東北大学

２０２５年度
共同利用・共同研究拠点
「流体科学国際研究教育拠点」
活動報告書

Activity Report 2025
Joint Usage / Research Center
"Fluid Science Global Research and Education Hub"

東北大学
流体科学研究所

Institute of Fluid Science
Tohoku University

Institute of Fluid Science
Tohoku University
IFS

はしがき

東北大学流体科学研究所は、「流動現象に関する学理及びその応用の研究を行うこと」を目的として、流体科学の深化とその成果の社会への還元に取り組んでいる。2010 年度に文部科学省から共同利用・共同研究拠点「流体科学研究拠点」として認定され、2016 年度および 2022 年度には「流体科学国際研究教育拠点」として認定更新を受けた。本拠点は、物質の流れにとどまらず、エネルギーや情報の流れをも含む多様な流動現象を対象とし、国内外の研究者が本研究所の研究者、施設・設備及び研究ネットワークを活用して協働する場を提供している。公募共同研究では、環境・エネルギー、ナノ・マイクロ、健康・福祉・医療、宇宙・航空、基盤研究の五つの分野を柱とし、共同研究委員会の審査の下、所外研究者と本研究所の教員が共同研究を推進している。一般公募に加え、国際連携、萌芽、リヨンセンター等の各種公募共同研究を通じて、学問分野や国境を越えた新たな研究の展開を促進している。

2025 年度には、一般公募共同研究に 109 件の申請があり、102 件を採択した。加えて、国際連携公募共同研究、萌芽公募共同研究、リヨンセンター公募共同研究、リーダーシップ共同研究など、多様な形態の共同研究を推進した。2022 年に設置した統合流動科学国際研究教育センター（IFS-GCORE）を核として、フランス、サウジアラビア、米国、台湾等の海外拠点との戦略的共同研究や研究教育交流を進めるとともに、2025 年度からは燃料アンモニアサプライチェーン公募共同研究プログラムを開始し、社会的課題の解決に資する分野横断的な研究を強化した。また、共同研究の成果は、2025 年 11 月の AFI-2025 における公募共同研究成果報告会及び ICFD2025 等を通じて広く発信された。海外共同研究者を交えた発表と討論は、新たな連携の創出と若手研究者の育成にもつながる重要な機会となった。

本報告書は、こうした 2025 年度の拠点活動と、各種公募共同研究及びリーダーシップ共同研究の成果を取りまとめたものであり、計 135 件の共同研究を収録している。流体科学の基礎的な学理の探究と、先端分野との融合による新たな知の創出を両輪とし、研究成果の共有と共同利用の機会を一層広げていくことが、本拠点の重要な使命である。今後も、国内外の研究者が集い、互いの知見を結び付ける開かれた研究拠点として、国際共同研究の深化、異分野融合の推進、次世代を担う研究者・技術者の育成に努め、流体科学を通じた社会への貢献を目指してまいりたい。結びに、本拠点の活動を支えてくださった関係各位に深く感謝申し上げるとともに、引き続きご支援とご鞭撻を賜り、本報告書への忌憚のないご意見をお寄せいただければ幸甚である。

2026 年 11 月

東北大学流体科学研究所長
佐藤 岳彦

目　次

1. 2025年度流体科学国際研究教育拠点活動のまとめ

1.1　概要 …… 1
1.2　公募共同研究成果報告会 …… 2
1.3　流体科学データベース …… 2
1.4　共同利用・共同研究拠点「流体科学国際研究教育拠点」活動報告書 …… 3
1.5　公募共同研究実施状況 …… 3
1.6　研究成果の発表件数 …… 7
1.7　平成 21 年度から平成 27 年度まで（第 2 期中期目標期間）の活動成果 …… 7
1.8　平成 28 年度から令和 3 年度まで（第 3 期中期目標期間）の活動成果 …… 10

2. 研究成果報告書

＜2025 年度東北大学流体科学研究所一般公募共同研究採択課題＞

J25I001　プラズマ刺激細胞における膜層間電気システムの大規模数値解析 …… 17
内田　論（東京都立大学）、佐藤 岳彦（東北大学）

J25I002　熱硬化型インフレータブル構造物のシールド性能に関する実験的研究 …… 19
槙原 幹十朗（東北大学）、大谷 清伸（東北大学）

J25I003　Supercritical Real-Fluid Oxidations of Ammonia by Using the SP-Virial Thoery …… 22
Hao Zhao（Peking University）、中村　寿（東北大学）

J25I004　Machine-learning-based Analysis for Microseismic Monitoring of Water Injection in Muara Laboh Geothermal Field, Indonesia …… 26
Dian Darisma（University of Syiah Kuala）、椋平 祐輔（東北大学）

J25I005　YSZ 相転移とイオン伝導性メカニズム …… 28
郭　玉婷（京都大学）、小原　拓（東北大学）

J25I006　Molecular Simulation of CO2 Permeation though Microalgae Lipid Membrane …… 35
馬渕 拓哉（東北大学）、Fayza Yulia（Pertamina University）

J25I007　ふく射と対流の複合解析による熱中症ダイナミクスの解明 …… 40
江目 宏樹（山形大学）、岡島 淳之介（東北大学）

J25I008　キャリア選択性パッシベーションコンタクト界面構造の分子動力学解析 …… 45
宇佐美 徳隆（名古屋大学）、徳増　崇（東北大学）

J25I009　微細水滴と窒素プラズマの界面反応を用いた高効率アンモニア製造 …… 49
白石 僚也（山口大学）、徳増　崇（東北大学）

J25I010　柔軟弾性体と超音速気流との衝突干渉時における衝撃環境の減衰効果 …… 52
北川 一敬（愛知工業大学）、大谷 清伸（東北大学）

J25I011　異種材料 3 次元構造への炭化ケイ素結晶成長と反応性力場分子動力学法を用いたシミュレーション … 54
竹内 和歌奈（愛知工業大学）、徳増　崇（東北大学）

J25I012　羽ばたき運動を有する翼胴結合体まわりの流れの数値解析 …… 56
石出 忠輝（木更津工業高等専門学校）、永井 大樹（東北大学）

J25I013　複発ロータ機の流れ干渉効果がロータ性能に及ぼす影響の解明 …… 59
大塚　光（金沢大学）、永井 大樹（東北大学）

J25I014　突起を持つロータブレード周りの低レイノルズ数における流れ構造の解明 …… 62
大塚　光（金沢大学）、伊神　翼（東北大学）

J25I015　低速尾翼バフェットの理論・解析モデルの構築 …… 65
大塚 啓介（東北大学）、阿部 圭晃（東北大学）

J25I016 Performance Investigation and Optimization Analysis of a Spectral Splitting Concentrating Photovoltaic Thermal (CPVT) System with a Unique Design: Numerical and Experimental Approaches …… 67
Abid Ustaoglu（Bartin University）、岡島 淳之介（東北大学）
J25I017 Hemodynamics at Internal Carotid Artery with Aneurysm in Elastic Full-scale Patient Specific Model … 74
Nadia Shaira Shafii（Universiti Teknologi Malaysia）、太田　信（東北大学）
J25I018 Intrinsic Instabilities of Partially Cracked Ammonia/Air Flames …… 76
Zheng Chen（Peking University）、森井 雄飛（東北大学）
J25I019 電磁場作用下でのテイラー・クエット流動場の解明とエネルギー変換装置への応用 …… 81
小林 宏充（慶應義塾大学）、高奈 秀匡（東北大学）
J25I020 Fabrication of Flow Chamber for Nanofibrous Layer Covered Stents …… 86
Angela Jedlovszky Hajdú（Semmelweis University）、太田　信（東北大学）
J25I021 Comparative Study of Steel Hydrogen Embrittlement using Ultrasonic and Eddy Current Characterization Techniques …… 89
Guy Feuillard（INSA Centre Val de Loire）、内一 哲哉（東北大学）
J25I022 Laminar Flame Speed Measurement and Kinetics Modeling Study of Tri-Methyl-Phosphate (TMP) Combustion. Toward P-Containing Fire Suppressants for Lithium-Ion Battery Electrolytes …… 93
Olivier Mathieu（Texas A&M University）、中村　寿（東北大学）
J25I023 Molecular Simulation of Conductive Polymer Electrolyte Composite Membranes for Application in Electrochemical Devices…… 97
Phumlani F Msomi（University of South Africa）、馬渕 拓哉（東北大学）
J25I024 金属液滴内部気孔の排出に関する 3 次元シミュレーション …… 99
吉川　穣（宮城県産業技術総合センター）、高奈 秀匡（東北大学）
J25I025 分子動力学計算によるプラズマ - 液面相互作用の解明…… 102
高橋 克幸（岩手大学）、馬渕 拓哉（東北大学）
J25I026 CFD 検証用データ取得のための極超音速飛翔体周りの衝撃波実験 …… 105
古館 美智子（Chungnam National University）、永井 大樹（東北大学）
J25I027 Characterization of Particulate Morphology Generated from Lithium-Ion Battery (LiB) Combustion Processes …… 108
Samuel L. Manzello（Reax Engineering）、丸田　薫（東北大学）
J25I028 Dynamics Simulation of Endothelial Cell Migration under Shear Flow …… 110
Narendra Kurnia Putra（Institut Teknologi Bandung）、安西　眸（東北大学）
J25I029 高速飛翔体表面の遷移機構とそれを再現する乱流モデルに関する研究 …… 113
焼野 藍子（東北大学）、Jens Fransson（KTH Royal Institute of Technology）
J25I030 Generation of Charged Cavitation Bubbles and the Characteristics …… 115
佐藤 岳彦（東北大学）、Mohamed Farhat（Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)）
J25I031 高速変形下の脂質単分子膜の局所表面張力場の計算 …… 117
金川 哲也（筑波大学）、馬渕 拓哉（東北大学）
J25I032 風洞試験および流体計算による空陸両用車の高性能化に関する研究 …… 120
森澤 征一郎（沖縄工業高等専門学校）、伊神　翼（東北大学）
J25I033 複雑流動場に対する圧縮センシング技術の構築 …… 123
松田　佑（早稲田大学）、永井 大樹（東北大学）
J25I034 高速ナノ液滴の衝突による水の新機能発現 …… 127
佐藤 岳彦（東北大学）、金澤 誠司（大分大学）
J25I035 Magnetic Incremental Permeability Detection Method and Experimental Technology for Stress under High-Temperature for Ferromagnetic Materials …… 129
Shurui Zhang（Beijing University of Technology）、内一 哲哉（東北大学）

J25I037 乱流渦における渦軸バンドル束の幾何学特性と渦流構造形成に関する解析 …… 136
中山 雄行（愛知工業大学）、服部 裕司（東北大学）
J25I038 Effect of Charge Distribution on the Plasma-induced Fine Bubble Dynamics …… 141
Siwei Liu（東北大学）、Outi Supponen（ETH）
J25I040 火星飛行機実現に向けた柔軟膜翼の非定常空力特性解明 …… 143
佐々木 大輔（大阪公立大学）、永井 大樹（東北大学）
J25I041 部分電離プラズマ流によって駆動される高速宇宙輸送システムにおける数値的研究 …… 146
高橋 聖幸（東北大学）、永井 大樹（東北大学）
J25I042 硫化物系ナノメモリのデバイス作製技術に関する研究 …… 149
大野 武雄（大分大学）、遠藤 和彦（東北大学）
J25I043 長時間起動時における燃料電池内での物質輸送現象を予測する手法の開発 …… 151
森澤 征一郎（沖縄工業高等専門学校）、徳増　崇（東北大学）
J25I044 Evaluation of Wall Thinning with Thick Insulator Based on Pulsed Eddy Current Testing Method using Novel Signal Processing Way …… 154
Shejuan Xie（Xi'an Jiaotong University）、内一 哲哉（東北大学）
J25I045 Numerical Modeling of Transport Phenomena in the Vicinity of Solid-Liquid Interface in Desalination with Gas Hydrate Formation …… 161
神田 雄貴（東北大学）、小松 博幸（新潟大学）
J25I046 ナノマテリアルを駆使した高輝度感圧塗料の開発と低速風洞実験への適用 …… 164
渡部 花奈子（東北大学）、伊神　翼（東北大学）
J25I047 Numerical Simulation of Mass transfer in Supercritical Carbon Dioxide …… 167
神田 雄貴（東北大学）、Yingxue Hu（Xi'an Jiaotong University）
J25I048 風洞試験と数値計算による翅脈を持つ柔軟膜翼のデジタルツイン研究開発 …… 172
伊神　翼（東北大学）、金崎 雅博（東京都立大学）
J25I049 Development of Transparent Ultrasound Phantom Material: Sound Velocity Study …… 175
Muhammad Shiddiq Sayyid Hashuro（Bandung Institute of Technology ）、太田　信（東北大学）
J25I050 液中プラズマ・超音波キャビテーション併用処理によるスルホン化炭素触媒合成 …… 177
竹内　希（東京科学大学）、高奈 秀匡（東北大学）
J25I051 飛行しながら回転する中空円筒の実験と数値解析 …… 181
平田 勝哉（同志社大学）、石本　淳（東北大学）
J25I052 空気衝撃波背後の微弱な放射に関する基礎的研究 …… 184
舩津 賢人（群馬大学）、大谷 清伸（東北大学）
J25I053 嗅覚刺激に対する脳機能解析のための非磁性流体制御デバイスの MRI 内部環境の移流拡散解析 …… 186
井上 雄介（旭川医科大学）、岡島 淳之介（東北大学）
J25I054 微小重力下におけるパルス型ヒートパイプ開発に関する混相熱連成解析的アプローチ …… 190
石本　淳（東北大学）、Sławomir Pietrowicz（Wrocław University of Science and Technology）
J25I055 Dynamics of Single Cavitation Bubbles in Carbon Dioxide-Supersaturated Water …… 192
Siwei Liu（東北大学）、Davide Bernardo Preso（University of Oxford）
J25I057 九重火山の熱水系解明に向けた微小地震データの高精度解析 …… 194
池田 達紀（九州大学）、椋平 祐輔（東北大学）
J25I058 大規模 DNS に基づく粗視化した高レイノルズ乱流のデータ駆動科学 …… 197
石原　卓（岡山大学）、服部 裕司（東北大学）
J25I059 翼後縁形状がトーンノイズへ与える影響とそのメカニズムの解明 …… 200
澄川 太皓（岩手大学）、伊神　翼（東北大学）
J25I060 Study of the Liquid Film Thickness Near the Capillary Limit …… 203
Andrzej Ireneusz Nowak（Wrocław University of Science and Technology）、岡島 淳之介（東北大学）

J25I061 Sonic-boom Surrogate Model Integration in a Chemistry-climate Model …… 206
山下　博（German Aerospace Center）、焼野 藍子（東北大学）
J25I062 Molecular Dynamics Simulation for Determining Static and Kinetic Parameters of CO_2 Adsorption in Direct Air Capture (DAC) Applications …… 209
Nasruddin Yusuf Rodjali（Universitas Indonesia ）、徳増　崇（東北大学）
J25I063 Exploring the Effects of Shear Stress Magnitude and Variation on Endothelial Injury: from Current Evidence to in Vitro Experiment of Cellular Responses …… 214
Mingzi Zhang（Macquarie University）、太田　信（東北大学）
J25I064 Study on Conceptual Design of an Aircraft Fueled with Ammonia …… 217
中村　寿（東北大学）、下栗 大右（広島大学）
J25I065 マイクロ流路チップ上のプラズマ気液界面反応装置の開発 …… 219
吉木 宏之（仙台高等専門学校）、佐藤 岳彦（東北大学）
J25I066 大動脈弁を考慮した大動脈・左心室系の血流解析 …… 226
宮内　優（宮崎大学）、船本 健一（東北大学）
J25I067 非平衡的挙動を示す乱流場におけるエネルギ・スカラ輸送機構に関する数値研究 …… 229
伊藤 靖仁（名古屋大学）、服部 裕司（東北大学）
J25I068 爆発的噴火における衝撃波と火山岩塊の飛翔のダイナミクス …… 232
常松 佳恵（山形大学）、大谷 清伸（東北大学）
J25I069 The Structure and Propagation of Ignition Fronts of Reacting Mixtures under Autoignitve Engine-relevant Conditions: from Deflagration to Detonation …… 235
Minh Bau Luong（Hanoi University of Science and Technology）、森井 雄飛（東北大学）
J25I070 揚力型大気圏突入カプセルの自由運動型風洞試験 …… 239
上野 和之（岩手大学）、永井 大樹（東北大学）
J25I071 Study on Visualization of Concentration Boundary Layer near Gas-liquid Interface in Gas Absorption 245
神田 雄貴（東北大学）、Junhao Ke（The University of Sydney）
J25I072 リブレット加工による粘性抵抗低減メカニズムの解明 …… 248
大山　聖（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (JAXA)）、焼野 藍子（東北大学）
J25I073 Hybridization of Nanocellulose with Silver Nanoparticles for the Fabrication of Antibacterial Filament Composites by a Field-Assisted Flow Focusing Method …… 250
高奈 秀匡（東北大学）、Anthony B. Dichiara（University of Washington）
J25I074 固体表面ナノバブルと表面特性の分子動力学的解析 …… 253
永島 浩樹（琉球大学）、徳増　崇（東北大学）
J25I075 含有金属成分の自己滲出作用を利用した Ag および Cu 含有炭素膜の抗菌作用の研究 …… 255
後藤　実（宇部工業高等専門学校）、内一 哲哉（東北大学）
J25I076 サブ 10 μ m micro-LED の開発 …… 257
寒川 誠二（National Yang Ming Chiao Tung University）、大堀 大介（東北大学）
J25I078 表面修飾ナノ材料／媒体間のナノ・メゾスケール界面現象に関する研究 …… 260
久保 正樹（東北大学）、小宮 敦樹（東北大学）
J25I079 金属／誘電体プラズモニックナノ構造の作製とその発光増幅能の検証 …… 264
木場 隆之（北見工業大学）、大堀 大介（東北大学）
J25I080 Control of Wake of Wind Turbines based on Instability of Helical Vortices …… 266
服部 裕司（東北大学）、Ivan Delbende（Sorbonne University）
J25I081 Study on micro-scale evaporation for heat transfer enhancement …… 269
岡島 淳之介（東北大学）、Peter Stephan（Technical University of Darmstadt）
J25I083 燃費向上を目指したプロップファンエンジン搭載航空機の統合解析 …… 271
千葉 一永（電気通信大学）、阿部 圭晃（東北大学）

J25I084 Investigation on Extravasation of Circulatuing Tumor Microemboli by using Microfluidic Platform … 273
Ting-Yuan Tu（National Cheng Kung University)、船本 健一（東北大学）
J25I085 Control of Transonic / High-speed Boundary Layer Flows …… 276
服部 裕司（東北大学)、Adrian Sescu（Mississippi State University）
J25I086 A Novel Research for Performance Optimization of Microchannel Heat Exchangers Using Fins, Magnetic Field, and Hybrid Nanofluids…… 279
高奈 秀匡（東北大学)、Shabbir Ahmad（Universidade Federal do Rio Grande）
J25I087 末梢がん脳転移抑止薬開発のためのヒト血液脳関門マイクロ流体モデル …… 283
立川 正憲（徳島大学)、船本 健一（東北大学）
J25I088 Combination of Atmospheric Pressure Plasma with Mist Generated by Condensation of Water Vapor in Pressurized Air…… 286
Yun-Chien Cheng（National Yang Ming Chiao Tung University)、佐藤 岳彦（東北大学）
J25I089 Innovative Strategies for Glaucoma Management Through CFD Modeling of Aqueous Humor Flow … 290
Muhamed Albadawi（Alexandria University)、太田　信（東北大学）
J25I090 流体振動を活用した発電技術に関する研究 …… 294
長谷川 裕晃（宇都宮大学)、永井 大樹（東北大学）
J25I091 Schlieren imagery of AC voltage EHD of Seeding Particle Enhanced Phase Change Materials …… 297
James Cotton（McMaster University)、佐藤 岳彦（東北大学）
J25I093 抗力係数に減速が与える効果の高精度計測 …… 301
菊池 崇将（日本大学)、大谷 清伸（東北大学）
J25I094 光ヘテロダイン光熱変位法によるナノサイズ構造半導体・金属等界面の熱伝搬特性評価 …… 304
福山 敦彦（宮崎大学)、大堀 大介（東北大学）
J25I095 マルチせん断を用いた自然風制御技術の構築 …… 307
高牟礼 光太郎（秋田大学)、大島 逸平（東北大学）
J25I096 Strategic Deployment of Aerosol Sensors in Confined Spaces for Enhanced Respiratory Virus Detection: an Optimisation Study Based on Computational Fluid Dynamics Simulations …… 309
Yujie Li（Torrens University)、太田　信（東北大学）
J25I097 極微細ノード MOSFET に向けた新規ゲートスタックプロセスの開発 …… 312
森田 行則（産業技術総合研究所)、遠藤 和彦（東北大学）
J25I098 超音速飛翔体表面の高精度圧力場計測の実現に向けた 2 色発光型 DP-AA-PSP の開発及び基礎研究 … 314
沼田 大樹（東海大学)、大谷 清伸（東北大学）
J25I100 不透明媒質中での衝撃波形成と伝播過程の実験的解明 …… 316
水書 稔治（東海大学)、大谷 清伸（東北大学）
J25I101 糸状菌由来機能性アミロイドの界面特異的自己組織化機構の解明 …… 319
阿部 敬悦（東北大学)、馬渕 拓哉（東北大学）
J25I102 再突入カプセルの動的不安定現象解明のためのカプセル後流領域に対する３次元密度計測 …… 322
太田 匡則（千葉大学)、永井 大樹（東北大学）
J25I104 Combined In situ & Ex situ, Multi-scale Stress Measurements in Crystalline Geothermal Reservoirs … 325
Xiaodong Ma（University of Science and Technology of China)、椋平 祐輔（東北大学）
J25I105 低封入率型ヒートパイプの熱輸送現象に関する数値解析 …… 327
畑本 明彩未（青山学院大学)、永井 大樹（東北大学）
J25I106 Control of Natural Convection Thermal Boundary Layer under High Grashof Number Condition and Heat Transfer Enhancement …… 329
小宮 敦樹（東北大学)、Nicholas Williamson（The University of Sydney）
J25I107 Harnessing Machine Learning for Enhancing Fluid Mechanics Understanding in Riblet Surfaces …… 332
Lavi Rizki Zuhal（Institut Teknologi Bandung)、焼野 藍子（東北大学）

J25I108 Feature Importance in the Predictive Capabilities of Machine Learning Models: Application for Estimating Thermo-physical Properties of Organic Materials …… 335
Hari Krishna Chilukoti（National Institute of Technology Warangal)、菊川 豪太（東北大学）
J25I109 Molecular-scale Design of Flame Retardant Polymer Materials by using an Integrated Scheme of Quantum Chemistry and Molecular Simulation …… 338
Yinbo Zhao（Tongji University)、菊川 豪太（東北大学）
J25I110 Analysis of Power Generation from Ammonia based Fuel in Solid Oxide Fuel Cells …… 341
Jeongmin Ahn（Syracuse University)、中村　寿（東北大学）

2025 年度東北大学流体科学研究所萌芽公募共同研究採択課題
J25H001 小型鳥型翼飛行機における軽量化に関する一検討（バッテリ重量問題）…… 347
泉　源（木更津工業高等専門学校)、永井 大樹（東北大学）
J25H002 高速出力調整用低温駆動 MHD 発電システム内の熱流体動特性解析…… 351
藤野 貴康（筑波大学)、高奈 秀匡（東北大学）
J25H003 航空機の意匠に関する多面評価：審美性と性能／安全性のクロスオーバー …… 354
齋藤　玲（東北大学)、阿部 圭晃（東北大学）

＜2025 年度東北大学流体科学研究所国際連携公募共同研究プロジェクト採択課題＞
J25R001 Tracheal Stent for Precision Drug Release Driven by the Piezoelectric Effect …… 361
Aike Qiao（Beijing University of Technology)、太田　信 (東北大学)、Song Hongfang (Capital Medical Unversity)
J25R002 Utilization of Coastal Wave Energy as Renewable Energy and Enhancement of Coastal Protection through Turbine Optimization in the Overtopping Breakwater for Energy Conversion (OBREC) …… 367
Pratama Raditya Hendra（National Research and Innovation Agency)、大島 逸平 (東北大学)、Nurcholik Samsu Dlukha (Kalimantan Institute of Technology)
J25R003 機能性材料成長に関する簡易的シミュレーション手法の提案 …… 371
金子　智（神奈川県立産業技術総合研究所 (KISTEC))、徳増　崇 (東北大学)、Ruei-Sung Yu (National Chin-Yi University of Technology)、Sahoo Sumanta (Radhakrishna Institute of Technology and Engineering)、Can Musa (Istanbul University)、Ionita Mariana (University Politehnica of Bucharest)、Meskinis Sarunas (Kaunas University of Technology)
J25R004 Towards Fluid-structure Interaction Analysis using High-order Flux-reconstruction Scheme and Cross-platform-based Parallel Computation …… 374
阿部 圭晃（東北大学)、Freddie Witherden (Texas A&M University)、Peter Vincent (Imperial College London)、Brian Vermeire (Concordia University)、Jin Seok Park (Inha University)

＜2025 年度東北大学流体科学研究所リヨンセンター公募共同研究採択課題＞
J25Ly01 熱的に揺動する膜上のチューリングパターン：異方性の起源に関する数値的および数理的研究 …… 383
加藤 文武（茨城工業高等専門学校)、内一 哲哉（東北大学）
J25Ly02 KERATOX project : Study of the Impact of Hypoxia on Human Keratinocytes…… 388
Nicolas Aznar（University Claude Bernard Lyon 1)、船本 健一（東北大学）
J25Ly03 超音波反射にもとづく配管内面の腐食の形状推定 …… 393
中本 裕之（神戸大学)、内一 哲哉（東北大学）
J25Ly04 三次元造形した SiC の電子顕微鏡内局所圧縮試験 …… 395
栗田 大樹（東北大学)、内一 哲哉（東北大学）
J25Ly05 Carbon Diffusion in Iron Assisted by an Electric Field: Model and Experiment …… 397
Patrice Chantrenne（Université de Lyon)、徳増　崇（東北大学）

J25Ly06 Monitoring Eukaryotic Cell Functions under Various Hypoxic Conditions with Microfluidic Differential Oxygenators …… 399
Jean-Paul Rieu（Claude Bernard University Lyon 1）、船本 健一（東北大学）
J25Ly07 Experimental Study of New Model Electroactive Materials (TEmPuRA) …… 402
Gildas Coativy（LGEF, INSA Lyon）、高奈 秀匡（東北大学）
J25Ly08 回転二重円筒 / 円すい間に発生する非線形流れ挙動の動的モード分解と安定性解析のクロスオーバー 404
足立 高弘（秋田大学）、小宮 敦樹（東北大学）
J25Ly09 Mass Transfer Enhancement and Control by using Ultrasound Induced Flow…… 408
小宮 敦樹（東北大学）、Valéry Botton（LMFA, INSA Lyon）
J25Ly10 Evaluation of VIP Performance and Investigation of Degradation Mechanism by Aging Effect …… 410
小宮 敦樹（東北大学）、Genevieve Foray（MATEIS, INSA Lyon）

＜2025 年度東北大学流体科学研究所統合流動科学国際研究教育センター戦略的共同研究プログラム採択課題＞
実験・理論統合解析による毛細管流マイクロ発電機構の解明 …… 415
高奈 秀匡（東北大学）、Anthony Dichiara（University of Washington）
理論・数値計算・実験によるアンモニア燃焼における着火・火炎特性の調査 …… 418
森井 雄飛（東北大学）、Huangwei Zhang（National University of Singapore）
液体アンモニアの噴霧燃焼特性に関する混相流体解析 …… 421
石本　淳（東北大学）、Sławomir Pietrowicz（Wrocław University of Science and Technology）
HAXPES を用いたアンモニアエネルギーシステムにおける超合金の窒化の高分解能調査 …… 427
中村　寿（東北大学）、S. Mani Sarathy（King Abdullah University of Science and Technology）
PIA(Particle Image Analyzer) を用いた間欠噴霧液体アンモニア液滴径計測 …… 437
早川 晃弘（東北大学）、Christine Mounaïm-Rousselle（University of Orléans）
燃料アンモニアに関する国際ワークショップ開催 …… 440
徳増　崇（東北大学）、S. Mani Sarathy（King Abdullah University of Science and Technology）

＜2025 年度東北大学流体科学研究所統合流動科学国際研究教育センター燃料アンモニアサプライチェーン公募共同研究プログラム採択課題＞
低温廃熱を利用したゼロロス・アンモニア－水素変換プロセス開発 …… 445
笘居 高明（東北大学）、早川 晃弘（東北大学）
アンモニアの電気エネルギー変換を指向した酸化還元活性な分子性触媒の創出 …… 448
芳野　遼（東北大学）、徳増　崇（東北大学）
高純度な多孔性高分子の空孔表面修飾による革新的アンモニア吸着材の開発とシミュレーションによる最適化 …… 452
大窪 航平（東北大学）、高奈 秀匡（東北大学）

＜2025 年度東北大学流体科学研究所リーダーシップ共同研究採択課題＞
J25L039 Experiment and Molecular Dynamics Simulation for Plasma-dependent Interface…… 459
Siwei Liu（東北大学）、立花 孝介（大分大学）
J25L056 カーボンフリー燃料の噴射制御に関する研究 …… 461
川原田 光典（交通安全環境研究所）、大島 逸平（東北大学）
J25L077 着火構造を考慮した火炎構造の再解釈 …… 467
松江　要（九州大学）、森井 雄飛（東北大学）
J25L082 火山噴石に対するシェルター補強用人工軽石の衝撃圧縮変形挙動 …… 471
立山 耕平（室蘭工業大学）、大谷 清伸（東北大学）
J25L092 Density and Surface Tension Effects on Vortex Dynamics …… 473
Stefan Llewellyn Smith（University of California）、服部 裕司（東北大学）

J25L099 セルロースナノファイバー分散液中のナノファイバーのミクロ構造とレオロジー特性との相関 …… 475
本澤 政明（静岡大学）、高奈 秀匡（東北大学）
J25L103 局所的応力及び熱流束を用いた微細流路内部の水液滴を介した熱および運動量輸送特性の解析 …… 477
福島 啓悟（福井大学）、徳増　崇（東北大学）

1. 2025 年度流体科学国際研究教育拠点活動のまとめ

1.1 概要

流体科学国際研究教育拠点では、公募共同研究の実施にあたり、関連学会内における専門性および国際性の観点から選任した外部委員を過半数含む共同研究委員会を設置している。研究者コミュニティの意向と関連研究分野の動向を反映させながら公募共同研究の実施方法を決定し、1）環境・エネルギー、2）ナノ・マイクロ、3）健康・福祉・医療、4）宇宙・航空、5）基盤流体科学の 5 分野における流体科学に関わる国内外研究者との一般公募共同研究を実施した。

また、異分野融合型の共同研究プロジェクトとして分野横断型公募共同研究プロジェクト（略称:分野横断プロジェクト）が 2010 年（平成 22 年）度より開始された。これは、本拠点が設定したテーマ「次世代反応流体科学」に対して、本研究所所属の複数の研究者と外部研究機関の複数の研究者が、本研究所の施設・設備等を利用して行う分野横断型の共同研究プロジェクトである。本プロジェクトは、ライフサイエンス・燃焼科学・高応答性流体科学の三つの研究領域からなるプロジェクトを推進し、各種反応性流動に関する異分野融合型次世代反応流体科学の学理創成を目指して実施され、一定の成果が得られたことから 2013 年（平成 25 年）度をもって終了した。

2013 年（平成 25 年）度より開始された本研究所所属の研究者と本研究所以外の複数の研究機関の研究者が行う連携公募共同研究は、2016 年（平成 28 年）度より、国際化を強く意識し、複数の海外研究機関との共同研究である国際連携公募共同研究プロジェクトとして実施されている。2014 年（平成 26 年）度より開始された萌芽公募共同研究は、これまで本研究所との共同研究実績はないが、本研究所の研究者との共同研究や、共同研究の前段階の議論を希望されている国内の研究者をサポートする目的で継続実施されている。また、2017 年（平成 29 年）度より、社会が直面する諸問題の解決を強く意識した重点公募共同研究プロジェクトが採択された。

2018 年（平成 30 年）度に設置されたリヨンセンターでは、フランス・リヨン大学（INSA de Lyon, École Centrale de Lyon, リヨン第一大学）に教員と学生がユニットとして滞在しており、同センターで共同研究を推進するリヨンセンター公募共同研究が 2019 年（令和元年）度に新設された。

統合流動科学国際研究教育センター（IFS-GCORE）では、当研究所の複数の研究者と IFS-GCORE 海外拠点に所属する研究者が共同研究を実施する統合流動科学国際研究教育センター戦略的共同研究プログラムを 2024 年度に新設した。本プログラムは、リヨン大学（フランス）、アブドラ王立科学技術大学（サウジアラビア）、ワシントン大学（米国）、国立陽明交通大学（台湾）を中心とする IFS-GCORE 海外拠点との共同研究や研究集会を組織的・戦略的に展開し、共同教育やリエゾンオフィス活動の一層の推進を目的として開始された。さらに 2024 年 10 月から CREATE（シンガポール）におけるケンブリッジ大（英国）、CNRS、シンガポール国立大等との脱炭素事業 HYCOMBS が加わり、同国での東北大学研究拠点構築に向け連携を進めている。2025 年度には、同センターの重点テーマの一つである燃料アンモニアの国際サプライチェーン（製造、

輸送、貯蔵、材料、燃焼等）に関する研究を学内において組織的に育成発展させる目的で、燃料アンモニアサプライチェーン公募共同研究プログラムが開始された。

2025 年度公募共同研究は、2025 年 4 月 1 日から 2026 年 3 月 31 日まで実施された。公募共同研究の募集や申請手続きの情報は、2024 年 12 月から翌年 1 月末にかけて、本研究所のホームページで日本語と英語で広く国内外に公開するとともに、関連学会および本研究所の関連研究者メーリングリストを利用して電子メールで広く国内外に通知した。公募共同研究の採択は、共同研究委員会に過半数が外部委員の審査委員会を結成して行った。採択された研究課題には、評価結果に基づき研究経費を措置した。2025 年 10 月に~~運営委員会、~~共同研究委員会、11 月には運営委員会、同月に公募共同研究成果報告会が開催された。

なお、第 1.7 節には、第 2 期中期目標期間中の成果、第 1.8 節には、第 3 期中期目標期間中の成果を記載している。

1.2　公募共同研究成果報告会

2025 年 11 月 10 日～13 日に、公募共同研究成果報告会（IFS Collaborative Research Forum）を流体科学研究所主催国際シンポジウム AFI-2025 において開催した。本報告会では 90 件（一般・国際連携・萌芽区分 78 件、リヨンセンター公募共同研究 12 件）のショートプレゼンテーションとポスターセッション（写真 1）が行われ、141 人の出席者があった。その他、同時開催された ICFD2025 にて、55 件の公募共同研究成果が発表された。発表は全て英語で行われ、海外からの共同研究者も交えて活発な議論が行われた。

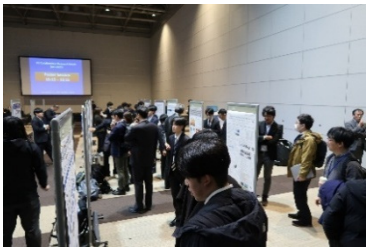



写真 1：ショートプレゼンテーション（左）とポスターセッション（右）の様子

1.3　流体科学データベース

学術論文等で発表された拠点における研究成果は、流体科学データベースに登録され、流体科学研究所のホームページで公開される。（https://ifs-db.ifs.tohoku.ac.jp/）

本データベースの登録件数とアクセス数を表 1 に示す。

表 1：流体科学データベースへの登録件数とアクセス数

	2022 年度 （令和 4 年度）	2023 年度 （令和 5 年度）	2024 年度 （令和 6 年度）	2025 年度 （令和 7 年度）
登録済みデータ総数	442	442	442	450 以上
流体科学データベースへのアクセス件数	3,657	4,383	4,111	*

*年度末運用開始のため、統計データなし

1.4　共同利用・共同研究拠点「流体科学国際研究教育拠点」活動報告書

2025 年 10 月に、2024 年度の共同利用・共同研究拠点活動の成果を取りまとめた共同利用・共同研究拠点「流体科学国際研究教育拠点」活動報告書を作成した。報告書（著作権の都合により論文別刷りは除く）は流体科学研究拠点ホームページに掲載されている。

（https://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/pamph/pamph.html）

1.5　公募共同研究実施状況

1）　申請・採択状況

一般公募共同研究の申請・採択状況等を表２に示す。申請時に選択された研究課題分野（環境・エネルギー、ナノ・マイクロ、健康・福祉・医療、宇宙・航空、基盤流体科学）と国内 / 国際の別を分類した。表３には国際連携公募共同研究プロジェクト、萌芽公募共同研究、特別国際公募共同研究および重点公募共同研究プロジェクト、表４にはリヨンセンター公募共同研究、表５-１には統合流動科学国際研究教育センター戦略的共同研究プログラム、表５-２には同センター燃料アンモニアサプライチェーン公募共同研究プログラムの申請・採択状況をそれぞれ示す。表６には拠点活動の一部（自己負担によるもの）として開始したリーダーシップ共同研究の実施状況をまとめた。

表 2：一般公募共同研究の申請・採択状況

		2022 年度 (令和 4 年度)	2023 年度 (令和 5 年度)	2024 年度 (令和 6 年度)	2025 年度 (令和 7 年度)
申請数（件）		87	90	102	109
採択数（件）		64*	67	92	102
国内・国際	国内	38	33	51	56
	国際	26	34	41	46
分野別件数 (国内/国際)	環境・エネルギー	22 (11/11)	21 (8/13)	28 (11/17)	39 (16/23)
	ナノ・マイクロ	2 (1/1)	4 (2/2)	9 (4/5)	12** (8/4)
	健康・福祉・医療	10 (5/5)	15 (8/7)	14 (7/7)	15 (7/8)
	宇宙・航空	14 (11/3)	13 (10/3)	21 (17/4)	17 (15/2)
	基盤流体科学	15 (9/6)	14 (5/9)	18 (10/8)	18 (9/9)
	その他	1 (1/0)	0 (-/-)	2 (2/0)	1 (1/0)
採択率（%）		74	74	90	94
申請金額（千円）：a		28,136	29,624	38,591	43,031
採択金額（千円）：b		15,930	16,284	19,130	20,912
平均充足率（金額）（%）：b/a		57	55	50	49
平均採択金額（千円）		249	243	208	205

*採択数は 65 件であったが、1 件の取り下げがあり上記の採択数となった。
**ナノ・マイクロの内 1 件については、経費なしの申請であった。

表 3：国際連携公募共同研究プロジェクト、萌芽公募共同研究、特別国際公募共同研究および重点公募共同研究プロジェクトの申請・採択状況

国際連携公募共同研究プロジェクト	2022 年度(令和 4 年度)	2023 年度(令和 5 年度)	2024 年度(令和 6 年度)	2025 年度(令和 7 年度)
申請数（件数）	3	3	4	4
採択数（件数）	3	3	4	4
採択率（%）	100	100	100	100
申請金額（千円）：a	4,800	5,880	8,300	5,650
採択金額（千円）：b	2,223	3,129	3,014	1,972
平均充足率（金額）（%）：b/a	46	53	36	35
平均採択金額（千円）	741	1,043	754	493

萌芽公募共同研究	2022 年度(令和 4 年度)	2023 年度(令和 5 年度)	2024 年度(令和 6 年度)	2025 年度(令和 7 年度)
申請数（件数）	7	2	4	3
採択数（件数）	7	2	4	3
採択率（%）	100	100	100	100
申請金額（千円）：a	1,292	341	785	570
採択金額（千円）：b	1,008	242	599	402
平均充足率（金額）（%）：b/a	78	71	76	71
平均採択金額（千円）	144	121	150	134

特別国際公募共同研究	2022 年度(令和 4 年度)	2023 年度(令和 5 年度)	2024 年度(令和 6 年度)	2025 年度(令和 7 年度)
申請数（件数）	1	0	0	0
採択数（件数）	1	-	-	-
採択率（%）	100	-	-	-
申請金額（千円）：a	500	-	-	-
採択金額（千円）：b	261	-	-	-
平均充足率（金額）（%）：b/a	52	-	-	-
平均採択金額（千円）	261	-	-	-

重点公募共同研究プロジェクト	2022 年度(令和 4 年度)	2023 年度(令和 5 年度)	2024 年度(令和 6 年度)	2025 年度(令和 7 年度)
申請数（件数）	0	0	0	0
採択数（件数）	-	-	-	-
採択率（%）	-	-	-	-
申請金額（千円）：a	-	-	-	-
採択金額（千円）：b	-	-	-	-
平均充足率（金額）（%）：b/a	-	-	-	-
平均採択金額（千円）	-	-	-	-

表 4：リヨンセンター公募共同研究の申請・採択状況

リヨンセンター公募 共同研究	2022 年度 (令和 4 年度)	2023 年度 (令和 5 年度)	2024 年度 (令和 6 年度)	2025 年度 (令和 7 年度)
申請数（件数）	20	14	13	10
採択数（件数）	20	14	13	10
採択率（%）	100	100	100	100
申請金額（千円）：a	11,030	7,580	7,584	5,620
採択金額（千円）：b	8,950	6,480	6,400	5,350
平均充足率（金額）（%）：b/a	81	85	84	95
平均採択金額（千円）	448	463	492	535

表 5-1：統合流動科学国際研究教育センター戦略的共同研究プログラム

統合流動科学国際研究教育センター 戦略的共同研究プログラム	2024 年度 (令和 6 年度)	2025 年度 （令和 7 年度）
申請数（件数）	5	6
採択数（件数）	5	6
採択率（%）	100	100
申請金額（千円）：a	7,500	8,800
採択金額（千円）：b	6,500	7,800
平均充足率（金額）（%）：b/a	87	89
平均採択金額（千円）	1,300	1,300

表 5-2：統合流動科学国際研究教育センター燃料アンモニアサプライチェーン
公募共同研究プログラムの申請・採択状況

統合流動科学国際研究教育センター 燃料アンモニアサプライチェーン 公募共同研究プログラム	2025 年度 （令和 7 年度）
申請数（件数）	3
採択数（件数）	3
採択率（%）	100
申請金額（千円）：a	9,000
採択金額（千円）：b	6,500
平均充足率（金額）（%）：b/a	72
平均採択金額（千円）	2,167

※リヨンセンター公募共同研究、統合流動科学国際研究教育センター戦略的共同研究プログラムおよび燃料アンモニアサプライチェーン公募共同研究プログラムに係る経費は、「統合流動科学国際研究教育センター構築事業」より措置している。

表 6：リーダーシップ共同研究の実施状況

		2022 年度 (令和 4 年度)	2023 年度 (令和 5 年度)	2024 年度 (令和 6 年度)	2025 年度 (令和 7 年度)
実施数（件）		21	23	10	7
国内・国際	国内	18	20	8	6
	国際	3	3	2	1
分野別件数 (国内/国際)	環境・エネルギー	12* (11/1)	10 (8/2)	4 (4/0)	3 (3/0)
	ナノ・マイクロ	1 (1/0)	1 (1/0)	3 (3/0)	2 (2/0)
	健康・福祉・医療	1** (1/0)	2 (2/0)	2 (1/1)	0 (-/-)
	宇宙・航空	4 (3/1)	4 (4/0)	0 (-/-)	0 (-/-)
	基盤流体科学	3 (2/1)	6 (5/1)	1 (0/1)	1 (0/1)
	その他	0 (-/-)	0 (-/-)	0 (-/-)	1 (1/0)
申請金額（千円）：a		7152	7970	3118	2,380
採択金額（千円）：b		1775	2017	703	493
平均充足率（金額）（%）：b/a		25	25	23	21
平均採択金額（千円）		85	88	70	70

*環境・エネルギー分野の実施数は 13 件であったが、1 件の取り下げがあり上記の実施数となった。
**健康・福祉・医療分野の 1 件については、経費なしの申請であった。

※リーダーシップ共同研究は、所長リーダーシップ経費により実施している。

2） 研究者の受け入れ状況

本研究所が公募共同研究を実施するために受け入れた研究者の人数（延べ人日）を表 7 に示す。対象は公募共同研究経費を使用して来仙した研究者とし、滞在日数を基に算出した。コロナ禍の影響を踏まえ、オンライン国際会議参加者も計上している。

表 7：研究者の受け入れ状況

	2022 年度 （令和 4 年度）	2023 年度 （令和 5 年度）	2024 年度 （令和 6 年度）	2025 年度 （令和 7 年度）
国内	798 (307)	927 (379)	957 (504)	1,160 (538)
国外	858 (307)	1,460 (610)	1,090 (454)	1,514 (578)
合計	1,656 (614)	2,387 (989)	2,047 (958)	2,674 (1,116)

（ ）の数字は大学院生の人数で内数

3) 研究費

本公募共同研究にて使用した研究費（執行額）の内訳を表 8 に示す。

表 8：研究費の内訳

	2022 年度 (令和4年度)	2023 年度 (令和 5 年度)	2024 年度 (令和 6 年度)*	2025 年度 (令和 7 年度)*
物件費（千円）	11,414	7,984	14,193	18,840
旅費（千円）	15,200	17,637	20,624	21,471
合計（千円）	26,614	25,621	34,817	40,311

*経費には「統合流動科学国際研究教育センター構築事業」を含む。

1.6 研究成果の発表件数

研究成果の発表件数を表 9 に示す。

表 9：研究成果の発表件数

	2022 年度 (令和4年度)	2023 年度 (令和5年度)	2024 年度 (令和6年度)	2025 年度 (令和7年度)
学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）	56	51	49	52
国際会議、国内会議、研究会、口頭発表等	231	237	267	239
その他（特許・受賞・マスコミ発表等）	23	37	29	15
合計（件）	310	325	345	306

1.7 平成 21 年度から平成 27 年度まで（第 2 期中期目標期間）の活動成果

本節では、平成 21 年度から平成 27 年度までの活動成果を表 10 から表 16 に記載する。

表 10：流体科学データベースへの登録件数とアクセス数

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
公募共同研究成果の登録数	16	32	42	47	54	60	63
登録済みデータ総数	458	478	488	493	500	516	532
流体科学データベースへのアクセス件数	10,040	12,123	10,815	8,591	7,587	6,818	7,546

表 11：一般公募共同研究の申請・採択状況

		平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
申請数（件）		52	64	77	85	94	98	98
採択数（件）		52	63*	77	85	93*	96*	97
国内・国際	国内	32	35	47	51	59	60	58
	国際	20	28	30	34	34	36	39
分野別件数 (国内/国際)	エアロスペース	7 (5/2)	7 (5/2)	10 (7/3)	12 (9/3)	13 (10/3)	16 (12/4)	16 (3/13)
	エネルギー	16 (8/8)	14 (5/9)	18 (6/12)	20 (7/13)	21 (7/14)	21 (7/14)	21 (7/14)
	ライフサイエンス	7 (5/2)	13 (8/5)	13 (9/4)	14 (8/6)	19 (12/7)	17 (12/5)	15 (8/7)
	ナノ・マイクロ	17 (10/7)	17 (10/7)	23 (17/6)	24 (17/7)	24 (18/6)	24 (17/7)	22 (14/8)
	基盤	5 (4/1)	12 (7/5)	13 (8/5)	15 (10/5)	16 (12/4)	18 (12/6)	23 (16/7)
採択率（%）		100	98	100	100	99	98	99
充足率（金額）（%）		26～100	77～95	59～97	49～83	44～73	19～70	21~67
申請金額（千円）：a		20,177	29,303	35,405	38,895	41,349	43,359	44,091
採択金額（千円）：b		16,639	24,637	25,657	25,550	23,079	22,004	21,563
平均充足率（金額）（%）：b/a		82	84	72	66	56	51	49
平均採択金額（千円）		320	391	333	301	248	229	222

*取り下げ

表 12：分野横断プロジェクト申請・採択状況

	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度
申請数（件）	1	1	1	1
採択数（件）	1	1	1	1
採択率（%）	100	100	100	100
申請金額（千円）：a	7,000	5,000	5,000	5,000
採択金額（千円）：b	7,000	4,650	3,445	2,936
充足率（金額）（%）：b/a	100	93	69	59
一件あたりの採択金額（千円）	7,000	4,650	3,445	2,936

表 13：連携公募共同研究プロジェクトおよび萌芽公募共同研究の申請・採択状況

	連携公募共同研究プロジェクト			萌芽公募共同研究	
	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
申請数（件）	3	3	7	5	3
採択数（件）	3	3	7	5	3
採択率（%）	100	100	100	100	100
申請金額（千円）：a	4,700	4,600	7,900	911	450
採択金額（千円）：b	2,977	2,627	4,572	393	257
充足率（金額）（%）：b/a	63	57	58	43	57
一件あたりの採択金額（千円）	992	876	653	79	86

表 14：研究者の受け入れ状況

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
国内	165	210	262	350	345	347	430
国外	254	384	285	340	347	473	498
合計（延べ人日）	419	594	547	690	692	820	928

表 15：研究費の内訳

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
物件費（千円）	8,136	22,343	22,837	18,739	16,796	16,649	12,417
旅費（千円）	7,415	11,978	11,484	13,866	15,809	15,611	18,688
合計（千円）	15,551	34,321	34,321	32,605	32,605	32,260	31,105

表 16：研究成果の発表件数

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）	51	84	88	88	139	109	106
国際会議、国内会議、研究会、口頭発表等	152	198	291	304	457	371	355
その他（特許・受賞・マスコミ発表等）	5	19	11	22	28	14	25
合計（件）	208	301	390	414	624	494	486

1.8　平成 28 年度から令和 3 年度まで（第 3 期中期目標期間）の活動成果

本節では、平成 28 年度から令和 3 年度までの活動成果を表 17 から表 24 に記載する。

表 17：流体科学データベースへの登録件数とアクセス数

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元 年度	令和 2 年度	令和 3 年度
公募共同研究成果の登録数	67	71	90	90	90	90
登録済みデータ総数	540	552	442	442	442	442
流体科学データベースへのアクセス件数	7,154	6,042	5,132	8,337	9,911	9,119

※平成 30 年度分より集計方法を変更

表 18：一般公募共同研究の申請・採択状況

		平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元 年度	令和 2 年度	令和 3 年度
申請数（件）		99	101	105	104	108	97
採択数（件）		69	70*	77	82	84	78
国内・国際	国内	44	38	44	44	41	35
	国際	25	32	33	38	43	43
分野別件数 (国内/国際)	環境・エネルギー	27 (17/10)	29 (12/17)	44 (23/21)	47 (23/24)	39 (19/20)	36 (16/20)
	人・物質マルチスケールモビリティ	9 (4/5)	8 (4/4)	6 (5/1)	4 (2/2)	3 (1/2)	5 (2/3)
	健康・福祉・医療	10 (6/4)	6 (3/3)	5 (3/2)	7 (4/3)	11 (3/8)	10 (5/5)
	基盤流体科学	23 (17/6)	27 (19/8)	22 (13/9)	24 (15/9)	31 (18/13)	27 (12/15)
採択率（%）		70	69	73	79	78	80
申請金額（千円）：a		30,396	30,546	43,460	41,819	36,923	35,185
採択金額（千円）：b		16,819	17,065	19,847	22,409	21,733	20,452
平均充足率（金額）（%）：b/a		55	56	45	54	59	58
平均採択金額（千円）		244	243	244	273	259	262

*年度途中に 1 件取り下げあり

表 19：萌芽公募共同研究、国際連携公募共同研究プロジェクト、特別国際公募共同研究および重点公募共同研究プロジェクトの申請・採択状況

萌芽公募共同研究	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元 年度	令和 2 年度	令和 3 年度
申請数（件）	5	4	3	5	4	2
採択数（件）	5	4	3	5	4	2
採択率（%）	100	100	100	100	100	100
申請金額（千円）：a	994	697	468	816	680	380
採択金額（千円）：b	525	559	362	643	486	329
充足率（金額）（%）：b/a	53	80	77.3	78	71	87
一件あたりの採択金額（千円）	105	140	120	128	122	165

国際連携公募共同研究プロジェクト	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元 年度	令和 2 年度	令和 3 年度
申請数（件）	6	6	6	4	4	4
採択数（件）	5	6	6	4	4	4
採択率（%）	83	100	100	100	100	100
申請金額（千円）：a	8,140	8,135	8,011	5,600	5,870	4,480
採択金額（千円）：b	4,869	4,470	5,010	3,795	3,452	2,759
充足率（金額）（%）：b/a	60	54.9	62.5	67	59	62
一件あたりの採択金額（千円）	974	745	835	948	863	690

特別国際公募共同研究	令和 3 年度
申請数（件）	2
採択数（件）	2**
採択率（%）	100
申請金額（千円）：a	800
採択金額（千円）：b	450
充足率（金額）（%）：b/a	56
一件あたりの採択金額（千円）	225

**採択された 2 件のうち 1 件は、コロナ禍により海外研究者が来日できず、経費を全額返納し、実施を見送った。

重点公募共同研究プロジェクト	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元 年度	令和 2 年度	令和 3 年度
申請数（件）	2	2	3	1	1
採択数（件）	2	2	3	1	1
採択率（%）	100	100	100	100	100
申請金額（千円）：a	3,042	3,687	3,948	1,850	1,850
採択金額（千円）：b	3,599	2,790	3,477	1,455	1,621
充足率（金額）（%）：b/a	118	75.6	88	79	88
一件あたりの採択金額（千円）	1,799	1,395	1,159	1,455	1,621

※採択額には、20%のインセンティブが含まれる。

表 20：リヨンセンター公募共同研究の申請・採択状況

リヨンセンター 公募共同研究	令和元 年度	令和 2 年度	令和 3 年度
申請数（件）	12	11	21
採択数（件）	12	11	21
採択率（%）	100	100	100
申請金額（千円）：a	6,500	6,350	10,910
採択金額（千円）：b	6,500	6,350	10,910
充足率（金額）（%）：b/a	100	100	100
一件あたりの採択金額 （千円）	541	577	520

※リヨンセンター公募共同研究に係る経費は、全国共同利用・共同実施分（共同利用・共同研究拠点の強化）「流動グランドチャレンジ国際研究ネットワーク」より措置している。

表 21：リーダーシップ共同研究の実施状況

		平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元 年度	令和 2 年度	令和 3 年度
実施数（件）		28	31	28	19	22	17***
国内・国際	国内	15	24	20	16	17	17
	国際	13	7	8	3	5	0
分野別件数 (国内/国際)	環境・エネルギー	7 (5/2)	14 (13/1)	14 (10/4)	10 (9/1)	12 (9/3)	8 (8/0)
	人・物質マルチスケールモビリティ	2 (0/2)	0 (0/0)	0 (0/0)	1 (1/0)	2 (2/0)	0 (0/0)
	健康・福祉・医療	6 (3/3)	4 (4/0)	5 (5/0)	2 (2/0)	1 (1/0)	1 (1/0)
	基盤流体科学	13 (7/6)	13 (7/6)	9 (5/4)	6 (4/2)	7 (5/2)	8 (8/0)
申請金額（千円）：a		11,825	12,217	9,186	6,600	9,038	5,588
採択金額（千円）：b		2,894	2,905	2,508	1,847	2,327	1,490
平均充足率（金額）（%）：b/a		24	24	27	27	26	27
平均採択金額（千円）		103	94	89	97	106	88

***採択は 19 件であったが、2 件の取り下げがあり、実施数は表の通りとなった。

※リーダーシップ共同研究は、所長リーダーシップ経費により実施している。

表 22：研究者の受け入れ状況

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元 年度	令和 2 年度	令和 3 年度
国内	389 (94)	469 (60)	411 (123)	577 (196)	476 (59)	758 (356)
国外	625 (53)	628 (230)	927 (74)	533 (55)	190 (38)	411 (24)
合計 （延べ人日）	1,014 (147)	1,097 (290)	1,338 (197)	1,110 (251)	666 (97)	1,169 (380)

（ ）の数字は大学院生の人数で内数

※令和 2 年度および 3 年度については、コロナ禍の影響を踏まえ、拠点主催オンライン国際会議参加者も計上している。

表 23：研究費の内訳

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度*	令和元 年度*	令和 2 年度*	令和 3 年度*
物件費（千円）	16,377	12,911	7,380	10,185	28,392	31,589
旅費（千円）	16,177	18,201	17,414	19,208	1,070	1,472
合計（千円）	32,554	31,112	24,794	29,393	29,462	33,061

*経費には全国共同利用・共同実施分（共同利用・共同研究拠点の強化）「流動グランドチャレンジ国際研究ネットワーク」を含む。

表 24：研究成果の発表件数

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元 年度	令和 2 年度	令和 3 年度
学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）	99	119	73	85	84	82
国際会議、国内会議、研究会、口頭発表等	291	439	303	295	244	263
その他（特許・受賞・マスコミ発表等）	16	14	17	23	28	33
合計（件）	406	572	393	403	356	378

２．研究成果報告書
＜一般公募共同研究＞

注：ページ先頭の継続年数欄の「1 年目（発展）」は
これまでの公募共同研究を発展させた課題を示す.

課題番号	J25I001
区分	一般公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目（発展）

プラズマ刺激細胞における膜層間電気システムの大規模数値解析

Large-scale Numerical Analysis of the Intermembrane Electrical System in Plasma-stimulated Cells

内田　諭*†，佐藤 岳彦**††
*東京都立大学大学院システムデザイン研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

プラズマ生命科学を基盤とする生体細胞への放電照射は，医療・農業・食品分野において様々な細胞機能を惹起する有用な技術である．本手法では，放電由来の化学活性種や誘導された電荷・電界による細胞刺激を起点としているが，放電制御パラメータと細胞機能の発現を直接的に関連付ける一般的な理論体系は未だ確立されていない．

本応募研究課題では，細胞膜―内外液層間の電気流体的挙動を数値的に模擬するとともに，放電プラズマ空間から細胞内部までを電気システム的な等価回路として解析する．さらに，計測可能な膜電位や原形質流動の変化との比較を介して，投入電力などの放電制御パラメータと膜浸透係数に代表される粒子輸送機能の定量的相関を明示した数理モデルを構築する．

2. 研究成果の内容

前課題（J24I023）で構築した細胞膜モデルを基本として，生体細胞において主要成分である三種の脂質分子（POPC，POPE および PSM）に対する細胞膜モデルを構築した．また，温度をパラメータとして，膜輸送係数（自由エネルギー，拡散係数，透過係数）および膜構造・動的物性（膜厚，脂質当たり面積，秩序度，水和深さ，水和厚さ）を導出し，その特性を検証した（図 1 参照）．

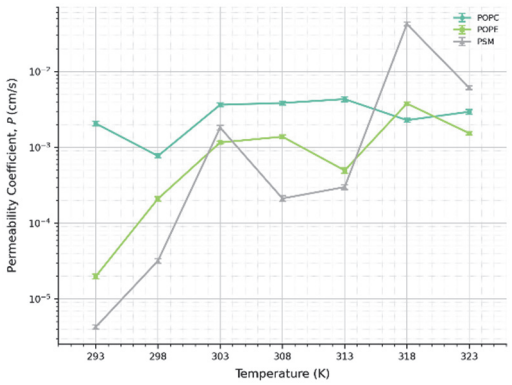


図 1：過酸化水素の膜透過係数における脂質種および温度依存性

また，前課題（同上）で構築したプラズマ流体－細胞回路モデルにおいて，プラズマ領域に対する中性粒子の径方向拡散損失を考慮した拡張モデルを再構築した．ギャップが 1.5 mm，印加電圧が 12 kV，駆動周波数が 19 kHz の大気圧空気プラズマにおいて，大気中の主要生成活性種（O_3，N，O，NO，N_2O，NO_2）の経時変化が 5 サイクル程度で安定することが示された．それに伴い，電流密度も 10 mA 程度で安定した．

3. 研究目標の達成状況

今回の研究において，前課題（同上）で構築した細胞膜モデルおよびプラズマ流体－細胞回路モデルを実用性と実効性を備えた拡張モデルに改良することができた．細胞膜モデルでは，脂質種および温度に対する放電由来活性種の輸送係数および構造特性を網羅的に解析し，その特性評価を実施することができた．またプラズマ流体－細胞回路モデルでは，定常状態における放電生成活性種の発生量を定量的に導出することができた．以上より，所定の成果が得られたと言える．また，本計算センターに実装された解析ソフトウエア（AMBER）で，より実際的な並列高速計算による大規模膜解析も同時に実施した．本研究期間における目標はおおむね達成できたと思われる．

4. まとめと今後の課題

本研究では，放電プラズマと生体膜の統合的な高精度モデルの開発および高速並列計算による各種放電条件下における細胞膜および活性種の長時間挙動解析が実施され，バッファ層や細胞膜への活性種照射および電圧印加・電流透過の過程がモデル化されつつある．今後，多種の活性種や電荷重畳の影響についても検証し，それらの成果を論文等にまとめて，幅広い公開を行っていく予定である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Yuki Iijima, Gakuya Miura, Ippei Yagi, Satoshi Uchida, Kosuke Tachibana, Akinori Oda, Takehiko Sato,: Molecular Dynamics Analysis of Membrane Transport of Reactive Species in a Cell Membrane Model Taking into Account the Inner and Outer Layers, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2025)*, Sendai, Japan (November 10–13, 2025), CRF-70, pp. 194-195.

[2] 飯島優樹，八木一平，小田昭紀，立花孝介，内田諭，「分子動力学シミュレーションを用いた細胞膜における放電活性種透過性の膜種および温度依存性解析」，第 73 回応用物理学会春季学術講演会，目黒区，東京＋オンライン(Zoom)（2026 年 3 月 15-18 日），15p-M_107-14.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）

なし

（受賞）

なし

（マスコミ発表）

なし

課題番号	J25I002
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

熱硬化型インフレータブル構造物のシールド性能に関する実験的研究
Experimental Study of Shielding Performance of Thermally-Cured Inflatable Structures

槙原 幹十朗*†，大谷 清伸**††
杉山 喜洋*，山越 夕詩*
*東北大学工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

繊維材料で構成された宇宙構造物であるインフレータブル構造物のスペースデブリ衝突防護に関する超高速衝突実験を行う．繊維材料で構成されるシールドの層の一部分を熱硬化する「部分熱硬化型デブリシールド」を提案する．超高速衝突による損傷を詳細に研究するために，一段式火薬銃を用いた超高速衝突実験を行う．研究目的の１つ目は部分熱硬化型デブリシールドに関して，最も防護性能が高くなる硬化層の配置箇所を明らかにすることである．部分熱硬化型デブリシールドにおいて硬化層の配置箇所を変化させて超高速衝突実験を行う.研究目的の２つ目は，同一面密度条件において熱硬化型デブリシールドと硬化無しのデブリシールドの防護性能を比較することである．本研究では，複数の面密度において超高速衝突実験を行う．

2. 研究成果の内容

部分熱硬化型シールドはガラスクロス, 硬化ガラスクロス, ケブラークロスから構成される (図１)．ガラスクロスは 311 g/m^2 の面密度，厚さ 0.25 mm で，硬化ガラスクロスは 635 g/m^2 の面密度，厚さ 0.30 mm で，ケブラークロスは 60 g/m^2 の面密度，厚さ 0.10 mm である．硬化剤にはエポキシ樹脂 2088E を用いた．エポキシ樹脂は，含浸前に 50℃で 5 分ほど温め，その後ガラスクロスに樹脂を含浸し，ローラーで空気と余分な樹脂を取り除いた．ガラスクロスに樹脂を含浸させた後，オーブンに入れ，100℃で 1 時間硬化させた．



(a) Glass cloth　(b) Cured glass cloth　(c) Kevlar cloth

図１ Materials constituting partially cured shielding.

硬化箇所を変化させた超高速衝突実験の結果と，各弾道限界式から求めたシールド弾道限界直径を比較し図２に示す．従来の Zhang らの手法および小林らの手法と比較した．提案手法による予測値は実験値と最も一致した．この結果は層通過前後のデブリ速度変化，硬化箇所の違い，および衝突角度を導入したことによるものであると考えられる．提案手法はこれらの要因を式中に取り込むことで，実際の衝突現象により近い予測を可能とした．以上より，本研究で提案した

弾道限界式は，部分熱硬化型デブリシールドの防護性能を従来手法より高精度に予測できることが示された．

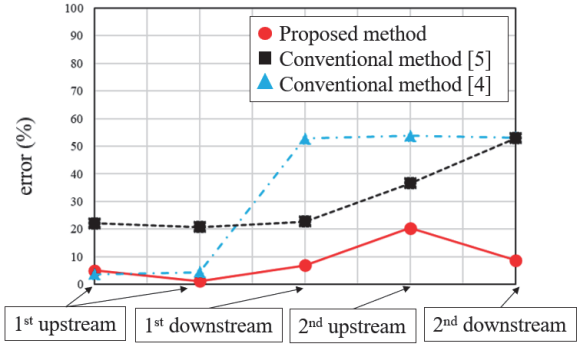


図２ Comparison of prediction accuracy of ballistic limit diameter.

さらに，修正した弾道限界式を用いて，部分熱硬化型デブリシールドの軽量性を評価した．宇宙構造物のデブリシールドでは，必要なデブリ防護性能を維持しながら重量を低減することが重要である．インフレータブル構造物においても，展開性に加えて打上げコストの観点からも軽量化が求められるため，所要の防護性能を満たす最小のシールド重量を把握することは設計上重要である．要求される弾道限界直径が大きくなるほど，必要なシールド重量も増加する傾向が確認された．一方で，硬化無しのデブリシールドと比較すると，部分熱硬化型デブリシールドは，同等の防護性能をより小さい面密度で実現できることが示された．部分熱硬化を適用することで，必要なデブリシールド重量を 9.6%削減できることが明らかになった．

3. 研究目標の達成状況

研究目標である損傷を定量的に予測評価できており，十分に研究目的を達成している．

4. まとめと今後の課題

部分熱硬化の有無による同一面密度下での硬化箇所の防護性能調査を行った．部分熱硬化によって有意に防護性能が向上することが示された．超高速衝突実験と，拡散角度式と弾道限界式による理論推察によって，有意に防護性能が向上することを示すことができた．超高速衝突実験によって，繊維材料シールドと比較してより小さいスタンドオフで，またより小さい重量で高い防護性能を実現できる．インフレータブル構造物の展開性能と軽量性に大きく寄与すると結論づけられる．今後は部分熱硬化型デブリシールドの精密な軽量性を評価についても検証する．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Morimoto, D., Takahashi, H., Sugiyama, Y., Hasegawa, S., Ohtani, K., Otsuka, K., and Makihara, K., “Support Vector Machine Framework for Detecting Ambiguous Contours of Space Debris Cloud,” *AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 62, No. 2, 2025, pp. 528-541.

[2] Takahashi, H., Sugiyama, Y., Kuzuno, R., Hasegawa, S., Ohtani, K., Hara, Y., and Makihara, K., “Partial Heat Curing Enhancing Space Debris Shielding Performance in Multi-Layered Inflatable Structures,” *Journal of Space Safety Engineering*, Vol. 12, No. 2, 2025, pp. 253-265.

[3] Hara, Y., Kuzuno, R., Takahashi, H., Sugiyama, Y., Kikuchi, Y., Ohtani, K., Hasegawa, S., and Makihara, K., “Shape Keepers of Hollow Cylindrical Electrodynamic Tethers for

Space Debris Removal," *AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 62, No. 4, 2025, pp. 1433-1444.

2) **国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等**

なし

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**

なし

Project Code	J25I003
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	2nd year

Supercritical Real-Fluid Oxidations of Ammonia by Using the SP-Virial Theory

Hao Zhao*†, Hisashi Nakamura**††
*School of Mechanics and Engineering Science, Peking University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

This project aims to advance the understanding of ammonia combustion under supercritical conditions using the AMDP method, which improves upon traditional methods (e.g., Lennard-Jones Virial method) for high-pressure fluid properties. The research supports applications in low-emission energy systems, aligning with global decarbonization goals.

2. Details of program implement

2.1 Theoretical method

This project develops the Attention-based Many-body Deep Potential (AMDP) model, which incorporates attention mechanisms over molecular triplets defined by interparticle distances, and the angle. This model employs a physically informed attention mechanism to evaluate and weight interaction contributions from different molecular orientations, enabling a deep neural network to learn from the resulting full-dimensional potential energy surfaces.

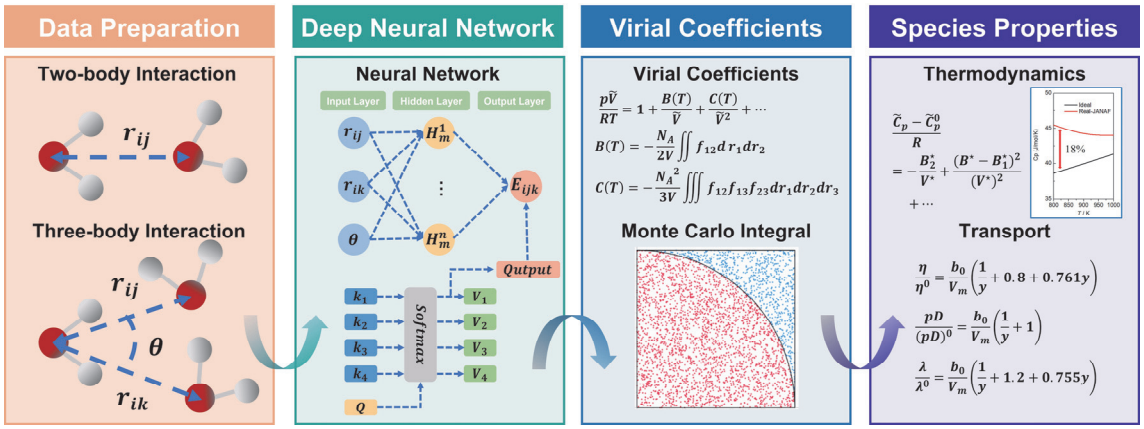


Figure 1: The workflow of the many-body deep potential model development and application process.

2.2 Numerical validation

1) To evaluate the compressibility factor and thermodynamic properties, including specific enthalpy and isobaric specific heat capacity, we conduct a rigorous comparison of various potential models against reference data provided by the National Institute of Standards and Technology (NIST), which is mainly based on experimental data fitting. Fig. 2 compares compressibility factors Z across different

fluids, using experimental data and predictions from LJ, BWF, and AMDP models. At low pressures, $Z \approx 1$, indicating ideal-gas-like behavior. For nonpolar gases (e.g., H2, CH4), all models perform similarly. However, for polar species (e.g., H2O, NH3), Z exhibits non-monotonic behavior. The LJ model, limited to isotropic interactions, shows large errors (up to 80%), while BWF improves modestly. In contrast, AMDP accurately captures both the magnitude and curvature of Z, even under high-pressure conditions. In long-chain hydrocarbons like nC5H12, multiple molecular segments interact simultaneously, forming cooperative networks. This leads to a sharp increase in Z from 0.65 to over 1.9 between 100 and 600 atm-a trend poorly captured by LJ and BWF. AMDP, however, tracks this nonlinear evolution, emphasizing the need for full-dimensional, many-body representations in dense fluids.

2) Fig. 3 shows pressure-dependent specific enthalpy $H = PV + U$. For nonpolar species, all models align well with experimental values. For polar molecules above 400 atm, LJ significantly underestimates H, with errors up to 200%. In nC5H12, H decreases to -12kJ/mol at 150 atm before rising again, reflecting compression-conformation interplay. Only AMDP captures this non-monotonicity, validating its strength in modeling complex systems. Fig. 4 presents the pressure dependence of isobaric specific heat capacity Cp. For nonpolar gases, all models perform adequately. Polar and long-chain species show complex, non-monotonic Cp trend: initial rises due to molecular excitation, followed by decreases due to structural hindrance. LJ and BWF fail to reproduce these turning points, with deviations exceeding 220%. AMDP matches both magnitude and curvature, maintaining <10% error by capturing energy fluctuations from many-body coupling and mode confinement.

3) Viscosity serves as a reliable benchmark for transport modeling. Fig. 5 compares model predictions using Enskog theory. As pressure increases, viscosity rises due to higher collisional frequency. LJ performs reasonably for small nonpolar species, but fails for polar and larger molecules, with errors up to 270%. These errors arise from neglecting orientation-specific effects and many-body resistance to shear. AMDP, by resolving cooperative motions and anisotropy, maintains accuracy within 0.3-10% across all fluids, confirming its robustness for transport predictions under compression.

These results demonstrate the AMDP's superior accuracy in modeling real-fluid thermodynamic and transport properties under supercritical conditions.

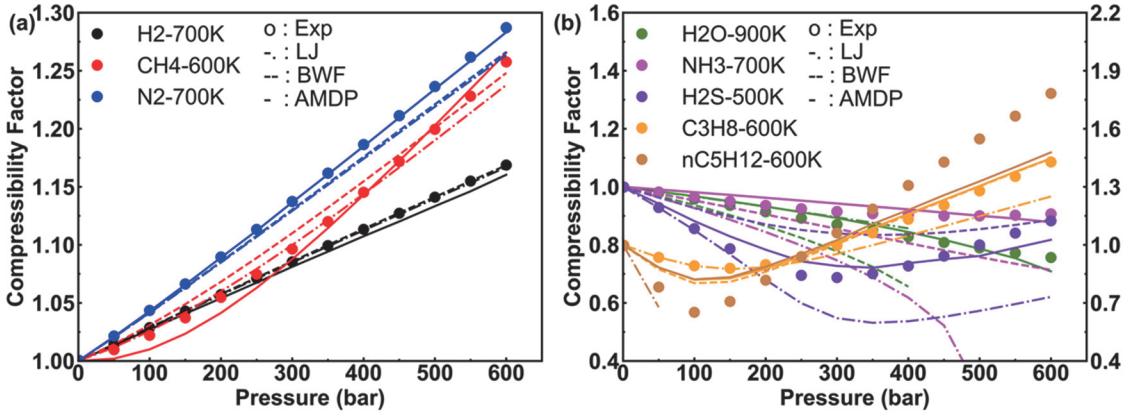


Figure 2: The compressibility factor of the various potential models: (a) nonpolar molecules; (b) polar and long-chain molecules (C3H8 and nC5H12 use the right coordinate axis of the (b) graph).

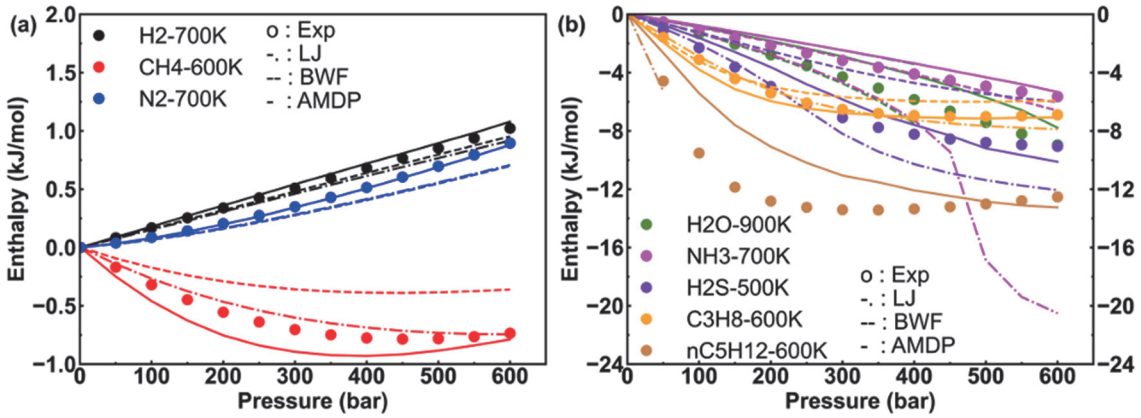


Figure 3: The specific enthalpy of the various potential models: (a) nonpolar molecules; (b) polar and long-chain molecules.

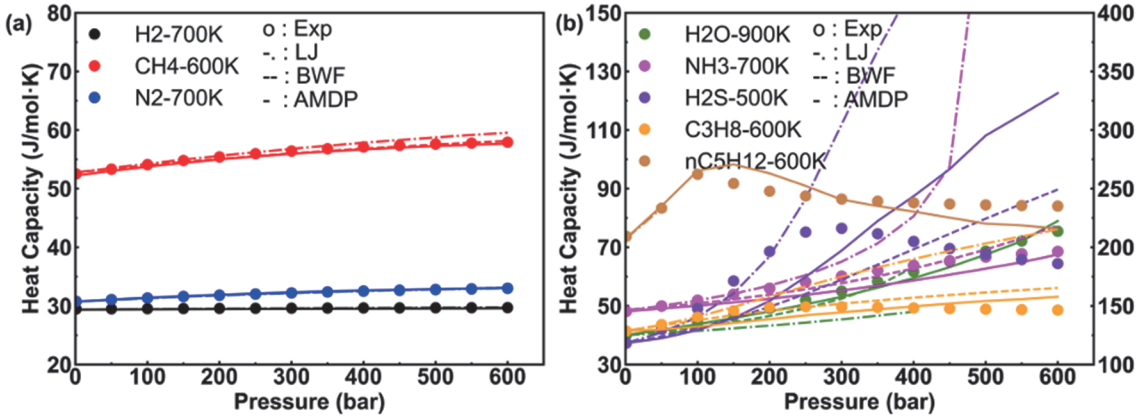


Figure 4: The specific heat capacity of the various potential models: (a) nonpolar molecules; (b) polar and long-chain molecules.

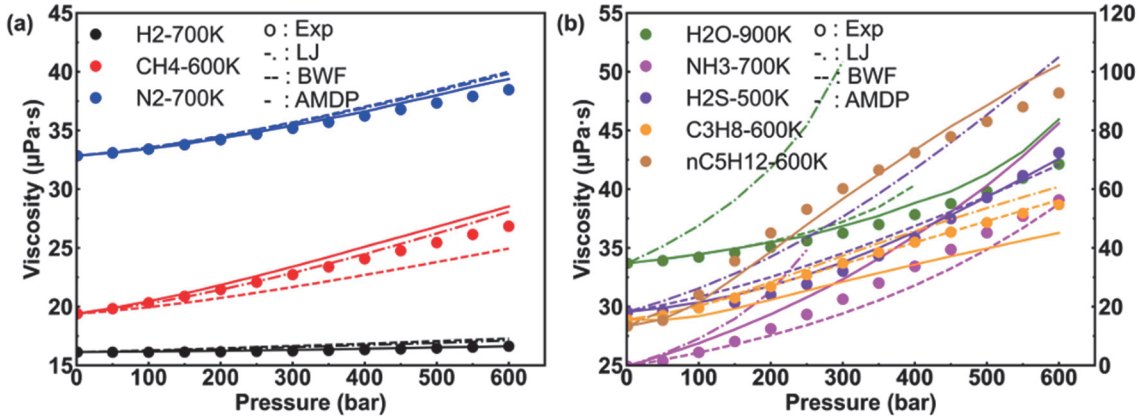


Figure 5: The viscosity of the various potential models: (a) nonpolar molecules; (b) polar and long-chain molecules.

2.3 Conference participation

Results presented at the AFI-2025 Forum (CRF-40, Sendai, November 2025).

3. Achievements

1) AMDP significantly improves accuracy for both polar molecules (e.g., H2O, NH3) and long-chain hydrocarbons (e.g., nC5H12), reducing errors in key properties to below 10% and capturing pressure-induced non-monotonic behavior missed by conventional models.

2) This work demonstrates that integrating physical insight with deep learning yields a generalizable and efficient framework for real fluid simulation, enabling predictive modeling across diverse thermodynamic regimes relevant to energy and environmental applications.
3) Dissemination: 1 conference presentation (CRF-40) and 1 manuscript in preparation (ICFD).

4. Summaries and future plans

4.1 Summary

We successfully developed the AMDP model that incorporates attention mechanisms for many-body anisotropic interactions. The model demonstrated superior accuracy for both polar molecules and long-chain hydrocarbons under high-pressure and supercritical conditions. Future plans include extending the AMDP framework to mixture fluids, incorporating reactive force fields for combustion applications, and applying the model to supercritical CO2 and other environmentally relevant fluids. Further collaboration with IFS will focus on large-scale molecular dynamics simulations using the developed potential.

4.2 Future work

1) Extend the AMDP framework to mixture fluids, incorporating reactive force fields for combustion applications.
2) Focus on large-scale molecular dynamics simulations using the developed potential.
3) Publish results in peer-reviewed journals (target: Combustion and Flame).

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] X. Zhang, R. Bo, H. Nakamura, H. Zhao, Accurate Modeling of Real-Fluid Thermodynamic and Transport Properties via an Attention-Based Many-Body Deep Potential, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-40, pp. 115-118.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)
Not applicable

(Award)
Not applicable

(Press release)
Not applicable

Project Code	J25I004
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Machine-learning-based Analysis for Microseismic Monitoring of Water Injection in Muara Laboh Geothermal Field, Indonesia

Dian Darisma*†, Yusuke Mukuhira**††
*Faculty of Engineering, University of Syiah Kuala
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this collaborative project is to obtain a high-resolution of hypocenter location by utilizing machine-learning-based picking.

2. Details of program implement

This project utilized a machine learning-based microseismic processing workflow to analyze continuous data from 15 seismometers with a sampling frequency of 500 Hz in the Muara Laboh geothermal field. We used six months of data recorded from April 1, 2021, to September 30, 2021. Seismic phases (P- and S-waves) are detected using the PhaseNet algorithm. To remove low-frequency noise, the waveforms were filtered with a high-pass filter at frequencies above 2 Hz. Default model of PhaseNet using natural earthquakes with a magnitude above 3. A suitable model designed explicitly for induced seismicity is needed to obtain more accurate picking results. The piSDL model can be used, which is trained using a microseismic model suitable for geothermal data. The picking results were associated into events using PyOcto, which involves at least six phases and four P-wave detections to minimize false detections. PyOcto supports saving the output file in the NLLoc input format. Hypocenter determination is based on a 13-layer velocity model.

3. Achievements

The achievement level for expected results is moderate. We have completed automatic phase picking using machine learning techniques and located initial hypocenter locations based on the automatic picking.

4. Summaries and future plans

We successfully detected 3,521 events using PhaseNet with piDSL model. The pickings were associated with PyOcto and located using NLLoc. We selected 818 events with at least nine picks and RMS < 0.25. The seismic distribution shows one big cluster in the southern part of the study area. Future work will focus on increasing seismic phase detection and applying template matching to continuous data.

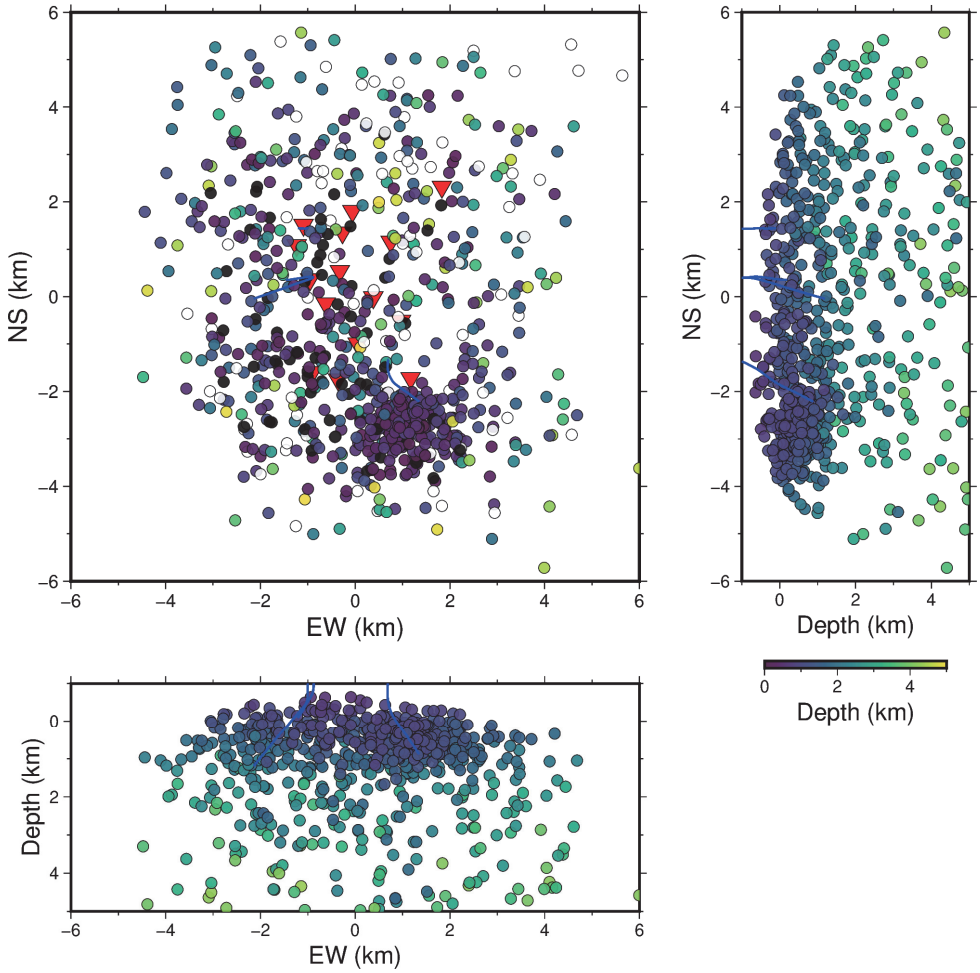


Figure 1: The selected hypocenter location with RMS < 0.25 s and number of phases> 8.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] D. Darisma, Y. Mukuhira, O. Lengline, R. Salma Salsabila, K. Okamoto, H. Azis, I. A. Nugroho, N. Ganefianto: Machine Learning-Based Analysis for Microseismic Monitoring of Water Injection at Muara Laboh Geothermal Field, Indonesia, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-24, pp. 70-71.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

課題番号	J25I005
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

YSZ 相転移とイオン伝導性メカニズム
Mechanism of YSZ Phase Transition and Ionic Conductivity

郭　玉婷*†，塩見　仁*，谷内 太陽*，Haiyi Sun*
岸本 将史*，岩井　裕*，小原　拓**††
*京都大学工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は，Ni の固溶がイットリア安定化ジルコニア（YSZ）の相転移およびイオン伝導性に及ぼす影響とそのメカニズムを，分子動力学（MD）シミュレーションを用いて明らかにすることである．SOFC（固体酸化物形燃料電池）のアノード材料として広く用いられる Ni-YSZ 複合体では，セル作製時の焼結過程で Ni が YSZ に固溶し，構造や酸化物イオンの移動性に大きな影響を及ぼすことが報告されているが，その詳細な原子レベルのメカニズムは未解明である．本研究では，Ni の固溶による局所構造の乱れ，酸素空孔の形成，ならびに酸化物イオンの拡散経路の変化に注目し，イオン伝導率の低下や構造変化の起点となる因子を特定する．加えて，得られた知見を通じて，Ni–YSZ 系材料の耐久性向上や相変態抑制につながる材料設計指針を導くことを目指す．

2. 研究成果の内容

本研究では，Ni が固溶した YSZ モデルを対象として MD シミュレーションを実施し，Ni 近傍および Y 近傍における酸化物イオンの拡散挙動，サイト占有率，ジャンプ挙動および局所構造変化について解析した．その結果，Y の第二近接領域は有効な酸化物イオン拡散経路として機能する一方，Ni 近傍ではバックジャンプを伴う局所的な往復運動が多く，有効な長距離輸送に結びつきにくいことが示唆された. Ni 固溶に伴う局所構造歪みが酸化物イオンサイトの安定性を変化させ，YSZ 全体のイオン伝導性低下に寄与する可能性が示された．また，2025 年 11 月に東北大学流体科学研究所（仙台）にて共同研究集会を開催し，京都大学工学研究科および東北大学流体科学研究所の研究メンバーが集まり，本年度までに得られた計算結果について検討を行った．本集会では，Ni 近傍における酸化物イオン輸送の局所性，Y 近傍の拡散経路としての役割，および Ni 固溶による局所構造歪みとイオン伝導率低下の関係について議論した．さらに，今後の研究計画として，還元雰囲気下における Ni の還元・析出挙動，Ni/YSZ 界面モデルの構築，および YSZ 相変態を含む劣化機構解析へ発展させる方針について意見交換を行った．

2.1 モデルの構築

本研究では，Ni^{2+}と Zr^{4+}が置換することで Ni が YSZ に固溶していると仮定し，以下の手法で Ni が固溶した YSZ モデルを作成した．まず，立方晶 ZrO_2 単位格子を，x, y, z の各方向に 20 倍に拡張した．次に，SOFC の燃料極材料や電解質として広く用いられている，Y_2O_3 を 8 mol%添加した YSZ（8YSZ）を再現するため，相当量の Zr^{4+}をランダムに選択して Y^{3+}に置換した．そし

て，Ni の固溶を再現するために，結晶中の Zr^{4+}をランダムに選択して，任意の数だけ Ni^{2+}に置換した．最後に，得られた結晶が電気的に中性となるよう，O^{2-}をランダムに選択して取り除き，Ni が固溶した YSZ モデルを作成した．境界条件として，x, y, z 全ての方向に周期境界条件を適用した．この方法で構築した純粋な YSZ モデルは，イオン伝導性，結晶構造ともに前年度の研究で妥当性を検証済みである．

2.2 拡散係数の解析

図 1(a)に示すように，Ni–O，Y–O の動径分布関数を計算し，Ni，Y それぞれについて第一近接領域（1NN）および第二近接領域（2NN）を定義した．図 1(b)に Ni または Y の 1NN，2NN に位置する酸化物イオンの拡散係数と固溶 Ni 濃度の関係を示す．Y 2NN に位置する酸化物イオンの拡散係数は全体平均と比較しても高いことがわかる．これは Y 2NN は酸化物イオンの拡散経路として機能しやすいことを示しており，先行研究で報告されている結果とも一致する．対照的に，Y 1NN に位置する酸化物イオンの拡散係数は他領域と比較して最も低く，拡散経路として機能しづらいことが分かる．また，Ni 1NN および Ni 2NN に位置する酸化物イオンの拡散係数は全体平均よりも低いことがわかる．また，拡散経路になりやすい Y 2NN に位置する酸化物イオンの拡散係数は，他領域と比較しても，Ni 固溶濃度増加に伴う減少量が大きい．以上より，固溶 Ni が近傍の酸化物イオン拡散を抑制し，本来有効な拡散経路である Y 2NN における拡散機能を低下させることで，YSZ 全体のイオン伝導性を低下させていると考えられる．

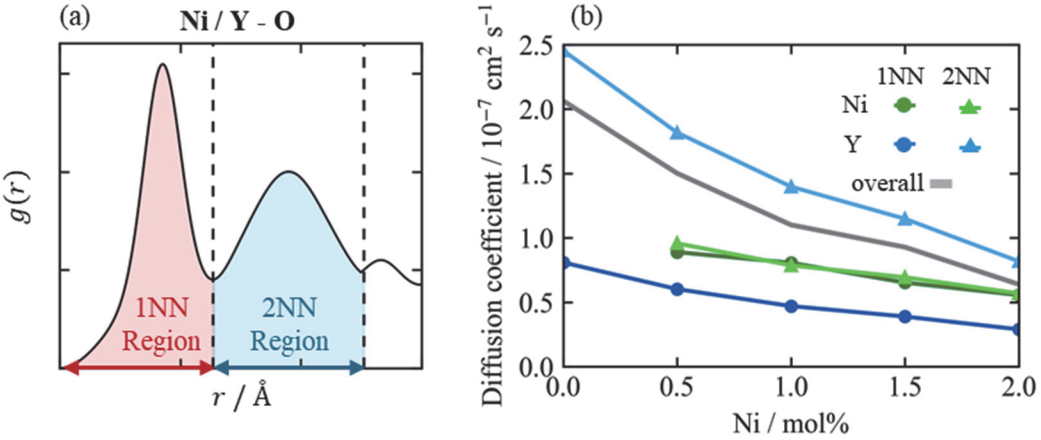


図 1：(a) Ni–O および Y–O の動径分布関数に基づく第一近接領域（1NN）および第二近接領域（2NN）の定義．(b) Ni または Y の 1NN，2NN に位置する酸化物イオンの拡散係数と固溶 Ni 濃度の関係．

2.3 k-means 法による解析

酸化物イオンの拡散挙動をより詳細に評価するため，MD 計算で得られた酸化物イオンのトラジェクトリデータに対して k-means クラスタリングを適用した．これにより，酸化物イオンの連続的な座標変化を離散的な酸化物イオンサイト間の移動として整理した．クラスタリングにより得られた各サイトを Ni または Y との位置関係に基づいて Ni 1NN，Ni 2NN，Y 1NN，Y 2NN に分類し，各局所環境が酸化物イオンの拡散に及ぼす影響を考察した．

2.3.1　サイト間ジャンプ回数の解析

図 2 に，各局所環境を始点とした単位サイトあたりの累積ジャンプ回数の時間変化を示す．図 2(a)～(d)より，いずれの局所環境でも累積ジャンプ回数は時間とともに概ね線形に増加しており，酸化物イオンのジャンプが継続的に生じていることがわかる．また，各グラフの右上に示される

2000 ps 時点の累積ジャンプ回数は Ni 1NN で最も大きく，Ni 近傍，特に Ni 1NN ではジャンプが相対的に起こりやすいことが示された．

ジャンプ先の内訳に着目すると，図 2(c)では Y 1NN を始点とするジャンプのほとんどが再び Y 1NN へ向かっており，同一局所環境内でのジャンプが支配的である．一方，図 2(d)では Y 2NN を始点とするジャンプにおいて Y 1NN への遷移が比較的多くみられることから，Y 1NN は酸化物イオンが局所的に集まりやすく，とどまりやすい環境であることが示唆される．これに対し，図 2(a)，(b)では Ni 1NN を始点とするジャンプで Ni 2NN への遷移が比較的多い一方，Ni 2NN から Ni 1NN への遷移は少なく，Ni 1NN は酸化物イオンを保持しにくい局所環境である可能性が示唆される．

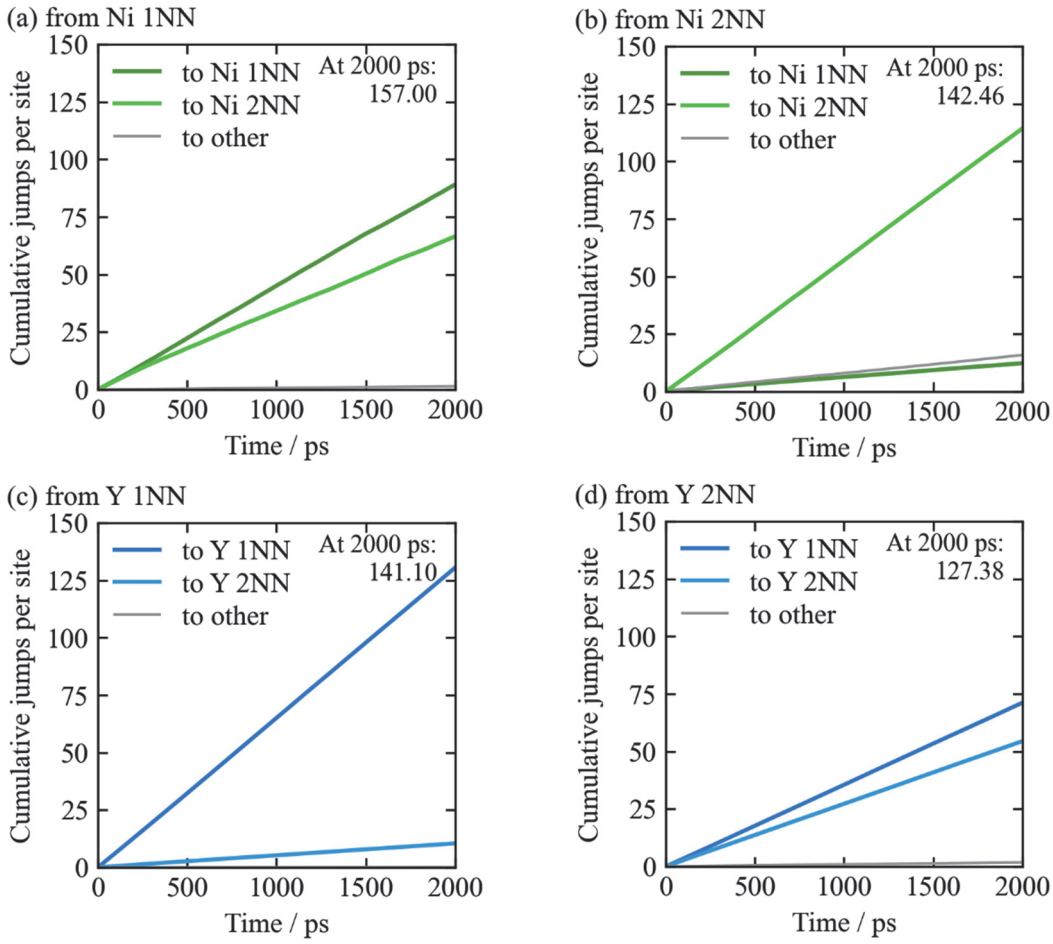


図 2 : 各局所環境を始点とした単位サイトあたりの累積ジャンプ回数の時間変化．右上に 2000 ps 時点の累積ジャンプ回数を示す．(a) Ni 1NN を始点とするジャンプ，(b) Ni 2NN を始点とするジャンプ，(c) Y 1NN を始点とするジャンプ，(d) Y 2NN を始点とするジャンプ．

あるサイトから隣接サイトへ移動した後，次のジャンプで直前のサイトへ戻る移動をバックジャンプとして定義した．ジャンプ回数が多くても，このような局所的な往復運動が支配的であれば，有効な長距離輸送には必ずしも結びつかないため，局所的な往復運動の程度を評価する目的でバックジャンプ割合を解析した．図 3 に，各局所環境におけるバックジャンプ割合を示す．Ni 近傍では Y 近傍と比較してバックジャンプ割合が高いことがわかる．したがって，Ni 近傍ではジャンプ回数は比較的多い一方で，有効な長距離輸送への寄与は限定的であると考えられる．一方，Y 2NN ではバックジャンプ割合が最も低く，有効な長距離輸送に比較的寄与していることが

わかる．これは，拡散係数の解析結果とも一致する．

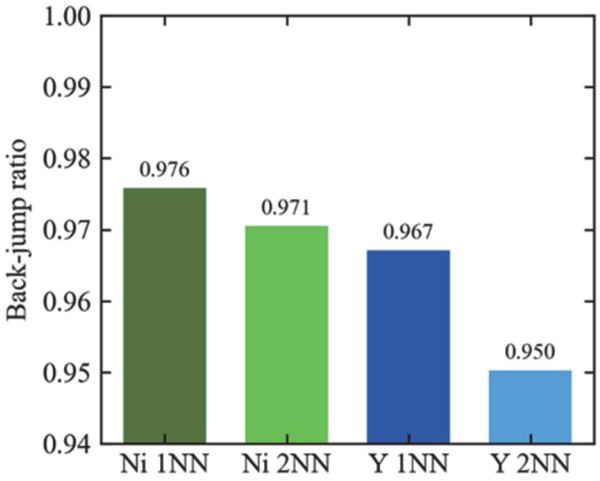


図 3：各局所環境を始点としたジャンプに対するバックジャンプ割合.

2.3.2　酸化物イオンサイトの占有率と滞在時間の解析

図 4 に，各局所環境に属する酸化物イオンサイトの平均占有率を示す．平均占有率は，各サイトが全時間フレームのうち酸化物イオンに占有されていた割合を求め，それを同一局所環境に属するサイト全体で平均した値である．平均占有率は Ni 1NN で最も低く，Ni 2NN，Y 1NN，Y 2NN の順に高くなった．このことから，Ni 1NN では酸化物イオンが存在しにくく，酸素空孔が相対的に存在しやすい局所環境であることが示唆される．

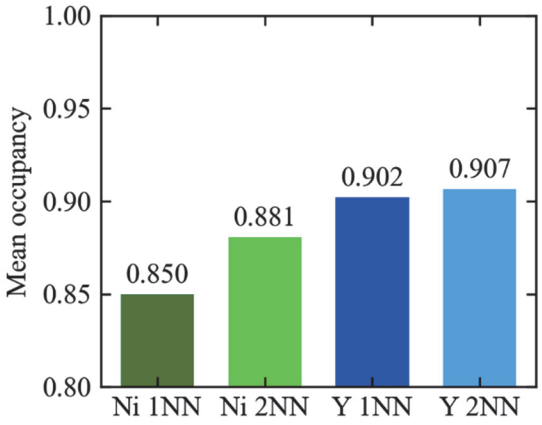


図 4：各局所環境に属する酸化物イオンサイトの平均占有率.

さらに，図 5 に，各局所環境に属する酸化物イオンサイトの占有状態に対する時間相関関数を示す．時間相関関数は，ある時刻に占有されていたサイトが，時間が経過した後も占有されたままである確率を表す指標であり，減衰が緩やかであるほど酸化物イオンがそのサイトに長くとどまりやすいことを意味する．図 5 より，Y 1NN では時間相関関数の減衰が比較的緩やかであり，酸化物イオンが一度占有したサイトにとどまりやすいことがわかる．一方，Ni 1NN では減衰が比較的速く，局所的に保持されにくい傾向が認められた．この結果は，ジャンプ回数の解析結果とも一致する．

以上より,Y 1NN と Ni1NN で酸化物イオンの存在しやすさと占有の持続性が異なり，Y 1NN では酸化物イオンが保持されやすい一方，Ni 1NN では酸化物イオンが保持されづらく，酸素空孔が相対的に存在しやすいと考えられる．このような酸化物イオンの存在安定性の違いが，各領域における拡散特性の違いを引き起こしていると考えられる．

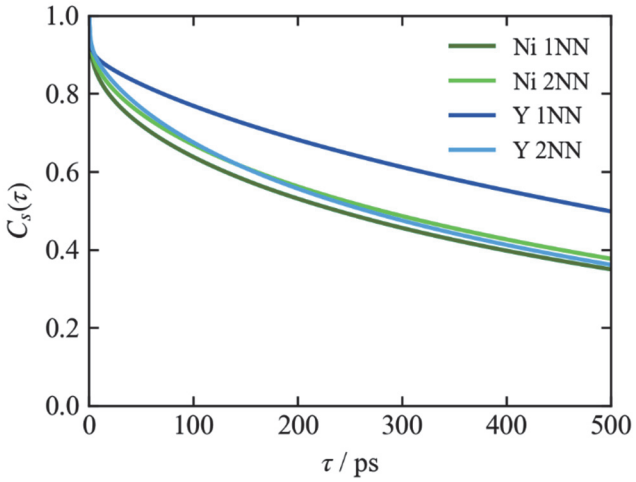


図 5：各局所環境に属する酸化物イオンサイトの占有状態に対する時間相関関数.

2.3.3　カチオンの変位

図 6 に，初期配置における理想的な蛍石構造中の各カチオン位置と，MD 計算時の時間平均座標との距離として定義した各カチオン種の変位の分布を示す．Ni は Zr および Y と比較して著しく大きな変位を示していることがわかる，これは，Ni 近傍で局所的な構造歪みが導入されている可能性を示している．このような局所構造の変化が，Ni 近傍における酸化物イオンサイトの安定性や移動特性に影響を与えていると考えられる．

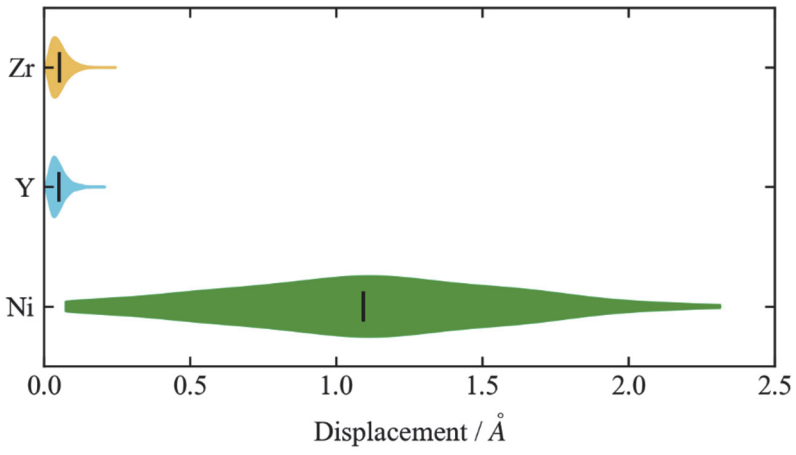


図 6：各カチオン種（Zr, Y, Ni）の変位の分布．黒い線は平均値を示す.

3.　研究目標の達成状況

本研究では，Ni 固溶 YSZ モデルに対する分子動力学シミュレーションを実施し，Ni の固溶が YSZ 中の酸化物イオン輸送に及ぼす影響を評価した．その結果，Ni 近傍，特に Ni 1NN では酸

化物イオンが相対的に存在しにくく，また存在しても安定に保持されにくいことが示された．さらに，Ni 近傍では局所的な往復運動が相対的に多く，有効な長距離輸送に結びつきにくいことが明らかになった．一方で，Y 近傍では Y 1NN が酸化物イオンを保持しやすい領域として，Y 2NN が比較的有効な輸送経路として機能していることが示された．これらの結果は，Ni の固溶によって Ni 近傍の酸化物イオンの存在安定性と移動特性が変化し，輸送に有効な局所環境が損なわれることで，YSZ 全体の酸化物イオン輸送が阻害されることを示している．また，Ni は他のカチオン種に比べて大きく変位しており，Ni 近傍に生じる局所構造の乱れが，酸化物イオン輸送特性の変化に関与している可能性が示唆された．これにより，酸化雰囲気下における Ni 固溶 YSZ のイオン伝導性低下機構について，局所構造と酸化物イオン輸送の観点から分子論的な知見を得ることができた．進捗は当初計画に対して概ね順調であり，想定した成果をおおむね達成している．今後は，本研究で対象とした酸化雰囲気下での解析を踏まえ，次の段階として SOFC 運転時の還元雰囲気における劣化機構の解明を目指す．そのため，Ni の還元，粒界への析出，および YSZ の相変態といった劣化挙動を再現可能な解析へ発展させるために，Ni/YSZ 界面モデルの構築や第一原理計算に基づく解析の導入を進め，より実際の SOFC 環境に近い条件でのメカニズム解明を行う．

4. まとめと今後の課題

本研究では，Ni の固溶が YSZ のイオン伝導性および構造に及ぼす影響を明らかにすることを目的として，Ni を固溶させた YSZ モデルに対して MD シミュレーションを行った．拡散係数解析の結果，Ni 近傍では酸化物イオンの拡散が抑制される一方で，Y 2NN は比較的有効な拡散経路として機能することが確認された．さらに，k-means クラスタリングを用いた解析により，固溶 Ni が酸化物イオンの拡散を抑制する局所的要因を検討した．サイト間のジャンプ回数，酸化物イオンサイトの占有率，滞在時間の解析の結果，Ni 近傍と Y 近傍では酸化物イオン輸送の特徴が大きく異なることがわかった．Ni 近傍では酸化物イオンの局所的な往復運動が相対的に多く，有効な長距離輸送に結びつきにくいことが明らかになった．また，Ni 1NN では酸化物イオンが存在しにくく，酸素空孔が相対的に存在しやすいことが示された一方で，Y 近傍では，Y 1NN が酸化物イオンを保持しやすい領域として，Y 2NN が比較的有効な長距離輸送に寄与する領域として機能していることが示された．このような Ni 近傍と Y 近傍における酸化物イオン輸送特性や存在安定性の違いは，Ni により引き起こされる局所構造の乱れに起因する可能性が示唆された．

以上より，Ni の固溶によって，Ni 近傍では酸化物イオンの存在安定性が Y 近傍とは異なる局所環境が形成されることが示された．その結果，Ni 近傍では有効な長距離輸送に結びつきにくい移動が増加し，酸化物イオン輸送が阻害されることで，YSZ 全体のイオン伝導性低下につながることが示唆された．

一方で，本研究には以下のような課題が残されている．まず，本研究で対象としたのは主として酸化雰囲気下での固溶 Ni の影響であり，SOFC 運転時の還元雰囲気における挙動は再現できていない．実際の運転環境では，Ni の還元・拡散に伴って粒界への析出や YSZ の相変態が生じ，それらが電解質の劣化に関与していることが報告されているため，今後はこうした現象を取り入れた解析へ発展させる必要がある．さらに，還元雰囲気下では電子状態の変化も重要になると考えられることから，古典 MD のみによる取り扱いには限界がある．したがって，今後は第一原理計算に基づく解析も導入し，Ni の固溶，還元，析出および相変態を含めたより実際の SOFC 環境に近い劣化メカニズムの解明を進める必要がある．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 塩見仁，谷内太陽，郭 玉婷，岸本将史，岩井裕: Ni の固溶が YSZ の結晶構造およびイオン伝導性に与える影響の分子動力学的研究，第 29 回動力・エネルギー技術シンポジウム，金沢大学 角間キャンパス (2025)，C132，口頭発表（発表日 6 月 5 日）.

[2] Jin Shiomi, Taiyo Taniuchi, Yuting Guo, Masashi Kishimoto, Hiroshi Iwai, Molecular-dynamics study of the effects of Ni dissolution on the ionic conductivity and crystal structure of YSZ, *The 14th Asian Thermophysical Properties Conference (ATPC 2025)*, Shanghai, China, (2025), Oral (presented on October 19).

[3] Yuting Guo, Jin Shiomi, Taiyo Taniuchi, Haiyi Sun, Taku Ohara, Masashi Kishimoto, Hiroshi Iwai, Influence of Ni Dissolution on Ionic Transport and Structure in YSZ: A Molecular Dynamics Study, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), Poster (presented on November 12).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project Code	J25I006
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Molecular Simulation of CO_2 Permeation though Microalgae Lipid Membrane

Fakhri Putra Nasution*, Fayza Yulia**††, Takuya Mabuchi***†
Nasruddin*
*Faculty of Engineering, University of Indonesia
**Faculty of Industrial Technology, Pertamina University
***Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The research aims to employ molecular dynamics (MD) simulation methods to visually represent and quantitatively analyze the permeation process of Carbon Dioxide (CO_2) molecules across microalgae's lipid membranes. This approach allows for a detailed exploration of the interaction dynamics between CO_2 and lipid membranes, offering insights that may not be readily achievable through experimental techniques. The study seeks to achieve three main objectives:

a) Showcase Mechanism and Dynamics of CO_2 Permeation
It can provide a detailed temporal evolution of interactions between CO_2 molecules and lipid membranes. By tracking the trajectory of CO_2 molecules, it helps in understanding how changes in molecular orientation and configuration affect permeation.

b) Partially Quantitative Insights into Gas Penetration
By using the trajectory data to calculate the number of CO_2 molecules penetrating the membrane over time. Analyzing these data will help quantify the rate of penetration under different conditions.

c) Analysis of Properties Related to Gas Permeation
The main properties that this research aims to evaluate is permeation coefficient, which refers to the rate of the CO_2 solutes passes through the microalgae's lipid membranes.

2. Details of program implement

Research collaboration related to Molecular Simulation of CO2 Permeation on DPPC lipid membranes is a series of research collaborations that have been carried out in previous years regarding investigations of carbon capture and storage using the adsorption method. In 2025, this collaborative project was part of the general collaborative research activities at the Institute of Fluid Science (IFS) Tohoku University, utilizing IFS's computing support facilities.

To ensure the project's objectives were met and to facilitate effective collaboration, the research team held a schedule of regular meetings, held at least twice a month. These meetings provided a platform for discussing ongoing research, sharing findings, and planning future activities. Additionally, an evaluation of the research progress was conducted during the International Conference on Fluid Dynamics (ICFD), held from November 10-13, 2025. This event was crucial for presenting initial results, receiving

feedback from the scientific community, and refining research methodologies based on peer input.

3. Achievements

In our research, we have examined the process of CO_2 permeation through microalgae cell membranes, which is modeled by DPPC (Dipalmitoylphosphatidylcholine) molecules, focusing on the interactions and dynamics of this process at the molecular level.

DPPC structure is a type of phospholipid molecule with hydrophilic head group, and hydrophobic hydrocarbon tails, each serving specific functions in relation to water molecules, creating a stable, cohesive, and impermeable barrier. This fatty acid-dominated structure can be found in several microalgae species.

The cell in the microalgae cell layer consists of a 64 DPPC lipid membrane with 2340 water molecules as illustrated in Figure 2. The structure and interaction parameters of the lipid membrane and water molecules were obtained using Charmm GUI. The bounded interactions of the lipid membrane were modeled using Chemistry Harvard Macromolecular Mechanics (CHARMM). Similarly, the interaction parameters for the CO_2 gas molecules were obtained using CGenFF (Charmm General Force Field) [8]. The simulation cell size used was 44.90 x 44.90 x 80 A°. Because the membrane is highly heterogeneous across its thickness, each leaflet was partitioned into four distinct regions, following the methodology detailed in earlier studies.

- Region 1: low headgroup density, 20-27 Å from the bilayer center.
- Region 2: high headgroup density, 13-20 Å from the bilayer center.
- Region 3: high tail density, 6-13 Å from the bilayer center.
- Region 4: low tail density, 0-6 Å from the bilayer center.

The entire structure underwent minimization and was subjected to a 10 ns molecular dynamics (MD) simulation with a timestep of 1.0 ps. The simulation process was carried out in seven stages, with the final stage involving the insertion of a CO_2 gas molecule into the simulation box to observe their interactions with the DPPC lipid membrane.

Once the system reaches equilibrium, it becomes feasible to calculate transport and permeation properties of the solute molecule.

To measure permeability quantitatively, the inhomogeneous solubility diffusion model is assumed to calculate the permeation coefficient (P). With this approach, the permeation coefficient is calculated using the following equation:

$$\frac{1}{P} = \int_{z1}^{z2} R(z)\, dz = \int_{z1}^{z2} \frac{\exp(\frac{\Delta G(z)}{k_B T}) dZ}{D_z}$$

Here, z1 and z2 represent the z-coordinates of the two sides of the bulk aqueous phase, R(z) is defined as the local resistance to permeation, ΔG(z) and DZ(z) are the excess free energy and the local diffusion coefficient of a small molecule permeating the membrane, kB is the Boltzmann constant, and T is the temperature.

Excess free energy (ΔG(z)), or Potential of Mean Force (PMF), could be calculated using various methods. In this work,we are using a non-equilibrium method to calculate PMF, which is called Umbrella Sampling. Umbrella Sampling attempts to overcome problems occurring because of limited sampling by biasing the original potential energy surface to enhance the sampling of the unfavorable states. In this method, a series of simulations are performed with the solute restrained relative to the center of mass of the membrane using a harmonic potential.

$$u_i(z) = \frac{1}{2} k (z - z_{0,i})^2$$

Where $u_i(z)$ is the potential energy of the restraint for simulation i, k is the force constant of the restraint, and $z_{0,i}$ is the reference position along the z axis the

simulation is biased to sample near. In our simulation, we used window spacings of 1.0 Aº and force constant of 3.0 Kcal/mol/Aº.
After a data set containing the position of the solute over time is collected, ΔG(z) is constructed using distributions sampled in the simulations. The Weighted Histogram Analysis Method (WHAM) is used in this research for this purpose.
To evaluate permeability based on the inhomogeneous solubility diffusion model, we also need to determine the position-dependent diffusion coefficient of the solute as a function of the axis perpendicular to the lipid bilayer, which in this case is the z-axis, D(z). One of the methods to calculate position dependent diffusion coefficient is the Woolf-Roux (WR) method. Hummer derived a simpler expression of WR method that relates D(z) to the variance of z and the correlation time, which resulted in the following formula.

$$D(z) = \frac{\langle \Delta z \Delta z \rangle^2}{\int_0^\infty \langle \Delta z(t) \Delta z(0) \rangle dt}$$

Where $\Delta z(t) = z(t) - \langle z \rangle$ Thus, the calcuation of diffusion coefficient requires an additional molecular dynamics simulation with the permeant fixed at particular z position, similar to the PMF.

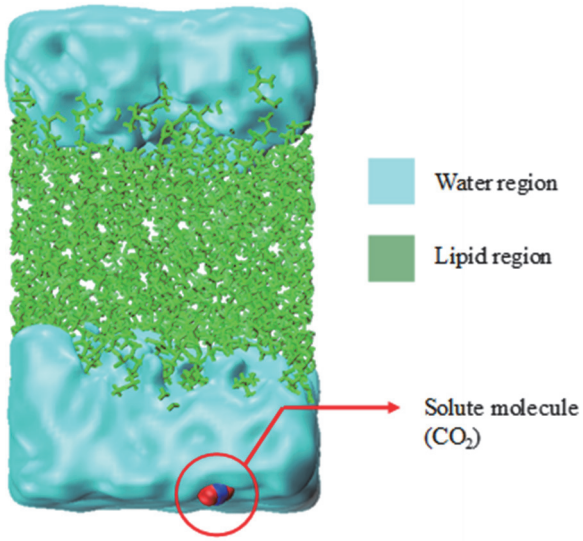


Figure 1: Simulation system

Figure 2 presents the free-energy profile, or potential of mean force (PMF), ΔG(z), for CO_2 permeation across the bilayer. The PMF represents the reversible work required to transfer a solute from bulk solution to a position z along the membrane normal. It therefore reflects the relative solubility of the permeant in water versus the membrane interior: a positive PMF denotes lower solubility at that location than in the aqueous phase, whereas a negative value signifies greater solubility.
The PMF obtained for CO_2 follows the behaviour expected of a hydrophobic species. A modest barrier appears at the charged, highly hydrated water–lipid interface. Beyond this point, the free energy decreases sharply as the molecule penetrates the ester and aliphatic tail regions (regions III and IV), reaching its minimum at z = 0 Å. This minimum indicates a thermodynamic preference for CO_2 to reside at the bilayer center.

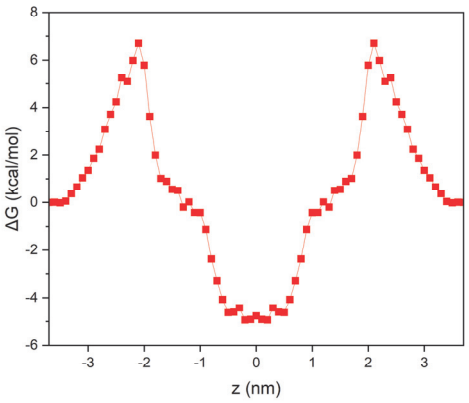


Figure 2: Free Energy Profiles (ΔG) of CO_2 molecules

Diffusion coefficient D(z) profiles for the carbon dioxide molecule are plotted in Figure 3.

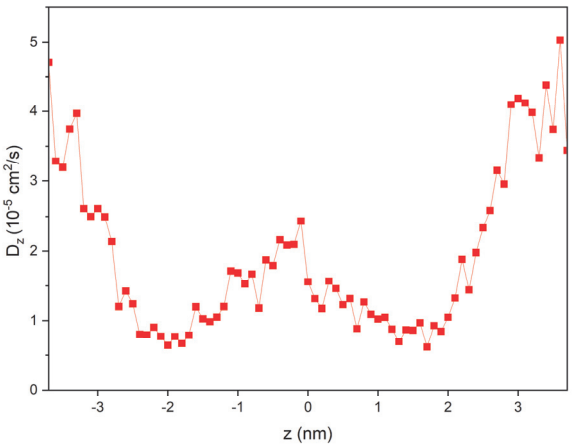


Figure 3: Diffusion Coefficient Profile of CO_2 molecules

D(z) decreases as entering the membrane in regions 1 and 2 to below 1×10^{-5} cm^2/s, then it is quite uniform in region 3, and increases slightly in region 4. This is due to region 1 and 2 are highly charged and crowded with water molecules. Diffusion coefficients inside the membrane are generally lower than in the bulk water phase because of the higher density of the lipid environment.

Using Equation 1 to combine the free-energy profile in Figure 3 with the diffusion-coefficient profile in Figure 4 gives a CO_2 permeability of 0.82 cm s^{-1}. This result lies very close to the typical experimental value of about 1 cm s^{-1} for cholesterol-free phosphatidylcholine membranes, confirming that the simulation captures the main barrier and mobility features that govern gas transport; the small (~20 %) difference is well within the usual experimental and modelling uncertainties.

4. Summaries and future plans

We have successfully determined the key parameter required to quantify solute transport across a membrane system, namely the permeation coefficient, for carbon dioxide (CO_2) molecules diffusing through a microalgal cell membrane. This parameter serves as a critical indicator of mass transfer efficiency and provides fundamental insight into the transport behavior of small molecules across biological

membranes. The permeation coefficient was obtained using non-equilibrium molecular dynamics (NEMD) simulations, with particular emphasis on the umbrella sampling technique to accurately characterize the free energy profile associated with CO_2 translocation. This approach enables a detailed resolution of the energy barriers and favorable pathways encountered by the solute as it permeates through the lipid bilayer, thereby ensuring a robust and physically meaningful estimation of permeability.

The results obtained thus far establish a strong computational framework for investigating solute–membrane interactions at the molecular scale. Building upon this foundation, the next phase of this research will expand the scope of investigation to include additional solutes that are highly relevant to microalgae cultivation systems. In particular, bicarbonate ions (HCO_3^-) will be studied due to their significant role in inorganic carbon uptake mechanisms in microalgae. Unlike CO_2, bicarbonate transport involves additional complexities such as charge effects, hydration shells, and potential interactions with membrane components, which may lead to distinct permeation behaviors.

By incorporating bicarbonate into the analysis, this work aims to enhance both the novelty and practical relevance of the study, especially in the context of optimizing carbon utilization in microalgal bioprocesses. Furthermore, comparative analysis between CO_2 and HCO_3^- transport properties is expected to provide deeper insight into the dominant carbon acquisition pathways and their dependence on environmental and membrane conditions. Ultimately, this research contributes to a more comprehensive understanding of mass transfer phenomena in biological membranes, which may inform the design and optimization of advanced systems for carbon capture, biofixation, and sustainable bioproduction.

5. Research results

Not applicable. One manuscript are going to be submitted in Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.

課題番号	J25I007
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	3 年目

ふく射と対流の複合解析による熱中症ダイナミクスの解明

A Study of Heat Stroke Dynamics by Combined Analysis of Radiation and Convection

江目 宏樹*†, 岡島 淳之介**††, 古川 琢磨***, 城野 雅斗*, 中野 冴規*, 小泉 佑輔*
北村 昂輝*, 原田 綾斗*, 神谷 脩斗*, 榊原 武*, 中村 凌大*, 神久保 武蔵*, 髙橋 歩夢*
川井 喜与人*
*山形大学理工学研究科, **東北大学流体科学研究所, ***芝浦工業大学工学部
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年，地球温暖化および都市部におけるヒートアイランド現象の進行に伴い，夏季の暑熱環境は一層深刻化している．その結果，熱中症による救急搬送者数および死亡者数は増加傾向にあり，社会的課題として重要性が高まっている．現在，熱中症リスク評価には湿球黒球温度（WBGT）が広く用いられているが，その多くは経験則や統計的知見に基づくものであり，各環境因子が人体の熱収支および体温上昇に与える影響を物理量として定量的に評価した研究は十分ではない．

特に，太陽ふく射による熱取得および湿度による蒸発冷却阻害が，人体の深部体温上昇にどの程度寄与するかについては体系的理解が不足している．熱中症は，環境要因（気温，湿度，ふく射，気流），身体要因，行動要因の相互作用によって発症するが，これらの寄与度を個別に分離して評価することは困難である．

そこで本研究では，多節点生体温熱モデルを用いた数値解析により，暑熱環境下における人体の熱収支を詳細に解析し，特にふく射および湿度が体温上昇に与える影響を定量化することを目的とする．さらに，環境温度に応じた支配的熱移動機構の遷移を明らかにし，熱中症発症ダイナミクスの物理的理解を深化させることを目指す．

2. 研究成果の内容

本研究では，多節点生体温熱モデル（Fiala モデル）を用い，気温 30℃，35℃，40℃の各条件において，平均ふく射温度（MRT）および相対湿度を広範囲に変化させた数値解析を実施した．これにより，人体の深部体温の時間応答とともに，対流，ふく射，蒸発から構成される熱収支の内訳を定量的に評価した．

まず，気温 30℃条件における結果を図１に示す．MRT の上昇に伴う深部体温の増加は最大で約 0.23℃（高湿度条件）であったのに対し，湿度変化による影響は最大でも約 0.14℃にとどまった（図１）．この結果は，本温度域では湿度よりもふく射が支配的に作用することを示している．熱収支の観点からは，対流およびふく射による顕熱放散が依然として有効に機能しており，蒸発冷却への依存度が限定的である．そのため，外部からのふく射熱取得の増加が直接的に体温上昇へ寄与する構造となっている．

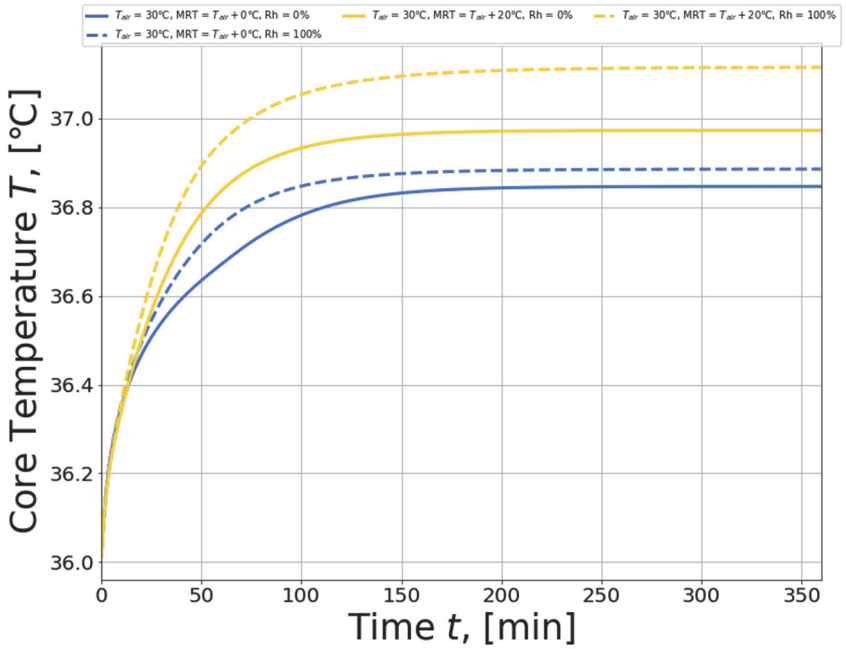


図１：気温 30℃における平均ふく射温度および相対湿度条件下での深部体温の時間変化

次に，気温 35℃条件における結果を図２に示す．この条件では，MRT および湿度の双方が深部体温に対して顕著な影響を及ぼすことが確認された．具体的には，湿度の上昇により最大で約 3.79℃の体温上昇が生じ，さらに高 MRT 条件ではその影響が増幅された（図２）．この温度域では，気温が皮膚温に接近することにより対流熱伝達が著しく低下し，顕熱による放熱がほぼ消失する．その結果，蒸発潜熱が主要な放熱機構へと移行し，湿度による蒸発抑制が体温制御に強く影響する．一方で，ふく射は引き続き熱取得項として作用するため，両者が複合的に体温上昇を促進するレジームが形成される．

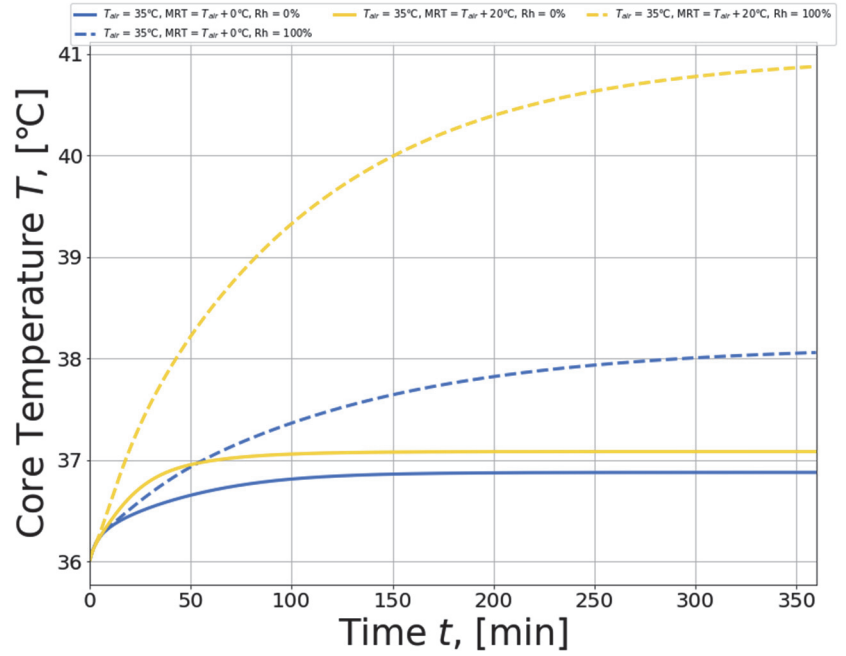


図２：気温 35℃における平均ふく射温度および相対湿度条件下での深部体温の時間変化

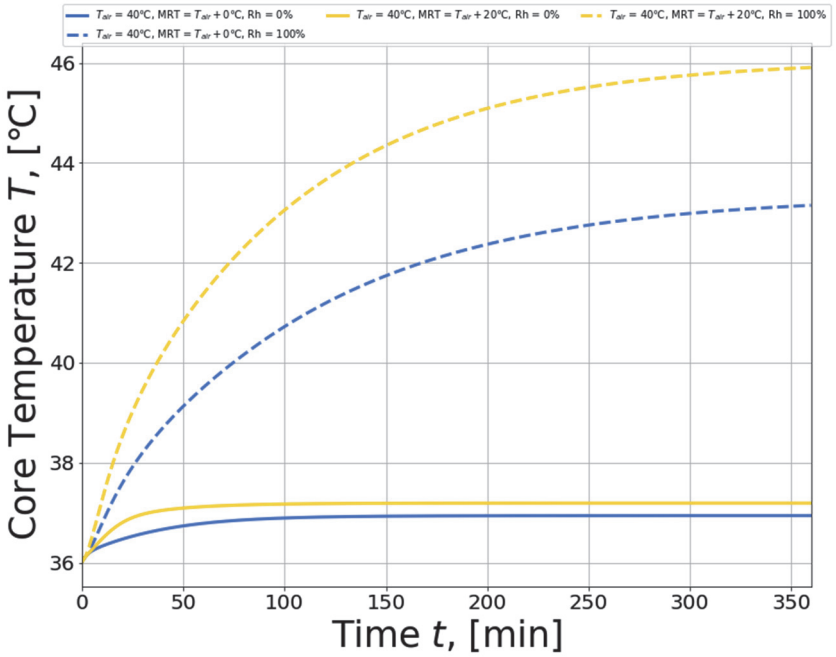


図３：気温 40℃における平均ふく射温度および相対湿度条件下での深部体温の時間変化

さらに，気温 40℃条件における結果を図３に示す．この条件では，湿度の影響が極めて支配的となり，最大で約 8.72℃の深部体温上昇が確認された．一方，MRT の変化による影響は相対的に小さいものの，高湿度条件ではその寄与も無視できない（図３）．この温度域では，外気温が皮膚温を上回るため，対流およびふく射はいずれも放熱ではなく熱取得として作用する．したがって，人体の熱収支は蒸発潜熱にほぼ全面的に依存する構造となり，蒸発能力を規定する湿度が体温上昇の一次的支配因子となる．

加えて，熱収支解析により，気温上昇に伴い支配的熱移動機構が「ふく射取得優位」から「蒸発潜熱依存」へと非線形に遷移することが明らかとなった．

3. 研究目標の達成状況

本研究の目的である「ふく射および湿度が人体の体温上昇に及ぼす影響の定量化」および「環境温度に応じた支配機構の解明」は概ね達成されたと評価できる．

具体的には，多節点生体温熱モデルを用いることで，従来は経験則に依存していた熱中症リスクの評価を，熱収支に基づく物理量として定量的に示すことに成功した．また，気温 30℃，35℃，40℃という代表的な暑熱環境において，ふく射と湿度の寄与がどのように変化するかを体系的に整理し，「ふく射支配領域」「複合支配領域」「湿度支配領域」という三つのレジームを明確に提示した．

さらに，これらの結果は，単一指標では記述困難であった熱中症発症過程が，多因子相互作用による非線形現象であることを示しており，熱中症ダイナミクスの理解に新たな知見を与えるものである．

4. まとめと今後の課題

本研究により，暑熱環境下における人体の熱収支構造は気温に依存して段階的に変化し，体温上昇を支配する要因が大きく異なることが明らかとなった．すなわち，30℃付近ではふく射が支配的，35℃付近ではふく射と蒸発の複合影響，40℃付近では湿度が決定的因子となる．この知見は，環境条件に応じた合理的な熱中症対策の設計指針を与えるものである．

特に，ふく射の影響が支配的な温度域においては，太陽光の可視・近赤外成分の反射制御による熱取得抑制が有効である．一方，高温域では蒸発冷却の維持が不可欠であり，湿度環境や通風条件の制御が重要となる．

今後の課題としては，風速や衣服条件，活動強度といった要因を含めたより現実的条件での解析が挙げられる．また，実験データとの比較検証によるモデル精度の向上も重要である．さらに，本研究で得られた知見を応用し，ふく射遮蔽性能と透湿性を両立した材料・製品設計へと展開することで，熱中症予防技術の高度化が期待される．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] T. Kogawa, M. Jono, K. Suzuki, K. Kawai, J. Okajima, S. Moriya, H. Gonome: Experimental demonstration of enhanced radiative shielding performance induced by Mie scattering of fine water-mist particles, *Case Stud. Therm. Eng.*, 77 (2026), 107560, doi: 10.1016/j.csite.2025.107560.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 北村 昂輝, 古川 琢磨, 江目 宏樹: 体温シミュレーションを用いた熱中症発症要因の寄与評価，日本機械学会東北支部第 61 期総会・講演会講演論文集，(2026)，pp. 100-101.

[3] 神久保 武蔵，城野 雅斗，川井 喜与人，江目 宏樹: 温室栽培における熱害対策用マイクロミストの有効性の検証，日本機械学会東北支部第 61 期総会・講演会講演論文集，(2026)，pp. 40-41.

[4] 神久保 武蔵，城野 雅斗，川井 喜与人，江目 宏樹: マイクロミストによる温室栽培の熱害対策の有効性検証, 日本機械学会東北学生会第 56 回卒業研究発表講演会講演論文集, (2026), p. 121.

[5] H. Gonome, K. Kitamura, J. Okajima, T. Kogawa: Quantitative Evaluation of Humidity's Role in Heat Stroke via Thermoregulation Modeling, *Proceedings of the 25th International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2025), CRF-77, pp. 214-215.

[6] K. Kitamura, T. Kogawa, H. Gonome: Evaluation of the Effect of Humidity on Heat Stroke by a Thermoregulation Model, *Proceedings of the 22nd International Conference on Flow Dynamics*, (2025), pp. 1609-1610.

[7] 神久保 武蔵，神谷 脩斗，江目 宏樹: 波長選択マイクロミスト熱害対策の実現可能性検証，日本機械学会熱工学コンファレンス 2025 講演論文集，(2025)，p. D12.

[8] 北村 昂輝，古川 琢磨，江目 宏樹: 生体温熱モデルによる日射と湿度が熱中症発症に及ぼす影響の評価，日本機械学会熱工学コンファレンス 2025 講演論文集，(2025)，p. B14.

[9] 城野 雅斗，古川 琢磨，川井 喜与人，邢 文静，守谷 修一，岡島 淳之介，江目 宏樹: 火災熱ふく射遮蔽ミストのスペクトル評価，日本機械学会熱工学コンファレンス 2025 講演論文集，(2025)，p. D32.

[10] M. Jono, T. Kogawa, K. Kawai, W. Xing, S. Moriya, J. Okajima, H. Gonome: Spectral Evaluation of Radiative Energy Transport in Water Mist Using Infrared Camera, *Proceedings of the 35th International Symposium on Transport Phenomena*, (2025), PS-P00052.

[11] 北村 昂輝，古川 琢磨，江目 宏樹: 生体温熱モデルによる気象条件が与える熱中症発症への影響の評価，第 25 回日本伝熱学会東北支部学生発表会講演論文集，(2025)，pp. 14-15.

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**

（受賞）第 102 期熱工学部門 若手講演表彰，二流体ノズルの微粒化特性がミストのふく射遮蔽性能に与える影響，城野 雅斗，古川 琢磨，川井 喜与人，邢 文静，守谷 修一，岡島 淳之介，江目 宏樹，2024.10.5，日本機械学会熱工学コンファレンス 2024.

課題番号	J25I008
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4～2026.3
継続年数	2 年目

キャリア選択性パッシベーションコンタクト界面構造の分子動力学解析
Molecular Dynamics Analysis of Carrier Selective Passivating Contact Interface Structures

宇佐美 徳隆*†，徳増 崇**††
後藤 和泰***，深谷 昌平*
*名古屋大学工学研究科，**東北大学流体科学研究所
***新潟大学工学部
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は，酸化チタンを用いた低コストかつ高効率な結晶シリコン(Si)系太陽電池を実現するために，分子動力学（Molecular Dynamics: MD）計算を用いて金属/酸化チタン（TiO_x）/ Si の各界面における構造変化や化学結合状態の変化の解明することである．

TiO_x は，そのバンドギャップエネルギーがおよそ 3.3 eV と大きく，さらに，Si と接合した際に電子輸送に有利なバンドラインナップを示すことから，次世代の太陽電池における電子選択層として期待されている．[1] これまで，TiO_x を太陽電池の電子選択層として応用する研究が活発に行われてきたが，電極として用いる金属が TiO_x と接触することで，TiO_x の Si に対する表面保護性能が低下することが報告されてきた. [2, 3] TiO_x の電子選択層としての応用を考えた場合，金属/ TiO_x/Si 界面を制御するための指針と技術が必要である．

そこで，本研究では，金属/ TiO_x/Si 界面における構造変化に着目する．TiO_x の場合，接触する金属と熱処理条件に依存して TiO_x の還元反応や酸化チタン/結晶シリコン界面への原子拡散が起こることが予想され，それらが金属電極形成後の表面保護性能の低下を引き起こしている可能性がある．しかしながら，調査領域が界面近傍のため，実験的に信号を取ることが困難といった問題があり，その界面の構造的な変化は明らかにされていない．本研究では，機械学習力場の一種である，ニューラルネットワークポテンシャル（NNP）を用いた MD シミュレーションにより，金属と TiO_x との界面近傍の化学結合状態や金属原子の挙動を明らかにすることで高品質界面の設計指針を提示し，酸化チタンを用いた次世代シリコン系太陽電池の実現に資することを目標とする．

[1] B. Liao, B. Hoex, A. G. Aberle, D. Chi, S. Bhatia, Appl. Phys. Lett., 104, (2014), 253903.
[2] X. Yang, Q. Bi, H. Ali, K. Davis, W. V. Schoenfeld, Wever, Adv. Mater., 28, (2016), 5891.
[3] V. Titova and J. Schmidt, Phys. Status Solidi RRL 15, 2100246 (2021).

2. 研究成果の内容

2.1 アルミニウム（Al）/アモルファス酸化チタン（a-TiO_2）/Si 界面を記述する NNP の作製

本項目の共同研究における意義は，実際に我々が観察を行いたい系である，Al/a-TiO_2/Si ヘテロ構造を模擬する NNP を確立する点である．これまでの研究において，我々は a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造を模擬する NNP の作成およびその妥当性について確認したが，それらは実験で得られた原子

拡散の結果との比較のみであり, NNP が量子化学計算の結果に対してどれほどの精度を担保しているかについての定量的比較は行っていなかった. よって, 2.1 項では, これまで作成した NNP にさらに金属 Al を追加したスラブモデルである, Al/a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造への作製し,さらに, 密度汎関数法（DFT）により得られる各原子のエネルギーとの比較により, 作成した NNP の妥当性の検証を行った.

図 1 に, （a）Si, （b）TiO_2/Si 界面, （c）バルク TiO_2, （d）Al/TiO_2界面, （e）バルク Al モデルにおける, NNP によって予測されたエネルギーと DFT によって計算されたエネルギーを比較したパリティプロットおよび平均絶対誤差 MAE（eV/atom）を示す. ここで, 各モデルはそれぞれ約 100 原子程度から構成されており, これらを約 1000 K まで加熱した条件において得られた同一構造に対し NNP および DFT 計算を行い比較した. 図 1(1-e)より, 全エネルギーに関して, DFT と NNP の結果の間に良好な線形相関が得られ, Si, TiO_2/Si スラブ, TiO_2 バルク, Al/TiO_2 スラブ, および Al バルクを含む多成分系においても系統的な偏りはみられなかった. さらに, その MAE はすべておよそ 1×10^{-3} eV/atom 程度に収まった. 以上の結果から, 本研究で構築した NNP は, Al/TiO_2/Si ヘテロ構造に対する分子動力学シミュレーションに十分な精度を有すると考えられる. したがって, 本 NNP を用いることで, 第一原理計算のみでは困難であった TiO_2膜厚依存性や金属電極存在下での界面構造変化について, 統一的かつ系統的な解析が可能となった.

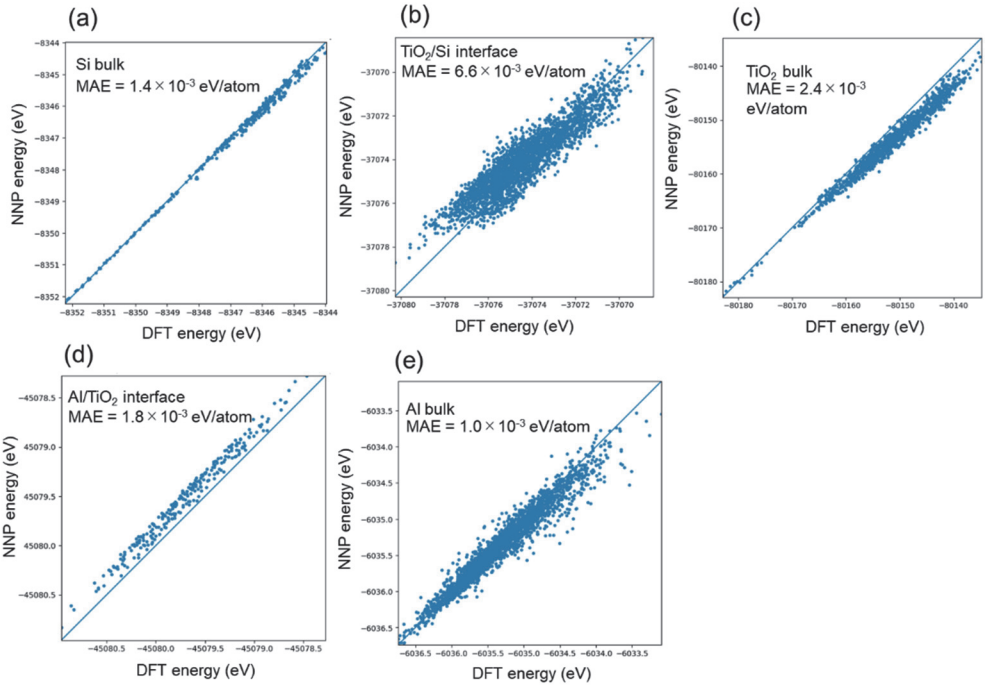


図 1 ： （a）Si, （b）TiO_2/Si 界面, （c）バルク TiO_2, （d）Al/TiO_2界面, （e）バルク Al モデルにおける, NNP によって予測されたエネルギー（縦軸）と DFT によって計算されたエネルギー（横軸）を比較したパリティプロットと平均絶対誤差（eV/atom）.

2.2 NNP を用いた Al/a-TiO_2/c-Si ヘテロ界面での熱処理時の Si-O 結合の解析

これまで, a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造上に Al 成膜を行うことでパッシベーション性能が低下することが報告されている.[3] 本研究の最終的な目的は, Al 成膜によるパッシベーション性能の低下原因の解明である. 2.2 項では, Al 成膜が Si-O 結合へ及ぼす影響を調査するために, 2.1 項で作成した Al/a-TiO_2/Si ヘテロ構造を記述する NNP を用いて, a-TiO_2 の膜厚を変化させた場合における, a-

TiO_2/c-Si ヘテロ構造と Al/a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造において，熱処理後の Si-O 結合の解析を行った．

図２（a）a-TiO_2/Si, (b)Al/a-TiO_2/Si ヘテロ構造モデルと，(c-1）TiO_2/Si および Al/TiO_2/Si モデルにおける，TiO_2 膜厚に対する界面 Si–O 結合数の変化と，（c-2）Al 堆積前後における Si–O 結合数の比を示す．ここで，結合半径の cutoff 半径は 1.61 Å とした．[4] 図２（c-1）から，全ての a-TiO_2 の膜厚において，1,000K での熱処理後の a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造の Si-O 結合密度は，Al/a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造と比較して高い値を示していることがわかる．これは，金属 Al の成膜が a-TiO_2/Si 界面における Si-O 結合の形成を抑制していることを示唆している． さらに，図２（c-2）より，a-TiO_2 の膜厚が厚くなるほど Si-O 結合密度が Al の成膜後では小さくなる傾向をもつことがわかる．よって，金属 Al の存在が Si-O 結合の形成を抑制すること，a-TiO_2 が厚くなることでその影響が小さくなることがわかる．ここで，Si-O 結合密度が高いほど界面のパッシベーション性能が向上すると仮定すると， Al の導入が Si-O 結合の低下に伴い界面パッシベーション性能を低下させる一方で，a-TiO_2 の厚膜化によってそれらを抑制する可能性があることが示唆された．

以上の結果から，金属 Al の成膜が TiO_2/c-Si ヘテロ界面における Si-O 結合の形成に負の影響を与えることが明らかとなり，それを抑制するためには a-TiO_2 の厚膜化が a-TiO_2/c-Si 界面制御に重要であることが示唆された．

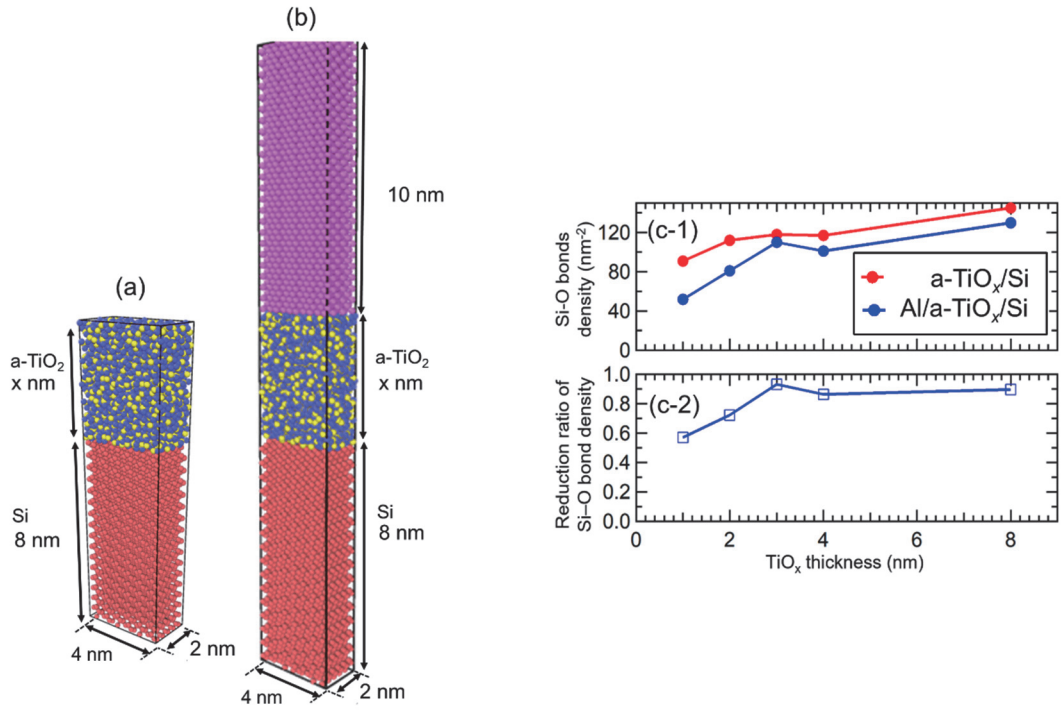


図２：（a）a-TiO_2/Si, (b)Al/a-TiO_2/Si ヘテロ構造モデルと，(c-1）TiO_2/Si および Al/TiO_2/Si モデルにおける，TiO_2 膜厚に対する界面 Si–O 結合数の変化，（c-2）Al 成膜前後における Si–O 結合数比．

[4] T. A. Sidorov, Russ. J. *Inorg. Chem.*, **52**, 532–542 (2007).

3. 研究目標の達成状況

本研究を遂行していく段階として，大きく四つのステップがある：①a-TiO_2/c-Si モデルに適用可能な機械学習ポテンシャルの作成，②a-TiO_2/c-Si モデルにおいて熱処理を模擬したシミュレーションとその妥当性の検証，③Al/a-TiO2/c-Si モデルに適用可能な機械学習ポテンシャルの作成，④Al/a-TiO_2/c-Si モデルの熱処理を模擬したシミュレーションとその解析である．この場合において，現在は，④のうちの，Al/a-TiO_2/c-Si モデルの熱処理を模擬したシミュレーションが終了した段階であり，当初の計画の全体の 85％程度を達成したといえる．今後は,作成した力場を用いてさらなる条件についてシミュレーションおよび解析を行うことで，より Al 成膜によるより詳細な影響について得ることができると考えている．

4. まとめと今後の課題

本研究では,Al/a-TiO2/c-Si ヘテロ界面を記述する NNP の作成とその妥当性の検証を行った後に，Al 成膜前後における熱処理時の Si-O 結合状態への影響ついて解析した．その結果，本研究で作成した Al/a-TiO_2/Si ヘテロ界面を記述する NNP は，DFT 計算と同等の精度を持つことが確認された．さらに，Al/a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造では，金属 Al の成膜が Si-O 結合形成を抑制し，界面におけるパッシベーション性能の低下を引き起こしている可能性が示され，その抑制には a-TiO_2 の膜厚が重要であることが明らかになった．これにより，a-TiO_2/Si 界面制御には a-TiO_2 膜厚が重要であることが明らかとなった．

今後の課題として，より現実の系を反映した酸化チタンである，a-TiO_2 に酸素空孔を付与した a-TiO_x に拡張して調査を行う必要がある．さらには，実際のパッシベーション膜として用いられる TiO_x には多量の水素原子が含まれているため，水素濃度を変化させた場合における TiO_x についても研究が必要である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] S. Fukaya, N. Uene, K. Gotoh, T. Tokumasu and N. Usami, “Insights into Passivation Mechanisms at Ti/TiO*x*/Si Interfaces by Molecular Dynamics Simulation: Role of Metal and Oxide Layer Thickness”, *21st International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, November 10-13, 2025

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J25I009
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4～2026.3
継続年数	1年目

微細水滴と窒素プラズマの界面反応を用いた高効率アンモニア製造
High-Efficiency Ammonia Production by Interfacial Reaction between Fine Water Droplet and Nitrogen Plasma

白石 僚也*†, 桑木 優弥*, 坂本 駿太郎*, 徳増 崇**††
*山口大学大学院創成科学研究科, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

プラズマを用いたアンモニア生成法（プラズマ法）は，水を原料として常温・常圧下でCO_2を排出せずにアンモニアを一段合成できる次世代技術として注目されている．従来のハーバー・ボッシュ法は高温・高圧（500 ℃, 30 MPa）を必要とし，年間約0.5 GtのCO_2を排出するが，プラズマ法はこれを回避できる．しかしながら，実用化に向けてはエネルギー効率の向上が不可欠である．本研究の目的は，窒素プラズマジェットに微細水滴（ミスト）を衝突させる新手法「MAP（Mist and Plasma）法」を開発し，アンモニア生成効率を大幅に向上させることである．ミストを用いることで，(1) 静的バルク水面に比べた界面積の増大，(2) 衝突による局所高圧領域の形成，(3) 生成アンモニアのミストへの迅速溶解・反応場からの除去，(4) 逆反応（アンモニア分解）の抑制，の4つの効果が期待される．これらの効果を実験的に検証し，各操作パラメータ（ノズル・トーチ間距離，窒素流量，電流周波数）がアンモニア生成効率に与える影響を明らかにすることを目指す．

2. 研究成果の内容

窒素プラズマジェットへの微細水滴衝突によるアンモニア生成（MAP 法）の実験を実施した．実験装置の概略図を図1に示す．実験装置は，一端にミスト生成ノズル（アルゴンキャリアガス0.15 MPa, 20 L/min），他端に銅製プラズマトーチ（内径5 mm, 中心棒径3 mm）を配した大気開放型リアクタである．高電圧電源(栗田製作所MPP04-A4-30)により1.5～3.0 kV, パルス幅1 μs, 周波数5～20 kHzのパルス電圧を印加して窒素プラズマジェットを発生させ，蒸留水をミスト化したものと衝突させた．生成アンモニアはリアクタ底部（一次水）および外部水トラップ（二次水）に溶解・回収し，イオンクロマトグラフィーで定量した．入力エネルギーは電流・電圧波形の時間積分から算出した．また，シャドウグラフ法（高速カメラ Photron FASTCAM SA-3SE, LED ストロボ）によりミスト液滴の直径・数密度・体積面積を計測し，ノズル出口からの距離依存性を調べた．液滴径分布は対数正規分布でフィッティングした．比較対照として，バルク水中にプラズマを生成する in-liquid plasma 法も同一条件で実施し，MAP 法との効率比較を行った．

結果，シャドウグラフ計測によりミスト液滴の表面積(単位空間体積あたり)がノズル出口に近いほど大きいことを明らかにし（最大約15 mm²/mL），アンモニア生成効率はノズル・トーチ間距離が狭いほど高いことを確認した．この結果から，界面積の増大が MAP 法の高効率化の主要因であることを実験的に明らかにした．

次に，窒素流量を変化させた実験では，7.5 L/min での 4.1 mg-NH_3/MJ から 12.5 L/min での 21.3 mg-NH_3/MJ まで約 5 倍の変化が生じることを見出した．電流周波数については，5 kHz 付近から 20 kHz にかけての変化で約 2 倍の差が生じ，10 kHz において最高効率を示した．いずれも，プラズマ中の高エネルギー粒子密度と窒素供給量のバランスが効率を支配していることを示唆する結果であった．

さらに，最適条件（ノズル・トーチ間距離 70 mm，窒素流量 10 L/min，電流周波数 10 kHz）において，MAP 法の最高エネルギー効率として 57.6 mg-NH_3/MJ を達成した．これは同条件で測定した in-liquid plasma 法（1.6 mg-NH_3/MJ）の約 36 倍，先行研究（Haruyama et al.，UV 照射を用いた窒素プラズマと静的バルク水の界面反応法，16.7 mg-NH_3/MJ）の約 3.5 倍に相当し(図２)，常温・常圧・無触媒・水からの一段アンモニア合成として，現時点で報告されている最高水準の効率であった．

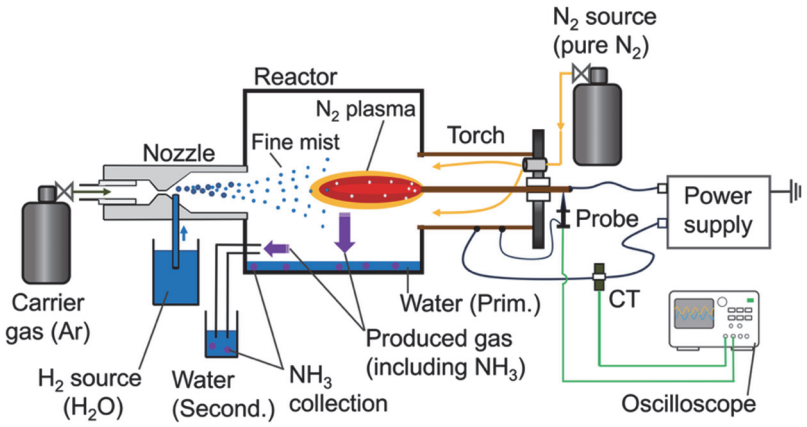


図１：実験装置の概略図

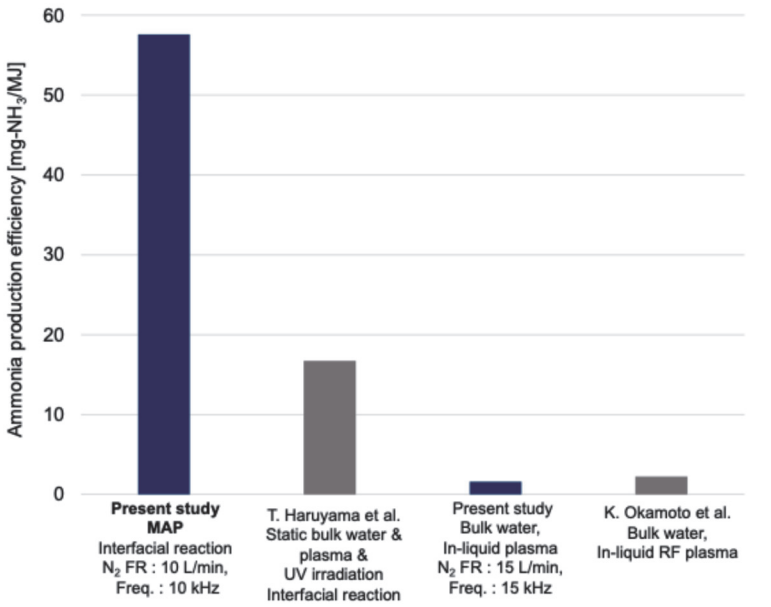


図２：本研究で開発した MAP 法及びその他の手法におけるアンモニア製造効率

3. 研究目標の達成状況

MAP 法によるアンモニア生成効率の大幅向上については，本研究で十分に達成された．具体的には，MAP 法の最大効率 57.6 mg-NH3/MJ を達成し，これは従来の in-liquid plasma 法（1.6 mg-NH_3/MJ）の約 36 倍，窒素プラズマと静的バルク水の界面反応法（16.7 mg-NH_3/MJ）の約 3.5 倍に相当する．これは UV 照射支援なしで達成したものであり，触媒不要・一段合成・常温常圧・水を原料とする条件下での報告値として極めて高い水準である．また，ミスト液滴の表面積とアンモニア生成効率の間に正の相関が確認され，界面積増大が MAP 法の高効率化の主要因であることを実験的に示すことができた．さらに，窒素流量および電流周波数の最適化により効率が大きく変動すること（それぞれ約 5 倍，約 2 倍の変化）も明らかにした．一方，各効果の定量的寄与の分離や，プラズマ反応場の詳細な理解は今後の課題として残っており，次年度以降の研究に継続される．具体的には，(1) 光学的手法（発光分光など）やプラズマシミュレーションによる反応場の詳細観察，(2) 各効果（界面積増大，局所高圧，アンモニア除去等）の個別寄与の定量化，(3) ベイズ最適化を用いた全パラメータの包括的最適化などを行う予定である．

4. まとめと今後の課題

本研究では，窒素プラズマジェットに微細水滴（ミスト）を衝突させる MAP（Mist and Plasma）法を新たに開発し，アンモニア生成効率の評価を行った．MAP 法の最大効率は 57.6 mg-NH_3/MJ であり，従来の in-liquid plasma 法の約 36 倍，静的バルク水との界面反応法の約 3.5 倍を達成した．これは，常温・常圧・触媒不要・水から一段でアンモニアを合成する手法の中で，報告されている最高水準の効率である．効率はノズル・トーチ間距離（界面積に相当），窒素流量，電流周波数に依存し，特に窒素流量の影響が顕著（最大 5 倍の差）であることが明らかになった．今後は シミュレーションや分光測定により，効率向上メカニズムを解明することを目指す．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] R. Shiraishi, Y. Kuwaki, T. Hatayama, S. Sakamoto, C. Yamasaki, Y. Hayamizu, T. Tokumasu: Improvement in ammonia production efficiency via collision of fine water droplets with a nitrogen plasma jet, *International Journal of Hydrogen Energy*, 184 (2025), 151825, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.151825.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] S. Sakamoto, R. Shiraishi, T. Hatayama, T. Fujii, Y. Hayamizu, T. Tokumasu: Fundamental Simulation of Plasma Processes to Optimize Ammonia Production Efficiency, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-38, pp. 109-110.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I010
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	3 年目

柔軟弾性体と超音速気流との衝突干渉時における衝撃環境の減衰効果
Attenuation Effect of Shock Environment in Supersonic Flow using the Soft Body

北川 一敬*†，大谷 清伸**††
小西 康郁**，上田　颯***
*愛知工業大学工学部，**東北大学流体科学研究所
***岐阜大学工学部
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

衝撃波と柔軟ポーラス材料との衝突干渉例としては，爆風と可変形物体の干渉など工学的環境問題や，体外からの衝撃波フォーカシングによる胆石，脳血栓等の破壊細分過程における損傷干渉の医学的応用など衝撃波－複雑媒体干渉の基礎から応用への視野を含めた研究テーマである．本研究代表者は，衝撃波管下流管端末に空隙率 76～98%のオープンセル型ポリウレタンフォームを設置した時の 1 次元衝撃波干渉実験と計算を行っている．空隙率 76%の中密度フォームの衝撃波干渉の特徴として，ガスの mobility が小さく，フォーム固定端の応力変動は気体反射衝撃波によって生じた圧縮応力波が管端末に到着して応力上昇し，固定端からの反射応力波が圧縮波であるために更に応力上昇が続き，フォームの弾性による慣性力が過剰な動的応力に大きく影響し，空隙率 0%のゴムに似た現象を示している．又，高空隙率フォーム(98%)では，フォーム内部に一部衝撃波の貫入が見られ，過剰な動的応力はフォーム弾性の慣性力が空隙率の中密度フォームよりも小さいために低くなる．又，本研究代表者等の今までの研究の結果，衝撃波－フォームの非定常抵抗は，Darcy の粘性抵抗よりも動圧の影響が大きく作用している事が CFD 計算により明らかにしている．これらの知見を踏まえて，円形，四角，楔等の各種形状の柔軟弾性体を用いて，超音速気流との多次元干渉の詳細，衝突干渉時の内部構造，圧力波，応力波の伝播特性と形状変化の可視化とインパルスに関して，衝撃波の緩和，吸収による減衰効果の基本特性導出という目的から，現象の解明を図る．

2. 研究成果の内容

本研究は東北大学流体科学研究所衝撃波関連施設に設置されている弾道飛行装置を用いて実施した．図 1 は実験で使用した射出試験体の模式図を示す．軟弾性体の球形状試験体はシリコンゴム製，直径 10mm，質量 0.54g，空隙率 0%，ポアソン比 0.50 である．硬度は，ショア A:18 と 38 を用いた．可視化は nac MEMRECAM ACS-1, フレームレート 200kfps シャッタースピード 0.6μs, 解像度 1280×768pixels, 可視化領域寸法 134.8×80.8mm² である．図 2 は火薬銃式弾道飛行装置を用いた弾性体の光学可視化結果を示す．図 2(a)は硬度 38, (b)は硬度 18 の結果を示す．両図から自由飛行している物体の前方に離脱衝撃波の発生と弾性体の変形が確認できる．図 2(a)において，飛行マッハ数 M= 1.79±0.04，試験体が受ける抗力は運動量保存則より算出し 228N である．図 2(b)において，飛行マッハ数 M = 1.71±

0.04，試験体が受ける抗力は運動量保存則より算出し 365N である．弾性体の硬度が小さくなるにつれ，離脱衝撃波距離と抗力の増加，衝撃波角度の減少，飛行マッハ数の減速を確認し，離脱衝撃波形成時の変形量および曲率半径は大きくなる事がわかった．硬度 38 と硬度 18 を比較すると，最大変形量が横方向約 11%，縦方向約 12%，半径約 18%の増加を示した. これは, 各弾性体の弾性率の違いによるものと考えられる. 硬度 38 の弾性率は 438kPa, 硬度 18 の弾性率は 160kPa となる．弾性率が低い硬度 18 は，復元力が小さい事から，変形量が増加した.

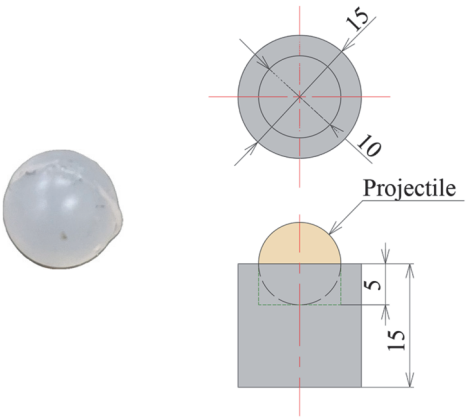
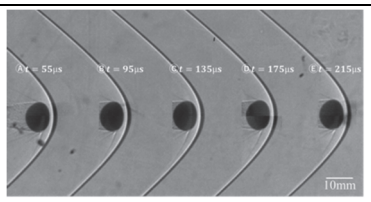
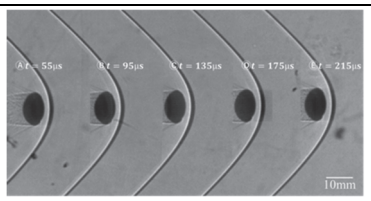


図1：試験体寸法図



(a) 硬度 38



(b) 硬度 18

図 2：自由飛行時の離脱衝撃波の可視化

3. 研究目標の達成状況

本研究の目標は，弾道飛行中の弾性体の挙動及び弾性体に発生する離脱衝撃波をシュリーレン可視化することで，弾性体が持つ衝撃波減衰効果の基本的特性を調査することである．弾性体の変形によって流れが変化し，離脱衝撃波距離の増加，衝撃波角度が減少し，飛行マッハ数の減速を確認した.

4. まとめと今後の課題

弾道飛行中の弾性体は，変形によって離脱衝撃波距離及び衝撃波角度が変化した．衝撃環境の変化について，衝撃波背後のエネルギ，静圧，周囲の温度，密度勾配などを検証する必要がある.

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] K. Kitagawa, H. Ueda, K. Ohtani, N. Sato, T. Ogawa, Y. Konishi: Attenuation Effect of Shock Environment in Supersonic Flows using the Soft Body, *The 22h International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, OS28: *The 25th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2025) IFS Collaborative Research Forum*, Sendai, Japan, (2025.11), CRF-18.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J25I011
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

異種材料 3 次元構造への炭化ケイ素結晶成長と反応性力場分子動力学法を用いたシミュレーション

Silicon Carbide Crystal Growth and Its Simulation on Three-dimensional Structure of Different Materials using ReaxFF

竹内 和歌奈*†，徳増　崇**††
遠藤 和彦**，安原 重雄***
*愛知工業大学工学部，**東北大学流体科学研究所，***ジャパン・アドバンスト・ケミカルズ
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は，異種材料からなる三次元構造体上における炭化ケイ素（SiC）の結晶成長機構を解明し，実験およびシミュレーションを統合することで，低温における化学気相成長（CVD）法による高品質 SiC 被覆の形成条件を確立することである．特に，ビニルシランを単一前駆体としたCVDプロセスに着目し，CNTなどのナノカーボン上におけるSiCの低温結晶成長（約750℃）の成立要因を明らかにすることを目的とする． 本年度はその第一段階として，前駆体分子の吸着挙動に着目し，SiC 成長の初期過程に関する基礎的理解を得ることを目的とした．

2. 研究成果の内容

本研究では，ビニルシランを単一前駆体とした熱 CVD 法により，多層カーボンナノチューブ（MWCNT）への炭化ケイ素（SiC）被覆形成およびその成長機構の解明を目的として，実験および計算の両面から検討を行った．まず，走査型電子顕微鏡（SEM）像を図 1 に示す．未処理の CNT では上部から下部にかけて均一な直径（約 30-40 nm）を有しているのに対し，SiC 被覆後は上部ほど顕著に太径化し，最大で 150～300 nm 程度まで増加することが確認された．このことから，SiC は CNT 表面に核生成した後，主に上部から成長しながら被覆層を形成することが示唆される．次に，X 線回折（XRD）測定結果を図 2 に示す．未処理 CNT ではグラファイト由来のピークのみが観測されるのに対し，SiC 被覆後には 3C-SiC に対応する回折ピークが確認された．特に 750℃という比較的低温条件においても結晶性 SiC の形成が確認され，低温結晶化が可能であることが明らかとなった．さらに，Quantum ESPRESSO を用いた密度汎関数理論（DFT）計算結果を図 3 に示す．ビニルシラン分子とグラフェン表面との相互作用を評価した結果，完全なグラフェン表面では安定な吸着は見られない一方，欠陥部位では分子が近接・吸着することが確認された．このことから，CNT 表面に存在する欠陥が SiC 成長の核生成サイトとして機能することが示唆された．以上の結果より，本研究では，SiC 成長は「前駆体分子の欠陥部位への吸着→核生成→被覆成長」というプロセスで進行することが明らかとなった．

また，本成果は東北大学流体科学研究所における共同利用・共同研究として実施され，共同研究集会および国際会議 ICFD2025（Sendai International Center）においてポスター発表を行った．発表日は 2025 年 11 月 12 日である．

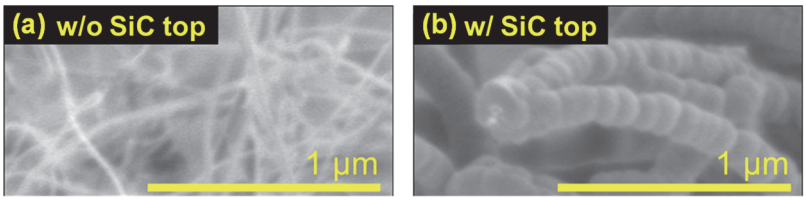


図 1 CNT の上部付近の SEM 像(a)SiC 被膜なし，(b)SiC 被膜あり

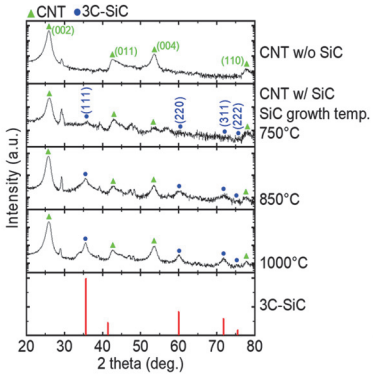


図 2 SiC 被膜前後の XRD パターン

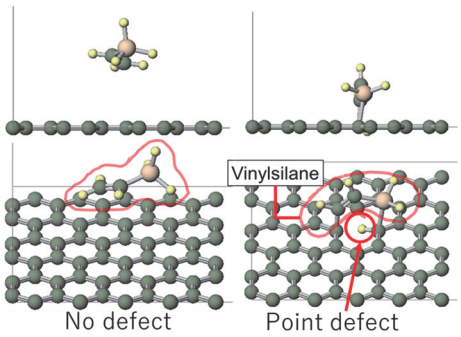


図 3 グラフェンにおけるビニルシラン吸着挙動

3. 研究目標の達成状況

申請書においては, ビニルシランを用いた低温 CVD による SiC 成長機構の解明を目的とした. 本年度は，SiC 被覆形成および低温結晶化の実験的知見に加え，DFT 計算により前駆体分子の吸着条件に関する基礎的理解を得た．一方，ReaxFF 分子動力学法による成長シミュレーションについては，力場構築に必要な教師データ整備に着手した段階である．これにより，次年度に向けた計算基盤を整備した.

4. まとめと今後の課題

本研究では，ビニルシランを用いた CVD により MWCNT への SiC 被覆形成および低温結晶化を確認するとともに, DFT 計算により前駆体分子の吸着条件に関する基礎的知見を得た．これにより，CNT 表面の欠陥が核生成に重要であることが示唆された．今後は，得られた知見を基に ReaxFF 分子動力学法を用いた成長過程の解析を行い，SiC 結晶成長機構の解明を進める．また，三次元構造への均一被覆条件の最適化を目指す.

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] N. Ohshima, K. Uehara, Y. Nakai, S. Fukuchi, S. Yasuhara, T. Tokumasu, K. Goshima, N. Taoka, W. Takeuchi: Formation of SiC Coating on MWCNTs via Thermal CVD with Vinylsilane, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-32, pp. 90-92.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I012
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	1 年目（発展）

羽ばたき運動を有する翼胴結合体まわりの流れの数値解析
Numerical Analysis of the Flow around a Wing-Body Combination Model with Flapping

石出 忠輝*†，永井 大樹**††
満永 基大***，長谷川 悠真*，徳海　庵*
*木更津高専機械工学科，**東北大学流体科学研究所
***木更津高専専攻科機械・電子システム工学専攻
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

近年，AI 技術の急速な広がりに呼応して，ドローン産業の持つ高い付加価値が認識され始めている．また，有人火星探査を目指す準備段階として，MAV の活用も実用化されつつある．本研究は，このような背景化において，バイオミメティクスの観点から鳥の羽ばたき運動を模した計算モデルを作成し，離陸・巡航・着陸の各飛行モードにおけるフラッピング，フェザリング及びリード・ラグの適切な組み合わせを調査する．

2. 研究成果の内容

2.1 解析条件

本解析では，数値解析手法として SIMPLEC 法を使用している．本解析ではツバメを模倣対象とし，離着陸時（U=2m/s ）および巡航時（U=10m/s ）を想定した飛行速度に応じて羽ばたき条件を設定した．解析条件一覧を表 1 に示す．境界条件としては流入側に離着陸時 U=2m/s，巡航時 U=10m/s の一様流速，流出側には圧力一定のディリクレ条件を与えた．その他の面は速度と圧力の勾配を 0 としたノイマン条件を与えた．

表 1：解析条件

Uniform flow velocity U	2m/s	10m/s
Reynolds number Re	6×10^3	3×10^4
Flapping frequency f	10Hz	7Hz
Flapping amplitude A_f	±30°	±50°
Feathering amplitude A_{fe}	±5°，10°，15°	
Lead-lag amplitude A_{ll}	±5°，10°，15°	
Offset angle α_0	5°，10°，15°	

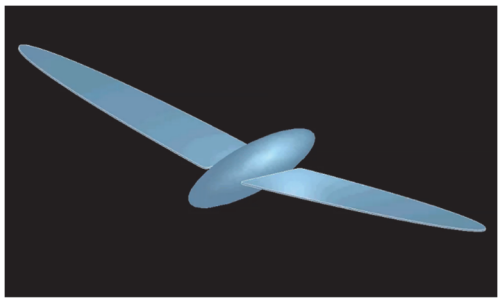


図 1：解析モデル

2.2 解析モデル及び格子生成

図 1 に解析モデルを示す. 本モデルは翼胴結合体であり，平均翼弦長 47.1 mm，翼幅 180mm の楕円翼，胴体は長軸 120mm，短軸 30mm の楕円体で構成されている. 図 2 に計算格子を示す．本解析では翼を動かす必要があるため, 物体移動に対応可能な重合格子を用いた．計算領域の大きさは，流れ方向に平均翼弦長 c の 40 倍とし，翼

幅方向および高さ方向についてもそれぞれ 20c としている．なお，翼および胴体の壁面近傍にはプリズム要素を 20 層配置しており，従属領域の総要素数は約 62 万点，独立領域の総要素数は約 774 万点となっている．

2.3 解析結果

2.3.1 離着陸時 (U=2m/s)

図 3 は推力係数 C_T と揚力係数 C_L との関係を示した散布図である．比較のため，図中には 1DOF（フラッピングのみ）と 2DOF（フラッピング＋フェザリング）の結果も併記した．この図を見ると，推力が最大となった条件は α_0=5°，A_{fe}=15°，A_{ll}=15°とした 3 自由度運動であった（図中○印）．本条件の振り下ろし中間点における渦構造を図 4 に示す．この図を見ると，翼全体にわたり前縁剝離渦（LEV）が存在していることが確認できる．特に 20～60%スパンでは，LEV が前縁付近に付着したまま存在し，その付近で低圧領域を形成している．このことが瞬間的な推力および揚力の増大に寄与しているものと考えられる．

2.3.1 巡航時 (U=10m/s)

図 5 に，C_T と C_L との関係を示した散布図を示す．この図を見ると，抗力最小となった条件は α_0=5°，A_{fe}=10°，A_{ll}=5°とした 3 自由度運動であった（図中○印）．本条件の振り下ろし中間点における渦構造及び圧力分布を図 6 に示す．この図を見ると，翼根元部から 50%スパン付近では明確な剝離渦は形成されていないが，20～40%スパンでは前縁付近に低圧分布が確認され，推力および揚力への寄与が考えられる．一方，50%スパンから翼端付近では翼全体にわたって渦構造がみられ，60～80%スパンでは低圧領域が翼弦中央付近に集中している．この低圧領域の前縁からの移動が，離着陸時に比べて推力への寄与が小さくなった要因であると考えられる．

3. 研究目標の達成状況

本公募共同研究では，3 自由度の羽ばたき運動を有する翼胴結合モデルを作成し，それぞれの運動の振幅を変化させて数値解析を行った．解析結果より，離陸時及び巡航飛行時における空力特性と渦構造の関係が明ら

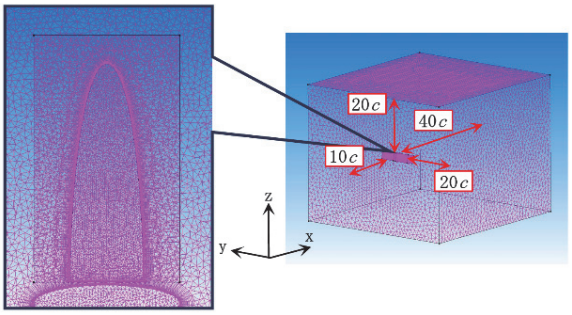


図 2：計算格子

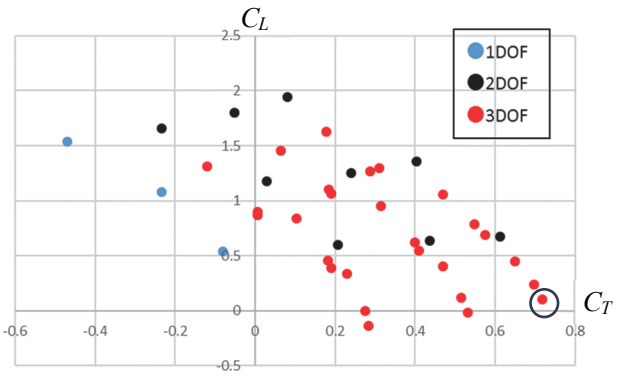


図 3： C_T - C_L 散布図 (U=2m/s)

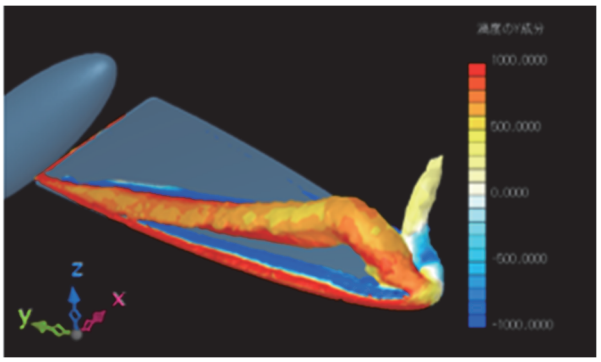


図 4： 渦構造 (U=2m/s)

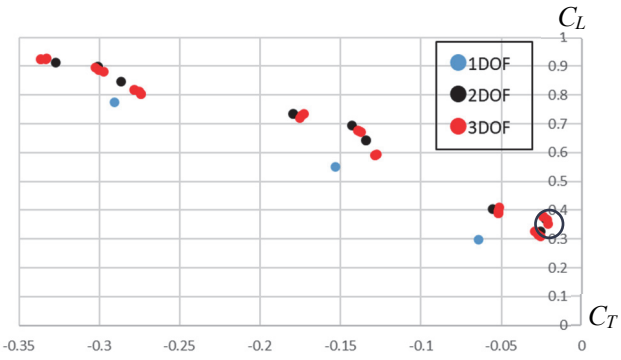


図 5： C_T - C_L 散布図 (U=10m/s)

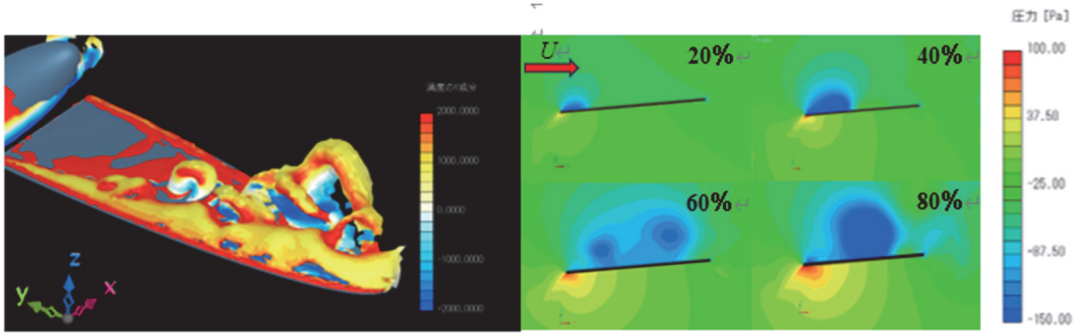


図 6： 渦構造及び圧力分布 (U=10m/s)

かになり，空力特性改善につながる羽ばたき運動パターンを見いだす事ができ，研究目標は概ね達成できたものと考えられる．

4. まとめと今後の課題

本公募共同研究では，鳥の羽ばたき飛行をフラッピング，フェザリング，リードラグの組み合わせで実現し，離陸及び巡航のそれぞれの飛行状態において，優れた空力特性を示す羽ばたき運動パターンに関する知見が得られたものと考えられる．今後は，鳥類特有の翼断面形状や風切羽にみられるスロットなどを模倣することで，巡航時における推力向上の可能性を探る．また，流入速度条件を段階的に調整し，剛体翼でも推力が発生する巡航速度範囲を明確化することで，より実用的な飛行条件の確立を目指していきたい．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] M. Mitsunaga, T. Ishide, H. Izumi, Y. Katsu, H. Nagai：Numerical Analysis of the Flow around a Wing-body Combination Model with Three-degree-of-freedom Flapping, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-5, pp. 25-26.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I013
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

複発ロータ機の流れ干渉効果がロータ性能に及ぼす影響の解明
Study on Flow Interaction Effect to Rotor Performance of Multirotors

大塚　光*†，永井 大樹**††，伊神　翼**，得竹　浩*
赤羽 峻瑛***，大川 真生**，原　大生***，小林 雪貴***
*金沢大学理工研究域，**東北大学流体科学研究所
***金沢大学大学院自然科学研究科
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は，小型マルチロータ機のロータ間流れ干渉時の推力変化のメカニズムの解明である．具体的には，地面近傍でのホバリング中と水平飛行中のマルチロータ機周りの流れ場を数値解析およびレーザーライトシート法による可視化実験によって把握し，推力変化と流れ場の対応を明らかにする．

2. 研究成果の内容

前身課題を発展させ，本課題ではロータ間での流れ干渉について，一様流れ中と地面効果中に分けて研究を行った．一様流れ中でのロータ間流れ干渉については CFD 解析により研究を推進した．その解析結果を学術論文として発表した(成果 2)．地面効果中のロータ間流れ干渉については，実験的アプローチにより研究を推進した．具体的には，胴体を有するクアッドロータ機の推力変動評価と流れ場の可視化，頂点効果中のロータ推力変動評価，有孔板による地面効果の抑制手法の確立，に取り組んだ．

・ 一様流れ中でのロータ間流れ干渉

CFD 解析により，一様流れ中に置かれた 2 枚のロータの推力の変化量を評価した．また，ロータブレードに負のプリコニング角をつけることで，単独ロータに生じる機首上げモーメントが減少することを示した(成果 2)．

・ 胴体を有するクアッドロータ機の推力変動評価と流れ場の可視化

これまでの研究では，4 つのロータのみでクアッドロータ機を模擬し，地面効果による推力変化の評価を行ってきた．しかし，実際の機体には中央に胴体があり，地面から上昇してくる噴流に胴体がさらされることで機体に上向きの揚力を生じる．そこで，胴体がある場合に胴体が受ける揚力と，ロータ推力の評価を行った．計測を行った結果，胴体がある場合でもロータ推力は地面近傍でホバリング推力よりも小さくなるが,胴体が受ける揚力増加が上回る場合がほとんどで,機体全体では機体を支える空気力がホバリング状態よりも大きくなることを確認した．

・ 頂点効果中のロータ推力変動評価

これまでの CFD 解析の成果を踏まえ，2 枚の壁と地面の 3 つに囲まれた頂点近傍でのロータ

推力変動の評価と，流れ場の状態を明らかにした(成果 1).

・　有孔板による地面効果の抑制手法の確立

地面効果によるロータ推力変動を抑制するため，着陸面に有孔板を備えた着陸パッドの敷設を提案した(図 1)．推力計測の結果，板下の高さと開口率が条件を満たす場合に，推力変動が 5%以下に抑えられることを確認した．更に，レーザーライトシート法による可視化によって，有孔板の開口率と板下高さに応じた，ロータ後流構造の変化を明らかにした(図 2)．加えて，PIV 計測による流速分布の定量的な評価に取り組んだ.

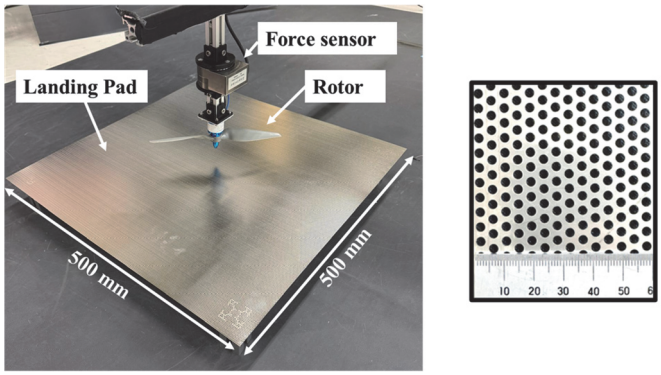
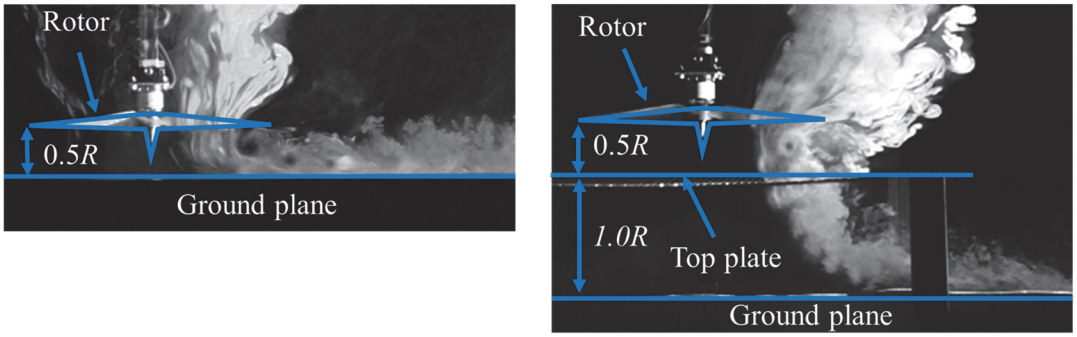


図 1：地面効果による推力変動を抑制する有孔板



(a) 地面　　(b) 穴空き着陸面

図 2：有孔板によるロータ後流構造の変化

3.　研究目標の達成状況

スーパーコンピュータシステム上で解析ツールの整備都合により，本課題期間内で CFD 解析による評価を計画通りに進めることができなかった．一方で，前進課題から続く 2023 年度までの解析成果を元に流れ構造を把握し，実験的なアプローチによる流れ構造の解明と，ロータ特性を変化させるための初期検討を行うことができた.

また実験的アプローチにより，クアッドロータ機の後流構造と，単独ロータの近接効果中のロータ後流構造を明らかにした．これらの成果は，今後実施する予定の数値流体解析の比較に供する.

4.　まとめと今後の課題

前身課題から通して，CFD 解析と実験的な評価により，ロータ間の流れが干渉する流れ構造の

解明に取り組んだ．その中で，有孔板や負のプリコニング角を持つロータブレード等の，ロータ特性を改善する手法の示唆を得ることができた．

本課題は流れ構造の解明とロータ推力の評価に取り組んだが，定性的な評価に留まった．流れ場の状態の比較や，空気力と流量変化を対応づけて議論するためには，ロータ配置をパラメトリックに変更しつつ，PIV 計測等により流れ場の速度分布などを定量的に評価する取り組みが期待される．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] H. Otsuka, H. Nagai, H. Tokutake: Negative coning angled blades for reducing small rotor pitching moment in forward flight, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, (in press).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] T. Hara, H. Otsuka, H. Tokutake, H. Nagai: Design Considerations for Landing Pads with Airflow Holes for Small Rotorcraft, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025), GS1-12.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

T. Hara, Best Presentation Award for Young Researcher, “Design Considerations for Landing Pads with Airflow Holes for Small Rotorcraft” *Twenty-second International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025), GS1-12.

課題番号	J25I014
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

突起を持つロータブレード周りの低レイノルズ数における流れ構造の解明
Study on Flow Structure around Rotor Blade with Turbulators in Low Reynolds Numbers

大塚　光*†，伊神　翼**††，佐々木 悠斗***，得竹　浩*
佐々木 大輔****，大崎 歩乃花****，川本 裕樹*****，永井 大樹**
*金沢大学理工研究域，**東北大学流体科学研究所，***金沢大学自然科学学研究科
****大阪公立大学工学研究科，*****東海大学工学部
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は低レイノルズ数領域において，突起を付けたロータブレードまわり流れの 3 次元構造を明らかにし，突起形状に応じてブレード表面での剥離状態を解明することである．

2. 研究成果の内容

3 つの大学で，1)騒音を抑制する突起配置の探索(金沢大)，2)カーボンナノチューブ感温塗料(cntTSP)によるブレード表面流れ構造の可視化(東北大)，3)翼面上に配置した突起まわり流れの数値流体力学(CFD)解析(大阪公立大)を進めている．

1)　突起配置の探索(金沢大)

突起の配置と数について騒音がより低減できる形態を探索した．ロータブレードのスパン位置中央から外側で突起に対して騒音特性が不感となる領域について評価を行った．騒音が低減できる一方で，突起の増加はホバリングの効率を示す Figure of merit が低下することを確認した．騒音低減と Figure of merit のトレードオフ関係を定量的に評価し，騒音を低減できる突起配置の設計情報を得る．

2)　cntTSP によるロータブレード表面流れの可視化(東北大)

風洞を用いて，固定翼として突起が翼表面の遷移状態に与える影響を調べた．突起をつけることで，最大失速角の増加と，剥離流れの再付着が促されることを確認した．一方で，失速角の増加効果は，レイノルズ数変化に敏感であることがわかった．

ロータブレード表面流れ場について cntTSP による可視化を試みたが，ロータの振動の影響を受けて，所望の解像度で可視化像を得られなかった．引き続き cntTSP によるロータブレード表面流れの可視化に取り組む．また，3 次元的な流れ構造を可視化するため，新たにスモークワイヤー法による可視化に取り組む．

3)　CFD 解析による突起周囲流れ構造の解析(大阪公立大)

平板固定翼に対して，半球状の突起を付加して CFD 解析を行った．流線型翼型での解析ではないものの，突起数と前縁からの突起の距離に応じて，突起背後の低圧領域の大きさが変化することを確認した．

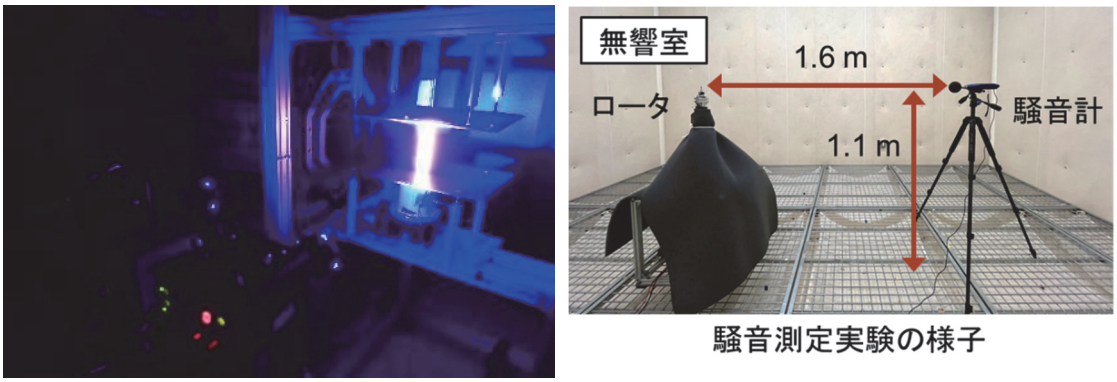


図 1：cntTSP を用いた突起付き翼の表面状態の可視化実験(左)とロータ騒音計測の様子(右)

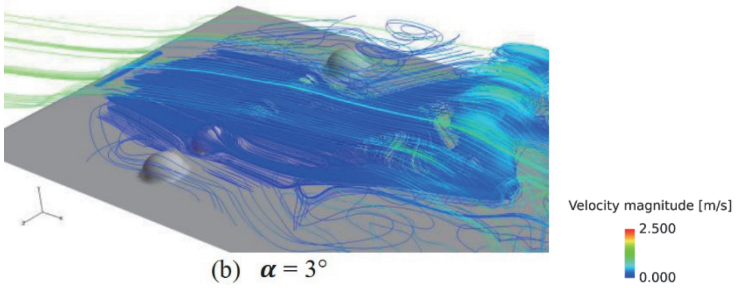


図 2：平板に取り付けた半球状突起周りの流れの CFD 解析結果

3. 研究目標の達成状況

cntTSP を用いた固定翼表面での遷移状態の可視化と，スモークワイヤー法による回転翼周囲の流れの可視化により，突起周りの流れ構造を把握することが可能になった．次年度では，両手法を用いて突起位置と流れ構造の対応を明らかにする．また，突起のブレードスパン位置が騒音に対する感度を持つことを突き止めた．突起の数を抑えつつ，突起のスパン位置を設計することで，空力性能と低騒音を両立するロータが設計できる可能性がある．

4. まとめと今後の課題

突起を翼に取りつけた際の流れ構造を，固定翼風洞実験，固定翼 CFD，回転翼実験により可視化した. 特性や観測限界が手法ごとに異なるが, 突起周囲の流れ構造を捉える手法を確立できた. 今後，騒音の大きさと揚抗比や Figure of merit などの空力特性の評価と，流れ場の解析を並行して進め，流れ構造とそれぞれの性能の対応を解明する．

数値解析結果の妥当性を評価するため，スモークワイヤー法による可視化結果の比較を行う．cntTSP による可視化では，固定翼の表面の遷移状態を分析できる結果を得たが，回転翼では振動による解像度低下が生じることがあった．振動対策を施し，表面流れ構造を議論できる解像度での表面状態の可視化を試みる．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 佐々木悠斗，大塚光，得竹浩，佐々木大輔，伊神翼，永井大樹: サバの尾びれを模倣した突起付き小型ロータの騒音評価，日本航空宇宙学会第 56 期年会講演会，東京都文京区，S10，2025.

[2] 大崎歩乃花，佐々木大輔，川本裕樹，岡本正人，佐々木悠斗，大塚光，伊神翼: 低レイノルズ数における平板に設けた突起まわり流れの 3 次元解析，第 57 回流体力学講演会/第 43 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム，東京都江戸川区，3C05，2025.

[3] 佐々木悠斗，得竹浩，佐々木大輔，伊神翼，大塚光: 小型ロータブレード表面の突起分布に対する騒音低減量の評価，第 63 回飛行機シンポジウム，沖縄県那覇市，1C10，2025.

[4] H. Osaki, D. Sasaki, Y. Kawamoto, M. Okamoto, T. Ikami, H. Sasaki, H. Otsuka: Numerical Analysis of the Three-Dimensional Flow Around Installed Protuberances on a Flat Plate at Low Reynolds Numbers, *Proceedings of 16th Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Seoul, Korea,* (2025), S5-1, p. 00186.

[5] H. Otsuka, H. Sasaki, H. Tokutake, T. Ikami, H. Nagai, H. Osaki, D. Sasaki, Y. Kawamoto: Study of Vortex Generators on Small Rotor Blades for Minimizing Noise Emissions, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-6, pp. 27-28.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（受賞）

優秀講演賞(学会賞)，低レイノルズ数における平板に設けた突起まわり流れの 3 次元解析，大崎歩乃花，2025.7.4，第 57 回流体力学講演会／第 43 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム，日本航空宇宙学会.

課題番号	J25I015
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	3 年目

低速尾翼バフェットの理論・解析モデルの構築
Low-Speed Aeroelastic Buffeting of Tail Wings: Theory and Analysis

大塚 啓介*†, 阿部 圭晃**††
芳賀 臣紀***
志村 賢人*
*東北大学工学研究科, **東北大学流体科学研究所, ***宇宙航空研究開発機構（JAXA）
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

2050 年のカーボンニュートラル達成のためには, 旅客機の軽量化と主翼の高アスペクト比化による燃費向上が必要である. 高アスペクト比翼の大変形空力弾性解析法は様々なものが提案されている. しかし, 大変形主翼（特に離着陸における低速・高迎角時）によって生じる複雑な後流場が尾翼に引き起こすバフェット振動の効率的な解析法は未だ確立されていない. これは複雑な後流場の再現には LES をはじめとする高忠実度 CFD が必要であるが, 物体境界が移動するような非定常空力弾性問題に対しては, 膨大な格子の再生成などが必要になるため, 高忠実度 CFD をそのまま使えないからである. 本研究では一般的な旅客機形態である「主翼と尾翼は近接していない」ことを活用した尾翼バフェットの数値解析法を構築し, その解析精度を風洞実験で実証することを目的とする.

2. 研究成果の内容

研究３年目となる 2025 年度はより実機に近い形状を模擬するため磁力支持風洞天秤装置を用いた実験を行った. 図１に示すように主翼と尾翼を有する航空機模型を作成した. 模型内部に磁石があり, 磁力支持風洞を支持棒なしに浮上できる. この初期検討では磁力浮上を容易にするため模型の前後重量を等しくなるように主翼と尾翼のサイズを同じものにした. 翼の変形をレーザ変位計で計測できるようにした. ただし, いきなり通風して尾翼バフェットの実験を行うのは困難であるため, まずは浮上磁力を周期的に変動させた場合の主翼の変形を解析と実験で比較した. 図３はその結果を示す. なお, Model Displacement は周期的な磁力変動によって引き起こされる胴体の強制変位を表しており, Wing Deflection が翼の変形量を表している. 点線の解析値と実線の実験値の良好な一致が確認できた.

3. 研究目標の達成状況

本研究申請時の予想される成果は「継続３年目には論文成果が期待できる」ことであったが, その前段階となる解析理論の論文査読が長引いており, 論文投稿はできなかった. 来年度の論文投稿を目指す.

4. まとめと今後の課題

磁力支持風洞を導入することで研究目標達成に必要としていた以上の実験環境が構築できた.

磁力支持風洞で空力弾性変形試験を行った研究は世界的にも類をみないものであると考えている．今後の課題は，その成果を迅速に論文としてまとめることである．

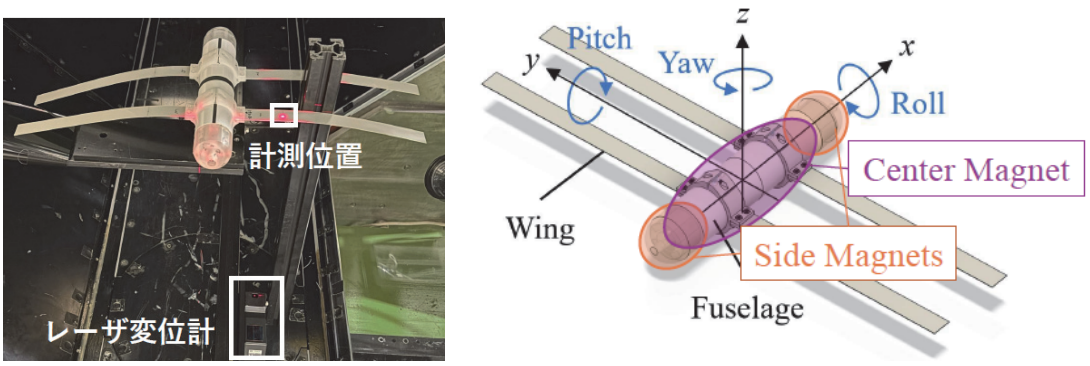


図１ 磁力支持天秤用の低速バフェット実験模型

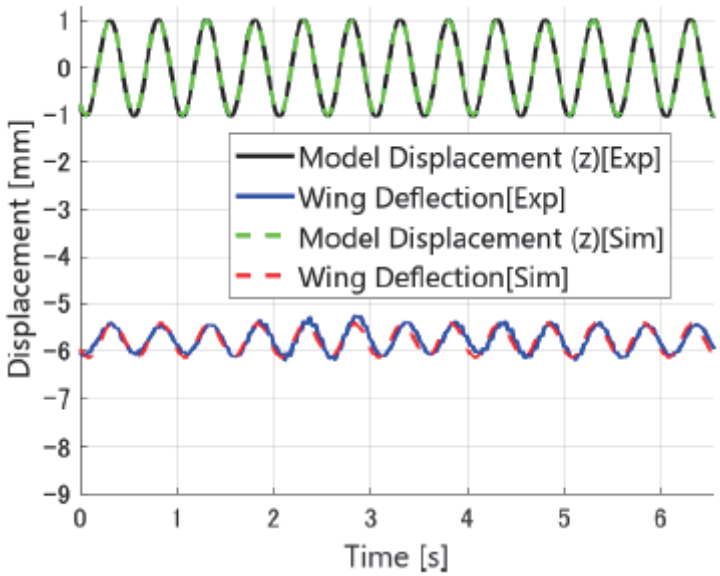


図３　変位の時間履歴

5.　研究成果

1）　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2）　国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1]　Shimura, K., Otsuka, K., Abe, Y., “Flexible Wing Simulation and Experiment Using Magnetic Suspension and Balancing System,” *22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2025)*, Sendai, Japan, November 11th, 2025.

3）　その他　（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project Code	J25I016
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Performance Investigation and Optimization Analysis of a Spectral Splitting Concentrating Photovoltaic Thermal (CPVT) System with a Unique Design: Numerical and Experimental Approaches

Abid Ustaoglu*†, Junnosuke Okajima**††
Bilal Kursuncu*,
*Faculty of Engineering, Architecture, and Design, Bartın University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Solar concentrators use reflective mirrors or lenses to concentrate larger area of sun light into a small area, thereby increasing the heat flux. They can be adapted into a photovoltaic system. However, high solar radiation can cause hot spot generation on the PV surface. Increasing PV temperature reduces electrical efficiency and system performance. Integrating a cooling fluid circulation into the PV system reduces the PV panel's temperature and enables thermal energy recovery. Thus, overall energy utilization and system performance are enhanced. Various strategies have been explored to improve the thermal management of PV systems.

One effective approach is the use of optical filters to split solar radiation by wavelength. In this method, wavelengths within the PV cell's spectral response range are transmitted through the optical filter and reach the surface, while the remaining wavelengths are absorbed by the filter. This reduces the heat load on the PV cell, lowers its temperature, and improves electrical efficiency. Many studies have shown that spectral splitting can enhance the overall performance of photovoltaic systems.

However, most existing studies focus mainly on the design or analysis of spectral splitting systems under specific conditions. The combined effect of cooling fluid temperature and improvements in CPV systems has not been studied in detail. Therefore, this study aims to fill this gap by examining how cooling-fluid temperature and system design improvements influence the thermal and electrical performance of CPVT systems using spectral-selective optical filters. The main objective of this project is to investigate spectral-splitting non-imaging concentrating photovoltaic-thermal (CPVT) systems, optimize their design and operating parameters, and develop a novel, cost-effective system configuration.

2. Details of program implement

In the project, numerical, experimental and optimization studies have been conducted to investigate CPVT system. In this study, a compound parabolic concentrator (CPC) was used in the concentrating photovoltaic thermal (CPVT) system. The concentrator was designed with a concentration ratio of 2 and an acceptance angle of 30°. Experimental tests on PV, PVT, and CPC-CPVT systems were conducted on July 21, 2025, on the rooftop of the Faculty of Engineering, Architecture and Design at Bartın University, Türkiye (41.6°N, 32.3°E).

A Shenchen YZ1515x DF600 peristaltic pump (±0.5% accuracy) was used to circulate the coolant at a constant flow rate of 150 mL/min. Temperature and solar radiation data were recorded using a Hioki LR8450 data logger with a U8550 module (±0.3% reading accuracy), while K-type thermocouples (±0.4% accuracy) were used to measure inlet, outlet, and ambient temperatures. Global solar irradiance was measured using an EKO MS-410 pyranometer with an uncertainty of approximately ±3%.

An I–V measurement system was employed to monitor electrical performance parameters, including current, voltage, short-circuit current, and open-circuit voltage. A water storage is used to ensure continuous fluid circulation within the system. The systems was oriented southward. The collector tilt angle was set to be 22° for maximum solar utilization. Figure 1 illustrates the schematic diagram of the experimental setup. Figure 2 shows a photo of the experimental setup.

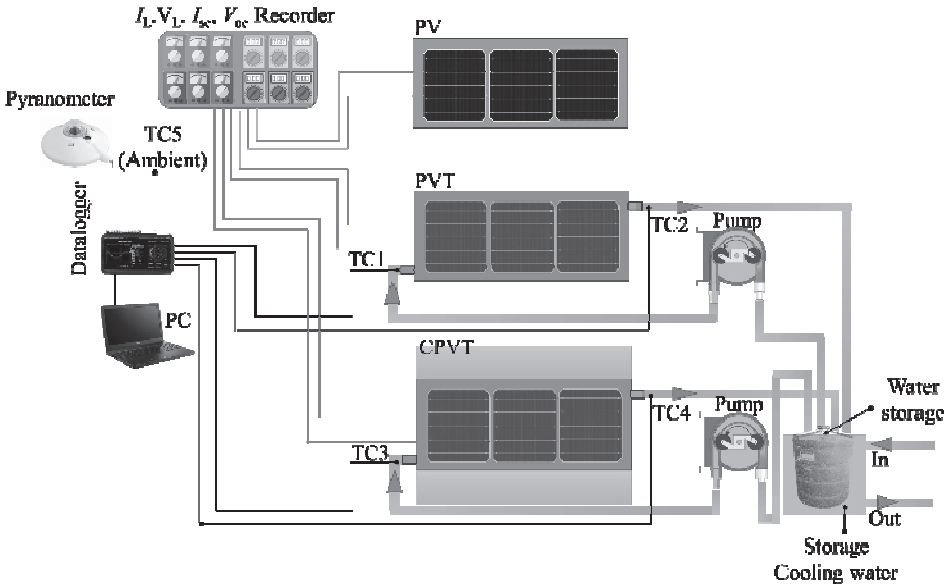


Figure 1: Schematic diagram of the experimental setup.

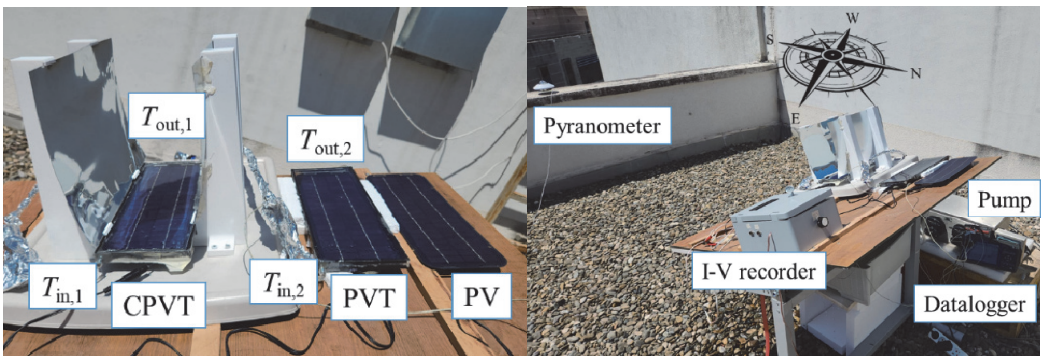


Figure 2: Experimental setup of the CPVT, PVT and PV systems

The experiments were conducted on July 22, 2025, on the rooftop of the Faculty of Engineering, Architecture, and Design at Bartın University (41.6°N, 32.3°E). The global, direct, and diffuse solar radiation are shown in Fig. 3. The highest global radiation was measured around noon hours (at 13:00) to be 939 W/m². The direct part of the global radiation reached 822.8 W/m². The diffuse radiation was calculated to be 136.9 W/m². These results show that about 87% of global radiation is falling into the part of the diffuse radiation. These results indicate that the weather conditions were mostly clear sky during the experiment.

Figure 4a shows the change of the short-circuit current (I_{SC}) for the CPVT, PVT, and PV systems. The CPVT system shows the highest current values among the systems. The average I_{SC} values were 0.29 A for CPVT, 0.15 A for PVT, and 0.16 A for PV. This improved performance of CPVT is mainly due to cooling and spectral filtering. These effects keep the cell temperature lower. Moreover, it provides more useful radiation to reach the PV surface regarding to the spectral response range of PV. In the case of the PVT and PV systems, lower current values were obtained.

Figure 4b shows the open-circuit voltage (V_{OC}) of the systems. The CPVT system shows the highest average V_{OC} value of 21.40 V. It is followed by the PVT with 21.22 V, while the PV system has the lowest value of 19.29 V. The higher voltage in CPVT and PVT systems is mainly related to cooling. It reduces cell temperature and improves electrical performance. In the case of the PV, it provides a lower voltage due to higher PV temperatures. Figure 4c illustrates the electrical power output of the systems. The maximum power generation (P_{max}) can be calculated by I_{SC} x V_{OC} x FF. To calculate the upper limit of the electrical output, the fill factor (FF) was considered to be 1. The CPVT system produces the highest power with an average value of 6.31 W. The PVT and PV systems have lower values of 3.25 W and 3.15 W, respectively. The better performance in the CPVT comes from the combined effects of solar concentration, spectral filtering, and cooling. It showed that the system can efficiently use solar energy. In the case of PV, the systems produce lower power due to their conventional designs without concentration or spectral filtering.

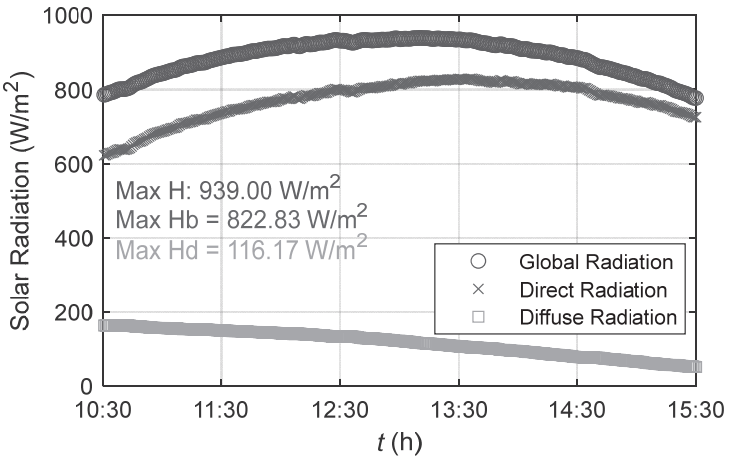


Figure 3: Global, direct, and diffuse solar radiation.

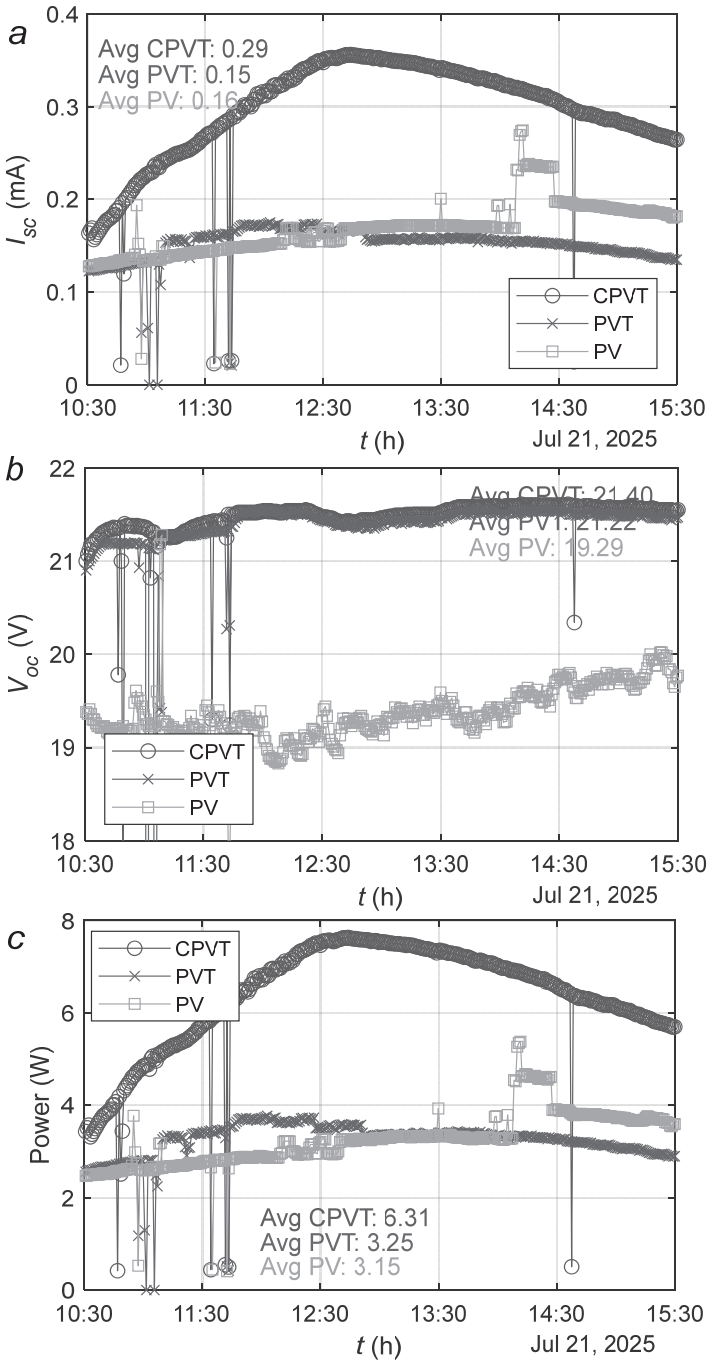


Figure 4: ISC , VOC and maximum power generation based on ISC and VOC.

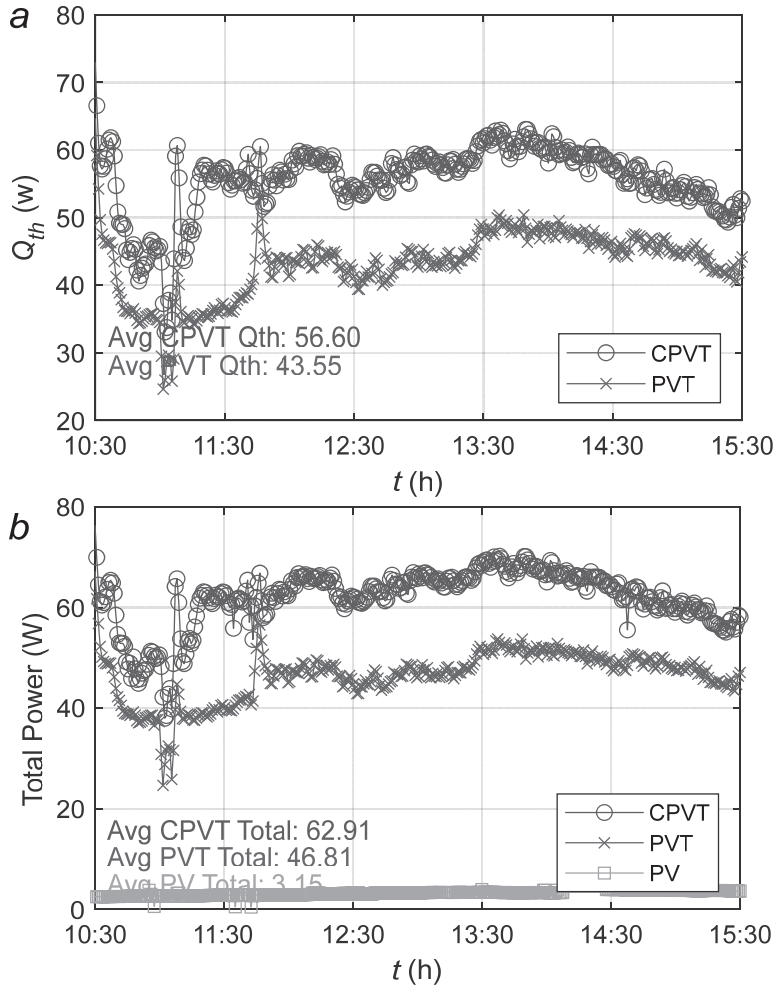


Figure 5: Q_{th} and total power generation of the CPVT, PVT and PV systems.

3. Achievements

A number of collaborative research activities have been carried out within the ongoing partnership between Abid Ustaoğlu, Bilal Kursuncu, and Professor Junnosuke Okajima at the Institute of Fluid Science, Tohoku University. As part of this collaboration, Ustaoglu and Kursuncu conducted a short-term research visit to Japan between November 1 and November 24, 2025.

During this period, active participation was ensured in leading international scientific events. The research team presented their recent findings at the 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025) and the 25th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2025), thereby disseminating their ongoing work and strengthening international academic collaboration.

As a scientific output of the current period, the following journal article has been published: Ustaoglu, A., Akgül, V., Kursuncu, B., & Okajima, J. (2025). Performance investigation of non-imaging concentrating photovoltaic thermal systems with metal oxide and ceramic-based nanofluids: numerical study and genetic algorithm-based multi-objective optimization. Applied Thermal Engineering, 128425.

In this study, the combined effects of nanofluids and non-imaging concentrators in CPVT have been investigated. Numerical analysis and genetic algorithm-based

multi-objective optimization have been conducted. Three types of nanofluids (SiC, Al_2O_3, and ZnO) and concentrators (CPC, V-trough, and CHC) were analyzed to improve thermal, electrical, and overall system performance. The results show that SiC-based nanofluids provide the highest efficiency. The best overall performance was achieved with the V-trough. CHC can provide a compact and cost-effective design. The study demonstrates that integrating nanofluids with optimized system parameters can significantly enhance performance while reducing overall cost.

The present study is the next step of the previous project titled “Numerical, experimental, and optimization analysis of a novel solar concentrating photovoltaic thermal (CPVT) system and investigation of phase change heat transfer on the working fluid for performance advancement.” In that project, numerical modeling, experimental analysis, and optimization were performed for various CPVT systems. In the new project, CPVT systems have been developed using spectral splitting approaches. In this perspective, the published article serves as a critical link between the two projects by integrating nanofluid-based thermal enhancement, non-imaging concentrator geometries, and genetic algorithm-based optimization.

In addition to the publications, experimental studies were conducted on non-imaging concentrating photovoltaic thermal (CPVT) systems with optical filter. The experiments focused on evaluating the combined effects of solar concentration, spectral filtering, and cooling mechanisms under real operating conditions. The results demonstrated that the CPVT system outperforms conventional PV and PVT systems in terms of electrical and thermal energy gain due to enhanced thermal regulation and more effective utilization of the solar spectrum. We are currently preparing a new manuscript and plan to submit it to an international journal soon. Overall, the studies conducted during this period have improved scientific understanding of CPVT systems, strengthened international collaboration, and provided a strong base for future research and development.

4. Summaries and future plans

During the project, numerical, experimental, and optimization studies have been carried out for non-imaging CPVT systems. Nanofluids were used to improve heat transfer and remove heat from PV cells. Different types of concentrators and nanofluids were tested to see the effect on system performance. A paper was published on this topic.

Experiments were also conducted under real ambient conditions for a spectral-splitting CPVT system. The results showed that CPVT systems have higher electrical and thermal performance than PVT and standard PV systems. This is mainly due to better cooling, solar concentration, and effective use of solar energy through spectral splitting. A new paper have been prepared and will be submitted to an international journal (Q1/Q2 SCI) soon.

As a future work, we will focus on improving spectral-splitting CPVT systems by combining optical filters with nanofluids. Various optical filter fluids will be considered regarding their thermal, electrical, and economic performance. Optimization studies will be conducted to determine the optimum design and operating conditions.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] A. Ustaoglu, V. Akgul, B. Kursuncu, J. Okajima. Performance investigation of non-imaging concentrating photovoltaic thermal systems with metal oxide and ceramic-based nanofluids: numerical study and genetic algorithm-based multi-objective optimization, *Applied Thermal Engineering*, 280 (2025), 128425, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128425.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[2] A. Ustaoglu, B. Kursuncu, T. Altiok, H. Buyukpatpat, M. O. Karaagac, J. Okajima, Enhancing Thermal and Electrical Performance of CPC-Based CPVT Systems Using Spectrally Selective Optical Filters, *Proceedings of the Twenty - fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-46, pp. 132-135.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Bartın University, Faculty of Engineering, Architecture and Design Web Site, "International Research Cooperation in Japan and Participation in ICFD 2025".2025.12.30
https://engineering.bartin.edu.tr/haberler/international-research-collaboration-in-japan-and-participation-in-icfd-2025.html

Project Code	J25I017
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Health, Welfare and Medical Cares
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	2nd year

Hemodynamics at Internal Carotid Artery with Aneurysm in Elastic Full-scale Patient Specific Model

Nadia Shaira Shafii*†, Kahar Osman**, Ryuhei Yamaguchi***
Mohamad Ikhwan Kori*, Ahmad Zahran Md Khudzari*, Makoto Ohta***††
*Department of Biomedical Engineering & Health Science, Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia
**Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, Johor, Malaysia
***Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, 980-8577 Miyagi, Japan
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this project is to study the wall vessel elasticity also the hemodynamics parameters impact to the embolized aneurysm using simulation and experimental study.

2. Details of program implement

Phase No	Objectives	Method	Output	Remark
1 4/2024-3/2025	– Identify the optimum porosity level of the coil to embolize an aneurysm – Simulate the simplified models of aneurysm with MCA (treated vs untreated) using CFD	– Simulate few levels of coil porosity and, compare of hemodynamic effects between treated and untreated aneurysm	– Results submitted for publication to IJBET and MJMHS – submitted. Paper IJBET was no updated, so submit to JATEP.	UTM Biomedical CFD team
2 4/2025-3/2026	– To study the endothelial cells' response an aneurysm with an aneurysm (treated and untreated) – To analyse the effect of hemodynamic	– Simulate through 1-way FSI simulation, analyse and compare the result, either used CFD or simVascular software	– Result still in progress and ongoing by degree and master student	UTM Biomedical CFD team and IFS

	characteristics to the vessel compliance that may lead to coil migration			
3 4/2026-3/2027	To validate and verify the wall elasticity compliance between the simulation and the experiment	- Data analysis, phantom making and PIV experiment	- Data collection, analysis, verification and validation	-IFS and UTM

3. Achievements
   - A simplified porous medium aneurysm was studied numerically and experimentally
   - An FSI of ICA had been simulated and analysed to know the impact to the endothelial cells before proceed for the two-way FSI.

4. Summaries and future plans
   - Next phase will be focused on structural analysis to study the elasticity effectiveness and the impact to the embolized aneurysm using numerical simulation either in one way or two-way FSI. Focusing on the stiffness,

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] Bt, A. N., Sadri, S., Shaira Binti Shafii, N., Yamaguchi, R., Osman, K., Kori, M. I., Rashdan Bin Saad, M., & Ohta, M. (n.d.). Effect of High-Porosity Endovascular Coiling on Hemodynamics and Thrombosis Formation in Middle Cerebral Artery Aneurysm: A CFD-PIV Study. *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences*, 21(6), 2636–9346. https://doi.org/10.47836/mjmhs.v21.i6.1416 - PUBLISHED

[2] Yamaguchi, R., Albadawi, M., Shafii, N. S., Saito, A., Nakata, T., Saqr, K. M., Anzai, H., & Ohta, M. (2025). Effects of wall compliance on pulsatile flow in a full-scale, patient-specific cerebral aneurysm model: Particle image velocimetry experiments. *Medical Engineering and Physics*, 142. https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2025.104381-PUBLISHED

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[3] Shaira Shafii, N., Osman, K., Yamaguchi, R., Anzai, H., & Ohta, M. (2025). Assessment of Porous Medium Coil Packing on Hemodynamics in Large and Small Intracranial Aneurysms. *The Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics ICFD2025*, *22*, 732–734. https://doi.org/10.1007/978-3-030 -**PUBLISHED**

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project Code	J25I018
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Intrinsic Instabilities of Partially Cracked Ammonia/Air Flames

Zheng Chen*†, Youhi Morri**††
*Peking University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective of this collaborative research project is to systematically investigate the intrinsic instability characteristics of partially cracked ammonia/air premixed flames using high-fidelity direct numerical simulations (DNS) with detailed chemical kinetics and a mixture-averaged transport model including Soret diffusion.

Ammonia is a promising carbon-free energy carrier, but its low reactivity hinders direct use in practical combustors. Partial cracking of ammonia into H_2 and N_2 offers an in-situ strategy to enhance flame propagation while avoiding separate hydrogen storage. However, the introduction of highly diffusive H_2 triggers strong thermo-diffusive (TD) instabilities, which couple with hydrodynamic (Darrieus–Landau, DL) instabilities and profoundly alter flame morphology, propagation speed, and pollutant formation.

This project aims to:

- Quantify the effect of Soret diffusion on the linear and nonlinear instability evolution of lean to rich H_2/air flames, providing a baseline understanding of differential transport mechanisms.
- Elucidate the linear and nonlinear instability behavior of partially cracked $NH_3/H_2/N_2$/air flames over a wide range of cracking levels and equivalence ratios.
- Decouple the roles of fuel enrichment (H_2) and inert dilution (N_2) in stabilizing or destabilizing the flame.
- Develop a fast and accurate machine-learning model to predict full dispersion relations, overcoming the computational bottleneck of DNS for ammonia-containing mixtures.

The ultimate goal is to provide fundamental physical insights and an efficient predictive tool for the design of safe and high-efficiency ammonia-based carbon-free combustion systems.

2. Details of program implement

The collaborative research was conducted between Peking University (China) and the Institute of Fluid Science (IFS), Tohoku University (Japan), with additional cooperation from the University of Stuttgart (Germany).

All DNS were performed using the in-house code EBDnsFOAM (developed at IFS and the University of Stuttgart), which solves the fully compressible reacting flow equations with finite-rate chemistry. A mixture-averaged transport model including Soret diffusion was employed. For hydrogen/air flames and ammonia/air and partially cracked ammonia flames, the detailed mechanism was used. The computational setup is shown in Fig. 1.

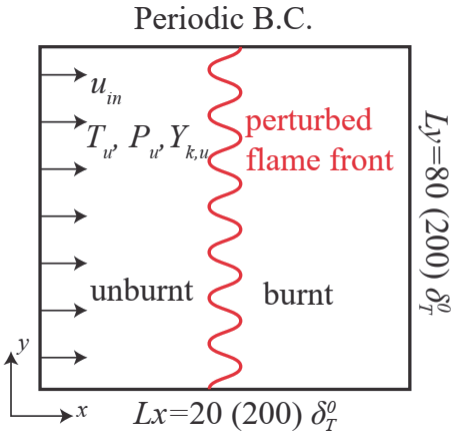


Figure 1: Computational setup and boundary conditions. Domain dimensions for the linear (nonlinear) regime analysis are also indicated. The flame front is shown with a single harmonic perturbation for better visualization.

Collaborative activities:

- Regular commutations through emails and online meetings between Prof. Zheng Chen (Peking University) and Prof. Youhi Morii (IFS) to discuss numerical methodologies, results, and manuscript preparation. Exchange of simulation data and post-processing scripts between the two groups.
- Prof. Youhi Morii (IFS) visited Peking University During Jul. 7-9 and discussed with Prof. Zheng Chen (Peking University). Prof. Zheng Chen (Peking University) attended the 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2025), held at IFS, Tohoku University, Sendai, Japan, on November 10–13, 2025 and discussed with Prof. Youhi Morii (IFS).
- Joint presentations at the 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2025): (1) Poster: "Effect of Soret Diffusion on Intrinsic Instability of Hydrogen/Air Flames" (Wen et al.); (2) Oral: "Intrinsic Instabilities of Partially Cracked Ammonia/Air Flames" (Wen et al.).
- Joint paper: submission of a manuscript to *Combustion and Flame* and revision of another paper for the *Proceedings of the Combustion Institute*. [1] Q. Wen, Y. Wang, L. Yang, Y. Morii, T. Zirwes, S. Wang, Z. Chen, Effects of Soret diffusion on the intrinsic instability of premixed hydrogen/air flames, accepted as an oral presentation at the 41st International Symposium on Combustion, and is under revision for publication in the Proceedings of the Combustion Institute; [2] Q. Wen, T. Wang, Y. Wang, L. Yang, Y. Wang, T. Zirwes, Y. Morii, S. Wang, Z. Chen, Intrinsic Instabilities of Partially Cracked Ammonia/Air Flames, paper submitted to Combustion and Flame.

3. Achievements

The project has fully achieved all expected outcomes stated in the application form. The main achievements are as follows.

(1) Variation patterns of instability in partially cracked ammonia/air flames with cracking level

For the first time, a distinct non-monotonic variation of flame instability with the ammonia cracking level has been systematically identified. Under lean to slightly rich conditions, the maximum perturbation growth rate first increases, reaches a peak at moderate cracking levels (around 40% to 60% cracking), and then decreases. This

behavior is consistently observed in both the linear dispersion relations and the nonlinear flame properties, such as the super-adiabatic temperature ratio and the stretch factor. The underlying mechanism has been clarified by separating the flame's response into two contributions: at low cracking levels, destabilization due to tangential strain dominates; at high cracking levels, stabilization due to curvature becomes more important.

(2) Individual and combined effects of Darrieus–Landau and thermo-diffusive instabilities

The separate and interactive roles of hydrodynamic (Darrieus–Landau) and thermo-diffusive instabilities have been quantitatively analyzed. For lean mixtures, the thermo-diffusive instability is dominant, and increasing the hydrogen content through cracking strongly enhances this instability. For rich mixtures, the flame is thermo-diffusively stable, and the Darrieus–Landau instability governs the overall behavior; increasing cracking reduces the density jump across the flame and thus suppresses the hydrodynamic instability. The nitrogen produced by ammonia cracking acts as an inert diluent and has opposite effects depending on the mixture: it enhances instability in lean mixtures (by further reducing the effective Lewis number) but suppresses instability in rich mixtures (by reducing thermal expansion). The competition between the two instability mechanisms explains the non-monotonic trends observed at intermediate cracking levels and near stoichiometric conditions.

(3) Linear regime: dispersion relation (growth rate versus wavenumber)

High-fidelity direct numerical simulations have been performed to compute the full dispersion relations for partially cracked ammonia/air flames over a wide range of equivalence ratios (from lean to moderately rich) and cracking levels (from zero to full cracking). The relationship between the perturbation growth rate and the wavenumber has been accurately quantified and the results are shown in Fig. 2. The calculations include Soret diffusion effects, which are found to modify the growth rates, especially under lean conditions. For hydrogen/air flames, a critical equivalence ratio (around 1.7) has been identified where the influence of Soret diffusion reverses from destabilizing to stabilizing; this finding also serves as a reference for understanding differential transport in ammonia-hydrogen blends.

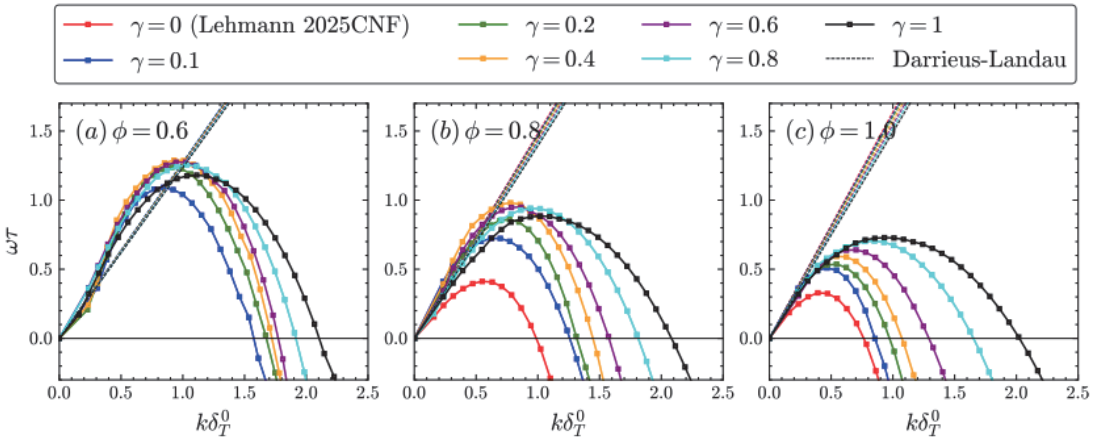


Figure 2: Dispersion relations of partially cracked ammonia/air flames for various cracking levels and equivalence ratios. The dash lines represent the corresponding theoretical predictions of the Darrieus-Landau instability.

(4) Nonlinear regime: fuel consumption speed and cellular flame structure

The influence of cracking level on the global fuel consumption speed and the flame

morphology has been examined in detail. As the cracking level increases, the flame front changes from a relatively smooth, Darrieus–Landau-dominated shape to a highly wrinkled, thermo-diffusively unstable cellular structure with many small-scale cells. However, contrary to intuition, the normalized fuel consumption speed does not increase monotonically with cracking. Although the local stretch factor (which enhances the local flame speed) increases with cracking, the total flame surface area decreases because the characteristic size of finger-like structures becomes smaller. Local flame dynamics have been further analyzed using the Karlovitz number and curvature probability density functions. The results show that moderate cracking (around 60%) maximizes the positive stretch and the reaction rate enhancement in positively curved regions of the flame front.

(5) Filling the research gap and providing new insights

This study fills a gap in the analysis of intrinsic instabilities of partially cracked ammonia flames. It provides the first comprehensive dataset of dispersion relations for ammonia/hydrogen/nitrogen/air mixtures, including the previously unquantified effect of nitrogen dilution. Moreover, a physics-inspired deep neural network trained exclusively on hydrogen/air data has been developed. This model achieves accurate zero-shot prediction of the full dispersion relations for partially cracked ammonia flames, demonstrating that the underlying instability mechanisms are universal (see Fig. 3). The neural network bypasses the prohibitive computational cost of direct numerical simulations for ammonia chemistry and outperforms classical theoretical models.

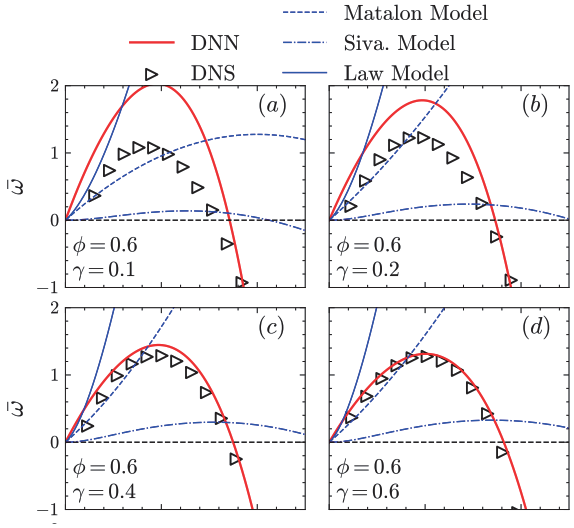


Figure 3: Zero-shot extrapolation performance of the H_2/airtrained DNN on partially cracked ammonia flames. The subplots display the dispersion relations at $\phi = 0.6$ across a wide range of ammonia cracking levels.

.

In summary, **all expected results have been accomplished**: the variation of instability with cracking level has been revealed; the individual and combined effects of Darrieus–Landau and thermo-diffusive instabilities have been analyzed; the linear dispersion relations have been computed; the nonlinear fuel consumption speed and cellular structures have been examined with mechanistic explanations; and the research gap has been filled, providing new insights into the combustion dynamics of partially cracked ammonia/air mixtures.

4. Summaries and future plans

(1) Summary

This first-year collaborative research has successfully quantified the previously

unclear role of Soret diffusion in hydrogen flame instabilities and provided the first systematic investigation of intrinsic instabilities in partially cracked ammonia/air flames. A critical equivalence ratio (ϕc=1.7) governing the reversal of Soret sensitivity was identified. For ammonia cracking, a non-monotonic instability response was discovered and mechanistically explained via two distinct Markstein numbers. Furthermore, a deep learning model trained only on hydrogen data was shown to accurately predict ammonia flame dispersion relations, demonstrating the universal nature of the underlying physics.

(2) Future plans (April 2026 – March 2027)

- Extend the analysis to three-dimensional DNS to capture more realistic flame dynamics and assess the effect of Soret diffusion on turbulent flame properties.
- Investigate the influence of elevated pressure and preheat temperature on the instability of partially cracked ammonia flames, relevant to gas turbine and engine conditions.
- Improve the DNN model by incorporating additional input features (e.g., pressure, temperature) and train on a combined H_2/NH_3 database to further enhance predictive accuracy across the full cracking range.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable (two papers were submitted but not published).

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Q. Wen, Y. Wang, L. Yang, Y. Morii, T. Zirwes, S. Wang, Z. Chen, Effect of Soret Diffusion on Intrinsic Instability of Hydrogen/air Flames, poster presentation, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-35, pp.98-101.

[2] Q. Wen, Y. Wang, L. Yang, T. Zirwes, S. Wang, Z. Chen, Intrinsic Instabilities of Partially Cracked Ammonia/Air Flames, oral presentation, *22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2025)*, Nov. 10-13, 2025, Sendai, Japan, OS2-37.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable (two papers were submitted but not published).

課題番号	J25I019
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

電磁場作用下でのテイラー・クエット流動場の解明とエネルギー変換装置への応用
Elucidation of Taylor-Couette Flow Field under Electromagnetic Fields and Its Application to Energy Conversion Devices

小林 宏充*†，高奈 秀匡**††
長谷部 喬大***，難波 克好***，藤野 貴康****
*慶應義塾大学法学部，**東北大学流体科学研究所
筑波大学大学院理工情報生命学術院，*筑波大学システム情報系
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

テイラー・クエット流れは，乱流遷移やその乱流構造の詳細な分類研究が今なお発展している一方で，粘弾性流体や壁面粗さといった新しい観点を加えた混合制御を目的とした工学的応用へとさらに研究範囲が広がっている．内円筒の回転速度が増加するにつれ，円周方向に回転軸をもつロール状のテイラー渦が形成され，さらに回転速度が増加するとテイラー渦が軸方向に波を打つ波動渦流れが形成され，さらに回転速度が増加すると乱流へと遷移する．本研究では，貴研究所の高奈教授が電磁流体（MHD）エネルギー変換装置の実験実証に成功した液体金属を用いたテイラー・クエット流に着目する．本装置では，風車の回転トルク制御と同時に余剰風力を電力に変換して取り出すことができ，風車のみならず多様な回転機器のトルク制御かつエネルギー回収への高度利用が期待されている．

本装置は，内円筒が風車のシャフトに接続されているとして回転し，外円筒との間に満たされた液体金属が内円筒でのせん断応力によって周方向に回転する．軸方向に印加された磁場との相互作用で半径方向に起電力が発生し，その内円筒と外円筒の間に負荷抵抗を接続することで，流体のエネルギーから変換された電気エネルギーを，電力として外部に抽出することが可能となる．また，流れと逆向きにローレンツ力が発生するので，内円筒の回転トルクを制御することも可能となる．これまでの研究から，本装置内の内円筒近傍の微細な乱流構造は，ローレンツ力によって平滑化されて抑制されることが知られている．さらに，上下壁から発生する渦対によって楔形の高速ストリークが発生することがわかってきた．このように，乱流条件下での検討が行われてきた一方で，よりレイノルズ数が低い領域で発生する波動渦流れとテイラー渦におよぼすMHD相互作用の影響は未解明である．本装置をどのレイノルズ数域で運転・設計するかを検討する上でも，これら波動渦流れやテイラー渦の影響を理解しておくことは重要である．

本研究では，MHD エネルギー変換装置の高度化に向けて，MHD 相互作用による波動渦流れやテイラー渦のハルトマン数ならびにレイノルズ数依存性を解明し，エネルギー変換装置の設計や高性能化へ応用することを目的とする．

2. 研究成果の内容

図 1 に，テイラー・クエット流れの概略図を示す．本研究では，上下壁による波動への影響を除外するために，上下壁を用いず，軸方向には周期境界を用いる．また，外円筒半径と内円筒半径の差で定義されるギャップ長と軸方向長さの比であるアスペクト比は 4 とした．これにより，$r-z$平面内には 4 つのテイラー渦が現れる．また，外円筒半径に対する内円筒半径の比で定義される半径比は波動渦流れの実験でよく利用される 0.83 とした．

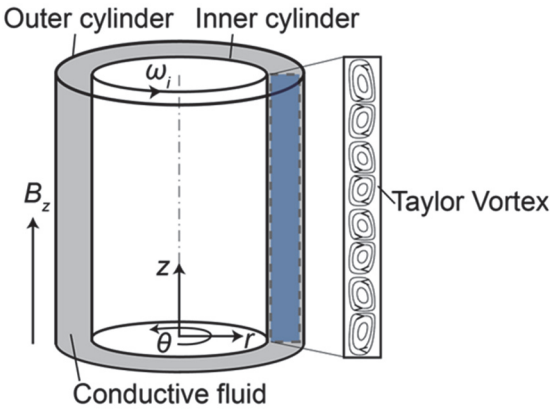


図 1：テイラー・クエット流れの概略図

図 2 に，Re=800 における$r-z$平面内の半径方向平均流速と流線分布を示す．ハルトマン数 Ha=0 では，テイラー渦が 4 つ形成されており，内円筒から外円筒への流れが強い outflow の領域と外円筒から内円筒への流れが強い inflow の領域が存在することがわかる．Ha が増加するにしたがって，テイラー渦がローレンツ力によって抑制され，outflow と inflow の速さも減少していくことがわかる．Ha=30 では，テイラー渦が消失し，軸方向に一様な速度分布が形成される．

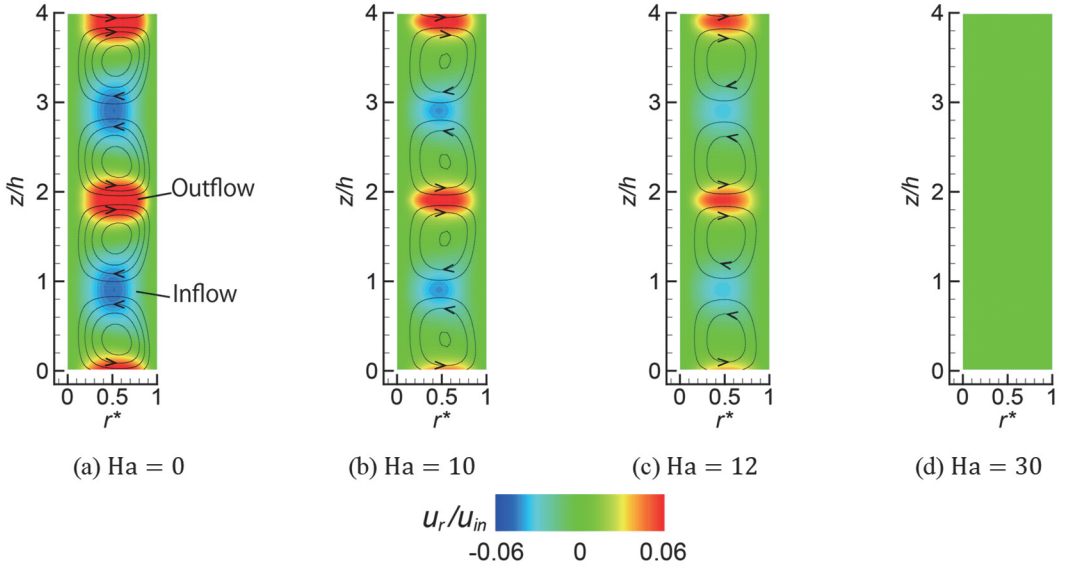


図 2：Re=800 における$r-z$平面内の半径方向平均流速と流線分布．(a) Ha=0, (b) Ha=10, (c) Ha=12, (d) Ha=30

図 3 に，Re=800 における$\theta - z$平面内の周方向流速の瞬時分布を示す．Ha=0 では，軸方向に振幅をもつ波動が形成されている．このとき，周方向流速が速いところは，outflow の領域に一致し，周方向流速が遅いところは，inflow の領域に一致している．Ha の増加に伴い，波動の振幅が抑制され，Ha=12 で波動が消失していることがわかる．一方で，このときまだテイラー渦は存在しているが，Ha=30 になるとテイラー渦も消失する．このように，Ha が増加すると，ローレンツ力によって波動が先に抑制され，次にテイラー渦が抑制されることがわかる．

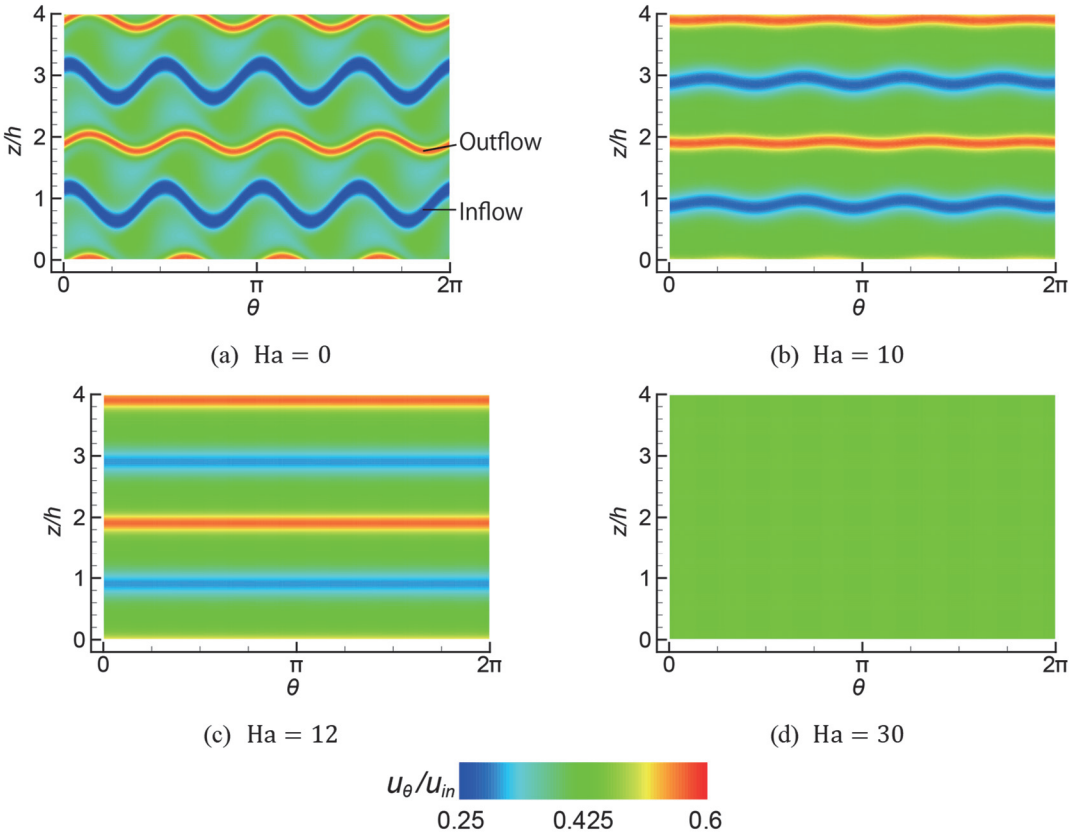


図 3：Re=800 における$\theta - z$平面内の周方向流速の瞬時分布．(a) Ha=0, (b) Ha=10, (c) Ha=12, (d) Ha=30

このことを定量的に評価するために，下記のように，運動エネルギーを，平均速度成分，テイラー渦成分，波動成分に分解する．

$$k_{mean} \equiv \frac{|\boldsymbol{u}_{mean}|^2}{2} = \frac{\left|\langle \boldsymbol{u} \rangle_{\theta,z,t}\right|^2}{2}$$

$$k_{TV} \equiv \frac{|\boldsymbol{u}_{TV}|^2}{2} = \frac{\left|\langle \boldsymbol{u} \rangle_{\theta,t} - \langle \boldsymbol{u} \rangle_{\theta,z,t}\right|^2}{2}$$

$$k_{wave} \equiv \frac{\left|\boldsymbol{u} - \langle \boldsymbol{u} \rangle_{\theta,t}\right|^2}{2}$$

$$k = \frac{|\boldsymbol{u}|^2}{2}$$

図 4 に，Re=800 におけるハルトマン数と各運動エネルギー成分の関係を示す．Ha の増加に伴い，波動成分とテイラー渦成分が抑制されていくが，波動成分より高いエネルギーを有するテイラー渦成分のほうが，より高い Ha まで存在しうることがわかる．このとき，平均流速成分が増加することから，抑制された波動やテイラー渦の成分は平均流速成分へ分配されていることがわかる．

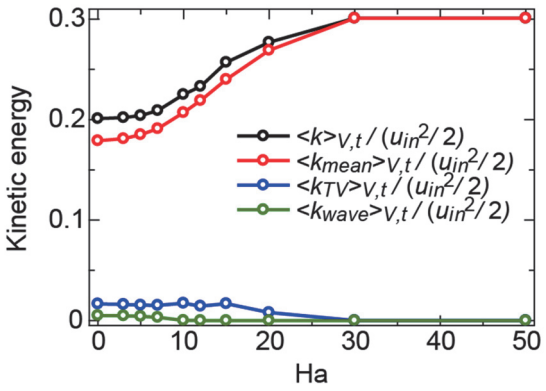


図 4：Re=800 におけるハルトマン数と各運動エネルギー成分の関係．＜＞*V,t* は体積時間平均を表す．

図 5 に，波動とテイラー渦が消失する臨界ハルトマン数のレイノルズ数依存性を示す．Re=200 では，それぞれの運動エネルギーが小さく，同じ Ha で波動もテイラー渦も消失するが，Re の増加に伴い，テイラー渦の運動エネルギーが高くなることで，臨界ハルトマン数が増加していく．ただし，波動が消失する臨界ハルトマン数は，レイノルズ数によって，大きく変化しないことがわかった．

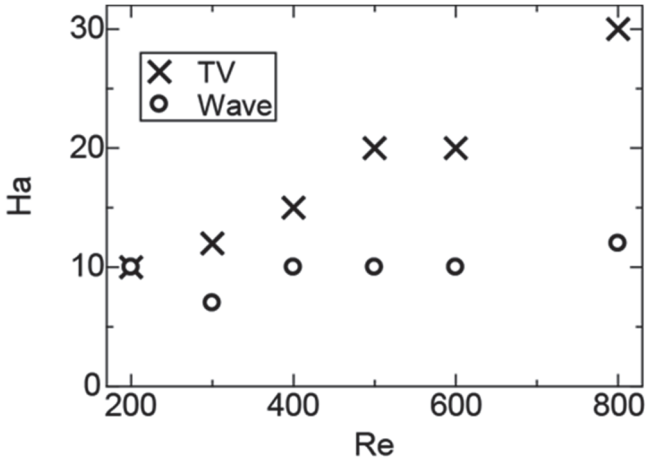


図 5：波動とテイラー渦が消失する臨界ハルトマン数のレイノルズ数依存性（TV:テイラー渦成分，Wave:波動成分）

3. 研究目標の達成状況

MHD エネルギー変換装置の高度化に向けて，波動渦流れが形成される，比較的低いレイノルズ数領域での運転や設計指針を得るために，3 次元数値計算を実施した．これまでは軸方向の上下に壁を有する流れ場での検討であったが，軸方向に周期境界条件を用いることで，より波動の性質を明瞭化できた．本成果により，エネルギー変換装置の設計や高性能化に資する重要な知見を得ることができた．また，これまで収束法で圧力や電位のポアソン方程式を計算していたが，周方向，軸方向が周期境界条件となったことで，これら 2 方向には FFT を用い，半径方向には直接法で計算する高速化の実装にも成功した．以上より，本共同研究の目的ならびに目標は大いに達成していると判断できる．

4. まとめと今後の課題

波動渦流れが形成されるレイノルズ数領域において，MHD 相互作用による波動渦流れ，ならびにテイラー渦におよぼす影響について，3 次元数値計算を実施した．その結果，ハルトマン数の増加に伴い，ローレンツ力によって波動がまず消失し，つづいてテイラー渦が消失することがわかった．その抑制に伴い，それらの成分は平均流速成分へと分配される．また，波動が消失する臨界ハルトマン数は，レイノルズ数が増加しても大きく変わらない一方で，テイラー渦が消失する臨界ハルトマン数はレイノルズ数の増加とともに増加することがわかった．

本研究では，内円筒と外円筒の間に負荷抵抗を接続しない，開放条件で検討を行ったが，より実際の装置の運転条件に近づけるために，負荷抵抗依存性について検討を行うことが，今後の課題である．

5. 研究成果

1）学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Katsumi Namba, Takahiro Hasebe, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana, Hiromichi Kobayashi: Numerical study of wavy vortex flow in a rotating co-axial cylindrical channel with MHD interaction, *The Eleventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, Naha, Japan (2025) 6 pages.

[2] Hiromichi Kobayashi, Takahiro Hasebe, Katsumi Namba, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana: Study on the influence of MHD interaction on Taylor-Couette flow with end walls, *11th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT'25)*, Tokyo, Japan (2025) 5 pages.

[3] Hiromichi Kobayashi, Takahiro Hasebe, Katsumi Namba, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana: Emergence of triplet streaks near the inner wall in MHD turbulent Taylor-Couette flow with end walls, *23rd International Couette-Taylor Workshop (ICTW 2025)*, Durham, UK (2025) 2 pages.

2）国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[4] Takahiro Hasebe, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana, Hiromichi Kobayashi: Numerical simulation of Taylor-Couette flow in a co-axial MHD energy conversion device, *Twenty-second International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, Sendai, Japan (2025), pp. 544-545.

3）その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project Code	J25I020
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Health, Welfare and Medical Cares
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year (progressing)

Fabrication of Flow Chamber for Nanofibrous Layer Covered Stents

Angela Jedlovszky Hajdú*†, Makoto Ohta**††
Veronika Pálos*, Sarolta Halmóczki*, Constantinos Voniatis*, Viktor Szilágyi*
Hanif Saifurrahman**, Ding ChiCheng**
*Laboratory of Nanochemistry, Depaertment of Biophysics and Radiation Biology, Semmelweis University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, †† IFS responsible member

1. Purpose of the project

Coating stents with electrospun polymer scaffolds is important because it creates a biomimetic, nanofibrous structure that closely resembles the extracellular matrix, promoting cell adhesion and tissue regeneration. These coatings can serve as controlled drug delivery systems, reducing inflammation, thrombosis, and restenosis after implantation also as a scaffold to create vessel cell layer a. The high surface area and tunable properties of electrospun fibers allow precise control over mechanical behavior and degradation rates. Overall, such functionalized stents improve biocompatibility and enhance long-term clinical outcomes.

2. Details of program implement

During the project, the Hungarian partner's task was to develop a method for directly forming and immobilizing electrospun polymer systems onto the surface of stents. Previous experience showed that although fiber formation was successful, the scaffold could not withstand the high shear forces at the implantation site and was washed away. Therefore, in the first year, our goal was to firmly anchor the scaffolds onto the surface of metallic stents. To achieve this, the Hungarian research group began investigations using thin metal wires, as illustrated schematically in Figure 1.

For the experimental setup, a new sample holder was designed, and the metal rods were chemically coated to promote the adhesion of artificial extracellular matrices (electrospun polymer systems). Several coating methods were applied, including dip coating, polymerization-based coating, and spray coating. Among these, polydopamine surface modification and spray coating yielded the most outstanding results. Subsequently, the stability of the electrospun and surface-fixed samples was tested using shear forces generated by a water jet pump.

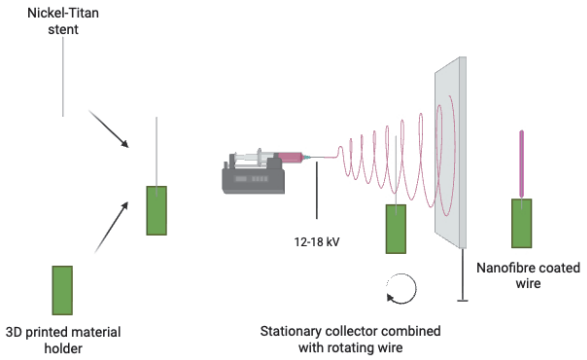


Figure 1: Schematic representation of the preparation of nanofiber coverage on the stent

In parallel, the Japanese research group focused on improving the flow chamber design to accurately reproduce physiological shear stress conditions. It was identified that the narrow gap between the stent and the chamber roof significantly increases local shear stress, which may lead to the detachment of the nanofibrous coating.To address this issue, the chamber geometry is being optimized by increasing the stent–roof gap and adjusting the flow conditions to maintain a target shear stress of 2 Pa at the base. Preliminary investigations on flow conditions have been conducted, and further optimization is ongoing to ensure stable and uniform shear distribution. In addition, micro-CT scanning and CFD analysis are planned to obtain realistic stent geometries and evaluate detailed flow fields. From the preliminary results 3 oral conference presentations were performed

3. Achievements

We successfully selected the two surface modification methods that most effectively anchored the scaffold to the stent surface and withstood the applied shear forces.
In addition to the successful development of coating methods, the optimization of the flow chamber design has been initiated. The influence of chamber geometry on shear stress distribution is considered to be an important factor affecting coating stability. Preliminary observations suggest that excessive local shear stress may contribute to coating detachment, and initial improvements to the chamber structure have been proposed.These efforts provide a foundation for more accurate in vitro modeling of physiological flow conditions.

4. Summaries and future plans

We successfully immobilized the fibrous systems on the surface of stents and tested their resistance to shear forces, and the modification of the flow chamber of the microfluidic cell has also been completed. The next step is the characterization of the samples using microscopic techniques (e.g., determination of fiber diameter and porosity), as well as testing the nanofiber-coated stents in the microfluidic cell—this constitutes the research objective for the second year. If further optimization is required, it will be carried out so that in the third year we can investigate the interaction of the nanofiber coating in the presence of cells and its application as an extracellular matrix.
In the next stage, further optimization of the flow chamber will be carried out to ensure stable shear conditions. Micro-CT measurements will be performed to obtain realistic stent geometries, followed by CFD simulations to analyze detailed flow behavior. In addition, viscosity modification using dextran will be introduced to achieve target shear stress under manageable flow rates. Subsequently, nanofiber-coated stents will be tested in the optimized flow system, followed by cell

experiments to evaluate endothelialization.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

No published paper yet

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Veronika Pálos, Sarolta Halmóczki, Constantinos Voniatis, Hanif Saifurrahman, Makoto Ohta, Angela Jedlovszky-Hajdu: Composite Meshes for Biomedical Applications, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS9-6, pp. 745.

[2] Veronika Pálos, Dorottya Gréta Kis, Sarolta Halmóczki, Constantinos Voniatis, Hanif Saifurrahman, Makoto Ohta, Angela Jedlovszky-Hajdu: Development of Polysuccinimide-Salt Nanofibers for Wound Dressing Applications, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS9-7, pp. 748.

[3] Sarolta Halmóczki, Kitti Osán, Angéla Jedlovszky-Hajdú, Constantinos Voniatis, Veronika Teréz Pálos, Makoto Ohta, Hanif Saifurrahman: Nanostructured Composites in Biomedical Research, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS9-8, pp. 752.

3) Patent, award, press release etc.

(Award)

Veronika Tóth-Pálos Best Presentation Award for Young Researcher Award in ICFD2025 with the presentation entitled „Development of Polysuccinimide-Salt Nanofibers for Wound Dressing Applications”.



Project Code	J25I021
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Comparative Study of Steel Hydrogen Embrittlement Using Ultrasonic and Eddy Current Characterization Techniques

Guy Feuillard*†, Tetsuya Uchimoto**††
*GREMAN laboratory INSA Centre Val de Loire, France
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The development of the hydrogen industry is a major way of reducing CO2 emissions into the atmosphere. However, the development of this sector presents major technological challenges in production, storage, and transport. Hydrogen is stored or transported in steel tanks or pipes, which are subject to specific constraints due to the nature of hydrogen. When placed in such an environment, steel undergoes an embrittlement and degradation mechanism linked to the absorption of hydrogen. This degradation reduces the ductility and loading capacity, leading to cracks or brittle fractures at stresses below the usual elasticity limits of steels. This is known as hydrogen embrittlement. Therefore, characterizing this degradation is a key factor in the safety and reliability of hydrogen storage and transport systems, to limit the storage system as a vector of operational risk.

The characterization of this embrittlement can be achieved using several techniques. These include ultrasound and eddy current methods. These two techniques are mastered at the GREMAN ultrasonic laboratory in France and Tohoku University for the eddy current technique. The aim of this work is to establish a comparative study of ultrasonic and eddy current methods for the evaluation of hydrogen embrittlement of steels. By combining these approaches, it will be possible to perform a comprehensive analysis of the structural and electrical changes in the material caused by the hydrogen charging.

2. Details of program implement

The work program is divided in 4 tasks:

Task 1: Selection of test samples.

Based on literature analysis, steel samples will be selected according to their microstructure and chemical composition. Indeed, among steel materials, austenite, matensite dual phase… some of them are more sensitive to hydrogen embrittlement. The objective will be to select and provide the appropriate samples that will highlight the phenomenon. Once the materials selected, the geometrical dimensions will be defined to meet the requirements of both ultrasonic and eddy current measurements and those of electrochemical charging. Finally, the number of test specimens will be carefully determined to ensure significant reproducibility of the experimental results to produce a basis for data interpretation.

Task 2 : Electrochemical hydrogen charging

Native steel samples will undergo an embrittlement process induced by electrochemical hydrogen charging. First, the electrochemical solution will be selected in terms of hydrogen charging efficiency. The specific charging conditions will be defined to ensure consistency and reproducibility across all test samples. These conditions will include the

specification of the electrochemical potentials applied during the charging process, which play a critical role in controlling the rate and extent of hydrogen absorption. Additionally, the charging duration will be determined to achieve the desired level of hydrogen saturation within the material, These parameters will be selected based on a thorough understanding of the steel's behavior under electrochemical conditions, as well as existing standards and prior research in the field. This detailed approach will ensure that the embrittlement process is both effective and representative of the conditions being studied, providing valuable insights into the steel's response to hydrogen-induced degradation.

Task 3 Experimental set-up and measurements
3.1 Ultrasonic measurements:
A specific ultrasonic test bench will be set up for material characterization. This include pulser receivers, a water tank, an oscilloscope and a computer. The acoustic properties of test samples will be measured at room temperature either by transmission or reflection measurements. The transducer center frequency and bandwidth will be defined allowing time of flight measurements from which acoustic properties will be deduced between round trip echoes in samples and will be compatible with electronic environment. The bench will ensure reproducibility of the measurement. From these measurements the speed and/or attenuation will be deduced and analyzed to obtain precise information about structural changes du to hydrogen charging.
3.2 Eddy Current measurements
Test samples will be characterized on the standard test bench at Tohoku University. The eddy current technique relies on inducing a magnetic field in the material using a coil or sensor. The currents generated within the material interact with variations in its conductivity or magnetic permeability, leading to measurable changes in the electrical impedance of the probe. This non-destructive method should highlight the variations in the material's composition due to hydrogen charging.
Task 4 Results and discussion
Once the measurements have been carried out, the results of eddy current and ultrasonic measurements will be compared and discussed. The relevance of the methods, and particularly their sensitivity to structural changes, will be examined. In the meantime, structural and morphological analysis will be conducted to assess the penetration depth of hydrogen in steel and relates the modification of the properties to the change of the microstructure.

3. Achievements

In our study, a commercial DP800 dual-phase steel was used. DP800 is mainly made of ferrite and martensite steel and with a lower content of bainite. Typical value reported in literature for the volume fraction of each component is 69 % of ferrite 30% of martensite and less than 1 % of bainite. This material is known as Advanced High Strength Steels (AHSS) is widely used in the automotive industry as the ferrite phase endows plasticity while the martensitic phase endows rigidity. Samples used for the experiment are 1mm thick with lateral dimensions of $50 \times 30\, mm^2$.

Hydrogen charging was performed by an electrochemical technique using a three-electrode setup. Steel samples (i.e. the working electrode) were connected to a potentiostat (Biologic SP 300, Seyssinet-Pariset, France). The counter electrode was a Platinum plate and the reference electrode was an Ag/AgCl secondary reference electrode (E=+237mV/ESH). The charging electrolyte was a solution of $NaHCO_3$ with a concentration of 0.5 mol at room temperature. In addition to this solution, 8 g/l of ammonium thiocyanate was added to prevent the recombination of hydrogen ions into dihydrogen. The charging potential was maintained at – 1.45 V vs Ag/AgCl for several

tenth of hours.

The ultrasonic measurements were carried out in normal incidence. The setup is composed of two 50 MHz ultrasonic transducers (Olympus Panametrics-NDT V358 50 MHz/0.25), one being used as an emitter and the second one as receiver. Electrical excitation was provided by a Panametrics pulser receiver Model 5800. The received signals were acquired by a digital oscilloscope (Tektronics MSO44, Beaverton, Oregon, USA) at a sampling frequency of 2.5 GHz, with an averaging over 1024 acquisitions and then transferred to a computer for processing on Matlab.

Simultaneously to hydrogen charging and ultrasonic measurements, the temperature was measured using a type K thermocouple temperature probe connected to its conditioner (midi Logger GL240) and transferred to the computer.

The experimental set-up is shown figure 1

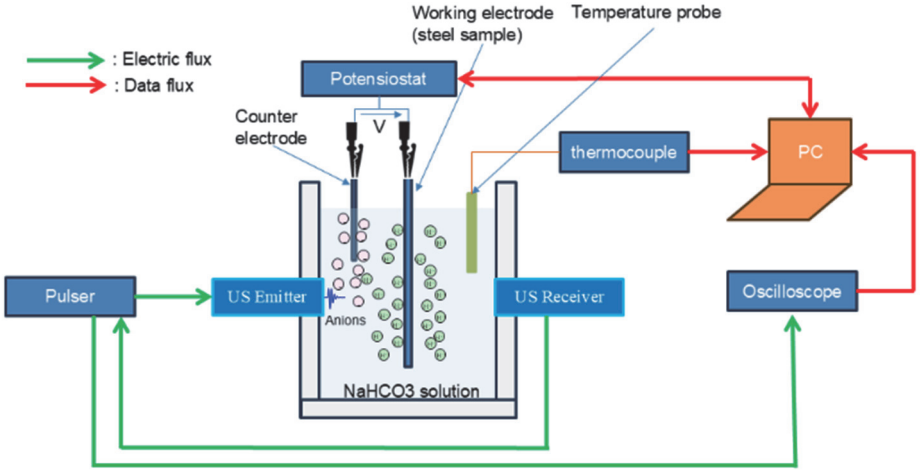


Figure 1 : Experimental set-up

Figure 2 shows a typical raw signal acquire on the oscilloscope. The first echo corresponds to the first transit between the transmitter and the receiver. Subsequent echoes correspond to round-trip echoes within the steel plate. Knowing the sample thickness, the ultrasonic velocity is determined from the transit time measurement between two echoes. The signal is first oversampled, then the transit time between two successive echoes is measured by intercorrelation. We take the average of the transit times over five echoes.

First, by making a measurement every 10 minutes without hydrogen charging allowed us to compensate the temperature effect on the velocity measurement. A temperature coefficient of -55 m/s/°C was founded, and the temperature compensated ultrasonic velocity deduced from the transit time measurement was founded to be 6020 m/s with a standard deviation of 0.06 m/s. This standard deviation should allow us to measure the velocity variations associated with hydrogen loading

Measurement during hydrogen loading then were carried out. Unfortunately, due to technical problems the measurements were unexploitable and didn't allow to monitor the hydrogen charging. However, these experiments have allowed us to define electrochemical loading conditions that will be used in future experiments.

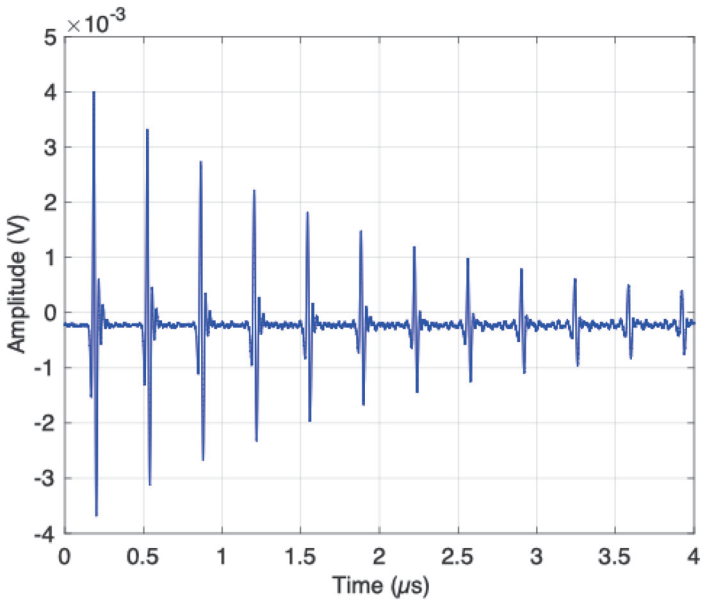


Figure 2 : Raw signal

4. Summaries and future plans

This work has facilitated the integration of ultrasonic techniques at the IFS. Measurement protocols have been developed, paving the way for further research in this field. New measurements are planned in France and Japan to investigate hydrogen loading and compare it with electromagnetic characterization methods. The findings will be presented in a paper accepted for ECNDT 2026, to be held in Verona this coming June. Collaboration is ongoing: I have applied to the French CNRS for a position at the ELyTMax laboratory at Tohoku University, Japan for one year, starting in the 2026 academic year. The joint project—between GREMAN, the ELyTMax laboratory (Nicolas Mary, Associate Professor, HDR), and the Institute of Fluid Science at Tohoku University (Prof. Tetsuya Uchimoto)—aims to explore the potential of multimodal acoustic reverberation techniques for studying the aging of metal-polymer structures under hydrogen loading.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] G. Feuillard, J. Toupin, H. Achdjian,J. Bustillo, L. Leffray, N. Mary, T. Uchimoto "Study of Stryeel Hydrogen Embrittlement Using Ultrasonic Technique" *ICFD 2025* Sendai, Japon, 10-13 Nov 2025.

[2] B. Ducharne, N. Mary; Achdjian, H. Achdjian; J. Bustillo, G. Feuillard, J. Toupin, Y. Tene Deffo, T Uchimoto "Comparison between an ultrasonic and an electromagnetic metrology for the study of hydrogen embrittlement in steels" accepted to *14th ECNDT 2026 EUROPEAN CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING VERONA*, 15-19 JUNE

3) Patent, award, press release etc.
Not applicable

Project Code	J25I022
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year (Progressing)

Laminar Flame Speed Measurement and Kinetics Modeling Study of Tri-Methyl-Phosphate (TMP) Combustion. Toward P-Containing Fire Suppressants for Lithium-Ion Battery Electrolytes

Olivier Mathieu*†, Hisashi Nakamura**††
*J. Mike Walker '66 Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this project was to generate new experimental measurements for the laminar flame speed of H_2/air flames seeded with TMP. These measurements will allow both to assess the fire suppressant properties of TMP and to validate a detailed kinetics model. This model will be useful to numerically develop safer lithium-ion batteries where fire suppressants are added to the electrolyte.

2. Details of program implement

This collaborative research work on TMP chemistry can be divided into two sections: pyrolysis and oxidation. For the pyrolysis part, the work was submitted and accepted for oral presentation at the International Symposium on Combustion, with the IFS team leading the effort. This work consisted in measuring time-resolved CO mole fraction in a shock tube at Texas A&M University and performing speciation measurements for TMP and intermediate species in a micro flow reaction with a controlled temperature profile at Tohoku University. In addition, a detailed kinetics model from the literature was improved using ab initio computations. Below are the results obtained during this effort, illustrating the progress made on the detailed kinetics model when compared with the state of the art in the literature.

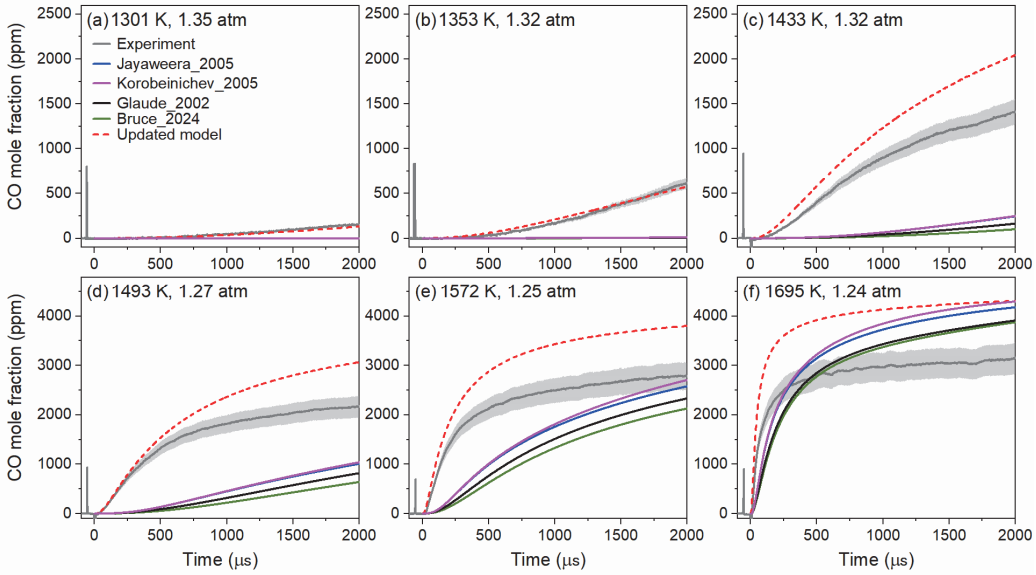


Figure 1: Evolution of the CO mole fraction with time at various temperatures during

the pyrolysis of 0.25% TMP in 0.2/0.795 He/Ar and comparison with detailed kinetics models from the literature and from this project. The grey area corresponds to the measurement uncertainty.

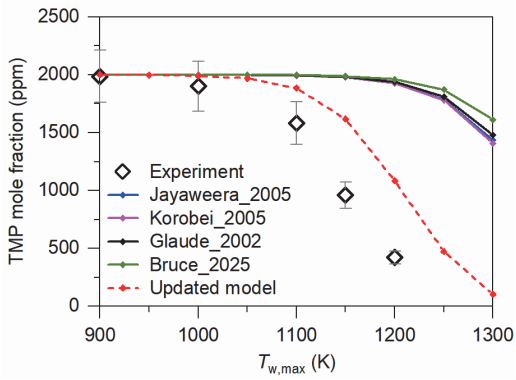


Figure 2: TMP consumption as a function of the temperature (0.2% TMP in 1% Ar and 98.8% N_2) and comparison with detailed kinetics models from the literature and from this project.

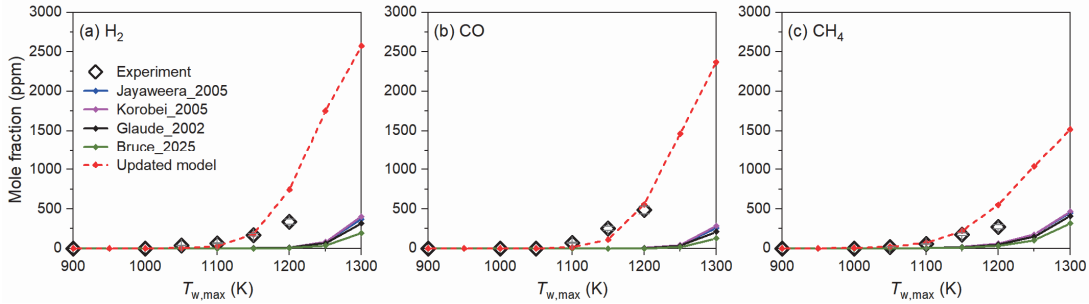


Figure 3: Formation of (a) H_2, (b) CO, and (c) CH_4 during the pyrolysis of 0.2% TMP in 1% Ar and 98.8% N_2 and comparison with detailed kinetics models from the literature and from this project.

Concerning the oxidation part of this project, the experimental results were obtained at Texas A&M University. The laminar flame speed data has been presented to several conferences, listed in Section 5. These laminar flame speed results, along with the comparison with some literature models, are visible in Fig. 4. Results for bis(2,2,2-trifluoroethy) methyl phosphonate (BtFEMP,) another fire suppressant candidate for lithium-ion batteries, were included as well. Note the very large decrease in the laminar flame speed of a hydrogen flame with an addition of only 0.5% mol. of fire suppressant. Literature models were, overall, satisfactory for the prediction of these results.

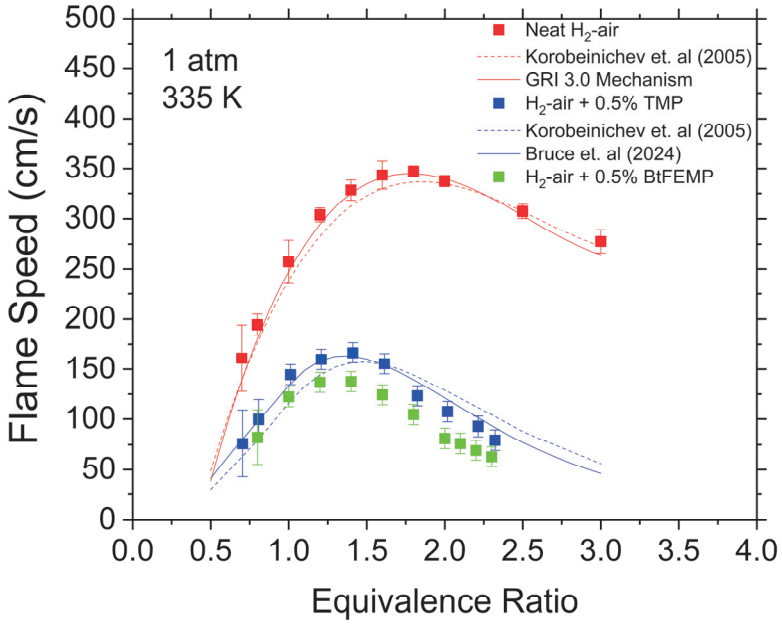


Figure 4: Evolution of the laminar flame speed with the equivalence ratio for a H_2/air mixture and the same mixture seeded with 0.5% TMP and 0.5% BtFEMP. Initial conditions were 1 atm and 335 K.

In addition to the flame results, CO measurements were also obtained but not presented at any conference. The stoichiometric results are visible in Fig. 5.

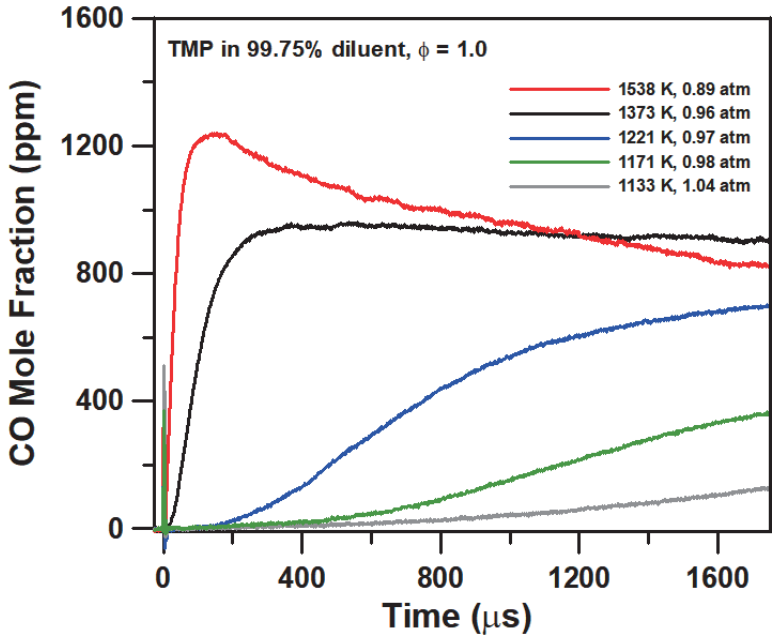


Figure 5: Evolution of the CO mole fraction with time for a stoichiometric 0.0009 TMP/0.0041 O_2/0.2 He/0.7975 Ar mixture.

3. Achievements

Experimentally, the expected results were achieved with a full curve for laminar flame speed. These results were completed with CO measurements using a spectroscopic diagnostic in a shock tube (pyrolysis and oxidation) as well as speciation measurement for TMP in a micro flow reactor with a controlled temperature profile.

On the numerical side, the pyrolysis model has been updated and validated and work is ongoing for the oxidation part of this detailed kinetics mechanism.

4. Summaries and future plans

Experimental measurements for the pyrolysis and oxidation of TMP were taken in various apparatuses: laminar flame speed in a closed vessel, CO time-histories in a shock tube, and TMP speciation in a micro-flow reactor with a controlled temperature profile. A detailed kinetics model was validated for the pyrolysis of TMP. A paper was submitted and selected for oral presentation to the International Symposium on Combustion for the pyrolysis part.

Future work will essentially consist in building upon this work to develop the oxidation part of the detailed kinetics model and publish this model along with the oxidation data.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] K. Kanayama, C. Grégoire, K. Maruta, E. Petersen, O. Mathieu, H. Nakamura: CO Time-history measurements and kinetic modeling of trimethyl phosphate pyrolysis *International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems* (2025), 94.

[2] M.B. Nielsen, U.L. Costa, J.E. Jacobs, O. Mathieu, E.L. Petersen: Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen doped with trimethyl phosphate, *30th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, (2025), 217.

[3] M. B Nielsen, O. Mathieu, E. L. Petersen: Experimental Study on Laminar Flame Speeds of H2/Air Mixtures Doped With Fire Suppressants, *AIAA SCITECH 2026 Forum* (2026), 29, doi: 10.2514/6.2026-2599.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[4] M.B. Nielsen, U.L. Costa, J.E. Jacobs, O. Mathieu, E.L. Petersen: Exploration of the effects of trimethyl phosphate on the laminar flame speed of hydrogen, *14th U.S. National Combustion Meeting*, (2025).

[5] M. Nielsen, S. Vézilier, O. Mathieu, H. Nakamura, E.L. Petersen: Laminar Flame Speed Measurement and Kinetics Modeling Study of Tri-MethylPhosphate (TMP) Combustion - Toward P-Containing Fire Suppressants for Lithium-Ion Battery Electrolyte, *22nd International Conference on Flow Dynamics*, (2025).

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project Code	J25I023
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Molecular Simulation of Conductive Polymer Electrolyte Composite Membranes for Application in Electrochemical Devices

Thabakgolo T Letsau*, Takuya Mabuchi**††, Phumlani F Msomi***†
*African Energy Leadership Centre, Wits Business School, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa
**Institute of Fluid Science, Tohoku University, Sendai, Miyagi, Japan
***Institute for Catalysis and Energy Solutions (ICES), College of Science, Engineering and Technology, Florida Science Campus, University of South Africa, South Africa
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this study was to investigate the ion conductivity behavior of imidazole-functionalized polyphenylene oxide blended with various carbon-based nanomaterial structures. Using molecular dynamics simulations, the research evaluated the influence of these nanomaterials on ionic conductivity, hydration behavior, and polymer electrolyte degradation mechanisms. Key properties investigated included water uptake, ionic conductivity, water cluster formation, hydration levels, and ion transport pathways. The outcomes of the study contributed toward the rational design and development of highly efficient and conductive polyphenylene oxide-based polymer electrolytes for advanced electrochemical energy applications.

2. Details of program implement

The implementation involved running molecular dynamics simulations on ImPPO membranes with different filler materials and loading ratios, then comparing hydroxide diffusivity. The results showed that performance depends on filler type and concentration, with zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) at higher loading giving the best ion transport due to improved water channel structure. All the simulations were performance at the IRF facilities.

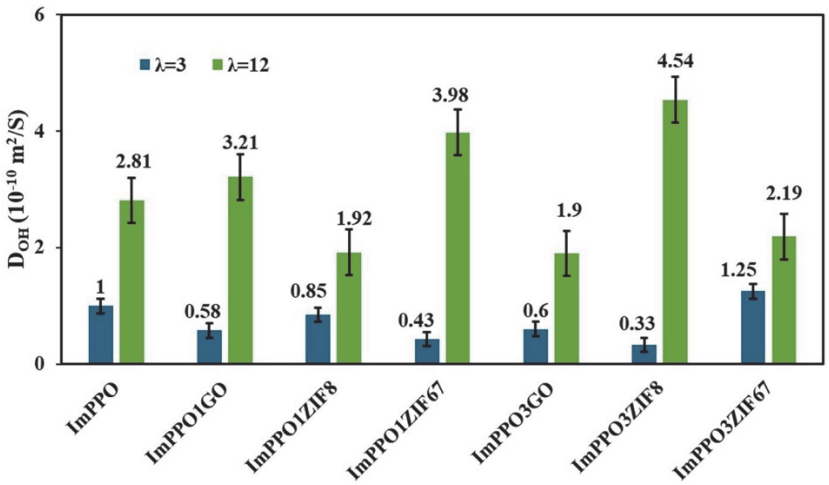


Figure 1: Average D_{OH} of ImPPO functionalized with different weight ratios of GO, ZIF8, and ZIF67 at λ = 3 and λ = 12.

3. Achievements

The study successfully demonstrated that modifying imidazolium quaternized poly (2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) (ImPPO) with selected fillers can significantly enhance hydroxide ion transport. It identified zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) at higher loading as the most effective additive, achieving the highest diffusivity. The work also established clear relationships between membrane structure (water channels, clustering, ion distribution) and performance using molecular dynamics simulations.

4. Summaries and future plans

Summary:

The results show that tailoring imidazolium quaternized poly (2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) (ImPPO) with appropriate fillers significantly influences hydroxide transport. In particular, zeolitic imidazolate framework-8 (ZIF-8) at higher loading provided the best performance due to improved water channel formation, ion distribution, and membrane stability.

Future Plans:

Future work could focus on experimentally validating these simulation results, optimizing filler loading for real-world membrane fabrication, and exploring other advanced nanofillers or hybrid combinations to further enhance performance. Additionally, long-term stability and durability testing under operating conditions (e.g., fuel cells) would be important for practical application.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] Letsau, T.T., Mabuchi, T. and Msomi, P.F. Effect of GO, ZIF8, and ZIF67 on imidazolium-quaternized PPO anion exchange membranes: a molecular dynamics simulations study. *Molecular Physics* 12(2) 2026. doi.org/10.1080/00268976.2025.2507319

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[2] Thabakgolo T. Letsau, Lesego Malepe, Takuya Mabuchi, Phumlani F. Msomi, Molecular Dynamics (MD) Simulations of the Effect of Bulky Substituents at the N3 Position of Imidazolium- Functionalized Poly (p-phenylene oxide), *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-50, pp.143-146.

[3] Thandiwe R Maumau, Thabakgolo T Letsau, Nobanathi W Maxakato, Takuya Mabuchi, Phumlani F Msomi. Molecular Dynamic Simulation of Hydroxide Transport and stability in Polyfuorene-based Anion exchnge membrane functionalism with Hexamethylenediamine, in *Proceedings of 22nd International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2025) November 10-13, pp. 1783-1784.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

課題番号	J25I024
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

金属液滴内部気孔の排出に関する 3 次元シミュレーション
Three-dimensional Numerical Simulation on Gas Pore Inside Liquid Metal Droplet

吉川　穣*†，高奈 秀匡**††
伊藤 桂介*
*宮城県産業技術総合センター，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究では，金属付加製造の材料粉末に含まれる気孔の低減(気孔レス)を目指し，粉末生成に広く利用されているガスアトマイズ法を対象に気孔レスの条件を探ることを目的とする．気孔レスガスアトマイズ装置開発を目指した研究では，溶融金属の微粒化過程における気孔の取込メカニズムの解明や，気孔の取込抑制のための流れの制御方法の提案に焦点が当てられてきた一方で，本研究では金属液滴に気孔が取り込まれることを許容して，その気孔が金属液滴の凝固前までに排出される条件を探ることで気孔レスの実現を目指している．そこで，内部気孔を有する金属液滴の変形挙動を気液二相流モデルとして取り扱い，そのシミュレーションを通じて内部気孔の排出条件を無次元数(レイノルズ数，ウェーバー数など)で整理することで，金属種を限定しない汎用的な気孔の排出条件を見出す．

2. 研究成果の内容

昨年度は，液滴が自転運動することで内部気孔が排出されるプロセスを対象としたが，今年度は並進加速運動する液滴の内部気孔排出に着目した．過去の実験的研究によって，一様流にさらされる液滴は気流ウェーバー数が 10 を超えると breakup が発生することが知られており，高ウェーバー数条件においては breakup の際に気孔の排出が期待される．それに対し本研究では，ウェーバー数 10 未満における気孔の排出可能性を探ることとした．数値計算には Ansys Fluent® 2024 R1 を用い，Volume of Fluid 法にて気液二相流をモデル化した．液滴径を0.1 mm，一様流速を53.56 m/sとし，液滴の密度と粘性係数，表面張力係数には液相線温度の Ni 基合金のインコネル 718 の物性値を，気相の密度と粘性係数には常温のアルゴンの物性値を採用し，定数として扱った．これらの物性値から算出されるウェーバー数は 0.26 で，breakup が発生する条件に比べて十分に小さい．初期の速度場は，液滴内部を速度 0，外部を二重湧き出しのポテンシャル流とした．なお本研究では，気孔の密度ρ_{p}をパラメータとし，一様流に等しい基準密度1.623 kg/m³に対して，液滴密度の半分の値である 3790 kg/m³，液滴密度に等しい7580 kg/m³と変えて計算を行った．

図 1 に$\rho_{\mathrm{p}} = 1.623$ kg/m³における計算結果を示す．ウェーバー数が十分に低い条件であるため，液滴・気孔ともにほとんど変形が見られないものの，気孔は液滴よりも高速に前進し，最終的に排出へと至った．この結果は，気孔の排出に液滴や気孔の変形が必ずしも重要でないことを示唆している．そこで気孔排出のメカニズムを探るため，気孔の物性値の中で，密度のみを3790, 7580 kg/m³と変化させた計算を行った．その結果を図 2，図 3 に示す．

気孔密度を液滴密度の半分の値にしても気孔は排出されるものの，排出に要する時間は長くなる．また気孔密度が液滴密度に等しい条件では，気孔は排出されず液滴内部に残留した．以上の結果から，気孔の排出は液滴と気孔の密度差に起因して発生していることがわかる．これは，気孔を含む液滴が一様流によって加速された際に，密度の小さな気孔は慣性が小さいためにより早く加速されるためであると考えられる．

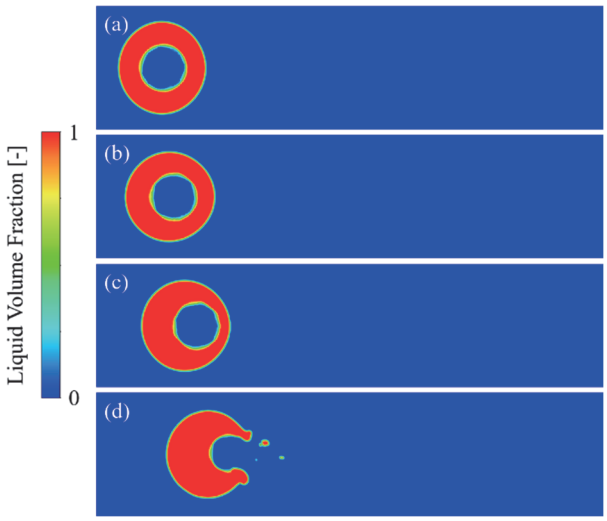


図 1：液滴と内部気孔の挙動 $(\rho_{\mathrm{p}} = 1.623\ \mathrm{kg/m^3})$
(a) $t = 35.01\ \mu\mathrm{s}$, (b) $t = 70.01\ \mu\mathrm{s}$, (c) $t = 105.0\ \mu\mathrm{s}$, (d) $t = 140.0\ \mu\mathrm{s}$.

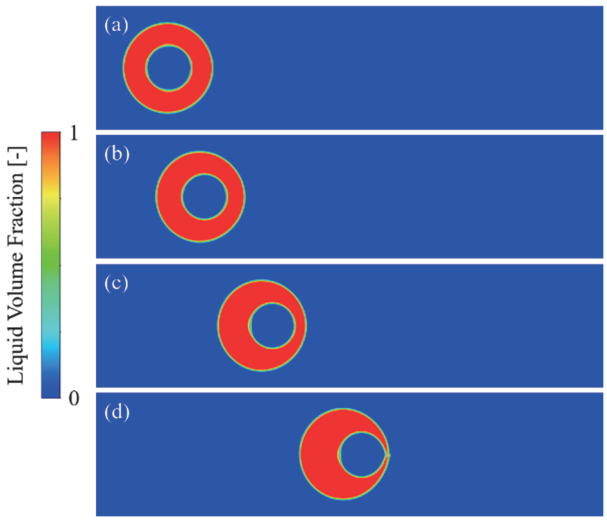


図 2：液滴と内部気孔の挙動 $(\rho_{\mathrm{p}} = 3790\ \mathrm{kg/m^3})$
(b) $t = 72.35\ \mu\mathrm{s}$, (b) $t = 144.7\ \mu\mathrm{s}$, (c) $t = 217.0\ \mu\mathrm{s}$, (d) $t = 286.5\ \mu\mathrm{s}$.

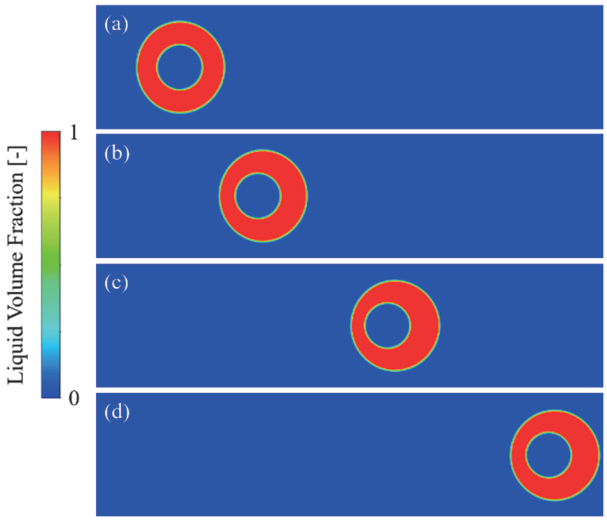


図 3：液滴と内部気孔の挙動 ($\rho_p = 7580\ \mathrm{kg/m^3}$)
(c) $t = 116.7\ \mu\mathrm{s}$, (b) $t = 233.4\ \mu\mathrm{s}$, (c) $t = 350.1\ \mu\mathrm{s}$, (d) $t = 466.8\ \mu\mathrm{s}$.

3. 研究目標の達成状況

本研究では，液滴が凝固する前に気孔が排出される条件を明らかにするために，第 1 段階として気孔排出の要因となる物理メカニズムを把握，第 2 段階でそのメカニズムに大きく影響するパラメータの特定，第 3 段階として特定したパラメータを走査させた条件探索の 3 段階に分けて進めることを考えている．今年度の研究では，その第 1 段階である気孔排出の物理メカニズムを明らかにすることができた．

4. まとめと今後の課題

今年度の研究では，液滴の並進加速運動による内部気孔排出を引き起こす物理的要因が明らかとなった．次年度は気孔排出を妨げる要因を特定し，気孔の残留/排出について無次元数を用いて整理する．さらに，現象に対する 3 次元性の効果の調査も課題として残されている．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 吉川穣，伊藤桂介，高奈秀匡：金属液滴の加速運動による内部気孔の排出，日本混相流学会混相流シンポジウム 2025，(2025), OS0101.

[2] J. Yoshikawa, K. Itoh, H. Takana: Collapse Process of Gas Pore inside Metal Liquid Droplet in Flow Field, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS5-5, pp.509-510.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I025
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

分子動力学計算によるプラズマ-液面相互作用の解明

Investigation of Plasma-Liquid Surface Interactions by a Molecular Dynamics Simulation

高橋 克幸*†，馬渕 拓哉**††
*岩手大学理工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

研究の目的は，液面上パルス放電によって形成したプラズマが，気液界面に誘導する物理・化学現象の解明と，その高度制御を実現することを目指し，分子動力学計算を用いたシミュレーションにより，粒子流動モデルを構築することである．これにより，プラズマから液中に突入する放電生成粒子と液中粒子間の相互反応をミクロスケールで明らかにし，実験から得られた知見を裏付けるとともに，気液界面におけるエネルギー収支と作用機序を解明する．

2. 研究成果の内容

気液界面スラブモデルを構築し，界面およびバルクにおけるイオン挙動を比較できる解析手法を構築した．MD 解析では，気液界面スラブモデルを構築し，セル寸法は 60 Å × 60 Å × 200 Å とした．水モデルには TIP3P，力場には CHARMM36m を用いた．水分子 6807 個，Na^+ 122 個，Cl^- 122 個を配置し，界面領域およびバルク領域を定義した．xy 方向および z 方向の MSD を算出し，各粒子の拡散挙動を評価した．

図 1 に，バルクにおける各分子の MSD を示す．バルクでは，xy 方向において各粒子が比較的直線的に拡散した．一方，z 方向では界面近傍に留まる傾向を示した．図 2 に，界面における各分子の MSD を示す．界面では，水分子が xy 方向に単調増加する一方，Na および Cl は界面に現れた後にバルクへ戻る挙動を示した．z 方向では，Cl の方が Na より界面に現れやすい傾向を示した．バルクと界面ではイオン挙動に明確な違いがあった．バルクでは粒子が主として xy 方向に拡散する一方，界面では Na および Cl の挙動に差があり，特に Cl が Na より界面に現れやすい傾向を示した．これは，気液界面近傍における水和構造および安定性がイオン種によって異なることを示している．

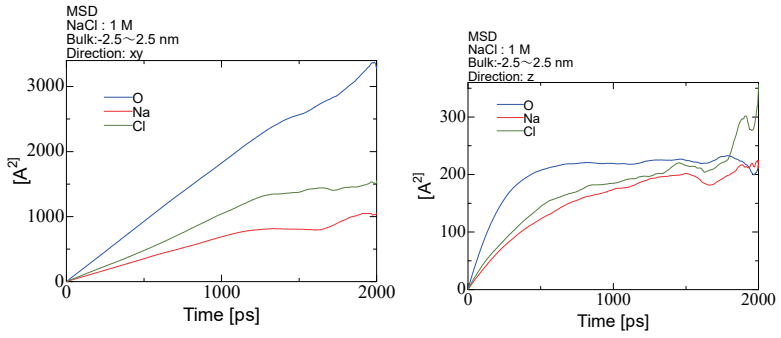


図 1：バルクの各分子の MSD

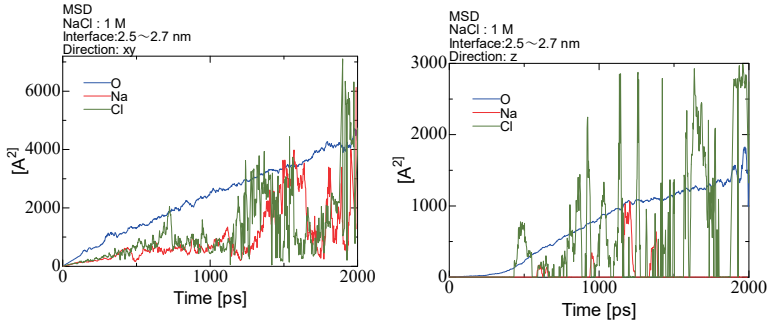


図 2：界面におけるの各分子の MSD

気液界面における分子挙動を評価するために岩手大学において，炭酸ナトリウム溶液上で気液界面プラズマを形成しその様相を観測した．リアクタには 134 mL 規格瓶を用いて製作した．液面と平行となるように，規格瓶の蓋とアクリル板を接着し，電極挿入用のセラミック管（直径 2 mm）を 2 本，排気用チューブ（直径 6 mm）を 1 本挿入した．高圧側電極にはタングステン線（直径 0.3 mm および 0.5 mm）を使用し，もう一方のセラミック管にはステンレス線（直径 0.5 mm，SUS316）を挿入して接地電極とした．放電光は分光器へ導入し，測定した．図 5 に，周波数（1，5，10 kHz）変化時の Na 589.3 nm に対する PMT 波形を示す．周波数の増加とともに Na 発光開始時刻は早まり，発光頻度も増加する．一方，1 kHz では Na 発光は明確には確認されなかった．図 6 に，電圧を印加してから，Na の発光が観測されるまでに要する時間を示す．周波数増加に伴い Na 発光開始時刻が早まった理由として，単位時間当たりのエネルギー投入が増加した結果，液面近傍の加熱および蒸発，または液滴噴出が促進され，Na が気相へ供給されるまでの時間が短縮されたことが考えられる．

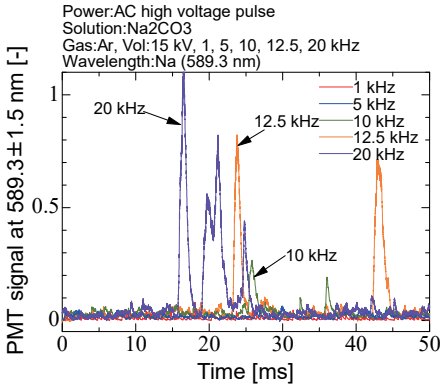


図 3：Na 589.3 nm に対する PMT 波形

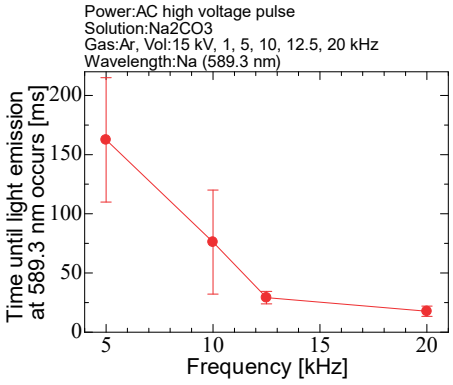


図 4：Na589.3nm の発光までに要する時間

3. 研究目標の達成状況

本年度は，気液界面スラブモデルを構築し，液中分子の界面での挙動を調べた．それらのミクロ的な挙動に関する基礎的な知見を得ることができた．一方で，課題解決に重要となる電界下での挙動や，イオン衝突モデルの解析には至っておらず，今後その構築が必要となる．また，実験ナトリウムの気液界面での挙動を観測することができた．今後は，RDF，密度分布，電界印加条件における解析を進め，界面イオン挙動と実験結果を対応づけて議論する必要がある．

4. まとめと今後の課題

本研究では，液面上パルス放電プラズマが気液界面に誘起する物理・化学現象の解明を目的として，分子動力学計算による気液界面スラブモデルの構築と，炭酸ナトリウム溶液上でのプラズマ発光観測を行った．分子動力学計算では，MSD 解析の結果，バルク領域では粒子が主として xy 方向に拡散する一方，Cl^-はNa^+よりも界面近傍に現れやすい傾向を示し，気液界面における水和構造やイオン安定性がイオン種によって異なることがわかった．実験では，炭酸ナトリウム溶液上にパルス放電プラズマを形成し，Na589.3 nm の発光挙動を PMT により観測した．その結果，周波数の増加に伴い Na 発光の開始時刻が早まり，発光頻度も増加した．これは，周波数増加により単位時間当たりのエネルギー投入量が増加し，液面近傍の加熱，蒸発，または液滴噴出が促進されたためと考えられる．

以上より，気液界面におけるイオン挙動を分子スケールで評価する手法を構築するとともに，液面上パルス放電により液相由来成分が気相へ供給される過程を発光計測により確認した．これにより，シミュレーションと実験の両面から，プラズマが気液界面へ与える作用を評価するための基盤を得た．今後は，界面近傍のイオン分布，水和数，配向構造，ポテンシャルエネルギーを解析し，Na^+および Cl^-の界面安定性を定量化する必要があるとともに，Ar^+，電子，ラジカルなどのプラズマ由来粒子を導入したモデルへ拡張し，液面への衝突に伴う運動量移行，エネルギー移行，界面構造変化を評価する必要がある．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] K. Takahashi, N. Takeuchi, T. Mabuchi: Characteristics of Gas-Liquid Interfacial Pulsed Discharge Plasmas, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-58, pp. 164-165.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I026
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4～2026.3
継続年数	1年目

CFD検証用データ取得のための極超音速飛翔体周りの衝撃波実験

Shock Wave Experiments Around a Hypersonic Vehicle for CFD Validation Data Acquisition

古館 美智子*†, 永井 大樹**††
Jinhwi Kim***, Bok Jik Lee***, 大谷 清伸**
*Chungnam National University, South Korea
**東北大学流体科学研究所
***Seoul National University, South Korea
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

極超音速飛翔体周りの流れを解析する数値流体力学（CFD）コードは，実験値との比較により信頼性が検証される必要がある．極超音速流れの実験は衝撃風洞を用いて行われることが多い．しかし，衝撃風洞のノズルで加速膨張された試験気流は気体分子の振動温度が高い状態であるとされており，CFDコード検証に使用する際の気流条件に不確定性を除くことができない．一方，弾道飛行装置を用いた実験では，飛翔体が静止気体中を飛行するため，気流条件の同定が容易である．そこで，本研究では，弾道飛行装置を用いて極超音速飛翔体周りの流れの様子を可視化し，CFDコードの信頼性検証用の実験値を取得することを目的とする．極超音速飛翔体周りの流れを解析する数値流体力学（CFD）コードは，実験値との比較により信頼性が検証される必要がある．本研究では，衝撃波管や弾道飛行装置を用いて極超音速飛翔体周りの流れの様子を観測する実験を実施し，CFDコードの信頼性検証用の実験値を取得する．

2. 研究成果の内容

本共同研究では，東北大学流体科学研究所の弾道飛行装置（ballistic range）を用い，極超音速で飛行する球周りに形成される衝撃波構造の可視化実験を実施した．（第1期：2025年7月7日～11日，第2期：2025年10月19日～24日）

実験では，半径2.4 mmおよび4 mmのアルミニウム球を静止空気中に射出し，高速度シャドーグラフ法により弓形衝撃波の撮影を行った．光学系はパルスレーザー光源（約40 ns）と高速度カメラを同期させる構成とし，飛翔体速度はレーザーセンサによって計測した．試験条件は，熱化学非平衡の程度を特徴づけるバイナリスケーリングパラメータ（ρR）を指標として設定し，複数の密度・圧力条件において実験を行った．

その結果，代表条件（飛翔速度約2.1 km/s，圧力約2 kPa）において，球前方に形成される弓形衝撃波の可視化に成功した(図1)．また，画像処理（Cannyフィルタ等）を用いることで，衝撃波位置の抽出および衝撃層厚さの評価を試みた．さらに，複数回の射撃実験により飛翔体速度の再現性を確認し，速度が約2100～2200 m/sの範囲で安定して得られることを示した．一方で，現状の光学分解能および露光時間の制約により，衝撃波位置の特定には数

ピクセル程度の不確かさが存在し，衝撃波離脱距離の定量評価には大きな誤差が含まれる可能性があることが明らかとなった．（図 2）

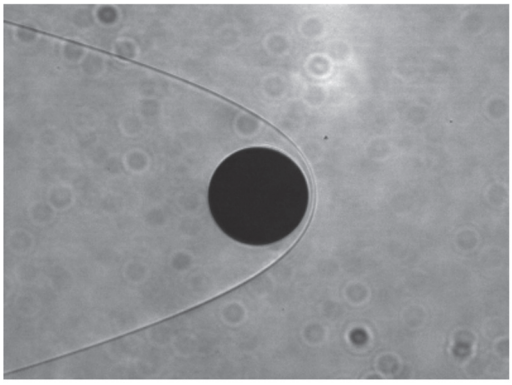


図 1：実験で撮影された球周りの衝撃波のシャドーグラフ

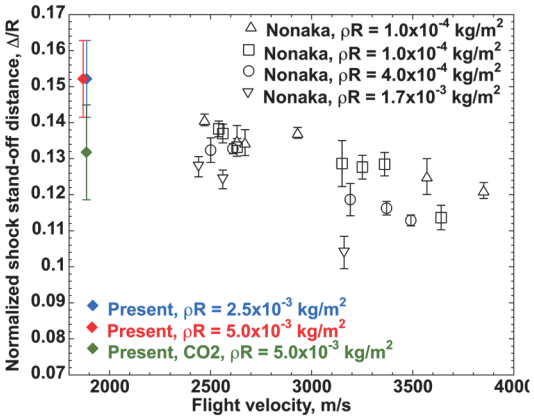


図 2：実験から得られた飛行速度 2km/s に対する球の衝撃波離脱距離データ

3. 研究目標の達成状況

本研究の当初目標は以下の 2 点である．

(1) 衝撃波離脱距離データの取得

(2) 衝撃波背後の流れ場特性量データの取得

これらに対する達成状況は以下の通りである．

(1) 衝撃波離脱距離データの取得

シャドーグラフ撮影により，極超音速飛行体前方の弓形衝撃波の可視化には成功し，衝撃波位置の抽出および離脱距離評価の基盤となる画像データを取得した．しかしながら，露光時間中の飛翔体移動（約 1〜2 ピクセル）および空間分解能の制約により，衝撃波位置が幅を持って観測されるため，離脱距離の定量値には大きな不確定性（場合によっては 100%以上の誤差）が含まれることが確認された（図 2）．したがって，定性的評価および初期データ取得は達成（達成度：60〜70%），高精度な検証データとしての取得は今後の課題である．

(2) 衝撃波背後の流れ場特性量データの取得

本研究では主として可視化に焦点を当てたため，密度・温度・圧力などの流れ場特性量の直接計測には至っていない．ただし，衝撃層厚さに関する情報は画像解析から間接的に取得可能であり，今後の解析および計測手法の高度化により，特性量推定への展開が可能である．したがって，現時点では未達成（達成度：20〜30%）だが，取得可能性は確認済みと評価される．

4. まとめと今後の課題

本研究のまとめと今後の課題を記して下さい．本研究では，弾道飛行装置を用いた極超音速流れの可視化実験を実施し，静止気体中を飛行する条件下での衝撃波構造の観測に成功した．これにより，CFD コード検証に有用な基礎データ取得の第一段階を達成した．

一方で，現状の計測系では以下の課題が明らかとなった．

－露光時間による motion blur の影響
－空間分解能不足による衝撃波位置特定の不確かさ
－衝撃波離脱距離の定量評価精度の不足

今後はこれらの課題を解決するために，以下の取り組みを行う予定である．

－高解像度光学系の構築による空間分解能向上
－画像処理手法（エッジ検出・フィッティング等）の高度化
－分光計測などの導入による流れ場特性量の取得
－CFD との直接比較による検証フレームワークの構築

これらにより，弾道飛行装置を用いた高信頼な CFD 検証データベースの構築を目指す．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] M. Furudate, Y. J. Kim, J. Kim, B. J. Lee, K. Ohtani, H. Nagai: Shock Wave Experiment around a Hypersonic Vehicle for CFD Validation Date Aquisition, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-16, pp. 52-53.

[2] Y. J. Kim, M. Furudate, J. Kim, B. J. Lee, K. Ohtani, H. Nagai: Ballistic Range Experiments on the Shock Wave over a Sphere in Hypersonic, *2025 KSAS Fall conference,* Goseong, South Korea, (2025), pp. 1139-1140.

[3] Y. J. Kim, M. Furudate, J. Kim, B. J. Lee, K. Ohtani, H. Nagai: Image Processing for Extracting Shock Wave Positions in a Hypersonic Vehicle Shadowgraph, *2025 KSCFE Fall conference,* Busan, South Korea, (2025), p. 125.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし
（受賞）なし
（マスコミ発表）なし

Project Code	J25I027
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Characterization of Particulate Morphology Generated from Lithium-Ion Battery (LiB) Combustion Processes

Samuel L Manzello*†, Sayaka Suzuki**
Kaoru Maruta***††
*Reax Engineering, USA
**Institute of Science Tokyo, Japan
***Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of Project

The combustion of electric vehicles in large outdoor fires is believed to contribute to a range of particulates and these effects have not been quantified, particularly related to the combustion of the Lithium-Ion Battery (LiB) cells found in EVs.

2. Details of program implement

To demonstrate the feasibility of the project, one type of LiB cell was used. As part of the experimental effort, during LiB cell rupture, significant emissions were observed, further demonstrating the original hypothesis of this project. In the final year, significant efforts were spent laying the ground work for international standardization efforts, and as such, no new experiments were conducted.

3. Achievements

The research team presented the project at the 2025 ICFD symposium held in Sendai, Japan. The proposer was invited to be a speaker at the 13th Mediterranean Combustion Symposium as part of the International Sooting Flame Workshop, a prestigious workshop held in partnership with the International Combustion Symposium. The proposer was also appointed as program leader for wildland fires and wildland-urban interface (WUI) fires, as part of the ISF workshop series.

4. Summaries and future plans

The proposer is the convenor of ISO TC92/WG14, by global ballot. Significant updates were achieved in the final year of this project. After approval by global ballot, several new work items were added. The first for approval, by global ballot, was ISO/AWI 24944 Standardized Post-Fire Data Collections from Large Outdoor Fires. As part of ISO/AWI 24944, post-fire data collection for large outdoor fires will be reviewed based on available studies. These studies will be used to develop a standardized data collection methodology for large outdoor fires that may be used in the event of future fire disasters.

The second recent work item in ISO TC92, under ISO TC92/WG14, is a technical specification to harmonize test methods for thermal flux exposure for large outdoor fires. Various countries have some variation of thermal flux exposure test methods for large outdoor fires but none of the approaches have been globally harmonized. Finally, ISO TC92/WG14, balloted a new work item proposal at the start of January,

2026. After passing global ballot at the end of March 2026, the approved work item has now been placed on program of ISO TC92. Existing models for large outdoor fires will be reviewed that purport to be able to predict fire spread for wildland-urban interface (WUI) fires, urban fires, including post-earthquake urban fires, and informal settlement fires. The resulting literature review will be used to develop a technical specification for large outdoor fires models that may be used in the event of future large outdoor fire disasters.

In November 2025, the report *Prospects for Implementation of Fire Safety Engineering Approach in Europe*, was published. Due to the increasing wildland-urban interface (WUI) fire problem, this report added an entire section on standardization needs for WUI fires. The above report has been cited in the (Staff Working Document SWD(2025) 1053 "Understanding the housing crisis") accompanying the first (European Affordable Housing Plan) issued by the European Commission in December, 2025. The SWD is an important policy document and it considers fire protection as a major aspect in the difficulty balancing the objectives of affordable, sustainable, and quality housing.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] F. Sciarretta, F., A. Athanasopoulou, C.S. Polo Lopez, G. Tsionis, B. Debrouwere, *et al.*, Prospects for Implementation of Fire Safety Engineering Approach in Europe - Support to Policies and Standards for the Construction Ecosystem, F. Sciarretta, F., A. Athanasopoulou, and G. Tsionis (editors), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, https://data.europa.eu/doi/10.2760/1335237. JRC143347.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[2] S.L. Manzello, Technology and Applications Challenge: Wildland Fires and Wildland -0Urban Interface (WUI) Fires, *13th Mediterranean Combustion Symposium*, June 2025 (invited as part of International Sooting Flame Planning Meeting for Kyoto Symposium).

[3] S.L. Manzello, S. Suzuki, and K. Maruta, Characterization of Particulate Morphology from Lithium-Ion Battery Combustion Processes, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-49, pp. 140-142.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) No patents in this period.

(Award) No awards in this period.

(Press release) Tohoku University Ran Press Release on the JRC report (above).

(International Standards)

ISO/AWI 24944 Standardized Post-Fire Data Collection Methods from Large Outdoor Fires. ISO/AWI 24944 - Standardized Post-Fire Data Collection Methods from Large Outdoor Fires.

ISO/AWI TS 25399 Large Outdoor Fires and the Built Environment: Harmonizing the Test Methods for Thermal Flux Exposure. ISO/AWI TS 25399 - Large Outdoor Fires and the Built Environment: harmonizing the test methods for thermal flux exposure

ISO/AWI ISO/AWI TS 26520 Modelling Approaches for Large Outdoor Fires ISO/AWI TS 26520 - Modelling Approaches for Large Outdoor Fires.

Project Code	J25I028
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Health, Welfare and Medical Cares
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Dynamics Simulation of Endothelial Cell Migration under Shear Flow

Narendra Kurnia Putra*†, Hitomi Anzai**††
Dicky Setianto***, Fara Azzahra Dinata***, Makoto Ohta**
*Instrumentation, Control, and Automation Research Group, Faculty of Industrial Technology, Insitut Teknologi Bandung
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
***Instrumentation & Control Master's Program, Faculty of Industrial Technology, Insitut Teknologi Bandung
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Understanding how endothelial cells move collectively provides crucial insight into the mechanisms by which the body regulates vascular formation, remodeling, and repair, particularly under mechanical stimuli such as wall shear stress (WSS) generated by fluid flow. Therefore, developing a quantitative model of this migration behavior is essential to link microscopic cell dynamics with macroscopic tissue responses in flow environments. This project aims to construct a data-driven and physics-based framework to describe endothelial cell migration under confluent conditions by integrating time-lapse microscopy analysis with stochastic modeling. Although the present study does not explicitly compute WSS, it focuses on capturing the intrinsic motility behavior of endothelial cells as a fundamental component required for future modeling under shear flow conditions. Cell trajectories extracted from experimental data are used to model motion using Langevin dynamics, where velocity follows an Ornstein–Uhlenbeck (OU) process representing a mean-reverting stochastic motion with Gaussian noise. The video used in this research is a time-lapse microscopy footage from YouTube (video ID: FFAcNHe1YBA) and was recorded using the Vena8 Endothelial+ Biochip platform (Cellix Ltd.). Intrinsic motility parameters such as damping (α) and fluctuation amplitude (σ) are estimated directly using likelihood-based optimization by minimizing error between experimental and simulated migration behavior while providing a basis for extending the model toward shear flow–driven dynamics.

2. Details of program implement

This research is conducted as part of a collaborative study on endothelial cell migration study in Ohta-Anzai Lab, utilizing time-lapse microscopy data video that spans 11 seconds with a resolution of 360p, capturing approximately 3 hours of real-time cellular activity under confluent condition. The methodology is structured through an automated video analysis pipeline, as illustrated in Figure 1, which consists of preprocessing, segmentation, and tracking stages to extract trajectory and velocity data of individual cells. Preprocessing involves contrast improvement and noise reductions, followed by segmentation using thresholding and morphological operations to isolate individual cells, and tracking based on centroid extraction with Kalman filtering to ensure temporal consistency of trajectories.

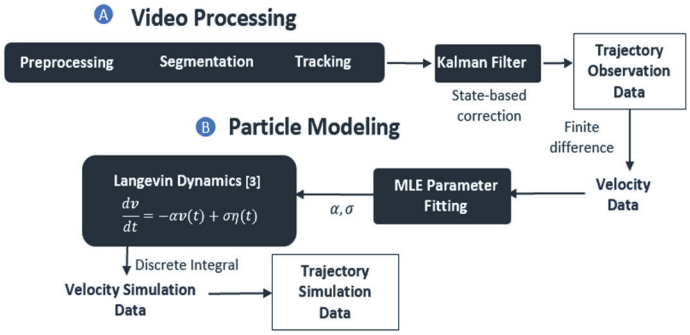


Figure 1: Automated video analysis pipeline

The extracted velocity data represent the intrinsic motility behavior of endothelial cells in the absence of explicitly modeled external forces and serve as a baseline for understanding migration dynamics prior to incorporating shear stress. These velocity data are then modeled using Langevin dynamics, where the temporal evolution of velocity is described by an OU-process, and the model parameters are estimated through Maximum Likelihood Estimation (MLE). Then, the validation is carried out by comparing simulation results with experimental data using statistical metrics such as Mean Squared Displacement (MSD) and spatial density evolution, enabling a direct and quantitative evaluation of the model's ability to reproduce endothelial cell migration behavior as a prerequisite for future extension toward shear flow–driven dynamics.

3. Achievements

The first phase of this research successfully established an integrated framework that converts time-lapse microscopy data into quantitative trajectory and velocity datasets, enabling stochastic modeling of endothelial cell migration. Using this framework, the Ornstein–Uhlenbeck (OU) model parameters were estimated as α_x = 311.1222 h^{-1} and σ_x = 6948.3575, and α_γ = 219.2854 h^{-1} and σ_γ = 6097.2682, indicating strong stochastic fluctuations and rapid relaxation of velocity, which reflect a low level of directional persistence in confluent endothelial cell motion. Validation using MSD that the simulated trajectories exhibit a steeper growth compared to experimental observations, indicating that the model systematically overestimates long-term diffusion despite accurately capturing short-term stochastic behavior.

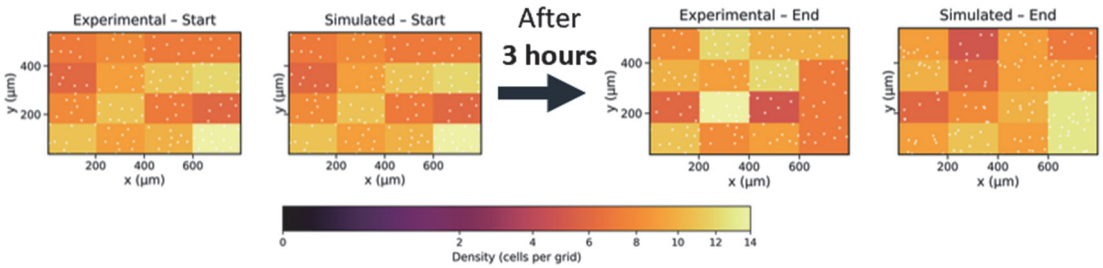


Figure 2: Comparison of spatial density evolution

In addition, spatial density analysis based on a 4 × 4 grid comparison between initial and final states such as shown in Figure 2, reveals that the simulated system spreads more rapidly than the experimental data, with quantitative discrepancies characterized by MSE = 14.25 and RMSE = 3.77 cells/grid at the final frame. These results suggest that while the OU-based model effectively captures intrinsic motility and local fluctuations, it does not account for macroscopic constraints that limit cell

dispersion, such as confinement effects or collective interactions. Consequently, the observed mismatch between simulation and experiment provides important evidence that endothelial cell migration cannot be fully described by a non-interacting stochastic model alone, highlighting the necessity of incorporating interaction mechanisms and external influences, including shear flow effects, in future model development.

4. Summaries and future plans

Based on the first year's results, we successfully establishes a data-driven framework for analyzing endothelial cell migration by integrating video-based trajectory extraction with stochastic modeling using an OU formulation. The results demonstrate that the proposed model can capture short-term stochastic dynamics and intrinsic motility characteristics, as reflected by the estimated parameters and velocity behavior. However, discrepancies observed in MSD and spatial density evolution indicate that the current non-interacting model overestimates long-term dispersion and does not account for macroscopic constraints present in experimental systems. These findings highlight that endothelial cell migration is governed not only by intrinsic stochastic motion but also by collective interactions and environmental influences. Therefore, future work will focus on extending the model by incorporating intercellular coupling, confinement effects, and external mechanical stimuli such as WSS to better represent migration under shear flow conditions. In addition, further validation will be performed using more comprehensive statistical metrics to improve model reliability. Through these developments, this research aims to advance toward a more accurate and predictive simulation framework for endothelial cell dynamics in physiologically relevant flow environments.

5. Research results

1) Journal

Not Applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] D. Setianto, F. Faturrahman, H. Anzai, M. Ohta, P.E. Putri, N.K. Putra (2025) "Stochastic Non-Interacting Particle Modeling of Endothelial Cell Migration Under Confluent Condition Using Video Processing Algorithm", *Proceedings of The 25th International Symposium on Advance Fluid Information (AFI)*, 2025, CRF-69, pp. 190-193.

[2] D. Setianto, N.K. Putra, F. Faturrahman, H.Anzai, M. Ohta, P.E. Putri, "Stochastic particle modeling of endothelial cell migration under shear flow", *13th Asian-Pacific Association for Biomechanics Conference (APBiomech)*, 2025, Auckland, New Zealand.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not Applicable

(Award) Not Applicable

(Press release) Not Applicable

課題番号	J25I029
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

高速飛翔体表面の遷移機構とそれを再現する乱流モデルに関する研究

Research on the Transition Mechanism on the Surface of High-Speed Flying Vehicle and a Turbulence Model that Reproduces It

河田 卓也**, 焼野 藍子*†
大崎 陸人**, 中川 皓介*
Jens Fransson***††
*東北大学流体科学研究所, **芝浦工業大学工学部
***KTH Royal Institute of Technology, Department of Engineering mechanics
† 申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

従来の RANS モデルでは, 遷移によって生じる乱流成分を乱流粘性として丸め込んでいるため, 次世代の高速飛翔体に求められる高迎角姿勢や層流維持といった機能の評価が不可能である. 本研究では, 高速飛翔体表面における遷移機構の解明と, それを再現する新たな RANS モデルの提案に資する知見の獲得を目的とする. 特に, 翼表面周辺のレセプティビティ (外乱受容性) の解明, DNS 計算による遷移の直接計算, および DMR (Distributed Micro Roughness) が TS 波崩壊に与える影響の定量的評価を行う. さらに, KTH (スウェーデン王立工科大学) との国際連携を活かし, 風洞実験データや DNS データとの比較・検証を通じて, 高精度な RANS モデル構築に向けた基礎的知見を蓄積する.

2. 研究成果の内容

流体科学研究所において, Blasius 境界層を対象とした直接数値シミュレーション (DNS) を用いた遷移・抵抗低減機構の解析を実施した (図 1). 本年度は芝浦工業大学・河田研究室との共同研究として, DMR (Distributed Micro Roughness) が遷移境界層に及ぼす抵抗低減機構を, スケール間エネルギー輸送解析の手法を用いて検討した. 具体的には, 河田博士および Henrik Alfredsson 教授 (KTH) (2018, Phys. Rev. Lett.) の提案する波数 (または周波数) 空間でのスケール分解インタースケールエネルギー転送解析を, DMR ありおよびなしの DNS データセットに適用し, DMR による小スケール乱流生成・抑制メカニズムを明らかにした. 本成果は 2025 年 11 月の ICFD2025 において発表された (大崎・中川・焼野・河田, 「遷移境界層流れにおける分散型微小粗さによる摩擦抵抗低減機構について」).

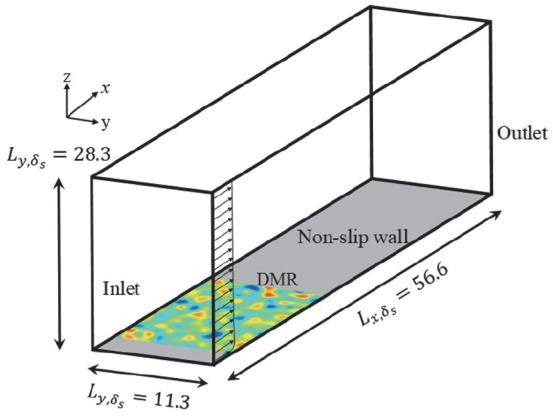


図 1：計算領域および境界条件の概略

3. 研究目標の達成状況

申請書に記載した「予想される成果」の達成状況は以下の通りである．遷移プロセスにおける DMR のエネルギー輸送への寄与について，DNS 計算と河田・Alfredsson 手法を組み合わせたスケール間エネルギー解析を実施し，TS 波の崩壊後に形成される小スケール乱流構造が DMR によって制御されるメカニズムを定量的に明らかにした．一方，バイパス遷移数値実験に向けた格子乱流などの設置に関しては，Jens Fransson 教授（KTH）との意見交換（IUTAM 遷移シンポジウム，2024 年 9 月，長野，およびオンラインコミュニケーション）を通じて設計の指針を得ており，次年度の検討に向けた準備が進んでいる．RANS モデル改善への直接的な適用は次年度課題であるが，遷移機構の物理的理解という基盤的成果は目標に即した進捗を示している．

4. まとめと今後の課題

本年度は，高速飛翔体表面における遷移機構解明を目標として，DMR を用いた Blasius 境界層の直接数値シミュレーションを実施し，スケール間エネルギー輸送解析によって DMR 抵抗低減機構の物理的描像を明らかにした．本成果は ICFD2025 において発表し，流体科学コミュニティへの情報発信を行った．今後の課題として，波数・周波数空間における乱流運動エネルギーおよびレイノルズせん断応力の輸送バジェットの定量的比較を継続する．また，KTH との連携を本格化させ，バイパス遷移実験データとの比較検証を通じて，2-way 結合型 RANS モデル構築に向けた知見の積み上げを進める．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 大崎 陸人，中川 耕介，焼野 藍子，河田 卓也: 遷移境界層流れにおける分散型微小粗さによる摩擦抵抗低減機構について， *ICFD2025*，仙台，(2025).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし
（受賞）なし
（マスコミ発表）なし

Project Code	J25I030
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Fundamentals
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Generation of Charged Cavitation Bubbles and the Characteristics

Takehiko Sato*†, Mohamed Farhat**††
Kiyonobu Ohtani*, Tomoki Nakajima*, Siwei Liu*, Zihan Song***
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), Switzerland
***Graduate School of Engineering, Tohoku University
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Cavitation bubble dynamics is still a major issue for a variety of industrial applications, including hydraulic machines, marine propellers and space rocket inducers among others. We have clarified that hydrogen gas is included in a plasma generated bubble and jetting dynamics from cavitation bubbles through the previous IFS collaboration research project. Although the jetting phenomenon strongly depends on the gas pressure inside cavitation bubbles, the gas pressure has not been clarified because the cavitation process is short and small. In this project, we aim at developing a pressure measurement method using electrical discharge characteristics in the cavitation bubble. We strongly believe that the complementary skills developed by the research groups led by Prof. Farhat (EPFL) and Prof. Sato (Tohoku University) will greatly help achieving the project goals.

2. Details of program implement

A schematic of the experimental apparatus is shown in Fig. 1. The system consists of a laser optical system, a shadowgraph visualization system, a discharge system, and electrodes. A nanosecond-pulse Nd laser (532 nm, 6–7 ns, ~7.8 mJ/pulse) was focused in water to generate spherical bubbles. Bubble dynamics were recorded using a high-speed camera with background illumination. A pulse voltage of approximately 2.0 kV was applied to electrodes inserted into the water-filled vessel, and discharge was induced when the bubble reached its maximum size. The discharge current was measured using a current probe and recorded with an oscilloscope synchronized with the camera. The needle electrode, with a tip diameter of approximately 30 μm, was positioned to contact the top of the bubble [1–3].

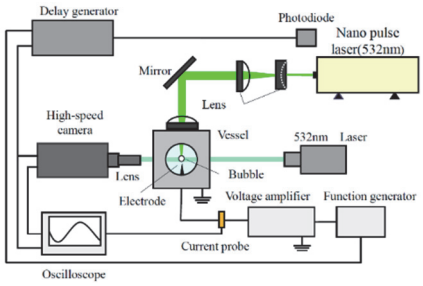


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

For the analysis, the bubble center at maximum diameter was defined as the origin O (x_{max}, y_{max}), and the center just before disappearance was defined as E (x_e, y_e). The displacement was calculated as ($x_e - x_{max}$, $y_e - y_{max}$). Bubble centers were determined by importing binarized MATLAB images into ImageJ.

Fig. 2 shows the disappearance positions of bubbles relative to the center of the primary bubble at its maximum size. Without discharge, most bubbles showed little displacement, with average movements of −53 μm in x and 57 μm in y. Under positive discharge, the bubbles moved mainly in the negative x-direction, with average

displacements of −251 μm in x and 48 μm in y. Under negative discharge, the bubbles moved in both negative x- and y-directions, with average displacements of −103 μm and −470 μm, respectively.

The negative x-direction movement observed even without discharge may be due to the formation of two adjacent laser-induced bubbles, whose mutual attraction caused displacement, consistent with previous reports [4]. The pronounced negative y-direction movement under negative discharge is likely caused by repulsive force acting on the charged bubble when it contacted the electrode near its maximum diameter, indicating that y-direction displacement is mainly influenced by discharge and charge accumulation.

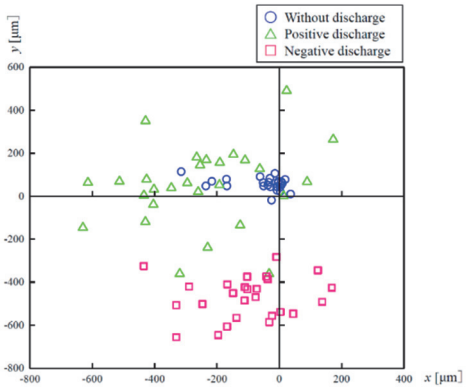


Fig. 2 The selected series of shadowgraph images of the bubble behavior in the case of negative

3. Achievements

Demonstrated effective charge injection into laser-induced cavitation bubbles by applying electrical discharge at maximum expansion. High-speed shadowgraph visualization revealed polarity-dependent bubble displacement, providing evidence of Coulomb-force-driven motion. These findings support future studies on micro energy concentration and plasma–bubble interactions.

4. Summaries and future plans

The movement characteristics of charged cavitation bubbles remain unclear. Therefore, this study aims to clarify the effect of discharge polarity on their movement characteristics.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] S. Liu, T. Sato, O. Supponen, M. Farhat, T. Nakajima: Exploring the Characteristics and Biomedical Applications of Charged Cavitation, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS8-15, pp. 727-728.

[2] S. Liu, O. Supponen, T. Sato, M. Farhat, T. Nakajima, K. Nitto, K. Kurihara: Characteristics of the Plasma-Affected Cavitation Bubble Dynamics, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-56, pp. 160-161.

[3] T. Sato, M. Farhat, S. Kamata, K. Ohtani, T. Nakajima, S. Liu: Generation of Charged Cavitation Bubbles and Their Characteristics, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-64, pp. 176-177.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable (Award) Not applicable (Press release) Not applicable

課題番号	J25I031
区分	一般公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

高速変形下の脂質単分子膜の局所表面張力場の計算
Calculation of Local Surface Tension Field of Lipid Monolayer under Rapid Deformation

Nguyen Nam Quoc*, 馬渕 拓哉**††, 金川 哲也***†
*筑波大学理工情報生命学術院, **東北大学流体科学研究所, ***筑波大学システム情報系
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

超音波下における気泡の振動は医療応用において注目を集めている．これらの応用において，気泡は脂質単分子膜によって被覆されている．脂質単分子膜の表面張力はひずみに対して非線形に変化することが知られている．したがって，超音波誘起による気泡振動および気泡を含む媒体中の超音波伝播に影響を及ぼす.

従来の脂質単分子膜の表面張力モデルは実験に基づいて構築されているが，到達可能な変形速度が低領域（10^{-1}~10^{1} Hz）に限られており，超音波誘起気泡振動に対応する高変形速度領域(10^{5}~10^{6} Hz)での挙動・力学特性は未解明である．したがって，気泡振動を適切に記述するために，脂質単分子膜の新たな表面張力モデルを構築する必要がある.

本研究では，分子動力学シミュレーション（MD）を用いて，高変形速度下における脂質単分子膜の挙動および表面張力を解明する．さらに，MD により得られた表面張力の傾向を基に，新たな表面張力モデルを構築する．加えて，局所的な変形と局所表面張力との関係を理解するため，局所表面張力の計算を行う.

2. 研究成果の内容

シミュレーション条件は以下の通りである．DPPC 脂質 64 分子からなる単分子膜を 2 層配置し，その間に水層を挟んだ系を構築する．面積当たり脂質分子数（APL）は 0.63 nm^2 とする．平衡化後，8 ns の NVT シミュレーションで表面張力を計算する．その後，8 ns でボックスサイズを双方向に変化させる．さらに，変形後の状態を維持したままボックスサイズを固定し，8 ns のシミュレーションを行う．変形は，(a) 圧縮および (b) 膨張の 2 種類について，一定の変形速度で実施する．圧縮過程において，LAMMPS の Nakamura パッチ（Comput. Phys. Commun., 2015）を用いて，100,000 ステップの間，250 ステップごとに局所表面張力場の平均を算出する．また，表面抽出，法線ベクトルの算出，および応力テンソルの法線方向への整列には Python コードを用いる.

図 1 は系全体の表面張力を示すものである．一定速度での膨張（赤）では表面張力は線形に増加する一方，一定速度での圧縮（青）では非線形に減少し，その変化はより顕著である．さらに，変形直後において，膨張の場合には表面張力は緩やかな振動を示すのに対し，圧縮の場合には表面張力の回復挙動が観測される．また図 1 の右より，圧縮の場合も含め，表面張力がゼロ付近に達するまで，表面張力と APL の間には線形関係が成立することが分かる.

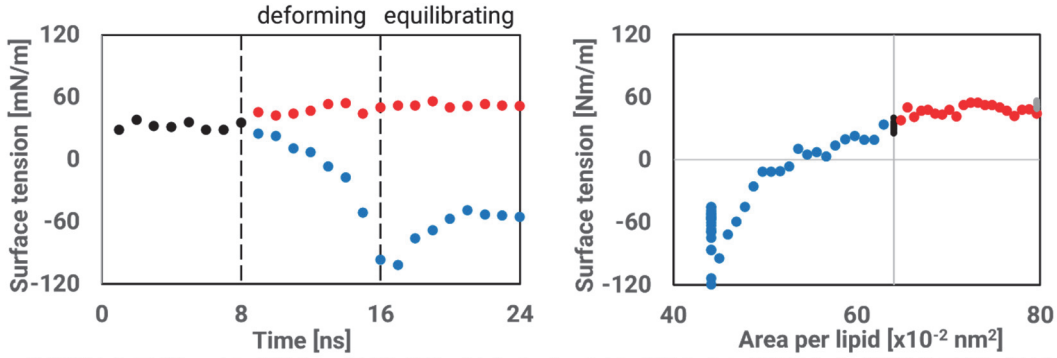


図 1 : 脂質単分子膜の表面張力の時間変化（左）および表面張力と面積当たり脂質分子数（APL）の関係（右）.

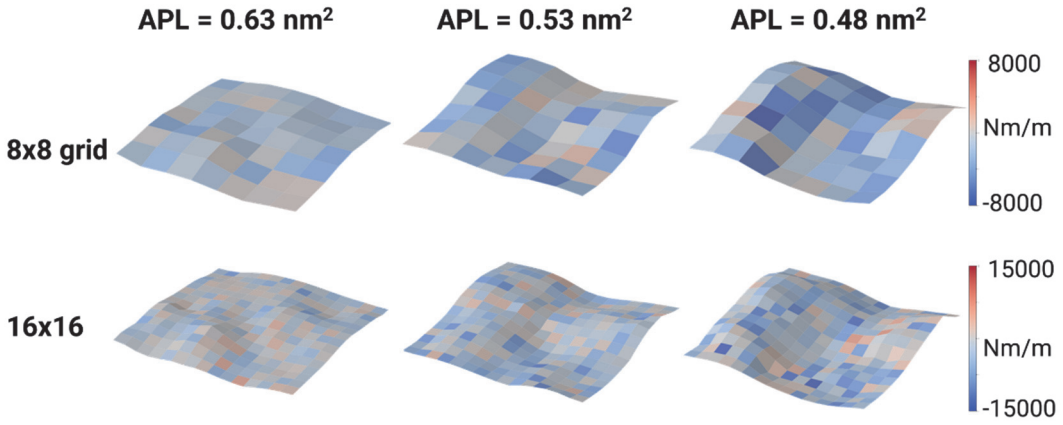


図 2 : 圧縮過程における異なる面積当たり脂質分子数に対する脂質単分子膜の局所表面張力分布.

図 2 は圧縮過程における局所表面張力場を示すものである．脂質単分子膜の変形が進行するにつれて，局所表面張力の振幅は増大し，特に負の値が支配的となる．なお，現在の結果は十分に収束しておらず，表面張力の値が高いこと，およびグリッドサイズへの依存性が見られることからも確認される．

3. 研究目標の達成状況

高変形速度下における脂質単分子膜の変形挙動をシミュレーションした．その結果，表面張力と面積当たり脂質分子数（APL）の関係は，従来モデルから乖離し，特に表面張力がゼロ付近および負の領域において顕著であることが示された．また，局所表面張力場の計算ワークフローを構築し，初期的な結果を得られた．

4. まとめと今後の課題

超音波下の医療用気泡の振動モデルは，安全な超音波医療応用に向けて重要である．本研究では，振動のモデル化に適した脂質単分子膜の新たな表面張力モデルを構築することを目的とする．脂質単分子膜の変形に関する MD を通じて，当該条件下における挙動および力学応答を解明し，既存の表面張力モデルからの乖離の可能性を示す．さらに，局所表面張力場の解析により，単分子膜内部における張力分布が一様ではないことを明らかにする．今後は，MD 結果を連続体理論による予測と比較する．さらに，MD および理論の両結果に基づき，新たな表面張力モデルの提案を行う．また，再現計算を実施し，周期境界条件の影響および局所表面張力場の収束性についても検討する．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Nguyen, Mabuchi & Kanagawa: Calculation of Surface Tension Field of Lipid Monolayer under High Strain Rate, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-71, pp. 196-198.

[2] Nguyen, Mabuchi & Kanagawa: Molecular Dynamics study on surface tension model for phospholipid coated (micro)bubble ultrasound contrast agents, 第 12 回混相流国際会議 ICMF2025, Toulouse, (2025), ID: 340.

[3] Nguyen, Mabuchi, Takeishi & Kanagawa: 医療用気泡を覆う脂質単分子膜の力学挙動の考察：変分法に基づく膜の数理モデルと分子動力学計算，混相流シンポジウム 2025，神戸，(2025), SS0505.

[4] Nguyen, Takeishi, Mabuchi & Kanagawa: MHz 帯で振動する脂質単分子膜の理論解析と分子動力学計算，第 36 回バイオフロンティア講演会，弘前, (2025), 2A03.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I032
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目（発展）

風洞試験および流体計算による空陸両用車の高性能化に関する研究

Study on Improving the Performance of a Roadable Aircraft with Wind Tunnel Testing and Fluid Simulation

森澤 征一郎*†，新里 侑右*，伊神　翼**††
*沖縄工業高等専門学校，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

沖縄, 鹿児島, 北海道など離島に住む人々にとって航空機は非常に重要な移動手段である．特に，悪天候時は波が高くなり出船が難しくなることが多く，移動手段は空路に依存することになる．一方で，離島内の人口減少に伴う利用者の減少が進むことで空港の利用率が低下し赤字路線となり，路線の縮小や廃止が進みつつある．その結果，離島などの既存の地方空港の無人化も進んでいる．そのため，我々はこれらの問題解決手段として離島間を移動できる新たな移動手段として既存の空港滑走路を用いた空陸両用車を提案し，機体の成立性についてのサイジングを実施してきた．ここで，重要となったのは機体の最大揚力係数・有害抗力係数などの空力性能の予測である．これらは旅客機などをベースとした実験結果による経験的な予測であり，胴体などは自動車のように圧力抗力の影響が形状への適用が難しく，適用できた範囲は飛行機形状に近い主翼などに留まる．さらには，機体のエルロン，ラダー，エレベータなどの操舵やスラット，フラップなどの高揚力装置の効果についての検証も機体成立性という点で実現性には重要な要素となる．そこで本研究では風洞試験および流体計算を通じて，空陸両用車に生じる空力 6 分力の計測を行うことで機体のサイジングを再評価するとともに，機体自身の安定性も評価できることで空陸両用車の高性能化を目指す．

2. 研究成果の内容

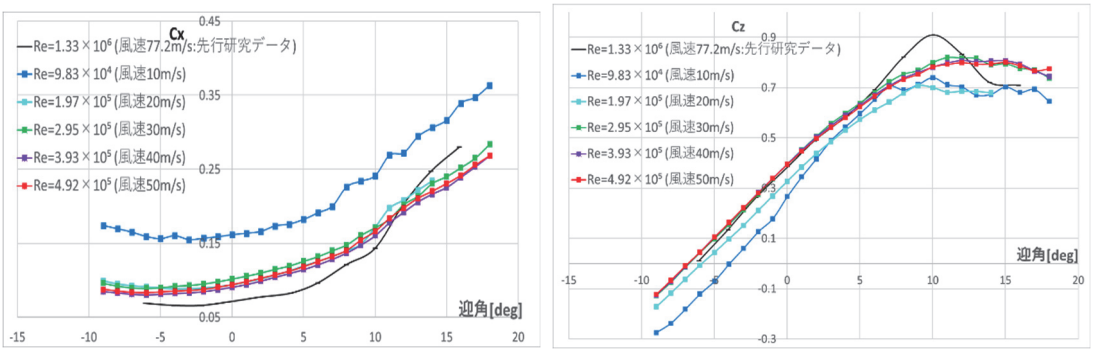
今年度は，風洞実験により空陸両用車に生じる空力 6 分力の計測と感圧塗料(PSP)による機体表面の圧力場について可視化を行った．現在は，これらのデータを解析中であるので空力 2 分力の結果，および PSP の状況を報告する．本研究では東北大学流体科学研究所の低乱熱伝達風洞を利用した. 実験時の風速は, 今回の風洞試験では風速が 10m/s から 50m/s の範囲で変化させて計測し, 各風速の計測時には迎角を-5°から 22°の範囲で変化させた. なお, 計測時のレイノルズ数は Re = 9.83×10^4 から 4.92×10^5 の範囲で変化しており，他機関で行われた先行研究のレイノルズ数は Re =1.33×10^6 となっている．

図 1 に X 方向及び Z 方向の空力計測の比較結果を示す．その結果，図 1(a)より今回の実験結果についてレイノルズ数が大きくなると迎角の変化に対する C_X の値が小さくなっていることがわかる．なお，レイノルズ数の増加に伴い，C_X の値の減少量は小さくなっている．この結果はレイノルズ数の増加により，粘性の影響が減少することで模型表面に働く摩擦抗力が減少したためだと考えられる．また，レイノルズ数が Re =9.83×10^4 のケースでは C_X の結果が他のケースに比べて全体的に大きな値となっている．この結果は，レイノルズ数の

オーダーが他のケースに比べ低いため，粘性による影響を強く受けたためだと考えられる．一方，先行研究の結果と今回計測した C_X の結果を比較したところ，C_X が最も低くなる迎角や C_X の増加が始まる迎角などの特徴が類似しており，先行研究と定性的に同様な結果が得られていると考えられる．

次に，図 1(b)より今回の実験結果についてレイノルズ数が増加すると迎角の変化に対する C_Z の値も大きくなっていることがわかる．なお，レイノルズ数の増加に伴い C_Z の増加量は小さくなっており，レイノルズ数が $Re = 2.95 \times 10^5$ 以上となる結果の値はほとんど重なった状態となっている．加えて，レイノルズ数の増加に伴い，より高迎角で C_Z の最大値が計測されていることがわかる．これらの結果はレイノルズ数の増加に伴い，主翼周辺での流れが安定し低迎角での主翼表面の流れの剥離が減少したためだと考えられる．なお，今回の実験結果では先行研究の結果と比べ，C_Z が最大となった迎角よりも高迎角での C_Z の減少が緩やかであった．そのため，より高迎角での計測を行うことで失速の様子を確認できる結果が得られると考えられる．一方，先行研究の結果と今回計測した C_Z の結果を比較したところ，C_Z の値に対する迎角の変化や C_Z が最大となる位置などの特徴がほぼ一致しており，先行研究と定性的に同様な結果が得られていると考えられる．

最後に，図 3 に PSP で可視化した例を示す．図 3 で示すように無事に可視化することができた．現在は得た結果を整理し，空力特性と圧力場の関係についての議論を進めている．



(a) X 方向の空力係数(C_X)　　(b)Z 方向の空力係数(C_Z)

図 1：X 方向及び Z 方向の空力計測の比較結果

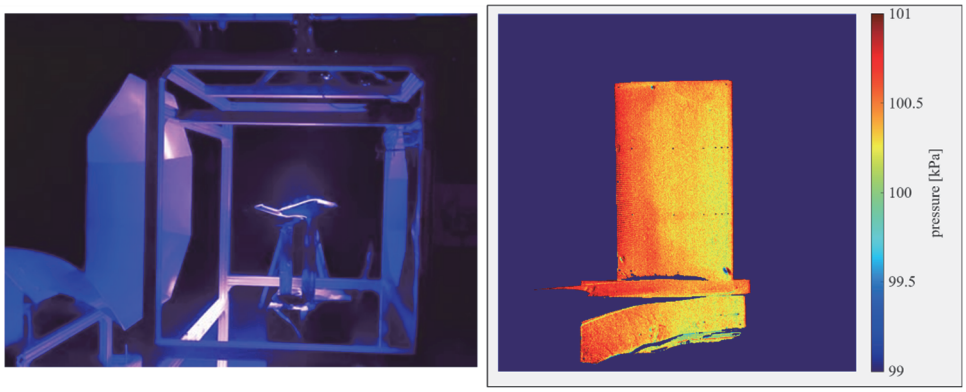


図 1：PSP による空陸両用車の主翼表面で圧力場を可視化した例

3. 研究目標の達成状況

本研究は，現在データの分析中ではあるが風洞実験を通じて空陸両用車の空力設計に必要な 6 分力データを得ることが出来た．現在は，それらのデータは解析中である．[達成度：70%]

4. まとめと今後の課題

風洞実験により空陸両用車の空力設計に必要な空力 6 分力のデータを得るとともに感圧塗料(PSP)による機体表面の圧力場について可視化を試みた．今後は，これらの結果の精査を行い，機体自身の安定性を得ることで空陸両用車の高性能化を試みる必要がある．そのためにも，今後は流体計算を用いて風洞試験では対応できないより高レイノルズ数の流れや異なる操舵や高揚力装置の条件について議論する必要がある．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] S. Morizawa, Y. Shinzato, M. Ozawa, and T. Ikami, "Trial-experiment study for improvement of the aerodynamic performance on a roadable aircraft using wind tunnel testing," *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, November 10-13, 2025, CRF-7, pp. 29-30.

[2] Y.Shinzato and S. Morizawa, "Aerodynamic Testing with a Wind Tunnel Model on a Roadable Aircraft Using FDM 3D Printer," *Twenty-second International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, Sendai, Japan, November 10-13, 2025, OS27-13.

[3] 新里侑右，森澤征一郎， "FDM 方式 3D プリンターを用いた空陸両用車の風洞試験用模型作成と空力計測の実施," 第 63 回飛行機シンポジウム，1A15，沖縄，2025 年 10 月 15 日～17 日．

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I033
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	3 年目

複雑流動場に対する圧縮センシング技術の構築
Development of Compressive Sensing Technique for Complex Fluid Phenomena

松田　佑*†，小久保 琉史*，本橋 良汰*，黒澤 美怜*
伊神　翼**，江上 泰広***，永井 大樹**††
*早稲田大学理工学術院，**東北大学流体科学研究所
***愛知工業大学工学部
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究では，データ駆動型のアプローチに基づいた複雑流動場の圧縮センシング技術の構築を目指している．このようなアプローチで圧縮センシングを行う際には，計測データを低次元化することが重要となる．そこで本年度は対称翼後流に生じる流れ場を Particle Image Velocimetry（PIV）計測したデータに対して深層学習モデルを用いた低次元化手法を適用し有効性を検討した．

2. 研究成果の内容

本年度は NACA0012 翼型模型の後流の速度場を PIV により計測した．計測は東北大学流体科学研究所低乱風洞実験施設の小型低乱風洞において実施した．実際の実験では複数の迎角で PIV 計測を行ったが，ここでは主に迎角 3°のデータについて扱う．低次元化手法には複数の手法が提案されているが，本研究では畳み込みオートエンコーダ Convolutional Autoencoder (CAE)と Vision Mamba Autoencoder (ViM-AE)[1]を用いた低次元化を実施した. 一般に CAE は, 局所性は強いものの長距離依存性を捉えにくいとされている一方, ViM-AE は局所性と長距離依存性の双方に強いと言われている．これらの二つの手法を用いて流れ場を低次元化したのちに再構成を実施し，元のデータとの二乗平均平方根誤差（Root Mean Squared Error; RMSE）を計算した．図 1 に流れ方向速度成分について，図 2 に鉛直方向速度成分について元の計測データとそれぞれの手法で再構成した結果を示している．なお，図中では流れは左から右に流れており，主流流速は 9 m/s である．またtは計測のタイムステップを表している．図 1，2 から分かるように，いずれの手法も流れの細かい構造を捉えることはできていないものの流れ場の大規模な構造はほぼ捉えることに成功している．また RSME を計算した結果，いずれの手法においても 0.60 m/s であり，ほぼ同一の結果が得られていると言える．

3. 研究目標の達成状況

本年度は PIV 計測データの低次元化手法に関して取り組んだ．翼後流などの乱れの強い流れでは特異値分解などでは低次元化が困難であることが知られているが，深層学習を用いた手法では計測データを問わず安定した結果が得られることを確認した．

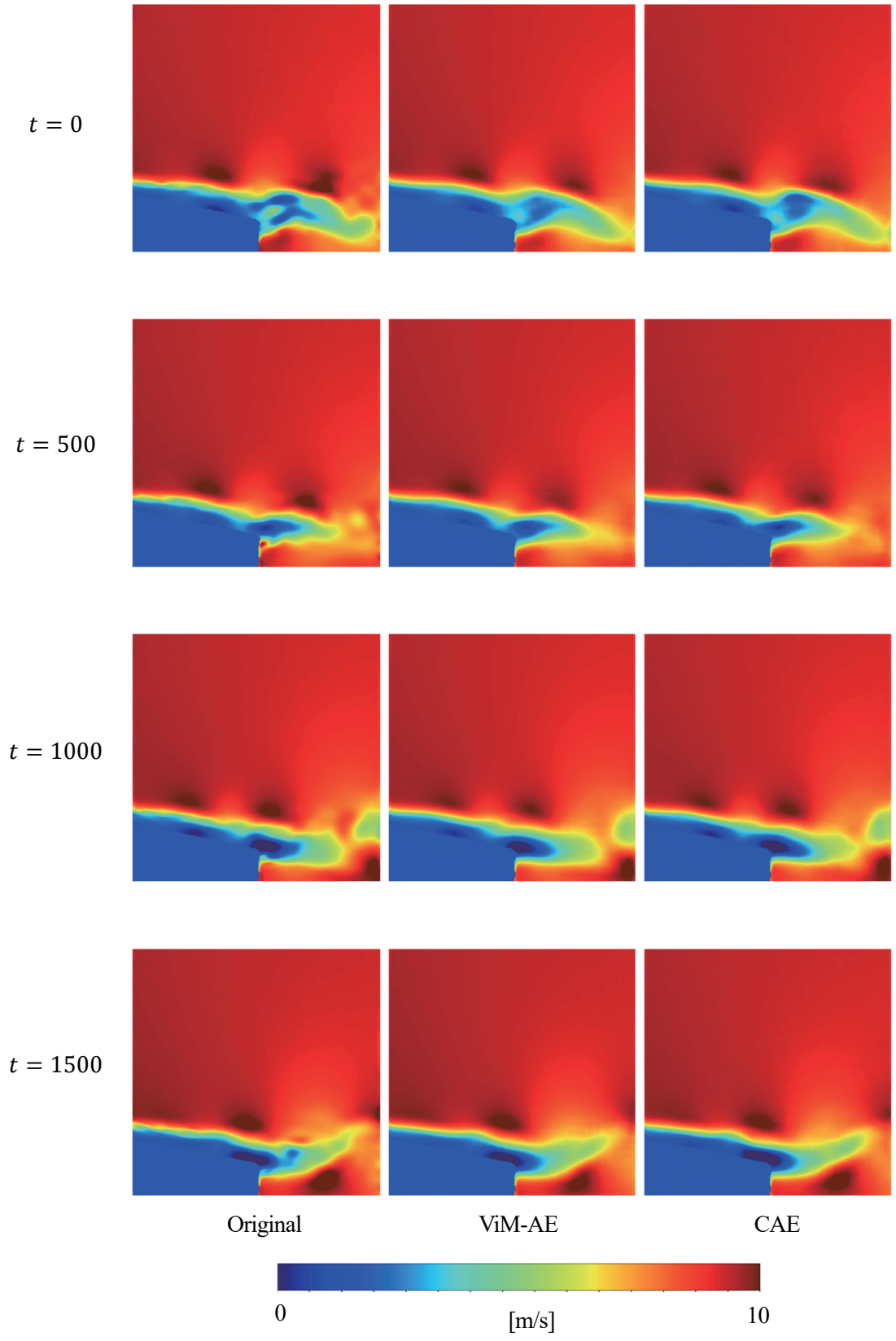


図 1　元データと ViM-AE および CAE による再構成画像．流れ方向速度成分の結果．

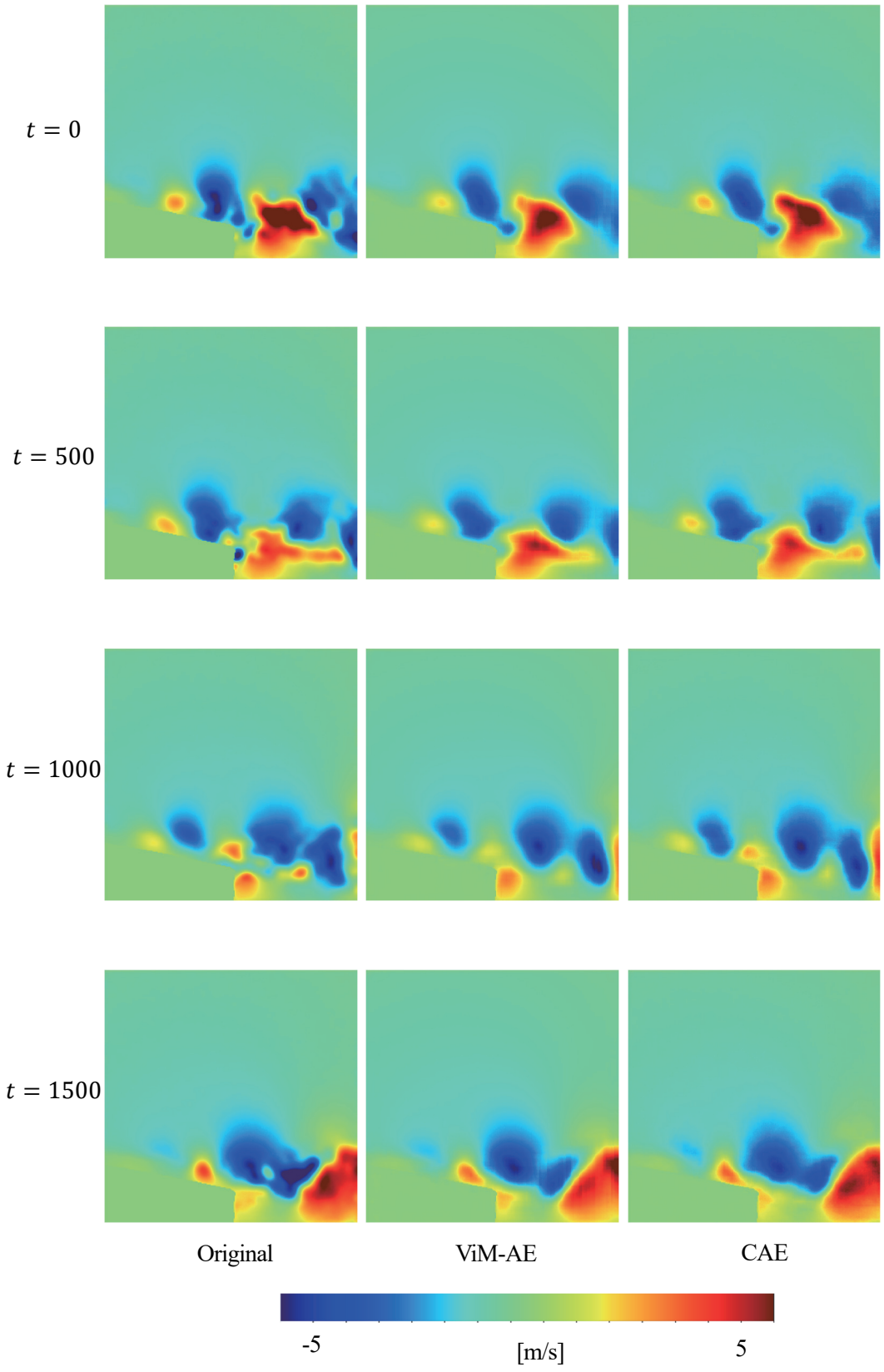


図 2　元データと ViM-AE および CAE による再構成画像．流れに垂直な方向速度成分の結果．図の上向きを正としている．

4. まとめと今後の課題

継続 3 年目で最終年度となる本年度では，前年度までに行ってきた感圧塗料計測法のデータに対する低次元化と再構成法に留まらず，PIV 計測データなど他データについて検討を行った．その結果，深層学習モデルを用いた手法を用いることで汎用的に流れ場の低次元化が可能であることが確認された．またこれまでの研究から，流れ場の低次元化に関して数理最適化手法を含め複数の手法を試しており，感圧塗料計測データや PIV 計測データといった計測法を問わずに流れ場の低次元化が可能となった．

参考文献

(1) L. Zhu, B. Liao, Q. Zhang, X. Wang, W. Liu, X. Wang: Vision Mamba: Efficient Visual Representation Learning with Bidirectional State Space Model, *Proceedings of the 41 st International Conference on Machine Learning*, Vienna, (2024), pp. 62429-62442.

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] M. Kurosawa, T. Narita, R. Kokubo, M. Okawa, T. Ikami, Y. Egami, H. Nakai, Y. Matsuda: Time Series Prediction Method for PIV data Using Time Evolution Equations, *Proceedings of the 21st International Symposium on Flow Visualization,* Tokyo, (2025), ISFV21-1167.

[2] M. Kurosawa, M. Takagi, R. Kokubo, T. Ikami, Y. Egami, H. Nakai, T. Kashikawa, K. Kimura, Y. Takita, Y. Matsuda: Flow Field Prediction Method Based on Pressure-Sensitive Paint Data, *Proceedings of the 22nd International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025), pp. 1244-1245.

[3] R. Kokubo, M. Kurosawa, M. Okawa, T. Ikami, Y. Egami, H. Nakai, Y. Matsuda: Machine Learning Based Post-Processing for PIV data, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-15, pp. 50-51.

[4] 小久保琉史, 都木誠, 黒澤美怜, 伊神翼, 江上泰広, 永井大樹, 柏川貴弘, 木村浩一, 松田佑, PSP 計測データを用いた時系列予測技術の開発，日本流体力学会年会 2025，(2025)，3-41.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J25I034
区分	一般公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目（発展）

高速ナノ液滴の衝突による水の新機能発現

Expression of New Functions of Water by Impinging High-speed Nanodroplets

佐藤 岳彦*†，金澤 誠司**††
劉　思維*，中嶋 智樹*，大熊 拓郎***
*東北大学流体科学研究所，**大分大学理工学部
***東北大学大学院工学研究科
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では，申請者が開発した粒径 100 nm 以下で高速で噴出する高速ナノ液滴が衝突により，わずかな水のみで濡らさずに低温で洗浄・殺菌する革新的機能が発現する機序について，化学種生成の視点から解明を目指す．

2. 研究成果の内容

本年度は，高速ナノ液滴システムの診断能力をさらに向上させるために，OH ラジカルをその場で直接可視化する手法として，レーザー誘起蛍光法（LIF）を導入した．本手法では，ラジカルの空間分布および時間変化を計測することが可能であるため，LIF 法を用いることにより，ラジカルの生成機構だけでなく，ミスト流中における輸送および相互作用についても調査できると考えられる．採取後の分析に依存する ESR 法と比較して，LIF 法はリアルタイムかつ局所的な情報を取得できるため，動的な液滴研究において特に有用である．

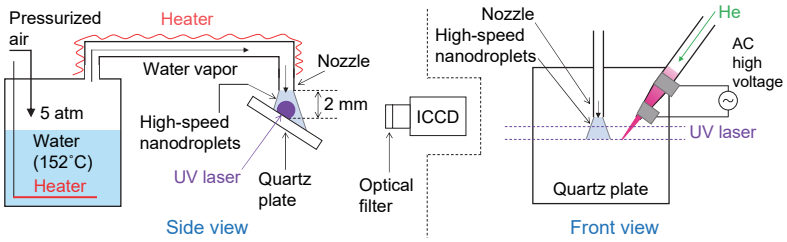


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

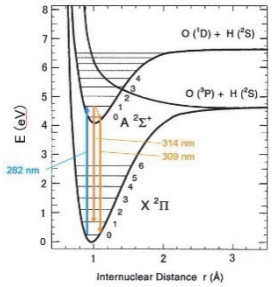


Fig. 2 Energy level diagram of OH.

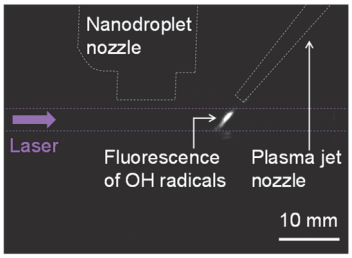


Fig. 3 LIF signals derived from OH radical.

図 2 に，LIF 法を用いて OH ラジカルを計測するための実験装置を示す．石英板をノズルから 2 mm の距離に 45 度の角度で設置し，高速ナノ液滴をこの石英板に衝突させた．UV レーザーパルスを石英板表面に沿って照射し，UV レンズおよび光学フィルターを備えたゲート付き ICCD カメラ（Hamamatsu, C10041-51）を用いて LIF 信号を取得した．LIF 法により基底状態の OH

ラジカルを観測するために，282 nm における OH [$A^2\Sigma^+$ (v' = 1) ← $X^2\Pi$ (v" = 0)] 遷移系を用いた（図 2）．レーザーパルスは波長可変 OPO レーザー（EKSPLA, NT342C-SH-ATTN01）から照射した．また，LIF システムの妥当性を確認するために，プラズマジェットにより生成された OH ラジカルも同時に計測した．

図 3 に，OH ラジカルに由来する LIF 信号を示す．プラズマジェットにより生成された OH ラジカルの LIF 蛍光は，ジェットノズル下流の He ガス流中で検出されたが，高速ナノ液滴の衝突によって誘起される LIF 蛍光は観測できなかった．この結果は，大きな消光環境下における低濃度の OH ラジカルを検出できるように，LIF システムを改良する必要があることを示している．

3. 研究目標の達成状況

高速ナノ液滴の衝突により OH ラジカルが生成されるかどうかを LIF 蛍光法を構築し，検出を試みた．現時点では衝突時に OH ラジカル由来の発光は確認できていないことから，OH ラジカルの生成の有無についての考察を深めることができた．

4. まとめと今後の課題

高速ナノ液滴が衝突時に OH ラジカルが生成するという仮定の下に検出を試みたが，現状では検出されなかったため，衝突瞬間をより精密に計測する実験系を考案する必要がある．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] 佐藤岳彦，藤村茂，金澤誠司，立花孝介，李俊賢，肖昀晨，中嶋智樹，杉本俊之，鄭雲謙，劉思維：高速ナノ液滴が拓く新しい水利用社会，金属，Vol. 95, No. 12 (2025), pp. 29-35.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] T. Sato, S. Fujimura, S. Kanazawa, K. Tachibana, S. Liu, T. Nakajima, Y. Xiao: Generation of High-Speed Water Nanodroplets and Their Applications, *9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2025), Fukuoka*, (2025), A2-9-12.

[3] T. Sato, S. Fujimura, S. Kanazawa, K. Tachibana, S. Liu, T. Nakajima, Y. Xiao: High-Speed Nanodroplets Driving Innovation in Water Use, *The Eleventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (J-K TFEC11), Okinawa*, (2025), JK-TFEC11-1475.

[4] T. Sato, S. Kanazawa, S. Liu, T. Nakajima, T. Okuma, K. Tachibana: Measurement of the Characteristics of Impinging High-Speed Water Nanodroplets, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-63, pp. 174-175.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project Code	J25I035
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Magnetic Incremental Permeability Detection Method and Experimental Technology for Stress under High-Temperature for Ferromagnetic Materials

Shurui Zhang*†, Tetsuya Uchimoto**††
Zhongqi Xu***, Xiucheng Liu*, Yujue Wang*
*School of Information Science and Technology, Beijing University of Technology
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
***College of Mechanical & Energy Engineering, Beijing University of Technology
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the Project

This project focuses on the Magnetic Incremental Permeability (MIP) detection method and experimental technology for stress in ferromagnetic materials under high temperature.

Ferromagnetic materials are widely used in equipment such as automation components, motors, and transmission systems, especially in key axisymmetric parts like reducers for humanoid robots and motor spindles for electrical vehicles. During their precision machining processes, these components are inevitably subjected to simultaneous high temperature, plastic strain, and stress accumulation. The coupled effects of thermal and mechanical loads lead to microstructure evolution and performance degradation, which directly affect the dimensional accuracy and service safety of the parts. Therefore, stress and strain evaluation under high temperature non-destructively for ferromagnetic components are of great importance to ensure machining quality and operational reliability.

However, the extreme high-temperature environment brings great challenges to stress or strain detection. MIP technology, which adopts the superimposed excitation of high-frequency low-amplitude and low-frequency high-amplitude magnetic fields, can sensitively capture the changes of material magnetic properties (magnetic permeability, magnetic domain wall reversible motion, etc.) affected by temperature and stress.

Traditional MIP testing is mostly limited to room temperature. In high-temperature environments, detection parts are easily affected by heat, resulting in unstable signals and unclear testing results. At present, there is still a lack of high-temperature MIP testing systems and clear correlation between coupled temperature plus stress or stain and magnetic properties. Also, there is a lack of theoretical models and matching experimental systems to guide the detection practice.

Based on the above engineering demands and scientific problems, the purpose of this project is:

1.Develop an MIP detection system for high-temperature environments

2.Construct theoretical models of MIP under high-temperature and stressed/strained condition

3.Explore the variation patterns of MIP under coupled high-temperature and stress/strain conditions

4.Apply stress/strain detection in high-temperature environments for materials with different microstructure.

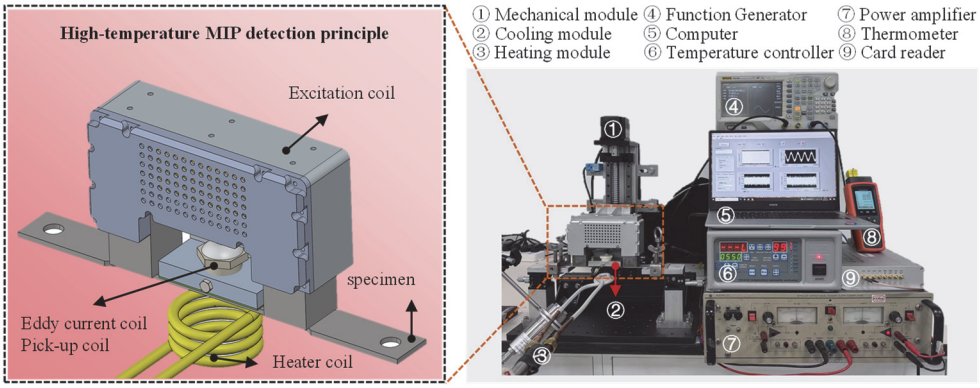


Fig. 1 High-temperature MIP detection system.

2. Details of Program Implement

2.1 Development and Parameter Optimization of High-Temperature MIP Testing System

A complete high-temperature MIP testing system was designed and constructed, which integrates heating control, mechanical adjustment, water-cooling protection, signal acquisition and other functional modules, as shown in Fig.1. The system adopts induction heating to heat the sample to 500°C, and uses infrared temperature measurement to realize real-time monitoring and closed-loop control of temperature. A water-cooling structure combined with mica sheet insulation was applied to isolate the detection coil from high-temperature radiation, so that the working temperature of the pickup coil is maintained below 50 °C during the whole test process (as shown in Fig.2), and long-term stable operation of the sensing unit is guaranteed.

Parameter optimization were carried out for key indicators that affect detection performance. The optimal total lift-off distance of the pickup coil is determined as 1.5 mm, including a 1 mm mica sheet and a 0.5 mm air gap, so that a good balance between signal and thermal isolation effect is achieved, as shown in Fig.3.

To validate the influence of different magnetization frequencies on the MIP signal, high-temperature experiments were conducted at frequencies of 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 30 Hz, 50 Hz, and 70 Hz. As shown in Fig. 4, low excitation frequencies (1-10 Hz) led to large fluctuations in the measured maximum MIP value (μ_{max}) over the 100-500 °C range. At 1 Hz, the measured MIP curves were severely distorted, and the coefficient of variation (CV) of μ_{max} reached nearly 40% (Fig. (c)). With increasing frequency, the stability of the signal improved markedly, and the CV dropped below 5% at 30 Hz and above, even under the maximum cooling rate of 10 °C/s. So the magnetization frequency is optimized to 30 Hz, which effectively suppresses signal distortion caused by rapid temperature change. Meanwhile, the high-frequency eddy current excitation was set to 30 kHz with an amplitude of 8 Vpp, ensuring sufficient local magnetic response and stable measurement of small hysteresis loops.

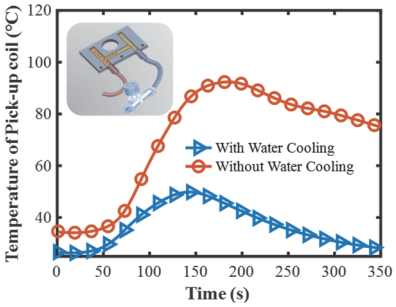


Fig. 2 Evaluation of the cooling effect of the water-cooling system on the pick-up coil.

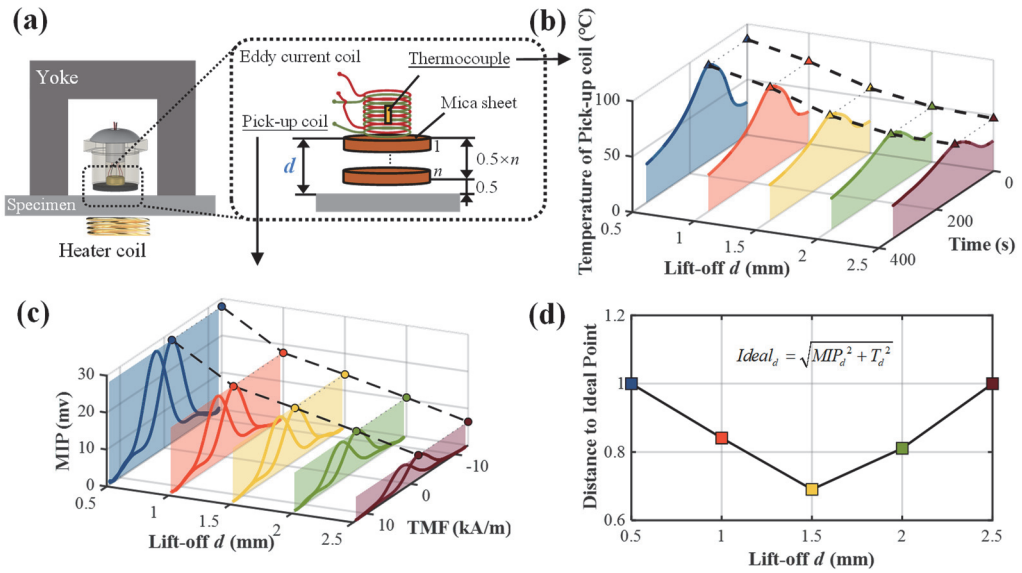


Fig. 3 Influence of lift-off value d on the performance of pick-up coil. (a) Schematic diagram of lift-off value d definition; (b) Temperature variation of pick-up coil with lift-off value d; (c) Variation of MIP butterfly curve with lift-off value d; (d) Variation of Ideal point with lift-off value d.

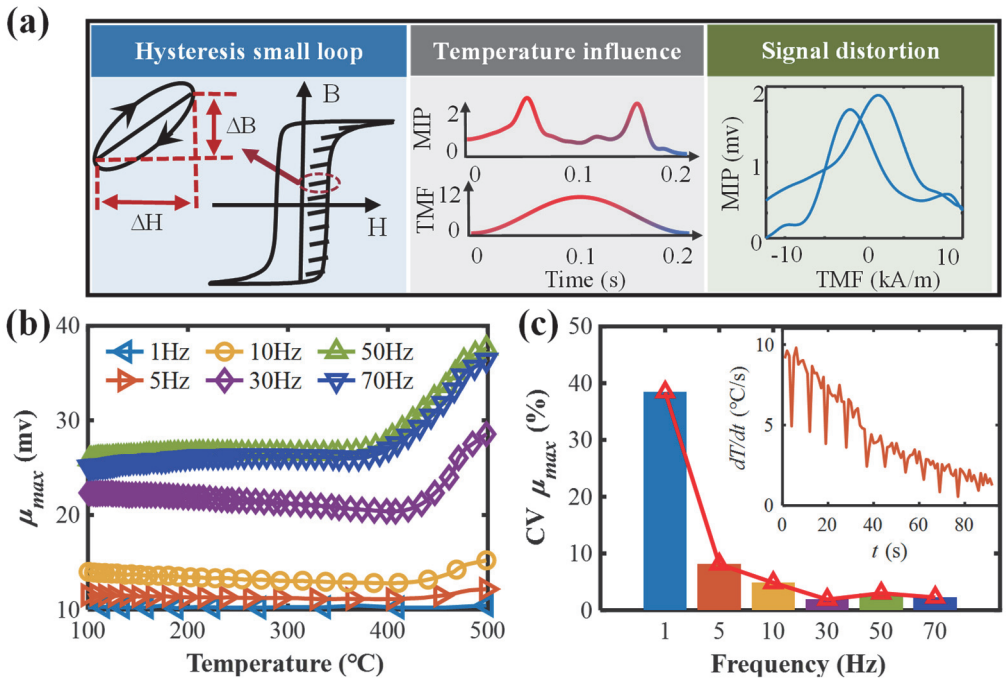


Fig. 4 Analysis of the correlation between magnetization frequency and temperature change rate. (a) MIP signal distortion due to rapid temperature changes; (b) Temperature response characteristics of μ_{max} under different magnetization frequencies; (c) Statistical distribution of the coefficient of variation for μ_{max}.

Through the above design and optimization, distortion-free MIP signals were successfully collected during the continuous cooling process of the specimen from 500 °C to 100 °C, and the reliability and stability of the high-temperature MIP measurement were realized.

2.2 Study on High-Temperature MIP Signal Behavior and Plastic Strain Characteristics

Since plastic strain is easier to control and quantitatively apply than stress in experimental operations, MIP behaviors under both plastic strain and high temperature were investigated firstly.

Based on the built testing system, experiments were conducted on DP590 dual-phase steel. At room temperature, obvious power-law relationships are obtained between key MIP characteristic parameters (defined in Fig. 5) and plastic strain from 0 to 12.22%. The mean MIP value shows the best fitting effect with R^2 higher than 0.96, and MIP signals present particularly high sensitivity to small deformation below 2%, as shown in Fig.6.

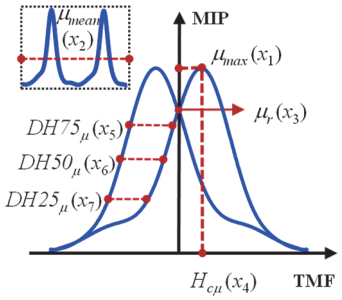


Fig. 5 Characteristic parameters of MIP.

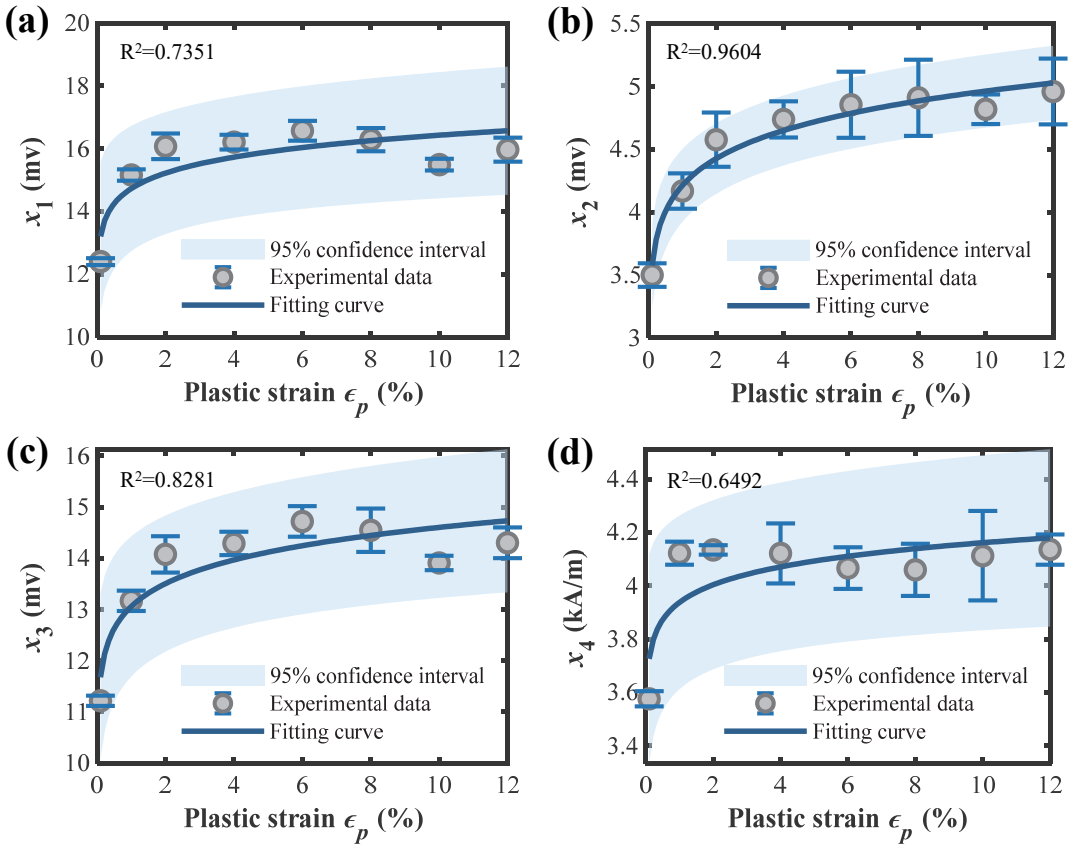


Fig. 6 Power-law fitting curves for characteristics x_1-x_4 for DP590. (a) Maximum MIP (x_1); (b) the mean MIP value (x_2); (c) the intercept of the MIP envelope on the vertical axis (x_3); (d) the corresponding tangential magnetic field (TMF) strength at x_1 (x_4).

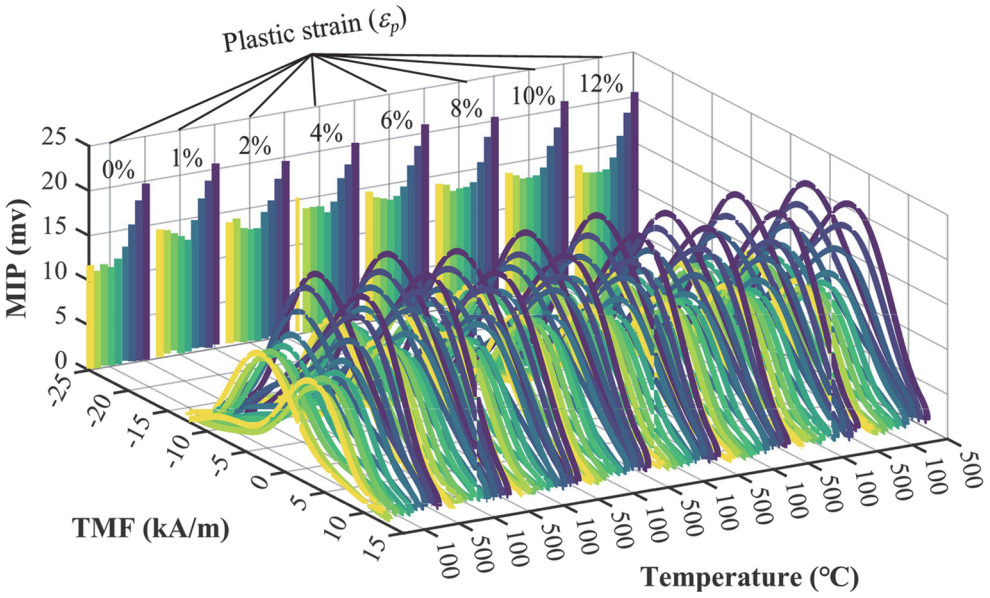


Fig. 7 MIP butterfly curves under the coupling effect of temperature and plastic strain.

Figure 7 presents the complete evolution of the MIP signal during cooling, across different levels of plastic strain. Overall, the MIP signal exhibits a general decreasing trend with decreasing temperature, indicating a more active magnetic response at higher temperatures. The evolution can be divided into two distinct stages, demarcated for DP590 steel at approximately 300 °C. In the high-temperature stage (300 °C-500 °C), the MIP signal increases rapidly and monotonically with temperature increases, indicating that the dominant mechanism is the ordering of magnetic moments with the assistance of thermal activation as thermal disturbance diminishes. Below 300 °C, the MIP trend flattens and exhibits non-monotonic fluctuations, indicating a transition where the influence of thermal activation wanes and pinning effects from microstructural defects become more pronounced. The distinct transition in MIP behavior near 300 °C reflects a significant change in the magnetic state of DP590 steel. This non-destructively measured transition in magnetic response is corroborated by existing mechanical studies that report changes in mechanical properties around 300 °C for DP590 steel. With increasing temperature, enhanced atomic thermal motion provides a stronger driving force for dislocation reorganization and carbon diffusion. This induces dynamic recovery within the material, including dislocation annihilation, carbon enrichment at defects, and residual stress relaxation. These microstructural changes shift the pinning mechanism of magnetic domain walls from one dominated by high-density dislocations and strong stress fields to one governed by the recovered microstructure at defects. Consequently, above 300 °C, the correlation between the MIP signal and the original plastic strain decreases markedly, indicating a fundamental transition in its characterization capability.

To quantify the effects of both temperature and plastic strain on the MIP signals, Figure 8 illustrates the quantitative relationship for the four key magnetic parameters (x_1-x_4). The experimental data were modeled using bivariate quadratic polynomial functions to effectively characterize the evolution of each parameter under the coupled influence. The fitting results indicate significant correlations between the four magnetic parameters and both temperature and plastic strain. The bivariate quadratic models exhibit a high goodness of fit, as demonstrated by the coefficients of determination (R^2), which reach 0.9657, 0.9652, 0.9671, and 0.9405 for x_1-x_4, respectively. This confirms that the established models reliably represent the actual coupling relationships.

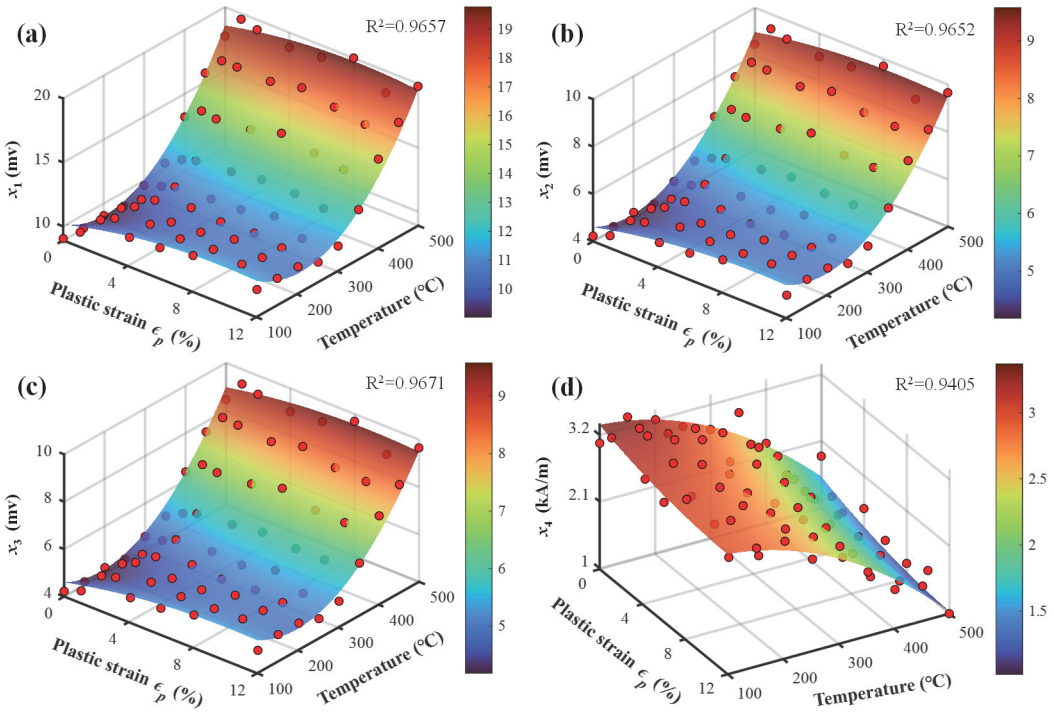


Fig. 8 Dependence of characteristic (x_1-x_4) with plastic strain and temperature: (a) the maximum MIP value (x_1); (b) the mean MIP value (x_2); (c) the intercept of the MIP envelope on the vertical axis (x_3); (d) the corresponding TMF strength at x_1 (x_4).

3. Achievements

In the past one year, (1) and (3) of the expected objectives stated in the application form have been achieved, and the main progress and achievements are summarized as follows:

(1) A high-temperature MIP testing system that can work stably up to 500 °C was successfully developed. Key parameters including coil lift-off, water-cooling protection, and magnetization frequency were optimized, enabling stable and distortion-free MIP signal acquisition during cooling from 500 °C to 100 °C.

(2) The variation behaviors of MIP under coupled high-temperature and plastic strain conditions were clearly revealed. A critical transition temperature near 300 °C was determined for DP590 steel, and quantitative relationships between MIP features, temperature, and plastic strain were established with high fitting accuracy.

(3) Quantitative relationships between MIP features, temperature and strain were established, and the universal applicability of the method on different ferromagnetic materials was verified.

4. Summaries and future plans

A stable high-temperature MIP testing system was successfully developed, and key parameters were optimized to realize reliable signal measurement up to 500 °C. The variation of MIP under high-temperature and plastic strain coupling were obtained, and the transition temperature for strain characterization was determined. Quantitative relationships between MIP features, temperature and strain were established.

Partial improvement of the magnetic theoretical model was completed with the support of international cooperation. However, a complete high-temperature MIP theoretical model covering stress, temperature, and microstructure has not been fully

established, which is the objective of 2026 and will be further improved in future research.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] Z. Xu, S. Zhang, T. Uchimoto, Y. Wang, B. Wu, X. Liu: Measurement method and apparatus for magnetic incremental permeability of ferromagnetic materials under high-temperature, *NDT & E International*, Vol. 161 (2026), 103713, doi: 10.1016/j.ndteint.2026.103713.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[2] Z. Xu, S. Zhang, T. Uchimoto, et al., Magnetic Incremental Permeability Detection Method and Experimental Technology for Stress under High-Temperature for Ferromagnetic Materials, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-27, pp. 76-79.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

課題番号	J25I037
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

乱流渦における渦軸バンドル束の幾何学特性と渦流構造形成に関する解析

An Analysis of Geometrical Characteristics of Bundles of Vortical Axis Lines and Formation of Turbulent Vortical Flow Structure

中山 雄行*†，服部 裕司**††
*愛知工業大学工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究は，渦軸として提案され適用されてきた複数の渦軸線をバンドル束として捉えたときの幾何学的特性，また軸線同士の関連，渦線バンドル束と渦流との相互作用による渦構造の形成について，理論と一様等方性乱流の数値シミュレーション(Direct Numerical Simulation: DNS)における渦流解析と統計解析により明らかにするものである．渦軸として，渦線の他に eigen-vortical-axis line，topological pressure minimum line を適用する．ここで，eigen-vortical-axis line (Nakayama et al., Fluid Dyn. Res. 2018)は，ローカルトポロジーにおける渦軸，即ち本トポロジー上旋回に依存しない方向を接ベクトルとする渦軸線であり，topological pressure minimum line (Nakayama, ICFD 2017, 2017)は渦流による圧力極小面の法線ベクトルを接ベクトルとする軸線である．

乱流渦を始め様々な流動分野またメカニズムで発生する渦は，宇宙・気象・海洋等の自然界や環境の他，航空から船舶，発電，或いは水族館等に至る広範囲な工学分野に関わり，流れの特性や製品・施設等の性能や信頼性に関わる．しかし，渦軸の統一的な定義は未だ確立されておらず，渦の位置や曲がり等を明確に特定することは難しく，適用する渦軸定義によって解析結果が異なることも起こりうる．また，これらの渦軸をバンドル束として捉えて渦軸や渦コア領域を同定しようとすると，渦領域に沿って膨張や収縮，旋回等が生じる場合がある．しかし，これらのメカニズムも未解明であり，渦軸同定のロバスト性にとっても懸案となる．渦軸の定義を確立するためには，それぞれ物理特性を有する渦軸の幾何学的特性のメカニズムを明らかにし，渦コア領域における物理特性の詳細を明確にする必要がある．即ち，上記 3 つの渦軸のバンドル束が渦領域を通るときの幾何学的特性を同定することは，渦軸としての適性評価というよりむしろこれらの解析により渦コア領域での物理特性が明らかとなり，渦特性の解明だけでなく渦軸が備えるべき条件が明確になる．

そこで，本研究では，渦領域中の旋回平面上でのバンドル束のローカルトポロジー上の幾何学的特性を特定する local axis geometry theory（Nakayama, APS-DFD2019)を上記 3 つのバンドル束に適用し，これらの幾何，並びにそのときの渦コア領域での物理特性を一様等方性乱流の渦にて明らかにすることを目的とする．また，渦線バンドル束は渦流と相互作用があり，これが 3 次元渦構造の形成に寄与していることが示されている(Nakayama, Uchima and Hattori, AFI2024)．本研究では，渦構造形成の基盤的性質を明らかにすることも踏まえ，渦線バンドル束の幾何学的変化が渦流構造に与える作用，また渦流が渦線バンドル束に与える作用についても併せて分析する．

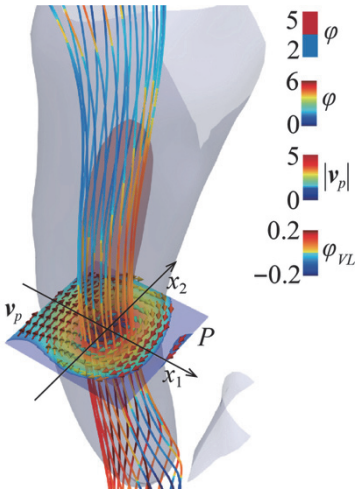


図 1：一様等方性乱流における速度場の swirlity φ_v で表した一つの渦領域と旋回平面，本平面上の渦流 $\boldsymbol{v}_p$，並びに渦線バンドル束の（LAG に関する）swirlity φ_ωのコンターで示した渦線バンドル束．（η：コルモゴロフ長さ）

2. 研究成果の内容

本研究では，一様等方性乱流の DNS における速度場から渦流の旋回強さを表す物理量 swirlity (Nakayama, Phys. Rev. Fluids, 2017)を用いて渦領域を同定し，swirlity の導関数並びにヘッセ行列・ヘシアンからこれの極大点を求めて渦中心を定める．この点にて渦空間を定義をして旋回平面上の渦流また本平面に垂直な方向の流れである軸流の分布を求めると共に，本平面を通過するそれぞれの軸線バンドル束を同定し，その幾何学的特性を解析する．ここで，渦空間は，ローカルトポロジーの観点から渦流の旋回平面並びに非軸対称的な楕円軌道の渦流の長短軸に関連付けたガリレイ不変の正規直交座標系である．各バンドル束の幾何学的特性は，local axis geometry theory (LAG)の解析手法を用いて旋回平面上の幾何を特定する．

一つの渦領域と本領域における一つの旋回平面（上部），並びに本平面上の渦流 $\boldsymbol{v}_p$，またこの渦領域を通過する渦線バンドル束を図 1 に示す．本図では，渦領域と（旋回）平面は渦流（速度場）の swirlity φ_vのコンターで表し，渦線バンドル束は本バンドル束（渦度ベクトル場）の LAG 上の swirlity φ_ωのコンターで表している．また，η はコルモゴロフ長さである．本渦領域における渦線バンドル束は図の上部から下部の方向に進んでいるが，φ_ωが正の領域が大部分であり，渦線バンドル束が旋回しながら進んでいることが示されている．この渦領域の旋回平面付近における渦線バンドル束，topological pressure minimum line (TPML)，また eigen-vortical-axis line (EVAL)のバンドル束と旋回平面上におけるこれらのベクトル場を図 2 に示す．本図における渦線，topological pressure minimum line，また eigen-vortical-axis line の各バンドル束は，各々の swirlity φ_{VL}, φ_{TPML}, φ_{EVAL} のコンターで示し，また下図の旋回平面上のコンターは，本平面上の各接ベクトルの角度を表している．渦線バンドル束は本平面上で時計回りに旋回し，渦中心周りのベクトルの角度が 0～2π に遷移している．Topological pressure minimum line も渦線バンドル束と同様に旋回しており，本平面上のベクトルの角度も渦線バンドル束のものと類似している．約 106000 点の渦中心近傍（の旋回平面）における各種バンドル束に関する確率密度関数，また結合確率密度関数による統計解析では，渦線バンドル束と topological pressure minimum line のバンドル束のそれぞれ約 50%, 45%が旋回している．また，渦線バンドル束が旋回するとき，約 8 割の topological pressure minimum line が旋回しており，これら二つのバンドル束の swirlity には強い相関があることが確認された．一方，eigen-vortical-axis line のベクトル場では旋回の様相は少なく，渦線バンドル束との相関も低い．

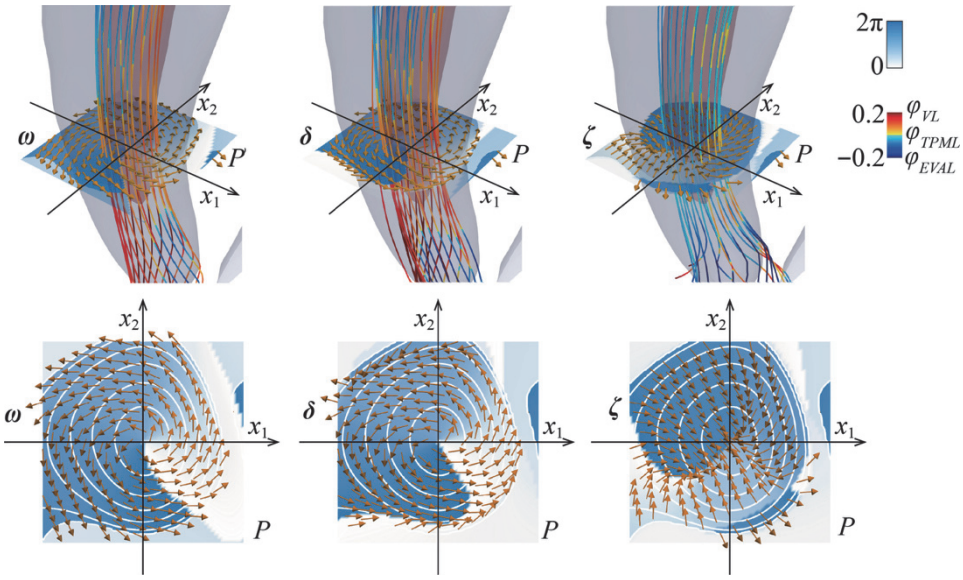


図 2：渦流の swirlity φ_{ν} のコンターで表された一つの渦領域，旋回平面 P と P 上の (a) 渦線(VL)，(b) TPML，(c) EVAL のバンドル束のベクトル場．バンドル束のコンターは各バンドル束の swirlity (φ_{VL}, φ_{TPML}, φ_{EVAL})を示し，下図の旋回平面は各バンドル束の接ベクトル，並びにこれらの角度のコンターを示す．

ここで，topological pressure minimum line の旋回は興味深い渦コア領域の物理特性を示唆している．図 3 にこのバンドル束が旋回している(図 2 とは別の)渦領域と渦流を含めた旋回平面を示し，本旋回平面上における実際の圧力分布，並びに圧力のヘッセ行列の最小固有値(ヘシアン)の固有ベクトルの分布，即ち旋回平面上の各点の圧力極小面の法線ベクトルの分布を図 4 にそれぞれ示す．図 3 における topological pressure minimum line は，このバンドル束の swirlity のコンターφ_{TPML} にて示している．図 3 では，本バンドル束は旋回平面上で旋回しており，この平面における圧力分布は，図 4 の通り渦中心周りで極小となる曲面形状となっている．一方，旋回平面上部から見た各点の圧力極小面の法線ベクトルの分布では，法線ベクトルは渦中心周りで旋回している様相を呈している．圧力は渦コア領域極小となりつつも渦中心周りの極小面の法線は旋回する，という奇妙な特性がここで明らかになった．これは，圧力極小面が螺旋曲面となる等の複雑な特性や機構があるものと考えられる．本研究では，各種渦線バンドル束の幾何学的特性を解析することにより，この様な特異な渦の特性が明らかになった．これは，渦の重要な特性の一面であるだけでなく，渦軸の定義の条件や同定法において考慮すべきものである．これらの現象のメカニズムを解明することが，渦力学だけでなく渦軸の定義に繋がるものと考えられる．

また，渦線バンドル束の幾何学的特性と旋回平面上の渦流との関わりに関し，周方向速度・半径方向速度のいずれとも本バンドル束の幾何との相関は低いことが統計的な解析で示された．一方，軸流は渦線バンドル束と非常に強い相関があることが確認された．渦線バンドル束の旋回・回転は，軸流の旋回平面上のラプラシアンに関わっていることが数学的に導かれるが，本平面上の軸流のヘシアンは渦線バンドル束のローカルトポロジーにおける周方向成分の固有値と密接な関わりがある．軸流には圧力勾配の影響もあるにも関わらず，この分布特性はほぼ渦線バンドル束の幾何により与えられることが示された．

3. 研究目標の達成状況

本研究は，渦線，eigen-vortical-axis line，topological pressure minimum line の各々物理特性が

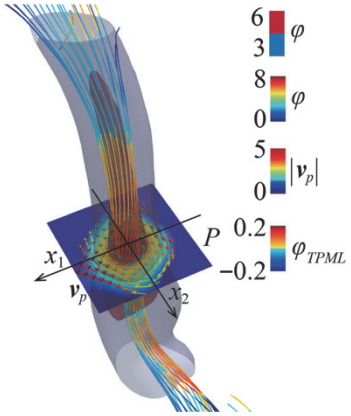
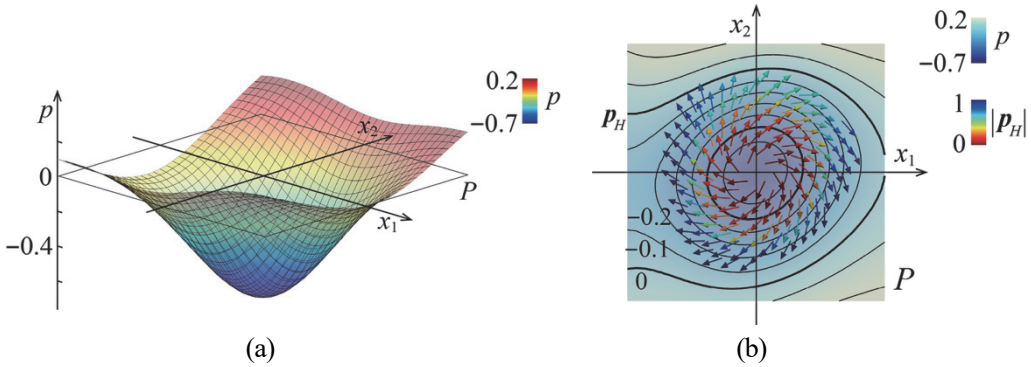


図 3：渦流の swirlity φ, のコンターで表された渦領域, 旋回平面 P と本平面上の渦流 $\boldsymbol{v}_p$, 並びに φ_{TPML} のコンターで表した TPML のバンドル束.



(a) (b)

図 4：ある渦の旋回平面における(a)圧力 p の分布, (b)圧力極小面の法線ベクトル $\boldsymbol{p}_H$ の場(渦中心基準).

異なる軸線のバンドル束の幾何学的特性を明確にし，それぞれの旋回特性の有無等を明らかにした．特に，topological pressure minimum line も渦コア領域中の圧力の極小領域・曲面の中で旋回していることが明らかになった．これは，渦コア領域における物理特性の新しい知見であると考えられ，渦のトポロジカルなダイナミクスの一面である．このメカニズムの解明が渦の詳細な物理特性につながると共に，渦軸が満たすべき条件を与えるものと考えられる．

また，渦流と渦線バンドル束の相互作用による 3 次元渦構造の形成において，渦線バンドル束による軸流への作用は，圧力勾配の影響よりも強く，軸流のヘシアンが渦線バンドル束の周方向成分の固有値で近似することができる程関連が強いことが示された．これは渦の速度構造のモデルの確立に貢献するものである．これらの成果は，本研究の目標を十分達成したものと考えられる．

4. まとめと今後の課題

渦線，eigen-vortical-axis line，topological pressure minimum line の幾何学的特性，topological pressure minimum line が示す圧力極小領域での圧力極小面の法線の旋回，渦線バンドル束と渦流の相互作用について明らかにした．今後は，この本研究で明らかになった圧力極小面の法線が旋回するメカニズム，また渦線バンドル束との関連を解析することにより，渦特有の複雑な物理特性が顕現されると共に，渦軸の条件の構築に繋がると考えられる．また，渦線バンドル束との相互作用を考慮した渦の速度構造のモデルも期待することができる．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] K. Nakayama: A Foundational Asymmetric Vortex Model Based on Local Flow Geometry and Interaction with Bundle of Vorticity Lines, *US NSF Sponsored International Conference VORTEX2025 Toward World Consensus on Vortex Definition and Prediction*, Arlington, (2025).

[2] K. Nakayama, K. Sakurai, T. Nishino, Y. Hattori: An Analysis of Geometrical Characteristics of Bundles of Vortical Axis Lines and Formation of Turbulent Vortical Flow Structure, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-79, pp. 218-219.

[3] K. Nakayama: Characteristics of Formation of Vortical Structure in Homogeneous Isotropic Turbulence, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025), pp. 1170-1171.

[4] K. Sakurai and K. Nakayama: Characteristics of an Axial Flow of a Vortex in Homogeneous Isotropic Turbulence, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025), pp. 1630-1631.

[5] 櫻井和貴，中山雄行: 一様等方性乱流の乱流渦における軸流発生メカニズムの解析，日本機械学会 2025 年度年次大会，(2025), J051p-06.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project Code	J25I038
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Nano-micro
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Effect of Charge Distribution on the Plasma-induced Fine Bubble Dynamics

Siwei Liu*†, Outi Supponen**††
Tomoki Nakajima*, Takehiko Sato*, Kaito Nitto***, Sayaka Kamata***
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Institute of Fluid Dynamics, ETH Zurich
***Graduate School of Engineering, Tohoku University
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

This project aims to deepen the understanding of bubble dynamics under the influence of electrical charge. In particular, the study focuses on clarifying how different charge conditions affect bubble motion through simulation, and on extending the investigation to bubble dynamics under external pressure loading. These efforts are intended to provide a more systematic understanding of charged bubble behavior and its physical mechanisms.

2. Details of program implement

Based on the experimental studies conducted in the previous years, simulation research was carried out during the present period to investigate the dynamic behavior of cavitation bubbles under different charge conditions. A theoretical and numerical model was established to describe bubble motion with varying amounts of electric charge, enabling quantitative analysis of how charge modifies the bubble characteristics as in equation (1).

$$\left(1-\frac{\dot{R}}{c}\right)R\ddot{R}+\frac{3}{2}\dot{R}^2\left(1-\frac{\dot{R}}{3c}\right)=\left(1+\frac{\dot{R}}{c}\right)\frac{P_g+P_v-P_s}{\rho}+\frac{R\dot{P}_g}{c\rho}+\left[1+\frac{\dot{R}}{c}(1-3\gamma)\right]\frac{Q^2}{8\pi\rho\varepsilon R^4} \quad (1)$$

This modeling work provides a useful framework for interpreting the role of electrostatic effects in bubble dynamics and complements the earlier experimental observations, as shown in Figure 1. In addition, the scope of the research was further

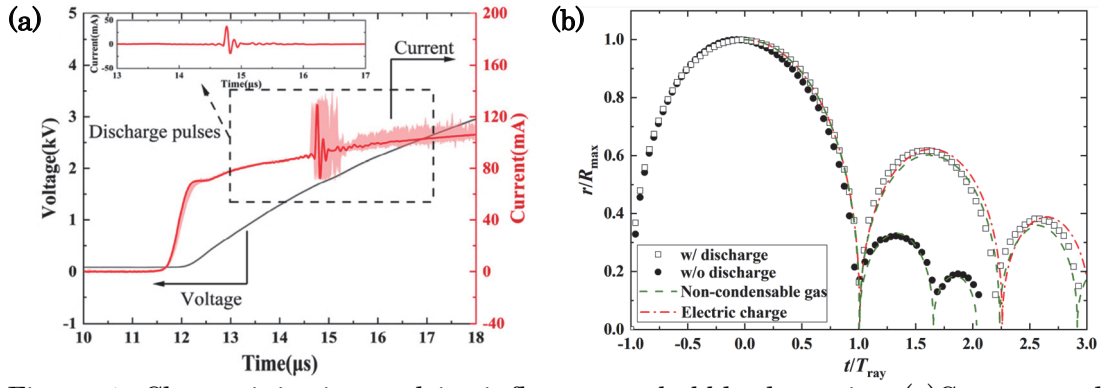


Figure 1: Charge injection and its influence on bubble dynamics. (a)Current and voltage waveforms in the repeated tests. (b) Bubble radius evolution from theoretical and experimental analysis.

extended to examine the motion characteristics of bubbles subjected to shock wave loading. To explore these highly transient processes in greater detail, experiments based on X-ray phase-contrast imaging were performed at the European Synchrotron Radiation Facility (ESRF). Compared to shadowgraphy imaging, this advanced imaging approach made it possible to visualize bubble evolution under shock wave excitation with high temporal and spatial resolution, offering new insight into the deformation, migration, and collapse behavior of bubbles in such extreme conditions, as shown in Figure 2.

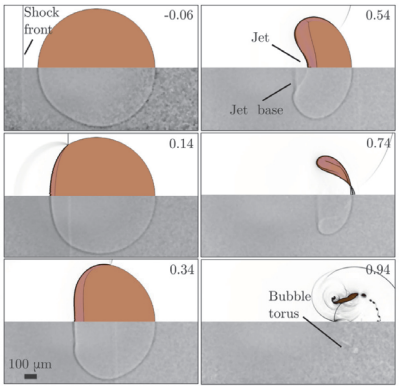


Figure 2: Interaction of a bubble with a planar shock wave.

3. Achievements

A simulation model of bubble motion under different electric charge conditions was successfully established, providing a theoretical basis for analyzing the effect of charge on bubble dynamics. The research was further expanded to include the study of bubble motion characteristics under shock wave action, and X-ray phase-contrast imaging experiments were successfully carried out at ESRF.

4. Summaries and future plans

The results of this 3-year project identified gas composition inside cavitation bubbles, as well as simulation-based analysis of charged bubble motion. It has further extended to investigate shock-wave-driven bubble dynamics. It is considered to publish more papers based on the completed studies. In parallel, a new project proposal will be prepared and submitted in order to continue the related research.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] G. T. Bokman, S. Fiorini, J.Strucka, B. Lukić, S. N. Bland, K. Mughal, S. Liu, A. Rack, O. Supponen. Planar shock-induced bubble collapse and jetting in water captured via x-ray phase contrast imaging. *Applied Physics Letters* 127, 014102 (2025). DOI: https://doi.org/10.1063/5.0272963.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[2] S. Liu, T. Sato, O. Supponen, M. Farhat, T. Nakajima. Exploring the Characteristics and Biomedical Applications of Charged Cavitation. *22nd International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2025), OS8-15, pp.727-728.

[3] S. Liu, O. Supponen, T. Sato, M. Farhat, T. Nakajima, K. Nitto, K. Kurihara. Characteristics of the Plasma-Affected Cavitation Bubble Dynamics. *Proceedings of the 25th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2025), CRF-56, pp.160-161.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

課題番号	J25I040
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目（発展）

火星飛行機実現に向けた柔軟膜翼の非定常空力特性解明

Unsteady Aerodynamic Characteristics of Flexible-Membrane Wing for Mars Airplane

佐々木 大輔*†，永井 大樹**††
大崎 歩乃花*，近本 悠真*，船田 光星*，木村 泰士*，藤田 昂志***，岡本正人***
高橋 俊****，川本 裕樹*****，伊神 翼**
*大阪公立大学大学院工学研究科，**東北大学流体科学研究所
金沢工業大学工学部，*宇宙航空研究開発機構，*****東海大学工学部
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

超小型火星飛行機による火星探査の実現には，火星環境に適した非定常空力特性を持つ主翼の設計・開発が必要となる．その一案として挙げられている柔軟膜翼では，膜の変形を積極的に利用することで火星環境に望ましい空力性能の実現が期待されているが，そのためには柔軟膜翼まわりの非定常流れ場の理解が不可欠である．そこで，本公募共同研究では，薄い柔軟膜翼の解析に適した流体構造連成解析手法を適用し，実験だけでは把握しづらい非定常空力特性の理解を図る．更に，火星飛行機の飛行環境下では，翼厚による空力特性の変化が大きいことから，その効果について明らかにすることが目的である．

2. 研究成果の内容

今年度，格子幅よりも薄い物体を対象とした流体解析を実現するために Ghost cell 法を改良した．さらに，多粒子系モデルに基づく構造解析手法を統合し，流体構造連成解析へと拡張させた. 構造解析における数値減衰の除去と，流体・構造間の時間同期を実現することで，非定常連成解析を可能にした.

拡張した流体構造連成解析手法を用いて柔軟膜翼の解析を行った．解析対象は風洞実験で使用されている翼模型を参考にした，翼弦長 $c=5.0\times10^{-2}$ m，弾性係数 E=7.4 MPa の柔軟膜翼である．膜翼には予ひずみを与えることで剛性を変化させることが可能である．解析条件は迎角 4 度，レイノルズ数 30000，計算格子幅は 0.800×10^{-4} m である．

予ひずみを 1.4%与えた膜翼の瞬時速度場の可視化図を図 1 に示す. 薄い柔軟膜翼の鋭利な前縁から流れの剥離が発生している．剥離に伴い，翼上面では剥離泡が形成され，下流に向けて細かな渦が断続的に放出される様子が確認される．

図 2 に，揚力係数と膜面上の代表的な 3 点における変位量の時刻歴を示す．膜翼に与える予ひずみの大きさにより，翼変動の様子が変化していることが分かる．予ひずみを 3.5%与えた膜翼では，翼のどの位置においてもほぼ同一の位相で周期的な変形が繰り返されている．前縁から 25%c，50%c，75%c の全ての位置において同時に変位が 0 を下回る時刻があるため，一時的に負のキャンバを形成していることが分かる．一方で，予ひずみを 1.4%与えた膜翼では，翼全体で平均的な変位が生じて正のキャンバを維持しつつ，各位置において細かな振動が表れている．翼の変動を表す波形は高周波数成分を含んでおり，膜翼は高次モードで

振動している．これは，張力の減少により膜の剛性が低下した結果，図 1 に見られるような前縁から放出される渦による微細な圧力変動に対して，翼の各位置において局所的に追従しやすくなったためであると考えられる．揚力係数の変動に関しても，高周波数の振動が確認されており，膜の変形と流れ場の変動が相互的に干渉していることが分かる

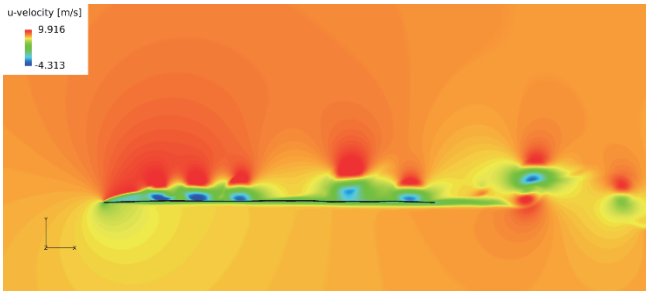


図 1：瞬間速度分布

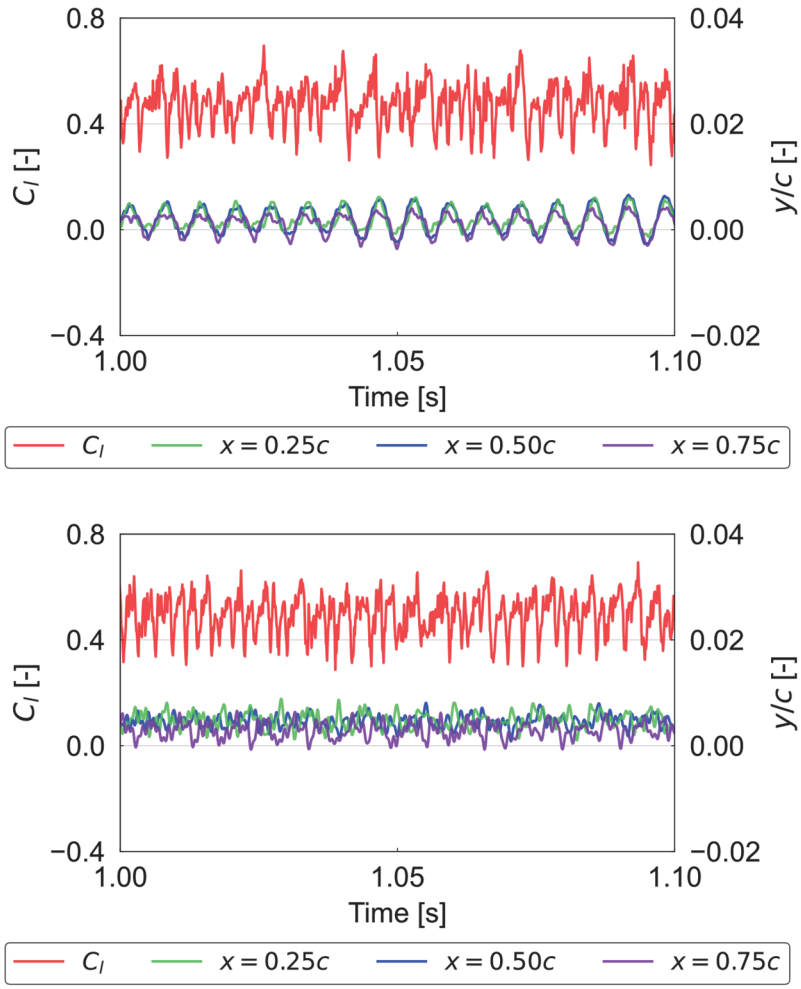


図 2：揚力係数と変位の時間変化（上：予ひずみ 3.5%，下：予ひずみ 1.4%）

3. 研究目標の達成状況

今年度構築した流体構造連成解析手法により，格子サイズより薄い柔軟膜翼の非定常流れ場の解析が可能となった．その結果，風洞実験の解析条件を模した柔軟膜翼の解析を実行することが可能となった．風洞実験のレイノルズ数である 30000 において，柔軟膜翼の解析により膜の剛性による揚力係数の変動の影響を明らかにした．また，柔軟膜翼を使用することで，より前縁に近い位置での圧力回復が確認でき，剥離した流れの再付着が促進されていると考えられる．ただし，今年度解析できた迎角は 4 度のみであることから，実験との詳細な比較や解析精度等の検証はまだ実施できていない．

4. まとめと今後の課題

本研究では，格子幅よりも薄い物体を解析対象とする流体構造連成解析手法を構築した．また，構築した手法を用いて，風洞実験と同じレイノルズ数域における柔軟膜翼の運動とそれがもたらす空力性能への効果を調査した．膜翼に与えられる予ひずみによって変形の様子に差が見られ，揚力係数の変動にも影響が表れることが確認できた．一方，今年度実施できた解析は迎角 4 度のみであることから，迎角を変えた解析を実施して，風洞実験との比較を行うことが必要である．また，解析手法の妥当性や解析精度の検証も行う必要がある．更に，高迎角での現象解明には本解析手法の 3 次元化が不可欠である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] K. Funada, H. Osaki, Y. Chikamoto, T. Kimura, D. Sasaki, K. Fujita, M. Okamoto, Y. Kawamoto, S. Takahashi, T. Ikami, H. Nagai: Unsteady Aerodynamic Characteristics of a Thin Elastomeric Membrane Wing by Fluid-Structure Interaction Analysis, *Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS7-5.

[2] T. Kimura, K. Funada, S. Inoue, D. Sasaki, Y. Kawamoto, M. Okamoto, T. Ikami, H. Nagai, Computational Study of Thickness Effect on Aerodynamic Performance of a Flat Plate at Low Reynolds Number Flow, *Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS27-10.

[3] 船田光星，井上翔太，佐々木大輔，川本裕樹，高橋俊，伊神翼，永井大樹：エラストマー素材を用いた柔軟膜翼の流体構造連成解析，日本流体力学会年会 2025，(2025).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I041
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	1 年目

部分電離プラズマ流によって駆動される高速宇宙輸送システムにおける数値的研究
Numerical Study on High-Speed Space Transportation System Driven by Partially-Ionized Plasma Flow

高橋 聖幸*†，宇野　耀*，阪本　健*
永井 大樹**††
*東北大学大学院工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

1.1 研究の背景と目的

地球超低軌道（VLEO：高度約 100～450 km）は，高解像度地表観測や低遅延通信の実現に向けて注目されている．しかし，従来の高度 600 km 級の低軌道と比較して大気密度が高く，大気抵抗が数桁増大するため，軌道維持には大推力を継続的に生成することが必要となる．この課題に対して，大気を推進剤として利用する大気吸込式電気推進機が提案されているが，必要推力の増大に伴い太陽電池パネル（SAP）の大型化が不可避となる．この SAP 面積の増加は摩擦抵抗の増加を招き，より大きな推力と電力を必要とするという負のフィードバックを生じさせる．結果として，高度約 160 km 以下では理論的に飛行が不可能となることが指摘されている．

この問題を解決するため，本研究では電力供給を衛星内部に依存しない新たな推進方式として，部分電離プラズマを使った新しい宇宙推進方式である“希薄流吸込式レーザーブラストライダー”を提案する（図 1）．本システムは地上から照射されるレーザーパルスによってプラズマを生成し，イオンを加速・排気することで推力を得るものであり，太陽電池に依存しないため低高度での飛行が可能となる潜在性を有する．一方で，レーザーパルスによるプラズマ生成を着実に行うためには，VLEO の希薄大気をインテークによって吸い込み，効率良く圧縮していく技術の確立が必要となる．また，レーザー照射によりどのようなプラズマ流が誘起されるのか，数値モデルを使った議論が必要となる．加えて軌道維持に必要な飛行条件等が明らかとなっていない．

従って本研究の目的は，従来の電気推進機では実現困難であった高度 160 km 以下，特にカーマン・ライン付近（高度 100 km）における衛星の軌道維持を実現するために，本提案システムの成立条件を明らかにすることである．そのために，希薄大気環境を対象とした 3 次元テスト粒子計算により大気抵抗および推力生成過程を評価するとともに，レーザー加熱モデルを構築してエネルギー輸送を解析する．さらに，粒子間衝突の影響を考慮した 2 次元 DSMC 計算により圧縮性能をより詳細に評価し，得られた推力・抗力を用いた軌道計算を通じて必要レーザーパワーを定量的に評価する．

1.2 研究期間内の最終目標

本研究では，大気吸い込み式の新しい推進システムを提唱し，数値計算を介してシステムの成立要件を精査することである．並行して実験的な研究を進め，実験と数値計算とを組み合わせることでより正確な数値モデル構築へとフィードバックし，システム成立の予測精度を高めていく．

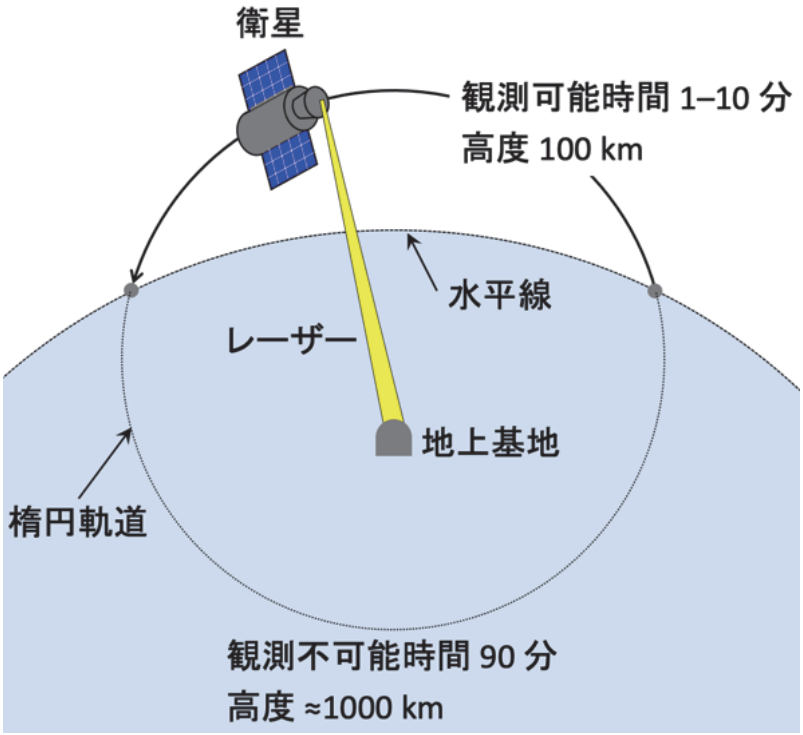


図 1：レーザーブラストライダー.

2. 研究成果の内容

本研究では，提案する希薄流吸込式レーザーブラストライダーの成立性を評価するため，流体・プラズマ・軌道の各観点から数値シミュレーションを実施した.

まず，粒子間衝突を無視した 3 次元テスト粒子計算により，インテーク形状が空力特性および推力性能に与える影響を評価した．その結果，インテークにテーパを取り入れ，且つ推力壁を拡大した改良モデル（モデル B）は，電気推進向けに設計された従来モデル（モデル A）と比較して抗力係数を約 18%低減できることが示され，前面形状の最適化が抗力低減に有効であることが明らかとなった．また，レーザー加熱による推力生成過程については，単純なレーザー照射では電子による吸収率が約 4%，イオンへのエネルギー輸送効率が約 1/350 と極めて低いことが判明した．これに対し，レーザーの多重反射によって吸収長を拡大することで，吸収率を 60%以上，イオンへのエネルギー輸送効率を約 40%まで向上できることを示した．さらにこの条件を反映した場合，モデル B の推力力積はモデル A の約 2.7 倍となり，推力壁面積の拡大が推力向上に有効であることが確認された．一方で，運動量結合係数は両モデルで同程度であり，圧縮比低下による吸収率低下が性能制約となることも明らかとなった.

次に，粒子間衝突の影響を評価するため，2 次元 DSMC 計算を実施した．独自に開発した AMR（適応格子細分化）および null-collision 法を用いた計算コードにより流れ場を解析した結果，分子間衝突を考慮するとインテーク内部に強い圧力勾配が形成され，対流が促進されることで圧縮比が約 80 から 250 へと約 3 倍向上することが示された．これは従来重視されてきた壁面形状に加え，圧力勾配が圧縮性能向上の重要因子であることを示す世界初の知見である．

最後に，得られた推力および抗力を用いて衛星軌道計算を行い，軌道維持に必要なレーザー出力を評価した．高度 100 km（近地点）と 1,000 km（遠地点）の楕円軌道において，地上からの可視時間に間欠的に推力を供給する条件下で，約 5 MHz のパルス周波数により軌道維持が可能であることを示した．このとき必要な平均ビーム出力は約 48.3 MW と見積もられ，非可視時間中の抗力補償が大きな負担となることが明らかとなった．さらにエネルギー損失を考慮すると，実効的な必要電力は数 MW 規模に達することが示唆され，kW 級での実現には凍結軌道の導入など軌道設計の高度化が不可欠であることが示された．

以上より，本研究は低高度 VLEO における新しいビーム推進型衛星の成立可能性を示すとともに，推進機設計，エネルギー輸送，圧縮機構，および軌道運用に関する重要な設計指針を明らかにした．

3. 研究目標の達成状況

本研究では，高度 100 km における希薄流吸込式レーザーブラストライダーの成立条件を明らかにすることを目的とし，流体解析・プラズマ加熱評価・軌道計算を統合的に実施した．その結果，推進機形状最適化による抗力低減，レーザー多重反射によるエネルギー輸送効率の大幅向上，および分子間衝突による圧縮性能向上を定量的に示した．さらに，軌道維持に必要なレーザー出力を評価し，本方式の実現可能性と課題を明確化した．以上より，当初の研究目的は概ね達成されたといえる．

4. まとめと今後の課題

今後の課題としては，希薄流プラズマのより正確な予測が挙げられる．これを達成するために，スーパーコンピューターを用いた PIC シミュレーションを実施して正確な荷電粒子運動を記述した上で，放電室において磁場を印加することで推進性能を改良可能かなどを検討する予定である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Masayuki Takahashi, Sakira Uno, Ken Sakamoto, Koki Ito, Hiroyuki Suzuki, and Hiroki Nagai, “Numerical Studies for Plasma Dynamics on a Space Propulsion System,” *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-1, pp. 16-17.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I042
区分	一般公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

硫化物系ナノメモリのデバイス作製技術に関する研究

Investigation of Device Fabrication Techniques for Sulfide-based Nanomemory

大野 武雄*†，濱田 康誠*，
大堀 大介**，尾崎 卓哉**，遠藤 和彦**††
*大分大学大学院理工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

情報処理技術で必須である記憶や演算を行うデバイスにおいて，超低消費電力化および高速化を行うためには情報やエネルギーを適切な経路で損失なく流すことが重要である．特に，イオン伝導型のデバイスにおいては電子およびイオンの２つのキャリアの流れをナノサイズの領域中で制御する必要があり，そのためデバイス構造中の原子配列，粒界，欠陥などを最適化することが要求される．本研究ではスパッタリング，硫黄蒸気流処理などのデバイス加工技術を用いて高品質な硫化物薄膜を形成しナノメモリの高性能化を目指す．

2. 研究成果の内容

本研究ではイオン伝導型のデバイスとして抵抗変化型ナノメモリを試作した．その構造は W/Ag_2S/Pt/Ti/SiO_2/Si 基板であり，W および Pt 電極に電圧を印加することで Ag_2S 中の Ag の陽イオンの移動が生じて導電性パスが形成され，その結果メモリデバイスがオン状態（低抵抗状態）となる（図 1）．ここで，Ag_2S 膜はスパッタリング法によって成膜された Ag 膜を硫黄蒸気に曝して硫化処理することで形成した．

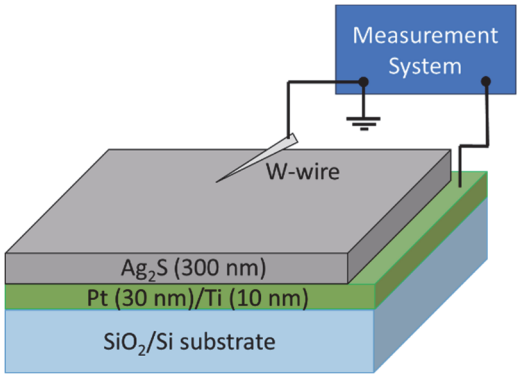


図 1：試作した硫化物系ナノメモリの構造と電流－電圧測定回路．

今回作製したナノメモリの電流－電圧測定を行ったところ，揮発特性を示した．これは，0 V から 1 V に電圧印加する途中で電流が急激に上昇する SET 状態と，その後，1 V から 0 V に電圧印加した際に途中で電流が急激に減少する RESET 状態を示す際に，同じ電圧極性中で SET と RESET が生じることを意味する．揮発特性が発生するのは Ag の導電性パス

が物理的に細かったり脆かったりすることが原因であり，それは，Ag_2S の組成比に起因すると思われる．また，興味深い結果として，0 V→1 V→0 V→1 V という電圧印加順序と，0 V→1 V→0 V→−1 V→0 V→1 V という順序では SET および HOLD 電圧の値およびそのばらつきに大きな違いが現れた（図 2）．これは，逆極性の電圧を印加することで Ag_2S 膜中の Ag の陽イオンの分布が変化してスイッチングがしづらくかつばらつきが大きくなったと考えられる．

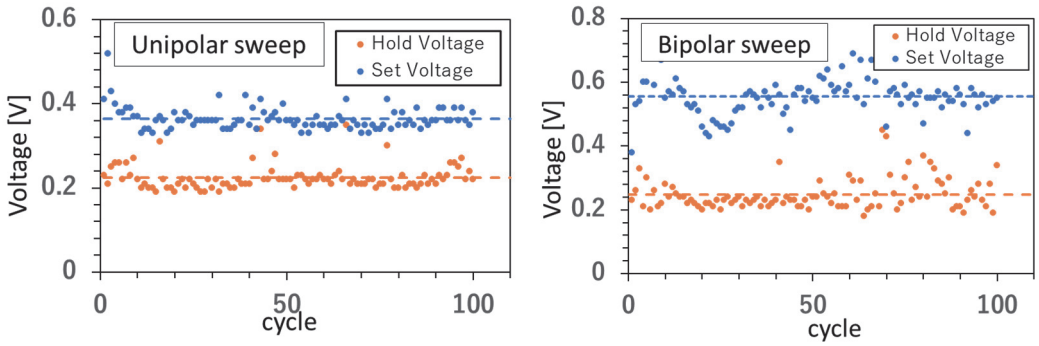


図 2：電圧印加順序の違いによる SET および HOLD 電圧の違い．

3. 研究目標の達成状況

本研究の目標は最適なスパッタリング法および硫黄蒸気を制御した表面処理の条件下で高品質な硫化物薄膜を得て，それのナノメモリへの適用を検討することであった．抵抗変化スイッチングが確認されたことが良い結果であり，特に，逆極性へ電圧印加しない場合の SET および HOLD 電圧の値およびばらつきが小さいことが確認された．一方で，電圧印加の仕方によっては SET 電圧が大きくかつばらつきも大きくなる傾向が見られた．

4. まとめと今後の課題

本研究では硫化物である Ag_2S 膜を用いたナノメモリの作製を行い，そのスイッチング動作を確認した．今後は，電圧印加無しにデータ保持を行う不揮発性の特性を得るために Ag_2S 膜の組成比などの最適条件を得ることが課題である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] K. Hamada, T. Ohno, K. Endo: Pulse Response of Ag_2S Resistance Change Device, *Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025), OS3-2, pp. 416-417.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J25I043
区分	一般公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

長時間起動時における燃料電池内での物質輸送現象を予測する手法の開発
Development of a Method for Predicting Flow Phenomena in Fuel Cells during a Long Start-up Time

森澤 征一郎*†，仲間 紗音*，徳増　崇**††
*沖縄工業高等専門学校，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

地球温暖化の対策やエネルギー自給率の向上を背景に，水素による電気自動車が商用化されるなど，水素エネルギーの活用についての注目が集まっている．しかし，この燃料電池の理論起電力は 25℃において 1.23V であるが，現状 1V 程度の起電力しか得られないことが一般的である．この原因の 1 つに物質拡散損失があり，燃料電池内部で電気が生成される際に生じるプロトン・水・酸素の輸送抵抗を減らすことが極めて重要となる．加えて，燃料電池を長時間起動させた場合，電解質膜が劣化する．一方で，その劣化を抑えるために混合している Ce イオンも移動し，燃料電池の劣化を促進する．このような物質の移動現象の予測には数値計算が有効的である．しかし，長時間の予測となると計算コストも大きく，より効率的な予測手法が必要となる．このような背景のもと，本研究では本研究では長時間起動時における燃料電池内での物質輸送現象の予測手法を開発することを目的とする．

2. 研究成果の内容

本研究は次の 3 つの項目に分けて実施する．①分子動力学に基づく MD 計算より得た電解質膜内での Ce イオンの輸送特性（拡散係数，電気浸透係数）からナビエ・ストークス方程式に関する構成式を構築する．②構築した構成式をもとに，CFD 計算を行い燃料電池の流動シミュレーションの実施する．③流動結果をともに，CFD 計算では計算コストが大きすぎるため予測が難しい長時間予測については機械学習によって外挿予測を行う．

その中でも今年度得た成果として，①に関しては電解質膜内におけるナビエ・ストークス方程式をもとに数理モデリングを実施し，解くべく物理量と支配方程式の精査を記述した．そして，MD 計算でより Ce イオンに関する輸送特性と関係を整理した．②に関しては現在，流動シミュレーションに向けた計算アルゴリズムの構築を進めている．加えて，③に関しては機械学習による長時間予測は，申請者らの研究室において PINNs による外挿予測を開発中である．PINNs はニューラルネットワークに偏微分方程式などの物理法則を損失関数に組み込む現象を予測する方法である．しかし，初期条件や境界条件に関連する損失項と物理法則に関連する損失項の間で勾配の大きさに不均衡が生じると学習が不安定になり，多くの計算回数を要する課題があった．そこで，動的重み付けをした DN-PINNs を実装し，バーガス方程式による衝撃波伝播に関する外挿予測を行った．図 1 の今年度導入した DN-PINNs の概略を示す．その結果，図 2 より DN-PINNs は epoch 数の少ない，即ち少ない計算回数での結果が収束し，その有効性を示した．

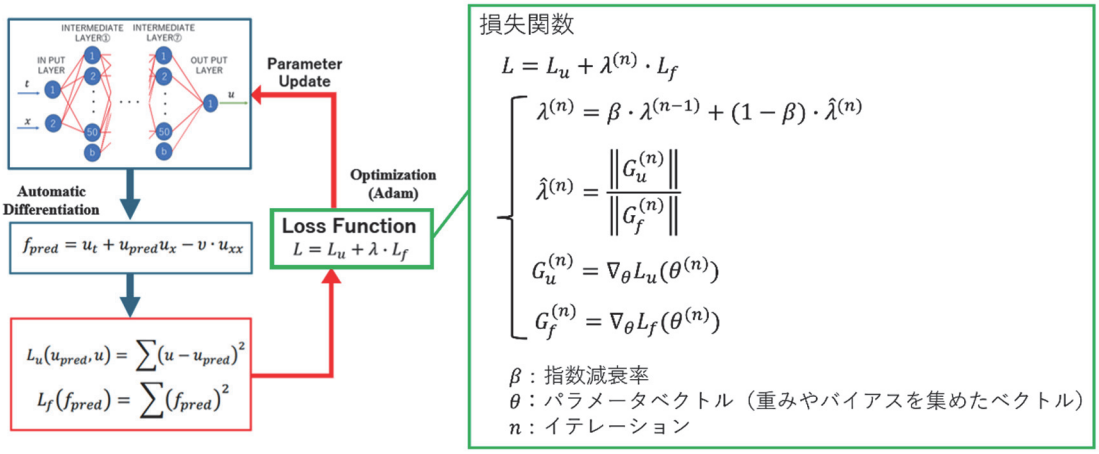


図１　：機械学習による外挿予測

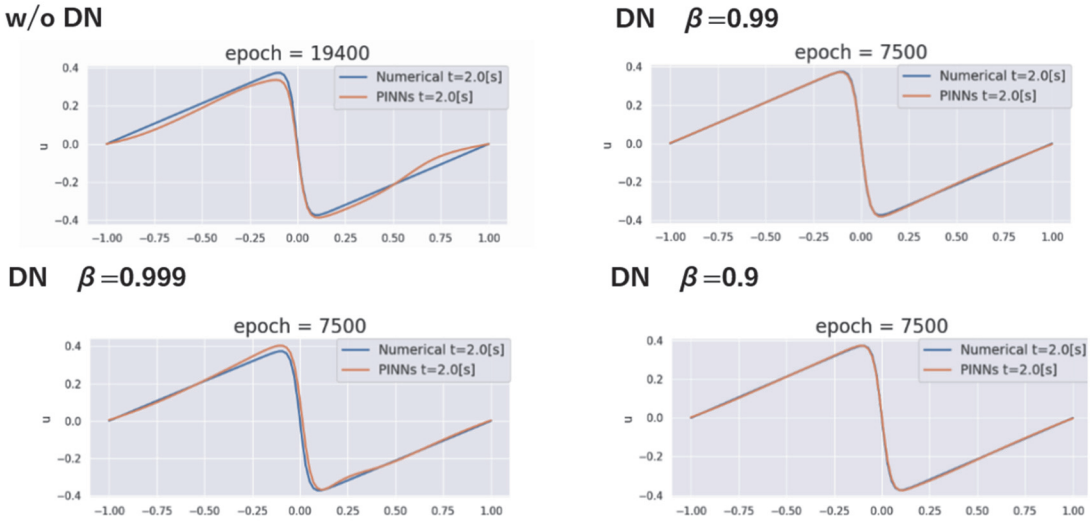


図２：　DN-PINNs の結果

3.　研究目標の達成状況

本研究では電解質膜内におけるナビエ・ストークス方程式をもとに数理モデリングを実施し，解くべく物理量と支配方程式の精査を記述した．さらに，長時間起動時における燃料電池内での物質輸送現象の予測手法に向けて機械学習による手法である DN-PINNs を実装し，バーガス方程式による衝撃波伝播に関する外挿予測を行った．[達成度:70%]

4.　まとめと今後の課題

本研究では長時間起動時における燃料電池内での物質輸送現象の予測手法を開発することを目的として，実施した．現在は，構築した電解質膜内の数理モデルをもとに，計算アルゴリズムを構築に向けた準備を進めている．さらに，今回実装した DN-PINNs は 1 次元問題に対するものであるため，2 次元問題に適用して外挿予測に対する評価を行う必要がある．

5.　研究成果

1)　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] S. Morizawa, S. Nakama, and T. Tokumasu, "Toward the construction of a prediction method on fluid phenomena in fuel cells during a long start-up time," *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2025)*, CRF-48, pp. 138-139, Sendai, Japan, November 10-13, 2025.

[2] S. Nakama and S. Morizawa, "Extrapolation Predictions Using Physics-Informed Neural Networks (PINNs) for Shock Wave Propagation Based on the Burgers Equation," *Twenty-second International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, OS27-52, Sendai, Japan, November 10-13, 2025.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project Code	J25I044
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Evaluation of Wall Thinning with Thick Insulator Based on Pulsed Eddy Current Testing Method using Novel Signal Processing Way

Shejuan Xie*†, Tetsuya Uchimoto**††
Zhenmao Chen*, Shuyan Yang*, Lihua Guo*
*State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Shaanxi Engineering Research Center of Nondestructive Testing and Structural Integrity Evaluation, Xi'an Jiaotong University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Through development of new signal processing way based on Gaussian denoising method and Hough transformation method, the quite weak pulsed eddy current testing signal can be well featured. The aim of this research is to enhance the detectability of wall thinning of ferromagnetic material pipe with thick insulator.

2. Details of program implement

For various defects emerging in ferromagnetic metal structures, corrosion under insulation (CUI), as shown in Figure 1, is widely acknowledged as a significant challenge for current Non-destructive Testing (NDT) technologies. Whereas, it is difficult to detect CUI by traditional nondestructive testing technologies. Fortunately, pulsed eddy current testing (PECT) has been proven useful in local wall thinning quantification of the ferromagnetic pipe with insulation.

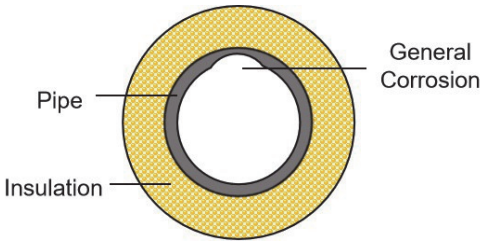


Figure 1 : Corrosion under insulation.

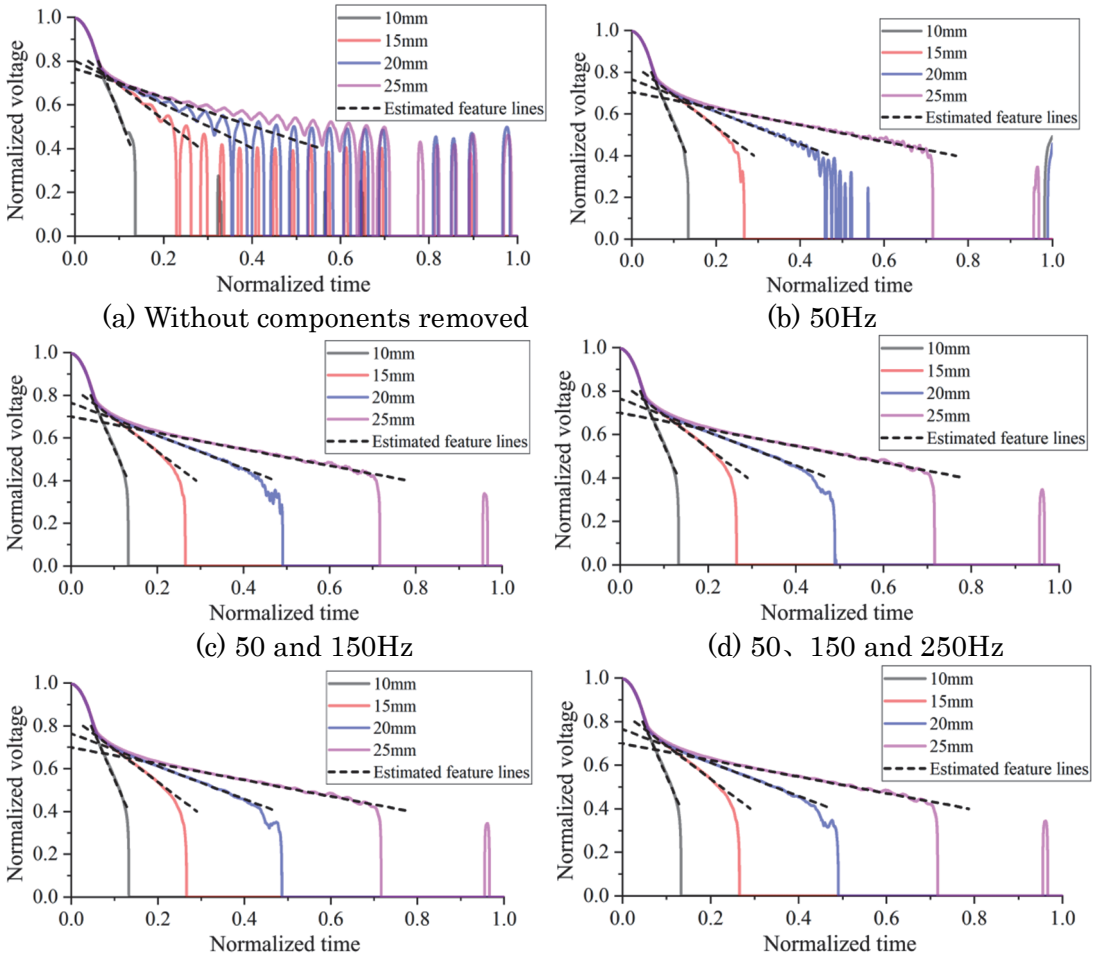
Before, there have been some studies conducting modeling theory, signal denoising method and feature extraction [1-5]. In our previous study, to further improve the filter effect and adaptability of feature extraction, a novel signal denoising method using Gauss filter and Independent Component Analysis (ICA) and a new PECT signal feature extraction method based on Hough transform (HT) are proposed to improve signal-to-noise ratio and adaptively extract signal feature. In addition, the effectiveness of Gauss-ICA and HT methods is verified through experiments under two modes of power supplying: battery power and grid power modes.

Next, to optimize the computational efficiency of the proposed method, the selection of relevant parameters in the algorithm will be discussed. Considering that the

amplitude of power-frequency interference decreases with the increase of harmonic frequency and accordingly the influence on pulsed eddy current testing signals gradually weakens. High-order power-frequency harmonics are not required to be eliminated during filtering. Therefore, the harmonic components of power-frequency interference to be removed can be further investigated. In addition, transforming all signal sampling points into the Hough space will lead to an excessive computational load. Hence, it is unnecessary to map all original sampling points to the Hough space in the HT process. Instead, downsampling can be performed on the original testing signals, and the downsampling ratio is also analyzed and discussed.

1) Power-frequency interference components

Taking the obtained original detection signal under grid power supplying as an example, Figure 2 shows the feature extraction results after removing different harmonic frequencies of power-frequency interference.



(a) Without components removed (b) 50Hz

(c) 50 and 150Hz (d) 50、150 and 250Hz

(e) 50、150、250 and 350Hz (f) 50、150、250、350 and 450Hz

Figure 2：Feature Extraction Results with Different Power-Frequency Harmonic Components Removed.

As can be seen from Figure 2, the more harmonic frequencies of power-frequency interference are removed, the smoother the filtered signal becomes, and the more accurately the linear attenuation segment in the late stage of the pulsed eddy current testing signal can be extracted. However, when the removed power-frequency harmonic frequencies exceed 250 Hz, the filtered signal and feature extraction

results show little variation. Taking the feature extraction result with power-frequency harmonics removed up to 450 Hz as the standard result, the average error between the feature extraction results under different removed harmonic frequencies and the standard result is calculated. Meanwhile, the average computation time of ICA filtering corresponding to different removed harmonic frequencies is recorded, and the results are presented in Figure 3. The formula for average error is given as follows:

$$\bar{e} = (\theta - \theta_{450})/\theta_{450} \times 100\% \quad (1)$$

Where, θ — thickness angle extracted after removing power-frequency interference; θ_{450} — thickness angle extracted after removing power-frequency harmonics up to 450 Hz. It can be observed from Figure 3 that the more power-frequency components are removed, the shorter the average computation time, but the larger the average error. Considering both the average error and average computation time comprehensively, the optimal removed power-frequency harmonic frequencies are determined as 50 Hz and 150 Hz. Under this condition, the average error of feature extraction is 0.1%, while the average computation time is reduced to 1/12 of the original, which is 237.3 ms.

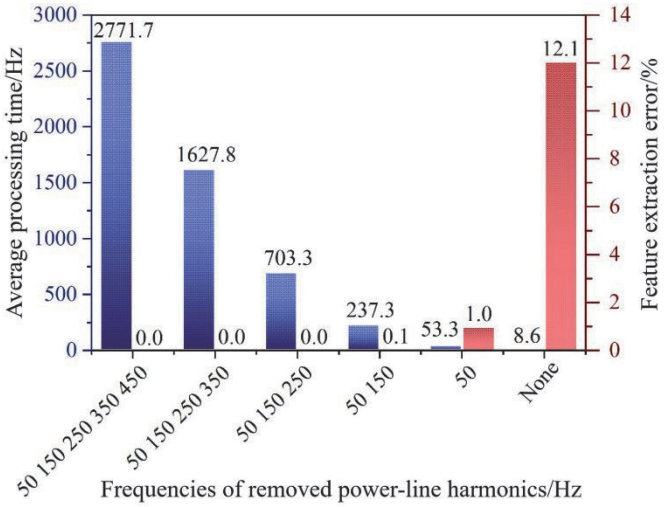


Figure 3: Average error and computation time for different removed power-frequency components.

2) Downsampling ratio

The downsampling ratio refers to the ratio of the sampling frequency before downsampling to that after downsampling. Taking the feature extraction result with power-frequency harmonics removed up to 450 Hz as the standard result, the average error and average computation time of feature extraction under different downsampling ratios are listed in Table 1. It can be seen from Table 1 that as the downsampling ratio increases, the average error gradually increases while the average computation time gradually decreases. When the downsampling ratio is no more than 400, the average error is within 1.7%. When the downsampling ratio exceeds 200, the average computation time tends to be stable. Therefore, the suitable value for the downsampling ratio is determined to be 200. Under this condition, the average error is 0.6%, and the average computation time is reduced to 1/127 of the original, which is 7.4 ms.

Table 1：The feature extraction error and processing time under different downsampling factors.

The downsampling factor	Number of remaining sampling points	Feature extraction error	Processing time
1	38984	0	940.6
10	3899	1.1	100.3
50	780	1.3	21.2
100	390	0.8	19.4
200	195	0.6	7.4
300	730	1.5	5.7
400	98	1.7	6.2
600	65	7.7	6.2
800	49	18.7	6.7

3) Performance comparison of filtering methods

To further demonstrate the advantages of the filtering method proposed in this paper, this section compares the noise reduction performance of the proposed ICA-Gauss filtering method with the Double Logarithmic Median filter (DLM) for pulsed eddy current testing signals presented in Reference [6] and the Savitzky-Golay filter (SG) reported in Reference [7].First, four repeated experiments are carried out. After processing the pulsed eddy current testing signals obtained from the repeated experiments using different filtering methods, the performance of each method is evaluated using the dispersion of the thickness angle features and the average computation time. The window length of each filtering method is set to 3501. To facilitate thickness angle feature extraction via the Hough transform, the signals processed by each filtering method are normalized to the range 0~1. The comparison results of the filtering methods are shown in Figure 4.

Figures 4(a)-(d) show the original signal, the ICA-Gauss filtered signal, the SG filtered signal, and the DLM filtered signal obtained from the repeated experiments, respectively. Figures 4(e) and (f) display the thickness angle features and the corresponding computation time after processing with different filtering methods. As can be seen from Figures 4(b)-(d), the proposed ICA-Gauss filtering method effectively removes power-frequency interference and random noise in the signal, significantly improving the signal-to-noise ratio. In contrast, the SG filter cannot suppress power-frequency interference. Although DLM preserves signal fidelity, its filtering result is less smooth than that of the ICA-Gauss filter. As shown in Figure 4(e), after processing with the ICA-Gauss filter, the standard deviation of the thickness angle in the repeated experiments is only 18.2% of that from the SG filter and 56.7% of that from the DLM filter, indicating that the filtering performance of the proposed method is significantly superior to traditional methods. As illustrated in Figure 4(f), the average computation time of the ICA-Gauss filter is only 19.6% of that of the DLM filter, demonstrating the high efficiency of the proposed method.

In summary, compared with conventional filtering methods for pulsed eddy current testing signals, the ICA-Gauss filtering method proposed in this studying not only achieves better filtering performance but also exhibits higher computational efficiency, revealing its considerable advantages.

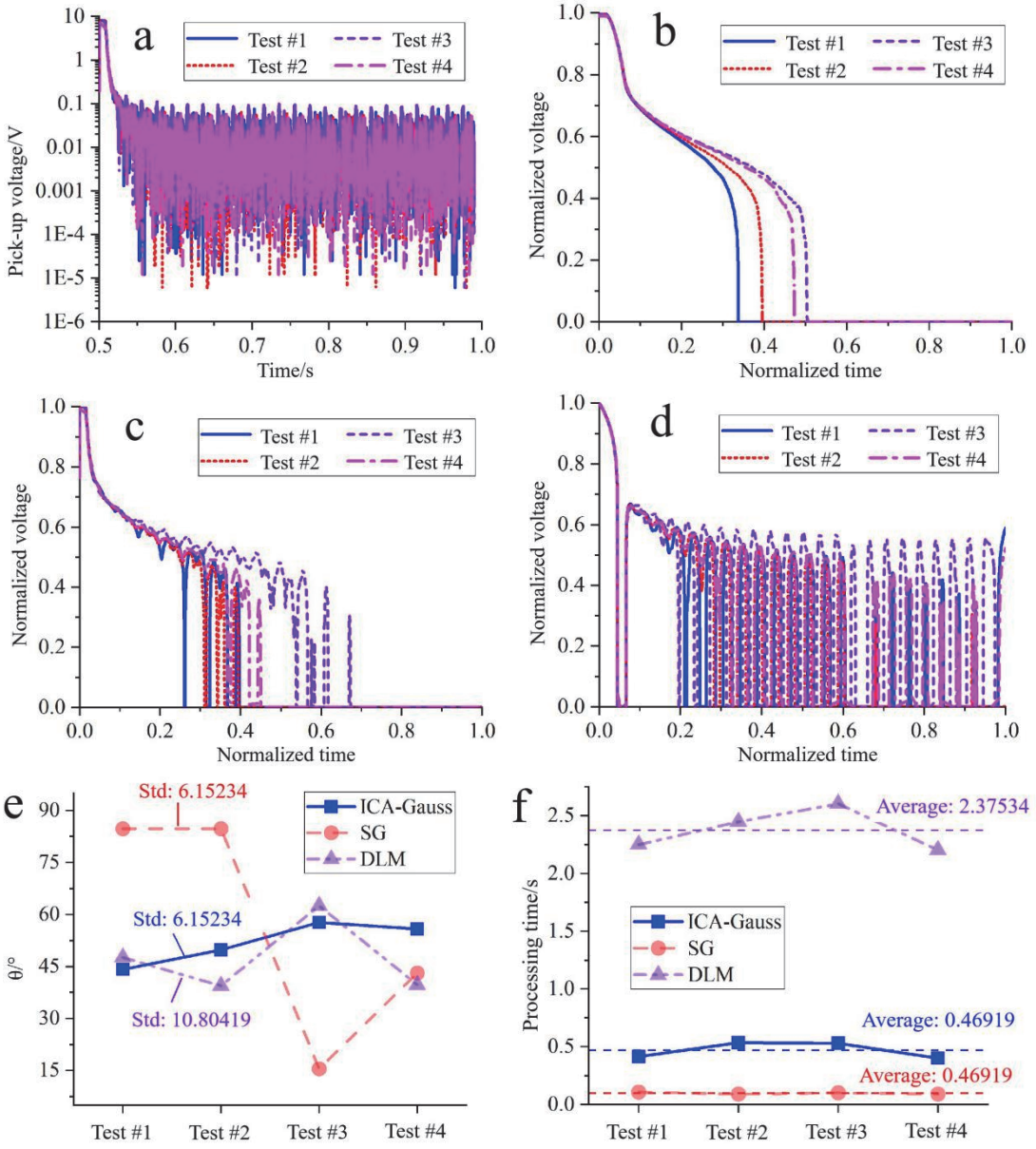


Figure 4: Comparison of the filtering method. (a) The raw signals (b) The signals after filtering by ICA-Gauss (c) The signals after filtering by DLM (d) The signals after filtering by SG (e) The discrete degree of feature (f) Processing time of calculation.

References

[1] M. Fan, P. Huang, B. Ye, D. Hou, G. Zhang, Z. Zhou, NDT&E Int., 42, (2009), 376-383.
[2] Y. Li, T. Theodoulidis, G.Y. Tian, IEEE Trans. Magn., 43, (2007), 4010-4015.
[3] Y. Li, G.Y. Tian, A. Simm, NDT&E Int., 41, (2008), 477-483.
[4] X. Chen, Y. Lei, NDT&E Int., 68, (2014), 22-27.
[5] C. Huang, X. Wu, Z. Xu, Y. Kang, NDT&E Int., 44, (2011), 163-168.
[6] C. Huang, X. Wu, Z. Xu, et al, NDT&E Int., 43(7), (2010), 648-653.
[7] L. Nguyen, N. Ulapane, J. Miro, et al, IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Siem Reap: IEEE, 2017, 2005-2010.

3. Achievements

1) For CUI of ferromagnetic pipes, a novel signal denoising method using Gauss filter and ICA and a new PECT signal feature extraction method based on HT are proposed to further improve the filter effect and adaptability of feature extraction.
2) The effectiveness of the proposed methods is verified through experiments under battery and grid power supplying modes, respectively. The experimental results demonstrate that under two power supplying modes, ICA-Gauss filter and HT methods both can accurately estimate the wall thickness and the error is less than 1.11%.
3) The processing speed and feature extraction error of the proposed method are optimized through the discussion of two parameters, namely the harmonics to be removed and the downsampling factor. The optimal removed power-frequency harmonic frequencies are determined as 50 Hz and 150 Hz; the suitable value for the downsampling ratio is determined to be 200.
4) The processing speed and feature extraction error of the proposed method are optimized through the discussion of two parameters, namely the harmonics to be removed and the downsampling factor. After optimization, the proposed ICA-Gauss is proved to be superior to other traditional filters (SG filter and DLM filter).

4. Summaries

Aiming at CUI in ferromagnetic pipes, this study proposed a new ICA-Gauss denoising method and an HT-based PECT signal feature extraction method to improve filtering performance and extraction adaptability. Experimental results under battery and grid power supplying modes showed that the proposed methods can accurately estimate wall thickness with an error below 1.11%. By optimizing the removed harmonics and downsampling ratio, the optimal parameters of 50 Hz + 150 Hz harmonics and the downsampling ratio of 200 are determined. After optimization, ICA-Gauss filter plus HT method is verified to outperform traditional SG and DLM filters in both accuracy and efficiency.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] Jialun Li, Zongfei Tong, Qingning Yang, Jiahao Wang, Chenyu Jia, Wei Guo, Yuange Zhang, Peng Jiang, Wei Qiu, Tetsuya Uchimoto, Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Tiejun Wang: Non-destructive evaluation of defects in thermal barrier coating system using combined electromagnetic and thermographic signals, *Nature Communications*, Vol.16, (2025), 8697 (12 pages), doi: 10.1038/s41467-025-63717-3.

[2] Wei Guo, Yingsong Zhao, Mengling Yang, Shejuan Xie, Zhenmao Chen: A numerical scheme for crack reconstruction in tubes by signals of array eddy current testing probe, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 38 (2025), pp. 1003–1011, doi: 10.1007/s10338-025-00604-w.

[3] Wei Guo, Lihua Guo, Hao Xu, Weijun Zhu, Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto: Impact damage detection on carbon fiber reinforced polymer tube by a mutual differential Bobbin probe, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.193, (2025), 108806 (11 pages), doi: 10.1016/j.compositesa.2025.108806.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[4] S. Xie, S. Yang, G. Lu, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi: PECT signal processing algorithm for better thickness quantification of ferromagnetic material, Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2025), CRF-28, pp. 80-83.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

"Pulsed eddy current testing method for pipeline wall thickness under large lift-off based on novel signal processing technology", Shejuan Xie, Guohang Lu, Jizhou Zhang, Zhenmao Chen, Hongen Chen, September 30, 2025, granted.

Project Code	J25I045
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Numerical Modeling of Transport Phenomena in the Vicinity of Solid-Liquid Interface in Desalination with Gas Hydrate Formation

Yuki Kanda*†, Hiroyuki Komatsu**††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Graduate School of Science and Technology, Niigata University
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

In this study, we attempt to numerically model the heat and mass transport phenomena in the separation of salt from aqueous solutions by gas hydrate formation using numerical simulations to understand the transport field.

2. Details of program implement

2.1 Rate-limited estimation model

In this study, CO_2 was selected as the guest gas because CO_2 hydrate can be generated under relatively moderate temperature and pressure conditions compared to other gases such as methane.

In GH formation, mass transfer in both the liquid and GH phases affects the formation process. As the first step, in this study, for the simplified estimation, the mass transfer was not considered, assuming a sufficient gas supply from the gas phase and GH phase as a thin layer. Hence, the formation process was reaction-limited and only GH growth was considered. Furthermore, in this study, based on the experimental framework, it is posited that GH exhibits a layered structure and advances at the solid-liquid interface. Consequently, the overall reaction rate is given the following equation.

$$R = k_r A_s (p - p_{eq})$$

where R is the overall rate of the reaction [mol/s], k_r is the reaction rate constant [mol/(m²・MPa・s)], As is the total surface area [m²], and p is the pressure [Pa].

For the reaction rate constant, the value reported by reference; k_r = 5.3×10^{-3} mol/(m²・MPa・s) was applied. In this calculation, the temperature was 279 K and the initial concentration of NaCl in the aqueous solution was set to 5.3%. The partial pressure of CO_2 in the gas phase was set to 4.4 MPa. Regarding the concentration of NaCl in the liquid phase, it was assumed that the water volume was 1000 mm³ and estimated by simply using the following equation, based on the assumption that the hydration number of CO_2 hydrate is six.

$$C_{NaCl} = \frac{m_{salt}}{m^0_{water} - 6 \times M_{water} \times R \times t}$$

where C_{NaCl} is the salinity [wt%], m_{salt} is the mass of salt [kg], m^0_{water} is the initial mass of water [kg], M_{water} is the molar mass of water [kg/mol], and t is time [s].

2.2 Estimated results

The estimation results for GH production are shown in Fig. 1. It should be noted that because this report does not consider the consumption of gaseous CO_2 involved in GH formation, the amount of GH generated increased linearly with time.

Figure 2 shows the changes in salinity caused by the GH formation. From this result, the salinity in the liquid phase was estimated to increase by approximately 0.6 wt% after 1800 s.

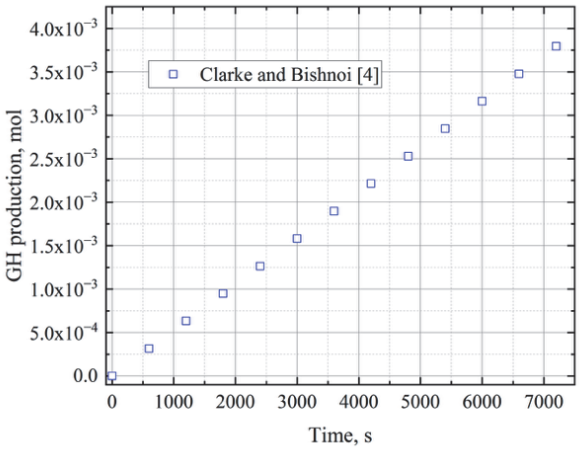


Figure 1: Estimation results of GH production

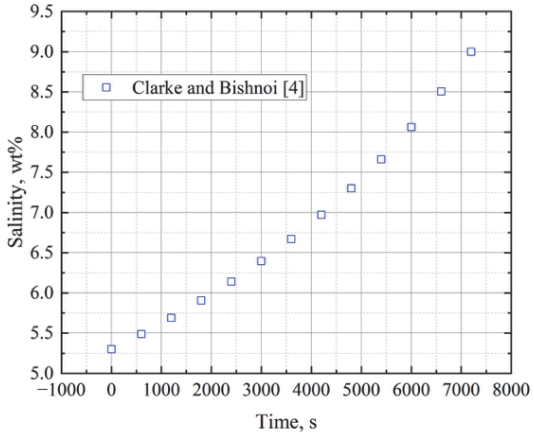


Figure 2: Estimation results of salinity changes owing to GH formation.

2.3 Experimental results

In this study, the phase-shifting interferometer was used to visualize the density variation near the solid–liquid interface due to the GH formation. After introducing CO_2 into the visualization chamber, GH was formed at the gas-liquid interface, and it was confirmed that GH grew toward the gas and liquid phases. The temperature and pressure used in this experiment were approximately 276 K and 3.0 MPa, respectively.

Figure 3 shows the phase-shifted data near the solid-liquid interface during GH formation. Focusing on the interference fringe distribution, that is, the density distribution near the solid-liquid interface, it was qualitatively found that the density distribution formed near the interface approximately 10 s after the GH crystal formation. It was suggested that the density distribution was generated by CO_2 dissolution into the liquid phase and heat generated by GH formation. A few minutes after GH formation, no interference fringes were observed near the solid-liquid interface. From these results, it is inferred that at the spatiotemporal scale of measurement in this experimental system, the

change in salt and gas concentration in the liquid phase due to GH formation was minute and could not be detected.

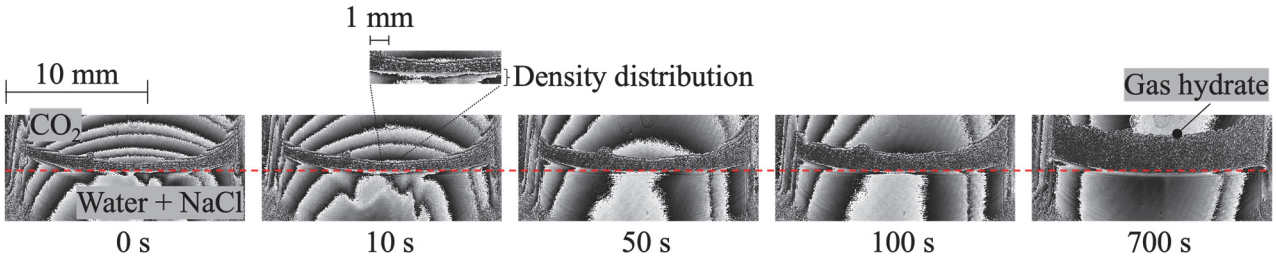


Figure 3: Phase-shifted data near the solid-liquid interface during GH formation.

3. Achievements

The amount of GH formed was estimated under the simplified assumption that GH formation at the gas-liquid interface is reaction rate-limited. In addition, the concentration ratio of NaCl in the liquid phase owing to GH formation was determined. For the preliminary experiment, the transient density variation in the liquid phase near the solid-liquid interface was visualized using the phase-shifting interferometer. Thus, we provide knowledge that will serve as the basis for gas hydrate based desalination technology. We also reported our research results at an international conference as shown in "Research results" section.

4. Summaries and future plans

In this study, the amount of GH formed was estimated under the simplified assumption. In addition, the transient density variation in the liquid phase generated by GH formation was experimentally visualized using the phase-shifting interferometer. As part of future this collaborative research, we will conduct simulations that also consider solid-phase diffusion within the GH phase and consumption of gas in the gas phase to more accurately evaluate transport phenomena near the interface during GH formation.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] Y. Kanda, H. Komatsu: VISUALIZATION OF DENSITY VARIATION NEAR CO_2 HYDRATE FORMATION SURFACE IN SALINE WATER, *Proceedings of the 11th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, (2025).

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[2] Y. Kanda, H. Komatsu: Numerical Modeling of Solid-Liquid Interface Transport Fields in Desalination by Gas Hydrate Formation, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-41, pp. 119-120.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J25I046
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

ナノマテリアルを駆使した高輝度感圧塗料の開発と低速風洞実験への適用
Development of Ultra-bright Pressure-sensitive Paint using Nanomaterials and Application in Low-speed Wind Tunnel Experiments

渡部 花奈子*†，伊神　翼**††
永井 大樹**，大川 真生**，山岸 悠真**
*東北大学大学院工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

感圧塗料（Pressure-Sensitive Paint, PSP）は，感圧色素の酸素消光を用いた光学的な圧力計測技術であり，マイクロ秒オーダーの高い時間応答性と，CCD/CMOS カメラを用いた高空間解像度の圧力面計測を同時に実現できる．しかし，現行の PSP 計測は信号雑音比が十分でなく，微小な圧力変動の定量計測が困難である．特に低速域での圧力変動は大気圧の 1%に満たない数十 Pa 程度であり PSP の計測精度は低い．近年では，データ駆動科学を活用した画像処理技術が研究されているが，依然として微小圧力変動を高精度に定量計測することは困難である．

そこで本研究では，PSP 計測における信号が感圧色素の発光強度であるという原理に基づき，ナノマテリアル設計によって局在表面プラズモン共鳴（Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR）を効率的に発現し，発光強度を飛躍的に増加させた超高輝度 LSPR-PSP を開発する．さらに，開発した LSPR-PSP を低速風洞実験へ適用し，高輝度化による圧力計測精度向上を実証することで，低速流れにおける非定常圧力場の面計測技術の確立を目指す．

2. 研究成果の内容

今年度は，最終的な目標である，LSPR による PSP の発光増強に先立ち，LSPR を用いた蛍光制御の実証実験に取り組んだ．

年度前半では，LSPR によって励起光を増幅させ，PSP の発光を増強するという実証を行った．PSP 色素の吸収波長帯で LSPR を励起する金属粒子を数値実験に基づいて設計・合成し，PSP へ添加した上で蛍光強度を比較した．蛍光強度の比較結果を図 1 に示す． LSPR 粒子を添加しない場合に比べて，添加した場合の発光強度は最大で 1.2 倍程度となった．一方で，発光強度は金属ナノ粒子の添加量に対して単調には増加せず，特定の添加量で極大値を取ることが明らかになった．これは，LSPR による光増幅効果が金属ナノ粒子のごく近傍（数十 nm）に局在するのに対し，約 10 μm の PSP 塗膜を励起光が透過する過程では金属ナノ粒子による吸光が無視できないためと考えられる．したがって，吸光を最小化するためには，蛍光色素と LSPR 粒子からなる層の厚みを可能な限り薄くすることが重要であるという知見を得た．また，発光の増強率は約 1.2 倍にとどまり，当初想定よりも小さかった．これは，PSP 色素の励起が既に飽和しており，励起光増幅の寄与が限定的であることを示唆し

ている．

そこで，年度後半では，前半で明らかになった課題を踏まえ，PSP 色素の発光増強率のさらなる向上に注力した．蛍光色素の励起が飽和している場合，発光強度の増大には放射失活の促進，すなわち蛍光波長近傍での LSPR の利用が有効である．そこで，蛍光波長帯で LSPR を励起する新たな粒子を設計した．数値計算による設計結果を図２に示す．数値計算の結果から，粒子径 100 nm 程度で SiO_2 のシェル厚が 5 nm の粒子において効率良く放射失活を促進させることができることがわかった．

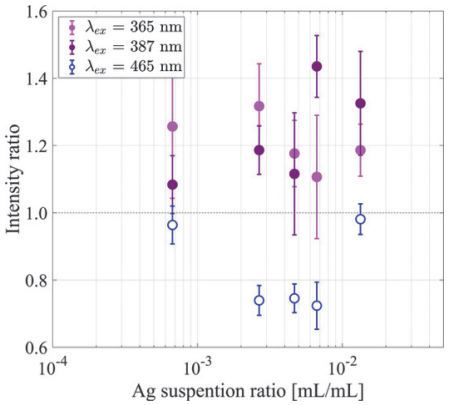


図１　銀ナノ粒子添加量に対する発光強度比

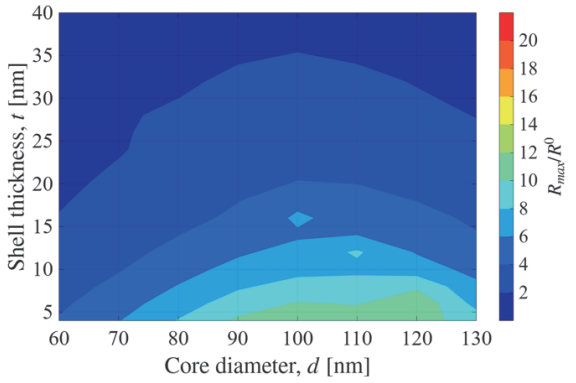


図２　Au@SiO2 粒子による飽和放射率の増幅

3. 研究目標の達成状況

本年度の計画は，当初の目標である LSPR による PSP の蛍光増強を実現するため，その基礎となる「LSPR による蛍光制御」のメカニズムを実証した．

励起光を増幅させるというアプローチは，金属ナノ粒子の設計・合成，PSP への添加，ならびに性能評価実験を通じて，最大 1.2 倍の発光増強を確認した．併せて，金属ナノ粒子の吸光特性が膜厚の影響を受けて増強効果を低減し得ること，および色素励起の飽和により励起光増幅の寄与が限定的となることを明らかにした．一方，得られた増強率は当初見込みを下回っており，励起光増幅に依らない新たな蛍光制御メカニズムの導入が必要であることが示された．

これを受けて年度後半には，放射失活を促進させることで蛍光を増強させるというアプローチに取り組んだ．現時点では，PSP への添加まで含めた本メカニズムの実証は未達であり，次年度以降も継続して進めていく計画である．

4. まとめと今後の課題

今後は，放射失活促進による蛍光増強を実証し，最終目標である「LSPR-PSP を用いた非定常圧力計測」へ接続させていく必要ある．そのためには，金属ナノ粒子—色素間の距離を精密に制御する必要があると考えられる．具体的には，SiO_2 シェルを用いたコア・シェル構造を最適化し，消光が支配的な極近傍を避けつつ LSPR 効果が最大となる距離へ色素を配置して，消光抑制と放射速度向上を両立する条件を特定する．次に，膜厚方向の吸光の影響を低減するため，バルク添加ではなく，金属ナノ粒子と感圧色素のみからなる薄い「LSPR 蛍光層」を形成し，励起光減衰を抑えた PSP を確立する．最後に，最適化試料を用いて圧力感度・応答性評価を実施し従来 PSP を超える高輝度化を実証する．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 大川真生，伊神翼，渡部花奈子，永井大樹：局在表面プラズモン共鳴を利用した感圧塗料の発光強度増幅，第 57 回流体力学講演会，東京，(2025)，2C05.

[2] M. Okawa, T. Ikami, T. Yoshihara, K. Watanabe, H. Nagai: Basic Characteristics of Pressure-Sensitive Paint with Metal Nanoparticle, *Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2025), OS18-7.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）感圧塗料、感圧膜及び感圧センサー、並びに、圧力計測装置、圧力計測方法及び流れ場の流体計測方法，伊神翼，永井大樹，渡部花奈子，大川真生，山岸悠真，2025.6.27，出願.

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project Code	J25I047
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	2nd year

Numerical Simulation of Mass transfer in Supercritical Carbon Dioxide

Yuki Kanda*†, Yingxue Hu**††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Understanding the dissolution and mass transfer of supercritical carbon dioxide ($ScCO_2$) in porous media is essential for evaluating the efficiency and safety of geological carbon storage. Although empirical power-law correlations capture the influence of flow velocity on mass transfer, they often neglect the role of bubbles morphology. In this study, we employ pore-scale direct numerical simulations to investigate the dissolution process of trapped $ScCO_2$ bubbles in porous media with two typical configurations: singlets and clusters. Key transport parameters, including interfacial area, flow field distribution, local Péclet number, and concentration distribution, were analyzed under different flow rates and saturations to evaluate performance.

2. Details of program implement

2.1 Numerical model

To systematically investigate the role of trapped CO_2 bubbles morphology on the interface mass transfer, a pore-scale numerical simulation framework was developed. This framework integrates a pore structure segmentation, random bubbles generation, and direct numerical simulation.

The two-dimensional computational domain, illustrated in Fig. 1, consists of a heterogeneous porous medium bounded by inlet and outlet buffer zones. The porous structure was digitally reconstructed from high-resolution X-ray CT scans of a packed silica sand sample. In the segmented binary image shown in Fig. 1(a), solid grains are represented by black, while pore spaces appear white. The porosity of the medium was calculated to be 42.04% based on the binary segmentation. Fig. 1(b) shows the pore size distribution obtained using a watershed-based image analysis technique.

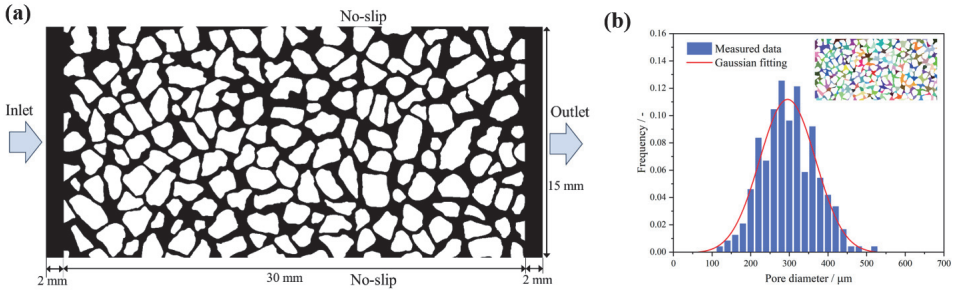


Figure 1: (a) Schematic of the computational domain and (b) pore size distribution of the porous medium.

The VOF method employ a Eulerian description of each phase on a fixed grid, calculating the interface between two phases using the transport equation of the local

volume fraction of one phase. In this method, both fluids are assumed to be incompressible and Newtonian, with no phase change. The single field quantity β, defined in the phase 1, 2, is given by:

$$\beta = \alpha\beta_1 + (1-\alpha)\beta_2 \tag{1}$$

where β_1, β_2 are the value of quantity β in phase 1 and 2 respectively; α is the phase indicator in the field. If α is equal to 0 or 1, it indicates cells occupied by only one phase, while $0 < \alpha < 1$ corresponds to cells containing the fluid/fluid interface.

Under isothermal conditions, the single-field velocity $\mathbf{u}$ and pressure p satisfy the single-field incompressible Navier-Stokes Equations (NSE):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}\mathbf{u}) - \nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^{\mathrm{T}})) = -\nabla p + \mathbf{F}_\sigma \tag{3}$$

where ρ, μ, $\mathbf{F}_\sigma$ are the average density of two phase, the average dynamic viscosity of two phase and the surface tension, respectively.

Finally, the phase distribution function is governed by the following transport equation:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\alpha(1-\alpha)\mathbf{u}_r) = 0 \tag{4}$$

where $\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2$ is the relative velocity between two phases.

The transport of the solute species can be described by the advection-diffusion equation:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C\mathbf{u}) = \nabla \cdot (D_{\mathrm{m}} \nabla C) \tag{5}$$

where C represents the solute concentration and D_{m} is the diffusion coefficient.

Based on this high-resolution information, an effective or upscaled mass transfer coefficient can be defined using the actual CO_2 dissolution rate within a representative elementary volume. The mass transfer coefficient can be expressed as:

$$k = \left(\frac{\partial m}{\partial t}\right)\left(\frac{1}{\mathrm{A}}\right)\left(\frac{1}{C_{\mathrm{s}} - C_{ave}}\right) \tag{6}$$

where $\partial m/\partial t$ denotes the net rate of CO_2 mass transfer into water, which is quantified by monitoring the CO_2 flux through the outlet under quasi-steady conditions. A is the total interfacial area across the pore space. C_{ave} is the averaged CO_2 concentration dissolved in water.

2.2 Morphology of trapped CO_2 bubbles

To investigate the morphology of trapped CO_2 bubbles (configuration and saturation) affects the interface mass transfer in the heterogenous porous media, six simulation cases were set as presented in Fig. 2. From Figs. 2(a)-(e), singlet bubbles with different saturation were randomly distributed in the porous medium. The volume of these bubbles is approximately equal to the average pore volume, with a variation range of ±20%. The CO_2 saturation ranges from 2% to 20%, consistent with experimental measurements of trapped gas in unconsolidated porous media.

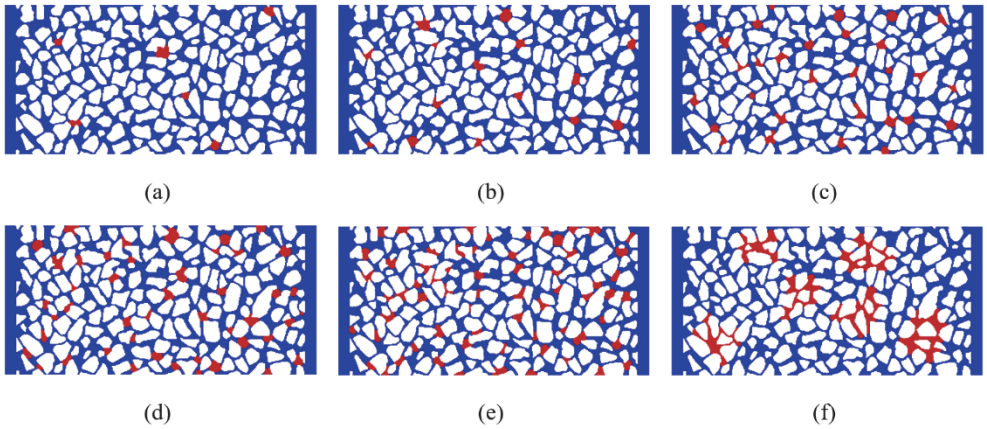


Figure 2: Initial distribution of trapped CO_2 bubbles in the porous medium: (a) singlet, S_n = 2%, (b) singlet, S_n = 5%, (c) singlet, S_n = 10%, (d) singlet, S_n = 15%, (e) singlet, S_n = 20% and (f) cluster, S_n = 20%, White, red and bule represent grain, CO_2 and water, respectively.

Figure 3 illustrates the velocity distributions in the two-dimensional porous medium under a constant flow rate of 1.0×10^{-3} m/s, with varying CO_2 saturations (S_n = 2%, 5%, 10%, and 15%). The velocity field is described by a color gradient from white to dark blue, representing low to high local velocities. To highlight the role of the morphology of trapped CO_2 bubbles, the bubbles and solid matrix were also presented in Fig. 3. As CO_2 saturation increases, the distribution of trapped bubbles significantly alters the flow field distribution. At low saturation (S_n = 2%), the gas bubbles are sparsely distributed and have a minimal impact on the overall flow structure. The main flow pathways remain continuous, and high-velocity channels are clearly preserved throughout the domain.

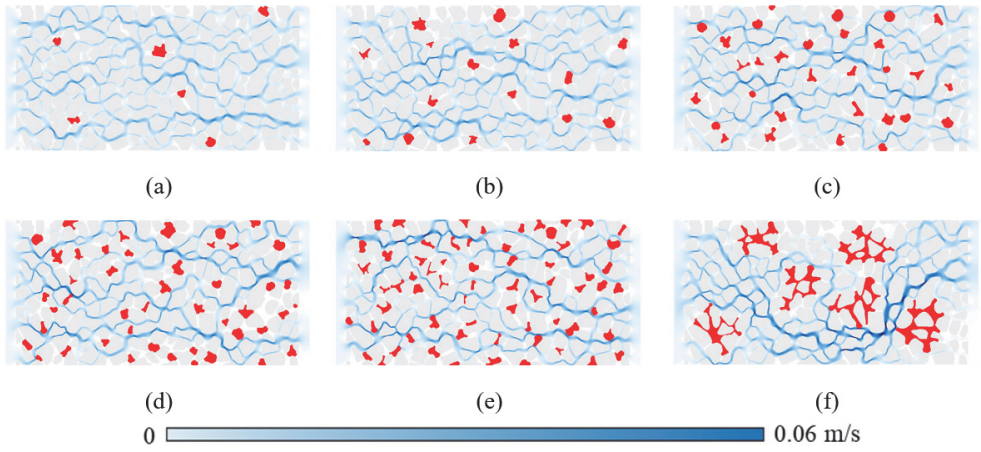


Figure 3: Velocity distribution with the water flow rate of 1.0×10^{-3} m/s: (a) singlet, S_n = 2%, (b) singlet, S_n = 5%, (c) singlet, S_n = 10%, (d) singlet, S_n = 15%, (e) singlet, S_n = 20% and (f) cluster, S_n = 20%.

2.3 CO_2 concentration distribution in water during dissolution

Figure 4 presents the spatial distribution of dissolved CO_2 in water under a constant flow rate of 1.0×10^{-4} m/s for different non-wetting phase saturations (S_n = 2%, 5%, 10%, and 15%). Overall, the concentration of CO_2 in water increases significantly with increasing gas saturation. Moreover, the spatial heterogeneity of the CO_2 distribution

becomes more obviously as S_n increases. At S_n = 2%, dissolved CO_2 is confined to a narrow zone surrounding the gas–water interface, typically limited to approximately one throat, indicating that mass transfer is strongly localized and diffusion-dominated. When the saturation increases to 5%, the CO_2 concentration expands into a broader region, and its distribution begins to extend farther from the gas–liquid interface. At higher saturations (S_n = 10% and 15%), a clear distinction emerges between high-concentration stagnant zones and low-concentration mainstream flow regions.

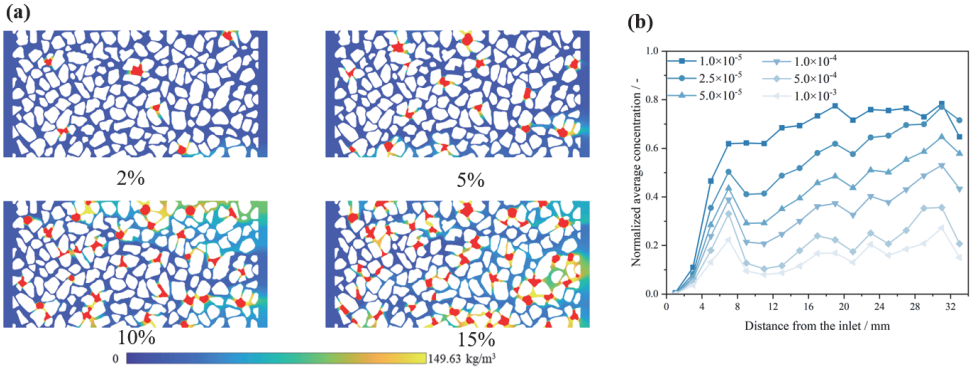


Figure 4: (a) CO_2 concentration distribution in water with the water flow rate of 1.0 × 10^{-4} m/s, (b) average CO_2 concentration along the flow direction at S_n = 15%.

2.4 Mass transfer coefficients

Figure 5 presents the interface mass transfer coefficient and *Sh* versus *Re* with different initial CO_2 saturation. The obtained mass transfer coefficients range from 2.0 × 10^{-8} m/s to 2.5 × 10^{-7} m/s, which is similar with the preview simulation results (4.26 × 10^{-6} m/s to 8.36 × 10^{-6} m/s) and the experimental results of trapped supercritical CO_2 bubbles in 3D porous media (5 × 10^{-8} m/s to 3 × 10^{-7}m/s). As expected, the obtained mass transfer coefficients and Sherwood number are strongly correlated to the Reynolds number, which is indicative of typical rate-limited mass transfer behavior. Generally, the empirical correlation of velocity-dependent mass transfer can be approached with a power function as $Sh \sim Re^n$, where n is an arbitrary constant. This relationship appears as a linear trend on the log–log scale.

As illustrated in Fig. 13, the interphase mass transfer coefficient is not constant across saturation levels. At low gas saturations (S_n < 15%), the coefficient increases with S_n. This trend can be attributed to enhanced pore-scale flow velocity with increasing gas presence, which augments convective mass transfer. In contrast, at higher gas saturations (S_n > 15%), the extent of stagnant flow regions near the gas–liquid interface becomes more pronounced. These stagnant zones suppress local convective transport, resulting in a reduction in the average mass transfer coefficient. Similar trends have been reported in previous pore-scale experiments.

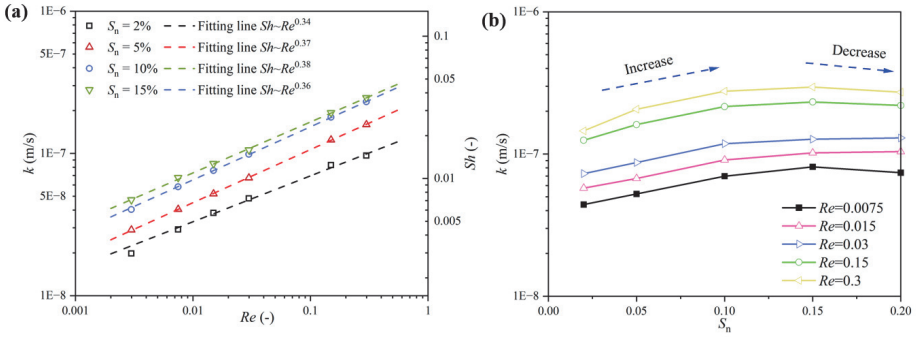


Figure 5: (a) Interface mass transfer coefficient (left axis) and Sherwood number (right axis) versus Reynolds number for CO_2 singlets with different saturation, (b) Mass transfer coefficient versus initial CO_2 saturation with different flow rates.

3. Achievements

In this study, the coupled solute transport and Navier–Stokes equations were solved to investigate the effect of residual CO_2 bubble morphology on the dissolution mass transfer process in porous media. The interfacial areas, stagnant regions, and mass transfer coefficients were quantitatively analyzed. This study not only contributes to a deeper understanding of how CO_2 bubble morphology in complex pores affects the dissolution mass transfer process, but also provides an empirical correlation for the mass transfer coefficient that can be used to predict field-scale CO_2 storage in saline aquifers.

4. Summaries and future plans

In this study, the quasi-static assumption was adopted to perform pore-scale numerical simulations of CO_2 bubble dissolution mass transfer. To further analyze the dynamic evolution of bubble morphology during the dissolution process and its impact on the mass transfer rate, it is necessary to conduct dynamic simulations of CO_2 bubble dissolution. This constitutes the next step of the collaborative research.

In the collaborative research, further conducting visualization experiments of supercritical CO_2 dissolution under in-situ conditions will not only provide validation for the numerical simulations but also offer more comprehensive reference data.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] Y. Hu, Y. Xu, K. Dong, Y. Kanda, Z. Gu, J. Su: Effects of morphology of trapped CO_2 bubbles on dissolution mass transfer in porous media: A pore-scale simulation, *Physics of Fluids*, Vol. 37, Issue 10, (2025) (DOI: 10.1063/5.0294260).

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[2] Y. Hu, Y. Kanda, Pore-Scale Insight into CO_2 Bubble Morphology and Dissolution Mass Transfer Coupling, *The 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, (2025).

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J25I048
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

風洞試験と数値計算による翅脈を持つ柔軟膜翼のデジタルツイン研究開発

Digital Twin R&D of Flexible Membrane Wing with Wing Veins
by Wind Tunnel Test and Numerical Simulation

伊神　翼*†，金崎 雅博**††
河野 日香**，工藤 惣士**，倉橋 晴香*，永井 大樹*
*東北大学流体科学研究所，**東京都立大学システムデザイン研究科
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

火星飛行機の実現に向けては，火星の低大気密度下で十分な揚力を得るために大翼面積が必要となる一方で，大気突入カプセルへの収納性も同時に要求される．これらの要求を満たす手段として，膜を展開して翼として機能させる柔軟膜翼がある．柔軟膜翼は，柔軟かつ伸縮性を有する膜と剛性を担保する桁構造からなり，軽量で高い収納性を実現できるだけでなく，失速特性の改善や揚抗比の向上といった空力的利点も報告されている．

柔軟膜翼では，膜を支持する桁構造に対しても高い収納性と構造強度を両立させる必要があり，本研究では，テントウムシなど甲虫類の後翅にみられる翅脈状構造に着目した．翅脈状構造は，羽ばたきに耐える構造強度と優れた収納性を同時に実現し，さらに翅脈の弾性による自律的な展開機構を有する．しかし，このような翅脈状構造を有する柔軟膜翼を小型航空機に適用する際の構造および空力特性の向上指針については，体系的な検討が十分になされていない．そこで本研究では，翅脈状構造が柔軟膜翼の空力特性に及ぼす影響を考慮した空力ー膜構造連成計算および最適設計，ならびに風洞試験を実施し，翅脈状構造と柔軟膜翼の収納性，構造強度，空力性能との関係を明らかにすることを目的とする．

2. 研究成果の内容

2024 年度までに，翅脈状構造を単純化した 3 種類のリブ構造パターン（rib0～rib2，図 1）を設定し，数値計算および風洞試験を実施した．2025 年度では，これらの結果に対して詳細な解析を進めるとともに，数値計算結果と風洞試験結果の直接比較を行うことで，デジタルツイン研究開発に向けた相互検証に取り組んだ．

まず，図 2 に示す揚力係数の比較より，rib0 では高迎角条件において数値計算と実験値の乖離が確認された一方で，rib1 および rib2 では数値計算が実験結果を良好に追随していることが分かる．このことから，膜翼の変形が大きく，かつ高迎角となる条件では，数値計算と実験との整合性が低下する可能性が示唆される．一方で，翅脈状構造が単純になるほど低迎角時の揚力が増加し，高迎角時には低迎角時ほど翅脈状構造による顕著な差が現れないという定性的な傾向については，数値計算と風洞試験の両者で一致した．これは，高迎角条件で高い揚力を得ることが求められる火星飛行機において，翅脈状構造の最適化にあたっては，揚力特性よりも，構造変形特性や折り畳み効率を主眼として検討すればよい可能性が示唆された結果である．

次に，図 3 にスパン中央付近断面における膜の変位量および速度分布について，数値計算結果と風洞試験結果の可視化を示す．風洞試験における速度分布は PIV 法により取得した．これらの結果から，リブ構造によって膜変位が抑制されている領域の周辺に，再循環領域が形成されていることが確認できる．この再循環領域の形成パターンについては，数値計算と風洞試験の間で概ね同様の傾向が捉えられており，両者の対応関係が一定程度確認された．

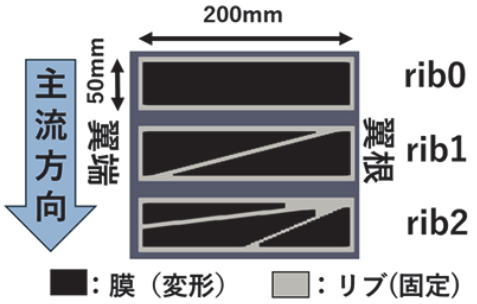


図１　検証に利用したリブ構造パターン

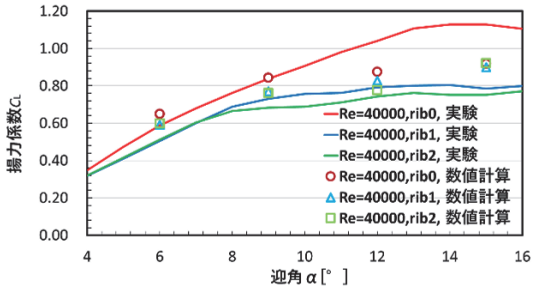


図２　揚力係数の迎角特性に関する数値計算と風洞試験結果との比較．

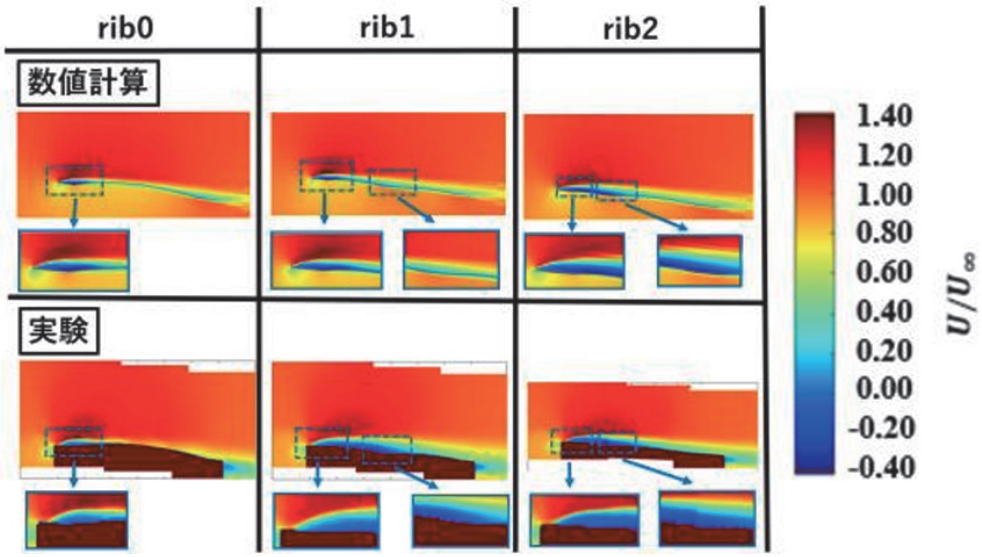


図３　スパン中央付近における断面速度分布と膜変位に関する数値計算と風洞試験結果との比較．

3.　研究目標の達成状況

本研究では，翅脈状構造を有する柔軟膜翼に対して，空力－構造連成解析手法を確立し，風洞試験による検証を通じて，翅脈状構造や膜物性が構造および空力特性に与える影響を明らかにし，最適設計へ展開することを目標としていた．本年度までの取り組みにより，翅脈状構造を単純化した複数のリブパターンに対して，数値計算および風洞試験を同一条件で実施し，揚力係数や膜変形量，流れ場構造に関する直接比較を行うことができた．その結果，翅脈状構造の有無や配置による揚力特性の定性的な変化や，膜変形を介した流れ場形成メカニズムについて，数値計算と実験で概ね整合した傾向を確認した．これにより，翅脈を有する柔軟膜翼に対する空力－膜構造連成解析手法を確立し，その有効性を実験的に裏付ける段階に到達したといえる．

4. まとめと今後の課題

本研究では，火星飛行機への適用を念頭に，翅脈状構造を有する柔軟膜翼を対象として，空力ー膜構造連成計算と風洞試験を組み合わせた評価を行った．翅脈状構造を単純化した複数のリブパターンについて，数値計算と風洞試験を同一条件で実施・比較した結果，揚力特性や膜変形挙動，ならびに流れ場構造について，両者で概ね整合した定性的傾向を確認した．今後は，翅脈トポロジの最適設計や，より複雑な翅脈形状を有する柔軟膜翼への展開を計画しており，次年度以降の研究において，デジタルツインによる設計指針の高度化につなげていく．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] 工藤惣士，田久保勇志，金崎雅博：風擾乱による不確定性を考慮した火星探査航空機の飛行経路最適化，知能と情報，日本知能情報ファジィ学会誌，Vol.38，No.1，(2026)，https://doi.org/10.3156/jsoft.38.1_555.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 工藤惣士，河野日香，髙木大成，正木拓斗，大島草太，伊神翼，永井大樹，玉置義治，今村太郎，金崎雅博：超小型火星飛行機：膜翼を採用した収納・展開可能な超小型火星飛行機の概念検討（第二報），日本航空宇宙学会第 56 期年会講演会，東京，(2025)，P19.

[3] S. Kudo, T. Takagi, T. Masaki, H. Kono, S. Oshima, M. Kanazaki, T. Ikami, H. Nagai: Conceptual Study on Storable and Deployable Micro-sized Mars Airplane with Membrane Wings, *AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND 2025*, Las Vegas, NV, USA, (2025), AIAA 2025-3625, https://doi.org/10.2514/6.2025-3625.

[4] 河野日香，工藤惣士，倉橋晴香，伊神翼，永井大樹，今村太郎，玉置義治，金崎雅博：火星での飛行環境における柔軟膜翼のリブ構造様式による空力特性変化，第 69 回宇宙科学技術連合講演会，札幌，(2025)，3Q05.

[5] 工藤惣士，田久保勇志，金崎雅博：不確定環境下での膜翼超小型火星飛行機のロバスト最適経路設計，第 69 回 宇宙科学技術連合講演会，札幌，(2025)，2E02.

[6] H. Kono, S. Kudo, H. Kurahashi, T. Ikami, H. Nagai, M. Kanazaki: Ribbed Membrane Wing Characteristics in Low Reynolds Number Flow by Numerical and Experimental Approach, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2025), CRF-8, pp. 31-33.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project Code	J25I049
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Health, Welfare and Medical Cares
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	2nd year

Development of Transparent Ultrasound Phantom Material: Sound Velocity Study

Muhammad Shiddiq Sayyid Hashuro*†, Makoto Ohta**††
Widya Anugrah Kinasih***, Maheswara Apta Adiyatma*
*Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Bandung Institute of Technology
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
***SAS Segara Rekateknik
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this project is to find the effect of additional solution into the solvent of poly-vinyl alcohol hydrogel and quartz glass mixture such as ethanol to its resulting ultrasound phantom gel's speed of sound. Initial results showed that the addition can decrease the speed of sound.

2. Details of program implement

Continuing our sound velocity study, this time Ohta lab hosted the lengthy experimental study of varying the ethanol addition composition to see its effects on the sound velocity in the material. The results are shown below.

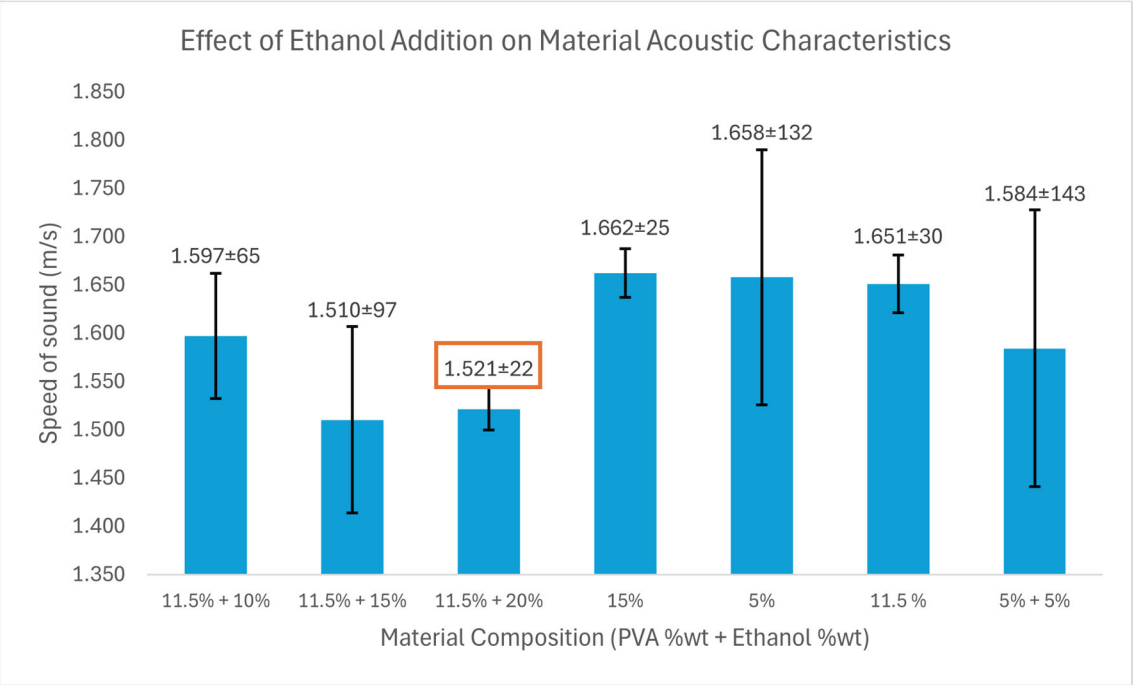


Figure 1. Effect of ethanol addition on the sound velocity in several PVA concentrations hydrogel.

The results show that 11.5 wt% PVA-H has closest sound velocity to human tissue at 20 wt% addition of ethanol on average 1521 m/s. On a more important note, this study shows that ethanol addition is indeed capable of modifying the hydrogel acoustic material, as we can also see on the 5 wt% PVA-H. These results open the possibility to manufacture a range of PVA-H with varying mechanical properties while maintaining its compatibility with commercial medical ultrasound systems.

3. Achievements

We have done three major experiments on this research:

1. Phantom material modification with ethanol indeed results in a decrease of the speed of sound to a point lower than the target speed. Thus, ethanol is a suitable additive for ultrasound phantom material.
2. Neither acetic acid nor acetone is a suitable additive for PVA-based ultrasound phantom fabrication, as acetic acid produces poor-quality, non-homogeneous gels due to premature pH-induced gelation, while acetone fails to induce any gel formation entirely.

4. Summaries and future plans

The results of this research will be integrated into larger research about aneurysm coiling platforms and the possibility of using Doppler ultrasound for their analysis, the outline of which was presented at ICFD 2025. We have not investigated the effects of ethanol addition on the hydrogel's refractive index. This information is needed to complete its usage possibility with scatterer while maintaining its transparency.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] W. A. Kinasih, I. M. Farhany, I. Rostiana., N. R. Marali, M. S. S. Hashuro, Suprijanto, M. Ohta. Ultrasound Compatible Phantom: Simulating Transcranial Color-Coded Duplex Sonography for Aneurysm Recurrence Monitoring and Evaluation After Coiling Procedure. *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-66, pp. 181-184.

[2] Nagaoka R., et. al., Preliminary Study on Image Reconstruction Using Estimated Average Speed of Sound for Ultrasonic Flow Images in Phantom Measurement, Poster Presentation at 2025 *IEEE International Ultrasonics Symposium* (https://2025.ieee-ius.org/), Utrecht, Netherlands, September 15-18, 2025.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J25I050
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	3 年目

液中プラズマ・超音波キャビテーション併用処理によるスルホン化炭素触媒合成

Synthesis of sulfonated carbon catalysts using combination process of plasma in liquid and ultrasonic cavitation

竹内　希*†，高奈 秀匡**††
*東京科学大学工学院，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究は，バイオマスであるセルロースからのバイオ燃料合成に必要な加水分解反応触媒の生成を目的とする．従来，環境負荷の大きい長時間の化学処理によって，高価な炭素ナノ材料にスルホン基を修飾して得られていた炭素触媒を，液中プラズマと超音波キャビテーションを併用したワンステップ処理によって生成する．そのために，超音波キャビテーションによる微小気泡雲・高速液流を有機溶媒・硫酸混合溶液中へ導入することにより，高導電率溶液中でのプラズマ安定生成を実現する．これにより，高価なシリカテンプレートを必要としない多孔質炭素ナノ材料合成が可能となり，比表面積極大化，および SO_3 ラジカル発生による炭素ナノ材料のスルホン化を同時に実現することが可能となる．得られた炭素触媒の応用としては，セルロースをグルコースへと転換する加水分解反応触媒を考えており，既存の触媒を超えるセルロース転換率 50 %，グルコース生成選択率 90 %を達成する．低コストかつ環境負荷が極めて小さい加水分解反応触媒の生成手法を確立することで，豊富な資源であるバイオマスエネルギーの利用拡大へとつながることから，持続可能な社会の実現にも大きく貢献できると考えられる．

2. 研究成果の内容

キシレンと硫酸の混合溶液中でソリューションプラズマを発生させ，炭素材料の合成を行った．図 1 に示すように，十字型ガラスリアクタ内にキシレン 80 mL および 1 mol/L 硫酸 20 mL を導入し，電極間距離 1 mm でタングステン電極対を設置した．さらに，電極上部にホモジナイザプローブを配置し，超音波キャビテーションを発生させた．電極間には波高値 2.5～3 kV のパルス電圧を印加し，プラズマを発生させた．

生成した炭素材料について，X 線光電子分光法（XPS）および燃焼-イオンクロマトグラフィ（IC）により元素分析を行った．図 2 および図 3 に，XPS 測定の結果を示す．XPS 測定の結果，C1s スペクトルから COOH および C-OH がそれぞれ約 2.0%，2.8%存在することが確認された．また，S2p スペクトルからスルホン基に由来する成分が約 82.4%を占めることが確認された．XPS に基づく表面硫黄含有量は約 0.02 wt%であった．一方，燃焼-IC 分析では, 47.2 mg の炭素材料サンプルを燃焼した結果, 0.0051 mg の硫酸イオンが検出され，硫黄含有量は 0.0036～0.020wt%と算出された. なお, XPS は表面分析手法であるのに対し，燃焼-IC はバルク分析であるため，硫黄が材料表面に偏在している場合，両者の値に差が生じる可能性がある．

我々の研究グループでは，カーボンナノチューブなどの炭素材料を懸濁した希硫酸にプラ

ズマ照射することで，カーボンナノチューブにスルホン基を修飾する研究も行っている．このときの硫黄含有量は，処理条件によっては 2〜4 wt%程度が得られており，今回の手法の硫黄含有量は低い値にとどまった．

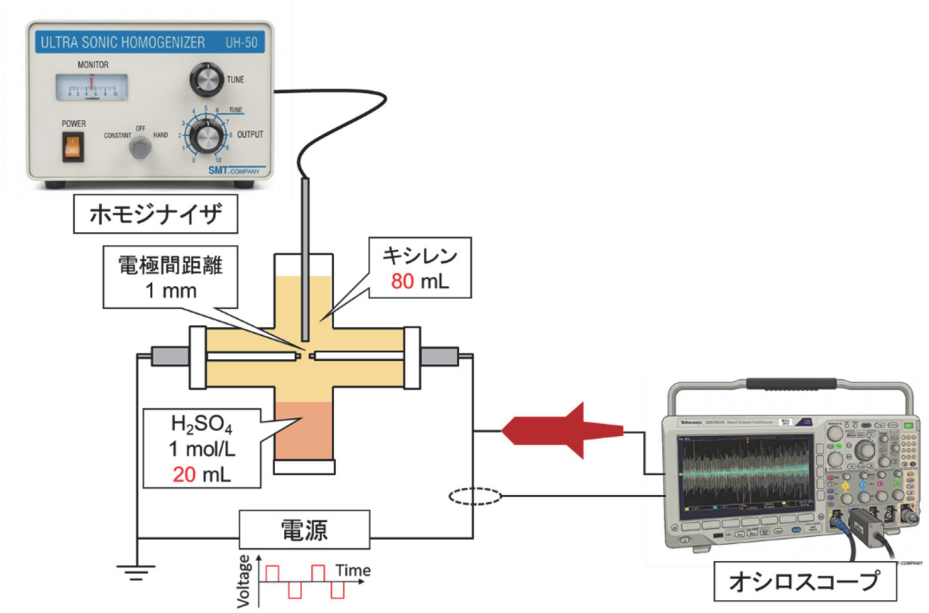


図 1：ソリューションプラズマによる炭素触媒合成の実験装置

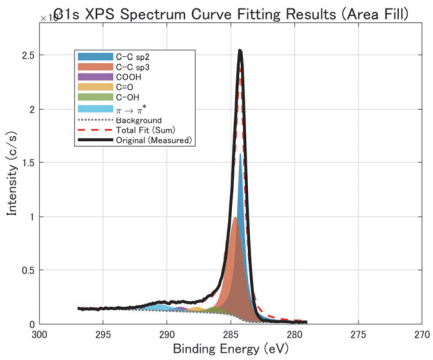


図 2：炭素材料の C1s スペクトル

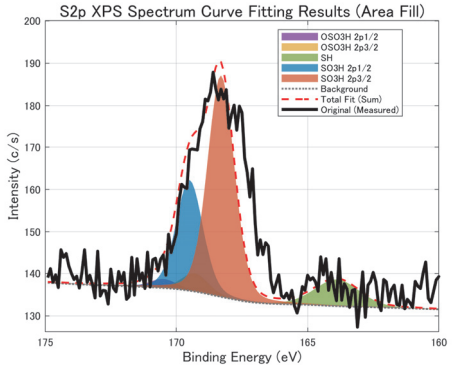


図 3：炭素材料のスペクトル

次に，キャビテーションプラズマの生成および炭素材料の合成に印加電圧周波数が与える影響を調査した．ここでは有機溶媒としてキシレンを用いた．図 4 に周波数を変化させたときの電圧パルスあたりの投入エネルギーの変化を示す．パルス印加ごとのばらつきは比較的大きいが，周波数増加に伴いパルスあたりの投入エネルギーが減少する傾向となった．周波数が高くなると，前パルス印加時の残存荷電粒子が増え，放電しやすくなることで，投入エネルギーが減少したと考えられる．

図 5 に平均投入電力と炭素材料合成速度の関係を，図 6 に周波数に対する炭素材料の比表面積の変化をそれぞれ示す．周波数 180 kHz において合成速度が大きく増加した一方，比表面積は 130 kHz で最大となった．炭素材料の原料となるラジカルの密度が高い場合，炭素材

料が密に合成され，比表面積が小さくなると考えられる．周波数が低いときはパルスあたりの投入エネルギーが大きいために瞬間的なラジカル密度が高くなり，また，周波数が高いときはパルス間隔が狭いことで，キャビテーションが誘起する流動によってラジカルが輸送される前に次のパルス放電でラジカルが生成されることで，局所的なラジカル密度が高くなる．130 kHz のときは，比較的低いパルスあたりの投入エネルギーと比較的広いパルス間隔によって局所的なラジカル密度が低くなり，比表面積が大きくなったと考えられる．

昨年度の成果から，キャビテーション強度の変化によっても炭素材料の比表面積を制御できることが分かっている．キャビテーション強度，周波数に加えて，印加電圧振幅やパルス幅を制御することで，さらに炭素材料合成条件を制御できる余地がある．

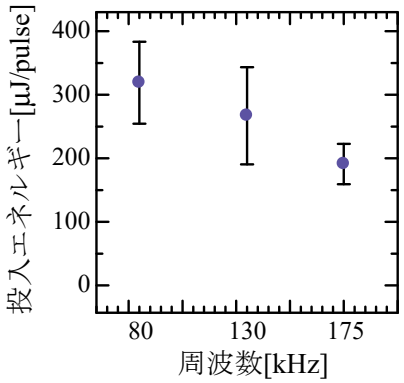


図 4：周波数に対するパルスあたりの投入エネルギーの変化

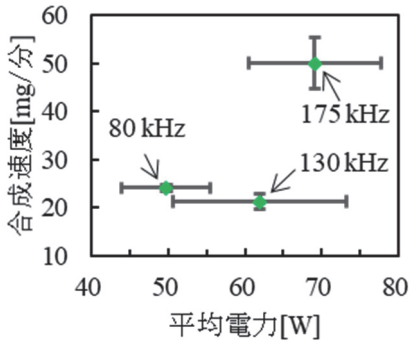


図 5：平均投入電力と炭素材料合成速度の関係

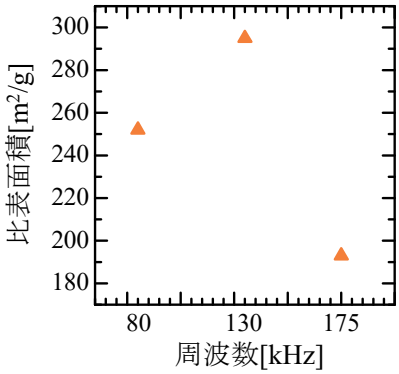


図 6：周波数に対する炭素材料の比表面積の変化

3. 研究目標の達成状況

本研究により，キシレン・硫酸混合溶液中における液中プラズマプロセスを用いて，炭素材料のスルホン化が可能であることを確認した．一方で，硫黄含有量は従来手法と比較して低く，スルホン基密度の向上が今後の課題である．また，本年度は放電安定化および材料分析に重点を置いたため，セルロース加水分解反応による触媒性能評価は実施していない．そのため，目標とする転換率および選択性に対する達成度は未評価である．

4. まとめと今後の課題

本研究では，キシレンと硫酸の混合溶液中において，液中プラズマと超音波キャビテーションを併用することで，炭素材料の合成およびスルホン化が可能であることを示した．

今後は，ホモジナイザ出力によるキャビテーション強度および流動場の制御，電極間距離，印加電圧などの条件最適化により，スルホン基密度および比表面積の向上を図る．また，セルロース加水分解実験を実施し，触媒性能の定量評価を行う．

微小気泡を含む流動場とプラズマが相互作用する複雑な反応場の理解を進めることで，低コストかつ低環境負荷な固体酸触媒の合成手法の確立を目指す．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] A. Shigematsu, H. Ota, N. Takeuchi, O. L. Li, H. Takana, M. Kodama: Study on synthesis of carbon materials for cellulose hydrolysis using cavitation plasma process, *The 78th Annual Gaseous Electronics Conference*, Seoul, (2025), DF3-6.

[2] H. Ota, A. Shigematsu, M. Kodama, O. L. Li, N. Takeuchi, H. Takana: Synthesis of Carbon Catalyst with Large Surface Area Using Liquid Plasma with Ultrasonic Cavitation, *Proceedings of Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), pp. 556-557.

[3] A. Shigematsu, H. Ota, N. Takeuchi, O. L. Li, H. Takana, M. Kodama: Study of the Effect of Ultrasonic Cavitation Intensity on Sulfonated Carbon Catalysts Using Cavitation Plasma, *Proceedings of The International Symposium Biomimetic Material Processing*, Nagoya, (2026), D2-P11, p. 52

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I051
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2025.4～2026.3
継続年数	3年目

飛行しながら回転する中空円筒の実験と数値解析
Experiment and Simulation of a Rotating Hollow Cylinder in Flight

平田 勝也*†，石本　淳**††，中野 政身**††
足立 高弘***，日尻 昂希*，小川 学人*
*同志社大学理工学部，**東北大学流体科学研究所
***秋田大学理工学部
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

一様流中にある迎角で置かれたAR=1.6の円筒翼を通過する流れについて，風洞実験，有限差分法等による三次元数値シミュレーションを試み，その周囲流れを詳細に調べるとともに，飛行物体としての揚力や抗力といった空気力学的特性を明らかにする．本研究で取り上げる中空円筒まわりの流れに関する研究はほとんどなく独創的である．さらに，回転（ジャイロ効果による飛行の姿勢安定化が主体）による影響や揚力，抗力等への影響に注目することに学術的な特徴がある．中空円筒は翼端がないことから，平面翼に比べ誘導抗力を減少させられる．現在世界的にゼロエミッションが叫ばれている中で航空機は抜本的な燃費改善が求められている．円筒翼は揚力曲線勾配が同ARの矩形翼に比べ2倍であるなど，空力特性が優れていることが過去の実験からわかっている．そこで我々の研究を成熟させることでよりよい提案ができると考えている．本研究はまだ基礎的段階にあるが，一様流に対してある迎角での円筒翼周りの流れやその空力特性に関して解析し，その飛行について検討するものであり，世界的に見てもほとんど見られない研究である．

2. 研究成果の内容

本研究では，レイノルズ数 10^4の低レイノルズ数領域において，風洞試験および自由飛行試験を実施した．風洞試験では矩形翼との比較によるレイノルズ数の影響を，自由飛行試験では回転の影響を評価した．その結果，レイノルズ数の影響は小さいことが示された．また，矩形翼と比較して最大揚力係数は約60%低下したが，抗力係数も低減し，結果として誘導抗力の低減が確認された．さらに，飛行安定性は矩形翼より向上しており，高い実用性が示唆された．図1より回転の影響は小さく，主に飛行安定性に寄与するパラメータである可能性が示された．またシミュレーションにおいてはメッシュを物体近傍で均一にする，乱流モデルの変更といった工夫を凝らし既存のものから実験とより定性的に会う環境づくりを行った．図2~4よりシミュレーションと実験の誤差が小さく，近い迎角で失速特性を示したことより，定性的に実験と一致したと考えた．

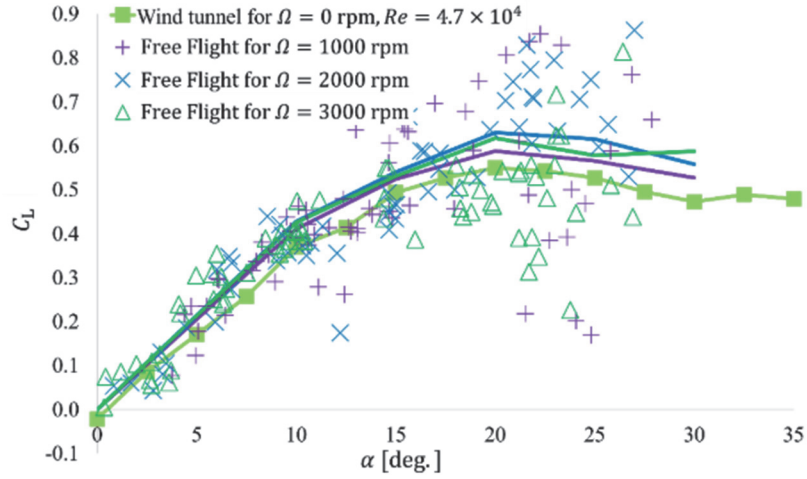


図 1 : The graph of C_L of Free Flight and Wind tunnel.

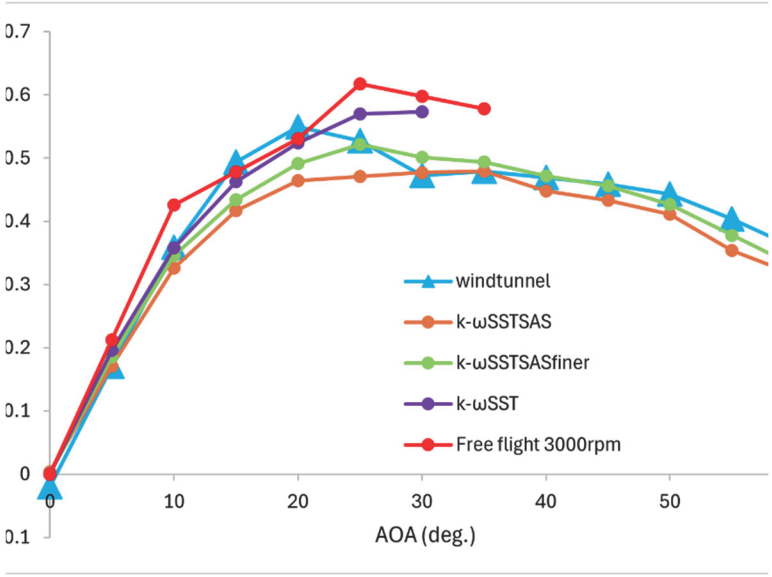


図 2 : The graph of C_L vs AOA.

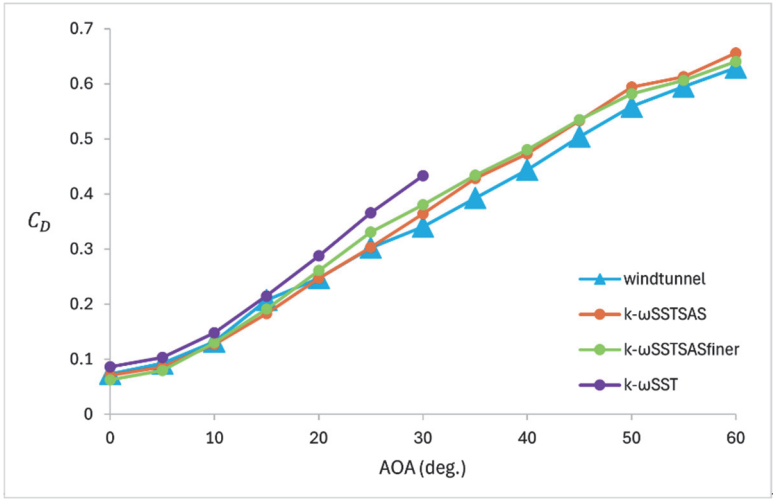


図 3 : The graph of C_D vs AOA.

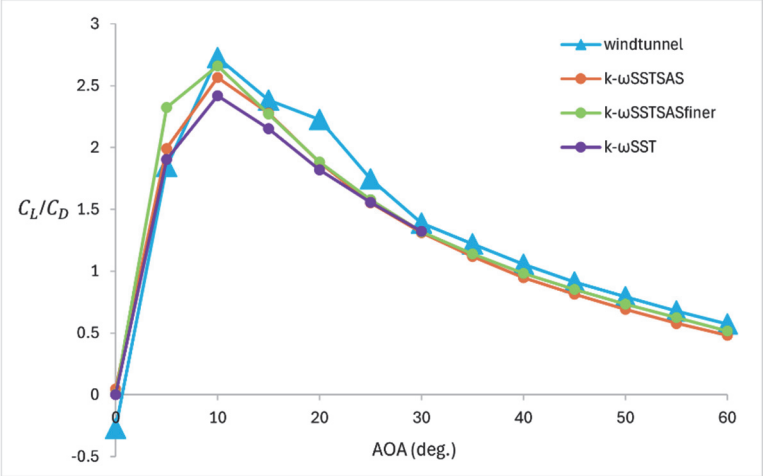


図 4：The graph of C_L/C_D *vs AOA*.

3. 研究目標の達成状況

シミュレーションの妥当性は担保できたと考えている．これより翼開発に向け AR 等の一定パラメータを変更し，シミュレーションを進めていく．

4. まとめと今後の課題

回転による円筒翼の飛行特性の差は生まれなかった．しかし飛行安定性には大きく影響を及ぼすことが分かった．また，スパコンを利用することでより詳細なシミュレーションが可能になり定性的に概ね一致する結果が得られた．これによりシミュレーションによる開発のフェーズに移れるので，パラメータ依存で形状を変更し今後も研究を進める．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 日尻昂希，小口晃太朗，石本淳，中野政身，足立高弘，平田勝哉: 円筒翼に関する数値解析と実験, 2025 年度 研究成果報告会（2024 年度研究成果報告），同志社大学光喜館（2025).

[2] 小口晃太朗，日尻昂希，石本淳，中野政身，足立高弘，平田勝哉: 風洞実験と飛行試験による円筒翼の空力特性 ，第 63 回飛行機シンポジウム，沖縄県市町村自治会館（2025), 3D07.

[3] 日尻昂希，小口晃太朗，石本淳，中野政身，足立高弘，平田勝哉: 数値シミュレーションによる円筒翼の空力特性と流れ，第 63 回飛行機シンポジウム，沖縄県市町村自治会館（2025），3D08.

[4] K. Oguchi, K. Hijiri, J. Ishimoto, M. Nakano, A. Adachi, K. Hirata: Investigation of the Aerodynamic Characteristics of a Cylindrical Wing using Wind Tunnel Testing and Free Flight Testing, *ICFD2025,* Sendai, (2025), OS1-12.

[5] K. Hijiri, K. Oguchi, J. Ishimoto, M. Nakano, A. Adachi, K. Hirata: Investigation of the Aerodynamic Characteristics of a Cylindrical Wing using Wind Tunnel Testing and Free Flight Testing, *ICFD2025,* Sendai, (2025), OS1-13.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I052
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4～2026.3
継続年数	2 年目

空気衝撃波背後の微弱な放射に関する基礎的研究
Fundamental Study of Weak Radiation behind Air Shock Waves

舩津 賢人*†，荻野 智也*，大谷 清伸**††
*群馬大学大学院理工学府，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

強い空気衝撃波背後の放射に関する研究は系統的に行われている．しかしながら，弱い空気衝撃波背後の放射に関する研究は，不純物等の影響により精力的には行われていない．そこで，本研究では，弱い空気衝撃波背後の放射を分光計測し，その熱化学的非平衡性に関して議論する．群馬大学現有の隔膜式衝撃波管（内径80 mm）を用いて，入射衝撃波マッハ数5程度の空気反射衝撃波を発生させ，その発光計測に成功している．得られた発光は，微弱なことからその化学種の同定に至っていない．これより，構成化学種に対応する複数の狭帯域フィルターを用いて，衝撃波背後の放射計測を行ったところ，理論的な解析に基づく発光強度比と異なる強度比分布が得られた．そこで，本研究では，東北大学流体科学研究所衝撃波関連施設の衝撃波管（矩形100 mm×180 mm）や弾道飛行装置を用いて，入射衝撃マッハ数3～7程度の衝撃波を発生させ，その衝撃波背後の分光計測を行い（分光器による計測が困難な場合には，狭帯域フィルターによる計測を試みる），群馬大学で得られたデータと比較検討する．これより得られた実験分光計測データを用いて，研究代表者等のグループが独自に開発した放射解析プログラムを利用し，温度推定を行うとともに，熱化学的非平衡性について議論する．

2. 研究成果の内容

2025年度は，東北大学流体科学研究所衝撃波関連施設の無隔膜型衝撃波管を用いて，入射衝撃波マッハ数4～5程度の空気衝撃波を発生させ，その反射衝撃波背後の放射を高速度ビデオカメラにより計測した．今年度は平板からV字型形状に変更し反射衝撃波の放射を計測した（図1）．特定波長に対応する狭帯域フィルターを利用した分光計測を試みた．また，同時にシュリーレン光学系により衝撃波を可視化した．

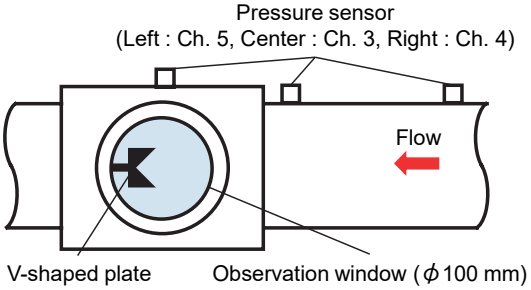


図１ ：計測部概略

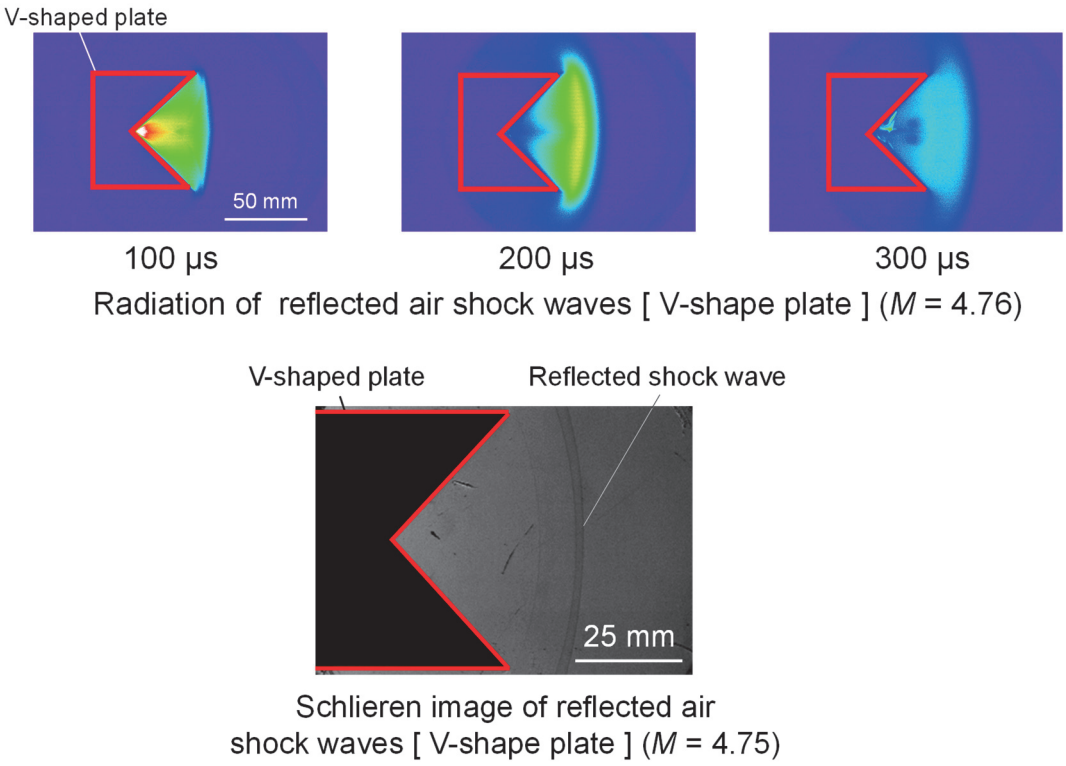


図 2：計測結果

3. 研究目標の達成状況

マッハ数4～5程度の衝撃波を発生させ，微弱な放射を計測することができた（図2上）．また，シュリーレン光学系により衝撃波を可視化した（図2下）．今年度は，平板からV字型形状に変更することにより，得られた放射強度値は増加したが，微弱な放射のため特定波長に対応する狭帯域フィルターを利用した分光計測においては，大変微弱な放射を計測するにとどまった．

4. まとめと今後の課題

今年度は，平板からV字型形状に変更し，反射衝撃波背後の放射計測を行った．マッハ数4～5程度の衝撃波を発生させ，微弱な放射を計測することができたが，特定波長に対応する狭帯域フィルターを利用した分光計測を試みたところ，大変微弱な放射を計測することにとどまった．今後は，より感度の高い分光器等を用いた分光計測や弾道飛行装置による衝撃波背後の分光計測により，微弱な放射から強い放射に関連する包括的な未解明の放射のメカニズムを明らかにしていく．

5. 研究成果

1) **学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）** なし

2) **国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等**

[1] M. Funatsu, T. Ogino, K. Shibusawa, and K. Ohtani: Fundamental Study of Weak Radiation behind Air Shock Waves (Second Report), *Proc. of 22nd Int'l Conf. Flow Dynamics [25th Int'l Sympo. Advanced Fluid Information]*, Sendai, Miyagi, Japan, November 10-13 [Presented on November 11], (2025), CRF-19, pp. 58-59.

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）** なし

課題番号	J25I053
区分	一般公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

嗅覚刺激に対する脳機能解析のための非磁性流体制御デバイスの MRI 内部環境の移流拡散解析

Advection-diffusion Solution of the Internal MRI Environment of a Non-magnetic Fluid Control Device for Analysis of Brain Function in Response to Olfactory Stimulation

井上 雄介*,**,***,†，岡島 淳之介***,††
山田 昭博**,***,****，坎本 晃海*****，関　布美子******
*旭川医科大学先進医工学研究センター，**東北大学大学院医工学研究科
東北大学流体科学研究所，*公立小松大学保健医療学部
*****実中研生体機能制御科学研究部，******実中研バイオイメージングセンター
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

アルツハイマー病に対する治療薬の開発は進展しているが，発症前後の超早期段階での診断は依然として困難であり，治療効果を最大限に引き出すための客観的バイオマーカーの確立が求められている．アルツハイマー病患者では嗅覚機能障害が極めて早期から認められることが知られており，嗅覚刺激に対する脳応答を定量評価することは，超早期診断につながる有望な方法である．本研究では，霊長類モデルを対象として嗅覚刺激時の脳活動を functional MRI により解析することを目的とし，その基盤技術として MRI 環境下で使用可能な非磁性流体制御型嗅覚刺激デバイスの刺激応答特性を評価する．嗅覚刺激は拡散を伴う物質刺激であり，刺激開始および終了の時間応答を正確に制御・評価することが難しい．本研究では，MRI 内部環境を模擬した実験系を構築し，嗅覚刺激物質の移流拡散挙動を可視化・解析することで，安定かつ高速な嗅覚刺激提示を実現するための基礎的知見を得ることを目的とする．

2. 研究成果の内容

2-1 模擬 MRI 環境下における嗅覚刺激物質の流体可視化

MRI と同等の幾何学的・物理的条件を再現するため，内径 72 mm，全長 600 mm のアクリル製円筒を MRI ボアの模擬構造として用いた．さらに，マーモセット頭部形状を基に作製した顔型モデルおよび拘束具を設置し，実際の MRI 撮像時と同様の配置条件を再現した．嗅覚刺激物質の供給および排気には内径 4 mm のシリコーンチューブを使用し，流量は 0.1 L/min に設定した．気体流れの可視化には油煙をトレーサー粒子として用い，レーザーシートをマーモセット鼻先相当位置に水平照射することで，嗅覚刺激物質の流動挙動を観察した．

2-2 高速度撮像および PIV 解析

可視化された粒子挙動は高速度カメラを用いて 1500 fps の条件で撮像し，得られた画像に対して PIV 解析を実施した．これにより，嗅覚刺激物質の速度分布および流れの方向性を定量的に評価した．

2-3 吸排気条件の違いによる流動特性の比較

嗅覚刺激物質の供給・排気方法として，チューブ先端からの送排気方式と，チューブ側面からの送排気方式の 2 条件を設定した．先端送排気方式では，刺激物質が鼻部に直接衝突し，

左右方向へ分岐する流れが観察された．一方，側面送排気方式では，刺激物質が顔面形状に沿って滑らかに流動し，比較的安定した排気挙動が確認された．

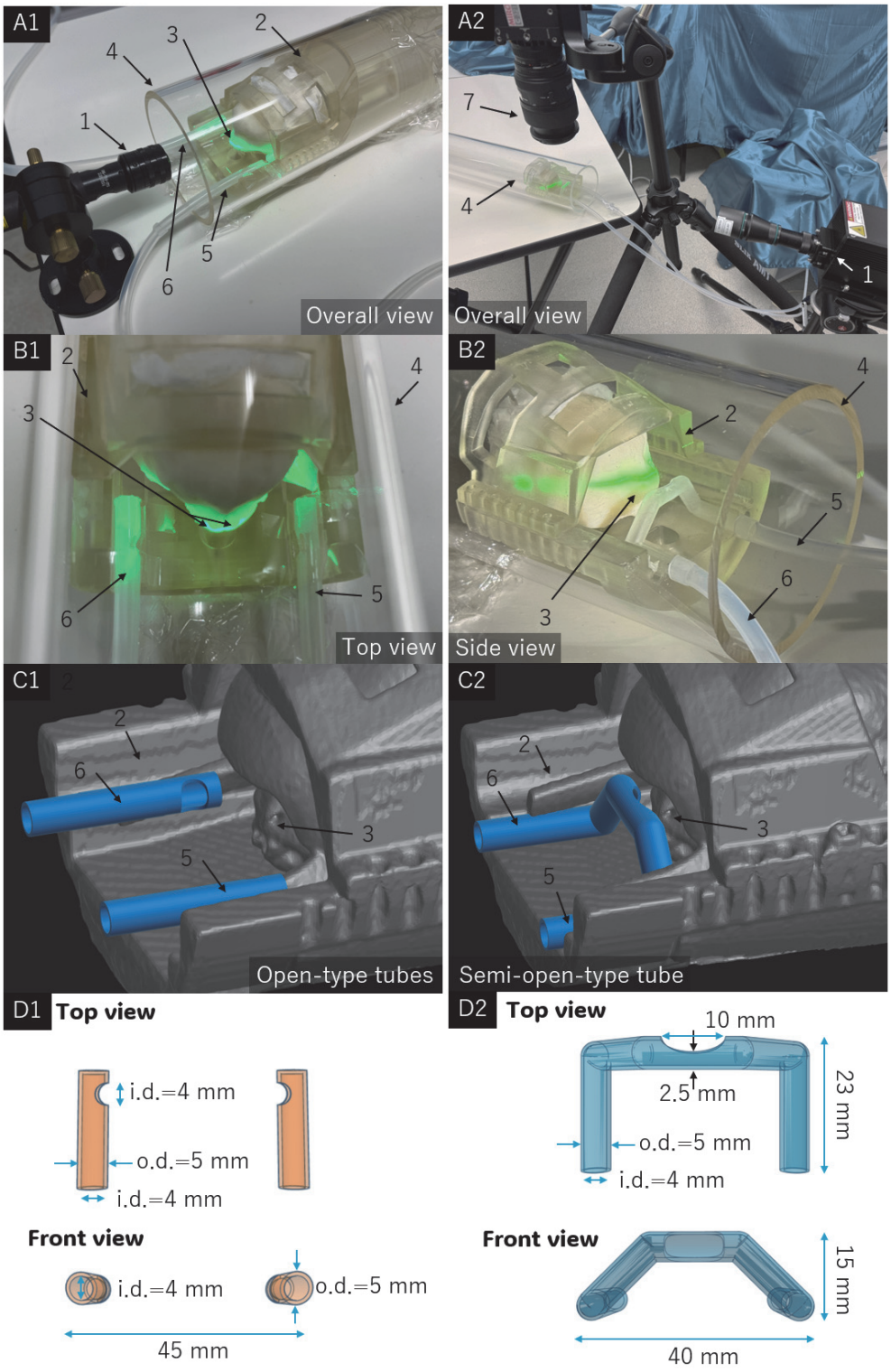


図 1：模擬 MRI 環境下での嗅覚刺激物質の流れ可視化　左：開放型，右：半解放型チューブ（A：全体像，B：シートレーザーによる可視化，C：チューブと鼻腔の位置，D：チューブのサイズ）(1) レーザー光源，(2) マーモセット用ホルダー，(3) マーモセット顔面モデルの鼻孔，(4) 模擬 MRI ボア，(5) 供給チューブ，(6) 吸引チューブ，(7) 高速カメラ）

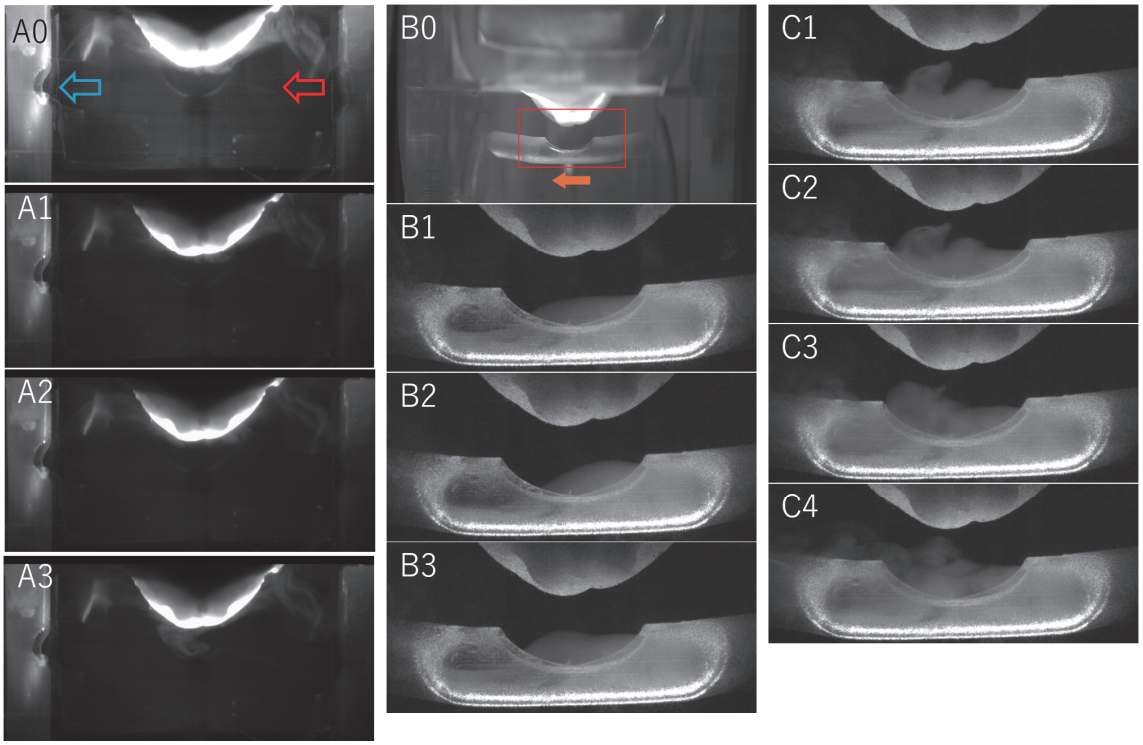


図 2：嗅覚刺激物質の流れ可視化の結果
（A：開放型，B・C：半解放型）（A1～2：供給管からでた刺激物質が顔面に沿ってながれ，吸引管から排出される様子，A3：一部に流れの剥離が生じ旋回流となった様子，B1~3：供給量よりも吸引量が多い場合，刺激物質は管から外に漏れない，C1~4：供給量より吸引量が少ない場合，刺激物質が管から漏れ出る）

3. 研究目標の達成状況

本研究により，模擬 MRI 環境下における嗅覚刺激物質の基本的な移流拡散挙動を可視化することに成功した．特に，吸排気管の配置条件が流動安定性および刺激応答性に大きく影響することが明らかとなった．チューブ側面から刺激物質を放出・排気する構成では，刺激物質の滞留が抑制され，嗅覚刺激の応答速度向上に有利であることが示唆された．一方で，取得画像の空間解像度およびレーザーシート厚の制約により，PIV 解析による速度ベクトルの定量精度には限界があることも明らかとなった．これらの点は，当初想定していた基礎実験系構築の範囲内であり，本年度の研究目標は概ね達成されたと評価できる．

4. まとめと今後の課題

本研究の本研究では，MRI 内部環境を模擬した実験系を用いて，非磁性嗅覚刺激デバイスにおける気体流動の可視化および基礎解析を行った．その結果，嗅覚刺激物質の供給・排気方法が刺激応答特性に大きく影響することを明らかにした．今後は，より高解像度の撮像系および薄層レーザー光学系を導入し，PIV 解析精度の向上を図る予定である．また，嗅覚刺激物質の流量および流速条件を系統的に最適化し，functional MRI 計測に適した刺激提示条件の確立を目指す．これにより，霊長類モデルにおける嗅覚刺激 fMRI 研究の信頼性向上と，神経疾患超早期診断への応用展開が期待される．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Yusuke Inoue, Akihiro Yamada, Terumi Yurimoto, Fumiko Seki, Yoshiaki Takewa, Junnosuke Okajima: Gas Flow Visualization and Advection-Diffusion Analysis in an MRI-Compatible Environment for Olfactory Brain Studies, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-76, pp. 210-213.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I054
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

微小重力下におけるパルス型ヒートパイプ開発に関する混相熱連成解析的アプローチ
Multiphase Thermaly Coupled Computing Approach to the Development of Pulsating Heat Pipes under Microgravity Conditions

石本　淳*†，Sławomir Pietrowicz**††
Andrzej Ireneusz Nowak**，Tomasz Duraziński**
*東北大学流体科学研究所，**Wrocław University of Science and Technology
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

微小重力下におけるパルス型ヒートパイプを用いたエネルギーシステム構築と，その超高熱流動特性に関し，マルチスケール統合型混相熱連成コンピューティングによる検討を行う．

2. 研究成果の内容

流体科学研究所のスーパーコンピュータと Wrocław University ならびに University of Bremen in Germany 所有の自由落下塔試験装置を用いて，微小重力下におけるパルス型ヒートパイプの超高熱流動特性に関するマルチスケール統合型混相熱連成解析を行い，極低温から高温まで高範囲の温度領域に適用可能となる微小重力下における温度制御・エネルギーシステムを確立した．

現時点までに，本熱制御システムの構築に必須となる，微小重力条件下における振動気泡流の数値シミュレーションを実施した．その結果，微小重力条件下における混相流動現象の高精度モデリングに成功し，表面張力が支配的な流動場における気泡の分裂・気泡とその尾部の非対称変形・ 液滴または液滴の蒸気泡への浸透に関する新知見が得られている．

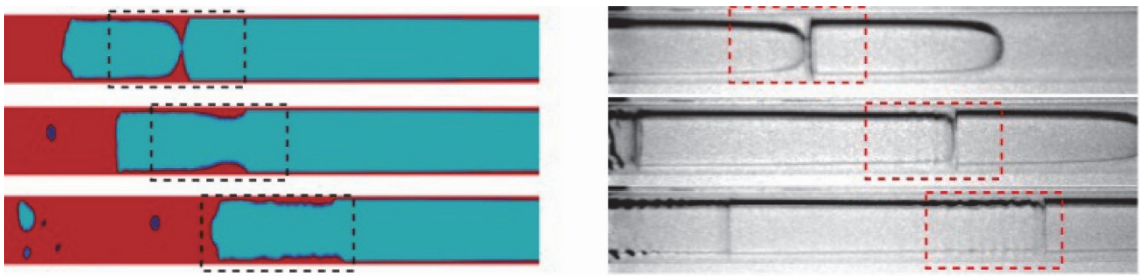


図 1：実験観測された 2 つの蒸気泡の合体メカニズムおよび数値計算による検証結果

3. 研究目標の達成状況

本研究の達成度は概ね 80%に達しており，当初計画通り順調に進行している．SDGs に立脚した次世代の微小重力環境における混相熱エネルギーシステム構築に必要となるマルチスケール統合型熱連成解析手法が確立されるとともに，リスク管理技術が確立される．さらに，表面張力が支配的となる混相流動場における超高熱流束熱制御ならびに新エネルギー複合化

によるレジリエントな微小重力広温度領域におけるサーマルマネジメントシステムの創成が可能となる.

4. まとめと今後の課題

本研究では，OpenFOAM v2106 の VOF/MULES 法による解析モデルと ZARM 自由落下塔（独）実験との比較により，エタノール作動・内径 4-6 mm 円管における気泡尾部の非対称変形・スラグ型液侵入・微小蒸気泡の分離合体等，微小重力下特有の界面挙動を高精度に再現した[1]．今後は，相変化解析への展開，三次元化，極低温流体・回転場への適用拡大を進め，マルチスケール統合基盤を構築する.

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Tomasz Durazinski, Andrzej Ireneusz Nowak, Jun Ishimoto, Slawomir Pietrowicz, Oscillatory two-phase flow dynamics in capillary tubes under microgravity conditions: Numerical modeling and qualitative analysis of the flow structures, *International Journal of Multiphase Flow,* Volume 184, 2025, 105107, ISSN 0301-9322. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.105107

[2] Marcin Opalski, Tisha Dixit, Bertrand Baudouy, Przemyslaw Blasiak, Jun Ishimoto, Slawomir Pietrowicz, Modeling of cryogenic pulsating heat pipe using CFD techniques, *Cryogenics*, Volume 147, 2025, 104061, ISSN 0011-2275. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2025.104061

[3] Jun Ishimoto, Computational Study of Liquid Ammonia Atomization Characteristics with Phase Change in an Injector Nozzle, *Proceedings of the ILASS-Americas 35th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, May 18-21, 2025, Bozeman, Momtana, USA.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[4] 内山 舜太 (東北大), 石本 淳 (東北大), ラバルノズル内極低温液体水素の混相流動特性に関する数値解析，日本混相流学会 混相流シンポジウム 2025，2025 年 9 月 3 日，神戸大学工学部（神戸市）.

[5] イ スンミン (東北大), 石本 淳 (東北大), 大島 逸平 (東北大), 相変化を伴うレーザー溶融プロセスに関する混相流シミュレーション，日本混相流学会 混相流シンポジウム 2025, 2025 年 9 月 3 日，神戸大学工学部（神戸市）.

[6] M. Opalski, A. Ruziewicz, A. I. Nowak, C. Czajkowski, J. Ishimoto, S. Pietrowicz, Numerical Analysis of Multi-loop Pulsating Heat Pipes on Cooled Cylinder for Rotary Applications (Invited)
The 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025) OS1: The Third International Symposium on Integrated Flow Science I & III, Sendai International Center, Sendai, Japan, Nov.10th - 13th, 2025.

[7] S. Pietrowicz , J. Ishimoto, Experimental and Numerical Analyses of the Flow Pattern in Pulsating Heat Pipes in Micro and Hypergravity,
The 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025) OS1: The Third International Symposium on Integrated Flow Science I & III, Sendai International Center, Sendai, Japan, Nov.10th - 13th, 2025.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project Code	J25I055
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Dynamics of Single Cavitation Bubbles in Carbon Dioxide-Supersaturated Water

Siwei Liu*†, Davide Bernardo Preso**,***††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Department of Engineering Science, University of Oxford
***Department of Drug Science and Technology, University of Turin
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The project aims to clarify the influence of dissolved gas on cavitation bubble dynamics, with particular emphasis on how the gas content in the surrounding liquid affects the collapse, rebound, and internal pressure of laser-induced cavitation bubbles. Since the composition inside cavitation bubbles and its coupling with bubble motion remain insufficiently understood, this study seeks to provide experimental evidence and model-based analysis to reveal the role of dissolved gas in bubble behavior.

2. Details of program implement

Experimental and numerical studies were carried out on single laser-induced cavitation bubbles generated in water with different levels of dissolved CO_2. A laser-induced bubble generation system was used to produce cavitation bubbles in CO_2-supersaturated water, and the temporal evolution of bubble radius was captured by high-speed shadowgraphy, as shown in Figure 1(a). The experiment enabled detailed observation of the bubble expansion, collapse, and rebound processes under different gas supersaturation conditions. To quantify the effect of dissolved gas, the bubble dynamics

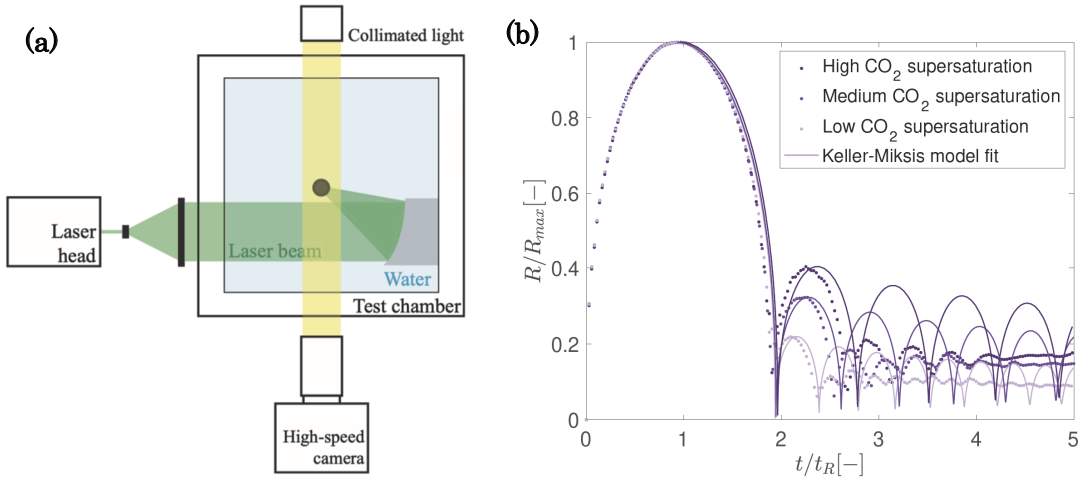


Figure 1: Experimental setup and typical results. (a)Experimental platform for bubble generation. (b) Temporal evolution of the radius in normalized coordinates of single laser-induced cavitation bubbles generated in water at three different levels of CO_2 supersaturation. The points are discrete data averaged over ten different experimental measurements. The lines represent the Keller–Miksis model fitted to the experiments.

were analyzed in normalized coordinates and compared under low, medium, and high CO_2 supersaturation levels as shown in Figure 1(b). The results showed that increasing the dissolved gas concentration had only a limited influence on the initial expansion stage, but significantly affected the collapse and rebound behavior of the bubbles. In particular, higher dissolved CO_2 concentrations led to milder collapse and larger rebound bubbles. Furthermore, the Keller-Miksis model was employed to fit the experimental data and estimate the internal bubble pressure at maximum expansion. Through this fitting procedure, the internal non-condensable gas pressure in the bubble was evaluated for different gas supersaturation conditions. The analysis demonstrated that higher dissolved gas content corresponds to higher internal gas pressure and reduced energy dissipation during collapse, indicating that more gas is retained inside the bubble.

3. Achievements

The project achieved progress in understanding the relationship between dissolved gas and cavitation bubble dynamics in water with different CO_2 supersaturation levels. It was demonstrated that dissolved gas has a clear influence on bubble collapse and rebound behavior, with higher gas content resulting in weaker collapse and stronger rebound. By combining experiments with Keller-Miksis model fitting, the internal gas pressure inside the bubble was quantitatively estimated, providing further evidence that dissolved gas directly affects the amount of non-condensable gas trapped in the bubble and thereby modifies its dynamic response.

4. Summaries and future plans

This study has shown that dissolved gas in the surrounding liquid plays an important role in cavitation bubble dynamics. The experimental results and model-based analysis consistently indicate that an increase in dissolved CO_2 reduces collapse intensity, enlarges rebound behavior, and increases the internal gas pressure of the bubble. Further work will focus on improving the accuracy of internal pressure recovery and extending the analysis to more refined physical models. Additional experimental approaches may also be introduced to better characterize the gas content inside the bubble and the associated interfacial processes.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] D. B. Preso, Siwei Liu. Effect of Dissolved Gas on Cavitation Bubble Dynamics. *25th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, 2025, CRF-55, pp.157-159.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

課題番号	J25I057
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

九重火山の熱水系解明に向けた微小地震データの高精度解析

Advanced Microseismic Data Analysis for Understanding Hydrothermal System of the Kuju Volcano

瓜生 健浩*，池田 達紀*†，椋平 祐輔**††
Dian Darisma***，川人 崇央**，岡本 京祐****，北村 圭吾*
*九州大学工学研究院，**東北大学流体科学研究所
***Syiah Kuala 大学, ****産業技術総合研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

現在，脱炭素社会の実現に向けて超臨界地熱資源が注目されており，活発な熱水活動を示す九重火山はその有力な探査候補地となっている.しかし, 先行研究で適用された自然地震ベースの機械学習モデルでは，九重特有の微小地震の特性を十分に捉えきれないという課題があった. そこで本研究では, STA/LTA 法を用いた微小地震の検出と震源推定に加え, AR-AIC（自己回帰赤池情報量規準）に基づく高精度な位相ピッキング技術を実装する.さらに，リサンプリングやエンベロープ抽出などの前処理を適用して計算の高速化を図り，九重火山において取得済みの膨大な連続地震データを高精度かつ高速に解析するための基盤を確立する. こうして得られた微小地震データを教師データとして機械学習に利用することで，より効率的な震源決定を実現する.最終的には，得られた震源分布やメカニズム解を統合的に解釈し，九重火山の熱水系に関する新たな知見を得ることを目的とする.

2. 研究成果の内容

2022 年から 2023 年にかけて九重地域で取得された約 40 日分の連続地震波形データを解析した.

まず，STA/LTA 法を用いて微小地震イベントを検出した.次に，検出されたイベントの震源位置を Hypoinvers を用いて推定し，九重火山直下の微小地震の空間分布を決定した.図 1 に，解析対象地域の地震計の分布と STA/LTA 法により推定された震源を示す.STA/LTA 法で検出されたイベント数は，先行研究 (Andajani et al., 2023)と同等であった.処理方法の違い（先行研究における S 波の使用や Double-Difference 法による再決定など）により直接的な比較は困難であるが，全体的な震源の空間分布パターンは整合している.

また，大規模データセットに対する計算効率を向上させるため，リサンプリングとエンベロープ処理を組み込んだ独自のアプローチを実装した.これにより, 微小地震解析に必要な精度を維持しつつ，より高速でイベントを検出することが可能となった.さらに，P 波の初動走時の読み取り精度を向上させるため, AR-AIC に基づく位相ピッキング手法も実装している.

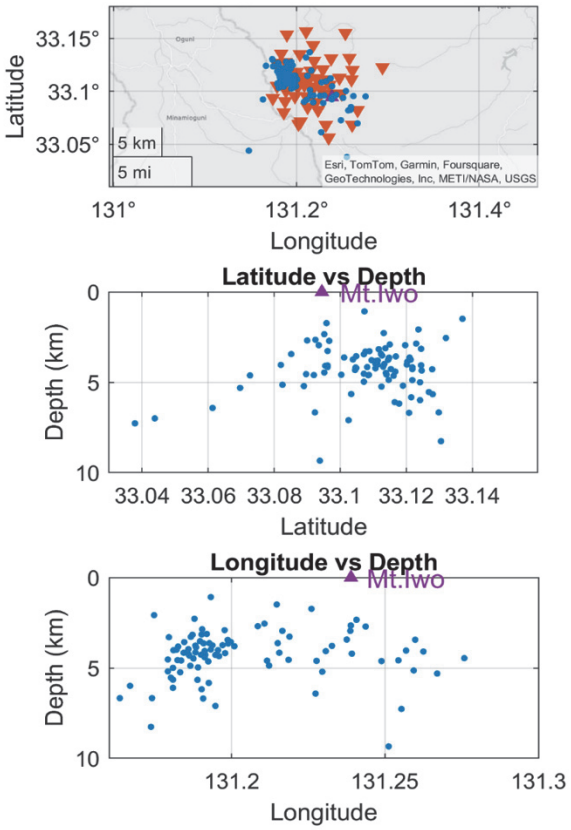


図 1：対象地域の地震計分布（オレンジ）と推定した震源分布

3. 研究目標の達成状況

メカニズム解の推定や機械学習を用いた微小地震の自動検出システムの構築まで至らなかったものの，それらの解析の基盤となる微小地震の検出や震源推定の手法を実装することができた.

4. まとめと今後の課題

本研究では，九重火山の連続地震データに対して高精度な微小地震解析を行うための第一段階として，STA/LTA 法や AR-AIC 等を用いた初期の微小地震検出・震源推定手法を実装し，大規模データを処理するための解析基盤を構築した.

今後は，Double-Difference 法を導入して震源決定のさらなる精度向上を図る.それに加え，今年度達成できなかったメカニズム解の推定や機械学習を用いた微小地震検出に取り組み，九重火山の熱水系の詳細な解明を目指す.

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 瓜生健浩，池田達紀，椋平祐輔，Dian Darisma，川人崇央，岡本京祐，北村圭吾: 九重地域の熱水系解明に向けた連続微小地震の震源決定，日本地熱学会令和 7 年盛岡大会，(2025)，P62.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J25I058
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

大規模 DNS に基づく粗視化した高レイノルズ乱流のデータ駆動科学
Data-Driven Science of Coarse-Grained High Reynolds Number Turbulence Based on Large-Scale DNS

石原　卓*†，金尾 祐伸**
服部 裕司***††
*岡山大学環境生命自然科学学域，**岡山大学環境生命自然科学研究科
***東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

乱流の直接数値計算（DNS）は乱流の普遍的な統計法則を理解するための道具として有効である．近年，高レイノルズ数乱流中に生じる極めて大きいエネルギー散逸や渦度の性質について理解するため小スケールの解像度の高い大規模な乱流 DNS が実施されている．実際，高レイノルズ数乱流中では最小スケールのコルモゴロフ長（η）の数倍程度のスケールで速度の空間微分が関わるエネルギー散逸や渦度の値が激しく変化するため，その流れ構造や運動を正しく捉えるためには十分な解像度（$k_{max}\eta$の値の大きい計算）が必要である（ここで，k_{max}は DNS における最大波数）．

一方, Yoshida, et al. (2005)の乱流 DNS を用いた数値実験によると, $k\eta < 0.2$ の流れ(渦)のデータを同化すると$k\eta > 0.2$の渦が再生することが示されており，　$k\eta > 0.2$の小スケール渦が受動的であることを示唆する結果が得られている．また，近年，解像度の低い画像から解像度の高い画像を再構成する超解像の技術が流体分野に応用され注目されている．

本研究では，解像度の低い（$k_{max}\eta$~1）乱流 DNS の結果から解像度の高い（$k_{max}\eta > 2$）乱流 DNS の結果を再構成する方法を開発することを目的としている．そのため，乱流 DNS の解像度に依存せず，粗視化のレベルを適切に揃えれば同等な統計量が得られることを確認する．次に，解像度の高い乱流 DNS データを用いて，粗視化した速度場のデータから高解像度な速度場データを再構成する超解像モデルを機械学習によって構築し，その超解像モデルの性能を評価する．

2. 研究成果の内容

（1）ほぼ同じレイノルズ数（R_λ~1100）で解像度の異なる乱流 DNS（$k_{max}\eta = 1, 2, 4$）のデータを用いて，全て$k_c\eta = 0.5$相当に粗視化を行ってエンストロフィーとエネルギー散逸率の確率分布密度（PDF）を比較した（図１にエンストロフィーで比較した例を示す）．その結果，粗視化しない場における PDF は解像度に依存して，高解像度ほど極端に大きい値となるイベントの頻度が高いことが確認できた．一方で，全て$k_c\eta = 0.5$相当に粗視化を行った場におけるエンストロフィーの PDF は元の乱流 DNS データの解像度に依存せず，ほぼ一致することが確認できた．

（2）次に，格子点数 1024^3，解像度（$k_{max}\eta = 2$），レイノルズ数（R_λ~268）の乱流 DNS データを用いて，粗視化の度合いを$k_c\eta = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 1.0$と変えて，渦度鉛直成分画像の DSC/MS の超解像モデルの構築を行った．その結果，超解像画像は$k_c\eta = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$では低解像画像に近いものに比べ，$k_c\eta = 0.6, 1.0$では元の高解像度画像に近いものとなり，元画像との MSE も一桁程度改善することが確認できた．

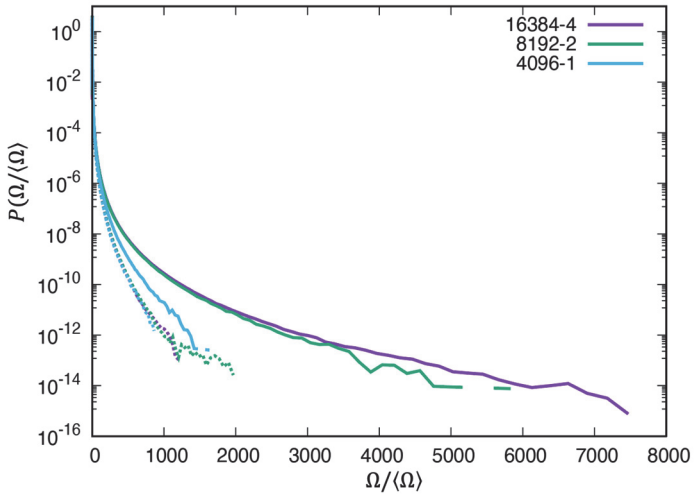


図 1 : 異なる解像度$k_{max}\eta = 1, 2, 4$の高レイノルズ数乱流 DNS データ（R_λ~1100）によって得られたエンストロフィー$\Omega/\langle\Omega\rangle$の PDF（実線）．元の場の PDF は解像度依存性を示すが，粗視化のレベルを$k_c\eta = 0.5$とした場の PDF（破線）には顕著な解像度依存性がないことがわかる．

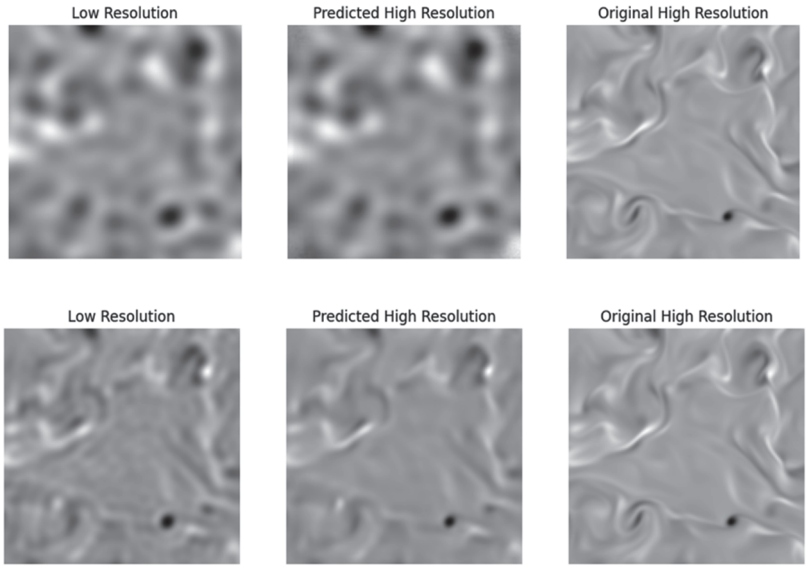


図 2 : 粗視化レベルが異なる渦度成分の低解像，超解像，高解像の画像の比較．（上）$k_c\eta = 0.3$，（下）$k_c\eta = 0.6$. 中央の超解像画像は上では左の低解像に近く，下では右の高解像に近い．実際，高解像度画像との MSE は上の場合に比べて下の場合は一桁小さい．

3. 研究目標の達成状況

本研究により，乱流 DNS の場は粗視化レベルを$k_c\eta = 0.5$と揃えれば，解像度が$k_{max}\eta \geq 1$となる乱流 DNS のエンストロフィーやエネルギー散逸率の PDF は解像度依存性がなくなり，レイノルズ数のみに依存することが示唆された．また，粗視化レベルが$k_c\eta \geq 0.5$の場合，超解像モデルが有効に働き，$k_{max}\eta \geq 2$相当の渦度場が再構成できることが示唆された．

以上により，本研究の 2025 年度における研究目標は達成できたと考えられる．

4. まとめと今後の課題

本研究により，超解像の技術を応用して，低解像度の乱流 DNS のデータから高解像度の乱流 DNS に匹敵する解像度のデータを得るためには低解像度の粗視化レベルを$k_c\eta \geq 0.5$にすることが重要であることが示唆された．今後は，レイノルズ数の異なる乱流 DNS データを活用して，結果のレイノルズ数依存性，および，超解像モデル依存性を明らかにする．

そして，最終的には高レイノルズ数乱流の高解像度 DNS データを用いた機械学習によって，低解像度の乱流 DNS データの高解像度化を実現する超解像モデルを開発する予定である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] T. Ishihara, Y. Kanao, Y. Hattori: Analysis of Coarse-grained Turbulent Vorticity Fields at High Reynolds Numbers using Large-scale DNS, *The Twenty-second International Conference on Fluid Information,* Sendai, (2025), OS15-9.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I059
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

翼後縁形状がトーンノイズへ与える影響とそのメカニズムの解明

Clarifying the Effect of the Shape of the Trailing Edge of the Wing on Tone Noise and the Mechanism Behind It

澄川 太皓*†，原田 康生*，柴田 貴範*，伊神 翼**††
三瀬 律紀***，大川 真生***，永井 大樹**
*岩手大学理工学部，**東北大学流体科学研究所，***東北大学工学研究科
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

近年，ドローンが急速に普及し，新しい物流や移動手段として社会実装されることが期待されている．しかし，マルチコプター型ドローンの騒音は自動車騒音より大きく，航空機騒音と同レベルである．空力騒音の中でも特にトーンノイズはより人間にとって耳障りな音であり，広域帯騒音よりも減衰しにくいという特徴を持つ．ドローンの普及に伴い空力騒音が大きな環境問題となることが予想されるため，トーンノイズの低騒音化は喫緊の課題である．先行研究により，翼後縁形状がトーンノイズへ影響を与えることが示唆されている．しかし，翼後縁形状がトーンノイズに与える影響に関しては，高 Re 数領域（$Re>10^5$）での研究に限られている．そのため，ドローン飛行時の低 Re 数領域（$Re<10^5$）において，翼後縁形状がトーンノイズに与える影響を定量的に調べた研究や，その増減メカニズムを調べた研究はない．本研究では，まず二次元翼において，低 Re 数領域（$Re<10^5$）での翼後縁形状とトーンノイズの関係，その増減メカニズムの解明を目的とする．

2. 研究成果の内容

半円と切り落としの 2 種類の後縁形状，翼後縁厚みがコード長の 0%，1%，2%，3%，4%，5%の 11 種類の翼モデルを作成し，東北大学流体科学研究所の小型低乱風洞を用いて，PIV 試験と騒音計測を行った(図 1).

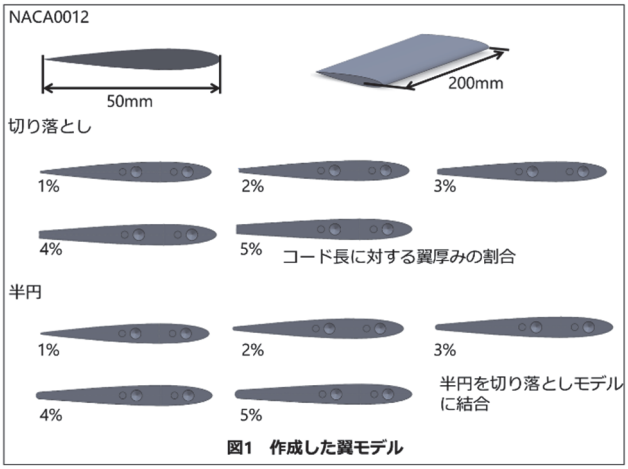


図1 作成した翼モデル

図 2 および図 3 に，各後縁形状において翼後縁厚みを変更した際の音圧の変化を示す．横軸は Re 数であり流速の変化を表し，縦軸は迎角を表す．なお，左上にはシャープモデルの結果を示している．半円形状および切り落とし形状のいずれにおいても，後縁厚みが 1%の場合には最大音圧は迎角 0° 付近で生じる．一方，後縁厚みの増加に伴い，音圧のピークは迎角±2° 付近へ移動する．また，最大音圧は翼後縁厚みが増加するにつれて低下することがわかった．

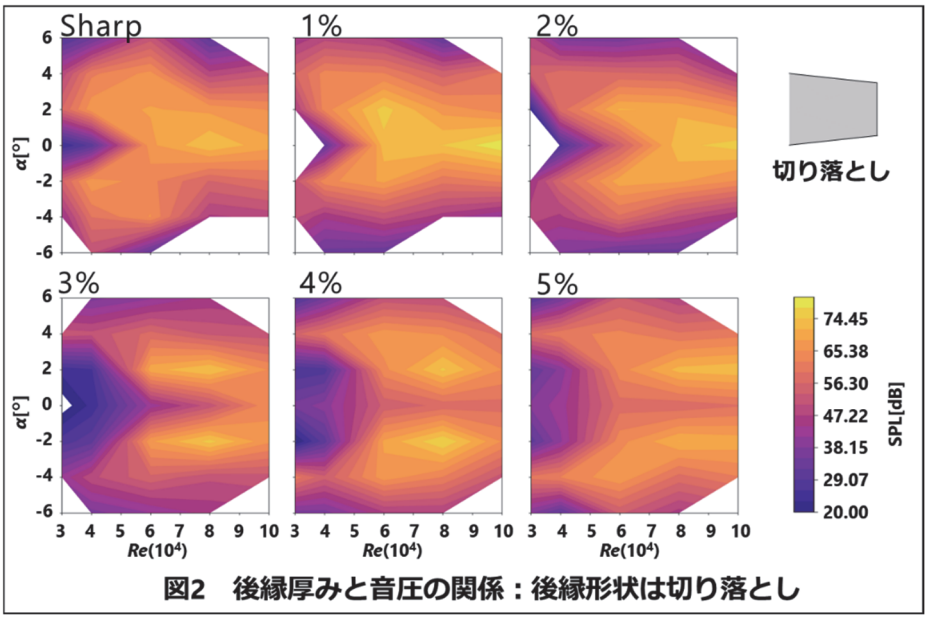


図2　後縁厚みと音圧の関係：後縁形状は切り落とし

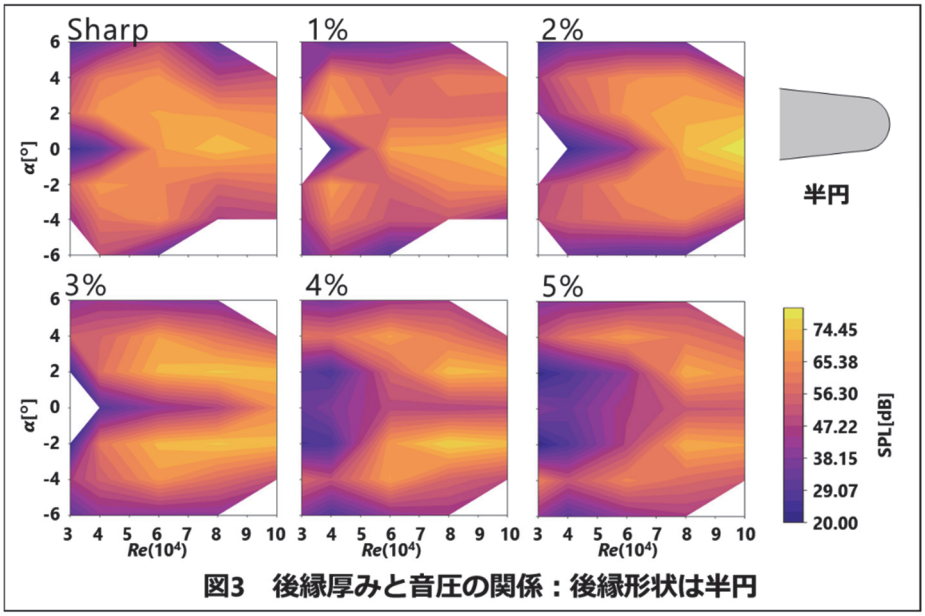


図3　後縁厚みと音圧の関係：後縁形状は半円

3.　研究目標の達成状況

本研究では低 Re 数領域において，①後縁形状とトーンノイズ発生の関係，②そのメカニズムの解明，③よりトーンノイズを抑えることのできる翼後縁形状の設計を予想される成果としてあげていた．結果として，①に関しては，図 2，3 に示すように，迎角と Re 数，後縁形状および厚みによってトーンノイズ発生の有無を調べることができた．②に関しては現在，PIV の後処理を進めている最中であるが，強い音圧が出るときは後流が乱れる傾向にあることがわか

ってきた．③に関しては，本研究では最大音圧が一番小さかったのはSharp形状であることから，トーンノイズを抑える一つの形として尖った後縁形状を提案できる．

また，予想される成果としてあげていた国際シンポジウムでの発表は，当初の予定である1件よりも多い3件行うことができた．査読付き投稿論文に関しては現在執筆中であり，2026年中の投稿を目指す．

4. まとめと今後の課題

本研究では翼後縁厚みおよび形状がトーンノイズの音圧や周波数へ及ぼす影響を調べた．今後は，騒音計測と境界層計測の同期計測や，遷移過程(自然遷移，剥離泡遷移，バイパス遷移など)の差がトーンノイズへ与える影響を調査することで，より詳細なトーンノイズ生成メカニズムの解明を行う．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Kousei Harada, Hiroaki Sumikawa, Takanori Shibata, Ritsuki Mise, Masaki Okawa, Tsubasa Ikami, Hiroki Nagai: Investigation of the effects of trailing edge shape and thickness on tonal noise and its mechanism, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-9, pp. 34-36.

[2] Hiroaki Sumikawa, Kosei Harada, Takanori Shibata, Kazutoyo Yamada, Ritsuki Mise, Masaki Okawa, Tsubasa Ikami, Hiroki Nagai: Investigation of the effect of wing trailing edge shape on tonal noise, *Interdisciplinary Exchange Workshop for Future of All Asian Countries*,Morioka, (2025).

[3] Hiroaki Sumikawa, Kosei Harada, Takanori Shibata, Kazutoyo Yamada, Ritsuki Mise, Masaki Okawa, Tsubasa Ikami, Hiroki Nagai: Experimental investigation of the effect of wing trailing edge geometry on tonal noise generation, *The 10th Japan-Korea Joint Workshop on Fans and Compressors*,Busan, (2025).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project Code	J25I060
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Fundamentals
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Study of the Liquid Film Thickness Near the Capillary Limit

Andrzej I. Nowak*†, Junnosuke Okajima**††
Tomasz Duraziński*, Daisuke Tsuneoka**
*Department of Thermodynamics and Renewable Energy Sources
Wrocław University of Science and Technology
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The aim of this project is to investigate the liquid film thickness in channels with internal diameters close to the capillary limit, defined in terms of the Bond number (Bo ≈ 4). Existing correlations for liquid film thickness were originally developed for fluids and capillary channels significantly smaller than this commonly accepted limit. The project focuses on channels with diameters slightly below and above this boundary, where the comparison between gravitational forces and surface tension forces becomes critical. When the capillary limit is exceeded, gravitational forces are expected to dominate, resulting in stratified flow, while below the limit capillarity is expected to be maintained, producing slug flow. The ultimate objective is to improve existing correlations and to modify Taylor's law to account for the dominant effects when surface tension forces exceed gravitational forces, thereby enabling more accurate modelling of two-phase flows under such conditions.

2. Details of program implement

In the first year of collaboration between the Institute of Fluid Science (IFS), Tohoku University, and Wrocław University of Science and Technology (WUST), joint numerical and experimental studies on the liquid film thickness near the capillary limit were carried out. The work took advantage of the complementary expertise and computational resources available at both institutions.

At WUST, a prototype experimental stand was designed and constructed to measure the asymmetry of the liquid film in near-capillary channels during two-phase flow. The stand was developed to enable observation of the liquid film under controlled flow conditions in tubes of different internal diameters. Experimental measurements were conducted in channels with internal diameters of 3 mm and 4 mm. These measurements successfully captured the asymmetry of the liquid film during two-phase flow and enabled collection of a preliminary experimental dataset.

At IFS, numerical simulations were performed using software developed specifically for the study of fluid films in capillary channels. These simulations were used to generate flow maps under different flow conditions. Joint analyses were carried out by the IFS and WUST teams, in which the numerical results were compared with experimental data. A comparison between 2D and 3D simulations, including detailed analyses of Taylor bubbles, was initiated in order to better understand the influence of buoyancy on the shape and motion of the bubble.

3. Achievements

The expected outcome stated in the original application was a deeper understanding of liquid film formation in channels near the capillary interface, and the identification of next steps towards a refinement of Taylor's law. With respect to this expectation, the first year of the project delivered the following results:

- A prototype experimental stand for the measurement of liquid film asymmetry in near-capillary channels was successfully designed and constructed at WUST.
- Asymmetry of the liquid film in two-phase flow was captured experimentally in channels of 3 mm and 4 mm internal diameter, yielding a preliminary dataset suitable for validation of numerical models.
- Numerical simulations performed at IFS were compared with the preliminary experimental data, providing initial insight into the interplay between surface tension and gravitational effects in this flow regime.
- The first joint result of the collaboration was presented at the 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2025) in Sendai, Japan.

These results confirm that the initial objectives of the first year have been met, and they establish a solid experimental and numerical basis for the next phase of the collaboration.

4. Summaries and future plans

During the first year of the project, the IFS and WUST teams successfully established a joint research workflow combining experimental measurements at WUST with numerical simulations at IFS. A prototype experimental stand was built, measurements in 3 mm and 4 mm channels captured the asymmetry of the liquid film in two-phase flow, and a preliminary dataset was collected for the validation of numerical models. Initial comparisons with Taylor's law were performed, and the results were presented at ICFD 2025.

The collaboration will be continued in the second year of the project (J26I041), in which the experimental stand will be redesigned to allow simultaneous observation of the liquid film from two directions (3D visualization). The new setup will enable a more precise characterisation of the liquid film profile. In parallel, advanced simulations at IFS will be extended and directly compared with the new 3D experimental data. The planned joint analyses are expected to inform the modification of Taylor's law for the near-capillary regime and to lead to a joint publication, high-impact scientific journal. Team intend to apply jointly to the National Science Centre (Poland) for a multi-year research grant to further support this cooperation. The results of the study are presented in Figure 2. The data obtained indicate the presence of asymmetry in channels with diameters close to the capillary diameter. It was found that, despite the lower asymmetry in the 3 mm diameter channel, there is a maximum on the curve, followed by a sharp increase in the asymmetry of the liquid film. The data suggest that further research is required.

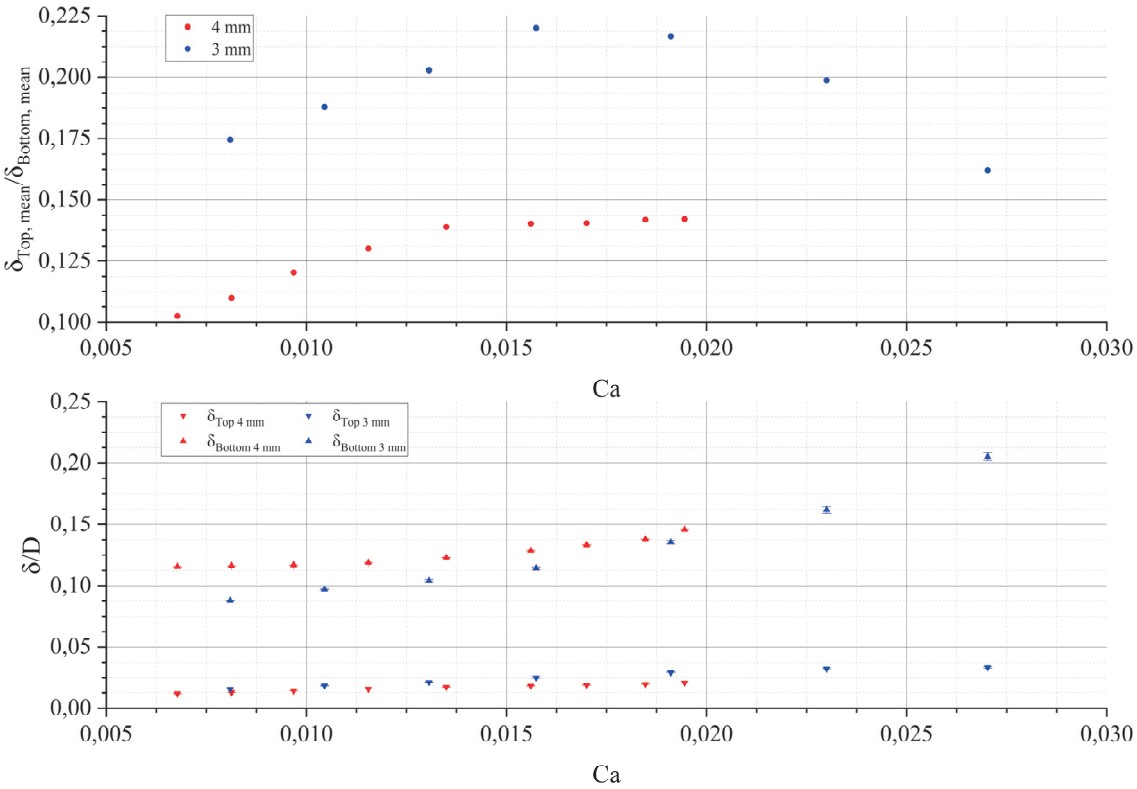


Figure 2: The results of experimental studies showing the liquid film asymmetry index and the ratio of liquid film thickness to channel diameter for various capillary numbers.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] A. I. Nowak, T. Duraziński, D. Tsuneoka, J. Okajima: Results of Experimental Studies and Modeling Concerning the Asymmetry of Liquid Film Thickness for Different Tube Diameters, *Proceedings 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2025)*, Sendai, (2025).

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project Code	J25I061
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Fundamentals
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Sonic-boom Surrogate Model Integration in a Chemistry-climate Model

Hiroshi Yamashita*†, Bastian Kern*
Shigeru Obayashi**, Aiko Yakeno**††, Takashi Misaka***, Takahiro Ukai****
*Institute of Atmospheric Physics, German Aerospace Center
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
***Industrial Cyber-Physical Systems Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
****Department of Mechanical Engineering, Osaka Institute of Technology
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Sonic boom variation due to atmospheric conditions has been investigated in the previous studies. These results showed that local atmospheric conditions, such as temperature, winds and relative humidity significantly affect sonic boom loudness. It is essential to understand the atmospheric effects on sonic boom propagation for supersonic aircraft operations. The SEIRA (Sonic-boom Evaluation In Realistic Atmospheres) project has been kicked-off in 2020. The aim of the project is twofold: to examine relationships between sonic boom impact and atmospheric conditions, and to develop a surrogate model for sonic boom evaluation under realistic atmospheric conditions.

2. Details of program implement

This study addressed surrogate modeling for sonic boom overpressures. The low sonic boom aircraft designed in the NASA's N+2 program was employed; the assumed supersonic flights were simulated by using the European Center Hamburg general circulation model (ECHAM) and the Modular Earth Submodel System (MESSy) Atmospheric Chemistry (EMAC) model (version 2.54) coupled with the air traffic simulation model AirTraf (version 2.0). The ECHAM5 resolution was set to T42L90MA, i.e., with a spherical truncation of T42 (corresponding to a quadratic Gaussian grid of approximately 2.8° by 2.8° in latitude and longitude) and 90 vertical hybrid pressure levels up to 0.01 hPa (middle of the uppermost layer; approximately 80 km). The supersonic aircraft flew from John F. Kennedy airport (JFK) to London Heathrow airport (LHR) along the great circle at $M = 1.8$ at 14.5 km altitude. Sonic boom under the flight track at sea level was calculated by using the sonic boom simulation tool based on the KZK equation; the tool has been developed based on Xnoise. A sonic boom reflection factor was set to 2.0. The simulation period was set for March 2009 – February 2019.

Figure 1 shows the maximum overpressure over the ten-year period, where the black solid line represents the moving average, and the gray hatching indicates the daily deviations from the average. The Kriging surrogate model is constructed using the data set from March 2009 to February 2018. Figure 2 shows the prediction of the maximum overpressure from the low-boom supersonic aircraft for the period from March 2018 to February 2019 (the red box in Fig. 1) using the Kriging model, in comparison with the simulated overpressure. The present Kriging model can

estimate yearly change of sonic boom overpressures, whereas a further model validation is necessary.

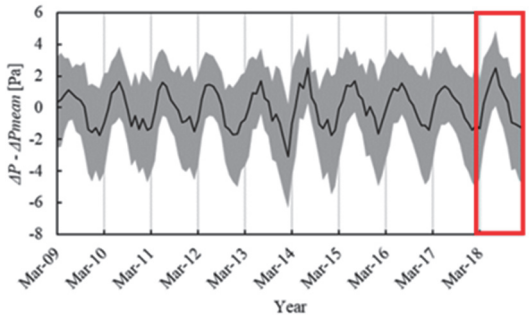


Figure 1 : The overpressure during ten years, where the black solid line indicates the moving average, while gray hatching is the daily deviations from the average.

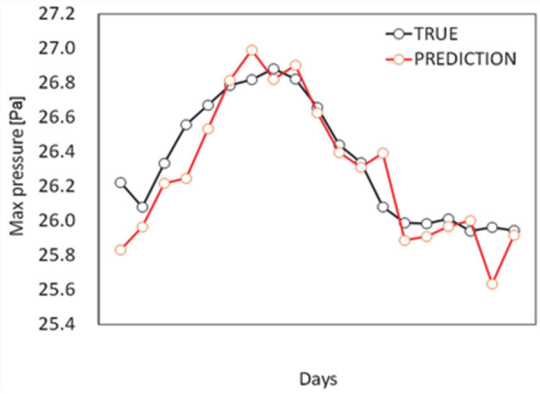


Figure 2 : The prediction for the period from March 2018 to February 2019 (the red box in Fig. 1) using the Kriging model, in comparison with the simulated overpressure.

3. Achievements

The atmospheric and sonic boom simulations have been completed by using the Integrated Supercomputation System of AFI Research Center, IFS, Tohoku University. Relationships between sonic boom impact and atmospheric conditions were analyzed; the findings have been published by Iura et al. 2024 in the SEIRA project. In the 3rd project year, predominant meteorological variables were examined for surrogate modeling and the kriging method has been developed. This model will be integrated into the EMAC model. Yamashita et al. (2025) contributed to AFI-2025 and the outcome will be submitted to a scientific journal in 2026.

4. Summaries and future plans

The Kriging-based surrogate model was constructed in terms of the sonic boom overpressure for the low-boom aircraft over the North Atlantic. The atmospheric conditions on the flight track were obtained from the EMAC model. Using meteorological and corresponding sonic boom data sets, a Kriging-based surrogate model was trained to predict the yearly change in the maximum overpressure. With some predominant atmospheric variables for sonic boom overpressures, a kriging model will be further evaluated and published.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
[1] H. Yamashita, B. Kern, T. Ukai, T. Misaka, A. Yakeno and S. Obayashi, "Surrogate Modeling of Sonic Boom Loudness Under Atmospheric Variability," *Proceedings of the 25th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-13, pp.45-46.

3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project Code	J25I062
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Molecular Dynamics Simulation for Determining Static and Kinetic Parameters of CO_2 Adsorption in Direct Air Capture (DAC) Applications

Erdiyanto Munandar*, Nasruddin*†, Takashi Tokumasu**††
*Departement of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Universitas Indonesia. Kampus Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat, Indonesia.
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
2-1-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, Japan.
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

This research investigates the competitive adsorption behavior and kinetic parameters of atmospheric gases (CO_2, H_2O, N_2, O_2, and Ar) on SIFSIX-3-Cu Metal-Organic Framework through a comprehensive multiscale computational framework integrating Density Functional Theory (DFT) calculations and Molecular Dynamics (MD) simulations. The primary objective is to determine equilibrium and kinetic parameters under realistic Direct Air Capture (DAC) conditions, including varying humidity levels (40-80% RH) and pressure conditions (20-100 kPa), which are essential for multiscale modeling and process-scale design of efficient DAC systems.

The specific objectives include generating multicomponent equilibrium adsorption data for realistic atmospheric mixtures under representative DAC conditions, determining diffusion coefficients and kinetic parameters currently unavailable in literature, establishing whether humid-condition performance is governed by thermodynamic or kinetic factors, and providing critical parameters for process-scale modeling of DAC systems utilizing ultramicroporous MOF adsorbents.

2. Details of program implement

The research program has been systematically initiated through comprehensive preparation and methodology development. A detailed research proposal has been jointly developed outlining computational methodologies combining Density Functional Theory calculations for atomic partial charge determination, Grand Canonical Monte Carlo simulations for equilibrium adsorption analysis, and Molecular Dynamics simulations for diffusion coefficient determination. The LAMMPS software has been identified as the primary simulation tool, with preliminary validation studies completed to ensure workflow accuracy.

Current work focuses on establishing the computational framework with several completed milestones including DFT calculations using CHELPG method to derive accurate atomic partial charges for SIFSIX-3-Cu framework, force field development and validation against experimental CO_2 adsorption isotherms, initial GCMC simulations examining humidity effects (40-80% RH) and pressure variations (20-100 kPa), and MD simulations for CO_2 diffusion analysis with Gaussian Mixture Model clustering for population classification. Graduate student Erdiyanto Munandar is actively engaged in simulation technique training, data analysis, and manuscript preparation. Key milestones include completing comprehensive

simulation campaigns by early 2025 and targeting publications in high-impact journals to advance phase change material and Direct Air Capture applications.

3. Achievements

The study has achieved significant research outcomes through the multiscale computational framework. In terms of quantum-scale electronic structure insights, the research successfully quantified electrostatic potential distribution with axial fluorine atoms exhibiting -0.572 e partial charges, revealed anisotropic charge distribution creating strong binding sites accessible to competing polar molecules, and validated force field against experimental data with excellent agreement across DAC-relevant pressure ranges.

Regarding multicomponent adsorption behavior, the study demonstrated profound hydrophilicity with water vapor uptake dominating across all humidity levels (2.5-6 mmol/g at 40-80% RH), identified negligible CO_2 adsorption capacity under realistic humid conditions despite exceptional dry performance, and revealed significant nitrogen uptake (0.6-1.2 mmol/g), challenging common inert gas assumptions in process modeling.

The kinetic analysis and transport limitations work identified that 70% of adsorbed CO_2 molecules are effectively trapped at strong binding sites, calculated an exceptionally low self-diffusion coefficient of 5.98×10^{-7} cm²/s for mobile CO_2 fraction, demonstrated confined diffusion behavior indicating severe mass transfer limitations, and refuted the hypothesis that rapid CO_2 kinetics could enable selective capture before water equilibration.

In terms of scientific contributions, the research provided comprehensive thermodynamic and kinetic parameters essential for process-scale DAC modeling, identified fundamental limitations in ultramicroporous MOF performance under realistic atmospheric conditions, demonstrated the critical importance of evaluating adsorbent materials under multicomponent conditions, and established a validated multiscale methodology bridging quantum calculations with molecular dynamics.

4. Summaries and future plans

This study successfully explores the thermophysical behavior of CO_2 and competitive atmospheric gases on SIFSIX-3-Cu MOF through a combined framework of Density Functional Theory calculations, Grand Canonical Monte Carlo simulations, and Molecular Dynamics analysis. The work addresses key challenges in Direct Air Capture technology development, particularly the material selectivity issues under realistic humid atmospheric conditions. The quantum-derived partial charges enabled accurate classical force field development, while GCMC simulations revealed profound hydrophilicity causing water vapor dominance and CO_2 exclusion. MD simulations quantified severe transport limitations with 70% molecule trapping and exceptionally low diffusion coefficients.

Key findings demonstrate that SIFSIX-3-Cu exhibits exceptional CO_2 affinity under dry conditions but loses selectivity completely under realistic humidity, with water vapor competitive adsorption dominating across all practical humidity ranges (40-80% RH). The kinetic selectivity mechanism is not viable due to severely constrained CO_2 diffusion, and the research generated a comprehensive parameter set for process-scale modeling including equilibrium isotherms and diffusion coefficients.

Several meaningful improvements and extensions are planned to strengthen and expand the research scope. Future work will investigate temperature-dependent competitive adsorption and diffusion kinetics for temperature-swing process optimization, evaluate regeneration energy requirements across different operational strategies, and analyze thermal cycling stability and long-term

performance degradation. The research will extend to include trace atmospheric pollutants (SO_2, NO_2, volatile organic compounds) to evaluate long-term stability, assess framework degradation mechanisms under realistic environmental exposure, and study competitive adsorption with varying pollutant concentrations.

Additional planned activities include calculating isosteric heat of adsorption for all atmospheric components, determining specific heat capacity and thermal conductivity of loaded framework to enable complete energy balance modeling for process design. The methodology will be extended to screen alternative MOF structures with modified pore architectures, identify hydrophobic MOF candidates maintaining CO_2 selectivity under humidity, and conduct comparative assessment of fluorinated versus non-fluorinated frameworks.

Multiscale integration efforts will link molecular dynamics with continuum-scale simulations for system-level performance prediction, develop breakthrough curve models incorporating heterogeneous diffusion populations, and optimize packed bed and structured contactor designs using generated parameters. Experimental validation partnerships will be established to collaborate with experimental groups for validation using differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), and breakthrough experiments, correlate simulated and experimental diffusion coefficients, and validate multicomponent competitive adsorption predictions. These enhancements will significantly improve both the predictive reliability and practical applicability of MOF-based systems in Direct Air Capture and thermal energy storage technologies.

5. Research results

This study presents a comprehensive multiscale computational investigation of CO_2 and atmospheric gas competitive adsorption on SIFSIX-3-Cu Metal-Organic Framework, addressing critical knowledge gaps in Direct Air Capture material characterization. The research successfully integrates quantum-scale electronic structure calculations with molecular-scale thermodynamic and kinetic simulations to provide fundamental insights and quantitative parameters essential for process-scale DAC system design.

In Phase I focusing on quantum-scale electronic structure analysis, DFT calculations using the CHELPG method successfully quantified the electrostatic potential distribution of SIFSIX-3-Cu framework. The hexafluorosilicate anion exhibits total charge of -1.416 e with pronounced anisotropy where axial fluorine atoms (-0.572 e) and equatorial fluorine atoms (-0.472 e) create strong directional electrostatic fields. The silicon center (+1.614 e) generates complex multipolar potential distributions within pore channels. Copper metal centers exhibit negative charges (-0.655 e), confirming that hexafluorosilicate pillars constitute the dominant adsorption sites. These quantum-derived charges enabled development of accurate classical force fields validated against experimental CO_2 adsorption isotherms.

Phase II examined multicomponent equilibrium adsorption through Grand Canonical Monte Carlo simulations of realistic atmospheric mixtures (400 ppm CO_2, 78% N_2, 21% O_2, 1% Ar, 40-80% RH) revealing fundamental selectivity challenges. Water vapor uptake dominates across all humidity levels, increasing linearly from 2.5 mmol/g at 40% RH to 6.3 mmol/g at 80% RH under 100 kPa total pressure. This profound hydrophilicity results in negligible CO_2 adsorption capacity, effectively indistinguishable from zero, across all realistic atmospheric moisture contents. Nitrogen exhibits significant uptake (1.2 mmol/g at 40% RH, decreasing to 0.6 mmol/g at 80% RH), challenging common assumptions of inert behavior. Pressure variation studies conducted from 20 kPa to 100 kPa at 60% relative humidity confirm these trends are fundamental thermodynamic phenomena rather than pressure-

dependent artifacts.

Phase III focused on kinetic analysis and transport limitations, where Molecular Dynamics simulations reveal severely constrained CO_2 diffusion kinetics that compound thermodynamic selectivity challenges. Gaussian Mixture Model clustering of per-molecule Mean Squared Displacement trajectories objectively identifies two distinct dynamical populations: trapped molecules comprising 70% of the total (49 out of 70 molecules) exhibiting near-zero long-range displacement, and mobile molecules representing 30% (21 out of 70 molecules) exhibiting confined diffusion. The mobile fraction's self-diffusion coefficient calculated at 5.98×10^{-7} cm^2/s is five orders of magnitude below free gas-phase values, indicating extreme mass transfer limitations. Mean Squared Displacement curves plateau rather than increasing linearly, confirming non-Fickian transport governed by activated hopping between metastable sites. The poor Einstein relation fit with R^2 value of 0.000 validates absence of classical diffusion behavior.

Phase IV provides mechanistic interpretation where the integrated multiscale analysis reveals that SIFSIX-3-Cu's precisely engineered 3.5 Å pore aperture creates a double-edged effect: exceptional CO_2 affinity under dry conditions through maximized electrostatic potential overlap, but severe vulnerability to competitive water adsorption and diffusion barriers under realistic conditions. Strong, anisotropic electrostatic fields from axial fluorine atoms create deep potential energy wells trapping both CO_2 and H_2O molecules. Water's higher polarity and hydrogen bonding capacity with fluorine sites generates substantially stronger interaction energies than CO_2's quadrupolar interactions. Combined with water vapor's 25 to 50 times higher atmospheric concentration (10,000-20,000 ppm versus 400 ppm CO_2), equilibrium thermodynamics overwhelmingly favor water uptake.

The critical process engineering implications demonstrate that conventional equilibrium-based temperature-swing or pressure-swing adsorption would achieve negligible CO_2 productivity under humid conditions. Kinetic selectivity mechanisms are not viable due to severely slow CO_2 transport with diffusion timescales orders of magnitude longer than required cycle times. The high trapped molecule fraction of 70% reduces effective working capacity even if partial regeneration is achieved. Pre-dehumidification or extremely short contact times might partially mitigate challenges but introduce additional complexity and energy requirements.

This investigation provides the first comprehensive characterization of SIFSIX-3-Cu behavior under multicomponent atmospheric conditions, generating critical parameters unavailable in existing literature including competitive adsorption isotherms for five-component mixtures, heterogeneous diffusion coefficients for trapped and mobile populations, and quantitative electrostatic potential distributions from first principles. The findings demonstrate that materials exhibiting exceptional single-component performance may fail under realistic feed complexity, emphasizing the necessity of multicomponent evaluation for process engineering applications. The validated multiscale methodology linking quantum calculations through molecular simulations to process-relevant parameters establishes a framework for accelerated computational screening of next-generation Direct Air Capture adsorbents.

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] E. Munandar, Nasruddin, T. Tokumasu: Molecular Dynamics Simulation for Determining Static and Kinetic Parameters of CO_2 Adsorption in Direct Air Capture (DAC) Applications, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, November 10-13, 2025, oral presentation, CRF-34, pp. 95-97.

3) Patent, award, press release etc.
Not applicable

Project Code	J25I063
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Health, Welfare and Medical Care
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	2nd year

Exploring the Effects of Shear Stress Magnitude and Variation on Endothelial Injury: From Current Evidence to In Vitro Experiment of Cellular Responses

Mingzi Zhang*†, Hanif Saifurrahman**
Zi Wang**, Hitomi Anzai**, Makoto Ohta**††
*Macquarie Medical School, Macquarie University, Australia
**Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The dysfunction of endothelial cells has long been associated with haemodynamic forces generated by blood flow, particularly parameters such as wall shear stress (WSS), oscillatory shear index (OSI), and related descriptors of flow behaviour. These factors are widely recognised as important indicators in predicting vascular pathologies, including the initiation and progression of atherosclerotic plaques.

Despite extensive investigation, there remains no consensus on the threshold values of these parameters that define pathological conditions. Moreover, the combined influence of shear magnitude and oscillatory behaviour has not been fully clarified.
Building upon the first-year work, this project aims to further examine how variations in shear stress characteristics affect endothelial responses. In particular, the current stage focuses on synthesising experimental evidence and identifying the underlying factors that contribute to inconsistencies in reported cellular outcomes.

2. Details of program implement

During this period, the research has primarily focused on an expanded and refined systematic review of in vitro studies investigating endothelial responses under controlled flow conditions. Compared with the previous stage, greater emphasis has been placed on methodological consistency and data interpretation.

A structured literature search was conducted using major scientific databases with combinations of keywords related to oscillatory flow, endothelial biology, and atherosclerosis. Studies were screened based on predefined criteria, including the use of flow-based experiments and quantitative reporting of gene or protein expression.
Data extracted from the selected studies included experimental configuration (e.g., flow chamber type), shear stress parameters (TAWSS and OSI), exposure duration, and biological outputs such as VCAM-1, ICAM-1, and eNOS expression levels. Additional attention was given to differences between mRNA- and protein-based measurements due to their impact on result interpretation.

In parallel, experimental infrastructure developed in the first year has been maintained and refined. This includes a controlled flow circulation system capable of reproducing physiologically relevant shear conditions, as well as image-based analysis protocols to quantify endothelial cell distribution and density after exposure.

3. Achievements

During the second year of the project, efforts have progressed from individual data collection towards integrative analysis of endothelial responses under varying haemodynamic conditions.

(1) Data synthesis and literature consolidation

Building upon the first-year systematic review, additional studies were screened and categorised based on experimental conditions and reported biological outcomes. The compiled dataset includes various endothelial cell types, flow chamber configurations, and both gene- and protein-level measurements. This step ensured a more comprehensive and structured dataset for further interpretation.

(2) Identification of haemodynamic response patterns

To better interpret cross-study variability, the collected data were mapped onto a two-dimensional framework defined by OSI and TAWSS. This allowed classification of results into distinct flow regimes and facilitated pattern recognition.

A consistent trend was observed across the dataset. Inflammatory markers such as VCAM-1, ICAM-1, MCP-1, and E-selectin were predominantly upregulated in regions characterised by elevated OSI. Importantly, this upregulation persisted even under relatively high TAWSS conditions, suggesting that oscillatory behaviour plays a dominant role in modulating endothelial activation. In contrast, regions with low OSI showed more heterogeneous responses, including instances of downregulation or minimal change, indicating a potentially protective effect of stable, unidirectional flow. Overall, these findings highlight the stronger influence of flow oscillation compared to shear magnitude in driving endothelial inflammatory responses, providing a more unified interpretation of previously inconsistent experimental results.

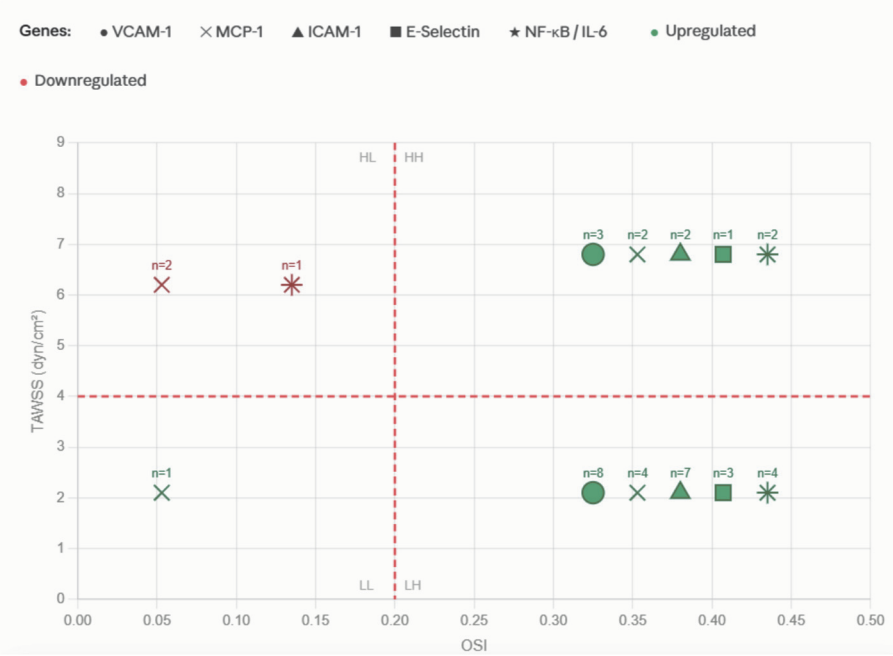


Figure 1: Summary of endothelial inflammatory marker responses mapped against oscillatory shear index (OSI) and time-averaged wall shear stress (TAWSS). Data points represent findings extracted from multiple in vitro studies, with different

symbols indicating specific biomarkers (VCAM-1, ICAM-1, MCP-1, E-selectin, and NF-κB/IL-6). Green markers denote upregulation, while red markers indicate downregulation. The dashed lines divide the plot into four flow regimes (low/low, low/high, high/low, high/high). A consistent clustering of upregulated responses is observed in high-OSI regions, suggesting that oscillatory shear plays a dominant role in driving endothelial inflammation, regardless of shear magnitude.

4. Summaries and future plans

In the second year of this project, efforts have been directed toward clarifying inconsistencies in existing literature and identifying methodological limitations in current experimental approaches. The findings reinforce the importance of considering both shear magnitude and oscillatory characteristics in a unified framework.

Moving forward, the project will aim to: Complete a comprehensive meta-analysis of key biomarkers associated with atherosclerosis; Consolidate findings into a full manuscript for publication; Conduct controlled in vitro experiments to validate hypotheses generated from the review; Develop more standardised experimental protocols to improve reproducibility; Establish computational models capable of predicting endothelial responses under complex flow conditions. Through these efforts, the project seeks to bridge the gap between experimental observations and theoretical haemodynamic analysis.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Zhang M., Saifurrahman H., Wang Z., Anzai H., and Ohta M. “Exploring the Effects of Shear Stress Magnitude and Variation on Endothelial Injury: From Current Evidence to In Vitro Experiment of Cellular Responses”, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-68, pp. 188-189.

3) Patent, award, press release etc.
Not applicable

Project Code	J25I064
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Study on Conceptual Design of an Aircraft Fueled with Ammonia

Hisashi Nakamura*†, Daisuke Shimokuri**††
Apurba Sharma**, Yuki Morimoto**, Yuji Wakata**
Akihiro Hayakawa*, Yohei Fujimoto*, Shigeru Obayashi*
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Hiroshima University
***Mitsubishi Heavy Industries Aero Engines
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

In this study, we are advancing the conceptual design of an ammonia-fueled hybrid aircraft through a collaborative framework. This partnership leverages the expertise of the Institute of Fluid Science at Tohoku University, which specializes in ammonia combustion and aircraft conceptual design; Hiroshima University, which possesses auto-ignition testing facilities capable of replicating high-temperature and high-pressure conditions equivalent to high-load engine environments; and Mitsubishi Heavy Industries Aero Engines, Ltd., a private aero-engine manufacturer. For the current fiscal year, we conducted measurements of ammonia auto-ignition delay times at high pressures to validate the combustion reaction models used in the conceptual design.

2. Experimental method

This study investigated the autoignition characteristics of ammonia using a three-section shock tube equipped with a Constraint Reaction Volume (CRV) approach to simulate the high-pressure and high-temperature conditions of aviation gas turbine combustors. The experimental apparatus consists of an 8-m driver section and a 7.5-m driven section, which are separated by a piston to initiate incident shock waves. To ensure uniform heating and prevent remote ignition, the driven section is further divided into a 6.9-m buffer section containing inert gas and a 0.6-m test section where the NH3/O2/Ar mixture is kept. A heat-resistant ball valve is installed at the interface of these sections to maintain gas separation until shock propagation. Furthermore, the inner walls of the test section and mixing tank are coated with PTFE to prevent ammonia adsorption.

The experiments were conducted at a constant high pressure of 3.0 MPa with temperatures ranging from 1000 to 1300 K, covering equivalence ratios of 1.0 and 1.5. The oxidizer composition was fixed at 21% O2 and 79% Ar to match the oxygen concentration of air. Pressure history was monitored via sensors located at specific distances from the end of the test section, and the ignition delay time (IDT) was determined as the interval between the reflected shock wave generation and the point of maximum pressure. In parallel with the experiments, numerical simulations were performed using a Chemkin 0-D closed homogeneous reactor model. These calculations utilized the reaction mechanism proposed by Nakamura et al. to validate and complement the experimental results.

3. Results

For the stoichiometric condition (ϕ = 1.0) shown in Figure 1a, measurements were conducted across a temperature range of 1000 K to 1300 K at a constant pressure of 3.0 MPa. The results indicate that the experimental data at intermediate temperatures (1100 K and 1190 K) show strong agreement with the numerical simulations. However, notable discrepancies between the experimental and numerical values were observed at the lower (1000 K) and higher (1300 K) temperature limits. A similar trend was observed for the fuel-rich condition (ϕ = 1.5) presented in Figure 1b. While the experimental results matched the numerical predictions well at 1100 K and 1190 K, significant differences appeared at 1000 K and 1290 K. The largest deviation for both equivalence ratios occurred at the highest temperature point of approximately 1290 K. The authors suggest that future studies utilizing the luminescence of excited radicals may provide more precise IDT measurements to further refine these combustion models.

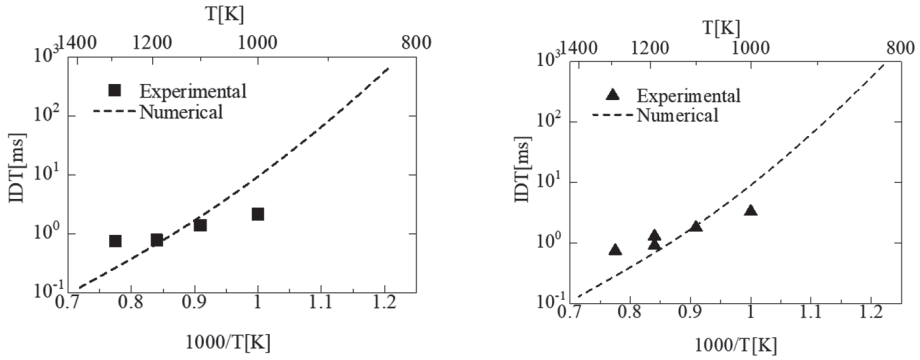


Figure 1 Ignition delay time of ammonia at 3.0 MPa for (a) ϕ = 1.0 and (b) ϕ = 1.5.

4. Summaries and future plans

In this study, we successfully measured the auto-ignition delay times of ammonia under high-pressure conditions. Moving forward, we will focus on refining the combustion reaction models and applying them to engine simulations for conceptual design.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] A. Sharma, Y. Morimoto, Y. Wakata, A. Hayakawa, H. Nakamura, Y. Fujimoto, S. Obayashi, D. Shimokuri: Shock Tube Measurement of Ignition Delay Times for NH3/O2/Ar under High-Temperature and High-Pressure Conditions with a Constraint Reaction Volume Approach, *The Proceedings of the 22nd International Conference on Flow Dynamics*, 2025, OS2-41.

[2] A. Sharma, Y. Morimoto, Y. Wakata, A. Hayakawa, H. Nakamura, Y. Fujimoto, S. Obayashi, D. Shimokuri: Ignition delay measurement of NH3/O2/Ar in a three-sectional shock tube adopting constraint reaction volume strategy, *The Proceeding of the 63rd Symposium (Japanese) on Combustion*, 2025, P125.

3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J25I065
区分	一般公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	2 年目

マイクロ流路チップ上のプラズマ気液界面反応装置の開発
Development of a Plasma-Liquid Interfacial Reactor on a Microfluidic Chip

吉木 宏之*†, 佐藤 岳彦**††
遠田 明広***, 中嶋 智樹**
*仙台高等専門学校, **東北大学流体科学研究所
***鶴岡工業高等専門学校
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

金ナノ粒子（AuNPs）は光電変換材料，触媒，バイオセンサー，医療診断（イムノクロマト診断薬）等に応用されている．なかでもエタノール酸化や，バイオセンサーへの応用が期待されるグルコース酸化等の触媒活性は粒径がφ2-5 nm で発現することが知られており**形状とサイズを均一に揃える単分散合成**が重要である．

AuNPs の合成では，塩化金酸（$HAuCl_4$）水溶液等の原料に$NaBH_4$やクエン酸等の還元剤を添加する化学的還元法や，化学気相成長法，物理的スパッタ法等が知られている．他方，大気圧プラズマを $HAuCl_4$ 水溶液に照射してプラズマ気液界面で生成する水和電子や水素原子による還元を利用するプラズマ還元法が提案されている．また，この方法は還元反応(核生成)をプラズマのON/OFFでデジタル的に制御できる利点がある．しかし，プラズマ還元反応ではプラズマ気液界面でのナノ粒子の核生成と溶液の対流に沿った核成長が同時に進行するため粒径分布は広がり単分散化は容易ではない．さらに，プラズマ照射 OFF 状態でも溶液中に金属イオンが豊富に存在するとナノ粒子を核として粒子成長が進行するため得られる粒径分布は広がりをもつことが分かった．

そこで，内径 1 mm 以下のマイクロ流路内でプラズマ気液二相流を生成することで気液界面容積比（S/V）が増加してプラズマ還元効率を高めることができる．さらにマイクロ流路内の物質移動は拡散が支配的であることが知られており対流による核成長が抑えられる．したがって“**マイクロ流路内プラズマ気液二相流**”を反応場とすることで AuNPs の単分散合成が可能になると期待される．

本研究では，アクリル製マイクロ流路プレート上で大気圧 He プラズマと水溶液の**気液層状流**を実現する流路構造および気液流体条件を探索して**プラズマ気液界面反応装置（プラズママイクロリアクター）**の試作を行なう．さらに**プラズママイクロリアクター**を用いて$HAuCl_4$水溶液のプラズマ還元による単分散 AuNPs の合成条件を明らかにすることを目的とする．

2. 研究成果の内容

本研究で用いた実験装置の概略を**図 1** に示す．アクリル板（70 mm×50 mm×5 mm）表面にマシニングセンター（DMG MORI，DuraVertical 5060）で幅 1 mm，深さ 1 mm の流路を加工した後，同じサイズのアクリル板を張り合わせてマイクロ流路プレートを形成する．流路形状および寸法を図 1 に示す．マイクロ流路の水平方向からシリンジポンプ（アズワン, SPS-1）で処理溶液を導入して T 型ジャンクション部で鉛直上方向からヘリウムガスを流量制御して導入する．気液の流量を調整することで長さ 20 mm のマイクロ流路内に気液二相流を形成する．この時，重力の影響で気相・液相に分離した層状流が形成される．その後，気液合流部の終端にリザーバーを設けることで液体と気体を分離する．ヘリウムガス導入部とリザーバー側にそれぞれφ0.25 mm の Pt 線を挿入して正・負電極（間隔 20mm）を形成する．Pt 線電極に誘導コイル（ナリカ，B10-4454）でパルス高電圧を印加する．本研究ではヘリウムガス流量を 50～600 mL/min，溶液流量を 28.5～143 mL/h と設定した．マイクロ流路内の気液二相流の時間変化および放電プラズマ生成時の気液二相流の様子をシュリーレン用レンズ（シグマ光機，凸レンズφ50，f500）およびハロゲン光源（プラズマ点灯時は自発光にて），カメラ（ニコン D4，AI AF Micro-Nikkon 200mm f/4D IF-ED）を用いて撮影した．

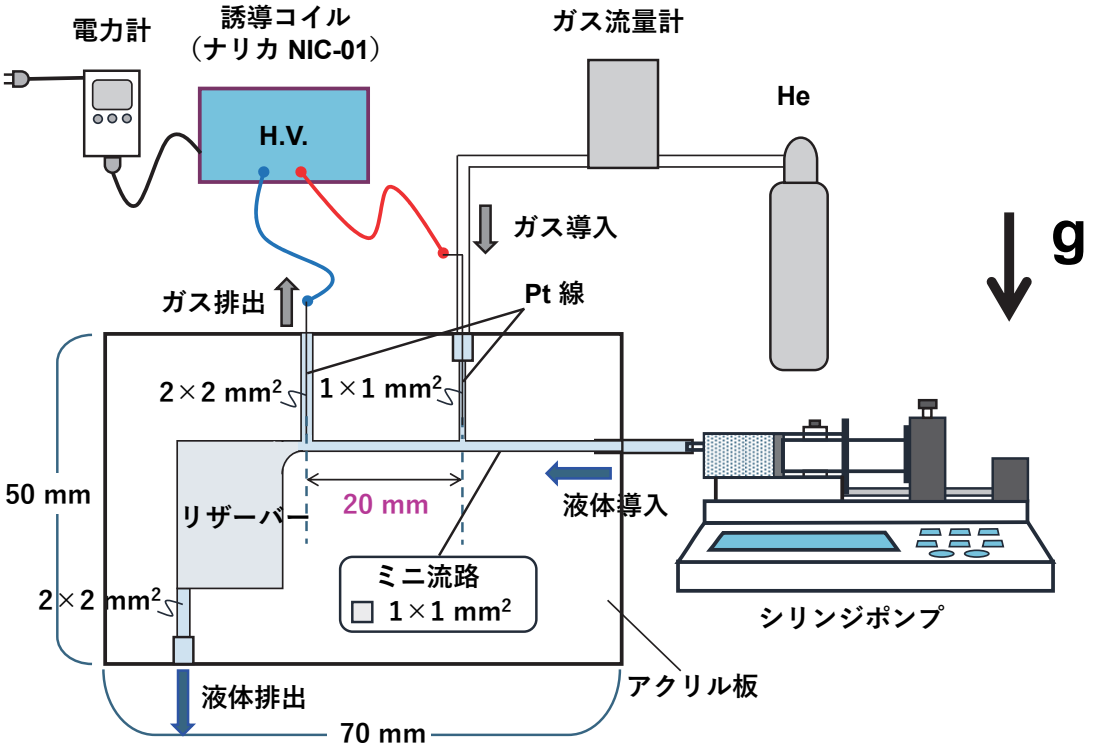


図 1：マイクロ流路内のプラズマ気液界面反応装置の概略図

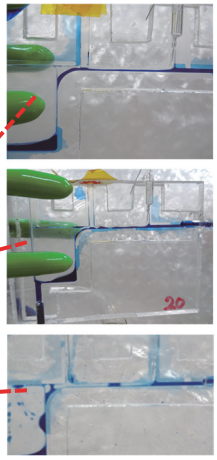
以下にマイクロ流路内の (1) 気液二相流の流れパターン分類，(2) プラズマ気液層状流の動画撮影，(3) インジゴカルミン水溶液の分解処理，(4) AuNPs 合成結果をそれぞれ示す．

(1) 気液二相流の流れパターン分類：

はじめに，水力直径 1 mm でのヘリウムガス流量：50～600 mL/min でのウエーバー数 We_G は 1.7×10^{-3} ～2.5×10^{-1} であり，水流量：28.5～143 mL/h でのキャピラリー数 Ca_L は 1.1×10^{-4} ～5.5×10^{-4} である．流れパターン観測の結果を**表 1** に示す．We_G が 1.7×10^{-3} ではスラグ流となり We_G の増加で環状流を経て層状流（気液平行流）への遷移が見られた．ここで Ca_L の 5 倍程度の変化では流れパターンに大きな変化は見られなかった．

表 1：マイクロ流路内の気液二相流の流れパターン

		We_G	0.001703	0.006811	0.015325	0.027245	0.061301	0.10898	0.170282	0.245205
					ヘリウム流量（mL/min）					
					流速：J_G （m/s）					
Ca_L			50	100	150	200	300	400	500	600
			0.83	1.7	2.5	3.3	5	6.7	8.3	10
0.000553		143	スラグ流	環状流	環状流	環状流	層状流	層状流	層状流	層状流
		0.04								
0.000442		114	スラグ流	環状流	脈動流	層状流	層状流	層状流	層状流	層状流
	水流量	0.032								
0.000332	（mL/h）	85.5	スラグ流	環状流	脈動流	層状流	層状流	層状流	層状流	層状流
	流速：J_L	0.024								
0.000221	（m/s）	57	スラグ流	環状流	脈動流	層状流	層状流	層状流	層状流	層状流
		0.016								
0.000166		42.8	スラグ流	環状流	脈動流	層状流	層状流	層状流	層状流	層状流
		0.012								
0.000111		28.5	スラグ流	脈動流	脈動流	層状流	層状流	層状流	層状流	層状流
		0.0079								



以下では，ヘリウムガス流量：200～600 mL/min，溶液流量：57 mL/h の層状流（気液平行流）領域で実験を行なった．

(2) プラズマ気液層状流の動画撮影：

ヘリウムガス流量：500 mL/min，水流量:57 mL/h での気液層状流と，プラズマ生成時の放電電力 3.5 W および 4.0W 時の様子を**図 2 (a)**に示す．気液層状流の上部気相部での放電プラズマ生成が確認できと共に，電力の増加で発光が強くなるのが分かる．また，ヘリウムガス流量：200 mL/min とした場合のシュリーレン光学系を用いた撮影結果を**図 2 (b)** に示す．

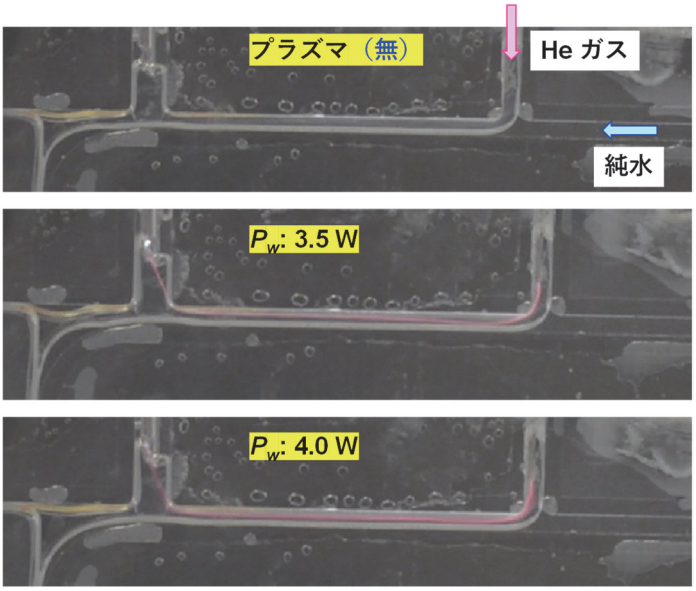


図 2(a)：マイクロ流路内プラズマ気液層状流生成と放電電力依存性

ガス流量の減少により気液層状流の形成が明らかに確認できる．また，放電プラズマ生成による気相の膨張も確認できる．

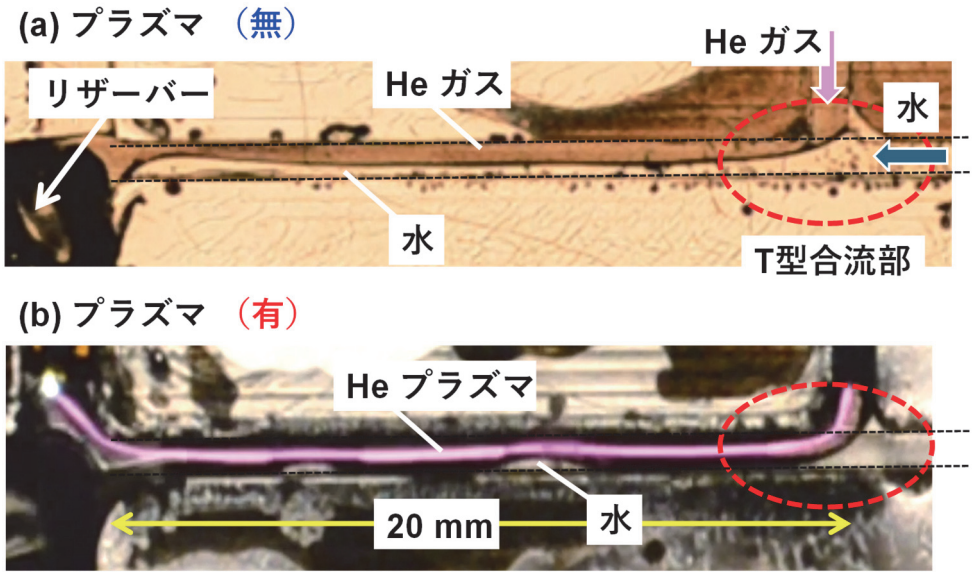


図 2(b)：シュリーレン光学系による気液層状流形成と放電プラズマ生成の様子

(3) インジゴカルミン水溶液の分解処理：

試作したプラズママイクロリアクター（図 1）を用いて濃度 10 mg/L，容積 20 mL のインジゴカルミン水溶液の分解処理を行なった．ヘリウムガス流量：200 mL/min，インジゴカルミン水溶液の流量：57 mL/h，放電プラズマ生成のピーク電圧：15 kV，パルス繰り返し周波数：50 Hz，パルス半値幅：40 μ s，投入電力：2 W で処理を行なった．処理後の溶液を回収して繰り返し 5 回処理を行なう．**図 3** にインジゴカルミン水溶液の紫外可視吸光度スペクトルの処理回数依存性を示す．プラズマ処理による溶液減少量は 2.3%/回であった．また，処理後の溶存物質濃度をデジタルパックテスト（共立理化学 DPM-MT）で測定した結果，H_2O_2：43 ppm，NO_2：0.56 ppm，NO_3：3.3 ppm であった．H_2O_2 は下記の反応で生成されると考えられる．

$$H_2O + O^* \rightarrow 2\,OH \qquad (1)$$

$$2OH \rightarrow H_2O_2 \qquad (2)$$

したがってインジゴカルミンの分解はプラズマで生成したヒドロキシルラジカル OH による酸化分解と考えられる．

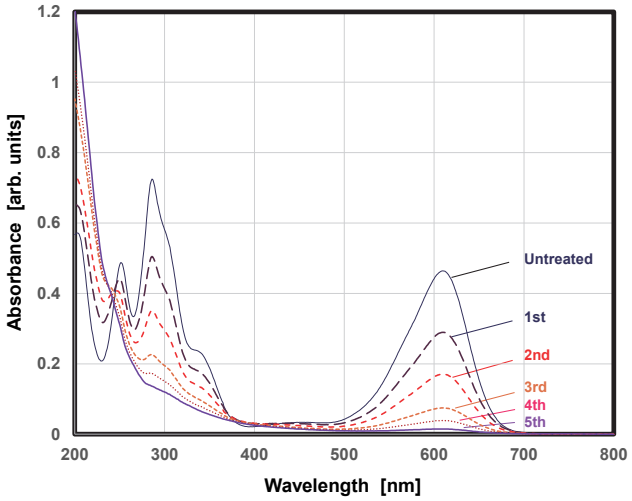


図 3：インジゴカルミン水溶液の吸光度スペクトルのプラズマ処理回数依存性

(4) AuNPs 合成結果：

塩化金酸（$HAuCl_4$）水溶液は導電性を有する為，濃度が高い場合は溶液中を電流が流れることで気相部での放電プラズマは生成しないか，もしくは不安定となる．**表 2** に $HAuCl_4$ 水溶液の濃度，導電率と放電プラズマ発生状況を，また**図 4** に放電プラズマ発生状況の様子を示す．図から明らかな様に濃度が 0.165 mM 以上では気液層状流間（長さ 20 mm）での放電は確認できなかった．

表 2： $HAuCl_4$ 水溶液の濃度，導電率および放電プラズマ発生状況

導電率　mS/cm	3.5	7.0	10.5	14	17.5
$HAuCl_4$濃度　mM	0.055	0.11	0.165	0.22	0.275
発生状況	安定	安定	不安定	不安定	不安定

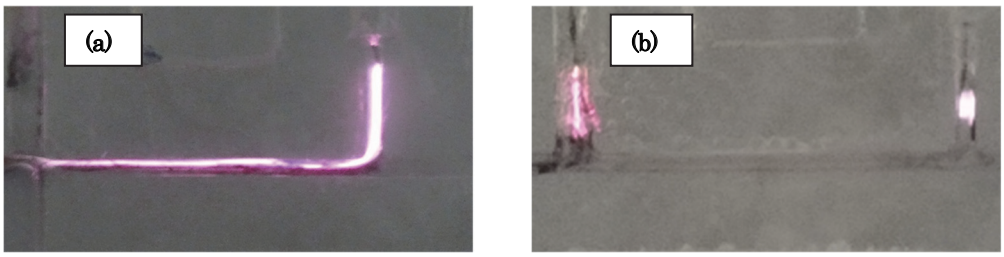
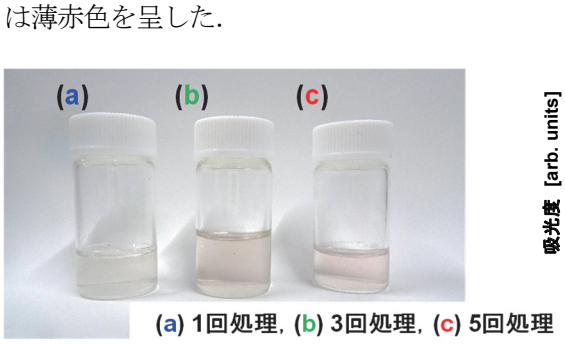


図 4：(a) 0.11 mM および (b) 0.22 mM での放電の様子

$HAuCl_4$ 水溶液濃度 0.11 mM での処理後の溶液色と紫外可視吸光度スペクトルの処理回数依存性を**図 5** に示す．540 nm 付近に AuNPs の表面プラズモン共鳴による吸収ピークが確認され，溶液は薄赤色を呈した．



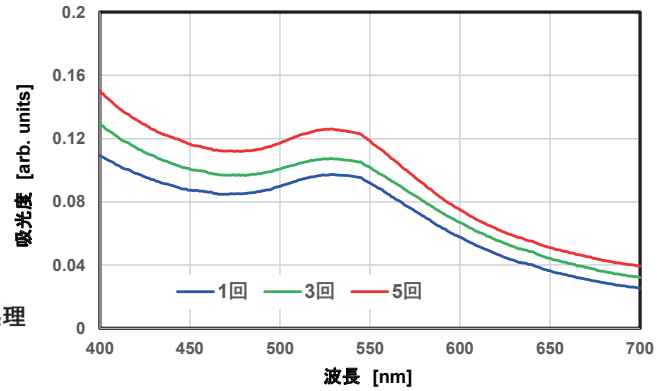


図 5： プラズマ処理後の溶液色と紫外可視吸光度スペクトルの処理回数依存性

図 5 に示した各処理溶液を数回遠心分離して上澄み液をコロジオン支持膜に滴下し乾燥させた試料を透過電子顕微鏡（TEM）観察した．各処理液で確認された代表的な合成物質を**図 6** に示す．処理回数 1～5 回のいずれの試料においても粒径が 5～6 nm の球状ナノ粒子が観察された．

また，これら球状ナノ粒子の原子面間隔は 2.3 Å で金の[111]面間隔と一致することから AuNPs の合成を確認した．

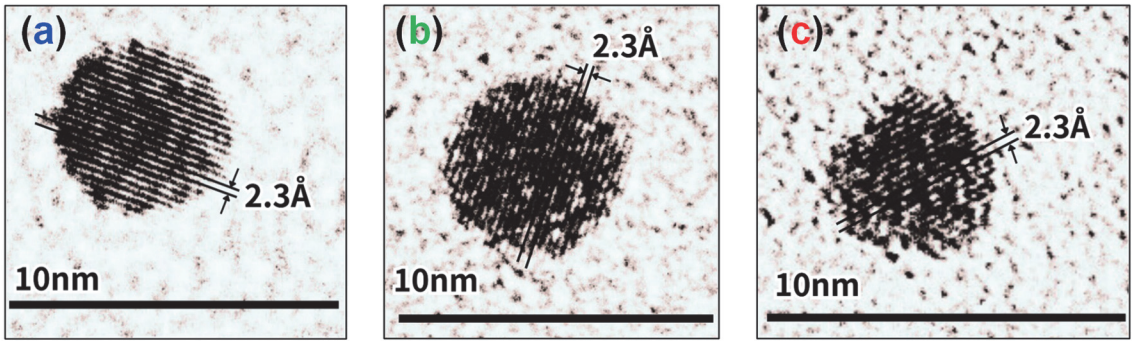


図 6：合成した金ナノ粒子の TEM 画像

(a) 1 回処理，(b) 3 回処理，(c) 5 回処理　　($HAuCl_4$濃度： 0.11 mM)

3. 研究目標の達成状況

アクリル製マイクロ流路プレート（水力直径 1 mm の矩形断面，長さ 20 mm）を用いた**プラズマ気液界面反応装置（プラズママイクロリアクター）**を試作した．気液二相マイクロ流の流れパターンをウエーバー数，キャピラリー数で分類することで気液層状流（気液平行流）形成条件を明らかにした．試作したプラズママイクロリアクターをインジゴカルミン水溶液の分解処理，$HAuCl_4$ 水溶液の還元による AuNPs 合成に応用した．予定した到達目標をほぼ達成したが合成される AuNPs の粒径分布制御には着手できていないため**達成度は 90%**と評価される．

4. まとめと今後の課題

本研究で以下の内容が明らかとなった．

1）ヘリウムガス流量：200～600 mL/min，水溶液流量：30～100 mL/h でマイクロ流路内に気液層状流が形成された．気相部に Pt 電極を挿入してパルス高電圧（ピーク電圧：15 kV，パルス繰り返し周波数：50 Hz，パルス半値幅：40 μs，投入電力：2 W ピーク電圧：15 kV，パルス繰り返し周波数：50 Hz，パルス半値幅：40 μs，投入電力：2-4 W）を印加することでプラズマ気液層状流を実現した．

2）インジゴカルミン水溶液の処理ではプラズマで生成された OH ラジカルによる分解が示唆された．

3）$HAuCl_4$ 水溶液の還元反応でφ5～6 nm の AuNPs 合成を実現した．粒径の大きなばらつきは確認されなかった．また，プラズマ処理回数を増やす事で AuNPs 生成量の増加が示唆された．しかし，合成された AuNPs の粒径分布制御は今後の課題となった．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] 吉木宏之，遠田明広，中嶋智樹，佐藤岳彦：ミニ流路プレートを用いた気液界面プラズマ反応装置，静電気学会誌，第 49 巻，第 5 号（2025），pp. 186-187.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 吉木宏之，伊藤由弥，遠田明広，佐藤岳彦：ミニ流路プレート上のプラズマ還元による金ナノ粒子合成，第 73 回応用物理学会春季学術講演会（東京科学大学 大岡山キャンパス），（2026），17p-PB4-2.

[3] H. Yoshiki, A. Enta, T. Nakajima and T. Sato: Development of a Plasma-Liquid Interfacial Reactor using a Microfluidic Chip, *The Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI-2025, Sendai, Miyagi, Nov. 10-13, 2025), Poster CRF-59.

[4] 吉木宏之，遠田明広，中嶋智樹，佐藤岳彦：ミニ流路を用いた気液界面プラズマ反応装置に関するの研究，第 49 回静電気学会全国大会（名城大学天白キャンパス），（2025），12aA-16，講演予稿集 pp.20-23.

[5] 吉木宏之，遠田明広，中嶋智樹，佐藤岳彦：マイクロ流路プレートを用いた気液界面プラズマ生成装置（Ⅱ），第 86 回応用物理学会秋季学術講演会（名城大学天白キャンパス），（2025），10a-N324-5.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許） なし

（受賞） なし

（マスコミ発表） なし

課題番号	J25I066
区分	一般公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

大動脈弁を考慮した大動脈・左心室系の血流解析
Blood Flow Analysis of Aorta-Left Ventricle System with Aortic Valve

宮内　優*†，船本 健一**††
島袋 拓己*，上田 晃蒼*
*宮崎大学工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

大動脈は大動脈解離や大動脈瘤などの致死率の高い疾患の好発部位であり，これらの疾患の機序解明や新たな診断法の提案のため，これまでに多くの数値流体力学解析が行われてきた．しかし，大動脈の上流側には大動脈弁があり，シミュレーションにおいて正確な大動脈内の血流動態を再現することは困難な課題である．本研究の目的は，大動脈弁による流動抵抗を表す外力モデルを新規に提案し，大動脈とその上流に位置する左心室を結合した大動脈・左心室系モデルに実装することで，大動脈弁が大動脈内の血流動態に与える影響を明らかにすることである．

2. 研究成果の内容

昨年度は，次式で表される流動抵抗モデルを提案し，大動脈弁のない大動脈・左心室系モデルに適用した．

$$\boldsymbol{f} = -K\boldsymbol{u}$$

ここで，Kは流動抵抗の大きさを表すパラメータ，$\boldsymbol{u}$は流速である．これまでの研究により，Kによる流量や圧力分布の変化を定量的に評価し，その有効性を確認したが，その適用範囲（$\boldsymbol{f}$を与える領域）やその内部の速度分布などは未解明であった．

本年度は提案した流動抵抗モデルの，上述に関する基本特性を明らかにすることを目的に，円筒内流れに本モデルを適用した．円筒の長さと半径はそれぞれ 20 cm，2 cm であり，境界条件として入口と出口に圧力差 100 Pa を与えた．円筒の中心位置（入口から 10cm）に厚さの異なる膜を設置し，膜の厚みによる影響を調べた．膜の厚みtに対して，$t = 0.5, 1.0, 2.0, 4.0$ mm の 4 種類を使用した．また，メッシュの細かさの影響を調べるために，要素数が 254882，873597 の 2 種類の円筒モデルを作成した．流動抵抗モデルのパラメータKは，$K = 1.0 \times 10^7$とした．流れ場が定常となった時刻での結果を考察の対象とした．

図 1 は膜の厚みによる流量の変化を示している．流量は出口境界における速度分布を積分することにより計算した．流路を完全に封鎖する膜を想定しているので，流量が小さいほど流動抵抗モデルとしての精度は高いことを意味する．同じ厚みでも，メッシュが細かい方が流量は小さい．また，両メッシュともに，膜が厚くなるにつれて流量は単調に減少し，メッシュ間の差が小さくなることがわかる．厚みが最も大きい 4mm の解析では，膜が無い状態の 10 分の 1 程度まで流量は減少している．さらに，図は省略するが，$\boldsymbol{f}$が作用するセル数ではなく，膜の厚みの方が，流量に与える影響が大きいことがわかった．

図 2 に膜内部の速度分布を示す．ここでの膜内部とは，$\boldsymbol{f}$を与えた領域のことである．図 1 の結果と同様に膜の厚みが小さくなるほど，流量は低下している．さらに，膜が厚いほど，全体的に流れの乱れが抑制されていることが確認できる．

3. 研究目標の達成状況

当初の計画通り，研究は順調に進んでいる．

4. まとめと今後の課題

本研究では，円管内流れに流動抵抗モデルを適用し，その基本特性を明らかにした．適用範囲のセル数が少なくても，膜の厚みを大きくすることで，流量を小さくでき，かつ，流れの乱れを抑えられることが分かった．今後は，大動脈と左心室の壁変形を考慮した大動脈・左心室系モデルを作成し，そのモデルに対する有効性を確認する．そして，大動脈弁の形状や動きによる血流場への影響を明らかにする予定である．

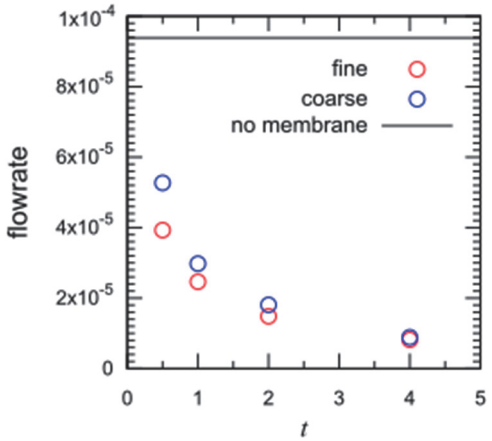


図 1：膜の厚みによる流量の変化

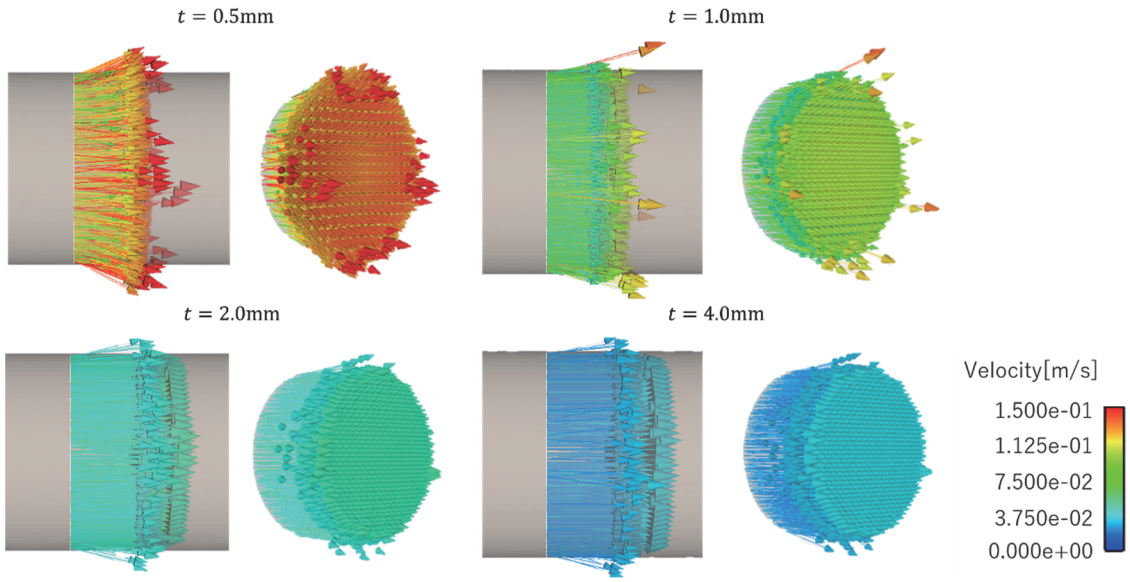


図 2：膜の内部の速度分布

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Takumi Shimabuku, Suguru Miyauchi: Improvement of Computational Accuracy of Two-dimensional Flow between Thin Membranes using Extended Finite Element Method, *Abstracts of the Eleventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference,* Okinawa, (2025), JK-TFEC11-1280.

[2] Kosei Ueda, Suguru Miyauchi, Kenichi Funamoto: Fundamental Study on a Flow Resistance Model of Heart Valves in Blood Flow Analysis, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025), 767-768.

[3] Takumi Shimabuku, Suguru Miyauchi: Discontinuous functions in Extended Finite Element Method for fluid elements containing a membrane tip, *Proceedings of International Joint Conference on Advanced Mechatronics 2025,* Miyazaki, (2025), 4-6.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I067
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2025.4～2026.3
継続年数	2 年目

非平衡的挙動を示す乱流場におけるエネルギ・スカラ輸送機構に関する数値研究

Numerical Study on Energy and Scalar Transfer in Turbulence with Non-equilibrium Features

伊藤 靖仁*†，Muyang Wang**，長田 孝二***
渡邉 智昭***，楠畑 天音***，Yi Zhou****，服部 祐司*****††
*名古屋大学大学院工学研究科，**ハルビン工程大学，***京都大学大学院工学研究科
****南京理工大学，*****東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

近年，完全発達乱流を基にした理論やスケーリング則が部分的にしか適用できない乱流場に関する研究が盛んにおこなわれている．この点に関して，本研究グループでは「非普遍的な乱流場における乱流エネルギ・スカラ輸送機構に関する基礎研究」「非普遍的な乱流場における乱流エネルギ・スカラ輸送機構に関する基礎研究」というテーマで共同研究を行ってきた．その結果，そのような結果をもたらす一部の物理的要因（例えばレイノルズ数や初期条件の依存性）の解明や乱流エネルギ減衰に関する新たなスケーリング則の提案をするに至った．しかしまだ未解明な点も多く，明らかにされた内容は断片的であると言わざるを得ない．特にいわゆる非平衡的挙動を示した場合，それが本当に非平衡乱流と呼べるのか，別の要因でそれに類似する挙動を示したのかを明らかにすることは，学術的に極めて重要である．そこで本研究では，物体後流流れやせん断乱流，圧縮性を考慮する必要がある乱流場等種々の流れ場に対する数値シミュレーションを実行し，得られた結果に対して乱流統計解析を行う．特に平衡性やエネルギとスカラの相似性に着目した現象解明を行う．これにより，乱流の普遍的性質の有無やその原因を明らかにするとともに，非平衡的な性質を特徴づける物理構造を見出し，新たなスケーリング則の提案を目指す．

2. 研究成果の内容

本節では矩形物体の後流に関する研究成果について述べる．本研究では，特に境界条件が通常の Non-slip ではない場合に着目した．

鈍体後流における乱流は，渦放出や剥離せん断層によって乱流のエネルギーカスケードが生じる非平衡的な流れである．こうした流れにおいて，境界条件が乱流エネルギー輸送をどのように変化させるかを理解することは重要である．この点において，超疎水性表面で見られるような Navier すべり境界条件，すなわち流れ方向すべり成分のみが有効となる異方的な性質を有する場合には，壁面における抗力低減をもたらすことが知られている．しかし，この異方性の影響が剥離を伴うような流れでも見られるか，またその場合のメカニズムは未解明である．そこで本研究では，Navier すべり境界条件を含む様々な境界条件を課した角柱周りの乱流流れに対して 直接数値計算（DNS）を実施し，特に流れ方向すべり条件がエネルギー輸送に及ぼす影響およびその機構を明らかにすることを目的とした．

計算領域および角柱周りのグリッドメッシュを 図 1 に示す. シミュレーションは高次スペクトル法ソルバーである Nektar++を用いた. 角柱幅基準のレイノルズ数は $Re_D = 3900$ とした．ただしコーナー特異性を緩和するために小さなフィレット（$r/D = 0.02$）が施されている．スパン方向長さは πD で，128 のフーリエモードを用い，要素次数は 6 とした．境界条件として，基準となる滑り無し条件，均質な滑り条件および Navier 滑り条件を設定した．ただし，滑り条件については滑り長を λ/D=0.01 または 0.2 とした．計算精度については，滑り無しの場合に対して既存データとの整合性を確認した．

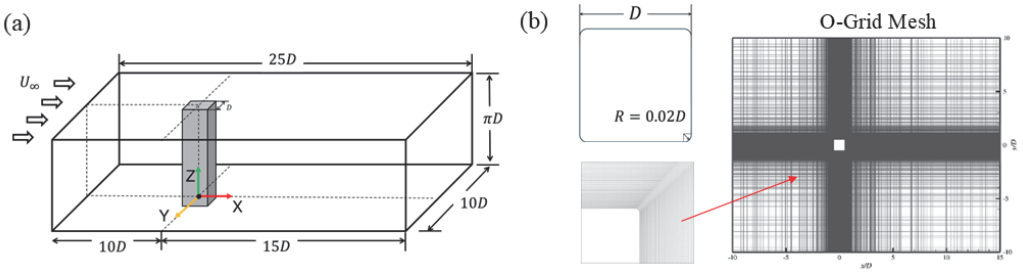


Fig. 1. (a) Computational domain and (b) O-grid mesh around the square prism with fillet corners (r/D = 0.02).

図 2 に乱流エネルギーTKE の空間分布を示す．5 つのケースの中で，$\lambda/D = 0.2$ の流れ方向すべりのみを与えた条件が最も顕著な変化を示した．流れ方向すべり条件の場合では，角柱近傍に明確な低 TKE 領域が形成され，下流の高 TKE コアが大幅に短縮されることがわかる．これに対して，同じ λ における均一すべり条件では，変化が小さく質的にも異なる応答を示した．つまり，すべり量ではなく**すべり方向**が後流応答を支配することを示唆している．

図 3 に，後流中心線上の TKE 収支解析結果を示す．すべりなし条件では角柱直後から TKE 生成が正となるのに対して，大きな流れ方向すべりを与えたケースでは近傍領域で TKE 生成が負となる．このため，乱流エネルギー生成が抑制され，乱流バーストの発生が遅延し，結果としてコヒーレント構造の出現が下流側へ移動すると言える．

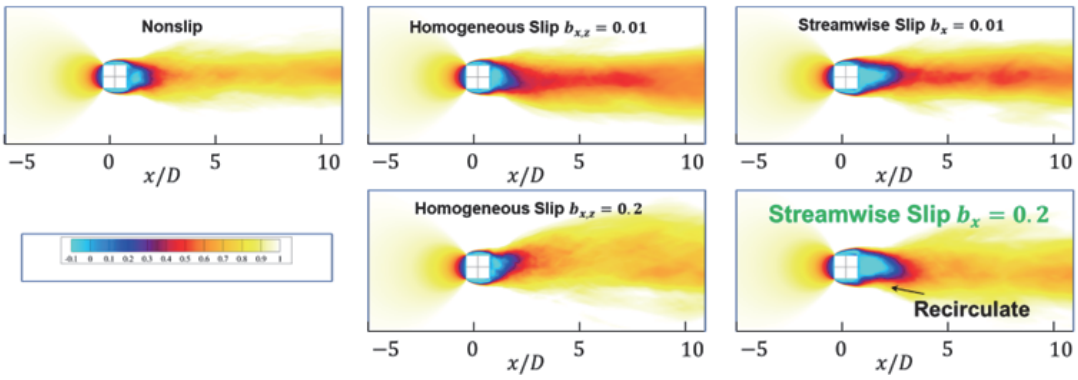


Fig. 2. Two-dimensional distribution of turbulent kinetic energy for the five cases.

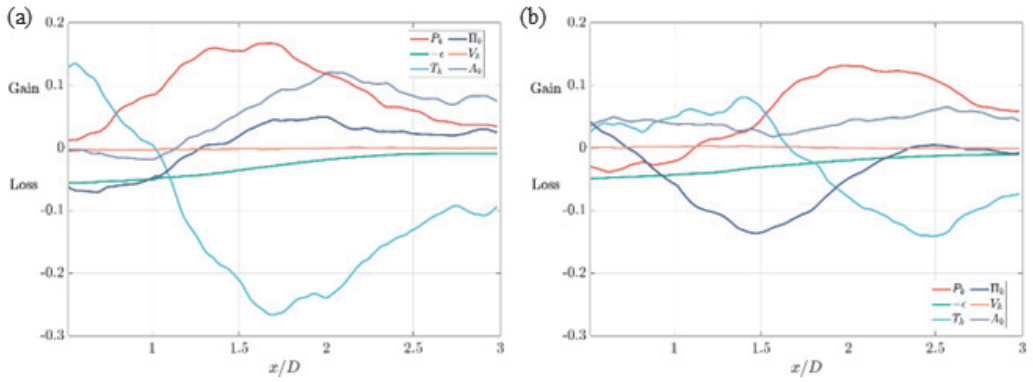


Fig. 3. Turbulent kinetic energy budget along the wake centreline for (a) no-slip and (b) streamwise-only slip at $b_x/d = 0.2$.

3. 研究目標の達成状況

本研究では非平衡的乱流場というキーワードの元に様々な流れ場に対して研究を行っている．プロジェクトの 2 年目である本年度は，上記のような通常とは異なる境界条件を有する物体後流流れに対しての新しい知見を得るなど，研究はおおむね順調に進捗していると言える．これから得られた成果を論文発表することで，学術的な意義を強固なものにしていく所存である．

4. まとめと今後の課題

これまで後流流れや圧縮性を伴う流れ場のエネルギ・運動量輸送に関する研究を中心に行ってきた．次年度は速度場に関する理解を深めるとともに，スカラ輸送に及ぼす非平衡性の影響についても取り組み，運動量輸送とスカラ輸送の相似性/非相似性についても議論する．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Rongji Hu, Yuanliang Xie, Xue-Lu Xiong, Yuling Zheng, Jianyu Chen, Yi Zhou: Turbulent/nonturbulent interface in a spatially evolving compressible turbulent boundary layer, *Phys. Fluids* 37, 035101 (2025)

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Muyang Wang, Yasumasa Ito: On the Effect of Navier Slip Length on Turbulent Transport in the Wake behind a Square Prism, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, 2025, pp.1149-1150.

[3] Muyang Wang, Yasumasa Ito, Koji Nagata, Tomoaki Watanabe, Yi Zhou, Yuji Hattori: Numerical study on turbulent transport of energy and scalar behind a square prism with Navier slip boundary, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-52, pp. 149-152.

[4] 楠畑天音，渡邉智昭，長田孝二: 乱流と干渉した垂直衝撃波の圧力等値面による波面変形の解析"，2025 年度衝撃波シンポジウム (2025)

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I068
区分	一般公募共同研究
課題分野	その他（火山学）
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

爆発的噴火における衝撃波と火山岩塊の飛翔のダイナミクス

Dynamics of Shockwave and Transport of Ballistic Blocks in a Volcanic Eruption

常松 佳恵*†，大谷 清伸**††
瀬尾 和哉***，Nils Steinau****，金子 明人***
*山形大学理学部，**東北大学流体科学研究所
***工学院大学工学部，山形大学理工学研究科
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

火山の爆発的噴火では，ほとんどの場合において火山弾・火山岩塊（一般的には「噴石」と呼ばれる）が噴出する．この現象は 10 cm 以上，大きいものでは数メートルに達する大きさの岩石が高速で噴出し，火口の近くに落下するため，人的被害・建物被害が起こり得る大変危険な現象である．しかし，岩塊がどのように噴出しするのか，またどのように噴出条件を観測して影響範囲の予測につなげるのかについての研究はあまり進んでいない．本研究では火山での爆発を，衝撃波管を用いて再現し，爆発の際にガスとビーズを噴出させる実験を行った．このガスの流れとビーズの軌跡を高速度カメラで撮影し，撮影された画像から速度などを求め，ガスの流れの速度分布と岩塊の速度の関係から岩塊の飛翔に関する物理を導くことを本研究の目的とする．

2. 研究成果の内容

2025 年度は 5 月 20 日から 24 日に，東北大学流体科学研究所衝撃波関連施設において衝撃波管を用いて火山噴火における爆発を模擬する実験を行った．実験は前年度と同様，衝撃波管に圧縮した空気を注入し，衝撃波管の上部に設置したマイラー膜が空気の圧力によって破膜することで爆発を発生させた．衝撃波管の出口付近のガスの流れをシャドウグラフ法によって可視化し，それをハイスピードカメラで撮影した．また，膜の上にはビーズを置き，ビーズの運動もガスと同様にハイスピードガメラで撮影した．新しい取り組みとして，衝撃波管から発生する空気の振動（空振）を圧力計とマイクロフォンで観測し，圧力波形とビーズの軌跡を解析した．

一番卓越している空振の周波数（ピーク周波数）がノズル内の管の長さを表すのではないかと考え，そのピーク周波数と共鳴との関係を探ったが，一般に知られている共鳴と管の長さとの関係は現れなかった．本研究で取得した空振のデータが，減衰仕切るまで取れなかったこと，（特に図 1 c, d），ノイズのような周波数も含めて解析してしまっていたことが原因ではないかと考えられる．また，そもそも共鳴はしていない可能性もある．これらの課題を解決するため，さらなる実験とデータの取得および解析が求められる．

一方，過去に行った実験を基に今年度は数値計算を進めた．実験で得られる衝撃波管の出口付近の映像は密度の変化を表すと考えられているが，数値計算を行うことでガスの速度の分布も得られる．このように数値計算によって求められたガスの速度場を用いて，ビーズの軌跡を計算によって求めたところ，図 2 に表されるように実験で得られたビーズの軌跡は数値計算によって良く再現された．この際，速度場の分布は OpenFOAM と呼ばれる数値計算ソフトを用いており，ビーズの軌跡はビーズが急であることを仮定し，

$$\left(1+\frac{\rho}{2\rho_p}\right)\frac{d\vec{v}}{dt}=\frac{3\rho C_D}{4\rho_p D_p}|\vec{v}-\vec{u}|(\vec{v}-\vec{u})-\frac{1}{\rho_p}\nabla P+\vec{g}$$

というような球体の運動方程式を解いて求めている．ここで，ρ_p，D_pはそれぞれビーズの密度，と直径を表し，ρ，P，C_Dは大気の密度と大気の圧力，空気抵抗係数を表す．また，$\boldsymbol{g}$ は重力加速度のベクトルを表す．$\boldsymbol{v}$はビーズの速度を表し，$\boldsymbol{u}$は大気の速度を表す．これらのパラメータのうち，大気に関連する密度ρ，圧力P，速度$\boldsymbol{u}$は数流体力学計算から求めており，空気抵抗係数C_Dは超音速のガス流についてはレイノルズ数よりもマッハ数に依存すると仮定して値を決定している．これらの仮定に基づいて計算された軌跡が図 1 に表される軌跡である．

なお，その他にも以前の実験で得られた結果と実現象の比較などをするため，レイノルズ数とマッハ数を実際の火山噴火と衝撃波管実験について求め，本研究で得られる結果が実際の噴火現象に応用可能であることも示された．その結果は Steinau *et al.* (2026) として *Earth Planests and Space* 誌に掲載された．

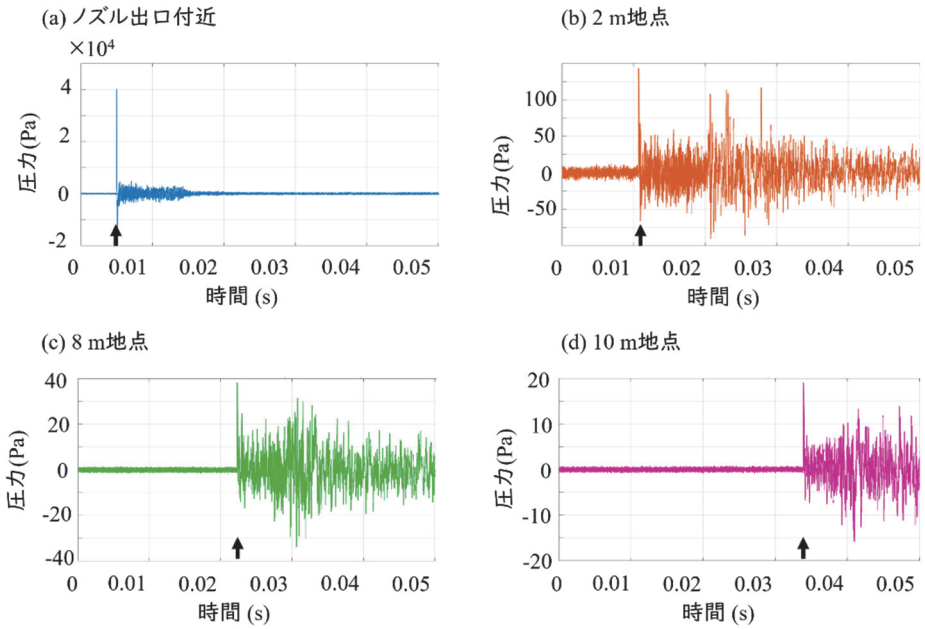


図 2：ノズル長 24 mm，ビーズ径 0.8 mm，初期圧力 1.0664 MPa で実験を行った際の空振の観測結果．(a) ノズル出口付近における圧力変化，(b) 衝撃波管から 2 m の地点における圧力変化，(c) 衝撃波管から 8 m の地点における圧力変化，(d) 衝撃波管から 10 m の地点における圧力変化．

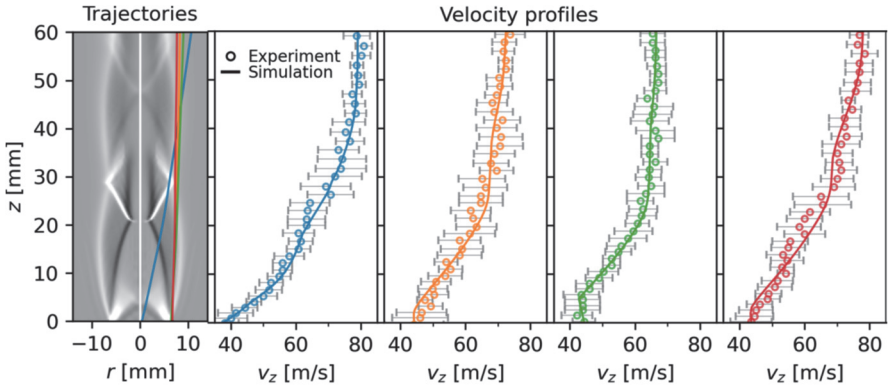


図 3：数値流体力学計算によって求められたガスの速度場を用いて，計算によって得られたビーズの軌跡（実線）と，実験結果によるビーズの軌跡の比較．ビーズの軌跡を表す丸とエラーバーはそれぞれ隣接する 5 つのビーズの位置の情報から得られた平均と標準偏差の値を示す．

3. 研究目標の達成状況

岩塊の噴出速度をモデル化するためのデータは揃いつつあり、論文中ではそのデータが表す傾向までは示すことができたが、まだ統計的にモデル化できるほどのデータは取得できていない。よって今後も引き続き、衝撃波管（噴火の圧力源）の圧力の値やノズル長のバリエーションを増やして実験を行い、傾向をさらに詳しく抽出する必要がある。

4. まとめと今後の課題

今年度はシャドウグラフ法を採用し、今までよりも長い距離のビーズの軌跡を取得することができるようになった。また、爆発によって生じる空振を観測して空振とガスの流れの関係などを調べようと考えていたが、データの取得に関しては減衰を見られるところまで空振を観測すること、ノイズなどを除外してピーク周波数を求めることなどの課題が浮かび上がった。さらに、今まで行った実験のデータを用いて数値流体力学計算と組み合わせることでビーズの軌跡を再現するシミュレーションを行うことができた。今後は、火山岩塊の噴出速度をモデル化するため、それらをコントロールすると考えられる圧力やノズル長のバリエーションを増やして実験を行い、モデル化のまとめを論文化していきたい。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] N. Steinau, K. Tsunematsu, K. Ohtani, K. Seo, A. Kaneko: Volcanic ballistic projectiles in supersonic jets: shock tube experiments with glass beads. *Earth Planets Space* **78**, 50 (2026). doi: 10.1186/s40623-026-02383-1.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] K. Tsunematsu, K. Ohtani, N. Steinau, K. Seo, A. Kaneko, T. Ogawa: Modelling the ejection velocity of ballistic blocks based on shock tube experiments, *IACVEI 2025 Scientific Assembly*, Geneve, Switzerland, (2025).

[3] N. Steinau, K. Tsunematsu, K. Ohtani, K. Seo, A. Kaneko, T. Ogawa: Trajectories of large particles in supersonic jets: Implications for volcanic ballistic projectiles, *IACVEI 2025 Scientific Assembly*, Geneve, Switzerland, (2025).

[4] A. Kaneko, K. Seo, K. Ohtani, K. Tsunematsu, N. Steinau, T. Tomizawa: Experimental Study on Particle and Gas Dynamics in a Simulated Volcanic Eruption using Schlieren Image Velocimetry, *Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2025).

[5] K. Tsunematsu, K. Ohtani, N. Steinau, A. Kaneko, K. Seo, T. Tomizawa: Experimental Study on Block Transport in Explosive Volcanic Eruptions using Schlieren and Shadowgraph Imaging, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-22, pp. 65-67.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project Code	J25I069
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

The Structure and Propagation of Ignition Fronts of Reacting Mixtures under Autoignitve Engine-relevant Conditions: from Deflagration to Detonation

Minh Bau Luong*†, Youhi Morii**††, Hong G. Im***
*School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
***Clean Energy Research Platform, King Abdullah University of Science and Technology
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

This project aims to develop a predictive framework for identifying and characterizing combustion modes in autoignitive mixtures under engine-relevant high-temperature and high-pressure conditions. Particular focus is placed on the dynamics of ignition front formation and propagation under temporal compression heating, accounting for mixture inhomogeneities and the effects of negative temperature coefficient (NTC) chemistry.

The study seeks to establish a rigorous method to quantify ignition front development, including the definition of an effective runup distance based on ignition delay field analysis, in order to improve the prediction of transitions between spontaneous ignition, deflagration, and detonation. By integrating multi-zone reactor modeling with dimensionless analysis frameworks and validating against high-fidelity simulations and experimental data, the project ultimately aims to enhance the predictive capability for engine knock propensity and provide guidance for improving combustion stability and efficiency in advanced internal combustion engines.

2. Details of program implement

This project implements a physics-based framework to identify combustion modes under autoignitive engine conditions, with particular emphasis on fuels exhibiting negative temperature coefficient (NTC) behavior. Dimethyl ether (DME) shown in Fig. 1, a fuel exhibiting pronounced low-temperature chemistry and strong negative temperature coefficient (NTC) behavior, is used as the representative NTC fuel in this study. The methodology builds upon the classical ignition regime analysis using the ξ–ε diagram, where combustion modes are determined by the relative interaction between spontaneous ignition front speed, laminar flame speed, and acoustic effects.

To overcome the limitations of conventional temperature-gradient-based approaches in NTC regimes, a generalized definition of the effective runup distance is introduced based on the ignition delay time field. Specifically, monotonic segments of the ignition delay distribution are identified, and in multidimensional configurations, dissipation element theory is applied to extract a representative length scale through the mean dissipation element size (see Fig. 2 and Fig. 3). This enables a more accurate characterization of ignition front propagation and detonation initiation criteria.

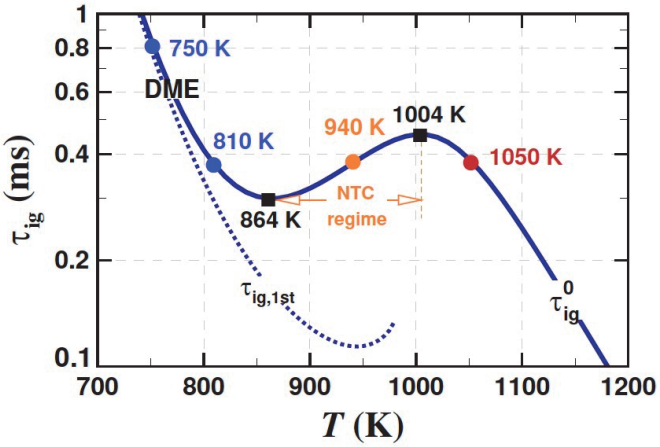


Figure 1: Homogeneous ignition delay time of a stoichiometric DME/air mixture at constant volume and 40 atm as a function of temperature.

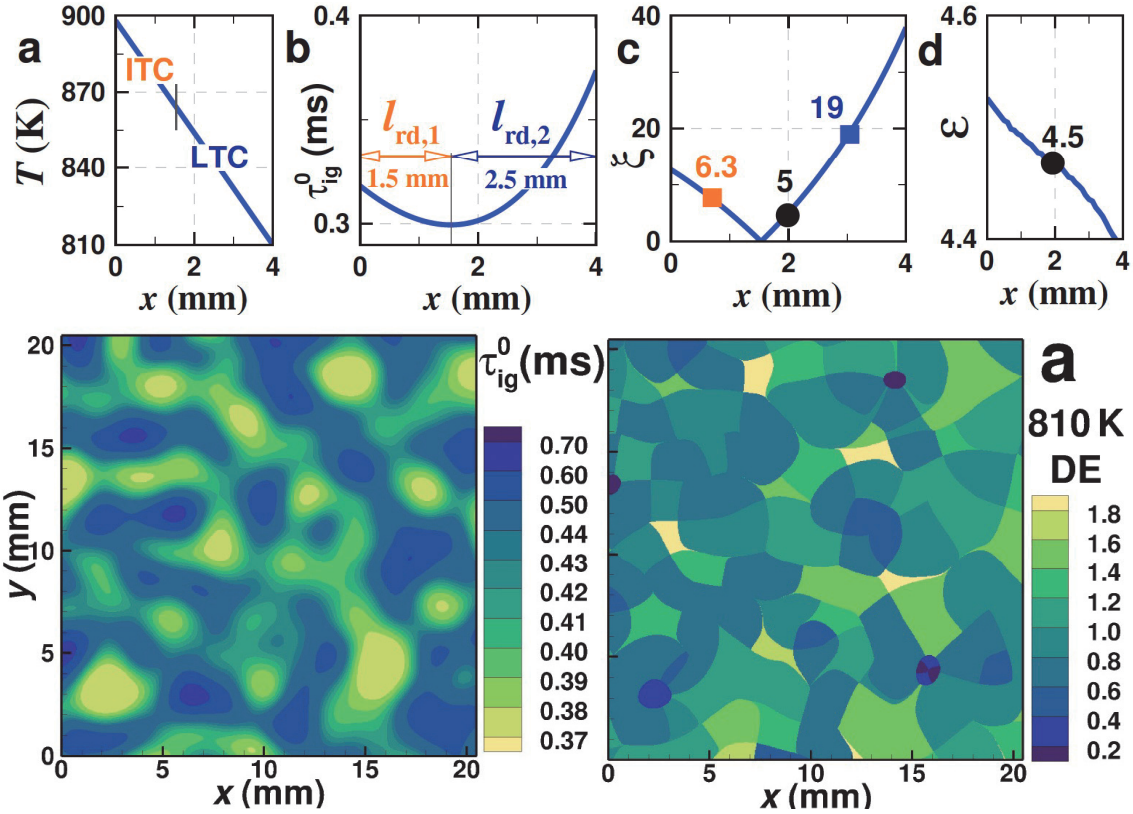


Figure 2: Representative monotonic segments of the ignition delay distribution in one-dimensional (first-row), and multiple-dimensional analysis (second-row) are extracted, serving as a representative length scale of hot spots.

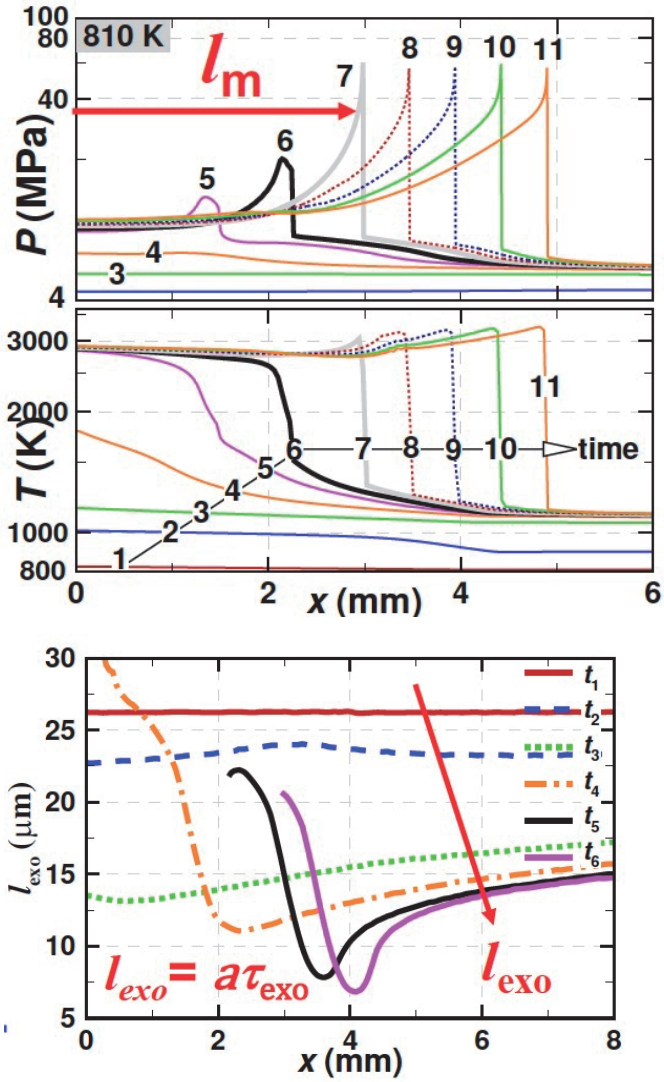


Figure 3: Examination of how low-temperature flames affect ignition front development and the evaluation of effective runup distance in autoignitive 1D ignition front propagation.

The framework is first validated using one-dimensional hot spot configurations to analyze ignition front structure and regime transitions. It is then extended to multidimensional fields, where statistical analysis of ignition delay gradients is performed. In parallel, a multi-zone reactor model is being developed using Cantera to reproduce the temporal evolution of pressure and temperature under compression heating, while accounting for mixture inhomogeneities. This integrated approach allows computation of transient dimensionless parameters and enhances the prediction accuracy of combustion modes under realistic internal combustion engine conditions.

3. Achievements

The ongoing-effort development of a multi-zone model is expected to accurately replicate the temporal evolution of pressure and temperature induced by compression heating in internal combustion engines under autoignitive conditions. By capturing

these transient thermodynamic processes, the model will provide a realistic representation of engine-relevant combustion environments. Findings will be validated using detailed 1D and 2D simulations with ethanol/air mixtures, and DME/air mixtures.

Based on this framework, transient dimensionless parameters will be systematically computed to facilitate improved identification of combustion modes within the ignition regime diagram. This approach is anticipated to enhance the predictive capability for distinguishing between different ignition behaviors, thereby supporting more accurate assessment of combustion mode transitions under practical engine conditions.

4. Summaries and future plans

The negative temperature coefficient (NTC) regime plays a critical role in modifying ignition front dynamics under engine-like conditions, posing challenges for accurate prediction of detonation onset and engine knock. In this study, a generalized framework has been developed by introducing an effective runup distance based on dissipation elements of the ignition delay field. Unlike conventional temperature-gradient-based metrics, this approach captures the nonmonotonic ignition behavior induced by NTC chemistry, leading to improved prediction of detonation initiation. These findings are supported by detailed numerical simulations using DME/air mixtures.

Building on this foundation, ongoing efforts focuses on the development of a multi-zone modeling framework using Cantera. This model is designed to reproduce the temporal evolution of temperature and pressure under autoignitive internal combustion engine conditions while accounting for mixture inhomogeneities. The multi-zone approach enables a more realistic representation of transient thermochemical states, thereby enhancing the prediction accuracy of combustion modes.

Future efforts will integrate this framework with dimensionless analysis based on transient ξ–ε parameters, as established in previous studies, to provide a more comprehensive and robust methodology for combustion mode identification under practical engine conditions for mitigating engine knock and improving combustion efficiency in next-generation internal combustion engines operating under extreme conditions.

5. Research results

Not applicable.

課題番号	J25I070
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

揚力型大気圏突入カプセルの自由運動型風洞試験
Free-motion Wind Tunnel Testing of a Lifting Atmospheric Entry Capsule

上野 和之*†，永井 大樹**††
竹田 裕貴*，黒澤 尚樹*，伊藤 一樹*，鈴木 隆誠*
*岩手大学理工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

大気圏突入カプセルは宇宙から物資を回収する手段の一つである．国際宇宙ステーション(ISS)や惑星探査機からのサンプル回収のためには，大気圏突入カプセルの技術を成熟させることは欠かせない解決課題である．ISS と物資をやりとりする補給機(HTV:H-II Transfer Vehicle)を使って，そこから分離した HTV 搭載小型回収カプセル(HSRC)の実証実験が 2018 年 11 月に実施された．ISS からのサンプルを含むカプセルの回収に成功し，多くの知見が得られた．しかし，今も未解明の事柄も残されている．特に遷音速・亜音速域での動的不安定性の解明がミッションの成功率を上げるために重要である．

本研究では，大気圏突入カプセルの動的不安定性の実験的解明を長期的な目標とする．その第一段階として，慣性モーメントの異なる模型を用いて自由運動型風洞試験を実施することで，慣性モーメントがピッチ振動に及ぼす影響を調査する．実験には岩手大学で独自に考案・ 開発した自由運動型磁力支持装置を使って風洞模型用を非接触浮上させ，自由度型動的風洞試験を行う．浮上模型を使った自由運動型動的風洞試験は国内では岩手大学の研究以外に前例のみつからない挑戦的な試みである．本研究の風洞模型は HSRC と相似で大型の HRV を想定した揚力型大気突入カプセルの縮尺模型であり，永久磁石を内蔵している．重心と内蔵磁石の中心が一致しているため，実機飛行を模擬した運動を風洞内で再現できる．

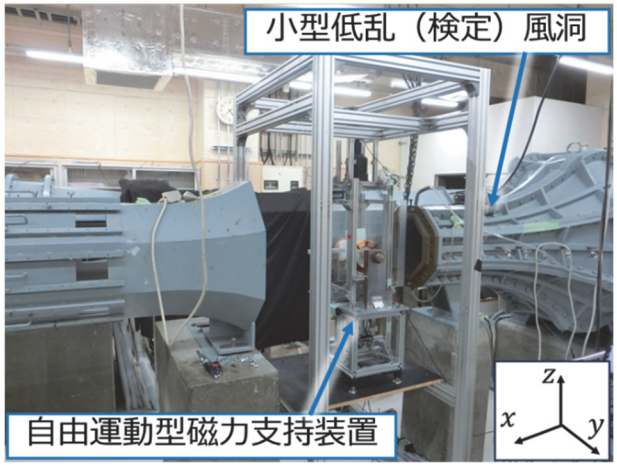


図 1：小型低乱（検定）風洞に設置した自由運動型磁力支持装置

2. 研究成果の内容

岩手大学で独自に開発した自由運動型磁力装置を東北大学流体科学研究所の小型低乱（検定）風洞に設置して，大気圏突入カプセル模型の自由運動型風洞試験を行った（図１）．

風洞模型は HRV カプセルの 1/100 縮尺模型であり，重心が中心軸からオフセットされた揚力型カプセルある．基準模型（1.0J-model）の無次元慣性モーメントは，古賀らの実験の風洞模型と同じ値である．その値は，実機がマッハ数 $M = 0.4$ 程度に減速した状態で飛行する高度での条件に概ね一致する．この模型を基準として，慣性モーメントをそれぞれ 0.8 倍（0.8J-model）および 1.2 倍（1.2J-model）とした模型を製作し，自由運動型風洞試験を実施した．３つの模型の外形・寸法・重心オフセットは同一である．

図２と図３に自由運動型風洞試験の模型ピッチ角の時間履歴を示す．図２が風洞気流風速 5.0 m/s の場合であり，図３が 9.0 m/s の場合である．計測開始から30 s 後に風洞の気流を流しはじめた．風速 5.0 m/s の場合，予定していた通風時間 600 s の後に実験を終了した．いっぽう，風速 9.0 m/s の場合は不安定現象が発生して模型の浮上制御が途中で破綻した．そのため，破綻するまでのデータを示した．

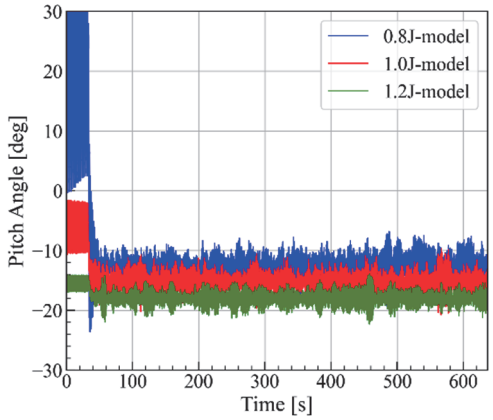


図２：ピッチ角θの時間履歴，気流速度 $U_\infty = 5.0$ m/s

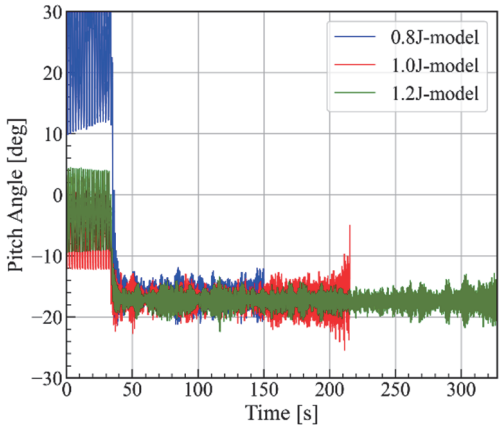


図３：ピッチ角θの時間履歴，気流速度 $U_\infty = 9.0$ m/s

得られた時系列データを離散フーリエ変換し，パワースペクトルを算出した．その結果の例を図４と図５に示す．図中には並進運動 $(x_g(t), z_g(t))$ のパワースペクトルも示した．今回注目しているピッチ角 θ のパワースペクトルには明確な卓越周波数がある．これは，空気力学的なモーメント傾斜$C_{M\alpha}$が負の値であるために生じる復元力に起因するものである．

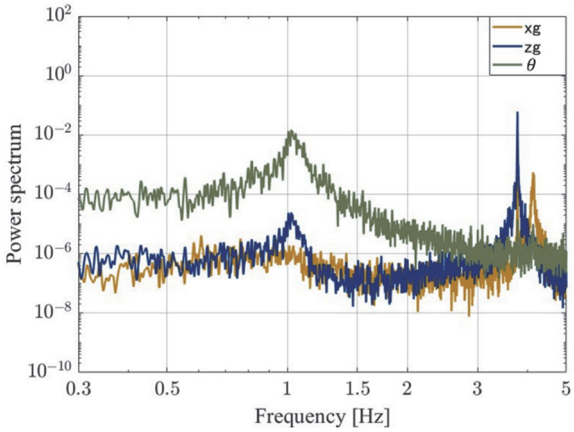


図４：1.0 J-model のピッチ角θと並進運動 (x_g, y_g) のパワースペクトル，
気流速度 $U_\infty = 5.0$ m/s

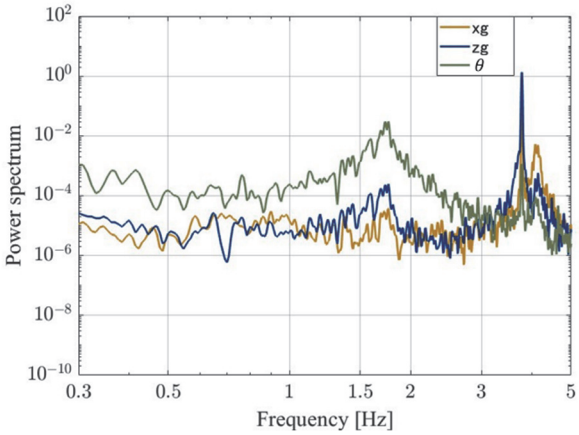


図５：1.0 J-model のピッチ角 θ と並進運動 (x_g, y_g) のパワースペクトル，
気流速度 $U_\infty = 9.0$ m/s

図６に気流速度 U_∞ とピッチング周波数 $f_{\theta 1}$ の関係を示す．ピッチング振動の卓越周波数は気流速度 U_∞ に比例し，慣性モーメントに概ね反比例する結果となった．

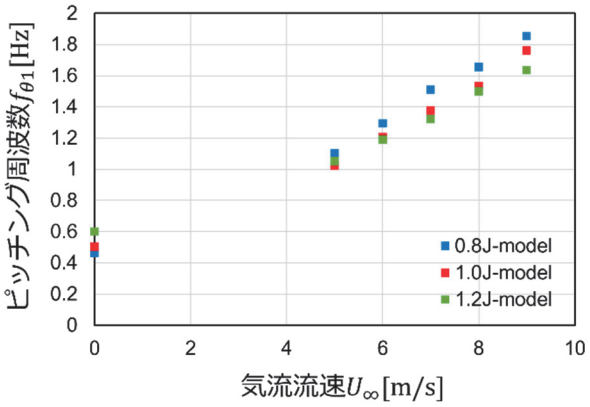


図６：気流速度 U_∞ とピッチング周波数 $f_{\theta 1}$ の関係

線形理論によれば，ピッチングモーメント傾斜$C_{M\alpha}$は次の式で同定できる．

$$C_{M\alpha} = -\frac{(2\pi f_{\theta 1})^2 I - mg\,\delta_{og}}{q_\infty S d}$$

ここで $I, m, g, \delta_{og}, q_\infty, S, d$ は，それぞれ慣性モーメント，模型質量，重力加速度，模型重心と磁石中心のずれ（3D プリンタの工作精度の限界によるもの），動圧，ショルダー部断面積，ショルダー部直径を示す．この式から算出された$C_{M\alpha}$を表１に示す．標準偏差の範囲内で Fujii et al. (2013)（スティングと軸受けで支えた１自由度風洞試験）の結果と一致した．この結果から，本研究の計測手法の妥当性が確認できた．

表１：モーメント傾斜 $C_{M\alpha}$

	$C_{M\alpha}$ [rad^{-1}]	標準偏差
本研究	−0.117	0.005
Fujii et al.*	−0.121	

*Fujii et al.: *J. Space Tech. Sci.*, 27 (2013), pp.31–43

ピッチ振動周波数とは対照的に，ピッチ振動の振幅は，風速と模型慣性モーメントとのいずれにも依存せずほぼ一定値を示した（図２，３）．この特性には，流体・カプセル連成振動系の非線形効果が関係していると考えられるが，詳しいことはわかっていない．今後，計測データのより詳細な分析と，非線形効果を取り込んだ運動モデル方程式とを組み合わせて吟味することによって，現象の理解を深めることが課題である．

3. 研究目標の達成状況

研究の前半ではピッチング振動のモーションキャプチャから空力微係数を同定した．この部分は当初計画どおりであり，十分な信頼性で空力微係数の同定ができることを確かめた．

申請時点では，風速を上げるにつれて大振幅のピッチング振動が発生すると予想されていた．岩手大学所有の簡易な風洞を使った予備実験では，実際に大振幅のピッチング振動が発生していた．ところが，東北大学流体科学研究所の小型低乱風洞で自由運動型風洞試験を行ったところ，ピッチング振動の振幅は 5 degree 以下であった．

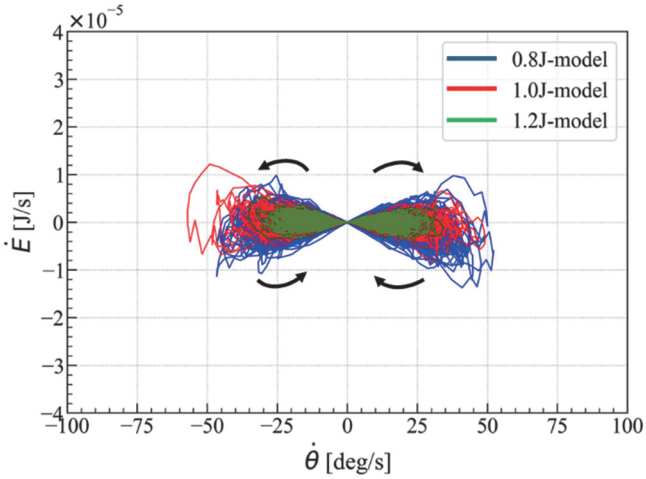


図７：角速度 $\dot{\theta}$ とカプセルの力学的エネルギーの時間変動 $\dot{E}$ との関係，
気流速度 $U_\infty = 5.0$ m/s

得られた時系列データから線形理論で説明できる成分を除去し，隠れた非線形効果を浮き彫りにする必要がある．その手始めとして，角速度 $\dot{\theta}$ とカプセルの力学的エネルギーの時間変動$\dot{E}$との関係を示すグラフを作図した（図７）．このような詳細なデータ分析を重ねて非線形効果の知見を深める．この部分は未達成であり，今後の課題である．

電磁的実時間位置検出法の適用を試みた．電磁場解析による詳しい検討の後，無風の浮上実験に成功した．今後，通風試験に進み，より複雑な形状の模型においても自由運動型磁力支持風洞試験を可能にする．この部分はおおむね計画どおりである．

より複雑な形状の模型を使った実験が可能になると，これまで使ってきた ARToolkit による後処理モーションキャプチャが不可能になる．それを克服するためにステレオ撮影された動画をデジタル画像相関法で解析し，模型運動を６自由度でモーションキャプチャすることに成功した（図８）．この部分は流体科学研究所から岩手大学への技術移転である．

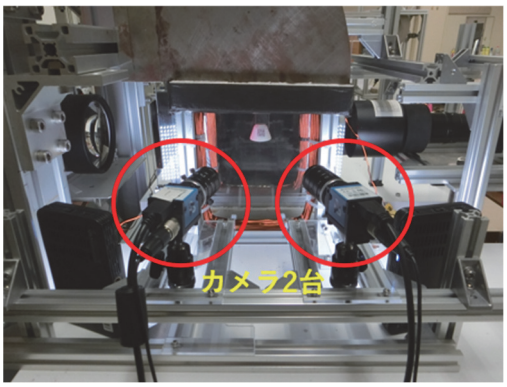


図８：デジタル画像相関法のためのステレオ動画撮影

4. まとめと今後の課題

本研究では，大気圏再突入カプセルの動的不安定性の実験的解明を長期的な目標として，揚力型カプセルの自由運動型風洞試験を行った．2025 年度は，慣性モーメントが異なる３種類の揚力型カプセル模型を用いた自由運動型風洞試験を実施し，慣性モーメントがピッチ振動に及ぼす影響を調査した．

ピッチ振動の周波数は風洞気流速度に比例し，模型慣性モーメントに概ね反比例した．これは線形理論で説明できる特性である．線形理論と振動周波数データを使ってモーメント傾斜 $C_{M\alpha}$を同定した．その値は先行研究と概ね一致し，本件研究手法の妥当性が確認された．

ピッチ振動周波数とは対照的に，ピッチ振動の振幅は，風速と模型慣性モーメントとのいずれにも依存せずほぼ一定値を示した．この特性には，流体・カプセル連成振動系の非線形効果が関係していると考えられるが，詳しいことはわかっていない．今後，計測データのより詳細な分析と，非線形効果を取り込んだ運動モデル方程式とを組み合わせて吟味することによって，現象の理解を深めることが課題である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] N. Kurosawa, K. Ueno, Y. Takeda, K. Asai, M. Kikuchi, H. Nagai, T. Ikami, Y. Sasaki: Free-motion Wind Tunnel Testing of Lifting Capsules with Different Inertia Moments, *Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), pp.580-581.

[2] 伊藤一樹，鈴木隆誠，黒澤尚暉，菊池護，浅井圭介，竹田裕貴，上野和之：デジタル画像相関法を用いた磁力支持風洞模型の多自由度運動評価，日本航空宇宙学会北部支部 2026 年講演会，(2026)

[3] 寺田圭佑，佐野太郎，猫塚啓太，上野和之，松本裕子，石向桂一，はやぶさカプセルまわりの圧縮性流れに対する分極分解の適用，日本航空宇宙学会北部支部 2026 年講演会，(2026)

[4] 猫塚 啓太，竹田 裕貴，上野 和之，支持干渉の影響評価のためのカプセルとスティングを組み合わせた 1 自由度連成解析，第 57 回流体力学講演会／第 43 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム，(2025)

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許） なし

（受賞） なし

（マスコミ発表） なし

Project Code	J25I071
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Study on Visualization of Concentration Boundary Layer near Gas-liquid Interface in Gas Absorption

Yuki Kanda*†, Junhao Ke**††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**School of Aerospace, Mechanical and Mechatronic Engineering, The University of Sydney
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

This study aims to visualize the concentration boundary layer caused by gas dissolution near the gas-liquid interface using an optical interferometer owned by the applicant, with the ultimate goal of evaluating dissolved oxygen levels in lakes.

2. Details of program implement

In this report, as a preparatory step for the study, the gas dissolution phenomena at the gas-liquid interface is visualized using nitrogen and carbon dioxide as substitutes for oxygen, and the validity of these measurements was discussed.

2.1 Visualization chamber

Visualization experiments were conducted using the visualization chamber shown in Fig. 1. The chamber was made of aluminum and was equipped with two quartz viewing windows. A spacer was placed in the observation area, and a glass cell filled with water was placed on top of it. The glass cell was formed by sandwiching a U-shaped resin plate between quartz glasses with an optical axis depth of 1.5 mm.

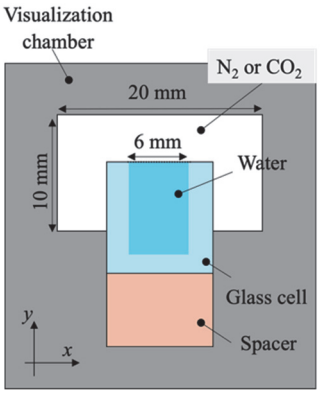


Figure 1: Schematic of the visualization chamber.

2.2 Result and Discussion

Figure 2 shows the phase-shifted data measured by the phase-shifting interferometer when nitrogen was introduced into the visualization chamber. The temperature inside the chamber during the experiment was approximately 297 K and the pressure was approximately 1 MPa. The visualization results indicated that there was almost no change in the interference fringes near the gas-liquid interface, that is, the refractive

index change could not be detected by the interferometer. It is explained that, at the resolution of this measurement, changes in refractive index due to nitrogen dissolution could not be detected.

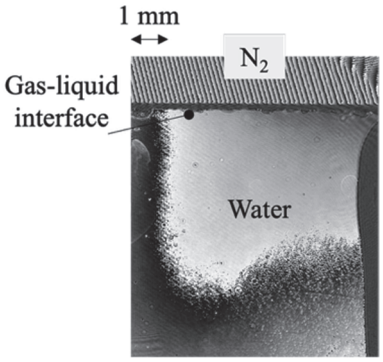


Figure 2: Phase-shifted data when nitrogen was introduced into the visualization chamber.

In this study, to increase the measurable change in the refractive index, the optical axis depth was changed to 15 mm and the gas was switched to carbon dioxide. Figure 3 shows the phase-shifted data when carbon dioxide was introduced into the visualization chamber. The temperature inside the chamber during the experiment was approximately 297 K and the pressure in the gas phase was 1 MPa. From the visualization results, it was observed that interference fringes appeared near the gas-liquid interface after gas introduction and progressed toward the liquid phase. This experimentally demonstrates that the dissolution phenomenon of carbon dioxide at the gas-liquid interface can be visualized by the phase-shifting interferometer.

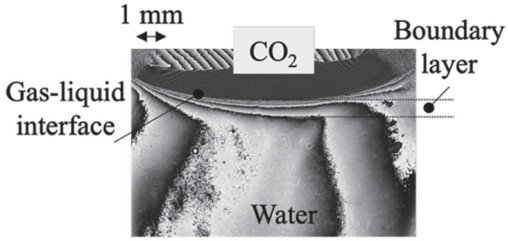


Figure 3: Phase-shifted data when carbon dioxide was introduced into the visualization chamber.

3. Achievements

This study presents a visualization of gas dissolution phenomena in the vicinity of the gas-liquid interface for nitrogen and carbon dioxide as a preparatory stage. We also reported our research results at an international conference as shown in “Research results” section.

4. Summaries and future plans

From measurements of the refractive index distribution near the gas-liquid interface using the phase-shift interferometer, it was found that visualization of nitrogen dissolution was difficult, whereas for carbon dioxide, we succeeded in visualizing the concentration boundary layer within a few millimeters of the gas-liquid interface.

As a goal for future our joint research, we plan to conduct more detailed experiments, including the effects of convection and temperature variation in gas/liquid phases, to better understand the transport phenomena of dissolved gases in lakes.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Y. Kanda, J. Ke: Visualization of Concentration Boundary Layer Near Gas-liquid Interface in Gas Absorption, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-42, pp. 121-122.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J25I072
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	3 年目

リブレット加工による粘性抵抗低減メカニズムの解明
Elucidation of Viscous Drag Reduction Mechanism by Riblet Processing

大山　聖*†, 焼野 藍子**††
有馬 佳奈***
*宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, **東北大学流体科学研究所
***東京大学工学部
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

本研究は, 航空機の粘性抵抗低減を目的として, 数値流体シミュレーションを用いてリブレット加工が粘性抵抗を低減するメカニズムを解明することを目的とする. 2023 年度～2024 年度の平板形状に関する研究に続き, 2025 年度は圧縮性流れ中のリブレット表面加工が施された翼型形状について直接数値シミュレーションを実施し, これまで明らかにされてこなかったリブレット表面加工が翼型の性能に与える影響とそのメカニズムを明らかにすることを目的とする.

2. 研究成果の内容

2025 年度は, 圧縮性乱流境界層中のリブレット表面加工による粘性抵抗低減効果を直接数値シミュレーション（DNS）により解析した. 等辺三角形断面リブレットを対象に, マッハ数 0.85 およびマッハ数 0.2 における無次元溝幅 $s^+ = 15, 18, 21, 24, 30$ の各ケースについて計算を実施した. マッハ数 0.85 において最大約 11%の抵抗低減が達成されることを示し, 最適溝幅の範囲がマッハ数 0.2（$s^+ = 18$）と比較して $s^+ = 18 \sim 24$ に拡大されるという, 圧縮性流れ特有のロバスト性向上を明らかにした. さらに, レイノルズせん断応力の quadrant 解析により, ejection および sweep の強度がリブレット面上においてマッハ数増加に伴ってより大きく低下することが, 圧縮性流れにおける抵抗低減率の向上メカニズムであることを解明した. また, 過年度（2023～2024 年度）において金子賢人（当時東京大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻, 現 JAXA）が取り組んだ遷移域・乱流域のリブレット効果に関する研究成果を取りまとめ, 2 本の査読付き学術論文として出版した. 大山聖教授（JAXA）は 2026 年 1 月に東北大学流体科学研究所を訪問し, 研究の進捗確認および今後の方針について打合せを行った.

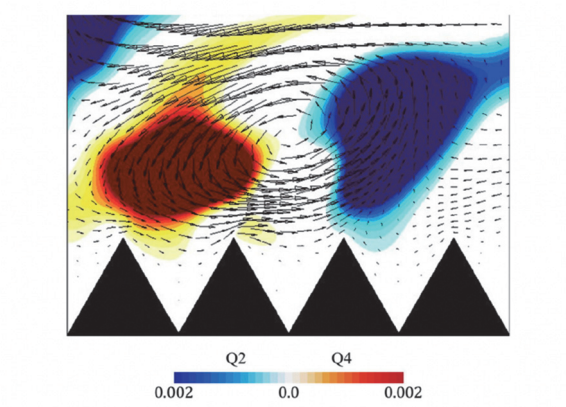


図 1：Instantaneous Q2 and Q4 events over the riblet surface with s = 18 at M_∞ = 0.2.
（図は論文 [2] より引用）

3. 研究目標の達成状況

申請書に記載した「予想される成果」，すなわち圧縮性流れ中のリブレット表面加工が翼型（および平板）の性能に与える影響とそのメカニズムの解明，ならびに効果的なリブレット設計指針の取得については，概ね達成した．特に，遷移域〜乱流域におけるリブレット効果に関する研究成果が 2 本の査読付き学術論文（日本航空宇宙学会論文集, Journal of Aircraft）として出版されており，圧縮性流れにおける最適溝幅の明確化および抵抗低減メカニズムの解明を通じて，実機への応用に向けた設計指針が示された．

4. まとめと今後の課題

本研究では，数値流体シミュレーション（DNS）を用いて，圧縮性流れ中における等辺三角形断面リブレットの粘性抵抗低減効果を明らかにした．マッハ数 0.85 の圧縮性流れにおいて最大約 11%の抵抗低減が達成され，また，マッハ数の増加に伴ってリブレット面上での ejection・sweep 強度が顕著に低下することが抵抗低減率向上のメカニズムであることを解明した．圧縮性流れ条件における最適溝幅は非圧縮流れ条件で最適化した値とは異なることを示し，実飛行条件に対応したリブレット設計の重要性を指摘した．今後の課題は，本研究で得られた知見を実際の航空機の空力設計に役立てることであり，JAXA 研究員として引き続き研究を展開している金子賢人氏らによる実機への応用研究が期待される．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] 金子 賢人, 大山 聖, 焼野 藍子: 遷移域におけるリブレットのはたらき, *日本航空宇宙学会論文集*, 73 (2) (2025), pp. 33-41, doi: 10.2322/jjsass.73.33.

[2] K. Kaneko, A. Oyama, A. Yakeno: Viscous Drag Reduction Effect of Riblets in Compressible Flow, *Journal of Aircraft*, Article in Advance (2026), pp. 1-9, doi: 10.2514/1.C038631.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

なし

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project Code	J25I073
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Nano-micro
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Hybridization of Nanocellulose with Silver Nanoparticles for the Fabrication of Antibacterial Filament Composites by a Field-Assisted Flow Focusing Method

Anthony B. Dichiara*†, Dylan D. Edmundson*
Hidemasa Takana**††, Wakana Hira**
*School of Environmental & Forest Sciences, University of Washington, U.S.A.
**Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The overall objective of this project consists of producing macroscopic filaments comprising aligned cellulose nanofibrils (CNFs) decorated with silver nanoparticles (AgNPs) by refining a previously established continuous field-assisted flow-focusing process.

2. Details of program implement

In this optimized configuration, as-prepared aqueous Ag@CNF dispersions (0.5 wt.%) are introduced at a flow rate of 180 mL·h^{-1} into a microfluidic channel equipped with copper electrodes positioned at regular intervals. The process integrates two distinct alignment mechanisms to ensure high structural order. First, hydrodynamic extensional and shear forces are generated by narrowing the channel cross-section from 9 to 1 mm^2, which actively stretches and aligns the CNFs along the flow direction. This streamlined design simplifies previous architectures by eliminating redundant extensional flows and auxiliary pumping systems, thereby reducing capital costs and facilitating industrial scale-up. Second, dielectrophoresis is induced by a transverse AC electric field to rotate and orient the polarizable surfaces of the nanofibrils. The electric field is applied both before and after the channel contraction. The upstream field provides initial pre-alignment of the dispersed CNFs, while the downstream field serves to preserve this orientation against rotational Brownian motion until the coagulation zone. As the highly aligned Ag@CNF core stream enters the acidic bath (1 mol·L^{-1} HCl), rapid protonation of the CNF carboxylate groups triggers a sol-gel transition, effectively locking the induced anisotropy into the solid filament. The resulting filament thread is continuously extruded at a rate of 0.5 cm·s^{-1} and dried at room temperature prior to characterization. The scalability and operational stability of this assembly platform are demonstrated by the production of continuous, macroscopic Ag@CNF filaments reaching lengths of 25 cm.

3. Achievements

The mechanical performance of as-prepared Ag@CNF filament composites was evaluated by tensile testing at a 0.5 mm·min^{-1} drawing rate using a Shimadzu EZ-SX uniaxial tester fitted with a 1-N load cell (**Figure 1**). These results reveal a significant synergistic enhancement in mechanical properties arising from the dual influence of Ag nanoparticle incorporation and electric field-induced alignment. In the absence of electric field (0 kV), increments in Ag content from 0 to 4.2 wt.% led to a 38% increase in tensile strength and a 42% gain in elastic modulus (**Figure 1a**), demonstrating that

Ag addition alone effectively reinforces the nanocellulose matrix. This simultaneous stiffening and strengthening was accompanied by a concomitant improvement in toughness, which rose from 2 MJ·m^{-3} for pure CNF filaments up to 3 MJ·m^{-3} for the Ag@CNF composites. Such improvements are attributed to the reduced suspension viscosity at higher Ag loadings, which facilitates more efficient sheath flow-induced alignment and densification during the assembly process.

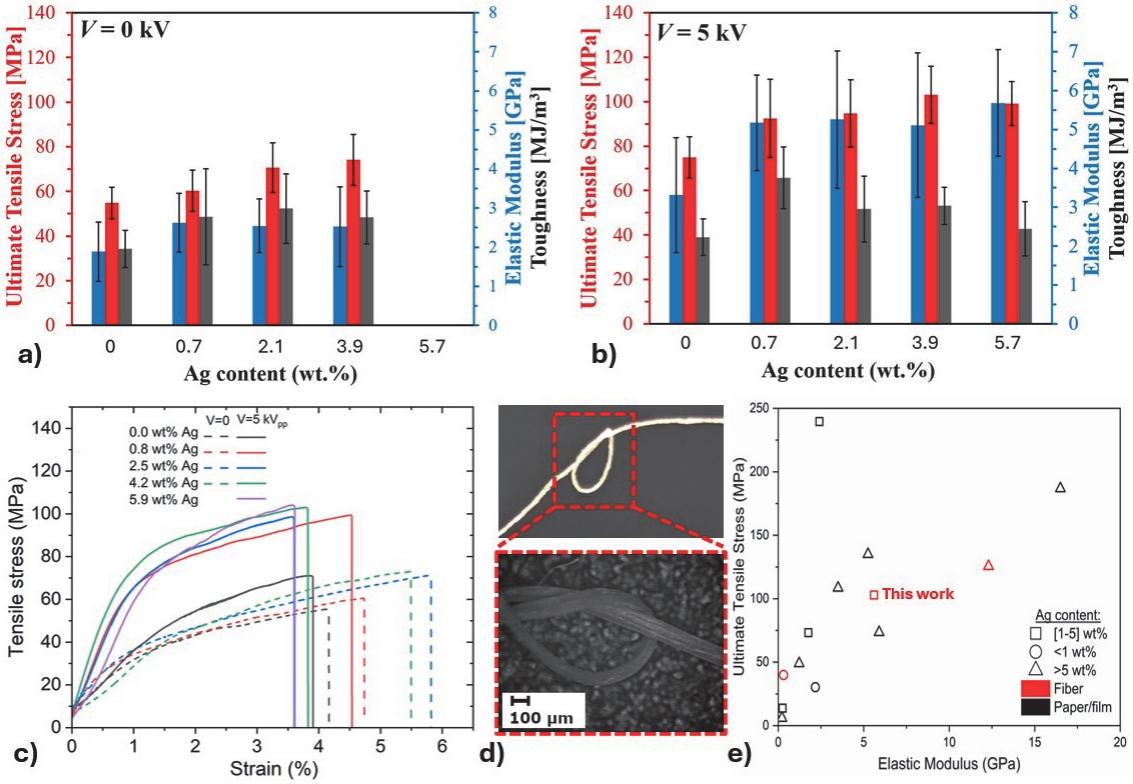


Figure 1. *Ultimate tensile strength, elastic modulus, and toughness of filaments nanocomposites fabricated as a function of Ag content in the (a) absence (V = 0 kV) and (b) presence (V = 5 kV) of a transverse AC electric field. Note the expanded compositional range enabled by the electric field, allowing for successful fabrication at 5.9 wt% Ag.* ***(c)*** *Representative tensile stress-strain curves illustrating the transition from field-free (dashed lines) to field-assisted (solid lines) assembly across various Ag loadings.* ***(d)*** *Photograph (top) and optical micrograph (bottom) of a macroscopic filament subjected to a tight knot, demonstrating high flexibility and mechanical integrity without crack formation.* ***(e)*** *Comparison of the ultimate tensile stress and elastic modulus of the present Ag@CNF filaments with state-of-the-art Ag-containing nanocellulose-based fibers and films reported in the recent literature.*

The mechanical advantages of Ag incorporation were markedly furthered upon the application of a 5 kV AC electric field (**Figure 1b**). Under these conditions, the fortifying efficiency of the Ag nanoparticles was significantly amplified: the same compositional increments yielded a 79% gain in elastic modulus, nearly doubling the improvement observed in field-free samples. Across the entire range of Ag concentrations, filaments fabricated under an electric field systematically exhibited superior mechanical performance compared to their non-field-assisted counterparts. Critically, the application of an electric field expanded the processable compositional space, enabling the successful fabrication of filaments with Ag loadings as high as 5.9 wt%. In contrast, compositions exceeding 4.2 wt% Ag prepared without field assistance lacked sufficient

structural integrity for handling and consistently fractured during the transfer from the acidic bath to the drying stage. The representative stress-strain curves in **Figure 1c** corroborate this transition, where the shift from dashed lines (0 kV) to solid lines (5 kV) depicts a pronounced increase in both the slope and peak stress. Notably, while the electric field alignment significantly enhances stiffness and strength, the filaments maintain a high degree of ductility, with elongation at break values remaining within the 3.5% to 4.5% range. The filaments prepared with electric field assistance achieved performance levels far exceeding those observed with either Ag addition or electric field alignment alone. While the application of an electric field to pure CNF filaments increased tensile strength from 54 MPa to 75 MPa and stiffness from 1.9 GPa to 3.2 GPa, the combination of Ag and the electric field triggered a much more substantial enhancement, with tensile strength nearly doubling to 105 MPa and stiffness tripling to 5.7 GPa. This pronounced synergy is attributed to the higher polarizability of Ag@CNF hybrid species, which promotes a more robust dielectrophoretic orientation. When integrated with the improved sheath flow orientation at elevated Ag contents, this dual-alignment strategy yield composites with exceptionally dense and tightly packed structures aligned parallel to the filament axis. The practical mechanical integrity and flexibility of these high-performance filaments were further demonstrated by their ability to be bent and knotted without the formation of cracks (**Figure 1d**). Finally, this performance was contextualized by comparing the ultimate tensile stress and elastic modulus against reported values for various Ag-containing nanocellulose-based fibers and films (**Figure 1e**). The filaments developed in this study exhibit a mechanical profile that is highly competitive with state-of-the-art bio-based materials, positioning this refined flow-focusing process as a viable route for the high-throughput manufacturing of structural functional composites.

4. Summaries and future plans

The research outcomes are being summarized in a high-impact peer-reviewed publication combining this year's mechanical performance with last year's antimicrobial results. Future work includes incorporating inexpensive lignocellulosic nanofibrils into the filament composition to conduct a thorough cost performance analysis for sustainable textile and wearable electronic applications.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] A. B. Dichiara, D. D. Edmmundson, W. Hira, Y. Kaneko and H. Takana: Scalable and Sustainable Production of High-Performance Bio-Based Fibers, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS5-24.

3) Patent, award, press release etc.
Not applicable

課題番号	J25I074
区分	一般公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2025.4 ～ 2026.3
継続年数	1 年目

固体表面ナノバブルと表面特性の分子動力学的解析
Molecular Dynamics Study of Nano-Bubble on Solid Surface and Surface Property

城ノ園 優佑*，津田 伸一**
永島 浩樹***†，徳増 崇****††
*東北大学，**九州大学工学研究院
琉球大学，*東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は，固液界面ナノバブルを工学的に制御する指針を得ることである．固体表面上のナノバブルは流体の摩擦低減効果，固体表面の伝熱制御，摩擦の初期現象の工学的解明に重要な役割を果たすと考えられており，その存在が明らかにされて以降，実験，シミュレーション，理論についての研究が行われている．昨年度は，固体壁面の形状が固液界面ナノバブルの安定性と形状に及ぼす影響について，三相界線における微視的な力学バランスに着目し解析を行った．巨視的バブルの場合，三相界線での力学バランスは Young の式により各相関の表面張力と接触角を用いて記述されるが，この Young の式が固体表面のナノバブルのような微視的な三相界線においても成立するかは十分には明らかにされていない．固体表面のナノバブルの形状変化などは，三相界線における微視的な力学バランスが変化することで引き起こされると考えられるため，壁面の形状とナノバブルの三相界線における微視的な力学的関係を明らかにすることを目標とした．

2. 研究成果の内容

本研究の分子動力学法用いた解析では，壁面に凹みを一つ作成し，その凹み深さと凹み幅を変化させて行なった．また，密度分布より算出した見かけの接触角と Young の式から算出した接触角を比較した．Young の式で用いた各相関の表面張力は，計算領域を微視的領域に分割し各微小領域内の圧力テンソルから Bakker の式と Young-Laplace の式より算出した．その結果，密度分布より算出した見かけの接触角と Young の式から算出した接触角の差は，凹みにナノバブルが収まる場合より凹みに収まらない場合の方が小さいことが確認された（図 1）．また，表面張力については水平，垂直成分の表面張力(γ_{SL}, γ_{SG})と γ_{LG} から算出される成分($\gamma_{LG}\cos\theta_d, \gamma_{LG}\sin\theta_d$)に差が生じることが確認され，力学的バランスが釣り合うと考えると，ナノバブル内部方向に向かって力が作用する必要があると分かり，これがピニング力である可能性が示唆された．しかし，主応力解析を行ったところ，ピニング力は観測できなかった．現在は，凹み幅および凹み深さをより細かく変化させた計算を実施し，断面積や曲率といった指標とナノバブルの形状・安定性との関係を系統的に解析している．特に，ナノバブルが凹みに収まるか否かの境界条件や，曲率半径・接触角・内部圧力といった物理量の変化に着目することで，構造誘起的なガス集積機構の定量的理解を目指している（図 2）．

本研究は，定期的に研究集会を開催している．昨年度は，4 月 10 日，6 月 23 日，11 月 18 日の計 3 回の集会を開催し，進捗状況の共有及び結果に対する議論を行った．

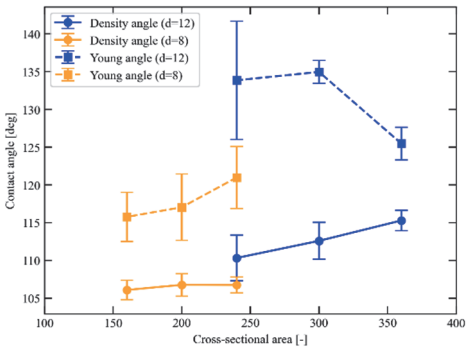


図 1：密度分布から求めた接触角と Young の式から求めた接触角の比較．d は凹み深さ．

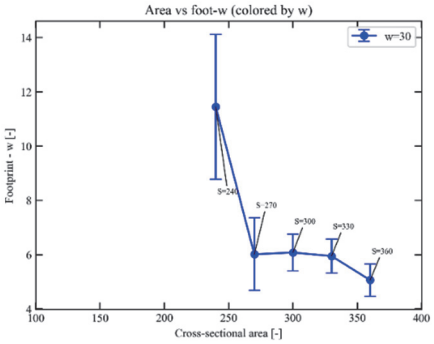


図 2：凹み深さを変化させた際のフットプリント径と凹み幅の差．

3. 研究目標の達成状況

昨年度の結果より，凹み構造の形状に応じて，三相界線における力学的バランスが大きく変化することが分かった．特に，凹みに収まらない場合には Young の式から求めた接触角と密度分布から求めた見かけの接触角に差が見られるものの，凹み断面積の変化に対する接触角の変化は比較的小さく，凹み構造の影響は限定的であると考えられる．一方で，凹みに収まる場合には両者の差が大きく，単純な表面張力のつり合いでは説明できない力学的差異が確認された．さらに，主応力解析の結果，局所的なピニング力は確認されず，構造によるガス分子の集積がナノバブルの安定化に寄与している可能性が示唆された．これらの結果は，固液界面ナノバブルの安定性に対する構造の役割を明らかにするものであり，本研究の目的達成に向けて重要な進展が得られていると考えている．

4. まとめと今後の課題

昨年度の研究結果より，固体壁面の凹み構造に応じてナノバブルの形状が変化し，これらの形状に応じて三相界線における力学的バランスが変化し，凹みに収まる場合には単純な表面張力のつり合いでは説明できない挙動が見られた．さらに，主応力解析の結果，局所的なピニング力は確認されず，構造によるガス分子の集積がナノバブルの安定性に寄与している可能性が示唆された．今後は，凹み構造を細分化した計算を行い幾何構造と力学的バランスの関係を明らかにするとともに，壁面温度の変化がナノバブルの安定性に与える影響についても検討し，固液界面ナノバブルの安定条件および制御指針の確立を目指す．

5. 研究成果　研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Y. Jonosono, S. Tsuda, H. Nagashima, and T. Tokumasu, Molecular Dynamics Study of the Effect of Concave Interfaces on the Shape and Stability of Nanobubble, *9th International Conference on Micro and Nano Flows, MNF 2025*, September 2025, Edinburgh, M005.

[2] Y. Jonosono, S. Tsuda, H. Nagashima, and T. Tokumasu, Molecular Dynamics Study of Nano-Bubble on Solid Surface and Surface Property, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-53, pp. 153-154.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I075
区分	一般公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	3 年目

含有金属成分の自己滲出作用を利用した Ag および Cu 含有炭素膜の抗菌作用の研究

Research on the Antibacterial Effect of Ag- and Cu-containing Carbon Films using the Self-exudation Effect of Contained Metal Components

後藤　実*†，武田　翔****

伊藤 耕祐***，内一 哲哉**††，三木 寛之****

*宇部工業高等専門学校機械工学科，**東北大学流体科学研究所

***日本大学工学部，　****石巻専修大学理工学部

†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

高い抗菌・抗ウィルス性を示す銀（Ag）および銅（Cu）などの軟質金属（SMe）と高い耐摩耗性を示すダイヤモンドライクカーボン（DLC）をナノ構造複合化した SMe/DLC ナノコンポジット膜（SMe-DLC）を，SMe-DLC と高い付着強度を示すポリイミド（PI）テープに成膜することで，SMe の抗菌性を必要な箇所に必要な時に簡単に付与することができ，また，その抗菌性が低下した場合は簡単に貼り替えることが可能な高耐久性抗菌テープの実現を目指している．昨年度までの研究で同一 SMe 濃度においては Ag-DLC の方が Cu-DLC よりも高い抗菌性を示すことから，本年度の目的は，1）Ag-DLC を市販の粘着剤付 PI テープ上に成膜し，2）人の手指を模擬した軟質ゴムとの摩擦による大腸菌に対する抗菌性能の変化を明らかにする．

2. 研究成果の内容

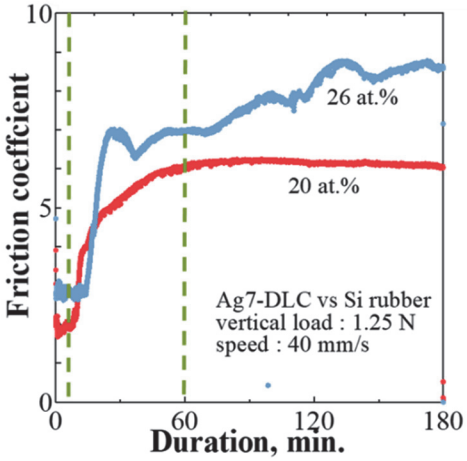


図 1：Ag-DLC 付 PI テープとシリコンゴムの摩擦係数推移（1.2 N, 40 mm/s）

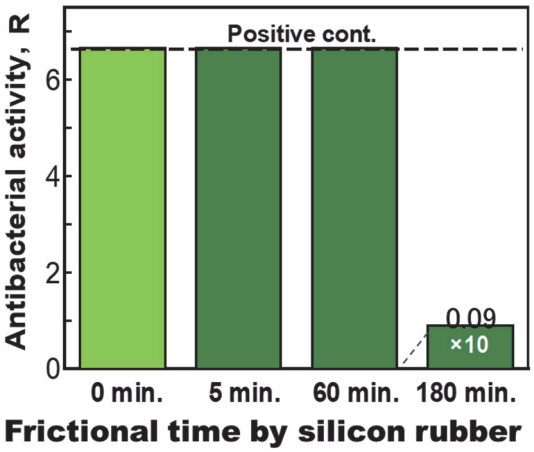


図 2：シリコンゴムとの摩擦時間と抗菌活性値 R の関係

本年度は Ag 含有量 26±6at.%の Ag-DLC を，同心円複合ターゲット（CCT）を使用した

RF マグネトロンスパッタ法により 450 - 650 nm の平均膜厚で PI テープ上に製膜し，直径 6 mm 長さ 25 mm のシリコンゴム円柱で摩擦した時の摩擦時間と大腸菌（W3110C）に対する抗菌性能の変化を，JIS Z2801・ISO 22196 に準拠した抗菌性の定量評価指標である抗菌活性値 R をもちいて評価した．摩擦試験時間に対する摩擦係数推移の例を図 1 に，摩擦開始から 5，60，180 min.までの摩擦時間と抗菌活性値 R の関係を図 2 にそれぞれ示す．摩擦試験条件は，垂直荷重 1.2 N，平均摺動速度 40 mm/s で，摩擦範囲は 25 × 25 mm² であり，抗菌性評価範囲は摩擦範囲内の 20 × 20 mm² である．摩擦開始直後は摩擦界面に十分な Ag が存在することにより摩擦係数も低く抗菌活性値 R も未摺動時と同等の R = 6.8 程度の状態が試験開始 60 min.まで続くが，試験終了の 180 min.時点では R 値は抗菌性が認められない R < 2 となった．摩擦試験後の Ag-DLC およびシリコンゴム摩擦面をそれぞれ光学顕微鏡で観察した結果，Ag-DLC 上にはニュートンリング様の干渉縞が観察され，シリコンゴム摩擦面には明確な摩耗痕が認められた．180 min.の摩擦により抗菌性が失われた原因は，1）摩耗したシリコンゴムの Ag-DLC 表面への移着により菌液に対する Ag の遮蔽が生じたか，あるいは 2）摩擦により Ag-DLC 表面の純 Ag 濃度が極端に低下したかのいずれかまたは両方の可能性が考えられるが，その解明は次期課題で行う予定である．

3. 研究目標の達成状況

PI テープ上に成膜した Ag を主として SMe-DLC の微生物工学分野における抗菌性能をトライボロジー分野における摩擦特性と融合して定性的・定量的に明らかにしたことで，人と機械が触れ合う接触界面における抗菌・抗ウィルスシステム設計技術確立へ知見を提供し，任意形状の固体表面に対する貼付けと剥離が容易な高耐久性抗菌テープの実現可能性を示すと共に，抗菌性消失の原因究明のための新たな課題発見に至った．

4. まとめと今後の課題

市販の粘着剤付 PI テープ上に SMe 含有量 26±6at.%の範囲の Ag-DLC を成膜し，人の手指を模擬したシリコンゴムとの摩擦特性を明らかにすると共に，摩擦時間の進展に伴う抗菌性能変化を JIS Z2801・ISO 22196 に準拠した抗菌性の定量評価指標である抗菌活性値 R をもちいて評価した．その結果，摩擦開始から 60 min.までは未摺動の Ag-DLC と同等の抗菌活性値 R = 6.8 であったが，180 min.時点では抗菌活性値がほぼ 0 となり，抗菌性能が失われた．抗菌性が失われた原因は，1）摩耗したシリコンゴムの Ag-DLC 表面への移着により菌液に対する Ag の遮蔽が生じたか，あるいは 2）摩擦により Ag-DLC 表面の純 Ag 濃度が極端に低下したかのいずれかまたは両方の可能性が考えられるが，その解明は次期課題で行う予定である．

5. 研究成果

1） 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2） 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] M. Goto, S. Takeda, K. Shimabukuro, H. Miki, K. Ito, T. Uchimoto: Research on the Antibacterial Effect of Ag- and Cu-Containing Carbon Films Using the Self-Exudation Effect of Contained Metal Components, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-75, pp. 208-209.

[2] 藤本 慎平, 山本 賢也, 島袋 勝弥, 後藤 実: 軟質金属 DLC 抗菌テープの軟質ゴムによる摩擦回数と抗菌性能変化，トライボロジー会議 2025 秋 函館，(2025), pp. 709-710.

3） その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I076
区分	一般公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	2 年目

サブ 10μm micro-LED の開発
Development of Sub-10μm micro-LED

寒川 誠二*†，大堀 大介**††
*國立陽明交通大学，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

AR/VR デバイスの高解像度・高輝度ディスプレイ化には，サブ 10μm レベルのフルカラーマイクロ LED の実現が不可欠である．特に赤色マイクロ LED では，AlGaInP 系材料の採用により発光効率の向上が期待されるが，多層構造のエッチング時に生じる GaP キャップ層の過剰なサイドエッチングおよび AlGaInP 層のテーパー形状が，デバイスの微細化と高密度集積を阻害している．本共同研究 2 年目では，中性粒子ビームエッチング（NBE）技術を用い，エッチングガス組成（塩素系，BCl_3混合，HBr 混合）の最適化に焦点を当てる．これにより，赤色マイクロ LED の側壁欠陥を低減し，エッチング異方性とテーパー角を精密に制御する加工技術の確立を目指す．最終的には，低電流密度域でも高外部量子効率（EQE）を維持するサブ 10μm 赤色マイクロ LED の実現，および VR/AR 向け次世代ディスプレイへの貢献を目的とする．

2. 研究成果の内容

本研究 2 年目では，赤色マイクロ LED の微細化および高効率化に向けた AlGaInP 系多層構造の側壁加工特性を，中性粒子ビームエッチング（NBE）を用いて解明した．40℃以下の低温条件が GaP キャップ層のサイドエッチング抑制に有効であることが示されたが，その条件下では直下の AlGaInP MQW 層でテーパー形状が形成され，実質的なメササイズ増大による高密度集積が阻害される課題が残されていた．本報告では，エッチングガス組成の最適化（塩素系，BCl_3混合，HBr 混合）による側壁形状制御に関する成果を報告する．

まず，Cl_2および Cl_2/BCl_3 NBE を用いた加工特性を 40℃条件下で比較評価した．BCl_3の添加により，AlGaInP 層の側壁テーパー角は 40.8°から 49.9°へ改善され，垂直性が向上した．これは，BCl_3が反応性塩素種の供給を促進し，反応生成物の揮発を活発化させるほか，Al 系層表面の酸化物（AlOx）の除去を促進するためと考えられる．一方で，BCl_3混合は GaP 層のサイドエッチングを促進し，垂直エッチング深さに対するサイドエッチング深さの比が約 2.8 倍増加したため，単独での採用には課題が残った．

次に，GaP 層のサイドエッチング抑制と AlGaInP 層の加工速度向上を両立させるため，HBr ガスの混合効果を検討した．Cl_2/HBr 混合比を 0～100％で変化させてエッチングを行った結果，HBr 混合比の増加に伴い GaP 層のサイドエッチング速度は顕著に低下し，75％以上ではほぼ抑制された（図 1）．同時に，AlGaInP 層のエッチング深さは増加し，加工速度が向上した．側壁形状の解析では，HBr 混合比 47％付近で AlGaInP 層のテーパー角が最大となり，それ以上では減少する傾向が確認された．

これらの加工メカニズムは，反応生成物の揮発性変化によって説明できると考えている．蒸気

圧曲線の評価から，Ga および P の臭化物は塩化物に比べてプロセス室圧力下での沸点が高く揮発性が低下するため，GaP 層のサイドエッチングが抑制された．一方，Al および In の臭化物は塩化物より沸点が低く揮発性が高いため，AlGaInP 層のエッチング速度向上およびテーパー角制御に寄与した．ただし，HBr 混合により側壁表面粗さが増加する傾向も観察された．

これらの結果から，NBE におけるガス組成の最適化，特に HBr の適正混合により，GaP キャップ層の過剰なサイドエッチング抑制と AlGaInP 層の異方性・テーパー角制御を両立させることが可能であることが実証された．本知見は，サブ 10μm 赤色マイクロ LED の高精度メサ形成に直接貢献し，低電流密度域での高外部量子効率（EQE）維持および VR/AR ディスプレイ向け高密度フルカラーアレイの実現に向けた基盤技術として確立された．

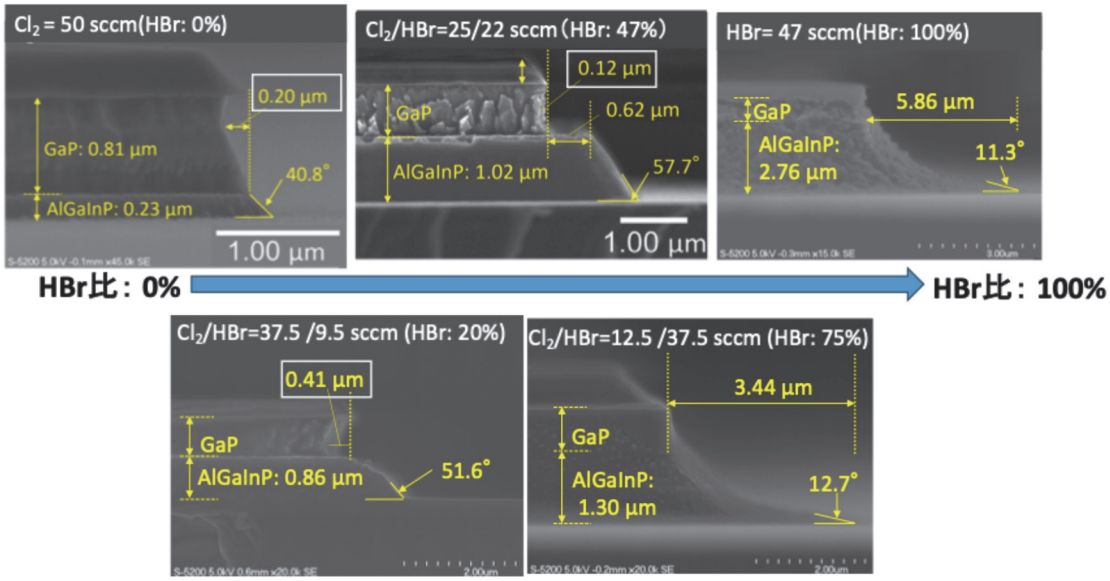


図 1. Cl_2/HBr 混合ガスを用いた中性粒子ビームエッチング（NBE）後の AlGaInP/GaP メサ断面 SEM 像．HBr 混合比を 0%（Cl_2単独），20%，47%，75%，100%（HBr 単独）と変化させた場合の加工形状の違い．

3. 研究目標の達成状況

本研究の 2 年目の目標である「赤色マイクロ LED 向け AlGaInP/GaP 多層構造の側壁エッチング制御技術の確立」は，計画通り達成された．具体的には，Cl_2，Cl_2/BCl_3，Cl_2/HBr 各中性粒子ビーム（NBE）を用いた加工特性を体系的に評価し，ガス組成が側壁形状に及ぼす影響を定量的に解明した．特に，HBr の適正混合により，GaP キャップ層の過剰なサイドエッチング抑制と，AlGaInP 層の異方性向上・加工速度増大を両立させることが実証された．その支配機構についても，反応生成物（塩化物・臭化物）の揮発性差に基づいて明確に説明できた．これにより，サブ 10μm 赤色マイクロ LED の高精度メサ形成に必要なエッチング制御パラメータを確立できた．ただし，HBr 混合に伴う側壁表面粗さの増加については，さらなるプロセス条件の最適化が必要であると考えられる．全体として，2 年間の研究目標は順調に達成され，今後，実際の赤色マイクロ LED 素子作製および発光特性（EQE）評価への移行が現実的となった．

4. まとめと今後の課題

本研究の 2 年目では，中性粒子ビームエッチング（NBE）によるサブ 10μm マイクロ LED 加工技術の開発を順調に推進した．1 年目で確立した HI ベース NBE による青色マイクロ LED の高効率化に加え，本年度は赤色マイクロ LED 向け AlGaInP/GaP 多層構造の側壁加工特性を体系的に

解明した．Cl_2，Cl_2/BCl_3，Cl_2/HBr 各ガス系を用いた NBE 評価により，ガス組成が反応生成物の揮発性に及ぼす影響を明らかにし，GaP キャップ層の過剰サイドエッチング抑制と AlGaInP 層の異方性・テーパー角制御を両立させる最適条件を特定した．特に HBr の適正混合が，側壁欠陥低減と加工速度向上に有効であることが実証され，赤色マイクロ LED の微細化・高効率化に向けたエッチング制御技術が確立された．

今後の課題としては，まず本年度で最適化したエッチング条件を用い，実際のサブ 10μm 赤色マイクロ LED 素子を作製し，低電流密度域における外部量子効率（EQE）および発光特性を評価することである．また，HBr 混合に伴う側壁表面粗さの低減策を検討し，光取り出し効率のさらなる向上を図る．さらに，青色・緑色・赤色の各マイクロ LED を統合したフルカラーアレイの作製および駆動評価を行い，AR/VR ディスプレイ向けに必要とされる高解像度・高輝度・低消費電力特性の実現を目指す．本共同研究の最終段階では，これら知見を統合し，次世代 VR/AR ディスプレイの実用化に貢献する高輝度フルカラーマイクロ LED 技術の確立を完了させる予定である．

5. 研究成果

1） 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

1） 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] D. Ohori, X. Wang, T. Kuribayashi, K. Endo, S. Samukawa, Neutral Beam Etching of InGaN/GaN and AlGaInP for Full-Color Micro-LEDs: Surface Damage Mitigation and Etch Profile Control, *248th ECS Meeting*, (Chicago, IL, USA, Oct. 14, 2025).

[2] S. Samukawa, Emerging Plasma Nanotechnology That Breaks Through the Limitations of Plasma Processing =Neutral Beam Atomic Layer Processing=, *22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, (2025), OS3-6 (Invited).

[3] 栗林 高大，大堀 大介，王 学論，遠藤 和彦，寒川 誠二，塩素系中性粒子ビームによる AlGaInP 赤色マイクロ LED に向けた AlGaInP 側壁加工特性，第 73 回応用物理学会春季学術講演会, (2026), 16a-W9_326-6.

2） その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J25I078
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

表面修飾ナノ材料／媒体間のナノ・メゾスケール界面現象に関する研究

A Study on Nano/Mezo-scale Interfacial Phenomena between Surface-modified Material and Dispersed Media

久保 正樹*†，小宮 敦樹**††，菊川 豪太**，斎藤 高雅*，佐藤 悠都*，黒沢 陽一朗*
*東北大学大学院工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

ナノ粒子を溶媒中に分散したナノフルイドおよびナノ粒子を高分子中に内包したナノコンポジット材料は，バルク体とは異なる特異な性質を発現することから，広範な分野での応用が期待されている．これらのナノ材料では，媒体中におけるナノ粒子の空間構造が機能を左右するため，精緻な構造設計手法の確立が必要である．ナノ粒子表面への有機分子修飾は，媒体中においてナノ粒子を分散安定化する手法として有効である．表面修飾はナノ粒子と媒体間の界面親和性を向上させるため，目的とするナノ粒子の空間構造を得るには粒子・修飾鎖・媒体の適切な選定が重要である．

混合溶媒は，混合比や溶媒種によって分散安定性を効果的に調整できるため，ナノ粒子製造プロセスにおける分離精製や構造形成に利用される．したがって，界面構造に及ぼす溶媒組成の影響を明らかにすることが重要である．

本研究では，表面修飾ナノ粒子を用いた各種材料の製造プロセスの設計・最適化に資するため，表面修飾ナノ粒子と媒体間とのナノ・メゾスケール界面現象を解明することを目的とする．

2. 研究成果の内容

本研究では，表面修飾有機分子の構造ならびに作用を厳密に解明するために，分子スケール・粒子スケールシミュレーションを組み合わせた解析手法の開発を目標としている．本年度は，粒子スケールシミュレーションに必要な情報の獲得を志向して，分子動力学シミュレーションによる表面修飾ナノ粒子/分散媒界面現象の解明を行った．特に，実用系において重要となる混合溶媒系に着目して検討を行った．

ナノ粒子表面の一部を模擬した表面修飾固体平板上に溶媒膜を配置した界面系を対象とした．固体には表面を水酸化した α-Al_2O_3 (0001)，修飾鎖にはデカン酸を用い，表面修飾率は 50% (2.4 分子/nm^2)とした．混合溶媒には粒子に対する良溶媒としてヘキサン，貧溶媒としてエタノール，1-プロパノールを用いた．混合溶媒中のアルコール体積分率を種々変更した．温度は 300 K，圧力は 1 MPa で制御した．計算には LAMMPS を用いた．

図 1 にアルコール体積分率 60 vol%でのデカン酸修飾 Al_2O_3 と混合溶媒との界面近傍における界面垂直方向の質量密度分布および側面図を示す．いずれの系においても溶媒は修飾鎖層に浸透し，アルコールは Al_2O_3 表面に強く吸着した．質量密度分布において，1-プロパノールの吸着ピーク，すなわち Al_2O_3 表面近傍の質量密度分布はエタノール系よりも幅広かった．

これは，1-プロパノールが Al_2O_3 表面に対して垂直に吸着したためである．その結果，修飾鎖層内に溶媒が浸透可能な空間はエタノール系よりも小さかった．

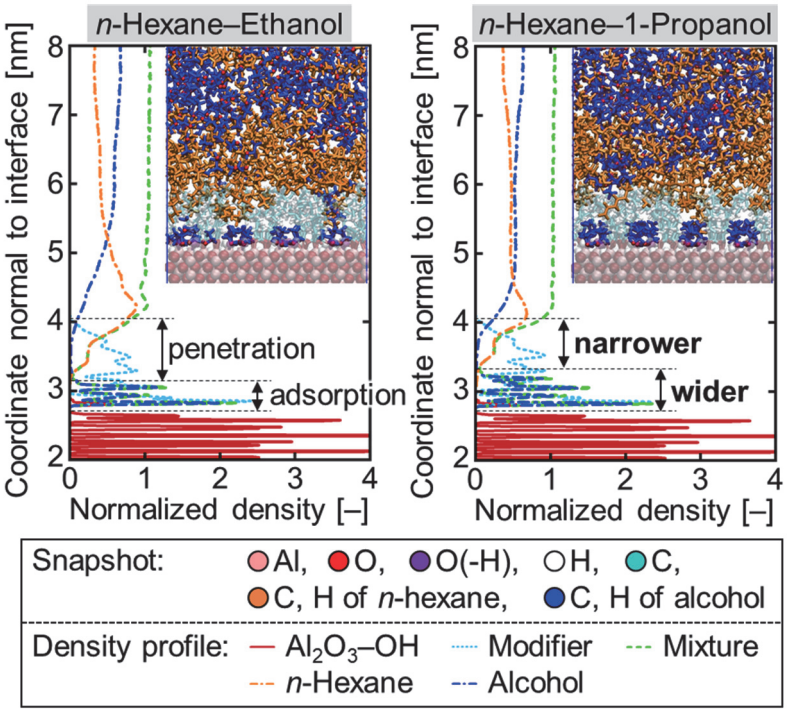


図 1：デカン酸修飾 Al_2O_3/混合溶媒界面近傍における界面垂直方向の質量密度分布および側面図（60 vol%）

修飾鎖層への溶媒の浸透を数値的に評価するため，浸透度P_oを式(1)より計算した．

$$P_{o,i} = \int_0^\infty \rho_{SM-solid}(z)\rho_i(z)dz \tag{1}$$

ここで，$\rho_{SM-solid}(z)$および$\rho_i(z)$は表面修飾固体および溶媒 i 成分の質量密度分布である．P_oは分布の重なりの程度を示す指標であり，P_oの値が大きいほど溶媒が浸透していることを表す．浸透した溶媒の組成を評価するため，アルコールの浸透割合$P_{o,alcohol,}/P_{o,mixture}$を求めた．その際，吸着したアルコールの寄与を除いた．

図 2 に種々の溶媒種におけるアルコール浸透割合とアルコール体積分率との関係を示す．いずれの溶媒種においてもアルコール浸透割合の変化は非線形であった．0-40 vol%において浸透割合は小さく同程度であった．これは修飾鎖層内が親和性の高いヘキサンで満たされているためである．60 vol%において，1-プロパノールの浸透割合はエタノールよりも大きかった．これは，分子中により多くの炭化水素基を有し，修飾鎖との疎水性相互作用が強いためと考える．80 vol%においていずれのアルコールも浸透割合は大きくなった．

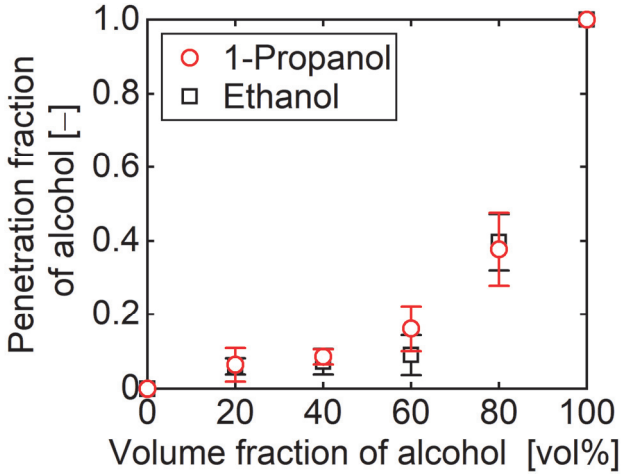


図２：アルコール浸透割合と体積分率との関係

3. 研究目標の達成状況

これまでの検討において，実プロセスで重要となる混合溶媒を対象に，MD シミュレーションを用いて，表面修飾ナノ粒子と混合溶媒間における界面現象を解析し，溶媒の浸透挙動ならびに固体表面への吸着挙動を分子スケールの観点から解明することに成功した．分子スケールの解析結果から，粒子スケールシミュレーションに必要となるナノ粒子表面における表面修飾剤の界面構造，すなわち表面修飾鎖の層の厚さならびに表面修飾鎖の層における溶媒の存在割合などの情報を獲得することが可能になった．以上のことから，分子スケールシミュレーションは目標以上の成果を挙げることができた一方で，分子スケールシミュレーションについては情報獲得に留まったことから，全体を平均的に考慮すると概ね目標達成と見なせると考える．

4. まとめと今後の課題

本研究により，実プロセスにおいて重要な混合溶媒に対して，MD シミュレーションを用いて，表面修飾ナノ粒子と混合溶媒間における界面現象を解析し，表面修飾ナノ粒子を高濃度分散させたナノフルイドを設計するための知見を獲得することができた．そして，粒子スケールシミュレーションに必要となる情報を獲得する手法を確立することができた．

今後は，分子スケールシミュレーションで獲得した情報を，実際に粒子スケールシミュレーションに組み込み，媒体中における表面修飾ナノ粒子の構造形成挙動を解析する．そして，表面修飾ナノ粒子を含有する媒体を用いたナノ材料製造プロセスにおいて，材料中におけるナノ粒子の空間構造とプロセス条件との関係を解明し，これまで試行錯誤的であったナノ材料の構造および機能を，理論的知見に基づいて設計・制御する手法を確立することが望まれる．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Yuto Sato, Yoichiro Kurosawa, Takamasa Saito, Eita Shoji, Gota Kikugawa, Donatas Surblys, Atsuki Komiya, Takaaki Tomai, Masaki Kubo：Evaluation of interfacial affinity between surface-modified metal oxide and solvent mixture using molecular dynamics simulations, *The Journal of Chemical Physics*, 163, (2025), 074702. doi: 10.1063/5.0288662

2) **国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等**

[2] Yuto Sato, Takamasa Saito, Eita Shoji, Gota Kikugawa, Donatas Surblys, Atsuki Komiya, Masaki Kubo: Effect of Solvent Mixture on Interfacial Phenomena between Surface-Modified Metal Oxide and Binary Mixtures of Organic Solvents, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-31, pp. 88-89.

[3] Yuto Sato, Yoichiro Kurosawa, Takamasa Saito, Eita Shoji, Gota Kikugawa, Donatas Surblys, Atsuki Komiya, Takaaki Tomai, Masaki Kubo: Evaluation of Interfacial Structure and Affinity between Surface-Modified Inorganic Solid and Solvent Mixture Using Molecular Dynamics Simulations, *The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2025* (*Pacifichem 2025*), Honolulu, Hawaii, (2025), 4330687.

[4] 佐藤悠都, 斎藤高雅, 庄司衛太, 菊川豪太, Surblys Donatas, 笘居高明, 久保正樹: 表面修飾固体／混合溶媒界面の構造に及ぼすアルコール溶媒種の影響, 化学工学会第 91 年会, 京都, (2026), K113.

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**

（**特許**）該当なし.

（**受賞**）該当なし.

（**マスコミ発表**）該当なし.

課題番号	J25I079
区分	一般公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2025.4～2026.3
継続年数	1年目

金属／誘電体プラズモニックナノ構造の作製とその発光増幅能の検証

Fabrication of Metal/Dielectric Plasmonic Nanostructures and Evaluation of Their Emission Enhancement Properties

木場 隆之*†，大友 琴心*，池田 圭佑*，川村 みどり*，大堀 大介**††，遠藤 和彦**
*北見工業大学工学部応用化学系，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

有機 EL 素子や半導体発光デバイスにおいて，発光スペクトルの制御は，高色純度化，光取り出し効率の改善，および新規光機能の発現に向けて重要である．従来のマイクロキャビティ効果を利用したスペクトル制御では，発光層や周辺有機層の膜厚設計が光学特性と電気特性の双方に影響するため，デバイス設計上の自由度に制約が生じる．

本研究では，金属ナノ構造に由来する局在表面プラズモン(LSP)共鳴と，発光デバイス内のマイクロキャビティモードとの結合を利用し，発光スペクトルを制御するための基盤技術の確立を目的とする．特に，ナノスフィアリソグラフィ(NSL)と酸素プラズマ処理を組み合わせ，構造周期および開口径を制御した金属ナノメッシュ電極の作製プロセスを検討する．

2. 研究成果の内容

本年度は，金属ナノメッシュ電極の作製に向けて，ポリスチレン粒子単層配列をマスクとし，酸素プラズマ処理により粒子径を制御するプロセスを検討した．NSL では，初期粒子径によりナノ構造の周期が決まり，酸素プラズマ処理により粒子径を縮小することで，金属成膜後に得られるナノメッシュ構造の開口径を制御できる．そのため，粒子配列の周期性を維持しながら粒子径を制御することが重要である．

実験では，直径約 500 nm のポリスチレン粒子をガラス基板上に単層配列させ，誘導結合プラズマ装置を用いて酸素プラズマ処理を行った．条件は，圧力 3～4.5 Pa，ICP 電力 100 W を基本とし，処理時間に対する粒子径変化を評価した．PS500 粒子に対して 7 分間の酸素プラズマ処理を行うことで，粒子径が公称 500 nm から約 350 nm まで縮小し，六方最密配列の周期性が維持されることが確認された（図１）．一方で，長時間処理では粒子配列に乱れが生じる場合があり，プラズマ照射中の温度上昇の影響が示唆された．そのため，冷却時間を挟んだ段階的エッチングにより，粒子径制御性と配列均一性の両立が可能となる[1].

さらに，粒子径を制御したポリスチレン粒子配列をマスクとして，抵抗加熱真空蒸着により Ag を 50 nm 成膜し，リフトオフにより Ag ナノメッシュ構造の形成を試みた．その結果，特定の試料では SEM および AFM 観察により規則的なメッシュ構造が確認された（図２）．また，透過スペクトルでは 300 nm 付近の Ag に由来するピーク，400～600 nm 領域の透過率低下，および 600 nm 以長での透過率の立ち上がりが見られ，FDTD シミュレーションと共通する特徴が確認された．これらの結果から，酸素プラズマ処理による粒子径制御を用いて，光学応答を有する Ag ナノメッシュ構造を作製できる見通しを得た．

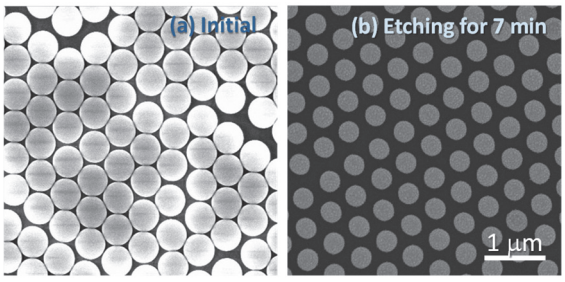


図 1：プラズマ処理前後の PSt ビーズ配列

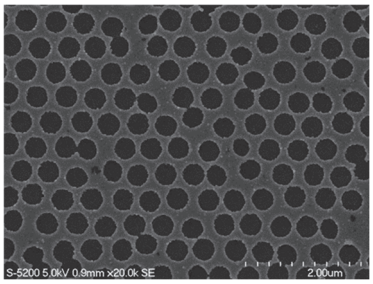


図 2：リフトオフ後の Ag ナノメッシュ構造

また，本共同研究の枠組みでは，熱処理により形成される Ag/WO_3/Ag プラズモニックナノキャビティ構造の断面 SEM 評価も実施した．熱処理によって上部 Ag 層をナノ粒子状に変化させ，下部 Ag 層を反射ミラーとして保持する構造について，断面観察により層構造の保持を確認した．この構造と有機 EL の緑色発光材料である Alq_3 との組み合わせにおいて，ナノ構造無しのものに対して 10 倍を超える PL 増強が得られた[2].

3. 研究目標の達成状況

申請時の目標は，金属ナノメッシュ電極の形成に向けた構造制御プロセスを確立し，発光デバイス応用に向けた基盤を得ることであった．本年度は，PS500 粒子配列に対する酸素プラズマ処理により粒子径制御が可能なことを確認したが，処理条件に関しては最適化の余地が残る．さらに，処理後のビーズ配列をマスクとした Ag ナノメッシュ形成においても，発光デバイスへの実装には構造均一性と再現性の改善が必要である．したがって，本年度は，粒子径制御から Ag ナノメッシュ形成および光学特性評価まで進展したものの，デバイス応用に向けたプロセス確立にはなお課題が残る．研究目標に対する達成度は約 70%である．

4. まとめと今後の課題

本研究では，酸素プラズマ処理により PS ビーズ径を制御し，Ag ナノメッシュ構造を形成できることを確認した．SEM，AFM および透過スペクトル評価により，特定条件下で規則的なメッシュ構造と光学応答が得られた．一方で，構造均一性と再現性には課題が残るため，今後は温度管理，Ag 成膜条件，リフトオフ条件を最適化し，発光デバイス応用へ展開する．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] T. Kiba, K. Ikeda, M. Kawamura, A. Higo, D. Ohori, K. Endo: Plasmonic Coupling-Driven Spectral Engineering in Metal Nanostructure-Integrated Light-Emitting Devices, *International Conference on Flow Dynamics 2025*, Sendai, (2025), OS3-9.

[2] S. Takahashi, Y. Takahashi, T. Kiba, M. Kawamura: Optimization of Annealing Conditions for Fabricating Ag/WO_3/Ag Plasmonic Nanocavity Structures, *TACT 2025 International Thin Films Conference*, Taipei, (2025), B-P-324.

[3] K. Ikeda, T. Kiba, M. Kawamura, A. Higo: Optical Characteristics of Metal Nanohole Arrays Using Electron Beam Lithography with Character Projection, *TACT 2025 International Thin Films Conference*, Taipei, (2025), B-P-95.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project Code	J25I080
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Fundamentals
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Control of Wake of Wind Turbines based on Instability of Helical Vortices

Yuji Hattori*†, Daisuke Nishiyama*, Ivan Delbende**††, Maurice Rossi**
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Sorbonne Université
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

風力発電は再生可能エネルギーとして改良と普及が期待されるものである．特に我が国では風況がよくないため，風力発電の要素技術の発展により一層の工夫が求められる．ウィンドファームでは最前列の風車が生み出すパワーに比べ，その後流にある風車のパワーは上流側の風車が作る流れ=速度欠損の影響で 40～60%に落ちる．本研究は，らせん渦の不安定性を利用して乱流遷移を促進することにより，風車後流の速度回復を行うためのらせん渦の効果的な制御法を開発することを目的とする．研究代表者はこれまでらせん渦のダイナミクスを，物理的素過程としての不安定性に基づいて体系的に解明する研究を行い，渦の切りつなぎや渦核の乱流化のような非線形ダイナミクスが乱流遷移と後流の性質を支配していることを明らかにしてきた．これまでに得たらせん渦ダイナミクスの物理素過程の詳細な理解に基づいて，らせん渦を速く崩壊させ，平均流速を大きくする制御法を，実機に実装可能なものとして確立する．これにより，後流の風車のパワーを向上させ，疲労を軽減し，風力発電の効率向上に貢献する．

2. Details of program implement

2.1 Shortwave Instability of Helical Vortices with Swirl

We investigate the linear instability of helical vortices characterized by near-Gaussian axial vorticity and velocity. The primary goal is to identify and characterize instability modes—specifically elliptical and curvature instabilities—that originate from resonances between Kelvin waves and deformations in the vortex core.

We developed a numerical framework to solve the linearized Navier-Stokes equations at a significantly lower computational cost by exploiting the helical symmetry of the flow.

(1) Base flow (HELIX code): Generates quasi-equilibrium states for helical vortices with specific parameters: reduced pitch (L/R), core size (a_0/R), and swirl (W_0).

(2) Stability analysis (HELIKZ code): Obtains the growth rate (σ), frequency (ω), and mode structure of the dominant instabilities.

(3) Validation: Results were compared against fully three-dimensional (3D) direct numerical simulation (DNS), which is more computationally intensive but serves as a "stringent check".

The key findings are:

(a) Identification of instability modes: We successfully captured two distinct short-wave mechanisms:

1. Elliptic Instability: Driven by the resonance of Kelvin waves (typically m=0 and m=2) excited by the elliptical deformation of the core.

2. Curvature Instability: Stemming from resonances (typically m=-1 and m=0) caused by the radial shift of the vortex core due to curvature.

(b) Numerical Precision: We highlight that accurately matching frequencies and growth rates requires high grid resolution. Using Richardson extrapolation on multiple mesh sizes, they achieved a close quantitative match (within 1% discrepancy) with the 3D DNS results.
(c) Complexity of Helical Flows: Unlike vortex rings, helical vortices are influenced by torsion, making the instability sensitive to the helical pitch and the direction of axial flow.

2.2 Nonlinear Dynamics and Turbulent Transition of a Helical Vortex
We focus on the nonlinear process of short-wave instability growth in a helical vortex. While linear instabilities are known to promote turbulent transition, the nonlinear stages—specifically for short-wave instabilities sensitive to local structures—are not yet fully understood. We aim to clarify whether these instabilities lead to a total collapse of the vortex core or reach a state of saturation.
We use direct numerical simulations (DNS) conducted in three stages:
1. Base flow generation: Obtaining a quasi-steady helical vortex with a Gaussian core distribution
2. Linear stability analysis: Identifying specific short-wave instabilities, particularly the elliptic instability (-2, 0, 2)
3. Nonlinear DNS: Investigating the evolution of these instabilities by adding initial disturbances of varying amplitudes (A_0) to the base flow.
The key findings are
(a) Initial amplitude effects: The vortex behavior is highly dependent on the initial disturbance amplitude A_0.
(b) For large amplitudes ($A_0 = 10^{-2}$), the total enstrophy shows a sharp peak, indicating a complete collapse of the vortex core and a transition to turbulence.
(c) For smaller amplitudes ($A_0 = 10^{-3}$ to 10^{-5}), the disturbance energy grows but eventually saturates.
(d) Saturation mechanism: Saturation is attributed to viscous diffusion (which thickens the core and breaks the resonance condition) and nonlinear effects that cause a sudden change in the phase difference between Kelvin waves.
(e) Secondary instability: In saturation cases, energy is transferred to specific non-harmonic wavenumbers via triadic resonance, suggesting complex secondary transition scenarios.

3. Achievements

らせん渦の不安定性を利用して乱流遷移を促進することにより，風車後流の速度回復を行うためのらせん渦の効果的な制御法を開発するのが本研究の目的である．そのために，まず実際の風車回転翼に近いらせん渦とハブ渦からなる複合的な渦系の不安定化過程を解明する．得られた物理的素過程の知見に基づいて実際の風車に適用可能な制御法を確立する．

本年度は一般に軸流をもつらせん渦の短波長不安定性を精度よく捉える 2 種類の数値計算方法を開発し，曲率不安定性や楕円型不安定性のモードを捉えることに成功した．また，不安定化後の非線形時間発展の数値シミュレーションを行い，乱流遷移の有無について議論した．

4. Summaries and future plans

一般に軸流をもつらせん渦の短波長不安定性を精度よく捉える 2 種類の数値計算方法を開発し，曲率不安定性や楕円型不安定性のモードを捉えることに成功した．また，不安定化後の非線形時間発展の数値シミュレーションを行い，乱流遷移の有無について議論した．

風車回転翼端渦の制御研究は最近始まったところであるが，渦の不安定性を利用して航空機翼端渦の崩壊を促進する研究は，空港における離発着間隔（飛行安全性上の制限）の短

縮を目的として行われている．しかし，顕著な効果を生み出して実用に至っているものはない．これに対し風車回転翼端渦の場合，らせんに沿う渦管が周期的に隣接し相互作用が強い点が航空機翼端渦との大きな違いである．そのため，長波長不安定性，短波長不安定性，相互作用不安定性がすべて強い．このことは，航空機翼と違って不安定性の利用がうまくいく可能性が大きいことを意味する．理論的には速度欠損を小さくし，速度を 20%回復することでパワーを約 2 倍にできる．そのために物理的素過程の理解を全面的に活かし，効果的な制御法を確立することを最終目標とする．この点で本研究は大きなインパクトの可能性をもつ．

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not Applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Yuji Hattori: Instability and Dynamics of Vortex Rings, Helical Vortices and Hub Vortices (invited), *d'Alembert seminar* at Sorbonne university, Paris, France (2025).

[2] Ivan Delbende, Yuji Hattori, Maurice Rossi: Shortwave Instability of Helical Vortices with Swirl, *Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS16-2, pp. 1163-1166.

[3] Daisuke Nishiyama, Yuji Hattori: Nonlinear Dynamics and Turbulent Transition of a Helical Vortex Disturbed by the Short-wave Instabilities, *Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS16-3, pp. 1167-1169.

[4] Daisuke Nishiyama, Yuji Hattori: Nonlinear processes of short-wave instabilities growing in a helical vortex: saturation and turbulent transition, *78th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, Houston, (2025).

3) Patent, award, press release etc.

Not Applicable

Project Code	J25I081
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Fundamentals
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Study on micro-scale evaporation for heat transfer enhancement

Junnosuke Okajima*†, Henrik Sontheimer**
Tatiana Gambaryan-Roisman**, Peter Stephan**††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Institute of Technical Thermodynamics, Technical University of Darmstadt
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

This project aims to clarify the characteristics of evaporative heat transfer on a micro-scale through the evaporative moving contact line model and to investigate the surface structure to enhance micro-scale evaporation. We understand the evaporation phenomena for the cooling system and develop the surface design strategy.

Additionally, the fundamental aspects of boiling heat transfer are also evaluated. The formation of a microlayer, which is one essential factor of boiling heat transfer, is numerically conducted. We will develop a new model to describe the microlayer formation by collaborating with the numerical simulation in IFS and the experiment in TU Darmstadt.

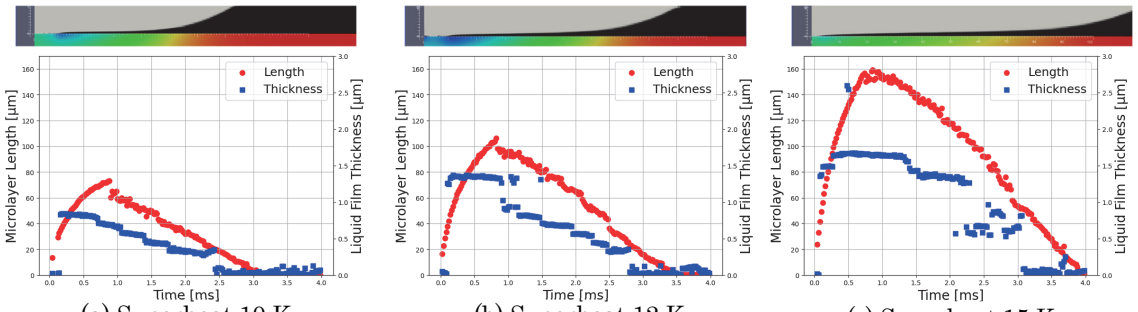
2. Details of program implement

Compared with water and ethanol, the microlayer was rarely observed in the nucleate boiling of the dielectric fluid, such as FC-72. Schweikert et al. measured the length and thickness of the microlayer and their dependence on the superheat and de-wetting velocity at TU Darmstadt. However, the dynamic behavior and evaporative characteristics of microlayer during nucleate boiling have not been discussed yet. Therefore, the objective of this study is to investigate the microlayer formation and its dynamics during the nucleate boiling of FC-72 by numerical simulation.

Figure 1 shows the numerical results obtained at IFS of the evolution of microlayer length and thickness with time during bubble growth for different superheat. In all cases, the microlayer length rises to a maximum and then decreases gradually. In the case of 10 K superheat, the microlayer thickness decreases constantly with the decreasing length. This indicates that the evaporation dominates the microlayer evolution. In the case of 15 K superheat, the microlayer thickness keeps constant for quite some time while its length first increases and then decreases again. This tendency implies that the microlayer evolution is dominated by hydrodynamical effect rather than evaporation. The case with 12 K superheat seems to be in a transitional regime.

3. Achievements

The obtained results contribute to modeling macroscopic wetting behavior and heat transfer on the surface in microscale. Our simulation will expand to a more complex structure; then, the design strategy to enhance the evaporative heat transfer for high-heat-flux cooling will be discussed.



(a) Superheat 10 K (b) Superheat 12 K (c) Superheat 15 K

Figure 1: Snapshots of microlayer and temperature distribution of solid wall at 0.3 ms and time variation of length and thickness of microlayer during bubble growth for different superheat.

4. Summaries and future plans

On nucleate boiling simulation, the reproducing of microlayers in dielectric liquid of FC-72 and the formation characteristics was discussed. The unified theory of microlayer formation between different liquids will be investigated. Thus, our new simulation results provide new insight for understanding the evaporation phenomena in micro-scale. As a next step, we develop the numerical model of the thermal device of vapor chamber. The knowledge of the wetting behavior of liquid on the micro-structured surface can be implemented into the simulation model of a thermal device in the future.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] J. Okajima, H. Ishibashi, K. Ota and P. Stephan: Numerical Study of Microlayer Formation and its Dynamics During Nucleate Boiling of Dielectric Liquid, *Proceedings of Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, (2025), pp. 1280-1281.

[5] T. Akita, P. Stephan and J. Okajima: Evaluation of Wetting and Evaporation Characteristics at 3-Phase Contact Region in Cryogenic Fluids with Moving Contact Line Evaporation Model, *Proceedings of Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, (2025), pp.1668–1671.

3) Patent, award, press release etc

Not applicable.

課題番号	J25I083
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

燃費向上を目指したプロップファンエンジン搭載航空機の統合解析
Integrated Analysis of a Propfan-Engine-Powered Airliner for Improved Fuel Efficiency

千葉 一永*†，阿部 圭晃**††
*電気通信大学大学院情報理工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

燃費を考慮してこなかった航空機の環境適合性向上は，現在の航空機設計の最重要課題である．エンジンの高バイパス比化が最も燃費向上に寄与するため，近年プロップファンエンジン，いわゆるオープンロータエンジンが再注目されている．現エンジンのようなナセルがなく，エンジン周囲の流れと機体とが強く干渉する流れ構造となるため，エンジンと機体との統合解析が必須である．本研究では，これまで培ってきた統合解析環境を転用し，プロップファンエンジンを搭載した航空機周りの流体物理を追究し設計知見を得ると共に，定量的な空力性能を明らかにする．

2. 研究成果の内容

本年度は，エンジン形状を定義し機体統合前に必要な事前検討を網羅的に実施した．エンジンはロータとステータで構成され，ロータを実際に回転させ安定的な解析が実施できることを確認した．この結果を受け，機体との統合解析の実施段階に移行した．最も干渉効果の厳しい着陸状態を想定し，スラットとフラップの展開された NASA CRM 高揚力形態で実施することとし，準備を始めた．

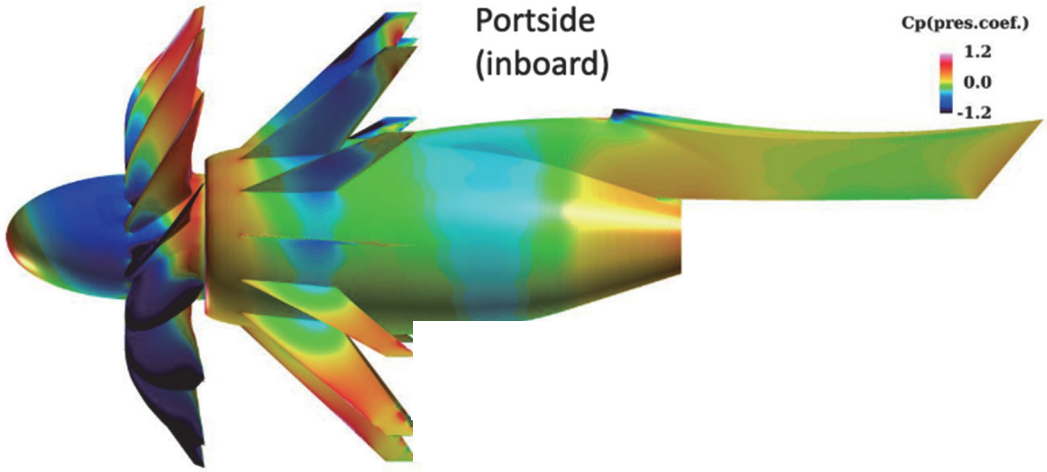


図 1：本研究で想定するプロップファンエンジン単体での回転解析による表面圧力係数分布．

3. 研究目標の達成状況

予定通り，ロータの実回転を考慮した非定常解析を安定的に実施することができた．次年度は，機体との統合解析を進め，目的を達成する計画である．

4. まとめと今後の課題

燃費の劇的向上による環境適合性向上を目指し，オープンロータエンジンを搭載した遷音速航空機の設計を始めた．本年度はオープンロータエンジン単体での実回転解析を安定的に実施できたため，今後はNASA CRM高揚力形態との統合解析を実施し，流体物理の追究，設計知見の獲得，および定量的空力性能の提示，を課題に研究を推進する．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Chiba, K., Mueller, J., Oba, Y., and Abe, Y.: Effects of Engine Rotational Speed on Full Aircraft Cruise Aerodynamic Performance, *Proceedings of the twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-14, pp. 47-49.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project Code	J25I084
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Investigation on Extravasation of Circulatuing Tumor Microemboli by using Microfluidic Platform

Ting-Yuan Tu*†, Kenichi Funamoto**††
*Department of Biomedical Engineering, National Cheng Kung University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Tumor extravasation is a critical step in cancer metastasis and is strongly influenced by both mechanical and geometrical factors within the vascular microenvironment. However, how different flow conditions regulate tumor–endothelial interactions are still not fully understood.

In this study, a tapered vessel-on-a-chip model was developed to investigate the behavior of tumor spheroids under different flow conditions. The aim of this project is to systematically evaluate how flow patterns, including static, oscillatory (rocker-induced), and hydrostatic pressure-driven perfusion (HP flow), affect tumor spheroid invasion under both occlusion and adhesion conditions.

By integrating controlled geometry and flow conditions, this work aims to provide insights into the mechanobiological regulation of tumor extravasation.

2. Details of program implement

This collaborative research project focuses on the development and application of a microfluidic vessel-on-a-chip platform with a tapered geometry to investigate tumor extravasation under spatially varying mechanical environments. Tumor spheroids were introduced into the microfluidic vessel, and their interactions with the endothelial layer were examined under different flow conditions, including static, oscillatory flow, and HP flow, where both occlusion and adhesion behaviors were successfully reproduced. As part of the collaboration with the Institute of Fluid Science, Tohoku University, research progress was presented at the ICFD 2025 conference in an oral session, along with ongoing discussions to explore flow-related mechanisms and experimental design. Overall, this work aims to elucidate how flow conditions and vessel geometry jointly regulate tumor–endothelial interactions during the extravasation process.

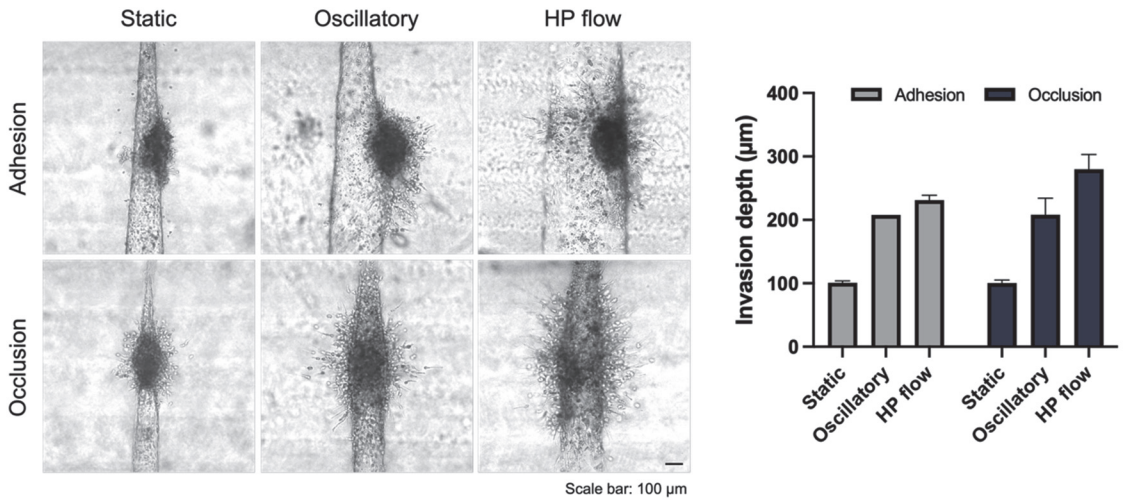


Figure 1: Flow-dependent tumor spheroid invasion behaviors in a tapered vessel-on-a-chip model.

3. Achievements

Tumor spheroid occlusion and adhesion were successfully established in the tapered vessel model under all three flow conditions. Under static conditions, tumor cells exhibited limited invasion, primarily driven by intrinsic motility. In contrast, oscillatory flow resulted in enhanced invasion, characterized by more dispersed and irregular invasion patterns, suggesting that disturbed flow promotes dynamic tumor–endothelial interactions. HP flow led to a more directional and stable invasion behavior.

Although oscillatory flow appeared to induce more extensive invasion based on visual observation, quantitative analysis revealed that HP flow resulted in greater invasion depth, indicating that unidirectional flow may facilitate deeper and more directional invasion through distinct mechanical cues. In addition, increased invasion was consistently observed toward the narrower region of the tapered vessel across multiple samples, highlighting the role of geometric confinement in modulating tumor invasion behavior. Quantitative analysis of invasion depth was performed to systematically compare invasion across different flow conditions.

4. Summaries and future plans

In summary, this study demonstrates that tumor spheroid invasion is regulated by both flow conditions and vessel geometry. While flow enhances invasion compared to static conditions, the invasion behavior varies depending on the nature of the flow, highlighting the importance of local mechanical environments.

Future work will include quantitative analysis of invasion directionality, computational fluid dynamics (CFD) simulations to characterize shear stress distribution, and further validation using unidirectional flow conditions in unidiameter channels. Additional studies will also investigate drug effects and endothelial responses to better understand the mechanisms of tumor extravasation.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Si-Ying Xu, Kazuki Sone, Ting-Yuan Tu, Kenichi Funamoto: Simulating tumor spheroid occlusion and adhesion under flow in a tapered vessel-on-a-chip model, *Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS11-03.

3) Patent, award, press release etc.
Not applicable

Project Code	J25I085
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Fundamentals
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Control of Transonic/High-Speed Boundary Layer Flows

Yuji Hattori*†, Adrian Sescu**††, M. Zamir A. Koshuriyan***
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Department of Aerospace Engineering, Mississippi State University,
***University of York, Department of Mathematics
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

遷音速および超音速境界層の層流制御法を開発することが本プロジェクトの目的である．航空機の高速化は人類の夢であると同時に，今後の航空輸送需要の拡大（20 年間で世界の航空旅客数が現在の約 2 倍となる：国際航空運送協会による予測[2017 年]）を考えるときには必須の解決課題である．近年，SDGs を初めとして環境問題への意識が高まっており，航空業界においても環境負荷の少ない航空機の需要が高まっている．航空輸送により排出される CO2 は，総排出量の約 2% を占め，船舶や鉄道輸送による排出量よりも多い．今後も更なる増加が見込まれるため，早急な対策が必要である．そのために航空機の抵抗を低減することが求められている．遷音速域では空力抵抗の半分以上を粘性抵抗が占める．乱流境界層における粘性抵抗は層流境界層と比較して 10 倍以上となる．そのため，境界層を制御することで乱流への遷移を遅らせる，もしくは乱流境界層における摩擦抵抗を低減することができれば粘性抵抗の低減に繋がると考えられる．

一方，各国で超音速旅客機の開発が進行中であるが，経済性と環境問題への対応を重視するとき，優れた揚抗比の機体を開発することは極めて重要である．超音速機・極超音速機では造波抵抗の低減とソニックブーム対策が優先される結果，機体表面の境界層はさまざまな条件下で存在する．その結果，想定外の乱流遷移が設計との乖離を生むことがある．また摩擦抵抗自体の低減も求められる．そこで求められるのが，高度な層流制御技術である．境界層の乱流遷移の制御には，長年の研究の蓄積がある非圧縮性流れにおいても，未だ数多くの課題がある．超音速境界層の場合には実験的研究が簡単ではないこと，熱環境の影響をより強く受けることなどから，さらに困難な課題を含む．われわれはこの問題に対する制御法を確立することを目的として取り組む．具体的には以下を目標とする：

・遷音速/超音速境界層中のストリーク構造の生成過程の解明
・遷音速/超音速境界層の乱流遷移の制御法のフレームワークの確立
・加熱/冷却，吹き出しによる遷音速/超音速境界層制御の有効性の理論的・数値的解明
・摩擦抵抗または熱輸送を最小化するためのアジョイント法による最適制御法の確立

2. Details of program implement

2.1 DNS Investigation of the Mechanics of Görtler Vortices Breakdown in Hypersonic Flows

We use direct numerical simulation (DNS) to investigate the transition process in hypersonic boundary layers over concave surfaces. The primary goal is to analyze how different wall thermal conditions (adiabatic vs. isothermal) and Mach numbers (Mach 6 and 7) influence the development of Görtler vortices and their subsequent breakdown into turbulence.

(1) Simulations: We employ DNS of the compressible Navier-Stokes equations under the assumption of a calorically perfect gas.
(2) Vortex Initiation: Streamwise vortices are triggered via upstream wall transpiration, creating alternating high- and low-speed streaks that eventually form mushroom-like structures.
(3) Case Studies: Four cases are compared across Mach 6 and 7 with both adiabatic (no heat transfer) and isothermal (constant wall temperature at 300K) wall conditions.
The key findings are:
(a) Thermal Influence on Transition: A significant delay in transition is observed for adiabatic walls compared to isothermal walls. This is attributed to elevated surface temperatures leading to thicker boundary layers with milder velocity and temperature gradients, which suppress instability growth.
(b) Isothermal Destabilization: Thinner boundary layers with steeper gradients on isothermal walls enhance the centrifugal instability, causing earlier breakdown.
(c) Instability Modes: The analysis identifies both sinuous (anti-symmetric lateral oscillations) and varicose (symmetric pulsations) modes. Sinuous modes are found to be more critical in driving early transition due to their enhanced momentum transport.
(d) Energy and Breakdown: For adiabatic cases, transition aligns closely with the peaks of Turbulent Kinetic Energy (TKE). In isothermal cases, breakdown occurs upstream of the TKE peaks due to strong thermally induced instabilities.
(e) Secondary Structures: Adiabatic cases show prominent secondary counter-rotating vortices at the tips of the mushroom structures that detach and merge before full turbulence. This specific pathway was absent in isothermal cases.

2.2: Effect of Wall Temperature and Transpiration on Görtler Vortices in High-speed Boundary Layers
We focus on flow control strategies to mitigate the energy of Görtler vortices and reduce frictional drag. We examine the combined effectiveness of wall temperature manipulation and distributed transpiration (suction/blowing) on vortex development across Mach numbers 3 to 6.
(1) Numerical Algorithm: We use the Non-linear Compressible Boundary Region Equations (NCBRE). This asymptotic approximation is more efficient and robust than DNS or Parabolized Stability Equations (PSE), providing results significantly faster.
(2) Control Parameters: Combined control involves specific wall-normal velocity distributions (transpiration) and surface temperature profiles.
(3) Asymptotic Structure: The flow is modeled across four regions, focusing specifically on Region III, where boundary layer thickness matches spanwise separation and streamwise ellipticity is negligible.
The key findings are:
(a) Vortex Energy Reduction: The application of wall transpiration and temperature control significantly reduces the size and intensity of the "mushroom" structures.
(b) Delayed Formation: Controlled cases consistently show lower vortex energy peaks and a downstream shift in these peaks, indicating a successful delay in vortex formation.
(c) Shear Stress and Drag: A substantial decrease in wall shear stress is observed across all Mach numbers when control is applied. The uncontrolled cases consistently exhibit higher shear stress, emphasizing the control strategy's potential for enhancing aerodynamic efficiency.
(d) Mach Number Sensitivity: While the overall energy of the vortices increases with the Mach number, the relative reduction achieved by wall transpiration remains effective even at higher speeds (Mach 6).
(e) General Effectiveness: The findings suggest that appropriately performed transpiration and thermal control can overcome the adverse effects of Görtler vortices across various Mach numbers and wall temperature regimes.

3. Achievements

本プロジェクトにおいて遷音速/超音速境界層の新しい制御法を生み出すことができれば，航空機の機体表面の境界層を狙い通りに制御することにより，優れた揚抗比の機体の開発に貢献できる．これにより現行機の燃費性能向上と同時に超音速機の可能性を広げることが期待される．また，境界層研究の観点では，非圧縮性流れ・遷音速流れの場合との違いを明らかにすることにより，乱流遷移の物理の理解を進め，層流制御技術のための新しいアイディアを提案することにもつながる．

2025 年度は超音速境界層中の Görtler 渦の崩壊と壁面温度の効果を直接数値シミュレーションにより調べ，その特性を明らかにした．

4. Summaries and future plans

超音速境界層中の Görtler 渦の崩壊と壁面温度の効果を直接数値シミュレーションにより調べ，その特性を明らかにした．

本プロジェクトにおいて遷音速/超音速境界層の新しい制御法を生み出すことができれば，航空機の機体表面の境界層を狙い通りに制御することにより，優れた揚抗比の機体の開発に貢献できる．これにより現行機の燃費性能向上と同時に超音速機の可能性を広げることが期待される．また，境界層研究の観点では，非圧縮性流れ・遷音速流れの場合との違いを明らかにすることにより，乱流遷移の物理の理解を進め，層流制御技術のための新しいアイディアを提案することを目指す．

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not Applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Omar Es-Sahli, Matthew Brockhaus, Adrian Sescu, Zamir Koshuriyan, Yuji Hattori: DNS Investigation of the Mechanics of Görtler Vortices Breakdown in Hypersonic Flows, *Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS16-6, pp. 1176-1179.

[2] Asmaa Ahaggach, Adrian Sescu, Zamir Koshuriyan, Yuji Hattori: Effect of Wall Temperature and Transpiration on Görtler Vortices in High-speed Boundary Layers, *Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS16-7, pp. 1180-1183.

[3] Adrian Sescu, Omar Es-Sahli, Zamir Koshuriyan, Yuji Hattori: Investigation of the Growth and Breakdown of Gortler Vortices Evolving in High-Speed Boundary Layers, *78th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, Houston, (2025).

3) Patent, award, press release etc.

Not Applicable

Project Code	J25I086
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	2nd year

A Novel Research for Performance Optimization of Microchannel Heat Exchangers Using Fins, Magnetic Field, and Hybrid Nanofluids

Hidemasa Takana*†, Shabbir Ahmad**,***††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Graduate Program of Ocean Engineering, School of Engineering, Universidade Federal do Rio Grande
Rio Grande, Brazil, Italia Avenue, km 8, 96201-900
***Muhammad Nawaz Sharif University of Engineering & Technology
QasimPur Colony, BCG Chowk, Multan, Punjab, 60000, Pakistan
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the Project

The purpose of this project is to enhance the performance of microchannel heat exchangers through advanced heat transfer optimization using fins, localized magnetic fields, and hybrid nanofluids. The study seeks to improve thermal management systems by systematically investigating the combined effects of magnetic field strength, Reynolds number, fin height, and nanoparticle concentration on fluid flow and heat transfer characteristics within the microchannel. Ultimately, the findings are expected to contribute to the design and development of more efficient, compact, and high-performance thermal systems.

2. Details of Program Implementation

This project is being carried out under a collaborative research program at the Institute of Fluid Science. A significant part of the study was presented at the *Twenty-Fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, which provided an excellent platform to share the preliminary findings and exchange ideas on future research directions. The project involves advanced numerical simulations based on the stream-vorticity formulation to solve the governing equations of hybrid nanofluid flow and heat transfer in a magnetized microchannel equipped with internal fins. This computational framework enables detailed analysis of the coupled effects of magnetic forces, fluid inertia, and geometric parameters on the overall thermal performance of the system.

Fig. 1 presents a conceptual model of a two-dimensional channel containing hybrid nanofluid flow. The working fluid is assumed to be Newtonian and laminar, with water as the base fluid mixed with hybrid nanoparticles (copper and iron (II, III) oxide) uniformly dispersed inside the channel. A magnetic field is introduced in the form of a vertical strip located at the mid-section of the channel. The direction of the magnetic field within this strip is from the lower wall to the upper wall, influencing the flow and heat transfer behavior in that region.
The upper wall is maintained at a higher temperature (hot wall), while the lower wall is kept cold, creating a temperature gradient across the channel. Additionally, upper and lower fins are attached near the inlet and outlet regions, which enhance mixing and thermal interaction within the flow.

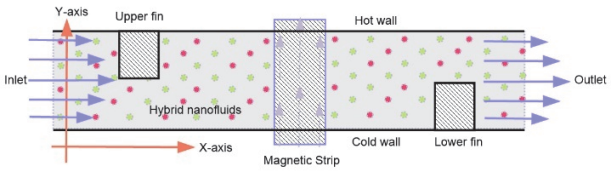


Fig. 1 Conceptual Representation of the Problem

3. Achievements

Significant progress has been made in achieving the objectives. The major achievements are summarized as follows:

- Impact of Magnetic Field Strength (Mn): The study demonstrated that increasing the magnetic field strength significantly modifies the internal flow structure inside the finned microchannel. In the absence of magnetic influence, the flow remains smooth and laminar with only minor disturbances caused by the fins. However, as the magnetic number (Mn) increases, localized Lorentz forces generate strong recirculation regions near the magnetized strip. At higher Mn values, distinct vortex pairs are formed near both upper and lower walls, which intensify fluid mixing and disrupt the thermal boundary layer. This behavior confirms that localized magnetic control can be effectively used to enhance convective heat transfer performance in micro-scale cooling systems.

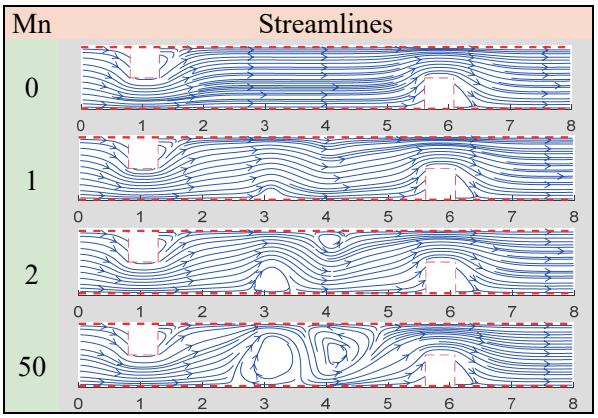


Fig. 2 Streamlines for the Flow with Varying Mn Values, Where Re = 5, Pr = 6.8, and fh = 0.5.

- Effect of Reynolds Number (Re): The numerical findings revealed that the Reynolds number plays a dominant role in strengthening the interaction between inertia-driven flow and magnetic forces. At low Reynolds numbers, only weak vortical structures were observed, indicating viscous-dominated motion. As Re increases, the vortices become larger and stronger, extending deeper into the channel domain. Higher Reynolds number, therefore, enhances circulation intensity, improves momentum transport, and increases convective heat transfer rates. These findings are particularly useful for designing forced-convection microchannel systems operating under magnetic control.

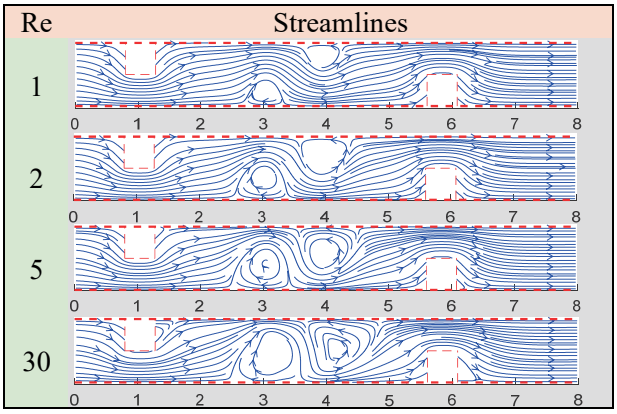


Fig. 3 Streamlines for the Flow with Varying Re Values, Where Mn = 50, Pr = 6.8, and fh = 0.5.

- Influence of Fin Height (f_h): The height of internal fins was found to strongly influence streamline behavior and thermal transport. Without fins, the flow remains nearly parallel and undisturbed. As fin height increases, downstream flow separation occurs, leading to the development of recirculation zones behind the fins. Taller fins generate larger and stronger vortices, increasing local turbulence-like mixing and reducing thermal resistance near heated walls. This confirms that optimized fin geometry can substantially improve heat transfer in compact channel configurations.

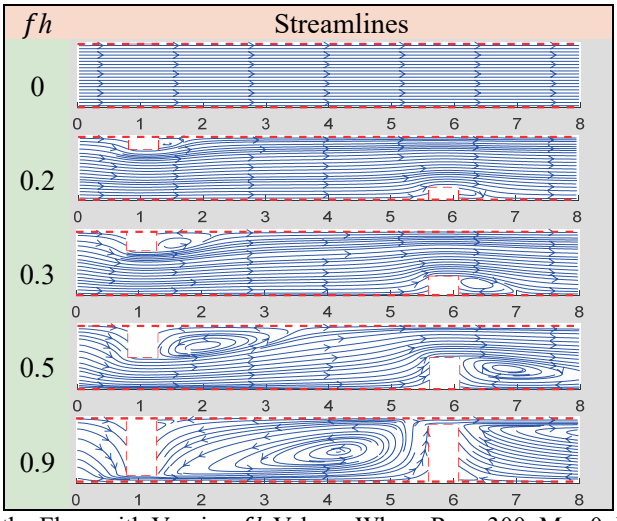


Fig. 4 Streamlines for the Flow with Varying fh Values, Where Re = 300, Mn=0, Pr = 6.8, and fh = 0.5.

- Role of Nanoparticle Concentration: Although the present study focused on a Cu–Fe_3O_4 hybrid nanofluid system, the results indicate that nanoparticles are a critical parameter in determining thermal performance. Increasing nanoparticle concentration is expected to enhance effective thermal conductivity, resulting in higher heat transfer capability. Moreover, Fe_3O_4 nanoparticles improve the magnetic sensitivity of the working fluid, enabling a stronger response to localized magnetic fields. Therefore, proper optimization of nanoparticle concentration can provide a balance between thermal enhancement, flow resistance, and pumping power requirements.

- Combined Effect of Magnetic Field, Reynolds Number, Fin Height, and Hybrid Nanoparticles: One of the major outcomes of this work is the demonstration of the synergistic effect of magnetic forcing, flow inertia, fin geometry, and hybrid nanofluid properties. The fins create geometric blockage and induce separation, the magnetic field introduces Lorentz-force-driven circulation, and a higher Reynolds number sustains stronger convective transport. Simultaneously, Cu nanoparticles improve thermal conductivity, while Fe_3O_4 nanoparticles provide magnetic responsiveness. This combined mechanism leads to intensified recirculation, thinner thermal boundary layers, and superior thermal performance compared with conventional fluids.

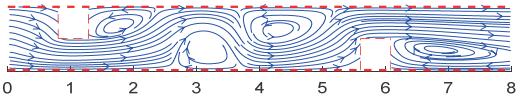


Fig. 5 Combined effect of magnetic fields, Reynolds number, and fins height where R=300, Mn=5, fh=0.5.

4. Summaries and Future Plans

This work successfully established a numerical framework for analyzing magnetically controlled hybrid nanofluid flow in finned microchannels. The study confirmed that magnetic field strength, Reynolds number, fin geometry, and nanoparticle properties collectively govern vortex formation and thermal enhancement. The results provide valuable design guidelines for next-generation cooling technologies.

Future Plans:

- Optimization of nanoparticle concentration for maximum thermal efficiency
- Three-dimensional simulations of realistic microchannel devices
- Entropy generation and thermodynamic irreversibility analysis
- Artificial intelligence-based optimization approach
- Experimental validation of the proposed numerical model

5. Research Results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

(Not yet published; under preparation.)

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Shabbir Ahmad, Hidemasa Takana: Influence of Localized Magnetic Fields on Thermal Performance in Finned Microchannels: A Numerical Insight, *Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025).

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J25I087
区分	一般公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2025.4～2026.3
継続年数	1年目（発展）

末梢がん脳転移抑止薬開発のためのヒト血液脳関門マイクロ流体モデル

The Blood-brain Barrier Microfluidics for Drug Development of Brain Metastasis

立川 正憲*,**†，稲垣　舞*
西原 秀昭***，船本 健一****††
*徳島大学大学院医歯薬学研究部 薬学域・DDS研究センター，
**徳島大学フォトニクス健康フロンティア研究院
山口大学大学院医学系研究科，*東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

転移性脳腫瘍は，末梢がん患者の約4割と高頻度で発症し，患者の生活の質を著しく低下させる．従って，末梢がんの脳転移をいかにして抑止するかが，がん治療の成否を決めるといっても過言ではない．脳には，組織内に三次元に張り巡らされた脳微小血管内皮細胞層を実体とする血液脳関門（Blood-Brain Barrier，BBB）が存在するため，循環血液中と脳実質の間の物質交換は著しく制限されている．一方で，がん細胞は血液脳関門を巧妙な手口ですり抜けていくことができる．そこで，循環血流存在下での血液脳関門におけるがん細胞の挙動（図1）を模倣するモデルを開発し，それを制御する薬物の開発は末梢がんの脳転移抑止に大きく貢献するものと期待される．本研究は，血液脳関門における末梢がん細胞の挙動を可視化するマイクロ流体モデルを開発し，末梢がんの脳転移を抑止する薬物をスクリーニングするシステムを確立することを目的とした．

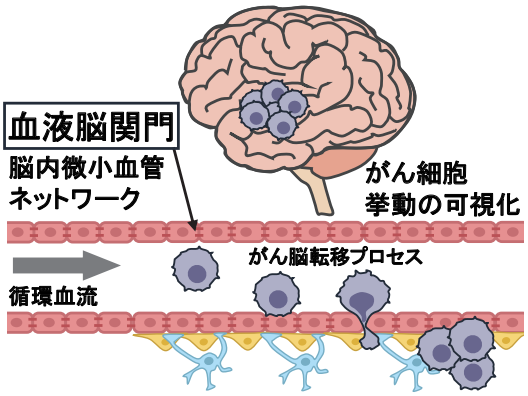


図1：血液脳関門におけるがん細胞の挙動とがん脳転移

2. 研究成果の内容

（1）マイクロ流体デバイス内で血流を再現したヒト二次元血液脳関門モデルの構築

ヒト血液脳関門 *in vitro* モデルとして汎用されている hCMEC/D3 細胞（脳微小血管内皮細胞）を，酸素濃度制御可能なマイクロ流体デバイス（次頁図 2A）のメディア流路に導入し，コンフルエントになるまで培養した．脳転移活性を有するヒト肺腺がん由来の H2030-BrM3 細胞をメディア流路に導入したのち，マイクロチューブポンプを用いて培地の流れを発生させた．自動細胞イメージングシステムを用いて，がん細胞の rolling，adhesion および extravasation などの挙動を解析した．その結果，がん細胞が，流れに逆らって脳微小血管

内皮細胞に接着し，細胞下に潜り込む一連の過程を可視化することができた．H2030-BrM3 細胞は，脳微小血管内皮細胞間の接合部の形態を変化させることが示された．さらに，構築したモデルを用いて，血管内皮細胞上でのがん細胞の挙動を制御しうる薬剤のスクリーニングを予備的に行った．

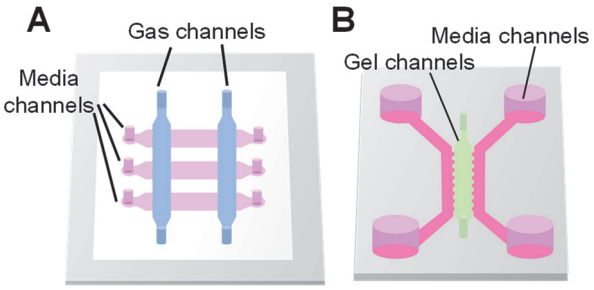


図 2:マイクロ流体デバイスの概略図

(2) ヒト三次元血液脳関門マイクロ流体モデルを用いた脳転移性がん細胞の挙動可視化

ヒト pluripotent stem cells (hPSCs) から分化誘導した微小血管内皮細胞様細胞と平滑筋様細胞，および初代培養アストロサイトをフィブリンゲルと混合してマイクロ流体デバイス（図 2B）へ導入し，三次元微小血管ネットワークを構築した．マイクロ流体デバイスのメディア流路に H2030-BrM3 細胞を導入し，共焦点レーザー顕微鏡を用いてリアルタイムイメージングを行った．H2030-BrM3 細胞は，微小血管ネットワーク内を灌流され，一部の細胞は血管内に残留した．H2030-BrM3 細胞の導入から 4 時間後，細胞は血管壁へ接着し，続いて血管外浸潤が見られた．20 時間後には，細胞は内皮細胞単層を透過した．以上の結果，末梢のがん細胞の脳転移の初期段階となる血液脳関門を透過する過程を可視化することが可能となった．

3. 研究目標の達成状況

ブラックボックスとなっていたヒト血液脳関門における末梢がんの挙動を可視化するシステムが開発されることで，がん脳転移の分子機構の解明が進むとともに，末梢がんの脳転移を抑止する薬物の高速スクリーニングが実現することを，予想される成果としてあげた．今年度は，血流存在下での，血液脳関門におけるがん細胞の挙動を模倣する二次元モデルのプロトタイプを構築し，血管内皮細胞層におけるがん細胞と rolling, adhesion および extravasation の過程を可視化した．さらに *in vivo* 脳血管におけるがん細胞の挙動を模倣した三次元ヒト血液脳関門マイクロ流体モデルを構築した．以上から，今年度の研究目標は計画通りに達成した．

4. まとめと今後の課題

本研究から，ブラックボックスとなっていたヒト血液脳関門における末梢がんの挙動を可視化するシステムの基盤が構築された．今後は，本研究で構築された二次元および三次元血液脳関門マイクロ流体モデルの改良を重ね，血液脳関門を標的とした末梢がんの脳転移抑止薬のハイスループットスクリーニング系を構築し，有用な薬剤の創出を目指す．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] S. Mama, M. Inagaki, M. Kondo, H. Nishihara, K. Matsuo, M. Tachikawa: 3D Human blood-brain barrier microfluidic model of multiple sclerosis, 日本薬物動態学会第 40 回年会, 京都, (2025)

[2] S. Mama, M. Inagaki, M. Kondo, H. Nishihara, K. Matsuo, K. Funamoto, M. Tachikawa: The blood-brain barrier microfluidic model for drug development of brain metastasis, *Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025).

[3] 近藤もも香, 万々桜, 稲垣舞, 西原秀明, 松尾欣也, 立川正憲: がん脳転移を模倣する血液脳関門マイクロ流体モデル, 第 48 回日本神経組織培養研究会, 新潟, (2025)

[4] 万々桜, 近藤もも香, 西原秀昭, 松尾欣哉, 土屋雅美, 堀里子, 船本健一, 稲垣舞, 立川正憲: がん脳転移を模倣するヒト血液脳関門マイクロ流体モデルの構築, 日本薬学会第 146 年会, 大阪, (2026)

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project Code	J25I088
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Health, Welfare and Medical Cares
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Combination of Atmospheric Pressure Plasma with Mist Generated by Condensation of Water Vapor in Pressurized Air

Jiun-Shian Lee*, Yun-Chien Cheng**†, Siwei Liu*, Tomoki Nakajima*
Takehiko Sato*††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Department of Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University / National Taiwan University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The nano-scaled sized droplets, mist, have high cleaning efficiency and has large reaction surface. The conventional method uses large amount of water to clean the surface. In contrast, using high-speed mist can effectively clean surface with few amount of water [1]. The ions generated by the mist also shows sterilization effects. However, the generation mechanism of the ions and charges is still unclear. In this project, the self-made mist generator was developed and the effects of mixing parameters, including the nozzle temperature, distance between nozzle to surface, humidity and heating power, on the current was investigated. Then the charge generation in the mist can be discussed and optimized. In this cooperation study, Prof. Sato's lab and Prof. Cheng's lab are working together to investigate the efficacy of mixing the mist with atmospheric pressure plasma to further enhance the cleaning efficiency and the RONS generation efficiency.

[1] Y. Xiao et al., IJPEST, 16 (2022), e03003.

2. Details of program implement

Fig.1 shows the mist generator, and it is composed by a heater, a stainless-steel vessel, a gas source, a pressure gauge, a temperature meter and a nozzle. The distilled water is added to generate the mist. The principle of mist generation is that the distilled water is heated and boiled using a heater (AS ONE Corporation, EHP-170N) and vaporized. High temperature and compressed gas in the generator generated high pressure (~6 atm in absolute pressure). The pressurized water-vapor comes out at the nozzle as a supersonic flow from a nozzle and the condensed water vapor is formed as a high- speed mist. During the experiment, the temperature of the heater is maintained at 300 C. The size of vessel is 135 mm in height, 70 mm in inner diameter. The main part of the vessel is a cylindrical glass pipe, and the top and down cover plate are made of stainless steel, which is covered by a stainless-steel layer for safe. It can bear maximum 6 atm (absolute pressure). The pressure in the vessel is monitored by a pressure gauge and the water temperature by a thermometer (OMRON E5CN-HQ2 and AS ONE Corporation KTO-16150M3). The is nozzle commercial type (Spraying Systems Co., HB-1/8-VV- SS-15-01). The nozzle shape is a straight V-shape cutting a part of a cylindrical throat of the nozzle. The nozzle and the tube are covered by a wire heater (Tokyo Technological Labo, CRX-1) of 30 W. Every time before the experiment, distilled water (Sanchemipha) of 200 mL is added into the generator container. Meanwhile, pressurized air from gas bottle goes into the container to keep a necessary pressure. The water vapor is mixed with the air flow and pumped out through the nozzle into the open space.

Because of the temperature decrease, the vapor condenses into small water droplets and the droplet flow forms the high-speed mist flow.

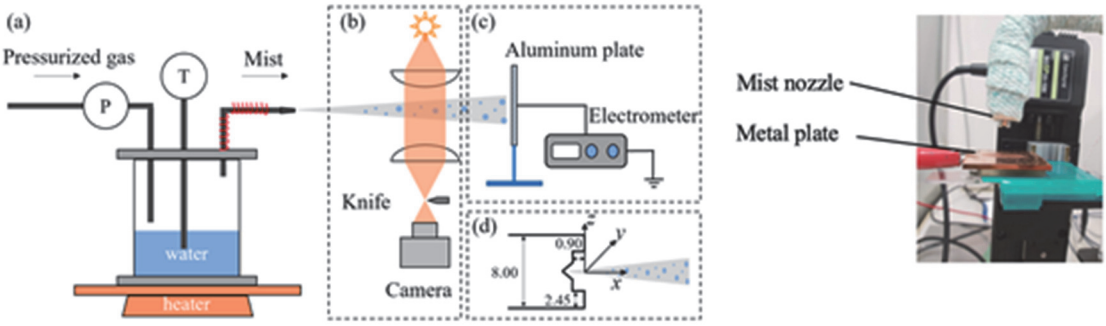


Figure 1. Sketch of the mist system [11] (left) and the photograph (right).

3. Achievements

In Fig. 2, the relationship between the distance and the current is shown. In the beginning, at the 1 mm position, the 160 and 170 ℃ are over 30 nA, and the 180 ℃ is 20 nA. Then, the current decreases as the distance increases and approaches zero. We can see that the current sharply decreases in the 20 mm distance range. As the distance increases, the velocity of the mixture flow decreases rapidly. Therefore, nanodroplets impact the copperplate weaker, causing a decreasing current.

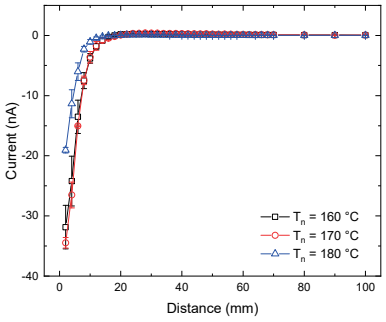


Fig. 2 The electrical current as a function of distance at T_n = 160, 170, 180 ℃

The previous figure shows the electrical current change with the different nozzle temperatures at the same distance. By changing the nozzle temperature in one water-adding operation, the electrical current shows a linear function to the nozzle temperature in Fig. 3. After superheating the mixture flow, the flow temperature is assumed to be the same as the nozzle temperature. The nozzle temperature makes nanodroplets condense differently, which causes the current to decrease with the nozzle temperature increase.

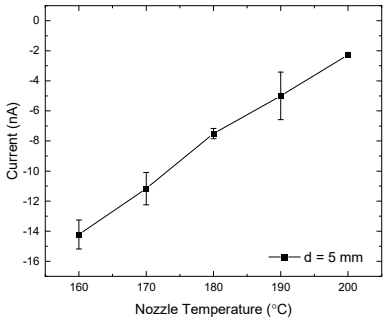


Fig. 3 The electrical current as a function of nozzle temperature at d = 5 mm

In Fig. 4, the data reveal that nanodroplets generated at 5 atm — corresponding to the highest flow velocity — induce the greatest electric current of −17.3 nA at a distance of 5 mm. As pressure decreases to 4 atm, the lower flow speed yields a reduced current of −8.6 nA, while the weakest response of −5.0 nA is recorded at 3 atm. Given that nanodroplet characteristics remain constant across these conditions, the monotonic increase in current with velocity suggests that collision intensity between the nanodroplets and the copper plate plays a central role in charge generation.

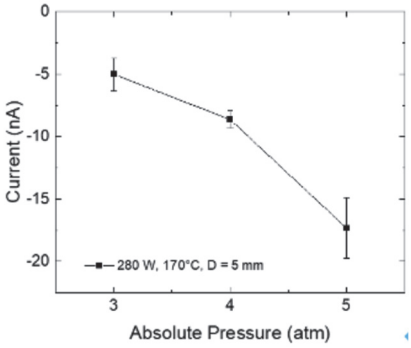


Fig. 4 The electric current as a function of pressure under WH = 280 W and TN = 170℃ at D = 5 mm.

4. Summaries and future plans

This study represents the effect of distance and nozzle temperature on electrical current. These parameters change the characteristics of nanodroplets. The mechanism and prime parameter of nanodroplets that induce current on the copperplate need further research and investigation.

Besides, the effects of nozzle distance, nozzle temperature, humidity, power added and water temperature, on the mist current were investigated in previous study. The current decrease with nozzle temperature increase. It may because the decrease of condense rete decreased the droplet size. The current decrease with nozzle distance increase. It is because the charged mist droplets evaporate during the transportation. The current increase with power increase. It may because the droplet size increase and the Lenard effect generate more charges. The mechanism of the charge generation in the high-speed mist can be further clarified with the results and further investigation.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] Jiun-Shian Lee, Takehiko Sato, Yun-Chien Cheng, Toshiyuki Sugimoto, Tomoki Nakajima, Siwei Liu: Mechanism of Charge Generation by High-speed Water Nanodroplets Impinging on Metal Surfaces" *Applied Physics Letters*, (2025)

[2] 佐藤岳彦、藤村茂、金澤誠司、立花孝介、Lee Jiun-Shian, Xiao Yunchen, 中嶋智樹、杉本俊之、Cheng Yun-Chien, Liu Siwei, 高速ナノ液滴が拓く新しい水利用社会, 金屬, (2025), Vol 95, No 22.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[3] J. Lee, S. Liu, Y. Cheng, T. Sugimoto, T. Nakagima, T. Sato, "Charging Phenomena and Electrostatic Elimination of High-speed Nanodroplet," IEEJ meeting（放電・プラズマ・パルスパワー研究会）Tendo, Yamagata, (2026), June.

[4] Jiun-Shian Lee, Yun-Chien Cheng, Siwei Liu, Tomoki Nakajima, Takehiko Sato*, "Charging Phenomena of High-speed Nanodroplets on Various Metal Plates," *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-62, pp. 172-173.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

Project Code	J25I089
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Health, Welfare and Medical Cares
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Innovative Strategies for Glaucoma Management Through CFD Modeling of Aqueous Humor Flow

Muhamed Albadawi*†, Mohamed G. AbdElKader*, Yasser Abuouf*, Ryuhei Yamaguchi**
Makoto Ohta**††
*Faculty of Engineering, Alexandria University, 21544 Alexandria, Egypt.
**Institute of Fluid Science, Tohoku University, 980-8577 Miyagi, Japan.
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Glaucoma is a multifactorial neurodegenerative disease that leads to progressive vision loss and is commonly associated with elevated intraocular pressure (IOP). The circulation of aqueous humor, a transparent fluid produced by the ciliary body, plays a crucial role in maintaining IOP. Disruptions in aqueous humor dynamics, particularly at the level of the trabecular meshwork and Schlemm's canal, are central to the pathophysiology of glaucoma. Computational Fluid Dynamics (CFD) has emerged as a powerful tool to model and analyze the fluid dynamics, offering insights into disease mechanisms and aiding the optimization of therapeutic strategies.

Building upon the strengths of CFD, this study utilizes an advanced 3D simulation of AH flow within an almost realistic model of the human eye. This work aims to fill that gap by integrating the uveoscleral pathway into a CFD-based model of AH flow. By comparing simulation results with and without this secondary outflow route, we aim to highlight its influence on IOP, pressure gradients, and flow distribution across the anterior chamber. Our findings not only add physiological accuracy to current models, but also offer insights that could support more targeted and effective treatment strategies for glaucoma

2. Details of program implement

The aqueous humor (AH) is continuously produced by the non-pigmented epithelium of the ciliary body and circulates from the posterior chamber, through the iris–lens channel, into the anterior chamber. It exits the eye via two primary pathways: the conventional pathway, through the trabecular meshwork and Schlemm's canal, accounting for approximately 70–90% of the total outflow, and the uveoscleral pathway, which drains through the ciliary muscle.

In pathological conditions such as glaucoma, increased resistance within the conventional outflow pathway leads to elevated intraocular pressure (IOP), a major risk factor for optic nerve damage. This resistance is often associated with structural and biomechanical alterations, including trabecular meshwork stiffening, collapse of Schlemm's canal, and obstruction of collector channels.

Computational Fluid Dynamics (CFD) has become a powerful tool for investigating AH flow behavior and understanding the mechanisms underlying IOP regulation. By solving

the governing fluid flow equations, CFD enables the analysis of pressure distribution, velocity fields, and flow resistance within anatomically realistic geometries. Previous studies have demonstrated the sensitivity of outflow resistance to microstructural variations in the trabecular meshwork and Schlemm's canal, highlighting the importance of patient-specific modeling in glaucoma research.

In this study, a three-dimensional computational model of the AH domain was developed to investigate flow dynamics with a particular focus on IOP. The geometry was constructed based on anatomically accurate representations reported in the literature, incorporating the posterior chamber, iris–lens channel (ILC), pupil, and anterior chamber, extending to both the conventional and uveoscleral outflow pathways. The ILC was modeled with a precise gap distance of 20 μm to capture its critical influence on flow behavior.

The computational domain was generated using a CAD software and discretized using a hybrid meshing strategy combining tetrahedral and hexahedral elements. Mesh refinement was applied in regions of high flow sensitivity, particularly within the ILC, where a minimum element size of 0.01 mm was used, while coarser elements (up to 0.5 mm) were applied elsewhere. The final mesh consisted of approximately 2.1 million elements to ensure numerical accuracy and stability.

AH was modeled as an incompressible, Newtonian fluid with a density of 1000 kg/m^3 and a dynamic viscosity of 0.00075 Pa·s. Due to the low flow velocities, laminar flow conditions were assumed. Simulations were performed under steady-state conditions using a pressure-based solver.

Physiological boundary conditions were applied to replicate AH production and drainage. A constant inflow rate of 2.4 μL/min was prescribed at the ciliary body, representing AH secretion. The conventional outflow pathway was modeled as a pressure outlet set to 10 mmHg, while the uveoscleral pathway accounted for approximately 10% of total outflow. All remaining boundaries were treated as no-slip walls. The governing Navier–Stokes equations were solved iteratively until convergence was achieved to a residual tolerance of 10^{-6}.

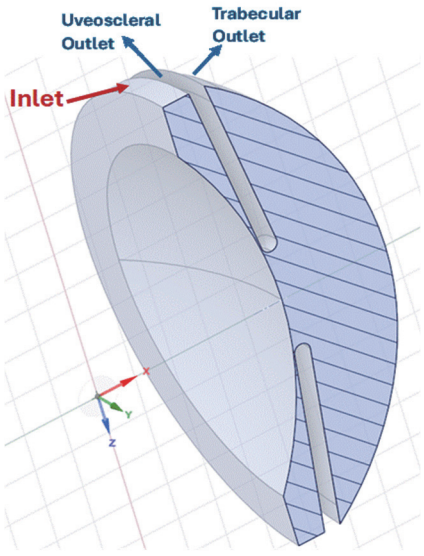


Figure 1: AH flow geometry.

3. Achievements

The CFD simulations conducted in this study are designed to provide a comprehensive characterization of AH dynamics within the human eye, with a particular emphasis on the distinct roles of the conventional and uveoscleral outflow pathways. The results will be presented through detailed visualizations of flow patterns and IOP distributions, coupled with quantitative assessments of outflow contributions.

The CFD simulation provides a detailed distribution of IOP across both the posterior and anterior chambers. Figure 2 illustrates the pressure profiles along the conventional (trabecular meshwork) and uveoscleral outflow pathways. A slight difference can be observed between the two pathways, which may be associated with factors such as the narrow 20 µm iris-lens channel that introduces significant resistance and pressure loss. Additionally, the simplified modeling of the uveoscleral pathway may have influenced the pressure distribution results. Notably, to the best of our knowledge, no previous simulations have included both the conventional and uveoscleral pathways within a CFD simulation, making this study a novel contribution to understanding AH dynamics.

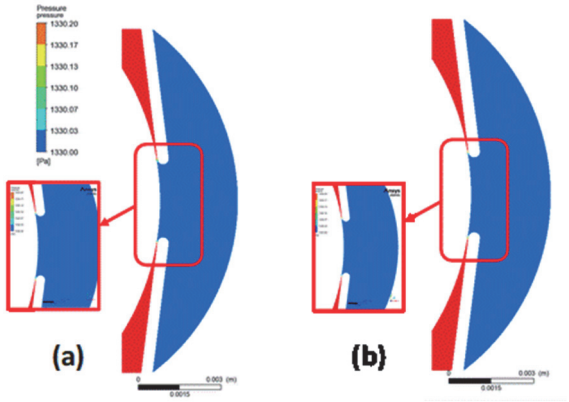


Figure 2: IOP distribution for the eye geometry with;
(a) Trabecular meshwork only, (b) including
Uveoscleral pathway.

A key quantitative outcome of this study is the precise assessment of the relative contributions of the conventional and uveoscleral pathways to total AH outflow, which visualized through velocity contour plots. Notably, Figure 3 highlights the differences observed between the simulations considering only the trabecular meshwork and that also include the uveoscleral pathway. This quantification is essential for understanding the distribution of AH drainage and provides a valuable vision for future investigations into Glaucoma therapeutic interventions. These detailed and realistic investigations remain difficult to capture through experimental or clinical methods alone.

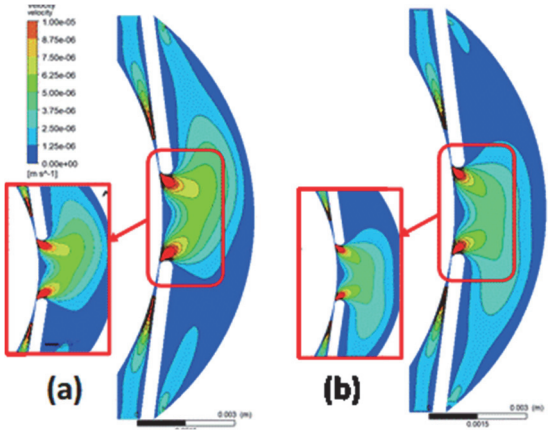


Figure 3: Velocity Contours for the eye geometry with; (a) Trabecular mesh only, (b) including Uveoscleral pathway.

4. Summaries and future plans

This CFD study provides a robust framework for modeling AH dynamics within the human eye, with a specific focus on the roles of the conventional and uveoscleral outflow pathways. A three-dimensional anatomical model was constructed and applied physiologically relevant fluid properties and boundary conditions, the simulation offers a detailed and quantitative assessment of AH flow and IOP distribution.

The conventional outflow pathway, primarily through the trabecular meshwork, accounts for most of the AH drainage. The uveoscleral pathway, while less structured and contributing a smaller fixed percentage, represents a vital alternative drainage route whose regulation is less directly pressure-dependent and is a significant target for existing glaucoma therapies. The simulations are confident to characterize detailed flow patterns and pressure gradients across both pathways. Finally, this CFD simulation is essential for understanding the distribution of AH drainage and provides a valuable vision for future investigations into Glaucoma therapeutic interventions.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Muhamed Albadawi, Mohamed G. AbdElKader, Yasser Abuouf, Abdulrahman Khaled, Nada Youssef, Nour Mahfouz, Mahmoud Tarek, Ryuhei Yamaguchi, Makoto Ohta: Modeling Aqueous Humor Dynamics: Unveiling the Role of Uveoscleral Outflow, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics (ICFD)*, Sendai, (2025), OS9-22.

3) Patent, award, press release etc.
Not applicable

課題番号	J25I090
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	1 年目

流体振動を活用した発電技術に関する研究

Research on power generation technology using flow-induced vibration

長谷川 裕晃*†，永井 大樹**††
中川 健一*，近藤 和哉*
*宇都宮大学，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

近年の温暖化対策として，CO_2 の排出量の低減とクリーンエネルギー創成技術が注目されている．このために，化石燃料の代替エネルギーや化石燃料を必要としない発電技術が多く研究されている．その中で，太陽光パネルや風車は費用面や運用面で課題が多く，得られるエネルギー効率の面でも十分とは言えない．本研究では，ソーラー発電や水力発電のような大規模な発電ではなく，本来であれば捨てられてしまうエネルギーを電気的エネルギーとして再生して利用することを目的とする．具体的には，エアコンの室外機等からの排風を利用して発電し，再利用する技術を目指す．本研究では振動体の下部に物体等を配置することで流れ場のフィードバックを活用することやロックイン現象の活用などで，微風中においても発電に利用できる流体振動現象を基礎研究的に調べる．

2. 研究成果の内容

本研究では，円柱の流体励起振動に着目した．振動する円柱の後流側に物体(後部体)を設置し振動振幅と流れ場を調査した．図１に実験概要図を，図２に使用した模型を示す．振動円柱後方に第２円柱を設置する際の物体間の距離 S は，$s/D=0.1$~1 の範囲で実施した．振動円柱は，直径 $d=60$ mm，長さ $L_1=300$ mm である．実験ではこの円柱を板バネにより直立するように支持した．後部体の第２円柱は直径 $D=60$ mm，長さ $L_2=400$ mm である．振動円柱上面から後部体の軸中心までの距離は $h/D=2$ として第２円柱の設置高さを決めた．

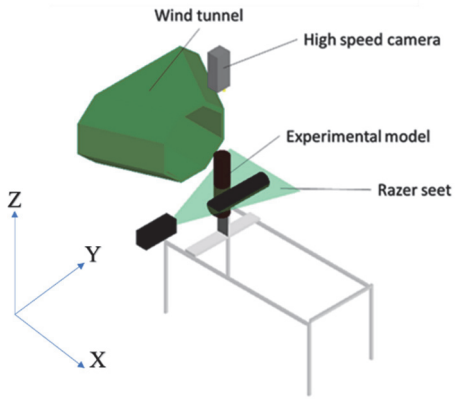


図１ 実験概要図

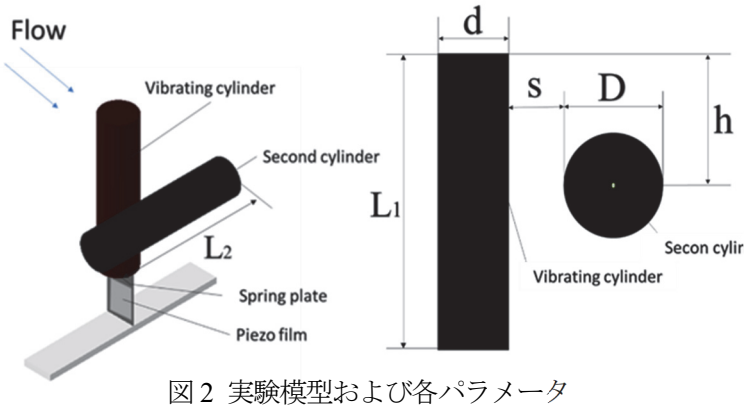


図２ 実験模型および各パラメータ

図 3 に第２円柱あり，なしでの振動円柱の振幅を示す．風速はエアコン室外機での条件を考慮し，4 m/s で行った．振幅は，振動円柱の上面にマーカを付け，そのマーカの移動量を高速度カメラで撮影し求めた．図より，第２円柱があることで，振動が効果的に増大していることがわかる．

図 4 に振動円柱後方での流れ場の様子を示す．図は渦度のカラーマップと速度ベクトルを重ねて描いてある．図 4 (b)の図中の破線は，下流側に配した第２円柱位置を示している．第２円柱があることで，振動円柱から放出される渦が強くなっている．そして，振動円柱に近いところで流れが巻き上がることで渦が存在している．このために，第２円柱を設置することで振動円柱の振幅が増大する．

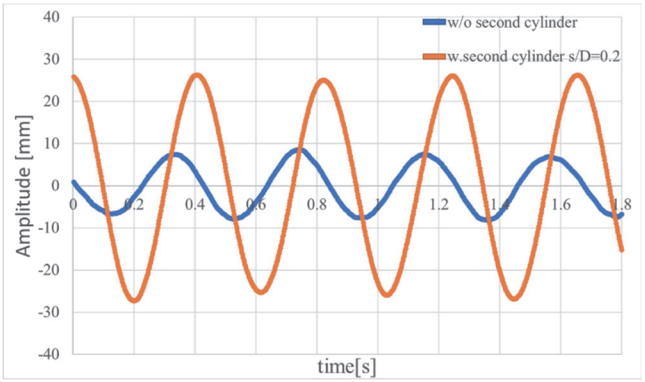
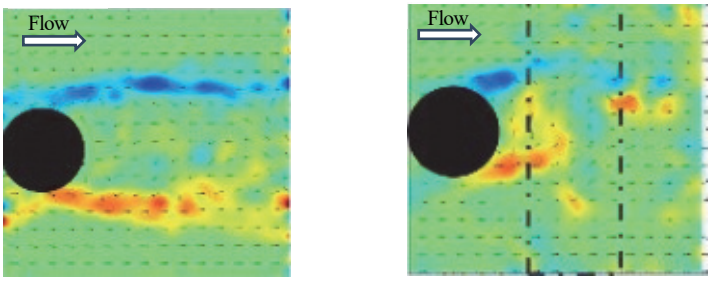


図 3 振幅の比較



(a) 振動円柱のみ (b) 振動円柱＋下流側に円柱付加 (s/D＝0. 2)

図 4 渦度カラーマップと速度ベクトル(X-Z 平面)

3. 研究目標の達成状況

本研究では振動体の下流側に物体を配置することで振動を増幅させることが可能となった．この際，振動の増幅現象と流れ場との関連が理解できた．その成果から物体間の距離，下流側の物体形状でも振動現象が変化する感触は得た．そのため，研究目標の振動を増幅させる手法については概ね達成できた．しかし，実際の発電量との関係までは実施できず，今回は簡易的に作成した回路で LED の発光を確認することにとどまってしまった．

4. まとめと今後の課題

振動を増幅させる手法として，振動体後方に物体を設置することの有効性を確認できた．今後は，振動によって得られた出力を電力として評価し，発電の観点で調べていく必要がある．その際，圧電フィルムの変形をより効果的に利用できる振動体でのフィルムの設置位置，下流側の物体の形状，配置の最適化を検討していく．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Naoto Kato, Kazuya Kondo, Hiroaki Hasegawa, Hiroki Nagai, Enhancement of Flow-Induced Vibration in a Piezoelectric Film for Energy Harvesting under Low Wind Speed, *Proceedings of the Eleventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, JK-TFEC11-1161, Okinawa (2025), Japan.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 近藤和哉, 加藤直人, 長谷川浩晃, 永井大樹: 発電用薄膜振動における低風速下での振動手法の検討, 第 29 回動力・エネルギー技術シンポジウム〔2025.6.5-6, 金沢〕

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project code	J25I091
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year (progressing)

Schlieren imagery of AC voltage EHD of Seeding Particle Enhanced Phase Change Materials

Ethan Chariandy*, Siwei Liu**
Takehiko Sato**††, James Cotton*†
*Department of Mechanical Engineering, McMaster University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective of this project is to visualize the velocity and temperature profile of EHD (Electrohydrodynamic) melting heat transfer enhancement in an organic PCM (Phase Change Material) using Schlieren imagery. The main advantages of Schlieren velocimetry over PIV (Particle Image Velocimetry) are the non-intrusiveness of the measurement from the lack of seeding particles and the ability to visualize transient phenomena in the flow, especially with highspeed imagery. These unique features of Schlieren imagery make it an excellent tool for the study of EHD heat transfer enhancement phenomena. Through the usage of novel visualization methods, the project aims to facilitate an improved understanding of EHD melting heat transfer enhancement for numerical modeling and subsequent development of EHD thermal batteries.

2. Details of program implement

From September to December 2025, an experiment was conducted to measure unsteady velocity and temperature profiles of the EHD phenomena using schlieren and a DSLR camera. The melting experiments were conducted under several different applied waveforms: 0.1Hz, 0.2Hz. 0.3Hz and DC, all under 7.5kV. The experiment involved melting a PCM (Phase Change Material) in a differentially heated cavity under the application of an electric field (figure 1). The cavity was placed in the interrogation area of a Z type schlieren system to visualize the induced flow in the liquid phase by the electric field (figure 2).

The oscilloscope and camera were triggered together so that the current, applied voltage, and flow velocity field and temperature field could be correlated together in time. Two types of experiments were conducted: constant melt fraction, and changing melt fraction. For constant melt fraction the fluid was melted in the absence of EHD forces for 1hr 15min. At this point the electric field was applied, and the flow was recorded for 5mins. This was to allow for the comparison of the different applied waveforms at the same melt fraction.

In the changing melt fraction experiment the electric field was applied from the time the heaters were turned on, and the flow was recorded in 15min intervals until melting was complete. This allowed for the study of how different applied waveforms affected the shape of the melt front, and speed of the melting.

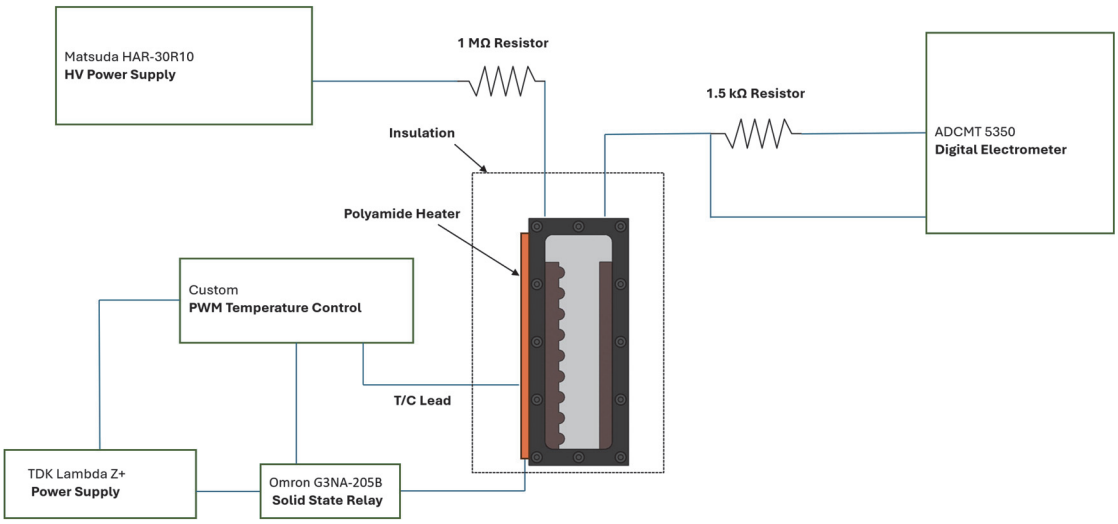


Figure 1: Experimental test facility schematic for simultaneous measurements of current vs voltage, heat transfer and flow visualization using Schlieren visualization.

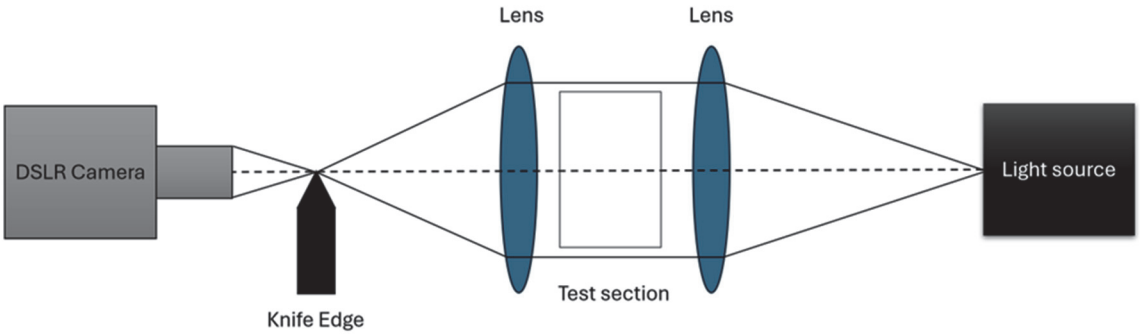


Figure 2: Schlieren visualization schematic

3. Achievements

We were able to visualize flow driven purely by dissociation phenomena, and an ultra low AC electric field (0.06Hz to 0.2Hz) and measure the associated heat transfer enhancement.

Compared to the previous year where we had used strong charge injection the current has dropped from ~100nA to ~4nA, but the flow velocities and heat transfer enhancment are similar (20mm/s and 30% reduction in melt time).

These phenomena had previously not been visualized before, or effectively applied to EHD melting heat transfer enhancment, and are therefore novel findings.

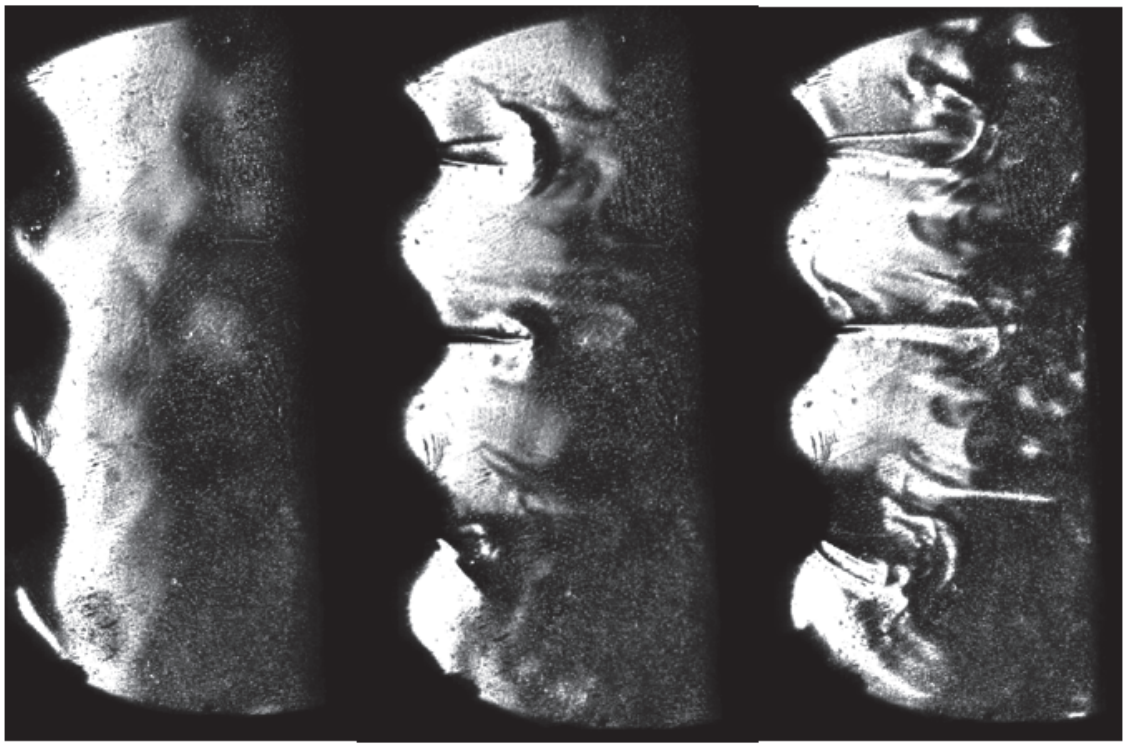


Figure 3: Schlieren visualization of jets for 0.06Hz- 8KV applied voltage left to right 0s, 1.2s, 2.1s.

There were several key findings:

- Charge injection can be controlled strongly by the material properties.
- Dissociation mechanism is very effective for heat transfer enhancement if an ultra-low frequency AC voltage is applied ~0.1Hz.
- Application of AC frequency increased induced velocity from 4mm/s to 20mm/s.
- The "jet" phenomena we are seeing with dissociation is driven by an attractive force towards the electrode, as opposed to the repulsive force seen in charge injection.
- ~50 times lower power consumption for similar heat transfer enhancement when comparing 8kV DC Charge injection in previous experiment to, 8kV 0.1Hz dissociation.
- No noticeable degradation of the PCM – current vs voltage measurements were consistent over 20hrs+ of testing.

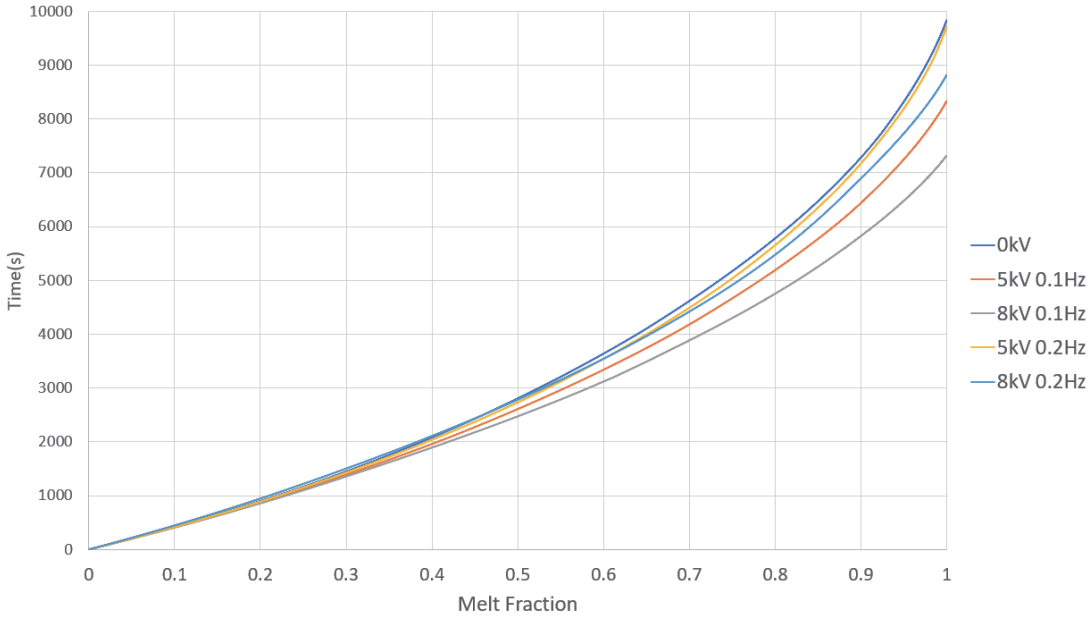


Figure 4: Time elapsed (s) vs Melt Fraction for different applied voltages.

4. Summaries and future plans

Moving forward, we would like to test and implement the idea of a "best waveform" for heat transfer enhancement. It is possible that as the melt fraction increases the ideal electric field frequency for maximum heat transfer changes. We would like to verify if this is true, and if so, find the best duty cycle to maximize the rate of heat transfer.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] Ethan Chariandy, Siwei Liu, Takehiko Sato, Tomoki Nakajima, James S. Cotton, "Schlieren imagery and velocimetry of electrohydrodynamic heat transfer enhancement in an organic phase change material", *Journal of Electrostatics*, Volume 140,2026,104269

2) International and domestic conferences, meetings, oral presentation etc.

[2] E. Chariandy, S. Liu, T. Sato, J. Cotton, "Visualization of Electrohydrodynamic Convection Cells in a Phase Change Material Using Schlieren Imagery" *International Symposium on Electrohydrodynamics 2025*

[3] E. Chariandy, S. Liu, T. Sato, J. Cotton, "Schlieren Imagery of Low Frequency AC Voltage EHD of Phase Change Materials" *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-45, pp. 129-131.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J25I093
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

抗力係数に減速が与える効果の高精度計測
Precise Measurement of the Effect of Deceleration on the Drag Coefficient

菊池 崇将*†，大谷 清伸**††
*日本大学理工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

航空機開発および大気圏突入物体開発で使用される空力データでは，定常流中で得られた抗力係数が用いられることが多い．一方，実際の飛行現象では，物体速度が時間とともに変化し，減速を伴って運動する．したがって，定常流を前提として取得された抗力係数を減速運動する物体に適用する場合，減速履歴が抗力係数評価に及ぼす影響を明らかにすることが重要である．本研究課題では，減速率の異なる条件において抗力係数を計測し，減速が抗力係数評価に与える影響を実験的に検討することを目的とする．併せて，計測条件，解析条件および不確かさ要因を整理し，信頼性の高い抗力係数計測手法の構築に資する知見を得ることを目的とする．

2. 研究成果の内容

2025 年 6 月および 2026 年 1 月の 2 回にわたって，衝撃波実験棟の弾道飛行を用いた実験を実施した．実験では，マッハ数 0.3～1.0 の範囲において，ポリアセタール，アルミ，ステンレスの直径 20 mm 球を射出し，影写真法を用いた高速度撮影により，飛行体の位置履歴を取得した．2 回目の実験では，1 回目に取得した実験条件の間を埋めるように異なる速度条件でデータを取得した．また，1 回目の実験で確認された光学系セットアップのアライメントに起因する画像歪みを低減するため，光学系の再調整を行った．図 1 に各実験回でリファレンスとして撮影したチェッカーグリッド画像を示す．どちらも目視レベルでは歪みは判別できないが，1 回目の実験では全体で 2 ピクセル程度，2 回目の実験では 0.3 ピクセル程度の画像の歪みが生じている．

図 2 に各実験回で得られた抗力係数を示す．横軸はマッハ数，縦軸は抗力係数である．球の材質により分類している．1 回目に取得したデータでは，2024 年度での結果と同様に，減速率によって抗力係数が変化する結果が得られた．減速率が低い条件では，抗力係数が大きくなる傾向が得られた．これを外挿すると，減速率 0 となる定常流れ条件に近づくにつれては，抗力係数が無限大に発散することを示唆しており，物理的に不自然である．この実験では，可視化映像に画像歪みが残存していることも確認されていた．そのため，この傾向は，減速によって抗力係数が増加することを直ちに示すものではなく，画像歪みに起因する位置計測誤差が，位置履歴から推定される減速量および抗力係数評価に影響した可能性がある．2 回目に取得したデータでは，光学系のアライメントを改善し，画像歪みをほぼ無視できる水準まで低減した条件で抗力係数を評価した．その結果，減速率の違いに対応したで抗力係数の明確な変化がない結果が得られた．この結果は，1 回目の実験で見られた，減速率が低

い条件で抗力係数が大きくなるという傾向が，減速の物理的効果ではなく，画像歪みに起因する位置計測誤差によって生じた見かけの変化であった可能性を示している．これらより，飛行体の位置履歴から減速量を読み取り，抗力係数を評価する計測では，可視化画像のわずかな歪みであっても評価結果に大きく影響し得ることがわかった．

特に，観測された可視化範囲内での減速量が小さい場合，画像歪みによる位置計測誤差が実際の減速量に対して相対的に大きくなり，抗力係数の評価結果に大きな誤差を生じる．そのため，これまで同様の計測原理に基づいて取得してきた結果にも，同種の誤差が含まれている可能性がある．通常，同種の弾道飛行実験では，飛行体を安定して飛行させるために密度の高い球を用いることが多い．しかし，密度の高い球では観測範囲内での減速量が小さくなり，位置計測誤差の影響を受けやすくなる．本研究の結果から，減速が抗力係数評価に与える影響を検討するためには，むしろ密度の低い球を用いて観測範囲内で十分に減速させ，減速量を画像歪みや位置計測誤差に対して十分大きくすることが重要であることが示唆された．

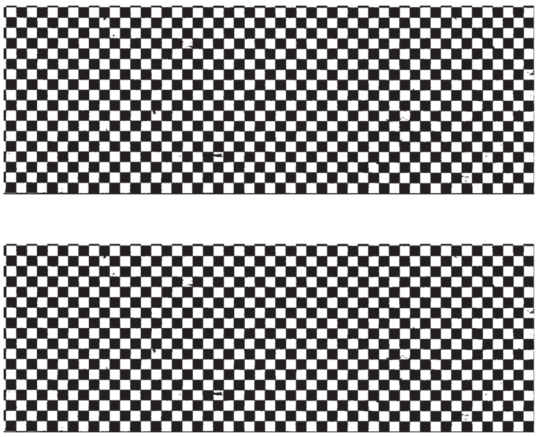


図 1：各実験回における歪み量検出用チャッカーグリッド（上：1 回目実験，下：2 回目実験）

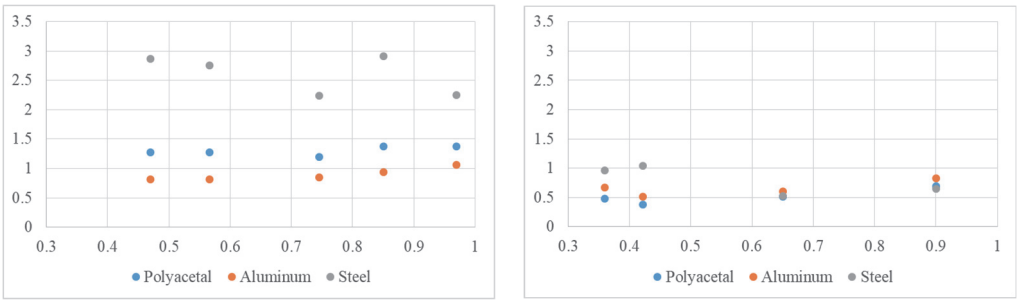


図 2：減速率を変化させた場合での抗力係数計測結果（左：1 回目実験，右：2 回目実験）

3. 研究目標の達成状況

達成度：50 %

2024 年度に誤差をなくす手法を開発し，本年度に系統的なデータを取得することで，減速の影響を厳密に評価することを目標としていた．本年度は，直径 20 mm 球を用いた弾道飛行実験を 2 回実施し，材質および減速率の異なる条件において，抗力係数評価のための系統的なデータを取得した．その過程で，画像歪みに起因する位置計測誤差が，抗力係数評価に想定以上に大きく影響することが明らかとなった．このため，本年度の段階では，誤差を十分に排除した上で減速の影響を厳密に評価するには至らなかった．

4. まとめと今後の課題

本年度は，直径 20 mm 球を用いた弾道飛行実験を 2 回実施し，マッハ数 0.3～1.0 の範囲で，材質および減速率の異なる条件の抗力係数データを取得した．その結果，位置履歴から減速量を読み取る計測では，観測範囲内での減速量が小さい場合，わずかな画像歪みであっても抗力係数評価に大きな誤差を生じることが示された．このことから，減速の影響を厳密に評価するためには，画像歪みの低減に加えて，観測範囲内で十分な減速量を確保することが重要であることが示唆された．

今後の課題は，画像歪みによる位置計測誤差を低減し，高精度に抗力係数を評価する手法を確立することである．具体的には，チェッカーグリッド画像を用いて画像歪みを定量評価し，後解析において位置履歴を補正する手法を開発する必要がある．また，画像歪みがどの程度であれば抗力係数評価に影響しないのかを判別し，計測条件の許容範囲を明確化する必要がある．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] T. Kikuchi, R. Sasaki, A. Yamauchi, M. Kudo, K. Ohtani: Drag Coefficient Measurement of a Sphere at Different Deceleration Rate, *Proceedings of 35th International Symposium on Shock Waves*, Brisbane Australia, (2025), No.-441

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] T. Kikuchi, K. Ohtani: The Precise Measurement of Drag Coefficient of Decelerating Free-flight Sphere (2nd-Report), *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-10, pp. 37-38.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I094
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4～2026.3
継続年数	1年目（発展）

光ヘテロダイン光熱変位法によるナノサイズ構造半導体・金属等界面の熱伝搬特性評価

Evaluation of Thermal Propagation Properties at the Interface between Nano-size Semiconductors and Materials by Laser Heterodyne Photothermal Displacement Method

福山 敦彦*†, 大堀 大介**††, 浦野 翔大*, 細越 裕太*, 寒川 誠二***,**
*宮崎大学, **東北大学流体科学研究所, ***台湾陽明交通大
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

ネットワークの高度化・ビッグデータ解析技術および人工知能等の発展によりサイバー空間と現実空間の融合が加速される超スマート社会が期待されている．超スマート社会の実現にはナノサイズの半導体構造を応用した次世代デバイスの開発が必須である．これは，ナノサイズ構造が示すバンド構造，特にゼロ次元状態密度や構造間の電子相互作用は，現在のレーザーやセンサといったデバイスの性能を飛躍的に向上させる可能性があるためである．しかしながら，ナノサイズに微細化されたデバイスは多くの材料界面（半導体/半導体，半導体/金属，半導体/絶縁体など）を有しており，界面でのキャリア再結合による発熱が高性能化を阻害する．つまりデバイス内で発生するフォノン（熱）の生成および輸送特性を明確にすべきである．加えて，これまで良質のナノサイズ構造を得ることが困難であったため，具体的な研究は進んでいなかった．これに対し，流体科学研究所の遠藤・大堀研究室において中性粒子ビームとバイオテンプレートを用いて無欠陥のナノサイズ構造を作製できる（以下，NBE法）．一方，申請者らは光ヘテロダイン光熱変位（以下，LH-PD）法を新たに開発しており，同法は半導体材料内の非発光再結合（フォノン＝熱放出）によって生じる表面変位量を干渉法によってナノメートルオーダーの高感度で検出できる．

本研究課題では，NBE法で作製した無欠陥ナノサイズ構造に対してLH-PD測定を適用して表面変位量を検出する．COMSOL Multiphysicsシミュレーションソフトによる計算（機械学習等）を併用することで，半導体各界面におけるキャリア損失および熱発生，熱伝搬特性を明確化する．これによって，電子デバイスや発光デバイスの飛躍的特性向上に寄与する知見を得ることを目的とする．

2. 研究成果の内容

東北大流体研において，SOI基板（725 μm厚のSi上に3 μm厚のSi酸化膜SiO_2を成膜したもの）の上にNBE法によって高さ100 nmのSi柱状構造（以下，Si-NP）を作製し，その後NP間をSiGeで充填したSi-NP/SiGe複合膜を形成した.図1に測定試料の概略図を示す.東北大流体研特有の成長技術であるNBE法において，バイオテンプレートとして用いるフェリチンの修飾物を変えることでNP間隔を変化させることができる．用意した試料は前年度までの実験結果や計算結果との比較検討を考慮し，これまでと同様にNP間隔が13，27，47 nm（以下，NP-13，NP-27，NP-47試料）の三種類の複合膜試料を用意した．また，SOI基板上に厚さ100 nmのSi層のみを成膜した試料（以下，ベア試料）も比較のために作製した．

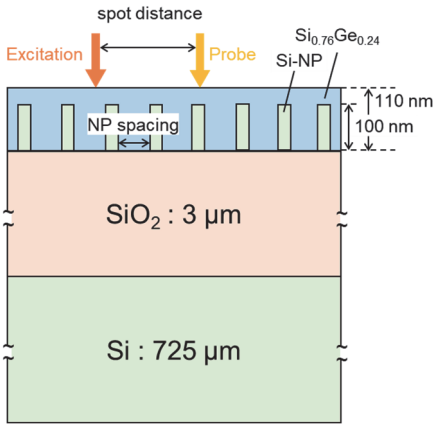


図 1：測定試料の概略図

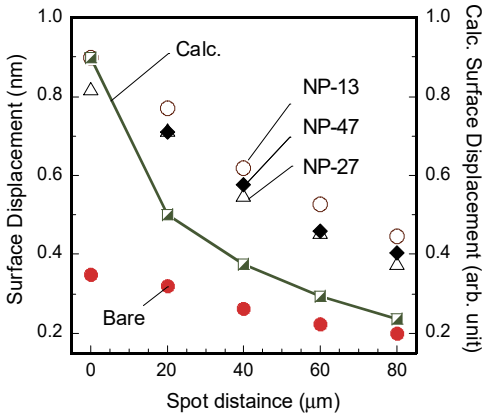


図 2：表面変位量のスポット距離による変化

宮崎大学で開発した LH-PD 法で検出される表面変位量に理論計算をフィッティングすることで，Si-NP/SiGe 複合膜の熱特性だけでなくキャリア特性も評価できる．励起レーザーをオフにした後の表面変位量の減衰曲線において，NP 間隔が 27 nm の試料は他の NP 間隔を持つ試料と比較して変位の減衰が遅延していた．理論計算フィッティング解析の結果，同試料のキャリア寿命が長いことを示唆していた．この成果は一昨年度の公募共同研究報告会（24th AFI2025/21st ICFD2025）で報告したが，キャリア寿命の実際の数値を算出することは出来なかった．その理由の一つはキャリア拡散方向に電界を正確に（一定に）印加できず，キャリアが基板側へ流れてしまったためである．そのため本年度では図 1 に示したように，SiO_2 酸化膜の厚さを 90 nm から 3 μm と厚くすることで Si 基板へのキャリア流出が生じないような試料を準備した．

図 2 は，3 つの Si-NP/SiGe 複合試料およびベア試料について，実験的に得られた表面変位量とスポット距離の関係を示している．スポット距離とは励起レーザーと検出レーザー間の距離である．励起レーザーの光吸収およびそれに伴う非放射再結合によって放出された熱は，試料内で等方的に拡散する．したがって，スポット距離が増加するにつれて表面変位量は減少する．図から，ベア試料の表面変位が非常に小さく，これは，Si 層の熱伝導率が高いため熱が励起スポットから遠くまで拡散したためである．対照的に，3 つの複合膜試料すべての表面変位量は大きかった．これは，Si-NP の存在によって熱拡散が妨げられた結果である．

次に，実験結果と計算結果（図中直線）を比較した．このモデルでは光励起キャリアの拡散を無視しており，キャリアはすぐに非発光再結合によって消滅し，その場で熱を放出する．図に示すように，スポット距離の増加に伴い表面変位量は急速に減少した．対照的に複合膜試料（NP-13，NP-27，NP-47）は，スポット間隔が広くても理論計算値よりも大きな表面変位量を示した．その理由は以下の通りと考えられる．光励起されたキャリアは，その場では再結合せず複合膜内を拡散する．その結果，熱源が励起レーザーの位置から遠ざかるため，スポット距離が長くても表面変位が大きくなる．このことは，キャリア拡散と熱拡散の両方を同時に考慮しなければならないことを示唆している．

ここで，3 つの複合膜試料の測定結果に改めて注目する．キャリア拡散と熱拡散の両方を考慮した計算モデルでは，表面変位の量は NP 間隔に比例して減少することが示された．しかし，図 1 に示すように，NP-27 の表面変位量は NP-13 と NP-47 よりも小さいことがわかった．これは，NP-27 の複合膜内で発生した熱量が少ないあるいはより遠くまで熱拡散したためと解釈することができる．より詳細な理論計算が今後必要である．

3. 研究目標の達成状況

本研究では，中性粒子ビームとバイオテンプレートを用いて東北大流体研で作製した無欠陥ナノサイズ構造に対して宮崎大学で開発したLH-PD測定を適用し，Si-NP/SiGe複合膜における熱拡散およびキャリア拡散を評価することを目的として行った．昨年度は，試料内に形成されたキャリアが基板側にも拡散してしまう試料構造であったため詳細なキャリア拡散を測定できなかった．そこで今年度は基板と複合膜の間の絶縁層（SiO_2酸化膜）の厚さを厚くすることで複合膜内でのキャリア拡散の評価を実施した．

励起レーザーと検出レーザー間距離を制御することでNP間隔の異なる3つのSi-NP/SiGe複合膜の表面変位を測定した．その結果，NP間隔が約27 nmの場合，光励起されたキャリアの非発光再結合割合が低く，発生した熱も拡散しやすい可能性が示された．

測定試料の工夫によって光励起キャリアの拡散および発生した熱の拡散について議論できたことから，達成度は８割と判断する．

4. まとめと今後の課題

測定試料の工夫によって光励起キャリアの拡散および発生した熱の拡散について議論することができたが，実際のキャリア拡散率（キャリア寿命）や熱拡散率の値を求めることはできなかった．値の算出には精密な理論計算結果が必須となるが，計算におけるSi-NP/SiGe複合膜のモデル化が困難であったためと思われる．Si-NPとSiGeの界面はキャリア拡散および熱拡散の妨げとなるため，慎重な界面抵抗（界面熱抵抗を含む）の設定が欠かせない．より詳細な解析のために，簡単な複合膜を用意して実験と理論計算を行うことで基礎となる物性値を算出することが今後の課題である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 浦野翔大，碇哲雄，福山敦彦：光ヘテロダイン光熱変位信号の平均化データを入力とした学習済み機械学習モデルによるSiの熱拡散率とキャリア寿命推定，第16回半導体材料・デバイスフォーラム，福岡，(2025)，P-4.

[2] S. Urano, Y. Hosokoshi, D. Ohori, K. Endo, S. Samukawa, A. Fukuyama: aluation of Thermal and Carrier Diffusion Properties of Si-Nanopillar/SiGe Composite Films by Laser Heterodyne Photothermal Displacement Method with Controlled Probe and Excitation Positions, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS3-7 pp. 430-432.

[3] T. Ikari, D. Ohori, A. Fukuyama: Underlying Perspectives of Positive Temperature Dependence of Photoluminescence Peak Energy in Quantum Structures and Localized States of Semiconductors, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS3-11, pp. 439-441.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I095
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

マルチせん断を用いた自然風制御技術の構築

Development of Technology to Generate Quasi-atmospheric Winds by Injecting Multiple Shear Forces

高牟礼 光太郎*†，大島 逸平**††
*秋田大学共同サステナブル工学専攻，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

屋外構造物の空力特性を理解し，実大大気乱流を模擬できる風洞技術を高度化するためには，高レイノルズ数で乱れ強度が大きく，かつ大きな空間スケールを有する乱流場を安定に生成する必要がある．しかし，従来の格子乱流では初期擾乱や生成方式に依存する影響が大きく，風洞内で得られた乱流から一般的な大気乱流の普遍的性質のみを抽出することは容易ではない．

本研究では，隣接ファン間に形成されるせん断層のみを利用して乱流を生成するマルチファン風洞を用い，入力信号に起因する人工的な周期成分を測定データから分離・除去することで，自然発達した乱流成分のみの減衰特性を評価することを目的とした．さらに，位相制御条件の違いが乱流発達に及ぼす影響を明らかにし，準大気乱流の再現・制御技術の基盤を構築することを目的とした．

2. 研究成果の内容

本年度は，上記課題の一環として，マルチせん断流システムを用いた準大気乱流制御に関する実験的検討を実施した．実験には宮崎大学に設置された大型マルチファン風洞を用いた．本風洞は鉛直 11 台×水平方向 9 台の計 99 台の小型ファンから構成され，各ファンの回転数を独立に制御できる．測定部断面は 1.80 m × 2.54 m，風洞全長は 15.5 m であり，流れ方向を x，水平方向を y，鉛直方向を z とする座標系を定義した．速度計測には X 型熱線流速計を用いた．

各ファンへの入力は，平均流速 $U_{in} = 4.67$ m/s，変動速度実効値 1.0 m/s とし，$f_1 = 0.72$ Hz および $f_2 = 0.36$ Hz の二つの周波数成分を重畳した非定常信号を与えた．位相制御は，隣接ファンを逆位相とする $N=2$，周期 $T_0 = 1/f_2$ を 5 分割して 4 台ごとに異なる位相を与える $N = 5$，全ファンに独立なランダム位相を与える $N = 99$ の 3 条件で比較した．特に $N = 99$ 条件では，高レイノルズ数下で準一様・準等方乱流に近い場が得られることを確認した．

得られた速度信号 $u(t)$ は，入力に由来する周期成分 $u_\theta(t)$ と乱流成分 $u_s(t)$ に分解して評価した．具体的には，周波数 $\alpha f_1 + \beta f_2$（α，β は正の整数）に対応するパワースペクトルのピーク成分を近傍補間により除去した．その結果，生データでは入力振幅に応じて乱流減衰指数 n が 0.89〜1.75 と広く変化したのに対し，周期成分除去後の乱流成分では $n \approx 1.1$ でほぼ一定となり，入力振幅に依存しない減衰則が得られた．図 1 に風洞外観と代表的な解析結果を示す．

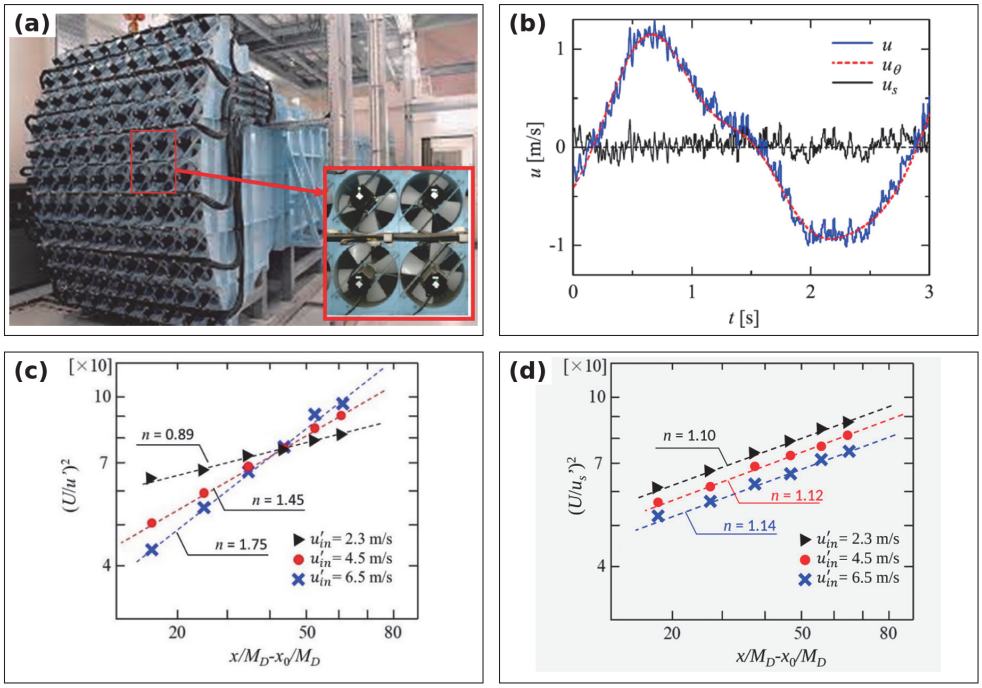


図 1：マルチファン風洞と代表的な解析結果．(a) 風洞外観，(b) 速度信号分解例，(c) 生データに基づく減衰指数，(d) 周期成分除去後の減衰指数

3. 研究目標の達成状況

申請時には，自然風に近い乱流境界層を再現するための最適駆動条件の取得を目標とした．これに対し，多数ファン風洞における位相条件の影響を評価し，入力に由来する周期成分を除去することで，乱流本来の特性を抽出できることを示した．これらの成果の一部は 2025 年 11 月の ICFD で発表した．一方で，国際ジャーナルへの投稿は当初予定より遅れており，現在原稿を準備中である．

4. まとめと今後の課題

マルチファン風洞を用いて準大気乱流を生成し，周期成分を除去した乱流成分の下流減衰特性を評価した．その結果，生データでは減衰指数が入力振幅に依存したが，周期成分除去後には $n \approx 1.1$ のほぼ一定の減衰則が得られた．今後は，準一様性・準等方性や空間スペクトル等の評価を進め，自然風応答評価に資する準大気乱流生成技術へ展開する予定である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] K. Takamure, I. Oshima: Control of Quasi-Atmospheric Turbulence via Multi-Shear Flow Systems, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-43, pp. 123-124.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project Code	J25I096
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Health, Welfare and Medical Cares
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Strategic Deployment of Aerosol Sensors in Confined Spaces for Enhanced Respiratory Virus Detection: An Optimisation Study Based on Computational Fluid Dynamics Simulations

Yujie Li*†, Naoki Kobayashi**, Hitomi Anzai**
Makoto Ohta**††, Craig McLachlan*
*The Centre of Healthy Futures, Torrens University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Airborne transmission of respiratory viruses is strongly influenced by the generation, transport, and dispersion of droplets expelled during breathing and coughing. While computational fluid dynamics (CFD) has been widely applied to study droplet behaviour, many existing studies rely on simplified symmetric airway geometries that do not adequately represent the anatomical asymmetry of real human respiratory systems. This limitation may affect the accuracy of predicted airflow dynamics, wall shear stress (WSS), and droplet generation characteristics, which are critical inputs for modelling virus dispersion in indoor environments.

Therefore, the objective of this first-year study is to investigate how airway geometry influences airflow behaviour and droplet generation by comparing symmetric and asymmetric airway models under controlled conditions. Specifically, this study evaluates the effects of bronchial asymmetry and the number of airway generations on airflow patterns, WSS, and droplet formation using CFD simulations. The findings will provide a more realistic foundation for subsequent research on airborne virus transport in indoor spaces and support the future optimisation of sensor placement for early virus detection.

2. Details of program implement

The simulation framework was developed to analyse airflow behaviour and droplet generation in human airways during coughing. The implementation process consisted of airway model development, CFD simulation, droplet modelling, and result analysis.

Two types of airway geometries were implemented for comparison: the symmetric Weibel model and the asymmetric Kitaoka model. The Weibel model was constructed using SolidWorks 2022, while three Kitaoka models (KMG3, KMG5, and KMG8) were generated using Lung4Cer. All models were designed with comparable volume and surface area to enable controlled comparisons.

The airway geometries were imported into ANSYS Fluent for transient airflow simulations under coughing conditions. A physiological cough flow profile was applied at the inlet, and airflow behaviour within different airway generations was analysed.

To simulate droplet formation, a coupled Eulerian Wall Film (EWF) and Discrete Phase Model (DPM) approach was implemented. The EWF model represented the mucus layer on airway surfaces, while the DPM tracked droplet formation and movement. Wall shear stress (WSS) was used to identify droplet detachment regions.

Simulation outputs, including airflow velocity (Figure 1[left]), WSS distribution (Figure

1[right]), droplet size, and droplet detachment locations, were processed and compared across different airway geometries, cough flow rates, mucus viscosities, and airway generations.
This implementation establishes a computational framework for improving the realism of respiratory droplet generation modelling and supports future studies on airborne virus transmission.

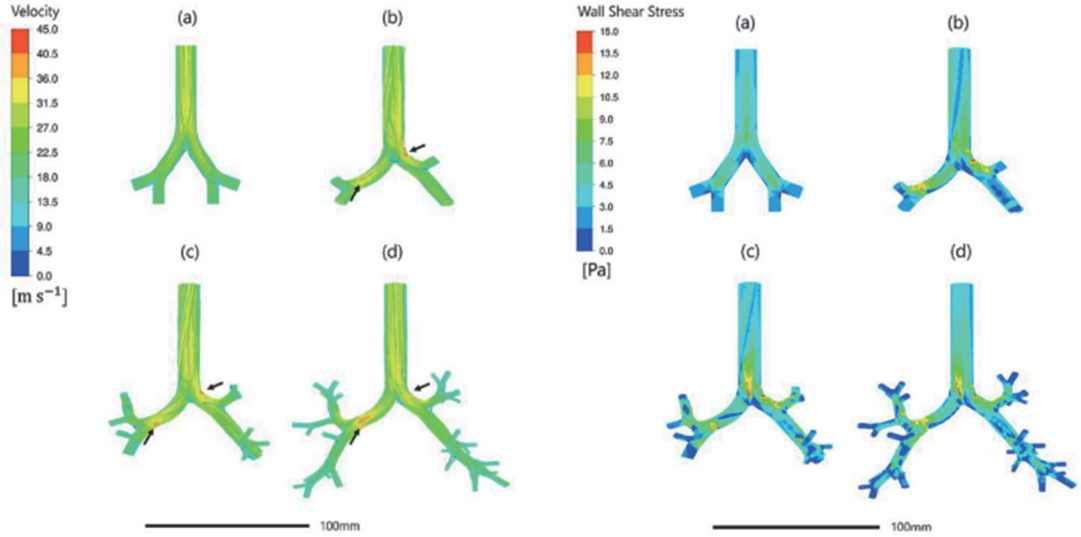


Figure 1: Velocity (left) and WSS (right) contour plots for:
(a) Weibel, (b) KMG3, (c) KMG5, (d) KMG8

3. Achievements

This project developed a CFD framework to study respiratory droplet generation during coughing using both symmetric Weibel model and asymmetric Kitaoka model airway models.
Key achievements include:

- Developed comparable airway models for controlled analysis
- Simulated transient cough airflow in ANSYS Fluent
- Implemented EWF-DPM models for droplet generation analysis
- Identified the effects of airway asymmetry on airflow, WSS, and droplet detachment
- Evaluated the impact of airway generation depth on droplet formation
- Demonstrated that the Kitaoka model better captures realistic droplet generation behaviour

These outcomes provide a foundation for future airborne transmission studies.

4. Summaries and future plans

This study showed that airway geometry significantly affects droplet generation during coughing. The asymmetric Kitaoka model produced more complex airflow patterns and a wider droplet size distribution than the symmetric Weibel model. Airway generation depth, cough flow rate, and mucus properties also influenced droplet formation.
Future work will focus on using patient-specific airway models, simulating droplet transport in indoor environments, and optimising sensor placement for early virus detection.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Y. Li, N. Kobayashi, C. McLachlan, M. Ohta: Optimisation of Aerosol Sensor Placement in Indoor Spaces, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-74, pp. 206-207.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

課題番号	J25I097
区分	一般公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	2 年目

極微細ノード MOSFET に向けた新規ゲートスタックプロセスの開発
Development of Novel Gate Stack Process for Advanced Node MOSFETs

森田 行則*†, 遠藤 和彦**††
*産業技術総合研究所, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

2nm 以降の超微細化した技術ノードのトランジスタに要求されるゲートスタックのプロセスを開発する. ターゲットとしては約 1 nm の電気的換算膜厚（CET）において駆動力の劣化を抑制したゲートスタック構造, プロセスを探索する. 特に, Si(100)に比較して, ホール移動度の大きい Si(110)チャネル面を用いた FET の構築に向け, プロセス条件の確認を行う.

2. 研究成果の内容

Si(110)面に対するウェット処理において, 従来の希弗酸（DHF）による酸化膜剥離処理と, 開発した低 pH ウェット処理と水素（H_2）アニールの組み合わせ処理を行った表面に対して, 原子間力顕微鏡による表面モフォロジー計測を行い, プロセスの影響を検証した. DHF 処理の場合, 異方性エッチングの影響で安定した(111)ファセットを側壁に持つ微小なヒロックが形成され, 表面のラフネスが著しく増大した. それに対し, 低 pH 溶液処理と H_2 アニールの組み合わせ処理では, (111)ファセット生成が抑制され, 安定な単原子層高さのステップと平坦なテラスの構造（ステップ-テラス）構造が形成された.

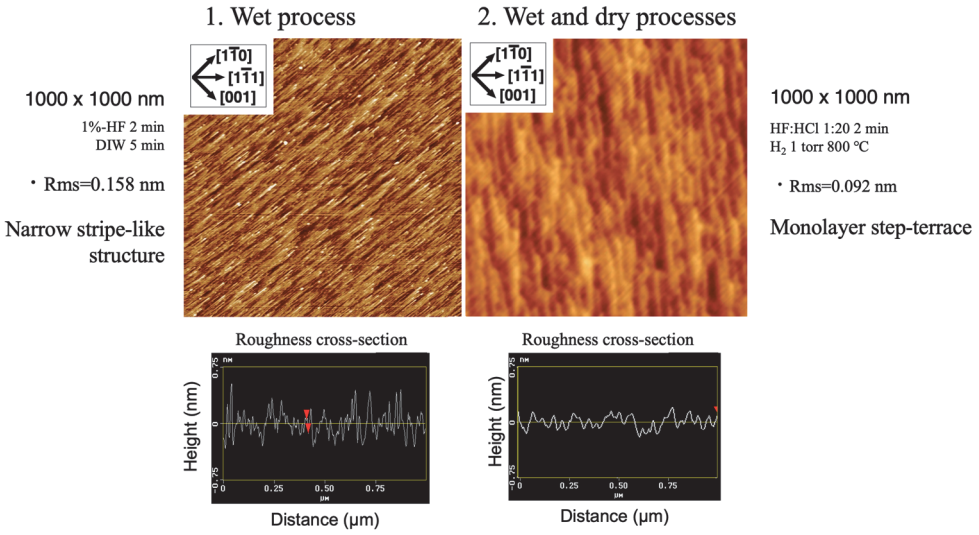


図 1：DHF 処理および, 低 pH 処理と H_2 アニールの組み合わせにより形成した Si(110)表面の原子間力顕微鏡像. それぞれの像に対して断面形状プロファイルを表示している.

3. 研究目標の達成状況

産総研内で形成した Si(110)上の界面層/高誘電率酸化膜（high-k）スタックに対し, 流体研が保有する先端ドライプロセス装置によるポストプロセスを行い, 電気的特性を取得して, 界面への影響, ゲートスタックの比誘電率, 漏れ電流特性等を取得し, ゲートスタック特性への影響を調査する予定である. 産総研側では, すでに新規界面層形成プロセスを確認済みで, 流体研の保有するドライプロセス技術との融合を目指す.

4. まとめと今後の課題

Si(110)表面処理プロセスによる表面モフォロジーの影響を検証した. Si(100)に比較して, Si(110)表面はウェットプロセスによる表面ラフネス発生の影響を受けやすいが, 適切なプロセス適用によりラフネス発生を抑制できることがわかった. 今後は Si(100)と同様, Si(110)面においてもゲートスタックを形成し, 電気的特性の取得を進める.

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Y. Morita: Evaluation of Surface Roughening for Si(110) Ultrathin Nanosheet Transistor Channel, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics* (ICFD 2025), Sendai, (2025)

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I098
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

超音速飛翔体表面の高精度圧力場計測の実現に向けた 2 色発光型 DP-AA-PSP の開発及び基礎研究

Development and Fundamental Research on a Two-Color DP-AA-PSP for High-Precision Pressure Field Measurement on the Surface of Supersonic Projectiles

沼田 大樹*†，大谷 清伸**††
*東海大学工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

高速飛翔体や飛翔体由来の衝撃波に起因する高速変動する圧力場の定量可視化計測手法として，感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) がある．PSP は光を介して計測対象上の圧力場を面的に取得可能な計測手法であり，試験部内で自由飛行する飛翔体の計測においては極めて親和性が高い手法である．一方，その計測原理ゆえに飛翔体計測では課題も多く，例えば超音速で飛翔する飛翔体上の圧力場計測を実施する場合，撮影時に許容される露光時間は高々マイクロ秒であり，高速度カメラ等で取得可能な光量の絶対値は極めて低い．そのため，発光強度の向上など特性の向上を図る必要がある．加えて，PSP は温度感度も有しており，温度変化により発光強度が変わることが知られている．そのため，高精度に圧力場計測を実施する場合，この温度による発光強度変化の影響を補正する手法が必要となる．これらを踏まえ，本研究ではこれら課題を解消するため，PSP 計測手法の中でも温度の影響を補正可能な 2 色発光型 PSP に着目し，通常衝撃波計測に用いている色素塗装型感圧塗料 (Dye-Painted PSP, DP-AA-PSP) の 2 色化に向けた基礎データ取得を目的とした研究を行った．また，DP-AA-PSP の 2 色化に伴い PSP の特性が受ける影響等を評価し，発光強度の維持，もしくは向上を実現する 2 色化手法の基礎研究を実施した．

2. 研究成果の内容

本課題の実施のために，基礎的な感温塗料 (Temperature-Sensitive Paint, TSP) を従来型の DP-AA-PSP に塗装する形で， DP-AA-PSP の 2 色化を試みた．TSP は特徴の異なる複数の候補を選定し，それらそれぞれについて異なる塗装条件下で DP-AA-PSP に塗装し，DP-AA-PSP の 2 色化を行った．PSP の発光スペクトルは分光蛍光光度計にて計測し，2 色化された各サンプルにおいて塗装条件や TSP 色素の影響が発光スペクトルに対してどのように影響するかを評価した．

スペクトル評価の結果，特定の塗装条件において PSP と TSP の発光強度バランスが適した水準になる条件を見出した．しかしながら，発光スペクトルバランス以外の PSP としての特性が充分でなく，今後塗装条件や TSP 色素の選定・調整などにより，不足する特性を向上させる必要のあることが示された．また，東北大学流体科学研究所のバリスティックレンジを用いた空力試験において開発した 2 色発光型 DP-AA-PSP を用いた空力試験を実施したが，温度分布に起因する計測精度の向上が見られた一方，PSP としての特性低下の

影響による計測上のデメリットも確認された.

3. 研究目標の達成状況

本研究で目的としていた 2 色発光型 DP-AA-PSP の開発に必要となる基礎的なデータ取得は達成され，バリスティックレンジを用いた実証試験でも良好な結果を得た．そのため，研究目的は概ね達成されたが，一方で実際の高精度計測を目指すうえでの 2 色計測における課題も明らかとなった.

4. まとめと今後の課題

本研究では DP-AA-PSP の 2 色化を目指した研究を行い，研究目的達成のために必要となる研究成果である，DP-AA-PSP の 2 色化に伴う塗装条件や色素条件が 2 色 DP-AA-PSP の特性に及ぼす影響を明らかにした．また，開発した 2 色発光型 DP-AA-PSP を用いたバリスティックレンジを用いた実証試験も行い，その有用性も明らかにした．一方，DP-AA-PSP の 2 色化に伴う新たな課題も明らかとなったため，今後は新たな課題の解消や 2 色 DP-AA-PSP の更なる特性向上を行い，DP-AA-PSP を用いた超音速飛翔体計測の更なる高精度化を図る計画である.

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] D. Numata, Y. Kawamata, T. Kawashima, K. Yoneyama, H. Takata, K. Ohtani: Fundamental Study on Two-Color DP-AA-PSP for Pressure Field Measurements on Supersonic Projectiles, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-17, pp. 54-55.

[2] H. Takata, K. Yoneyama, Y. Kawamata, T. Kawashima, D. Numata: Application of Sulfuric-Acid-Type DP-AA-PSP to Aerodynamic Testing, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025), OS27-63.

[3] K. Yoneyama, H. Takata, Y. Kawamata, T. Kawashima, D. Numata: Fundamental Characterization of Sulfuric-Acid-Type DP-AA-PSP, *Proceedings of the Twenty- second International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025), OS27-61.

[3] Y. Kawamata, T. Kawashima, D. Numata: Prototype Development of Dye-Painted AA-PSP Using Anodized Coatings on Aluminum Alloy, *Proceedings of the 21st International Conference on Flow Visualization,* Tokyo, (2025).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）

なし

（受賞）

なし

（マスコミ発表）

なし

課題番号	J25I100
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	2 年目

不透明媒質中での衝撃波形成と伝播過程の実験的解明

Experimental investigation on shock wave development in opaque medium

水書 稔治*†，大谷 清伸**††
*東海大学工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究課題の目的は，可視光に対する不透明媒質内を伝播する衝撃波の可視化計測法の確立である．

火薬類の利用は，火薬類取締法で規制されており，その保管においては，種類，および薬量に応じた方法および周囲への安全対策が規定されている．一般に，火薬庫の周囲は防爆壁と呼ばれるコンクリート製の擁壁，あるいは土堤で囲まれており，万が一の爆発事故の場合には，これらの防爆壁が爆発で生じた火薬庫の構造材の破片の飛散を大きく抑制する．さらに，破片の飛散と共に周囲に広がる爆風は，爆発で生じた衝撃波と後続する爆発生成気体の気流で形成される．爆風は，一定量の減衰を受けるものの，そのほとんどは防爆壁を乗り越えるため，周囲への伝播を強く抑制することは難しい．また，防爆壁との干渉で特異的に高圧部を発生させることが報告されている．このように，防爆壁と衝撃波の干渉による流体力学的効果の理解は，爆発安全研究上，極めて重要である．衝撃波と防爆壁の干渉様態の詳細解明には，光学的可視化計測が強力な実験手法であるが，爆点近傍では，不透明な爆発生成気体に光線が阻まれ，明瞭な可視化画像の取得が難しい．

そこで本研究課題では，縮尺模型を利用した室内実験において，爆発生成気体に瞬時に覆われるため光学的可視化が困難な防爆壁近傍での衝撃波伝播様態の可視化計測法の確立を目的とする．

2. 研究成果の内容

本研究課題では，アジ化銀ペレットのレーザ起爆で発生させた球状衝撃波（以下，衝撃波）を利用し，防爆壁（固体壁）と衝撃波の干渉様態について，防爆壁高さ h/t（防爆壁厚さ t，高さ h），および，換算距離 x/(w)^(1/3)（設置距離 x，爆薬の TNT 換算質量 W）を実験条件として，実際の法規上の火薬庫に対する周囲に対する安全距離（保安距離）を想定した縮尺模型の利用を検討している（図1）．この縮尺模型上での衝撃波伝播様態を，影写真法，および，背景型シュリーレン法（BOS 法）による可視化計測を行うが，この際，爆発生成気体の影響で防爆壁周囲が不透明となることを考慮し，可視化光源を白色光（メタルハライド光源），近赤外光（810 nm），および X 線を利用し，不透明媒質中での衝撃波伝播の可視化結果を比較する実験を検討した．実験に先立ち，Hydro-code によるアジ化銀ペレットの起爆過程から衝撃波形成に至る過剰圧を取得した予備実験結果（図 2）および数値解析結果（図 3）から，気中爆発での過剰圧予想に基づく実験条件を検討した．実験では，特に爆薬近傍における火薬の燃焼ガス（光学的に不透明）中でも可視化が期待できるフラッシュX 線による

可視化画像取得が期待の高い方法として期待する.

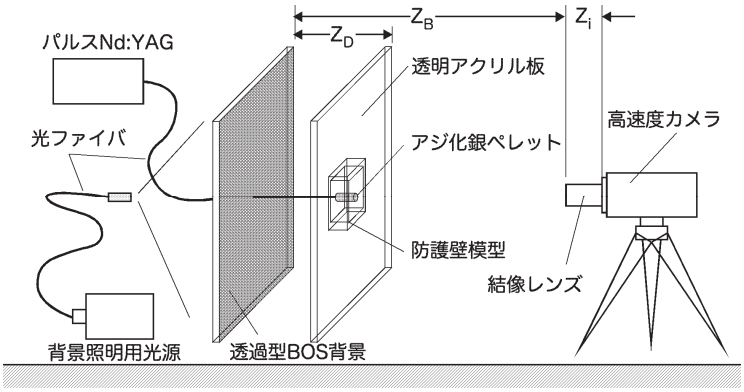
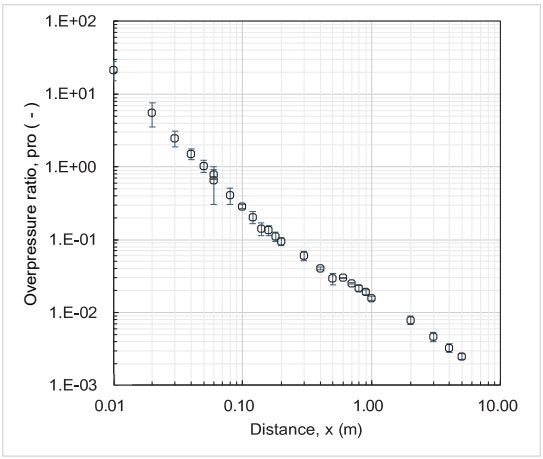
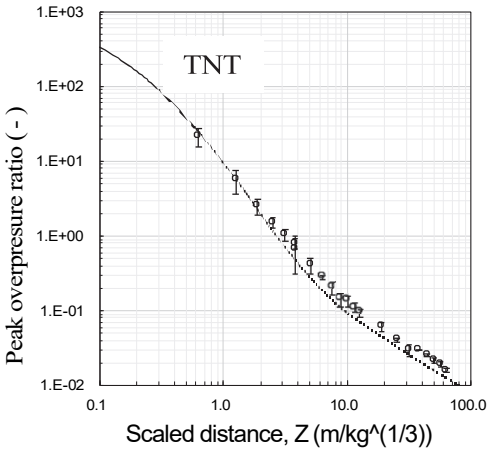


図1：可視光及び近赤外光を利用した背景型シュリーレン法による衝撃波可視化系計測系

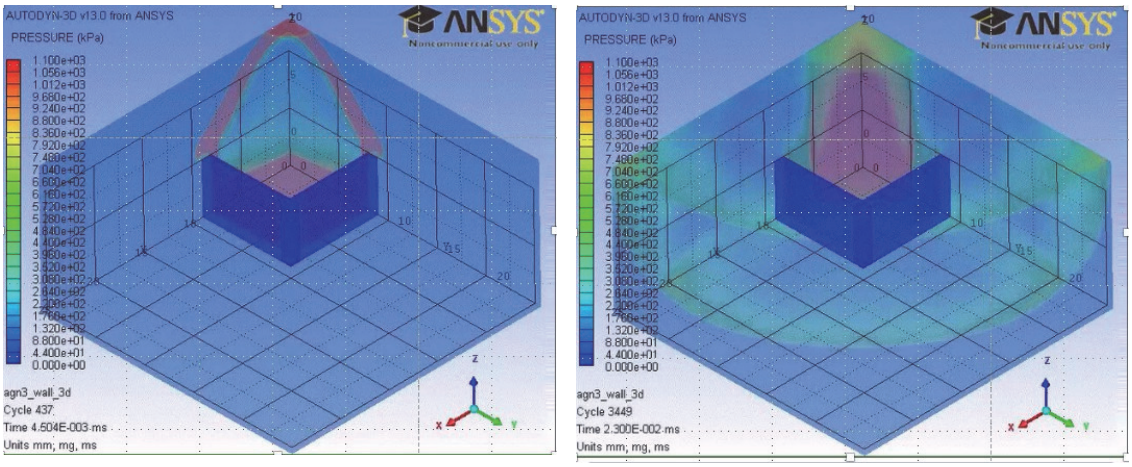


(a) AgN_3ペレット10 mg による過剰圧分布



(b) AgN_3ペレット10 mg による過剰圧分布(規格化距離)とTNT 爆薬によるもの（実線）との比較，(AgN3 のTNT 換算係数0.40)

図2：アジ化銀（AgN_3）ペレット 10 mg による過剰圧分布



(a) 起爆から 50 us 後　　(b) 起爆から 300 us 後

図3：防爆壁模型内部での AgN3 ペレットの爆発による過剰圧分布の数値解析例

3. 研究目標の達成状況

本年度計画していた流体科学研究所におけるフラッシュX 線光源による可視化計測が，未達成である．

4. まとめと今後の課題

本年度は，フラッシュX線撮影は安全管理上の理由と施設利用スケジュールの都合上，実施が困難な状況となった．そのため，昨年度に引き続き，微小爆薬の起爆で発生する衝撃波が，爆点近傍で物体（防護壁模型）との干渉による伝播挙動の特性のうち，可視光および近赤外光による可視化計測を中心に進め，実験および数値解析による研究を実施した．本研究の主眼は，火薬の爆発で生じる燃焼ガスに覆われる爆源近傍での状態を，フラッシュX 線によって可視化計測し，可視光による計測では達成できない化しか画像の取得である．そのため，次年度以降でフラッシュX 線による可視化計測の実施と結果の解析を引き続き実施する．一方，フラッシュX 線による可視化計測は，様々な条件調整が必要となるため，予備実験を繰り返し行うことで，適切な条件設定と計測対象の選定が極めて重要となる．

5. 研究成果

1） 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

該当無し

2） 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Mizukaki, T., Iwamoto, Y., Nakamura, Kiura, K., S., Ohtani, K. Experimental investigation on shock wave development in opaque medium, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-20, pp. 60-61.

3） その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）該当無し

（受賞）該当無し

（マスコミ発表）該当無し

課題番号	J25I101
区分	一般公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

糸状菌由来機能性アミロイドの界面特異的自己組織化機構の解明

Interface-Specific Self-assembly mechanism of fungal functional amyloid

阿部 敬悦*†, 高橋 尚央*
馬渕 拓哉**††
*東北大学農学研究科, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

機能性アミロイドと呼ばれるタンパク質は, 自己組織化して線維構造を形成することで生物の形態形成に寄与する. 機能性アミロイドにおいては, 自己組織化が「界面」によって促進される現象がよく観察される. タンパク質は天然環境で様々な種類の界面(気液界面・固体表面・脂質膜など)に曝されるため, 界面とタンパク質の相互作用は普遍的な現象であるといえるが, その分子機構の体系的な理解は為されていない.

日本の伝統的な醸造産業を支える麹菌(*Aspergillus oryzae*)の細胞表層は, ハイドロフォビン RolA と呼ばれる機能性アミロイドで被覆されている. RolA は界面活性タンパク質としての特徴も有し, 界面に強く吸着する. 吸着後, RolA は界面で特異的に自己組織化して硬い線維状構造を形成し, 免疫ステルス性や表面疎水化などの機能を発現する. RolA の詳しい機能発現機構を解明するためには, 線維構造形成過程を理解する必要があるが, 界面という微小領域で生じる RolA の特異的な構造変化を実験的に補足することは困難である. そこで本研究では, 実験と計算(MD シミュレーション)を統合することで界面上での RolA の構造変化を分子レベルで明らかにすることを目指した.

2. 研究成果の内容

RolA が界面上でのみ特異的に自己組織化するためには, RolA モノマーは界面吸着時に特異な構造状態をとる必要があると考えられる. そこで, RolA のバルクと界面での構造差異を, 実験とシミュレーションの双方向から解析した.

実験には, 麹菌が分泌した RolA をイオン交換クロマトグラフィーで精製したものを使用した. Langmuir-Blodgett 法で気液界面上に形成された RolA 膜をシリコンウエハに転写し, 原子間力顕微鏡(AFM)と全反射フーリエ変換赤外分光法で(ATR-FTIR)で構造状態を評価した. RolA は気液界面でアモルファスと線維という二状態で存在しうるため, 両者とも解析対象とした. AFM 観察の結果, アモルファス状態では明瞭な構造は観察できなかったが, 線維状態では基板表面が線維で密に覆いつくされている

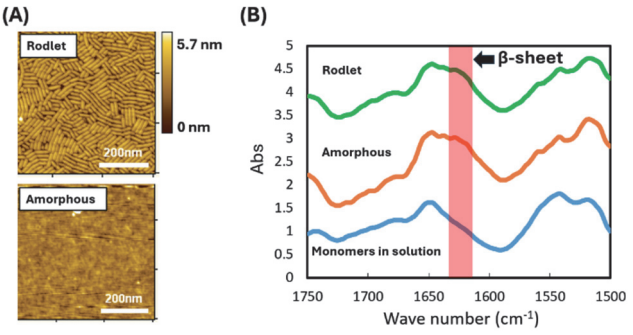


Figure 1. AFMとFT-IRによる構造解析

ことが確認できた(Figure 1A). 続いて，ATR-FTIR によってタンパク質の二次構造情報を含有する Amide I バンド域のスペクトル形状を確認した．その結果，アモルファス・線維状態ともに，β シート構造の含有割合がバルクの RolA よりも大きいことが明らかになった(Figure 1B)．アミロイドタンパク質では一般にモノマー分子間で β シート構造をつくることで線維構造へと変化するため，線維状 RolA ではこの分子間 β シート構造形成が検出されたと考えられる．一方でアモルファス RolA は線維化していないにも関わらず β シート構造形成が検知されており，RolA が界面に吸着したことでモノマーレベルでの特異な構造変化が生じたことが示唆された．

実験で示唆された RolA モノマーの界面特異的な構造変化を分子レベルで理解するため，MD シミュレーションを実施した．RolA のアミノ酸配列情報から Alphafold2 によって予測立体構造を取得し，これをシミュレーションの初期構造として使用した．シミュレーション系には水層と真空層とを配置し，その界面（気液界面）に RolA が吸着したときの構造状態を解析した．水層に RolA モデルを配置してシミュレーションを開始したところ，即座に RolA は界面に移行し，安定に界面に保持された．界面後の RolA の二次構造を DSSP プログラムで解析したところ，RolA は終始ほとんど二次構造を変化させていないことが明らかになった(Figure 2)．二次構造変化に表れない構造変化を検出するために，界面吸着前後での RolA 分子の radius of gyration (Rg)と root mean square fluctuation (RMSF)を算出した．その結果，界面 RolA はバルクよりもやや大きい Rg を示し，拡張的な構造状となっていることが明らかになった(Figure 3A)．また界面 RolA の N 末端領域はバルクよりも大きい RMSF を示し，当該領域の構造揺らぎが増大していることが示唆された(Figure 3B).

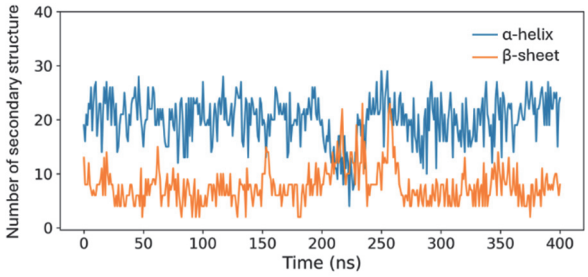


Figure 2. 二次構造形成量解析

以上の実験・シミュレーションの結果より，RolA はバルクから界面に移行することでモノマー一分子レベルで全体構造が拡張，部分的な構造揺らぎが増大することが明らかになった．また，実験的には界面上 RolA は線維形成前でも β シート構造を形成していることが推測されたが，これは界面上モノマー間で線維形成には至らない相互作用が生じて部分的に β シート構造が形成されていた可能性がある．以上の複合的な要因によって，RolA は界面吸着時にのみ線維形成すると考えられる．この界面特異的な構造変化は界面応答性の分子スイッチとも考えられ，さらなる研究の深化により，生物機能解明に留まらず，界面特異的に構造形成するナノ材料開発への応用が期待できる．

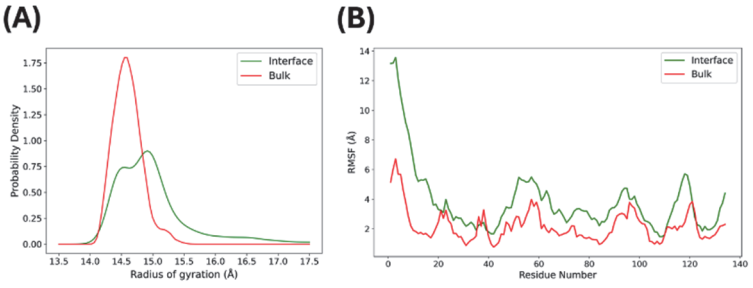


Figure 3. RolAのバルクと界面におけるRg・RMSF比較

3. 研究目標の達成状況

RolA モノマーの界面上での構造変化の解析は実験・シミュレーションともに目的を達した．当初はさらに，RolA モノマーのうちの特に自己組織化に関与することが明らかになっている領域を抜き出した 12 アミノ酸残基の短鎖ペプチドを用いた，実際の自己組織化過程のシミュレーションも計画していたが，自己組織化に伴う β シート構造の増大をシミュレーション観測することができなかった．したがって，当初予定していた論文執筆には遅れが生じている．

4. まとめと今後の課題

本研究では RolA モノマーの界面特異的な構造変化を実験とシミュレーションの双方向から解析し，微小な構造変化を明らかにすることができた．この構造変化は RolA の自己組織化の界面特異性を規定している可能性がある．一方で，今回のシミュレーション結果は，FT-IR で検出されたアモルファス RolA の β シート構造形成を反映していなかった．したがって，今後は RolA 一分子に留まらず，複数分子が自己組織化して分子間 β シート構造を形成する過程をシミュレーションで再現し，分子論的な観点からその機構を明らかにする必要がある．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] N. Takahashi, T. Mabuchi, Y. Terauchi, T. Tanaka, A. Yoshimi, H, Yabu, K. Abe: Mechanistic Insights into the Interface-Specific Self-Assembly of Fungal Functional Amyloid RolA, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-72, pp. 199-201.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25I102
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	３年目

再突入カプセルの動的不安定現象解明のためのカプセル後流領域に対する３次元密度計測

Three-Dimensional Density Measurement of Wake Region Behind Re-entry Capsule Model to Clarify the Mechanism of its Dynamic Instability

太田 匡則*†，永井 大樹**††
山岸 雅人*，伊神　翼**，大谷 清伸**
*千葉大学大学院，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

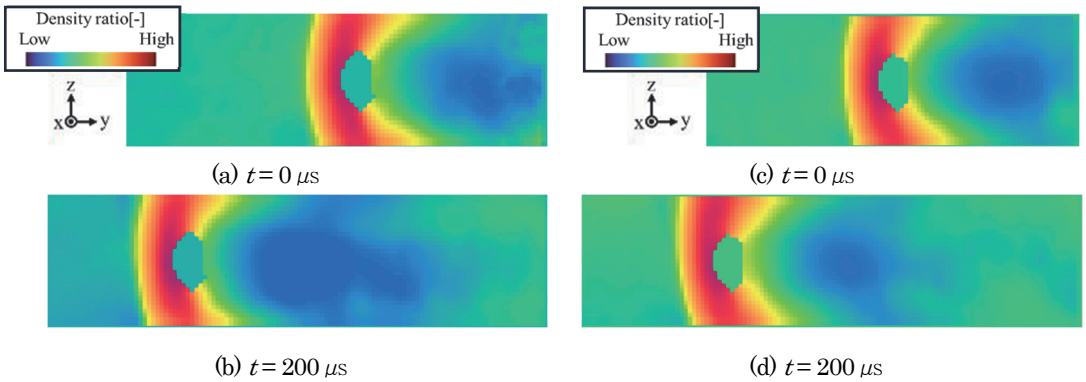
再突入カプセル形状物体まわりの高速非定常流れ場に対する定量的３次元密度計測を実現するために，背景設置型シュリーレン法（Background Oriented Schlieren, BOS 法）を利用した多方向同時計測システムを弾道飛行装置内に構築する．新型のカプセル形状を含むカプセル模型まわりの３次元密度場を再構成し，数値計算結果との直接的な比較・検証を世界に先駆けて実現する．これにより実験的な流れ場解析からカプセルの動的不安定性現象のメカニズムの解明およびカプセルの最適形状の検討を可能とすることを目的とする．

2. 研究成果の内容

これまでに，デジタルカメラ 11 台を利用した多方向同時計測系を弾道飛行装置内に２セット設置して４次元密度計測を行なってきたが，今年度は，下流側の多方向同時計測系に設置する小型高速度カメラを６台から８台へ増加し，上流側のデジタルカメラで１時刻，下流側の小型高速度カメラで２時刻分の合計３時刻において再突入カプセル模型まわりの非定常流れ場に対する BOS 法による３次元密度計測の実現を試みた．昨年度までに，弾道飛行装置内を自由飛行中の物体まわりの非定常流れ場に対して，３時刻における３次元密度分布の取得と飛行姿勢の計測に成功していたが，非定常現象をより詳細に捉えるため，小型の高速度カメラを８台導入してカプセル模型の後流領域の時間変化を捉えることを試みた．これともなって背景画像用の LED 光源駆動用回路の改良を行い，4μs 程度の短パルスで複数回 LED を発光させることに成功した．

その結果，昨年度までに達成した，自由飛行中のはやぶさ型カプセル模型の飛行方向と姿勢，カプセル模型まわりの３次元非定常密度場の同時計測に加えて，一度の射出実験で合計３時刻における３次元密度計測に成功した．今年度は従来のはやぶさ型カプセルに加えて，カプセル背面に r をつけたフィレット形状の模型を用いて４次元計測を行った．図１は小型高速度カメラ８台で撮影された異なる時刻における BOS 画像からそれぞれ３次元再構成を行なった結果である．図中(a)と(b)が従来のはやぶさ型模型，(c)と(d)がフィレット形状模型の模型中心を通る断面内の無次元密度比分布を示している．それぞれの二つの画像の撮影間隔は 200μs で飛行マッハ数は約 1.3 である．模型背面の形状による後流領域の流れ場構造の違いは明確には捉えられてはいないが，(b)と(d)とを比較すると，模型背後の膨張領域の形状に若干の差が生じている様子が確認できる．これらの結果から，数値解析（CFD）結果と

本実験結果とを直接比較，検証することが可能となるため，より詳細な議論の実現が期待される．



(a) $t = 0\ \mu s$　　(c) $t = 0\ \mu s$

(b) $t = 200\ \mu s$　　(d) $t = 200\ \mu s$

図１：小型高速度カメラ８台による３次元密度計測結果（模型中心断面内における密度比分布）

3. 研究目標の達成状況

本研究では，昨年度までに実現した再突入カプセルまわりの流れ場に対する実験的３次元，計測に加えて，小型の高速度カメラ８台を用いた合計３時刻における４次元的密度計測に成功した．カプセルの運動解析や最適形状の検討には，主に数値計算による解析が行われてきたが，それらを検証するためにも実験的アプローチは重要である．本研究では風洞実験では実現することが難しい，非定常な後流領域に対する３次元，４次元計測を実現し，模型の飛行姿勢も併せて取得する手法の開発に成功したため，研究目標は十分に達成できていると言える．

4. まとめと今後の課題

本研究では 11 台のデジタルカメラを用いた多方向同時計測システムと，８台の小型高速度カメラを用いた多方向同時計測システムを利用して弾道飛行装置内を自由飛行する再突入カプセル模型まわりの４次元計測を実現した．合計３時刻における計測を行うことで，自由飛行中のカプセル模型の飛行方向と飛行姿勢，模型まわりの３次元密度場の同時計測を実現した．これにより数値解析と実験結果の直接的な比較・検証が可能となった．はやぶさ型模型に加えて背面形状の異なるカプセル模型を利用した計測実験も行い，実験データの蓄積を試みた．現状ではカプセル背面の違いによる後流領域の流れ場構造の違いを明確に捉えることは困難であった．より詳細な流れ場構造を３次元計測で捉えるためには，計測系の空間解像度の向上が必要であり，その実現のためにはより高輝度な短パルス照明が必要となる．今後は本研究で取得した実験データと数値解析結果とを比較検証し，カプセルの自励振動発生メカニズムに対する現象解明を進めていく予定である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Masato Yamagishi, Masanori Ota, Kiyonobu Ohtani, Hiroki Nagai: Three-dimensional density measurement around a free-flight test model using Multi High-speed camera, *21st International Symposium on Flow Visualization*, Tokyo, Japan, No. ISFV21-1221 (2025)

2) **国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等**

[2] Ryota Miyazaki, Masato Ikawa, Masanori Ota, Tatsuro Inage, Masato Yamagishi, Ohtani Kiyonobu, Nagai Hiroki: Four-Dimensional Density Measurement in Unsteady Flow Field Around a Re-Entry Capsule Model by Multi High-Speed Camera BOS Systems, *Proceedings of the 25th International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-3, pp. 20-22.

[3] 津浦隼乙，井川将大，宮﨑龍汰，服部慎之介，稲毛達郎，太田匡則，大谷清伸，永井大樹，山岸雅人，廣瀬裕介: 再突入カプセル周りの非定常流れ場に対する四次元密度場計測，2025年度衝撃波シンポジウム，名古屋市，(2026), No. 3B2-3, pp. 1-3.

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project Code	J25I104
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Combined In situ & Ex situ, Multi-scale Stress Measurements in Crystalline Geothermal Reservoirs

Xiaodong Ma*†, Yusuke Mukuhira**††, Zhang, Shihuai**, Takatoshi Ito**
*University of Science and Technology of China
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Our proposed collaboration concentrates on the in situ stress measurements and its implications for the geothermal reservoir development. The in situ stress measurements and its role in geothermal energy extraction are interests shared by both institutions. We aim to overcome these obstacles by synthesizing the in situ measurements by ETH and the ex situ technique by the Tohoku partner Lab.

2. Details of program implement

In previous collaborative project, we conducted in-situ and ex-situ stress measurement, and we collected the data. Before the comparison and integration both in-situ and ex-situ stress measurement data, the heterogeneity of elastic parameter of rock should be considered, otherwise it might bring unignorable uncertainty into stress inversion results.

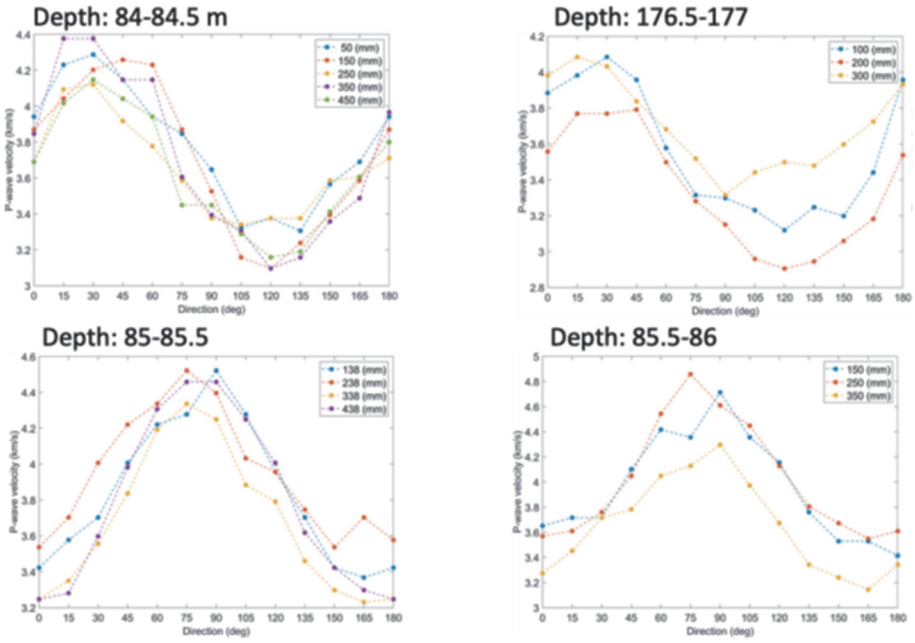


Figure 1: Circumferential variation of rock velocity on the core retrieved from different level of the borehole.

In this step of collaborative study, we carried out the circumstantial rock velocity measurement to evaluate the heterogeneity of elastic parameter of rock. The measurement was carried out by IFS responsible member at IFS. Figure 1 shows the measurement system following standard of ASTM.

3. Achievements

Achievements level for expected results is moderate. We have completed the measurement and obtained the basic information for next step of this study.

4. Summaries and future plans

As a summary of this study, we focused on an integrated geomechanical investigation on the stress variations around a prominent fault zone in the BedrettoLab. Further integration between In situ & Ex situ stress measurement are anticipated throughout ongoing collaboration and further extension to multi-disciplinary microseismic work will be expected in near future. We will integrate the DCDA measurement results and elastic velocity measurement result, then inverse the in situ stress model. Inversed stress model will be compared with in situ measurement results and further interpreted with other geophysical data.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Y. Mukuhira, X. Ma, S. Zhang, T. Ito: Combined In situ & Ex situ, Multi-scale Stress Measurements in Crystalline Geothermal Reservoirs, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-25, pp. 72-73.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

課題番号	J25I105
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目

低封入率型ヒートパイプの熱輸送現象に関する数値解析
Numerical Analysis of Transfer Phenomena in Ultra-low Fill Rate Heat Pipe

畑本 明彩未*†，永井 大樹**††
麓　耕二*
*青山学院大学理工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

数値シミュレーションにより低封入率型ヒートパイプの熱輸送現象を再現し，作動メカニズムを明らかにする．

2. 研究成果の内容

2025 年度は週 1 回永井研の学生 3 名と合同で勉強会を行い，シミュレーションの実行環境構築およびシミュレーションコードの理解に取り組んだ．また，既存の自励振動ヒートパイプの先行研究と同様の条件で計算コードを実行し，妥当な結果を得られることを確認した(図 1)．さらに，低封入率型ヒートパイプの内部流動を再現するにあたって既存のモデルの改良すべき点を洗い出し，検討した．以上の内容を ICFD2025 で発表した．

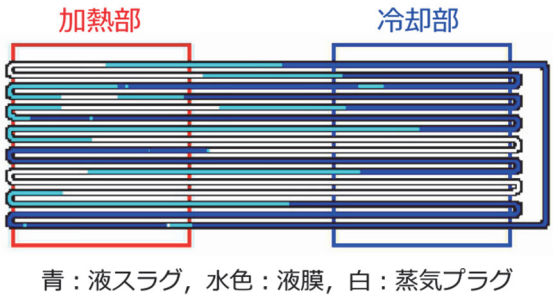


図 1：従来型ヒートパイプの内部流動のシミュレーション結果

3. 研究目標の達成状況

未解明である低封入率型ヒートパイプの作動原理を明らかにするために，シミュレーションモデルの構築の検討を行った．得られた成果は当初の計画よりもやや遅れているが，今後も継続して目標の達成に取り組む．

4. まとめと今後の課題

本研究は，従来の自励振動型ヒートパイプよりも極めて高い熱輸送性能を持つ低封入率型ヒートパイプの内部の熱輸送現象に関する数値シミュレーションモデルの構築に向けて，既存のコードの改良に取り組んだ．今後は，中性子ラジオグラフィによって得られた可視化実

験結果と比較し，実現象を再現可能なモデルを構築する．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] A. Hatamoto, K. Fumoto, H. Nagai: Numerical Analysis of Heat Transfer Phenomena in a Meander-Shaped Low-Fill Heat Pipe, *Twenty-third International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project Code	J25I106
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year (progressing)

Control of Natural Convection Thermal Boundary Layer under High Grashof Number Condition and Heat Transfer Enhancement

Atsuki Komiya*†, Nicholas Williamson**††
Junhao Ke**, Steve Armfield**
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**School of Aerospace, Mechatronic Engineering, The University of Sydney
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

In this study, we focus on the turbulent natural convection boundary layer flow along a vertically heated isothermal wall using direct numerical simulation (DNS) for both air and water. In this study we aim to investigate the mechanisms that affect the heat transfer of these thermally driven buoyant flow with and without Oberbeck-Boussinesq (OB) conditions in 3D. The non-OB flows are obtained by a weakly compressible Navier-Stokes solver to incorporate both the local density variation and fluid property variations. Preliminary studies reveal that the non-OB effects would shift the laminar—turbulent transition and therefore modify the heat transfer of the flow. By quantitatively analyzing the non-OB effect in both spatially developing and temporally developing flows, this study provides necessary corrections to the existing heat transfer model and unique insights for heat transfer modelling and enhancement.

2. Details of program implement

A three-dimensional direct numerical simulation has been carried out by IFS super computing system. The code is modified from a massively parallelized and benchmarked incompressible FORTRAN solver in our earlier studies. The code uses a finite volume method on a regular structured grid with a co-located storage arrangement for all flow variables. Fourth order accurate central differences are used for all spatial derivatives combined with second order accurate time integration using Adams-Bashforth time advancement for the non-linear terms and the Crank-Nicolson scheme for diffusive terms. Mass conservation is enforced using a fractional step method.

For the temporal framework, the Rayleigh number increases with time and the flow field is instantaneous and transient. To gain sufficient turbulence data and to reach the ultimate turbulent regime, simulations are expected to run for ~35 non-dimensional time. Over 1 billion cells are used in the simulations to ensure the Komogorov scales (for Pr<1) and Batchelor scales (for Pr>1) are resolved.

Figure 1 shows an instantaneous premultiplied spanwise power spectra for the streamwise velocity fluctuation. The data was obtained using the temporal framework at different Prandtl numbers, varying from Pr=0.71, Pr=4.16 and Pr=6. Evidently, as Prandtl number increases the turbulence streaky signature expands its width when normalised by the friction scales. At Pr =0.71, the streaks has a similar spacing to the canonical forced flows; whereas at Pr =4.16 and Pr =6 these spacing becomes wider suggesting the shear is less energetic as buoyancy becomes stronger.

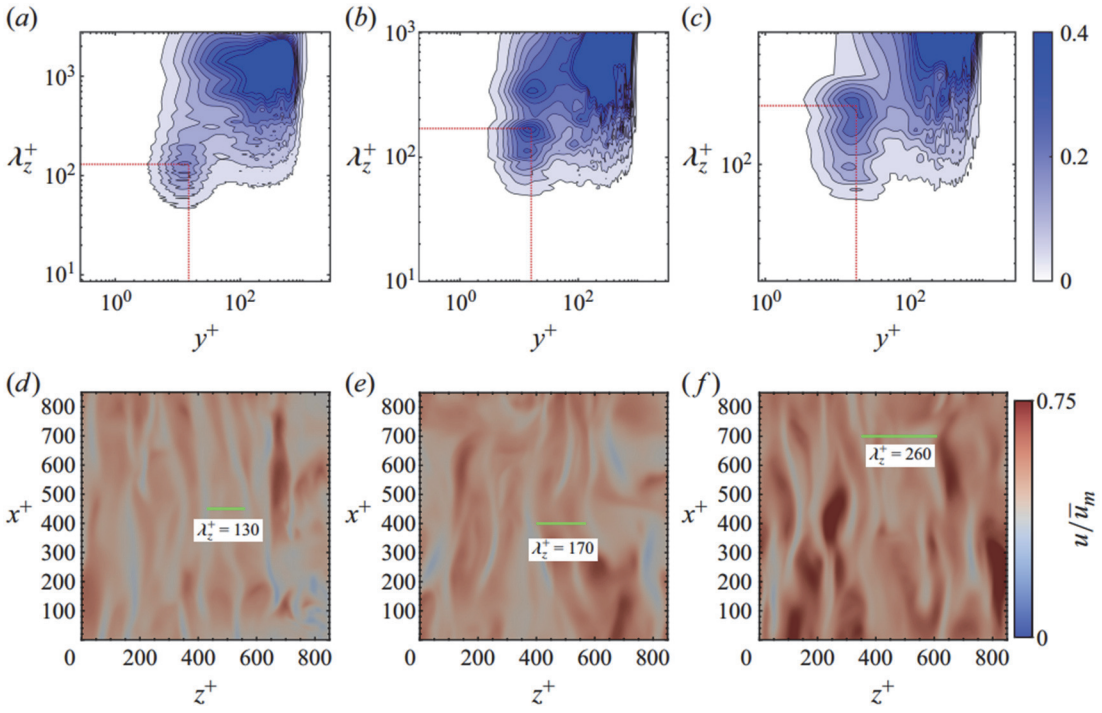


Figure 1: (a—c) Premultiplied energy spectra of the velocity fluctuation in the spanwise direction, normalised by its instantaneous maximum (a) $Pr = 0.71$; (b) $Pr = 4.16$; and (c) $Pr = 6$. The red dotted lines indicate the most energetic structure, which is representative of the streak spacing, in the near-wall region at y+ ≈ 18. (d–f) Corresponding (truncated) visualizations of the streamwise velocity field in a wall-parallel plane at y+ ≈ 18, showing the emergence of near-wall streaks. The green lines indicate the most energetic spanwise wavelength at y+ ≈ 18 in panels (a)–(c).

3. Achievements

This year, the project has resulted in two papers presented at international conferences and another presentation at the domestic ICFD2025 in Tohoku University. The project has also resulted in one joint journal publication in the Journal of Fluid Mechanics. There is one more paper, focusing on the turbulent statistics of spatially developing turbulent boundary layers, under preparation.

4. Summaries and future plans

The present study investigates the vertical natural convection in both spatial and temporal framework, with Prandtl number covering from 0.71 (air) to 6 (water). This year, we are able to successfully quantify the effect of the Prandtl number, using a temporal framework, on the turbulent natural convection, and revealed that how buoyancy mechanistically modify the turbulence structure in the turbulent regime.

In future study, we will continue our ongoing simulations to explore the effects of the non-OB condition on the flow transition, as well as the turbulent heat transfer for the buoyant flow in both spatially developing and temporally developing setups.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] Ke, J., Komiya, A., Armfield, S. W., Williamson, N. (2026). On the role of moderate Prandtl numbers in vertical natural convection. *J. Fluid Mech.*, 1029, A37.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[2] Ke Junhao: On the role of Prandtl number in turbulent natural convection, in *the 13th Australasian Natural Convection Workshop* (2025), Canberra ACT Australia.

[3] Lu Jinshuyang: Turbulence statistics for vertical natural convection boundary layer, in *the 13th Australasian Natural Convection Workshop* (2025), Canberra ACT Australia.

[4] Lu Jinshuyang: Turbulent modelling and statistics for vertical natural convection, in the *International Conference on Flow Dynamics* (2025), Miyagi Japan.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

Project Code	J25I107
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Fundamentals
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	2nd year

Harnessing Machine Learning for Enhancing Fluid Mechanics Understanding in Riblet Surfaces

Le Anh Tuan*, Kemas Zakaria*, Pramudita Satria Palar*, Viet Dung Duong**
Lavi Rizki Zuhal*†, Akira Oyama***, Aiko Yakeno****††
*Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Institut Teknologi Bandung
**School of Aerospace Engineering, Vietnam National University
***Institute of Space and Aeronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency
****Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The primary objective of this research proposal is to investigate and apply Machine Learning techniques to gain insights into the complex fluid flows and structures occurring around riblet surfaces. Through the utilization of Machine Learning, our aim is to uncover and characterize the underlying flow phenomena, shedding light on the mechanisms responsible for the drag reduction and improved performance associated with riblet surfaces. By achieving a comprehensive understanding of fluid flow dynamics using Machine Learning, this research seeks to provide valuable insights that can inform the design and optimization of riblet-based surfaces for various engineering applications, ultimately enhancing their efficiency and effectiveness.

2. Details of program implement

This study investigates the effectiveness of riblets in reducing viscous drag under incompressible flow conditions at a freestream Mach number of $M_\infty = 0.2$ using DNS performed with the LANS3D solver. Simulations compare smooth and riblet surfaces with nondimensional groove spacings $s^+ = 15, 18, 21, 24, 30$ at Re_x ranging from 6.5×10^5 to 8.3×10^5. The non-dimensional groove spacing, defined as $s^+ = \frac{su_\tau}{\nu}$, where ν is the kinematic viscosity, s denotes groove width, and u_τ indicates the friction velocity.

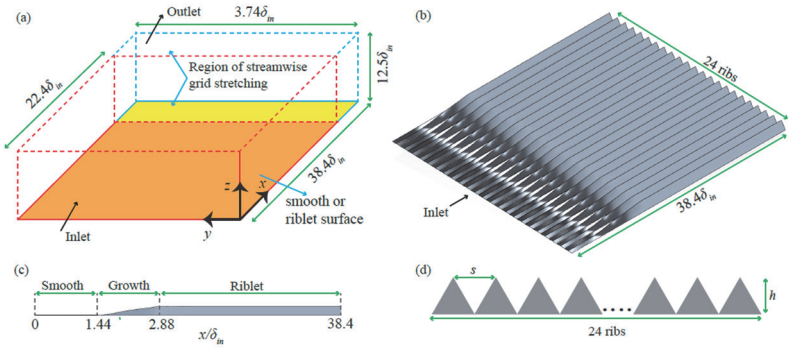


Figure 1: (a) Schematic of the computational domain, (b) Perspective view of the riblet surface, (c) Spanwise geometry of asingle riblet showing the transition from smooth to full riblet structure, (d) Cross-sectional geometry of the riblet surface

To analyze the influence of riblets on turbulent flow structures, we apply Dynamic Mode Decomposition (DMD), a data-driven technique that extracts spatialtemporal coherent structures from unsteady flow fields. DMD decomposes a sequence of flow snapshots into modes, each associated with a single frequency and growth/decay rate, allowing insight into dominant flow features relevant to drag-reduction mechanisms.

3. Achievements

Through the application of DMD, as a machine learning technique, we gained deep insights into the intricate fluid flow dynamics around riblet surfaces designed for drag reductions. The obtained insights contribute to a comprehensive understanding of the underlying mechanisms responsible for the improved performance of riblet surfaces compared to the smooth surface.

4. Summaries and future plans

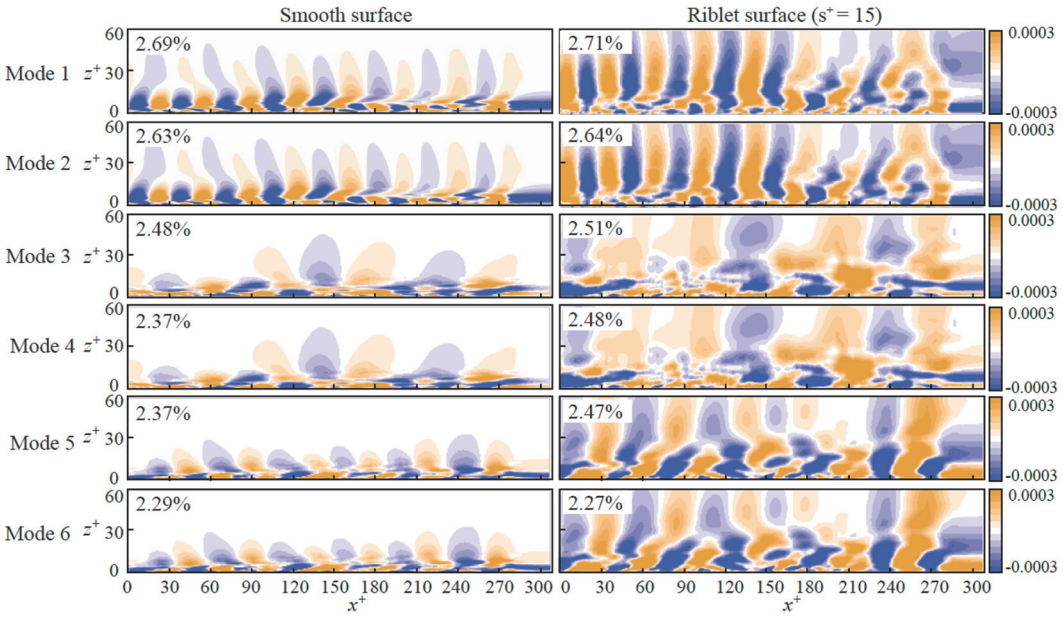


Figure 2: Contour plots of wall velocity in the $x-z$ plane for the first six modes, comparing the riblet surface at $s^+ = 15$ (left) with the smooth surface (right)

The DMD modes (especially Mode 1 and Mode 2) show great alternating velocity streaks concentrated near the wall on the smooth surface, so promoting strong wall normal momentum exchange and producing high shear stress. As shown in Figure 2, the velocity streaks appear weaker and more diffused away from the wall on the riblet surface.

Particularly for high energy, low frequency modes, Figure 5 shows overall that the riblet surface $s^+ = 15$ disperses turbulent structures more effectively than the smooth surface. The drag reduction mechanism by streamwise vortex control is highlighted by the symmetry of mode pairs and the energy reduction noted on the riblet surface.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] L. Anh Tuan, K. Zakaria, P. Satria Palar, V. Dung Duong, L. Rizki Zuhal, A. Oyama, A. Yakeno: Dynamic Mode Decomposition Analysis of Three-Dimensional Smooth and Riblet Surface at Mach 0.2, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-12, pp. 41-44.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project Code	J25I108
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Fundamentals
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year (progressing)

Feature Importance in the Predictive Capabilities of Machine Learning Models: Application for Estimating Thermo-physical properties of Organic Materials

Hari Krishna Chilukoti*†, Gota Kikugawa**††
Hiroshi Nagareboshi***, Jiro Sendai**
*Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Warangal
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Over the past thirty years, nanofluids have emerged as a subject of considerable interest within the scientific community due to their exceptional thermal properties, particularly the anomalous enhancement of thermal conductivity (TC) at relatively low nanoparticle concentrations. One of the major advantages of the nanofluids is their ability to enhance heat transfer performance without causing a significant rise in pressure drop. The literature suggests that various parameters can significantly influence the thermal conductivity of nanofluids. Selecting the appropriate input features to describe the nanofluid is crucial for data-driven modeling, as they play a critical role in determining the model's predictive performance. However, the application of various ML models that may offer superior accuracy or computational efficiency remains largely unexplored. Furthermore, most existing studies employing data-driven techniques have been conducted on limited datasets, typically involving a single type of base fluid combined with various types of nanoparticles. This limited dataset significantly restricts the generalizability of the ML models, as it hinders their ability to adequately capture the complex, nonlinear relationships between key input parameters and TC across diverse operating conditions. Lastly, there is a lack of systematic investigation into the importance of input parameters and their influence on the predictive performance of ML algorithms.

2. Details of program implementation

The input parameters for the ML models encompass critical variables that capture the essential features of hybrid nanofluids, including base fluid thermal conductivity, temperature, nanoparticles volume fraction, mixing ratio of nanoparticles, material properties of nanoparticles (size, density, and thermal conductivity), processing conditions (sonication duration and surfactant presence), and system characteristics (nanoparticles mixing ratio and base fluid acentric factor). A dataset consisting of 896 experimental thermal conductivity measurements of hybrid nanofluids was developed. The experimental dataset was divided into training and testing subsets. 70% of the total dataset was randomly allocated for training and the remaining 30% of the data was utilized for testing the models. All six ML models were trained on the same training dataset, and each of their predictive accuracy was evaluated using the same test dataset. The training and testing of all these six models follow the same workflow. After training, the models were finally assessed on the test dataset to verify their accuracy and reliability in predicting the TC of hybrid nanofluids. All the models' hyperparameters were optimized using the training dataset, while the test set was

utilized to evaluate each model's predictive performance. To ensure model reliability and prevent overfitting, defined as poor generalization on unseen data due to excessively specific learning from the training set, k-fold cross-validation was employed.

3. Achievements

This work investigated the application of several machine learning models, including support vector regression (SVR), decision tree regression (DTR), random forest regression (RFR), AdaBoost regression (ABR), gradient boosting regression (GBR), and K-nearest neighbors regression (KNNR), to predict the thermal conductivity of various hybrid nanofluids. The gradient boosting regression model demonstrated superior predictive performance. To develop a comprehensive understanding of the ML-based model used for predicting the TC of hybrid nanofluids, SHAP (SHapley Additive exPlanations) analysis was conducted. Across all models, three input features consistently emerged as the most influential: base fluid TC and volume fraction (both positively correlated) and acentric factor (negatively correlated). Additionally, some models highlighted the importance of second nanoparticle density and first nanoparticle TC, indicating slight model-specific changes in input feature importance.

4. Summaries and future plans

We employed SHAP (SHapley Additive exPlanations) analysis to provide quantitative insights into the importance of individual features on the thermal conductivity predictions of each ML model. As a next step, we will explore the application of various algorithms for predicting the properties of various fluids. Moreover, we will apply a Bayesian approach to optimize the target properties of organic materials.

Table 1: Statistical parameters for predicting thermal conductivity (W/m.K) of hybrid nanofluids from various ML models

Statistical parameter	GB	RF	SVR	DT	AB	KNNR
R^2	0.993	0.989	0.945	0.983	0.969	0.968
%AAPRE	1.891	2.372	5.535	3.01	5.491	2.76
RMSE	0.012	0.016	0.037	0.021	0.027	0.028
%APRE	–0.307	–0.275	–1.034	–0.137	–2.371	–0.064

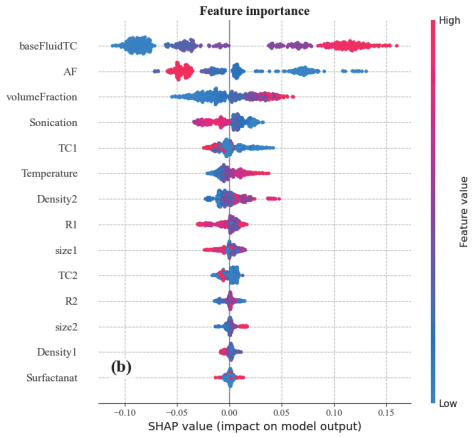


Figure 1: SHAP values for each training data sample obtained from gradient boosting regression model.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] H.K. Chilukoti, Y. Takaoka, and G. Kikugawa: Feature Extraction for Machine Learning-Based Prediction of Thermo-Physical Properties of Organic Materials, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-51, pp. 147-148.

3) Patent, award, press release etc.
Not applicable

Project Code	J25I109
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Nano-micro
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	2nd year

Molecular-scale Design of Flame Retardant Polymer Materials by using an Integrated Scheme of Quantum Chemistry and Molecular Simulation

Yinbo Zhao*†, Gota Kikugawa**††
*School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) has been widely used in the aerospace industry. CFRP is a kind of composite material in which carbon fibers are oriented inside a resin matrix. Epoxy resins are thermosetting polymers, which have been extensively adopted as the matrix for carbon-fiber-reinforced plastics (CFRP), and so controlling epoxy properties from a molecular design perspective has become a crucial research focus. Such plastics were used to construct the airframe of the Boeing 787 aircraft, due to their outstanding physical and mechanical properties. Okabe et al. studied the effect of epoxy resin composition on curing characteristics in multi-component epoxy systems. We here studied the systems comprised of Di Glycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA) cured with 4,4'-Diamino-2,2'-Dimethylbiphenyl (2,2'-CH3-BP), 4,4'-Diamino-3,3'-Dimethylbiphenyl (3,3'-CH3-BP), 4,4'-Diamino-2,2'-Dichlorobiphenyl (2,2'-Cl-BP), and 4,4'-Diamino-3,3'-Dichlorobiphenyl (3,3'-Cl-BP) in order to study the location and type of side chain effect on the crosslinking process and thermomechanical properties.

2. Details of program implement

Initially, the GRRM software coupled with QC calculations using Gaussian 16 package, was employed to investigate reaction pathways from reactant to products, calculating activation energy and heat of reaction. The analysis was based on the B3LYP/6-31G* level theory.

After the molecule system was fully relaxed, the crosslinking process was simulated using custom Python code developed by the authors. Our algorithm includes the activation energy and heat of formation, which are related to the real chemical reaction properties. This algorithm first searches the potential reactive pairs of C and N atoms and identifies if they are within a predefined cutoff distance—5.64 Å. Then, the reaction probability k is taken into consideration as a criterion for reaction, as determined by the Arrhenius equation. A uniform random number, P, which takes the value from 0 to 1, is utilized to judge whether the reaction happens in a Monte Carlo manner, i.e., if $P < k$, the reaction will happen along with creating new bonds; otherwise, the reaction will not occur. After the bond reassignment due to the chemical reaction, the NPT and NVT ensembles are used to relax and equilibrate the new topology after crosslinking. The process will stop when the conversion rate reaches a preset target. If not, a new cycle of the crosslinking process will start as illustrated in Fig. 1. In this work, the target of conversion rate is set to 80%.

It was found that the position and type of side chain have little effect on the gel point and the overall trends of different reaction degrees of the amine groups for all the systems are the same with the increase of the conversion rate.

To characterize Young's modulus of thermosetting resin, a uniaxial tension test is carried out up to a strain of 4%. It was found that Young's modulus is almost the same for different kinds of curing agents. To further explain these phenomena, Young's modulus was decomposed into three parts: σ_{Kin} denotes the contribution arising from molecular motion; $\sigma_{Non\text{-}bond}$ and σ_{Bond} represent the contributions from non-bonded and bonded interactions, respectively. The contribution of each energy mode to Young's modulus for each system is manifested in Fig. 1. Although the contribution of bonded interaction is still dominant to Young's modulus, the proportion of contribution from the non-bonded interaction is enhanced compared to the results of the thermal conductivity. In addition, the contributions of these three parts are nearly the same as shown in Fig. 1, which denotes the location and type of side chain may have little influence on Young's modulus. It is also clarified that Young's modulus has a deep relationship with the crosslink density as illustrated in Fig. 1.

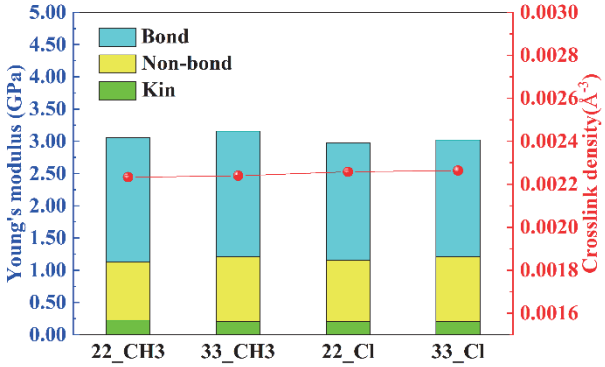


Figure 1: Kinetic, non-bonded, and bonded contributions to Young's modulus and crosslink densities corresponding to DGEBA/2,2'-CH3-BP, DGEBA/3,3'-CH3-BP, DGEBA/2,2'-Cl-BP, DGEBA/3,3'-Cl-BP at a crosslinking cycle number of 70, respectively.

3. Achievements

The expected result was to uncover the relationship between thermomechanical properties and structure based on our developed algorithm, and to further design high-performance epoxy resins. Against this target, we have established an integrated QC(GRRM)/MC/MD crosslinking scheme and applied it to four DGEBA systems cured with 2,2'-/3,3'-CH3-BP and 2,2'-/3,3'-Cl-BP, clarifying that the position and type of side chain have little influence on the gel point, on the amine reaction trends, or on Young's modulus. The structure–property relationship targeted in the application has therefore been partially uncovered for this side-chain family.

4. Summaries and future plans

We constructed an integrated simulation scheme combining quantum chemistry calculation (GRRM with Gaussian 16 at the B3LYP/6-31G* level) and Monte Carlo–based crosslinking molecular dynamics method, and applied it to four DGEBA-based epoxy systems cured with 2,2'-CH3-BP, 3,3'-CH3-BP, 2,2'-Cl-BP, and 3,3'-Cl-BP. Activation energies and heats of reaction obtained from QC were incorporated into the crosslinking algorithm, enabling network generation up to a conversion rate of 80%. The results showed that the position and type of side chain have little effect on the gel point or on the conversion-dependent reaction trends of the amine groups. Uniaxial tension tests up to 4% strain further indicated that Young's modulus is nearly insensitive to side-chain position and type, with bonded interactions remaining dominant but non-bonded contributions enhanced relative to the thermal-conductivity case. Young's modulus was also confirmed to correlate strongly with crosslink density across all four systems.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] Y. Zhao, G. Kikugawa: Investigation on influence of side chain on crosslinking process and thermomechanical properties of epoxy resin, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-26, pp. 74-75.

3) Patent, award, press release etc.
Not applicable

Project Code	J25I110
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Analysis of Power Generation from Ammonia Based Fuel in Solid Oxide Fuel Cells

Jeongmin Ahn*†, Hisashi Nakamura**††
Kenta Tamaoki**, Aliza Willsey*, Cole Wilhelm*
*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this research is to generate electricity from a solid oxide fuel cell (SOFC) using an ammonia-based fuel source. To achieve this purpose, we provided ammonia fuel to the nickel side (anode) of the fuel cell. Thermal cracking of the ammonia at high temperatures provides the hydrogen necessary to complete reactions. The specific objective of the project was to determine the influence of temperature changes to an ammonia fuel supply for a solid oxide fuel cell and to determine the generation of nitrogen oxide (NO_x) emissions from ammonia combustion. Additionally, methods to reduce NO_x emissions using the catalytic properties of the SOFC were investigated.

2. Details of program implement

In the experimental approach, the ammonia fuel is first directly applied to the planar SOFC. The cell in use utilizes a nickel-yttria stabilized zirconia (Ni-YSZ) anode, YSZ electrolyte, samarium-doped ceria (SDC) electrolyte buffer layer, and lanthanum strontium cobalt ferrite-SDC (LSCF-SDC) cathode. Higher ammonia utilization will improve the commercialization of direct-ammonia SOFCs. The testing temperature of the cells is varied to obtain a correlation between SOFC performance and cell temperature when the cathode is left open to the atmosphere. Electricity generation is analyzed using a four-terminal DC technique. Mass spectroscopy is used to analyze the exhaust products and determine NO_x emission generation. The testing setup for analyzing the buffer-layer SOFC powered by ammonia is shown in Figure 1.

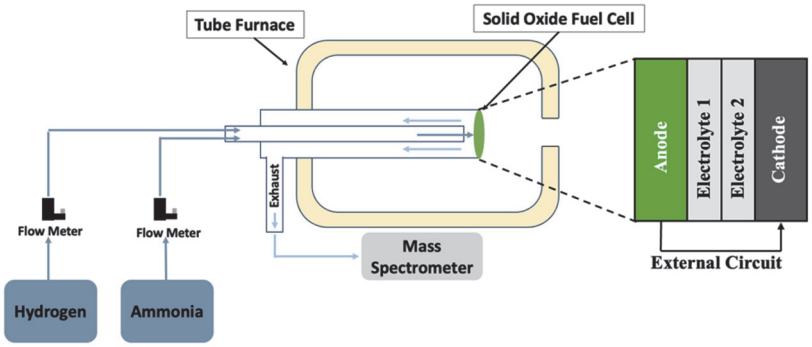


Figure 1: Experimental testing setup for ammonia-powered buffer-layer SOFC.

The second portion of the experimental approach is a study of SOFC material for nitric oxide (NO) reduction, as NO may be generated from ammonia combustion. The

catalytic properties of the SOFC allow for nitrogen and oxygen to be separated when applied to the cathode of the SOFC. Three standard cells are used for testing: LSM-YSZ, LSCF-SDC, and LSCF-gadolinium doped ceria (GDC). This allows for a study of each separate material to determine the efficiency of each SOFC type for NO reduction. Each SOFC is tested at 600°C using a mixture of 90% N_2 and 10% NO. Mass spectroscopy is used to analyze the amount of NO remaining in the exhaust and compared to the baseline mixture. The setup for this testing is shown in Figure 2.

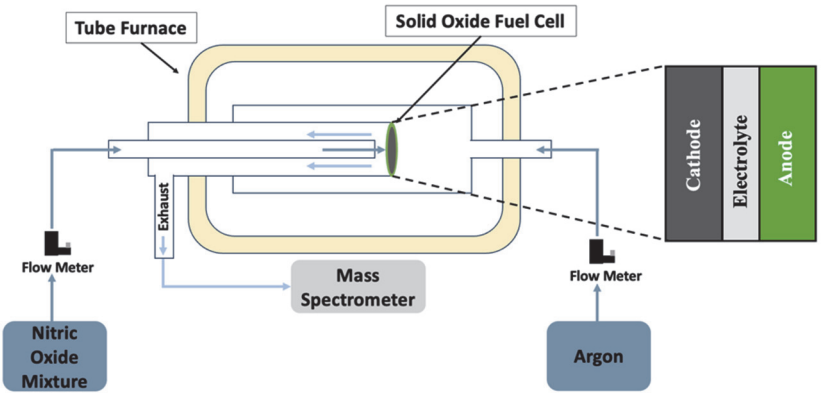


Figure 2: Testing setup for nitric oxide reduction using standard SOFC.

Using these experimental setups, a two-prong study of ammonia-powered SOFCs and NO_x generation from ammonia combustion is completed.

3. Achievements

Through the use of experimental approach, a correlation between temperature and power generated for ammonia-powered SOFCs is established. This identifies the preferred temperature for ammonia combustion and also investigates the NO emissions generated from the reaction at each temperature. Figure 3 shows the generated power curves for the buffer-layer SOFC powered on pure ammonia at temperatures of 650°C, 700°C, and 750°C.

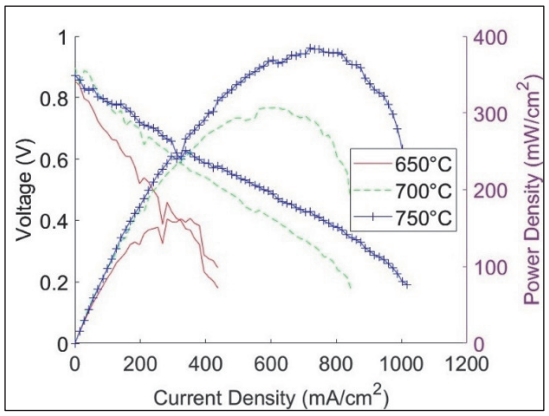


Figure 3: Power curve of SOFC on ammonia fuel supply at varied temperatures.

Similar to hydrogen-powered SOFCs, the higher temperature of 750°C is preferable for the reaction and generates the greatest power density. The exhaust for each test is analyzed using mass spectroscopy to determine the amount of NO generated at each temperature. Figure 4 shows the mass components of the exhaust at each temperature, as well as for the baseline mixture prior to testing. A zoomed-in perspective of the NO

peak at 30 amu is provided as well, which allows for a comparison of NO emissions for each condition. As seen in the figure, the baseline mixture actually contains some NO which is subsequently reduced by the SOFC, with the greatest reduction of NO occurring at 700°C.

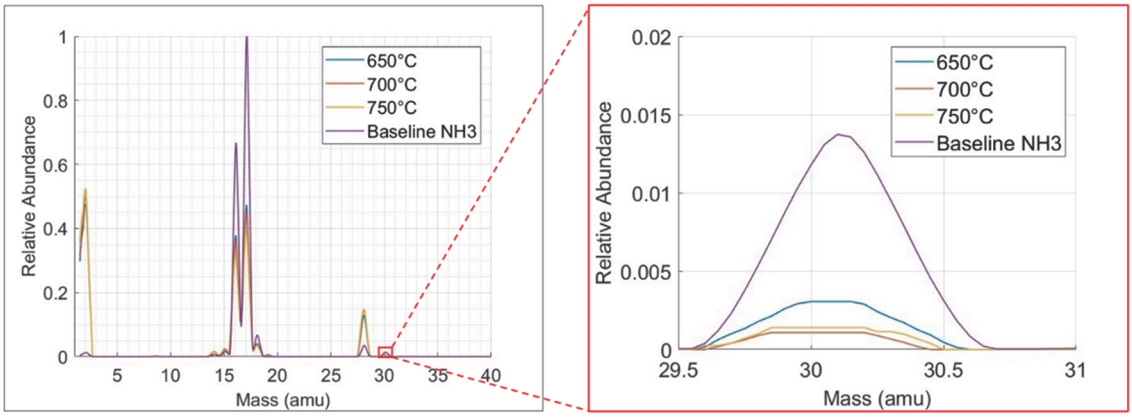


Figure 4: Mass spectrum analysis of SOFC exhaust compared to baseline.

Testing of NO reduction via SOFCs is done to determine the best material for the NO reduction reaction, in which NO is separated into N_2 and O_2. The concentration of NO in the exhaust from each test as well as the percent reduction from the baseline 10% NO is shown for each SOFC in Table 1. This allows for an analysis of each SOFC material to determine which is best suited for an emission reduction device. As seen in the table, the LSM-YSZ cell is most efficient at the decomposition of NO, with an over 90% reduction from baseline.

Table 1: Reduction of nitric oxide from each SOFC material.

Sample	*NO Concentration in Exhaust (vol %)*	*Percent Reduction from Baseline (%)*
LSCF-GDC	2.02	74.8
LSM-YSZ	0.69	92.8
LSCF-SDC	5.08	45.8

4. Summaries and future plans

In this work, an experimental approach was used to determine the ability of SOFCs to generate electricity using a pure ammonia fuel as opposed to the typical pure hydrogen fuel. This work showed the ability of a buffer-layer SOFC to use ammonia as a fuel and generate power at varied temperatures, and also identified the potential generation of NO emissions from ammonia combustion. Three SOFC materials were investigated as a means of reducing NO emissions, which is essential for ammonia-powered SOFCs. The LSM-YSZ SOFC was identified as the most efficient catalyst for reducing NO into N_2 and O_2. Future research will work towards integrating the two systems together, so any NO emissions generated from ammonia combustion may be immediately broken down by the SOFC, resulting in a low or no emission ammonia-powered SOFC system.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] A. Willsey, C. Wilhelm, K. Tamaoki, H. Nakamura, J. Ahn: Direct-Ammonia SOFCs: Evaluation of Nitric Oxide Generation and Mitigation Strategies, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-39, pp. 111-114.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

２．研究成果報告書
＜萌芽公募共同研究＞

課題番号	J25H001
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

小型鳥型翼飛行機における軽量化に関する一検討（バッテリ重量問題）
An Examination of Light Weight of Small Bird-wing Air Vehicle (Battery Weight Problem)

泉　源*†，石出 忠輝*，永井 大樹**††
*木更津高専，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は，小型鳥型翼飛行機における飛行時間の制約要因となるバッテリ重量の低減に向けて，機体軽量化手法の検討を行うことである．特に，小型飛翔体では搭載可能なエネルギー量が限られる一方で，モータ駆動および制御系の電力需要が大きく，バッテリ容量の増加は機体重量の増大を招き，飛行性能の低下につながるという課題がある．

本研究では，この課題に対し，補助電源として周囲の電波エネルギーを利用する RF エネルギーハーベスティングに着目し，バッテリ依存度の低減による軽量化の可能性を検討する．

具体的には，飛行姿勢の変化に伴う偏波変動に対応するため，直交配置したダイポールアンテナを用いた受信系を構築し，低電力条件において実用的な電力供給が可能かを実験的に評価することを目的とする．

2. 研究成果の内容

本研究は東北大学流体科学研究所との共同研究として実施したものであり，研究の方向性および評価手法について永井教授より助言を受けながら検討を進めた．

本研究では，小型鳥型翼飛行機におけるバッテリ重量の低減に向け，RF エネルギーハーベスティングを用いた補助電源の可能性について検討した．

まず，受信アンテナとして 3 種類のダイポールアンテナを試作した．図 1 に各アンテナの外観を示す．基本ダイポール，U 字型バラン付きダイポール，U 字型バラン付き折り返しダイポールを製作し，実装性および寸法の観点から比較をおこなった．

次に，各アンテナの反射特性を測定し，動作周波数における整合性を評価した．図 2 にその結果を示す．測定結果より，U 字型バラン付きダイポールは十分な整合特性を有し，かつ軽量であることから，本研究では本構造を採用した．

さらに，飛行時の姿勢変化に伴う偏波変動に対応するため，2 本のアンテナを直交配置した受信系を構築した．図 3 にその配置を示す．アンテナは機械的負荷を避けるため非可動部である尾翼および胴体に配置し，偏波ダイバーシチにより受信電力の安定化を図った．

受信可能な電力の評価として，Friis 伝搬モデルに基づく解析を行った．図 4 に受信電力の距離特性を示す．解析結果より，送信電力 20 dBm の条件において，約 3 m の距離で昇圧回路（LT3108）の起動に必要な 20 mV 相当の受信電力に到達することが確認された．

表 1 に 2 素子アンテナによる電力合成結果を示す．単一アンテナでは約−49 dBm 程度の受信電力であったのに対し，2 素子を用いた場合には−45.8 dBm まで向上した．この結果は約 3 dB

の利得増加に相当し，電力が約 2 倍に増加したことを示している．本結果は理論的な電力合成効果（3 dB 増加）と一致している．

次に，受信した高周波電力を直流電力へ変換するため，2 段チャージポンプ回路を構成した．図 5 に回路構成を示す．本回路ではショットキーダイオードを用いて整流をおこない，低入力電圧条件における動作を可能とする構成とした．

最後に，チャージポンプ回路の出力特性を評価した．図 6 にその結果を示す．本結果は回路シミュレーションによるものであるが，低入力電力条件において整流および昇圧動作が可能であることを確認した．

以上より，本研究ではアンテナの直交配置による受信電力の向上と，低電力条件における電力変換の可能性を示し，バッテリ依存の低減による軽量化に向けた有効な手法となることを確認した．



図 1：3 種のダイポールアンテナ

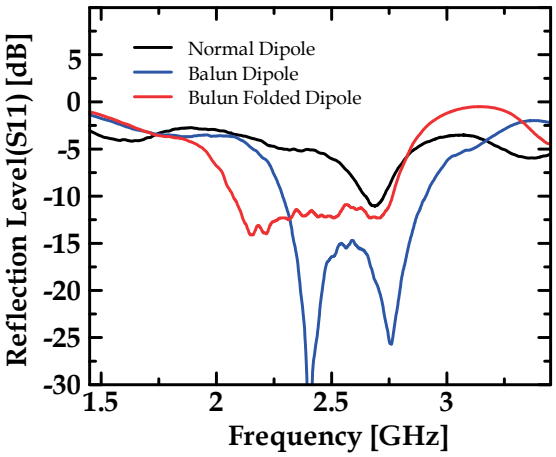


図 2：3 種のダイポールアンテナの反射レベル特性

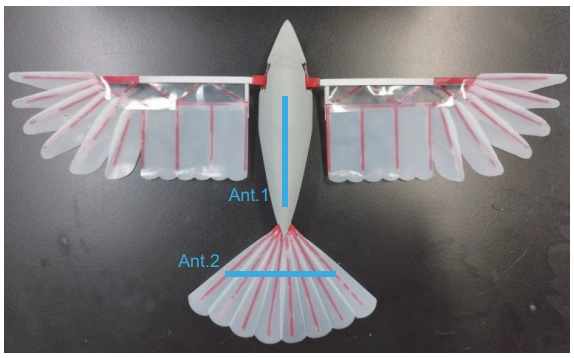


図 3：アンテナ直交配置

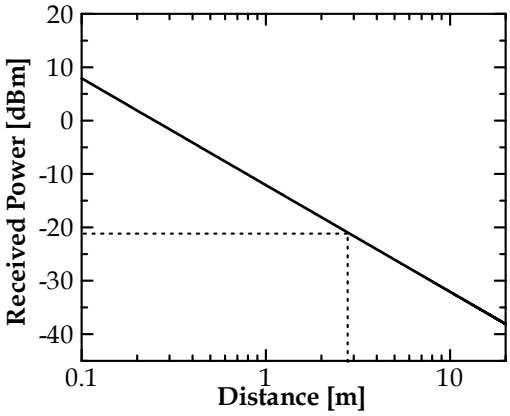


図 4：フリスの伝搬特性

表 1：2 素子アンテナの電力合成結果

Ant.1 [dBm]	*Ant.2* [dBm]	*Combining* [dBm]	*Gain* [dBm]
-49.5	-49.0	-45.8	+3.2

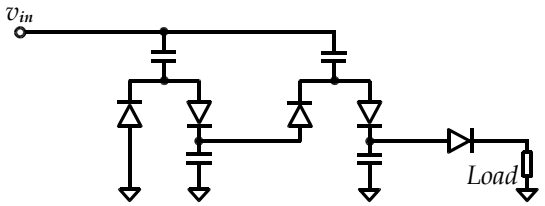


図 5：2 段チャージポンプ回路

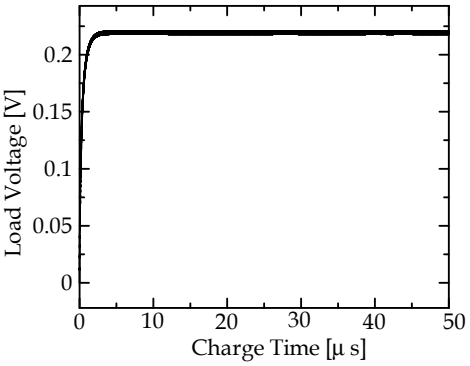


図 6：チャージポンプの充電特性

3. 研究目標の達成状況

申請書においては，バッテリという重量変更が困難な素子を電気二重層コンデンサに代替することで，機体全体の軽量化を実現し，センサ搭載余地を創出することを予想される成果として設定した.

本研究では，その前提となる補助電源としての RF エネルギーハーベスティングに着目し，アンテナの直交配置による受信電力向上および低電力条件における電力変換の可能性を検討した.

その結果，約 3 m の距離において昇圧回路の起動条件を満たす受信電力が得られること，および低入力電力条件において整流・昇圧動作が可能であることを確認した.

これにより，バッテリ依存の低減に向けた補助電源として RF エネルギーハーベスティングが有効である可能性が示され，電気二重層コンデンサへの置換による軽量化実現に向けた基礎的検討として，当初の予想される成果に対して概ね達成したと評価できる.

一方で，電気二重層コンデンサを用いた実機での動作検証や，連続動作に必要な電力供給量の確保については未検討であり，軽量化効果の定量評価を含めて今後の課題である.

4. まとめと今後の課題

本研究では，小型鳥型翼飛行機におけるバッテリ重量の低減に向け，RF エネルギーハーベスティングを用いた補助電源の可能性について検討をおこなった.

その結果，ダイポールアンテナの直交配置により受信電力が約 3 dB 向上し，電力合成効果および偏波ダイバーシチによる受信安定性の向上を確認した.

また，Friis 伝搬モデルに基づく解析より，約 3 m の距離において昇圧回路の起動に必要な受信電力が得られることを示した.

さらに，チャージポンプ回路の検討により，低入力電力条件において高周波信号を直流電力へ変換可能であることを確認し，補助電源としての適用可能性を示した.

以上より，本研究はバッテリ依存の低減による軽量化に向けた基礎的検討として，有効な手法であることを示した.

一方で，本研究における電力変換特性の評価はシミュレーションに留まっており，実機による整流・昇圧特性の検証が今後の課題である.

また，電気二重層コンデンサを用いた蓄電および電源供給系の構築，さらには飛行体への実装による連続動作の検証が必要である.

今後は，アンテナおよび回路の最適化により受信効率の向上を図るとともに，軽量化と電源供給の両立を実現するシステム設計の確立を目指す.

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] H. Izumi, T. Ishide, H. Nagai: RF Energy Harvesting via Orthogonal Dipole Antennas and Charge-Pump Circuitry on a Flapping-Wing Aerial Vehicle, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-4, pp. 23-24.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）

なし

（受賞）

なし

（マスコミ発表）

なし

課題番号	J25H002
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4～2026.3
継続年数	1 年目

高速出力調整用低温駆動 MHD 発電システム内の熱流体動特性解析

Numerical Analysis on Dynamic Characteristics of Thermofluid in a Low-temperature Driven MHD Power Generation System Utilized for High-speed Output Adjustment in a Next-generation Power Grid

藤野 貴康*†，高奈 秀匡**††
菊田 陽奈***
*筑波大学システム情報系，**東北大学流体科学研究所
***筑波大学システム情報工学研究群
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

出力変動が不可避な再エネ電源を主電源群とする次世代電力システムにおいて，それと協調される大規模集中電源には，これまで以上にシステム全体の安定化に資する高い出力調整能力が求められる．この要求に対し，申請者は希ガスプラズマを利用した希ガス MHD（電磁流体力学）発電機が，従来の回転型発電機とは異次元のレベル（1 秒未満の高速大規模出力）で出力調整が可能であることを世界に先駆けて明らかにしてきた．さらに，その発展として，希ガス MHD 発電機の実用化を阻む技術開発課題「アルカリ金属回収・再利用装置」「高温（2000℃）希ガス加熱用熱交換器」そのものを一掃する「アルカリ金属フリー低温駆動反応凍結希ガスプラズマ MHD 発電機」を提案し，その発電機の具体的基本仕様を提示する電磁流体解析を実施してきた．

一方で，申請者のこれまでの研究は希ガス MHD 発電機単体を対象に行ってきたものであり，本発電機が高速大規模出力調整用電源として真の意味で活用可能か否かを見極めるには，その発電機が組み込まれた発電システム全体（クローズドサイクル発電システムを前提とする）で研究をする必要がある．クローズドサイクル MHD（CCMHD）発電システムでは，熱機関としての高温熱源（天然ガス燃焼熱，原子力，核融合，太陽熱など），その高温熱源から作動気体である希ガスに熱を与える熱交換器，発電機である希ガス MHD 発電機，発電機の排熱を再利用する再生熱交換器，熱機関の低温熱源に相当するクーラ，作動気体の圧力回復に用いる圧縮機が基本コンポーネントとして存在する．CCMHD 発電システム全体を対象にした熱流体特性解析は東北大学高奈秀匡教授が過去にその解析技術の開発を含め実施している．ただし，その解析では本研究のように出力調整を前提にしたものではない．従って，同発電システムを高速大規模出力調整用電源として活用可能か否かを見極めるためには CCMHD 発電システムの出力調整能力に関する知見が不十分である．

そこで，本研究では，希ガス MHD 発電機内のプラズマ・電磁流体特性に関する研究で豊富な研究経験を有す申請者と同発電システム全体の熱流体特性の解析技術を持つ高奈教授との共同研究により，高速大規模出力調整用 CCMHD 発電システムの熱流体特性解析を実施し，同発電機の出力調整能力を見極めることを研究目的とする．

2. 研究成果の内容

本年度は，まず，CCMHD 発電システムの出力調整運転時におけるシステム内の熱流体特性を解析するための数値解析技術を構築した．本研究で対象とする CCMHD 発電システムでは，図 1 に示すとおり，作動ガスにヘリウムを用い，熱源には新たな原子炉の一つであるヘリウム利用高温ガス炉を採用している．本解析では，熱源を含むシステム内の各コンポーネントを 0 次元近似の下でモデル化し，熱力学および伝熱工学に基づいて時間依存の熱エネルギー保存方程式を各コンポーネントに対して立式した．また，電動式圧縮機については，入力電力に対する力学的出力（トルク，圧縮比）を，圧縮機の回転運動に対する時間依存の運動方程式を熱エネルギー保存方程式と連立して解くことで求めた．一方，ヘリウム利用 MHD 発電機は機械的可動部を持たないため慣性が小さく，発電機内部では数 km/s の超音速流れが用いられる．このため，外部電力系統との接続を考慮しても，発電機入口の流体条件の動的変化に対して数百 ms 以内で発電出力が応答することが，申請者の過去の研究により示されている．すなわち，本研究で想定する最短でも数秒以上の特性時間を有する出力調整運転に対しては，MHD 発電機の電気的特性は実質的に瞬時応答とみなすことができる．そこで本解析では，MHD 発電機を時間依存モデルとしては扱わず，発電機入口の流体条件および電極間の電気的負荷条件を広範囲に変化させた電磁流体解析を事前に実施した．そして，これらの条件に対する発電出力および発電性能の応答特性をテーブル化し，MHD 発電機を時間遅れのないコンポーネントとして取り扱うこととした．

次に，上述の解析技術を用いて，本研究で対象とする CCMHD 発電システムの基本仕様（定格運転条件）を設計した．本設計解析では，高温ガス炉の熱出力 20 MW，ヘリウムプラズマ MHD 発電機のエンタルピー抽出率（発電機への熱入力に対する発電出力の比）25%，等エントロピー効率 80%などを入力条件とした．これらの条件のもと，各コンポーネントに対する熱エネルギー保存方程式および圧縮機の回転運動方程式を時間的に解き，定常解を求めることで，定格運転時における各コンポーネントの熱力学的状態を算出した．図 1 に，本解析から得られた定格運転時の各コンポーネントの熱力学的諸量を示す．MHD 発電機入口温度（高温ガス炉出口温度）は約 1,300 K であり，システム総合熱効率は約 30%である．この温度は，従来の CCMHD 発電の研究で想定されている発電機入口温度約 2,200 K（システム総合熱効率 60%以上）の高効率発電システムと比較すると約 900 K 低い．これは，本研究で想定する CCMHD 発電システムの利用目的が出力調整用電源であり，2,200 K 級の高温利用を必ずしも必要としないという設計思想に基づくものである．

次年度は，今年度開発した上述の数値解析技術を用いて，図 1 の定格運転条件を初期条件として，CCMHD 発電システムの出力調整応答能力を数値解析により評価する予定である．

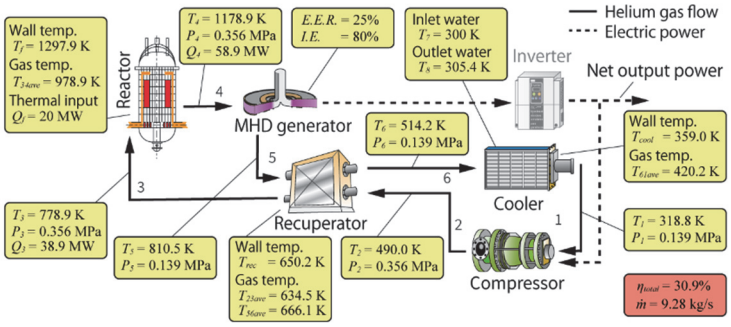


図 1：本研究で対象とする出力調整用 CCMHD 発電システムの構成と
定格運転時の熱力学的諸量の数値解析結果

3. 研究目標の達成状況

CCMHD 発電システムを対象とした時間依存熱流体特性解析技術の基盤を構築できた．また，この解析技術を用いて本研究で対象とする同発電システムの基本仕様（定格運転）を設計することができた．一方で，申請時に最終目的とした出力調整運転時の CCMHD 発電システムの出力調整能力の詳細評価には至っておらず，今後の課題として残された．

4. まとめと今後の課題

申請者は再エネ電源を主電源群とする次世代電力システムを念頭におき，同システムの安定運転に貢献する大規模出力調整用 CCMHD 発電システムを提案している．本共同研究ではこのシステムの出力調整能力を数値解析により評価することを目的としており，今年度はこの数値解析のための基盤技術である CCMHD 発電システムを対象とした時間依存熱流体特性解析技術を構築した．今後の課題は，同解析技術を活用して CCMHD 発電システムの出力調整能力（出力調整幅と調整時間の関係）を詳細に調べることである．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] H. Kikuta, K. Tabuchi, T. Fujino, and H. Takana: Thermodynamic Analysis of Closed-Cycle MHD Power Generation System for Output Adjustment, *Proceedings of Twenty-Second International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS27-1, pp. 1552-1554.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J25H003
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	その他（認知科学・航空工学）
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

航空機の意匠に関する多面評価：審美性と性能／安全性のクロスオーバー

Multidimensional Evaluation of Aircraft Design: The Crossover between Aesthetics and Performance/Safety

齋藤　玲*†，阿部 圭晃**††
*東北大学大学院情報科学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は，航空機の審美性並びに安全性を，人がどのように捉え感じるのかを定量的に明らかにすることである．本研究で捉える審美性とは「かっこよさ」であり，形容詞「かっこいい」は英語で *kakkoii* と表記されるほど日本独自の世界観を反映した概念であると同時に，世界に通ずる文化的・歴史的概念としても位置づけられる．本研究が注目するかっこよさの定量的測定法・スケールの確立は，人間が有する美感覚・意識の一側面を明らかにするとともに，他の心理的・物理的側面との関連を解明することに資し，ひいては「我々，人間とは何か」という哲学上の究極的な問いへとつながる人間理解，およびそれに基づく工学実践・研究へと結実していく．その一例として，本研究で取り組む航空機に対するかっこよさの人間認知の解明は，今後の商業化が見込まれる電動垂直離着陸型無操縦者航空機（いわゆる空飛ぶ車）の製品開発にも貢献し得る潜在性を持つ．

本研究では，前年度に続き，航空機の刺激セットを用意し，インターネット調査（n＝520）を通じて，それらに対する人々の反応を取得した．本研究では，これまでに構築された航空機の審美性に関する定量的測定法の枠組み（Saito et al., 2025）を用い，その方法の妥当性を検証するために審美性の定量的評価を新たに実施するとともに，先行研究（Saito et al., 2025）で示された審美性と安全性との関連の再現性についても検証する．これらに加え，本研究では，審美性と安全性との関連をより精緻に検討するため，認知科学・心理学研究において伝統的に測定されてきた親近性（familiarity）に着目し，審美性・安全性・親近性の三者間の関連を検証する．なお，先行研究の蓄積がある概念との関連を検証することは，本研究を既存の理論的枠組みに位置づけることにつながり，これまでの仮説・理論群との接続への道筋を開くものと期待される．



図 1：航空機シルエットの刺激セット I

2. 研究成果の内容

インターネット調査を通じて，図１に示すような複数の航空機シルエットが描かれた刺激セット（合計４セット，図１は刺激セットⅠの例）に対して，520 名（平均年齢 ＝44.8 歳，

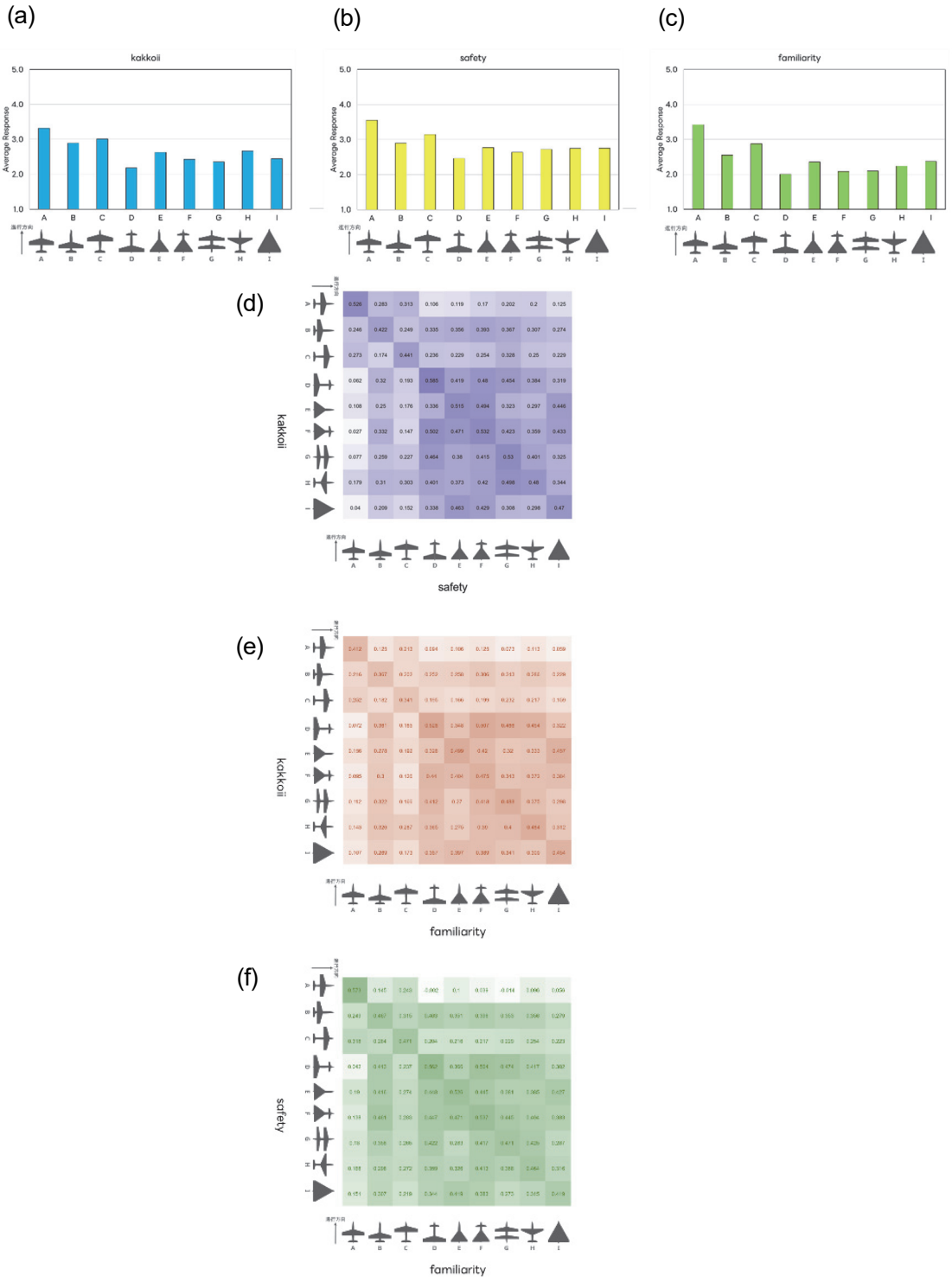


図２：航空機シルエットの刺激セットⅠにおける各概念（かっこよさ［a］，安全性［b］，親近性［c］）に対する心理的反応としての評定値の平均得点と相関行列

Note. かっこよさと安全性との相関行列（d），かっこよさと親近性との相関行列（e），安全性と親近性との相関行列（f）.

min = 18, max = 78，男性 260 名，女性 260 名）から反応を得た．調査対象者は，同時に呈示された複数の航空機シルエット刺激（航空機，ウイング）に対して審美性評定を実施した（「*あなたはそれぞれの飛行機をどのくらいかっこいいと思いますか*」に対する 5 件法反応［1. 全くかっこよくない –5. とてもかっこいい］）．同様に，同一刺激セットに対する安全性評定を実施した（「*あなたはそれぞれの飛行機をどのくらい安全だと思いますか*（「安全」に下線を付した）」に対する 5 件法反応［1. 全く安全でない – 5. とても安全］）．さらに，親近性評定も行った（「*あなたはそれぞれの飛行機についてどのくらい見覚えがありますか*（「見覚え」に下線を付した）」に対する 5 件法反応［1. 全く見覚えがない –5. とても見覚えがある］）．

これらの質問項目以外に，パーソナリティや空見行動等に関する項目への回答も得たが，本報告書では紙面の都合上，その報告を割愛する．各回答は間隔尺度とみなし得点化した．分析は統計ソフトウェア JASP（ver. 0.19.3）を用いて実施した．刺激セット I に対する審美性・安全性・親近性の心理的反応について解析を行った（図 1）．相関分析の結果（図 1）から，審美性評定・安全性評定・親近性評定のそれぞれが互いに関連することが示された（同一刺激に対する各評定間の相関係数がいずれも高い値を示している）．

3. 研究目標の達成状況

本研究は，「かっこよさ」という美感覚・美意識に対する心理的反応を取得するとともに，安全性および親近性に対する反応との関連を解析した，世界でも類例のない研究として位置づけられる．研究初年次において明らかになった課題を踏まえ，2 年目はその解決に向けた新たな取り組みに従事した．本研究が挑むテーマは現在も萌芽性が高く，未検討課題の整理と解決が残されているものの，二年間で得た成果としての，定量的測定法・スケールの確立に直接結びつく取り組みを実現できた点は，研究目標の達成状況として十分に満足のいくものである．

現在，得られたデータセットに対する精緻な分析（例えば，多変量解析）を計画・実施予定である．併せて，機械学習・深層学習等の技術を活用し，刺激一つひとつに対する幾何学的解析を行うべく，新たなプロジェクトチームを立ち上げた．認知科学・心理学的アプローチと流体科学的アプローチとをさらに融合・交差させることを通じて，航空機の審美性に対する心理的反応量と物理量との関連の解明を進め，よりよい社会の構築に寄与していく．

4. まとめと今後の課題

本研究では，航空機の審美性としてのかっこよさに対する定量的測定法・スケールの確立に挑み，実証的データをもとにその確立に向けた初手・二手目を踏み出した．航空機のかっこよさ（審美性）は心理的反応から測定可能であり，それが安全性，さらには親近性に対する人の心理的反応とも関連することが明らかになった．今後の研究では，これらの概念間の関係を認知心理学的にモデル化するにとどまらず，その妥当性の検証，さらにはモデルの精緻化に向けて物理量との関連についても迫っていく．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) **国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等**

[1] R. Saito, Y. Abe, R. Takano, J. Shintake: Charting Kakkoii Aircraft through the Intersection of the Humanities and Engineering: A Preliminary Survey Report, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-21, pp. 62-64.

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

２．研究成果報告書
＜国際連携公募共同研究プロジェクト＞

Project Code	J25R001
Classification	International Multiple Collaborative Research Project
Subject Area	Health, Welfare and Medical Cares
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Tracheal Stent for Precision Drug release Driven by the Piezoelectric Effect

Yanping Zhang*, Shiliang Chen*, Zhaojie Wang*, Tianming Du*, Aike Qiao*†
Hongfang Song**††, Hitomi Anzai***, Makoto Ohta***††
*College of Chemistry and Life Science, Beijing University of Technology
Pineleyuan 100#, Chaoyang District, Beijing 100124, P.R. China
**School of Biomedical Engineering, Capital Medical University
Youanmenwai Xitoutiao 10#, Fengtai District, Beijing, 100069, P. R. China
***Institute of Fluid Science, Tohoku University
2-1-1 Katahira Aoba-ku, Miyagi, Sendai, 980-8577, Japan
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Tracheal stent implantation is one of the primary clinical treatments for tracheal stenosis, which can rapidly reconstruct the airway and relieve dyspnea. However, long-term placement of tracheal stents tends to cause granulation tissue hyperplasia, which severely limits the long-term efficacy. Traditional drug-eluting stents mainly adopt passive drug release mechanisms, which are difficult to realize precise spatiotemporal control and may lead to insufficient therapeutic effect or toxic side effects.

The respiratory movement and granulation hyperplasia will exert periodic mechanical pressure on the stent. Based on the piezoelectric effect, this pressure can be converted into electrical signals to drive the on-demand release of anti-inflammatory drugs. Therefore, this project aims to develop a piezoelectric effect-driven adaptive precise drug release tracheal stent, which can sense the mechanical changes in the airway and intelligently regulate drug release, so as to inhibit granulation tissue hyperplasia and reduce postoperative complications.

2. Details of program implement

A detailed research plan and task allocation were established collaboratively. The project has progressed smoothly, and the results were presented at the *22nd International Conference on Flow Dynamics* (Sendai, 2025).

The details of the research are described as follows:

In this study, polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric nanofiber membranes were prepared by electrospinning, and the preparation parameters were optimized by adjusting PVDF concentration and the volume ratio of acetone to N,N-dimethylformamide (DMF), so as to increase the β-phase content and enhance the piezoelectric performance.

Curcumin-loaded poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT/CUR) nanoparticles were synthesized via emulsion polymerization, and their morphology, particle size, dispersion and drug loading rate were characterized.

The PVDF piezoelectric nanofibrous film was prepared on the surface of a metal spring simulating a bare metal tracheal stent by electrospinning. PEDOT/CUR nanoparticles dispersed in polyvinyl alcohol (PVA) hydrogel were adhered to the

upper and lower edges of the stent, where granulation hyperplasia is prone to occur, forming a PVDF-PVA@PEDOT/CUR drug-loaded piezoelectric coated tracheal stent.

The piezoelectric output voltage of PVDF film under different compression rates was tested by a mechanical tensile tester and an oscilloscope. The controlled release behavior of curcumin under different potentials, intermittent direct current and alternating current stimulation was studied by an electrochemical workstation and ultraviolet-visible spectroscopy.

The adaptive drug release function driven by piezoelectric effect under intermittent cyclic pressure was verified in vitro, and the cumulative release rate and release kinetics were quantitatively analyzed. All experimental data were processed and plotted by Origin 2022 and Image J software.

3. Achievements

PEDOT NPs and PEDOT/CUR NPs were successfully synthesized, both exhibiting spherical morphology, with PEDOT NPs showing more aggregation than PEDOT/CUR NPs. Particle size analysis showed that the diameters of PEDOT NPs and PEDOT/CUR NPs were (72±28) nm and (85±23) nm, respectively. The zeta potentials were (-20.47±0.55) mV and (-32.67±0.47) mV, respectively, indicating better dispersion of PEDOT/CUR NPs in solution. FTIR spectra revealed characteristic peaks of CUR in PEDOT/CUR NPs, confirming successful drug loading. The drug loading rate was calculated to be (12.62±1.80)% (Fig. 1).

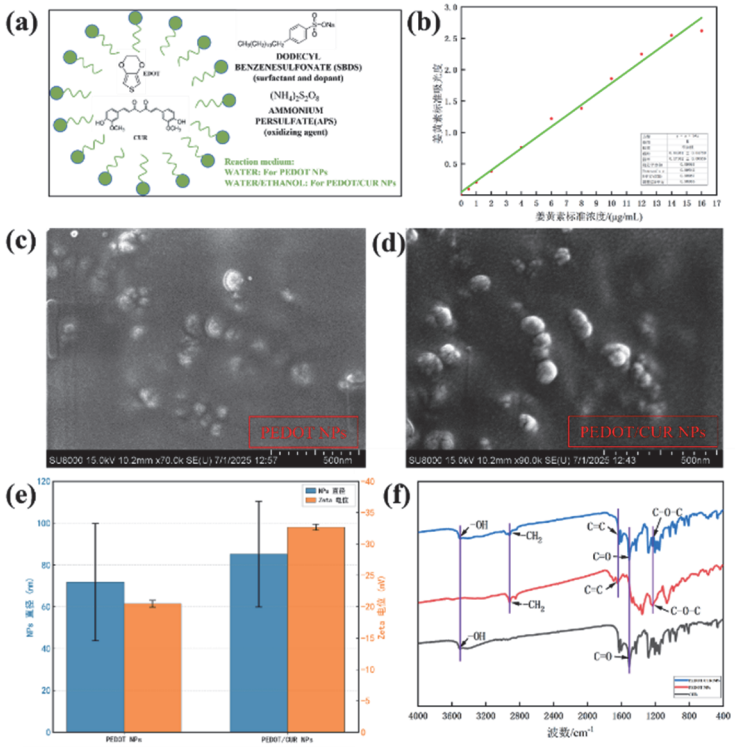


Fig.1 (a) Schematic illustration of the formation mechanism of PEDOT/CUR NPs via emulsion polymerization (b) Standard absorbance-concentration curve of CUR (c) SEM image of PEDOT NPs (d) SEM image of PEDOT/CUR NPs (e) Particle size and Zeta potential of PEDOT NPs and PEDOT/CUR NPs (f) FTIR spectra of CUR, PEDOT NPs, and PEDOT/CUR NPs

The release of CUR from PEDOT/CUR NPs showed significant medium-dependence. In pure PBS, the cumulative release of CUR was extremely slow, reaching only about 2% within 72 h. When the ethanol proportion increased to PBS:EtOH=9:1, the release increased slightly but remained limited. At a ratio of 3:7,

significant CUR release was observed. In pure ethanol, CUR achieved rapid and complete release. These results indicate that CUR is barely released in a static physiological environment but shows significantly enhanced release under hydrophobic conditions (Fig. 2).

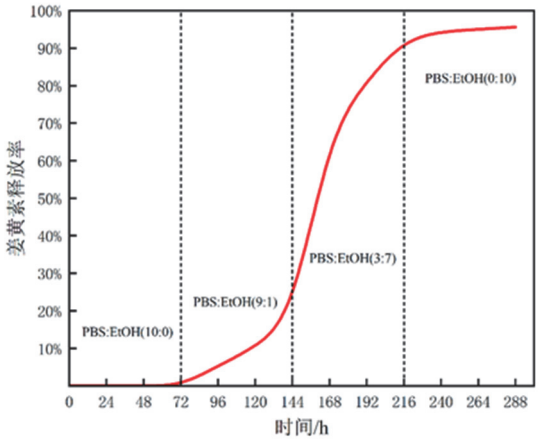


Fig.2 Cumulative release of CUR from PEDOT/CUR NPs in release media with different PBS:EtOH ratios (10:0, 9:1, 3:7, 0:10)

Electrochemical test results demonstrated that electrical stimulation effectively promotes CUR release. CV analysis showed that the redox peaks of CUR and PEDOT NPs appeared at similar potentials. In the redox cycles of PEDOT/CUR NPs, the anodic and cathodic peaks were more pronounced, and the peak current increased with increasing scan rate. Potential screening by chronoamperometry revealed that the CUR release rate exceeded 40% at a reduction potential of -1.25 V and reached 70% at -1.5 V. Under continuous stimulation at -1.5 V for 12 min, the cumulative release rate of CUR reached 90%, with rapid release observed within the first 4 min. Intermittent electrical stimulation experiments showed that both DC and AC stimulation effectively released CUR during the stimulation periods, while almost no release was detected during the non-stimulation intervals, successfully achieving "on/off" controlled release (Fig. 3).

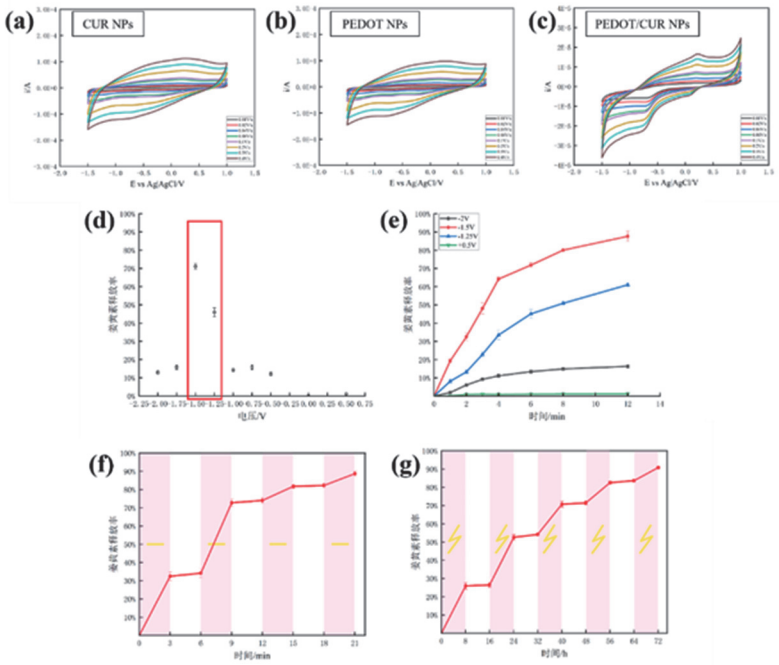


Fig.3 CV of nanoparticles: (a) CUR, (b) PEDOT NPs, (c) PEDOT/CUR NPs; (d)

Cumulative release rate of CUR from PEDOT/CUR NPs in PBS under different potential scans for 6 min; (e) Time-dependent release profile of CUR from PEDOT/CUR NPs in PBS under different potential scans for 12 min; Time-dependent release profiles of CUR from PEDOT/CUR NPs in PBS under intermittent (f) DC and (g) AC stimulation

The optimized PVDF piezoelectric film exhibited good morphology and piezoelectric performance. SEM images showed that the optimized PVDF (20%) fiber membrane had a fiber diameter of (365±78) nm. XRD analysis indicated that the highest ß-phase content (64%) was achieved at a PVDF concentration of 20% and an acetone/DMF ratio of 6:4. Piezoelectric performance tests showed that the output voltage of the PVDF-coated stent was -4 to -6 V at a loading rate of 1.5 m/min, and increased to -6 to -8 V at 2.5 m/min, indicating a positive correlation between output voltage and loading rate (Fig. 4).

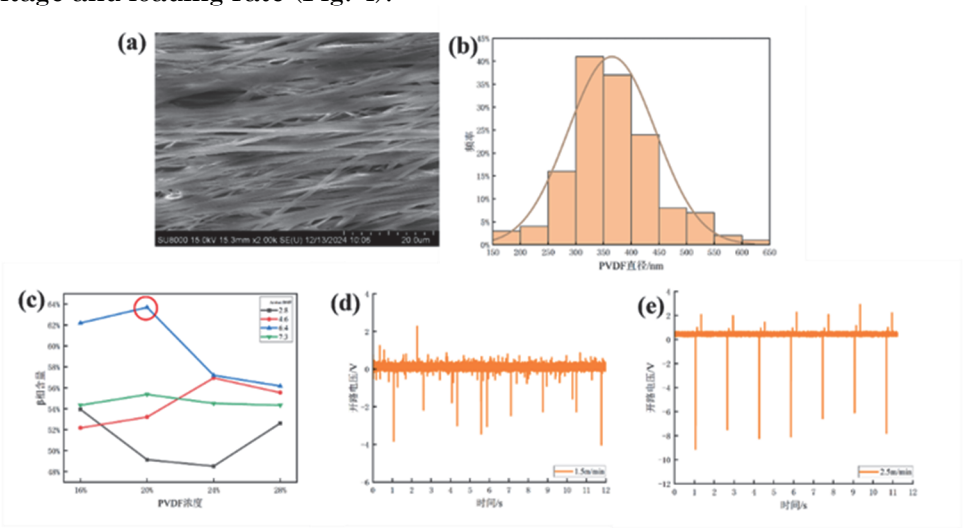


Fig.4 (a) SEM image of the PVDF electrospun membrane, (b) Diameter distribution of the PVDF electrospun membrane, (c) ß-phase content in PVDF electrospun membranes prepared with different PVDF concentrations and solvent ratios; Output voltage of the PVDF electrospun membrane at different force loading rates of (d) 1.5 m/min and (e) 2.5 m/min

Based on the above optimized conditions, the PVDF-PVA@PEDOT/CUR drug-loaded piezoelectric film-covered tracheal stent was constructed. Drug release results showed that almost no CUR release was detected in the control group without pressure loading. Under intermittent cyclic pressure, the CUR release rate was positively correlated with the loading rate. The cumulative release reached approximately 15% within 48 h at a loading rate of 2.5 m/min. Calculation indicated that this release level would achieve a curcumin concentration of approximately 34.3 μM at the stent-tissue interface, which falls within the reported effective concentration range of 10-50 μM for inhibiting fibroblast proliferation (Fig. 5).

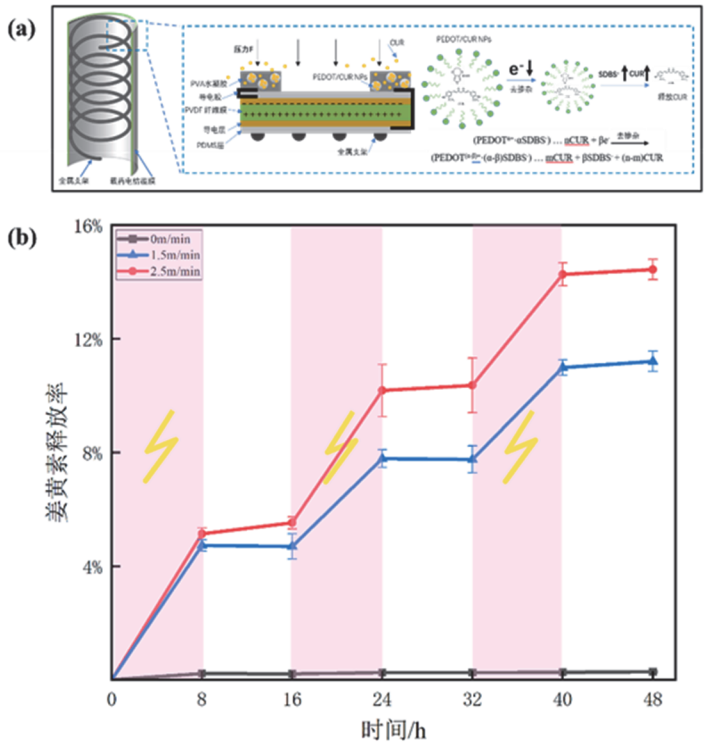


Fig.5 (a) Schematic illustration of the working mechanism of a drug-loaded PVDF-PVA@PEDOT/CUR electrospun piezoelectric coated tracheal stent; (b) CUR release profiles of the film-covered tracheal stent under different force loading speeds (0、1.5、2.5 m/min)

4. Summaries and future plans

This study successfully designed and preliminarily validated a piezoelectric effect-based adaptive drug-releasing tracheal stent. The results demonstrate that the PVDF piezoelectric film can convert mechanical pressure into electrical signals, and the generated electrical signals can effectively trigger the controlled "on/off" release of CUR from PEDOT/CUR NPs. Moreover, the cumulative release rate of CUR is positively correlated with the applied pressure rate, demonstrating the potential for force-controlled adaptive drug delivery. This stent is expected to maintain low release in the absence of granulation hyperplasia and activate drug release when local pressure increases, achieving on-demand drug delivery.

This work provides a new technological pathway and experimental basis for developing intelligent tracheal stents that can self-regulate drug release in response to mechanical changes in the pathological environment. In future work, we will further optimize material properties, construct more physiologically relevant multi-axial mechanical loading platforms that simulate respiratory rhythms, airflow shear, and mucus dynamics, and conduct in vivo animal experiments to verify the reliability, safety, and efficacy of this system for inhibiting granulation tissue hyperplasia.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] Y. Zhang, F. Zhao, S. Chen, B. Li, J. Dong, Y. Chen, Y. Liu, A. Qiao, M Chen: Melt electrowriting-enabled hybrid platforms: Toward functional biomimetic scaffolds for cellular interaction and tissue regeneration, *Acta Biomaterialia*, 213(2026), pp.21-26, doi: 10.1016/j.actbio.2026.02.015.

[2] Y. Zhang, F. Zhao, A. Qiao, Y. Liu, M. Chen: Rational Design and Functionalization of Melt Electrowritten 4D Scaffolds for Biomedical Applications, *Nano-Micro Letters*, 18(2026), doi: 10.1007/s40820-025-01986-9.
[3] X. Ding, S. Chen, T. Du, Y. Zhang, S. Liu, A. Qiao: Design and numerical analysis of a prosthetic mitral valve with a lantern-shaped variable diameter stent for TMVR, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 24(2025), pp.2095-2115, doi: 10.1007/s10237-025-02008-8.
[4] S. Chen, T. Du, Y. Tao, H. Zhang, W. Wu, Y. Zhang, Y. Zhou, Y. Cheng, M. Ohta, A. Qiao: Multi-objective optimization of tracheal stent with J-shaped load-deformation behavior, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 24(2025), pp.1797-1814, doi: 10.1007/s10237-025-01994-z.
[5] H. Zhang, S. Chen, T. Du, Y. Zhang, L. Wu, A. Qiao: Modeling the coupling between stent degradation and vascular remodeling considering the effects of mechanical stimuli and geometric interaction, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 269(2025), pp.108900, doi: 10.1016/j.cmpb.2025.108900.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[6] Y. Zhang, S. Chen, Z. Wang, T. Du, A. Qiao, H. Song, H. Anzai, M. Ohta: Tracheal Stent for Precision Drug Release Driven by the Piezoelectric Effect, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-65, pp. 178-180.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project Code	J25R002
Classification	International Multiple Collaborative Research Project
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Utilization of Coastal Wave Energy as Renewable Energy and Enhancement of Coastal Protection through Turbine Optimization in the Overtopping Breakwater for Energy Conversion (OBREC)

Raditya Hendra Pratama*†, Ippei Oshima**††, Samsu Dlukha Nurcholik***††
Yeddid Yonatan Eka Darma****, Ahmad Taufiqur Rohman*
*Research Center for Energy Conversion Technology, National Research and Innovation Agency (BRIN)
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
***Department of Naval Architecture, Kalimantan Institute of Technology
****Department of Ocean Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

This study aims to systematically clarify the overtopping process and reservoir hydrodynamics in Overtopping Breakwater for Energy Conversion (OBREC) systems using high-resolution numerical simulations based on the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method. During the research period, the study evaluates the influence of key design parameters on overtopping discharge, reservoir flow behavior, and flow stability. Based on these results, physics-based design guidelines are established to relate incident wave conditions and structural parameters to the optimal configuration of the overtopping ramp and the overall hydraulic performance of the OBREC system.

2. Details of program implement

A numerical framework was employed to investigate the overtopping behavior and reservoir flow dynamics of the OBREC system. The methodology consists of two sequential stages: an initial model verification to ensure the reliability of the simulations, followed by a systematic series of simulations to evaluate the effects of key design parameters.

In this study, the reservoir inflow velocity (V_{res}) is introduced as a turbine-relevant hydraulic response variable within a non-dimensional framework. In contrast to conventional parameters such as relative depth and wave steepness, V_{res} directly represents the inflow condition at the reservoir inlet and therefore provides a more direct descriptor of the hydraulic conditions governing turbine operation.

The Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method is adopted as a mesh-free numerical approach. SPH represents the fluid domain using discrete particles and simulates fluid motion without a computational mesh. While interface-capturing methods such as the Volume of Fluid (VOF) approach are often preferred for resolving detailed free-surface interfaces, SPH offers advantages in handling large deformations and strongly nonlinear free-surface flows. Furthermore, due to its reliance on local particle interactions, SPH is well-suited for parallel computation.

OBREC System Simulation Setup

Numerical simulations were carried out to replicate the performance of the OBREC system in a laboratory-scale wave flume environment. The corresponding side-view configuration is illustrated in Figure 1.

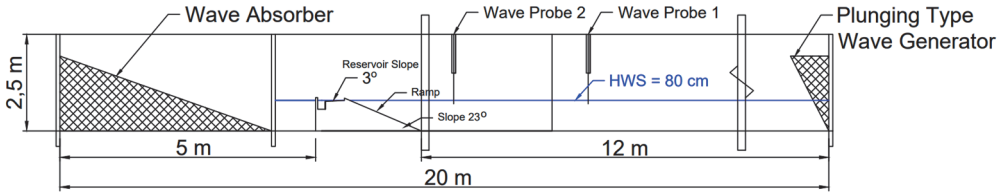


Figure 1. Numerical simulation setup of the OBREC system.

The computational domain was configured to represent a numerical wave flume with dimensions and still water depth indicated in Figure 1. Wave generation was implemented at the upstream boundary using a piston-type wavemaker module in DualSPHysics to reproduce the prescribed wave conditions.

Two OBREC configurations were considered, namely a Linear and a Convex geometry. Both configurations were designed with identical structural parameters, including a front ramp slope of 23°, a crest freeboard (R_r) of 0.025 m, and a reservoir width (B_r) of 0.135 m. Boundary conditions were defined to represent the physical constraints of the flume environment.

The simulations were conducted under model-scale wave conditions with various wave heights (H_s) and wave periods (T_p). By combining two OBREC geometries with four wave periods and two wave heights, a total of 16 simulation cases were analyzed. This configuration allows for a systematic evaluation of overtopping behavior and reservoir flow dynamics across a range of representative wave conditions relevant to turbine performance.

Under identical wave conditions, variations in ramp geometry and flow-path length influence flow acceleration and energy dissipation, leading to differences in crest velocity (V_{res}) and overtopping behavior. These geometric parameters are therefore used to relate V_{res} to the OBREC configuration and to assess the impact of ramp design on overtopping performance.

Non-Dimensional Analysis

This study adopts a non-dimensional framework based on wave steepness (H/L_m) and relative-depth parameters $(h/H$ and $h/L_m)$, which are widely used to describe wave–structure interactions and to enable scale-consistent comparisons across different hydrodynamic conditions. These parameters characterize the governing wave transformation processes and provide independent descriptors of the flow regime.

To represent the reservoir response, the inflow velocity (V_{res}) is expressed in non-dimensional form by normalizing it with the gravity-based velocity scale $\sqrt{gH}$ (H represents the incident wave height, adopted as the characteristic length scale). This formulation reflects the balance between gravitational forcing and flow inertia and provides a physically meaningful basis for comparing overtopping-driven inflow across different wave conditions.

Wave steepness (H/L_m) is introduced as a dimensionless parameter to characterize wave nonlinearity and energy properties, making it essential for describing wave–structure interactions and overtopping processes. The mean wavelength (L_m) is initially estimated from deep-water conditions and then corrected for finite water depth effects (Dean & Dalrymple, 1991).

The normalized reservoir inflow velocity is analyzed as a function of wave steepness and relative-depth parameters. Two ratios are considered: h/H, related to wave

breaking and nonlinearity, and h/L_m, which governs dispersion and wave transformation.
Together, these parameters characterize the transformation of incident wave energy before overtopping and provide a basis for interpreting the resulting inflow conditions at the reservoir entrance.
The combined effects of wave steepness and relative-depth parameters on the normalized reservoir inflow velocity provide a systematic framework for interpreting reservoir inflow dynamics across the range of tested wave conditions.

3. Achievements

Overtopping Behavior and Flow Field Characteristics

The numerical simulations successfully reproduced overtopping processes for both Linear and Convex OBREC configurations under the prescribed wave conditions. The results shown in Figure 2 indicate that the linear ramp facilitates a greater volume of uprushing flow reaching and overtopping the crest compared to the Convex configuration. This difference indicates a more effective transmission of wave-driven momentum toward the crest in the Linear geometry, whereas the Convex ramp promotes flow deflection and energy dissipation along the extended flow path. These contrasting flow behaviors are further quantified in terms of the reservoir inflow velocity (V_{res}), as discussed in the following section. From the results, it is found that the convex configuration exhibits a larger number of cases with no overtopping. This behavior is associated with increased energy dissipation and flow attenuation along the longer and curved ramp, which reduces the ability of the uprushing flow to reach the crest under lower-energy wave conditions.

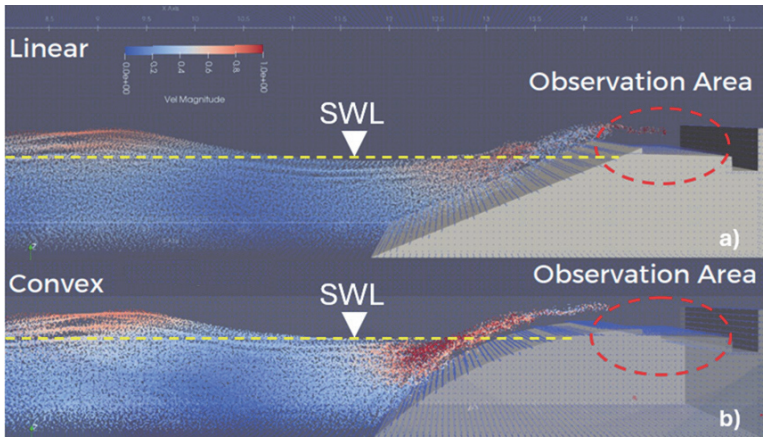


Figure 2: Velocity field distributions for (a) linear and (b) convex OBREC ramp

Non-Dimensional Reservoir Inflow Velocity Results

The relationship between $V_{res}/\sqrt{gH}$ and h/L_m (Figure 3) shows a consistent decreasing trend for both wave conditions (H_s = 0.15 m and H_s = 0.18 m). As h/L_m increases, the normalized inflow velocity decreases, indicating reduced crest momentum and overtopping. The similar slopes suggest that relative depth primarily governs the scaling behavior.
These relationships provide insight into how wave transformation processes influence the transfer of momentum from incident waves to the overtopping flow. This behavior indicates that steeper waves tend to break earlier and dissipate energy along the ramp, thereby limiting the momentum available for overtopping. Suggesting that relatively deeper water conditions reduce breaking intensity and allow greater momentum transmission toward the reservoir. Indicating that a larger relative depth with respect to wavelength reduces the efficiency of momentum

concentration at the crest and consequently limits overtopping-driven inflow. Notably, both wave-height cases exhibit similar slopes, suggesting that relative-depth effects predominantly govern the scaling behavior within the investigated range.

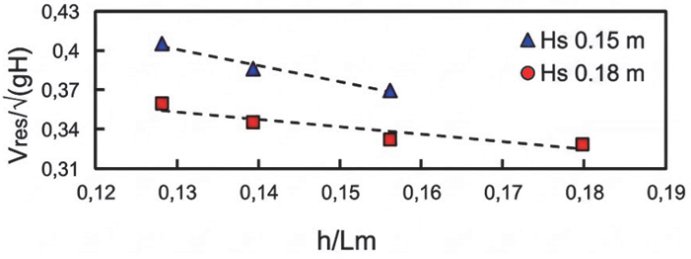


Figure 3: Influence of relative water depth to wavelength ratio (h/L_m) on normalized reservoir inflow velocity under different significant wave heights (H_s)

4. Summaries and future plans

SPH simulations show that reservoir inflow in the linear OBREC configuration is governed by wave transformation and relative-depth effects. The normalized inflow velocity ($V_{res}/\sqrt{gH}$) decreases with increasing wave steepness (H/L_m) and relative depth (h/Lm), but increases with the depth-to-wave-height ratio (h/H). This indicates that steeper waves and larger h/L_m promote earlier breaking and energy dissipation, reducing momentum transfer, while higher h/H supports momentum preservation and increases inflow velocity. The consistent trends across different H_s suggest that relative-depth scaling has a stronger influence on V_{res} than wave height. Therefore, V_{res} can be considered a key hydraulic parameter for turbine-relevant inflow characterization beyond discharge-based metrics.

Although the present SPH results clarify the dependence of $V_{res}/\sqrt{gH}$ on wave transformation and relative-depth parameters, further investigation is required to extend the applicability of these findings across a broader design space. Future studies should examine additional OBREC geometries, including variations in ramp profile, crest configuration, and reservoir entry design, to quantify how geometric modifications influence momentum transfer into the reservoir. In addition, extending the analysis to multiple still-water depth conditions would allow a more direct assessment of the sensitivity of V_{res} to depth-dependent wave transformation regimes. Such extensions would contribute to the development of turbine-oriented design guidance by mapping inflow-velocity characteristics across geometry–depth combinations and improving the robustness of performance optimization.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not Applicable

2) International and domestic conferences, meetings, oral presentations, etc. (included international conference without peer review)

[1] Y.Y.E. Darma, R.H. Pratama, A.T. Rohman, S.D. Nurcholik, I. Oshima: Numerical Simulation of Overtopping Behavior and Reservoir Flow in OBREC Systems for Turbine Design, *Proceedings of the 22nd International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS13-12, pp. 1010-1013.

3) Patent, award, press release, etc.

Not Applicable

課題番号	J25R003
区分	国際連携公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目（発展）

機能性材料成長に関する簡易的シミュレーション手法の提案
Proposal of a Simple Simulation Method for the Growth of Functional Materials

金子　智*,**†，吉村 昌弘*,**，SAHOO Kumar Sumanta***††

YU Ruei-Sung****††, CAN Mutlu Musa*****††，IONITA Nariana******††
MEKINIS Sarunas*******††, 徳増　崇********††

*地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所
**東京科学大学物質理工学院
***Einstein Academy of Technology and Management
****National Chin-Yi University of Technology
*****Istanbul University
******University Politechnica of Bucharest
*******Kaunas University of Technology
********東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

機能性材料の成長過程について量子的分子動力学を用いた検討を行ってきた．しかし，その計算にはある程度の精度は必要ではあるもののバンドギャップ計算のような精度は不要である．そこで，収束条件の緩和と構造最適化の省略など簡易なシミュレーション手法を提案するものである．

2. 研究成果の内容

シリコン(Si)基板上に 20nm の真空層を挿入した構造により Si(001)表面を作成した. 更に，2x2x2 の酸化マグネシウム(MgO(001))を Si(001)表面に挿入してスーパーセルを作成した．面内配置は MgO(100) // Si(100) (cubic 配置)と MgO(110) // Si(100) (45 度回転配置)としている．Si(001)表面の構造最適化を行なった後に，スーパーセルでの MgO クラスターを分子動力学

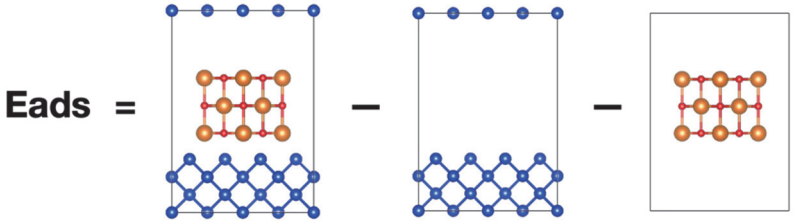


図 1　スーパーセルとシリコン表面，対象クラスターの全エネルギーの差として吸着エネルギーを見積もった．

力学的に最適化した. 比較に用いた吸着エネルギー(Eabs)は, 図１に示すようにシリコン単体, MgO 単体，MgO を Si 表面の全エネルギーの差として見積もった．本研究では収束条件の緩和と構造最適化の省略を行うことで計算コストの大幅な削減を狙ったものである. 図２に示すように，スーパーコンピュータで計算した結果とホーム PC での簡易計算で，結晶成長方向は同じ結果を示すことが確認できた.

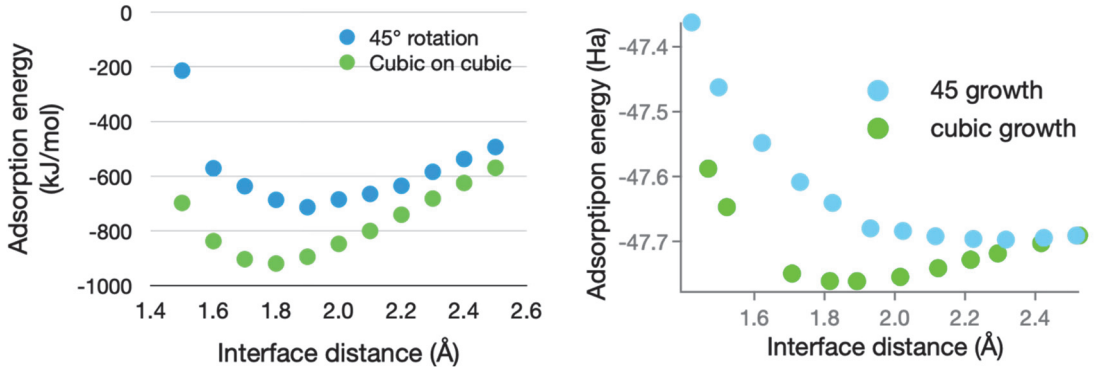


図 2　スーパーコンピューターとホーム PC での計算結果．どちらの計算結果も cubic on cubic 成長が安定している結果となった.

3. 研究目標の達成状況

これまで，酸化物(酸化マグネシウム・イットリア安定化ジルコニア)，グラフェン，窒化物(窒化チタン)での成長について計算と実験結果が一致した.

4. まとめと今後の課題

今回提案した簡易計算法による吸着エネルギーの見積りでも，評価が有効であることが分かった．更にエピタキシャル成長に関する指針となるよう様々な材料間での計算を進めていく予定である.

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Satoru Kaneko, Takashi Tokumasu, Masahito Kurouchi, Manabu Yasui, Daishi Shiojiri, Masahiro, Yoshimura, Ruei-Sung Yu, Musa Mutlu Can, Sumanta Kumar Sahoo, Ionita Mariana, Akifumi Mastuda: Simple Method for Evaluation of Stability of Epitaxial Thin Films on Silicon Surface, *International Union of Materials Society – International Conference of Advanced Materials (IUMRS-ICAM2025)*, 9 - 12 Dec., 2025, University of Ghana, Accra, Ghana

[2] Sumanta Kumar Sahoo, Arumugam Marikani, Satoru Kaneko, Ruei Sung Yu, Musa Mutlu Can, Masahiro Yoshimura: Laser-Assisted Characterization and Field-Emission Studies of Vertically Aligned Silicon Nanowire Arrays, , *International Union of Materials Society – International Conference of Advanced Materials (IUMRS-ICAM2025)*, 9 - 12 Dec., 2025, University of Ghana, Accra, Ghana

[3] Satoru Kaneko, Takashi Tokumasu, Masahito Kurouchi, Manabu Yasui, Daishi Shiojiri, Masahiko Mitsuhashi, Can Mutlu Musa, Ruei Sung Yu, Sumanta Kumar Sahoo, Mariana Ionita, Kripasindhu Sardar, Meskinis Sarunas, Masahiro Yoshimura, Akifumi Matsuda: Stability of epitaxial oxide thin film growth on silicon substrate with evaluation using density functional theory, *Materials Research Meeting 2025 (MRM2025)*, 8 - 13 Dec., 2025, PACIFICO Yokohama North, Yokohama, Japan

[4] Musa Mutlu Can, Jingjun Liu, Satoru Kaneko, Takashi Tokumasu: Gallate Spinels For Micro Energy Harvesting Systems, *ICFD2025*, 10 - 13 Nov., 2025, Sendai International Center, Sendai, Miyagi, Japan

[5] Satoru Kaneko, Masahiro Kurauchi, Manabu Yasui, Daishi Shiojiri, Masahiro Yoshimura, Ruei-Sung Yu, Musa Can, Kripasindhu Sardar, Sumanta Kumar Sahoo, Takashi Tokumasu: Proposal of Simple Method for Evaluation of Stability of Magnesium Oxide on Silicon Surface for Epitaxial Growth, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-33, pp. 93-94.

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**

（特許）

なし

（受賞）

なし

（マスコミ発表）

なし

課題番号	J25R004
区分	国際連携公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	2 年目

Towards Fluid-structure Interaction Analysis using High-order Flux-reconstruction Scheme and Cross-platform-based Parallel Computation

Yoshiaki Abe*†, Freddie D. Witherden***††
Peter E. Vincent**††, Brian C. Vermeire****††, Chungil Lee*, Sambit Mishra***
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Department of Aeronautics, Imperial College London
***Department of Ocean Engineering, Texas A&M University
****Department of Aerospace Engineering, Concordia University
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

空飛ぶクルマを含む次世代エアモビリティでは，垂直離着陸型の小型航空機（以降，電動・ハイブリッド型を含めて eVTOL と呼ぶ）が主流となる．eVTOL の設計では高速回転するローターの後流と支持部材の干渉流れなど，既存の固定翼機には見られない非定常空力現象を考慮する必要があり，このような流れや関連する流体構造連成現象に対する既存の RANS（Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation）解析の十分性は十分に議論されていない．

本研究では，申請者らが研究開発を進めてきた高次精度非構造格子法の一種である流束再構築法（以降，FR 法）を拡張し，LES（large-eddy simulation）などの非定常乱流解析を流体構造連成解析に適用可能となるよう，３つの基盤要素技術（「１．高次精度非構造格子法の空力弾性解析に対する荷重変換手法の確立」「２．高速回転するプロペラ周りの解析を可能とするスライディングメッシュ技術の開発」「３．高次精度非構造格子法に関するデータ駆動型空力構造連成解析手法の確立（静的空弾解析）」）を確立する．本研究では，我々のグループで開発を進めてきた高次精度圧縮性流体解析オープンソース PyFR（www.pyfr.org）[1,2]を基盤とする．PyFR は，MPI による大規模並列，Python の templating engine を用いて複数のアーキテクチャに適した実行ファイルの生成，といった特長を有し，特にこれまで GPU をベースにした極めて大規模な直接数値計算 (DNS: direct numerical simulation)，LES などの非定常乱流解析を行なってきた．今年度初めには，主なバージョンアップデートが行われ，これまでの実装等について詳細を説明した論文が公刊されている[研究成果 1].

まず，項目 1 として，「高次精度非構造格子法の空力弾性解析に対する荷重変換手法の確立」を目指す．航空機の空力弾性解析においては，流体側の解析格子と構造側の格子（構造モデル）で，メッシュ密度が大きく異なることが多い．具体的には，航空機主翼の翼弦方向に数百点以上の流体格子点が置かれることに対し，構造モデルはストリンガーやリブで囲まれるパネル毎にシェル要素などの構造要素で再現するため翼弦方向に数十点程度の離散化が一般的である．上記は RANS などの定常乱流解析で一般的な指標である．本研究で対象とする LES/DNS，また eVTOL などの複雑形状に対しては未だ多くの研究例が存在せず，流体側の格子点数は翼弦方向だけでも上記の十倍以上になると予想されることから，流体と構造の格子点密度の差はさらに大きくなることが予想される．また，高次精度非構造格子法

では各格子セルを高次多項式の曲面で定義する．これらを考慮した流体・構造の格子点間の物理量の受け渡し手法は十分に確立されておらず，仕事を離散的に保存しながら高精度に変換可能なアルゴリズムを確立する必要がある．申請者はこれまでに，従来法による流体計算手法（高次精度差分法）を用いた航空機主翼の空力弾性解析を行なってきており，放射基底関数（RBF）に基づく荷重変換手法の有用性を示してきたが，空力荷重を構造モデル上に変換した際に非物理的な振動が生じることがあった[3]．以上まとめると，本項目では，高次形状セルを有する非構造格子法に適合した，仕事保存の原理を満足する荷重変換法の確立を目指す．本項目は，後に展開する空力弾性解析の基盤となる技術でもある．

次に，項目 2 として高速回転するプロペラ周りの解析を可能とするスライディングメッシュ技術の開発を進める．垂直離着陸可能な eVTOL では，これまでの回転翼機（ヘリコプター）などと異なり，径が小さく高速で回転するプロペラを有することが特長である．この場合，プロペラ後流と支持部材の干渉，プロペラ後流同士の干渉など，高次精度ソルバーによる非定常乱流解析が求められる複雑な流体現象が多く存在する．FR 法を始めとする高次精度非構造格子法を適用するに際し，回転体の表現にはプロペラを含むメッシュの一部を剛体回転させるスライディングメッシュの技術が必要である．PyFR の開発者であり共同研究者の Witherden 助教は，これまでに回転するゴルフボールの解析[4]を始めとする移動メッシュ技術を構築してきており，また申請者の阿部は FR 法における移動変形メッシュ手法の研究を行なってきた[5,6]．これらの技術を統合し，本項目では PyFR に対しスライディングメッシュ機能を実装し，eVTOL のプロペラ流れ解析及び空力構造連成解析へと展開していく．本項目は最も時間を要するパートと予想されるが，Witherden 助教のグループと密に連絡を取りながら進める．

最後に，項目 3 として高次精度非構造格子法に関するデータ駆動型空力構造連成解析手法の確立（静的空弾解析）に取り組む．非定常乱流解析は計算コストが大きく，通常の分離反復型の連成解析手法では現実的な時間内に空弾解析が終了しないことも考えられる．申請者は近年，完全分離解法と呼ばれる高並列計算に適したデータ駆動型の静空弾解析手法を提案した[7]．同手法では，従来の空間領域分割による計算並列化に加え，連成方向（平衡状態までに逐次反復計算）の並列化を可能とした独自性の高いアプローチである．基本的な手法は[7]で構築済みであり，実現すれば非定常乱流解析を用いた高効率な静空弾解析の初めての事例となりうる．

[1] F. D. Witherden, A. M. Farrington, and P. E. Vincent, "PyFR: An Open Source Framework for Solving Advection-Diffusion Type Problems on Streaming Architectures using the Flux Reconstruction Approach," Computer Physics Communications, Vol.185(2014), 11, pp.3028-3040.

[2] Arvind S. Iyer, Yoshiaki Abe, Brian C. Vermeire, Patrick Bechlars, Ralf D. Baier, Antony Jameson, Freddie. D. Witherden and Peter E. Vincent, "High-order accurate direct numerical simulations of flow over a MTU-T161 low pressure turbine blade," Computers & Fluids, Vol.226(2021), 104989.

[3] Shugo Date, Yoshiaki Abe, Tomonaga Okabe, "Effects of fiber properties on aerodynamic performance and structural sizing of composite aircraft wings," Aerospace Science and Technology Vol.124(2022), 107565.

[4] J. Crabill, F.D. Witherden, A. Jameson, "A parallel direct cut algorithm for high-order overset methods with application to a spinning golf ball," Journal of Computational Physics, 374 (2018), 692-723.

[5] Yoshiaki Abe, Takanori Haga, Taku Nonomura and Kozo Fujii, "Conservative high-order flux-reconstruction schemes on moving and deforming grids," Computers & Fluids,

Vol.139(2016), pp.2-16.
[6] Yoshiaki Abe, Takanori Haga, Taku Nonomura and Kozo Fujii, "On the freestream preservation of high-order conservative flux-reconstruction schemes," Journal of Computational Physics, Vol.281(2015), pp.28-54.
[7] 阿部 圭晃, 山﨑 智基, 伊達 周吾, 竹内 稔, 庄司 伊織, 大林 茂, 岡部 朋永, "複合材航空機主翼の静的空力弾性解析に向けた完全分離解法の提案," 日本複合材料学会誌, 48 巻(2022), 6 号,pp.246-257.

2. 研究成果の内容

2.1 データ駆動型の空力構造連成解析に関する研究

項目 3 として，静的空力弾性解析における完全分離解法（FFP/DFP 法）の進捗を報告する ．これまでの研究では，空力モデルと構造モデルの変位差を最小化する残差変位型のアルゴリズムを導入し，有限要素法などの非線形解析との親和性を高めるとともに，ベイズ最適化（MBO）によるモード係数の同時同定手法を構築してきた．本年度は，これらの手法を実用的な設計フレームワークへと展開し，その有用性を検証した ．

- 計算効率の劇的な向上: 提案手法（DFP/FFP 法）は，複数の変形候補を独立して評価できる連成方向の並列化を実現しており，従来の BGS 法と比較して実効的な反復回数を大幅に削減できることを示した ．
- 大規模解析への適用: 国際ベンチマークである HIRENASD 形態翼に対し，Wall-modelled LES（WMLES）に基づく高忠実な静的連成解析を実施した ． 迎角-1.5 度から 1.5 度の範囲において実験値（ETW）と良好な一致を確認した一方で，高迎角側における空力解析の収束性が課題として明らかになった ．
- 自律設計への統合: AI 手法（ベイズ最適化）を統合することで，従来の遺伝的アルゴリズム（GA）と比較して約 1/10 の計算回数で，より優れたパレート最適解を導出することに成功した ．

以上の成果は，国際学術雑誌 *Composite Structures* への掲載やプレスリリースを通じて広く公開されたほか，国際学会（ECCOMAS CM3 等）での発表や招待講演においても報告を行った ．今後は，高迎角側での剥離流れを正確に捉えるための GPU 並列非定常解析への拡張や，3 次元主翼への適用による実用性の検証を推進する ．

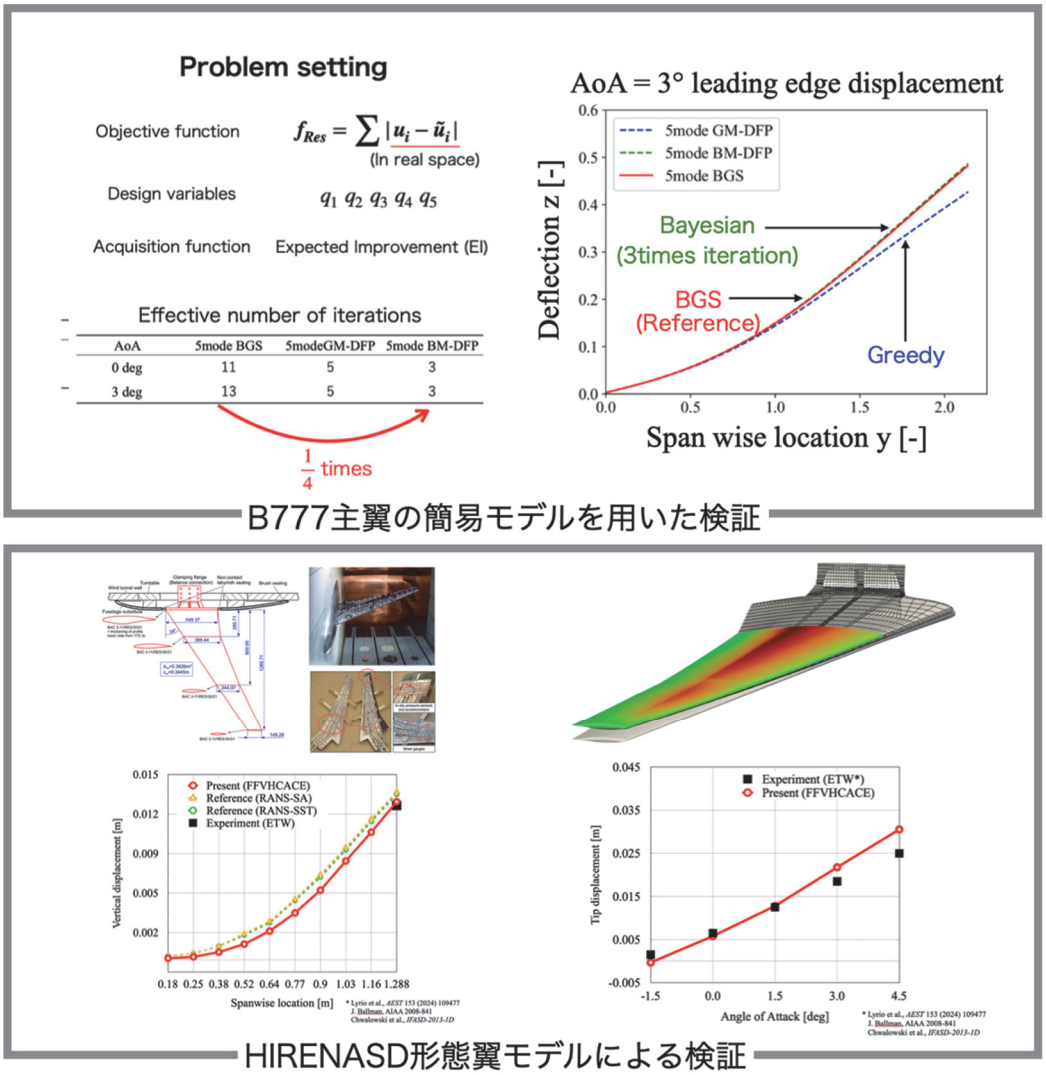


図 1：残差変位型の完全分離解法と HIRENASD 形態に関する検証解析の結果

2.2 動的連成解析手法の構築と高アスペクト比主翼への適用

動的連成解析を効率化するため，制御理論を応用した界面制御原理（Interface Control Principle 法）の研究を進めた．特にフラッター現象の影響が顕著となる高アスペクト比主翼を対象とし，実用的な条件でフラッター境界を評価することに取り組んだ．

流体と構造の界面における残差力を制御システムの入力として捉え，これを最小化することで連成状態を予測する手法（ICP 法）を提案した．2 次元剛体翼のフラッター解析において，本手法がリミットサイクル振動を再現できることを確認した．以上の内容は現在国際学術誌にて論文査読中（Revision 1 回目の途中）であり，先行的に Arxiv に掲載されている（https://arxiv.org/abs/2510.17144）．また，高アスペクト比主翼を対象とし，静的・動的空力弾性挙動を考慮した設計解析を実施した．揚力方向だけでなく負の荷重条件を設計に加味することで，重量増加を最小限に抑えつつ，フラッター安定境界を最大で約 1.75 倍に拡大できることを定量的に示した．

2.3 ICFD での OS 企画と所外対応研究者の流体研訪問

本研究課題を中核として，2025 年 11 月に開催された ICFD（International Conference on Fluid Dynamics）において OS7: Advances in Simulation Techniques for the Computational Aerosciences を企画した．オーガナイザーは本研究課題のメンバーに加え，JAXA，広島大学の研究者を加えたものであり，航空分野における数値計算に関する先進的研究を対象とした．本課題は流体力学（空気力学）を主体とするものだが，企画した OS では構造解析や制御理論など流体力学に限定せず，航空をキーワードとして幅広い研究発表（18 件）が行われた．そのうち 1 件はイギリスの Imperial College London から Raphael Palacios 教授に基調講演を依頼したものであり，空力弾性解析の先進的なテーマや環境適応型航空機を中心とした講演を行なってもらった．ICFD には，所外対応研究者の Mishra 氏（Texas A&M 大学の博士学生）に現地参加してもらい，また Witherden 准教授や Park 助教にはオンラインで参加してもらった．本共同研究を元に，Witherden 准教授は 2026 年度の秋季にサバティカルを取得して流体研に滞在することを計画しており，更なる研究交流が期待できる．また，日本学術振興会の海外特別研究員として Mishra 氏が申請を行った．採択されれば 2026 年度末から特別研究員として流体研にて 2 年間滞在・研究する予定である．

3. 研究目標の達成状況

昨年度大きな進展があった項目 1 の荷重変換アルゴリズムに関しては，新たに空力・構造格子間の密度差に起因する課題を解決し，実機モデルへの適用における安定性向上に向けた取り組みを継続している．項目 2 の移動格子およびスライディングメッシュの実装については，昨年度公刊された GPU 向けメトリクス評価法を基盤として，さらに複雑な非定常流れ解析への拡張を進め，高次精度 FR 法を用いた LES 解析を流体構造連成（FSI）へ適用するための計算基盤が整いつつある．また，昨年度は付加的な項目であった項目 3 の「残差変位型完全分離解法（DFP/FFP 法）」については，今年度本研究の主要な柱へと発展した．具体的には，HIRENASD 翼や B777 主翼モデルといった実用的な問題への適用を通じて，従来の BGS 法を凌駕する並列計算効率と精度を実証した．さらに，本手法をベイズ最適化と統合することで，計算コストを 1/10 に低減した自律設計フレームワークを構築するに至り，当初の計画を上回る極めて重要な進進捗が得られたと考えている．

4. まとめと今後の課題

本年度の研究では，データ駆動型アプローチによる流体構造連成解析の高度化において顕著な成果が得られた．静的解析では，残差変位型の完全分離解法を実用的な設計フレームワークへ展開し，HIRENASD 形態翼を用いた検証により従来の BGS 法を凌駕する計算効率と精度を実証した．また，ベイズ最適化の統合により，従来の 1/10 の計算回数で優れたパレート最適解を導出する自律設計手法を確立し，国際学術誌への掲載やプレスリリースに至った．動的解析においては，界面制御原理（ICP 法）を提案し，高アスペクト比主翼のフラッター安定境界を最大約 1.75 倍に拡大できることを定量的に示した．さらに，ICFD における OS 企画や海外研究者の滞在・招致計画を通じて，国際的な研究ネットワークの強化も進んでいる．今後の課題として，高迎角側での剥離流れを捉えるための GPU 並列非定常解析への拡張や，幾何学的非線形性を考慮した 3 次元主翼への適用による実用性の検証を推進し，より低コストで高忠実な動的連成解析基盤の構築を目指す．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Yajun Liu, Yoshiaki Abe, Ryosuke Kano, Yuki Yatsu, Katsumi Nakamura, Koji Shimoyama, Tomonaga Okabe, Shigeru Obayashi, Multi-objective Bayesian optimization of composite aircraft wings using various carbon fibers, *Composite Structures*, 383 (2026), 120105, 10.1016/j.compstruct.2026.120105.

[2] Kano Ryosuke、Ryuzono Kazuki、Date Shugo、Abe Yoshiaki、Okabe Tomonaga, Structural optimization of composite aircraft wing considering fluid-structure interaction and damage tolerance assessment using continuum damage mechanics, *Aerospace Science and Technology*, (2025), 110652, 10.1016/j.ast.2025.110652.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[3] Yuki Yatsu, Yajun Liu, Yoshiaki Abe: Parallelization in Coupling Algorithm for Static Aeroelastic Analysis of Aircraft Wings, *ECCOMAS CM3 - Transport 2025*, Trieste, Italy, 2025.09.

[4] （招待講演） Yoshiaki Abe: Advances in Data-Driven Aeroelastic Analysis for Multidisciplinary Aircraft Design, *France-Japan Forum 2025*, Lyon, France, 2025.11.

[5] S. Mishra, S. Akkurt, F. Witherden, Online Load Balancing of High-Order Mixed Element Simulations on Heterogeneous Architectures, *22nd International Conference on Flow Dynamics*.

[6] Park, J. Park, J. S. Park, S. Lee, Simulation of Axisymmetric Bodies at High Angle of Attack with an Optimized RotationCurvature Correction in the kω-SST Model B. 2*2nd International Conference on Flow Dynamics*.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）該当なし

（受賞）該当なし

（マスコミ発表）

・プレスリリース：東北大学,「AI が『理想の主翼』を自律設計、計算コスト 1/10 で大型旅客機主翼の最適形状を導出」，2026 年 2 月 20 日，https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2026/02/press20260220-01-AI.html

２．研究成果報告書
＜リヨンセンター公募共同研究＞

課題番号	J25Ly01
区分	リヨンセンター公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	2 年目

熱的に揺動する膜上のチューリングパターン：異方性の起源に関する数値的および数理的研究

Turing patterns on thermally fluctuating membranes: Numerical and mathematical studies on the origin of anisotropic Turing patterns

加藤 文武*†，鯉渕 弘資*

中山 まどか**，田崎 創平***，内一 哲哉****,***** ††

*茨城高専，**東京科学大学，***北海道大学

****流体科学研究所（東北大学），*****ELyTMaX (Lyon-Tohoku Univ.)

†申請者，††所内対応教員

1. 研究背景と目的

シマウマやシマヒメハヤ(zebra fish)の縞模様は Turing Pattern (TP)と呼ばれ，化学物質の濃度に対応するスカラー値関数 u,v に関する拡散と反応の競合を表わすような，反応拡散方程式と呼ばれる偏微分方程式で表わされる[参考文献 1]．特に，u と v の拡散係数に大きな差があって，その拡散係数に方向依存性がある場合，即ち，x 方向と y 方向の拡散係数が異なる場合には，シマウマやシマヒメハヤの縞模様のように，パターンにも異方性が現われる．

しかし，パターン異方性の原因とされる拡散異方性についてはその起源までは分かっていない．そこで，この拡散異方性は力学的な外力によって生まれるのではないかという独自の視点と，その拡散異方性のモデル化に内部自由度 $\vec{\tau}$ を仮定する Finsler 幾何モデリングの手法によって，本研究の 1 年目(=昨年度 2024)には，動物の皮膚のような柔らかい膜上では確かに(i)外力で拡散異方性が生まれ，その結果，(ii)異方的な TP が現われる，という結果が得られた[参考文献 2,3]．同時に，内部自由度 $\vec{\tau}$ が外力によってある向きに揃うとエントロピが小さくなり，外力を除くとエントロピが大きくなるというように，(iii)応力緩和などの非平衡過程が TP 発生に伴うこと，なども分かった[参考文献 3]．

本年度(2 年目 2025)の目的は，(1)貝殻などの硬い物質(図 1)にも柔らかい膜と同じように，その TP の拡散異方性の起源を外力に求められるかどうか，その内部自由度が関係する(2)非平衡過程が計算できるかどうか，を明らかにすることである[成果 1,2,3]．



図 1： 硬い表面(貝殻)上の模様

柔らかい膜状物質と硬い膜状物質は，エントロピを計算する上ではモデル化に大きな違いがあるため，硬い膜状物質における TP は非自明な研究課題になる．というのも，問題点として，エントロピはそのモデル化の性質上，柔らかい膜上でのみ計算可能であり，硬い膜状物質では計算できないからである．もしエントロピが計算できれば，硬い膜状物質においても，内部自由度の向きに連動する TP の向きと，物理的状態の安定性や不安定性，内部自由度が関わる応力緩和などの非平衡な現象，との関係が明らかになる．一方，エントロピが計算できなければ，これらの関係が不明になる．このため，エントロピまで含めて TP の起源を調べるのは，固い膜状物質では非自明な研究課題になる．なお，柔らかい膜

と硬い膜の違いは，膜を構成する分子が”熱的に揺動”するかしないかに起因するものとして定義しているが，内部自由度 $\vec{\tau}$ に関してはどちらも”熱的に揺動する”としている．

2. 研究成果の内容

図2(a), (b), (c)に柔らかい膜と硬い膜に対応する計算格子の模式図を示す．赤丸の頂点を結ぶ黒い線を bond と呼ぶ．頂点の動ける範囲を示したのが頂点の周りに黒い点線で描いた４角形である．その範囲が大きくなると柔らかい膜になり，その範囲が小さくなるとだんだん硬くなる，と理解し，その範囲が zero になる極限として現れる格子を硬い膜と定義する．

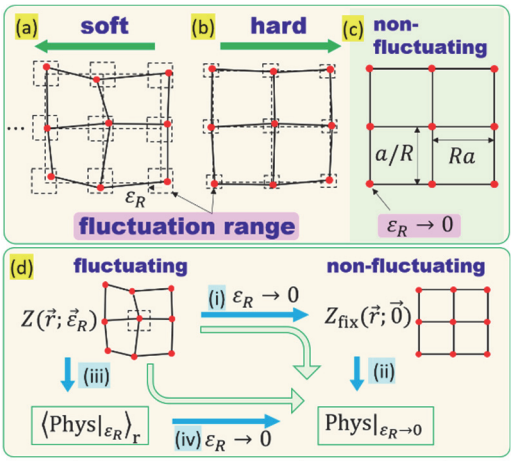


図２：粗視化ポリマーモデルにおける新しい内部自由度 $\vec{\tau}$：(a),(b) １次元，(c),(d),(e) ２次元

このように，硬い膜を柔らかい膜と連続的につながっているものとして定義すれば，固い膜上で計算する物理量も，柔らかい膜上で計算する物理量の極限値と一致するはずと考えられる．これを図示したものが図 2(d)である．この考えが正しければ，固い膜上で形式的に計算されるエントロピは，物理的に意味があるものとして計算した柔らかい膜上のエントロピの極限値と一致すると考えられる．図 2(a)−(c)だけを見ると，柔らかい膜と硬い膜の関係は特別な意味があるようには見えないが，図 2(d)と組み合わせて，物理量まで含めた意味でそれらの関係を示していると理解すれば，固い膜上の物理量計算は非自明な問題になる．図 2(d)の内容は，物理量 Phys に対して柔らかい膜で計算した$\langle \mathrm{Phys}|_{\varepsilon_R}\rangle_r$の$\varepsilon_R \to 0$の極限値 $\lim_{\varepsilon_R \to 0}\langle \mathrm{Phys}|_{\varepsilon_R}\rangle_r$ と硬い膜上で計算した$\mathrm{Phys}|_{\varepsilon_R=0}$が等しいかどうかいう問題を表わしている．[成果 1]の Supplementary Material ではこれらが等しくなることを示した．以下には，固い膜上で計算した物理量に関して要約を示す．特に応力やエントロピは，図 2(d)の内容によって物理的に意味があるものになることに注意する．

図3(a)−(c)は計算に用いる３種類の格子：正方形格子，３角形格子，立方体格子である．２次元格子は見やすくするため小さな格子を用いている．境界条件としては，２次元格子では周期的境界条件，３次元の立方体格子では，x, y 方向には周期的境界条件，z 方向は自由境界とした．

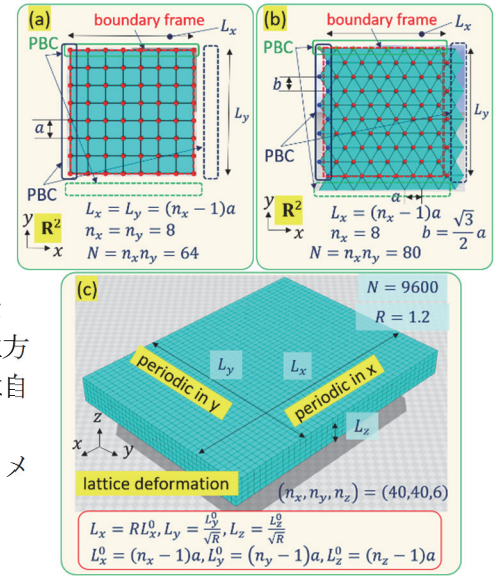


図３：計算に用いる２次元の(a)正方形格子，(b)３角形格子，(c)３次元立方体格子．２次元格子は見やすくするために小さなサイズのものを表示した．

格子の変形条件として２次元格子では変形のパラメータRを用いて，x, y 方向の長さL_x^0, L_y^0を

$$L_x = RL_x^0, \qquad L_y = \frac{L_y^0}{R}$$

とし，３次元格子では x, y, z 方向の長さL_x^0, L_y^0, L_z^0を

$$L_x = RL_x^0, \qquad L_y = \frac{L_y^0}{\sqrt{R}}, \qquad L_z = \frac{L_z^0}{\sqrt{R}},$$

とした．外力の代わりに格子を変形させることで，内部自由度 $\vec{\tau}$ の状態を変えようということである．これらの条件から明らかなように，変形によって格子の面積，

体積は変わらないとしている．

数値計算方法としては，変数 u,v の時間発展を記述する

$$u_i(t+\Delta t) \leftarrow u_i(t) + \Delta t\left[D_u \triangle(\tau)u_i(t) + f\left(u_i(t), v_i(t)\right)\right],$$
$$v_i(t+\Delta t) \leftarrow v_i(t) + \Delta t\left[D_v \triangle(\tau)u_i(t) + g\left(u_i(t), v_i(t)\right)\right], (i = 1, \ldots, N)$$

という反応拡散方定式の離散時間発展方程式を収束するまで反復する．ここで，D_u, D_vは拡散定数，$\triangle(\tau)$は$\vec{\tau}$に依存する方向依存の離散化ラプラシアン，f, gは反応項と呼ばれるu_i, v_iの多項式である．内部自由度$\vec{\tau}$は Metropolis　Monte Carlo 法で更新する．

図4は以上の２つの計算を交互に行って物理量を計算する計算法(Hybrid 計算と呼んでいる)の数値計算の手順を表わすフローチャートである．要約すると次のようになる：

Step 1: 変数 $\vec{\tau}, u, v$ をランダムに初期化する

Step 2: 変数 $\vec{\tau}$を Metropolis MC 法で更新する

Step 3: 変数 u, v の時間をΔtだけ進める
この Step 2, Step 3 をn_{MC}回繰り返す
u, vが収束しているかどうか判定する
もし収束していなければ Step 3 に戻る

Step 4: 収束したら，物理量を計算して Step 1 に戻り，これをn_{itr}回繰り返す

計算には２種類の model 1 と model 2 を用いた．引き延ばす方向と平行(垂直)に TP が現われるのが model 1 (model 2)である．

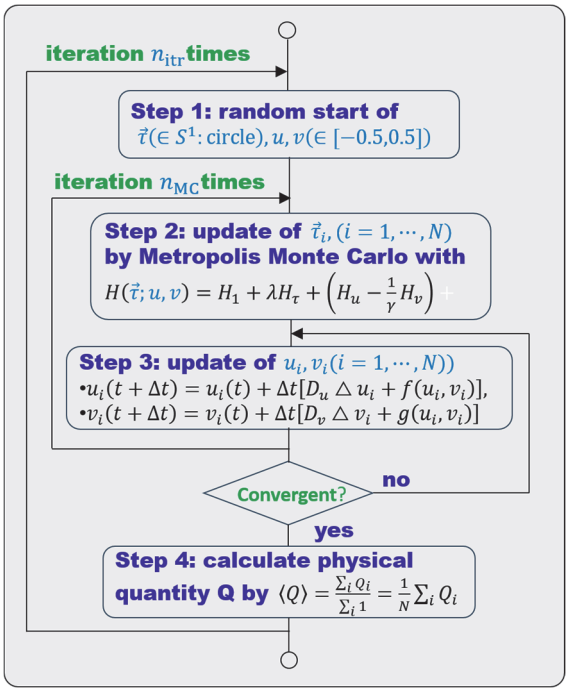


図４：計算の手順を表わすフローチャート．変数 $\vec{\tau}$ と u, v を更新する手続きを交互に行う．

3.　研究目標の達成状況

図５には，３種類の格子で得られた model 1 と model 2 の TP の snapshot を示す．(a),(b),(c)が正方形格子，(d),(e),(f)が３角形格子，(g),(h),(i)が立方体格子の結果である．それぞれの格子で，変形がない$R = 1$の場合は，その向きに特別な方向がない，即ち，等方的な TP が現われている．一方，x 方向に格子を少し引き伸ばす$R = 1.16$の場合は model 1 では引き伸ばした方向に平行に，model 2 では引き伸ばした方向と垂直に，異方的な TP が現われることが分かる．また，TP のこのような現われ方に，モデルの次元依存性はないことも分かる．

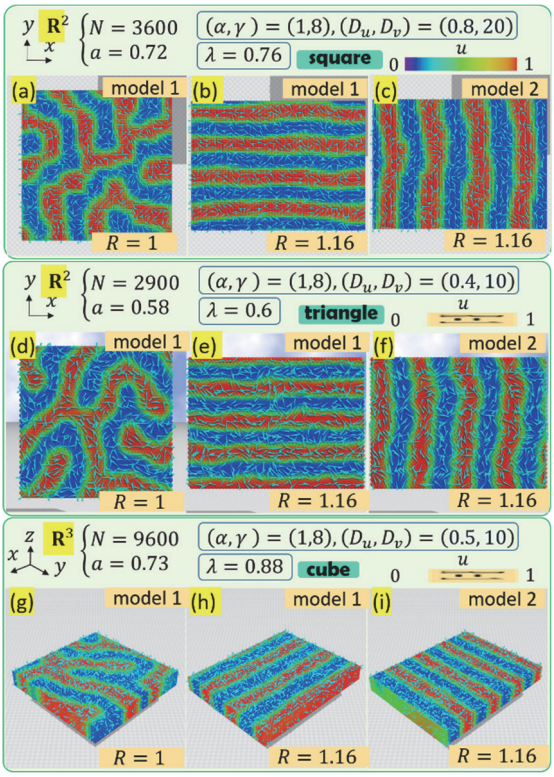


図５　TP の snapshot.　(a),(b),(c)　正方形格子，(d),(e),(f) ３角形格子，(g),(h),(i)立方体格子

図 6 には，(a),(b),(c)正方形格子と(d),(e),(f)３角形格子の機械的な性質を表わす bond ポテンシャル

$$h_1 = \frac{H_1}{N_B}, \quad H_1 = \sum_{ij} \Gamma_{ij}^G(\tau)\ell_{ij}^2,$$

その示強変数部分(=向きに依存する張力)

$$\Gamma_\mu^G = \frac{1}{\sum_{ij} \vec{e}_{ij}\cdot\vec{e}_\mu} \sum_{ij} \Gamma_{ij}^G(\tau)\, \vec{e}_{ij}\cdot\vec{e}_\mu, (\mu = x, y)$$

と，内部自由度 $\vec{\tau}$ の向きを表わす秩序パラメータ

$$q_\tau^\mu = 2\left[\frac{1}{N}\sum_i \left(\vec{\tau}_i\cdot\vec{e}_\mu\right)^2 - \frac{1}{2}\right], (\mu = x, y)$$

を示す．ここで，$N_B = \sum_{ij} 1$ は bond の総数，$\vec{e}_{ij}$ はボンド ij の接線単位ベクトル，$\vec{e}_\mu, (\mu = x, y)$ は μ 方向の単位ベクトルである．どちらの格子でも，有効張力 Γ_μ^G は $R = 1$ では向きに依存しないが，$R = 1$ からずれると，異方的になることが分かる．秩序パラメータ q_τ^μ も $R = 1$ では $q_\tau^\mu = 0$ で等方的，$R = 1$ からずれると，$q_\tau^\mu \neq 0$ となって，内部自由度の異方的な状況を反映していることが分かる．3 次元の立方体格子でも，同様な結果が得られる．

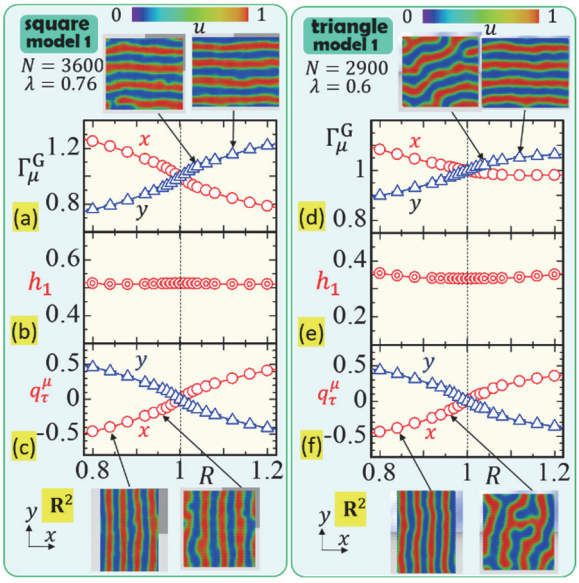


図 6 (a),(b),(c)正方形格子と(d),(e),(f)３角形格子の Γ_μ^G $vs.R$，h_1 $vs.R$ と q_τ^μ $vs.R$．

図 7 には，立方体格子で計算した応力 σ_x，エントロピ s，自由エネルギー f_{re} を示す．σ_x は格子を引き伸ばした状態に保つために必要な x 方向の力と同じものと考えられる．(a),(b)の横軸 λ は内部自由度 $\vec{\tau}$ の近接相互作用ハミルトニアンの係数である．

図 7(a)は $R = 1$ の引き伸ばされていない状態と $R = 1.2$ の引き延ばされた状態における σ_x の比較で，$R = 1.2$ では σ_x は $\lambda = 0.88$ 付近で大きく変化することが分かる．$\lambda = 0.88$ は図 7(b)から分かるように，エントロピ s が極大になる点である．この s の極大点は R が変化しても変わらない．図 7(c)は σ_x と s の R 依存性を示す．$R \geq 1$ の領域が x 方向への引張りに対応し，その領域では σ_x は R とともに増加し，s は減少することが分かる．s が減少するのは，内部自由度 $\vec{\tau}$ が格子を引き伸ばすとその方向に平行または垂直に揃うからである．図 7(d)の f_{re} は格子の変形に対応する自由エネルギーで，それはエントロピの計算に必要な物理量であり，σ_x は f_{re} から計算す

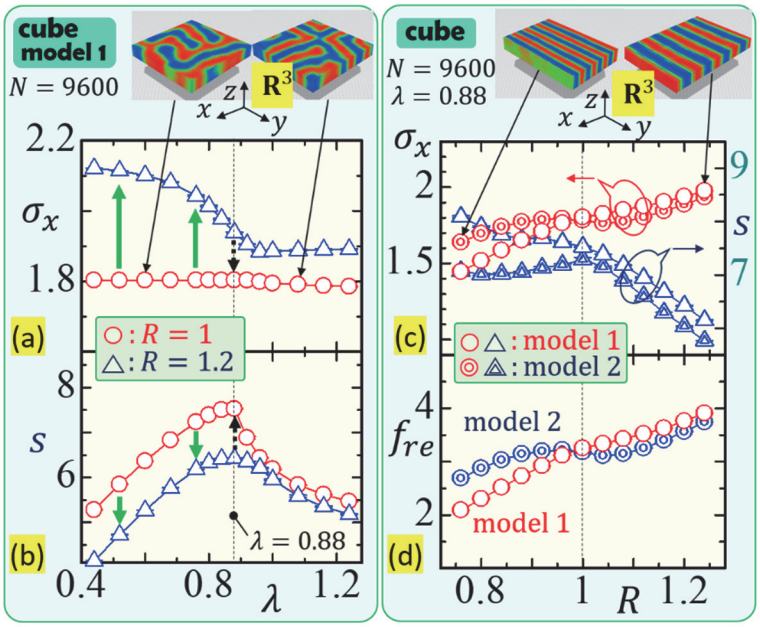


図 7 立方体格子で $R = 1$ と $R = 1.2$ で計算した(a) σ_x $vs.\lambda$，(b) s $vs.\lambda$．Model 1 と model 2 で計算した(c) σ_x $vs.R$，s $vs.R$ と(d) f_{re} $vs.R$．

る．従って，σ_xはf_{re}と同じように重要な物理量になる．

なお，非平衡緩和現象に関する数値計算法として動的 MC 法が知られている．その計算結果は本報告では述べなかったが，初期的な計算結果として，物理量の格子変形に対するヒステレシス応答を，[成果 3]において発表した．

4. まとめ

本研究では，昨年度の研究成果：柔らかい膜上の異方的な Turing pattern (TP)は膜を変形することで発生する外力によってその向きが決まる，即ち，応力誘起のパターン形成であることが，揺らいで変形しない硬い膜上でも期待できることを確かめた．更に，固い膜上で計算したエントロピは，柔らかい膜上で定義されるエントロピと一致することも分かり，その結果，固い膜上の TP も応力緩和のような非平衡緩和現象と連動して発生すると考えられる．

参考文献

[1] Models of Biological Pattern Formation, H. Meinhardt, Academic Press, London, 2nd edn, 1982.

[2] G. Diguet, M. Nakayama, S. Tasaki, F. Kato, H. Koibuchi and T. Uchimoto, Numerical study of anisotropic diffusion in Turing patterns based on Finsler geometry modeling, Phys. Rev. E, 2024, 109, 014213, https://doi.org/10.1103/physreve.109.014213.

[3] Fumitake Kato, Hiroshi Koibuchi, Elie Bretin, Camille Carvalho, Roland Denis, Simon Masnou, Madoka Nakayama, Sohei Tasaki and Tetsuya Uchimoto, Turing patterns on polymerized membranes: coarse-grained lattice modelling with an internal degree of freedom for polymer direction, Soft Matter, 2025, 21, pp. 2317–2338, https://doi.org/10.1039/d4sm01309c

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Fumitake Kato, Hiroshi Koibuchi, Madoka Nakayama, Sohei Tasaki and Tetsuya Uchimoto, Turing patterns on non-fluctuating surfaces under mechanical stresses, *arXiv*: https://doi.org/10.48550/arXiv.2604.26309

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Fumitake Kato, Hiroshi Koibuchi, Madoka Nakayama, Sohei Tasaki and Tetsuya Uchimoto, Turing Patterns on 3D Rigid Materials, *Twenty-second International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, November 10--13, 2025, Sendai, Miyagi, Japan, proceedings, OS29: *IFS Lyon Center Collaborative Research Forum*, pp.1774-1776, (2025).

[3] Fumitake Kato, Hiroshi Koibuchi, Madoka Nakayama, Sohei Tasaki and Tetsuya Uchimoto, Dynamic Monte Carlo Simulations of Turing Pattern, *ELyT Workshop* 2026 March 7--8, 2026, Sendai, Miyagi, Japan,.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project Code	J25Ly02
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject Area	Health, Welfare and Medical Cares
Research Period	April 2025 ~ March 2026
Project Status	1st year

KERATOX project: Study of the Impact of Hypoxia on Human Keratinocytes

Nicolas Aznar*†, Kenichi Funamoto**††
Jean-paul Rieu*, Minh Hoang*, Morgane Roinard*, Satoshi Aratake**
*University Claude Bernard Lyon 1
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this project is to elucidate how oxygen availability shapes keratinocyte behavior and contributes to skin regeneration and pathology. Although hypoxia is known to influence wound healing and skin cancer development, the mechanisms by which oxygen gradients regulate keratinocyte proliferation, differentiation, and migration remain poorly defined. By leveraging an organoid-on-chip platform capable of generating controlled oxygen gradients, we aim to model physiologically relevant hypoxic environments and dissect the cellular and molecular responses they trigger. Through the combined analysis of hypoxia-responsive pathways such as HIF and VEGF and the evaluation of pro-regenerative therapeutic compounds, this project seeks to build a mechanistic framework for understanding keratinocyte adaptation to hypoxic stress. Ultimately, the goal is to lay the groundwork for innovative strategies to improve skin repair and treat hypoxia-associated skin disorders. To strengthen our collaboration, Pr J-P. Rieu visited Pr K. Funamoto's lab during summer time and Dr N. Aznar and Morgane Roinard stayed in Sendai for 7 days (Nov. 8-14, 2025) to participate to the ICFD 2025 and discuss experiments related to this project.

2. Details of program implement

Specific aim 1: Development and validation of an oxygen-controlled microfluidic platform for keratinocyte cultures

The objective of this first aim was to develop and validate a microfluidic organ-on-chip platform capable of precisely controlling oxygen tension for the study of keratinocyte behavior. Oxygen availability is a critical but often overlooked parameter in *in vitro* skin models, despite its central role in epidermal homeostasis, wound healing, and pathological conditions. To address this gap, we adapted and implemented an oxygen-controlled microfluidic device compatible with keratinocyte cultures in both 2D and 3D configurations. The platform is based on a multilayer PDMS microfluidic architecture integrating dedicated gas channels positioned above the cell culture chamber, allowing spatial modulation of oxygen tension across the culture area (Figure 1a-c). To guide device design, numerical simulations were performed using COMSOL Multiphysics to evaluate oxygen diffusion profiles as a function of channel geometry. In particular, different distances between the gas channels and the culture chamber (1 and 5 mm) were modeled under several inlet oxygen conditions. Based on physiological relevance and experimental feasibility, a 0–21% O_2 configuration was selected to reproduce a

continuous transition from normoxia to hypoxia. Simulations revealed that smaller gap sizes generated steeper oxygen gradients, whereas larger gaps resulted in broader, more linear profiles, informing the selection of device geometries for experimental validation (Figure 1d). Following fabrication, oxygen gradient formation was experimentally validated using PtTFPP-based oxygen-sensing films, enabling spatially and temporally resolved quantification of oxygen levels within the device. These measurements confirmed the ability of the platform to generate reproducible oxygen gradients across the culture chamber (Figure 1e), while also highlighting the influence of device geometry and layer alignment on the minimal oxygen levels reached and on gradient stability (Figure 1f). This validation step was essential to define the operational limits of the system and ensure reliable control of the cellular oxygen microenvironment. The platform was subsequently validated for keratinocyte culture using the N/TERT-1 human keratinocyte cell line. Keratinocytes successfully adhered, proliferated, and maintained characteristic epithelial morphology within the microfluidic environment under both normoxic and hypoxic conditions. Importantly, the device was also compatible with 3D keratinocyte spheroid cultures embedded in extracellular matrix hydrogels, in which spheroids remained viable and structurally stable during in-chip culture. Together, these results demonstrate that the oxygen-controlled microfluidic device is both technically robust and biologically compatible with keratinocyte cultures, establishing a validated platform for investigating oxygen-dependent epidermal processes in subsequent aims.

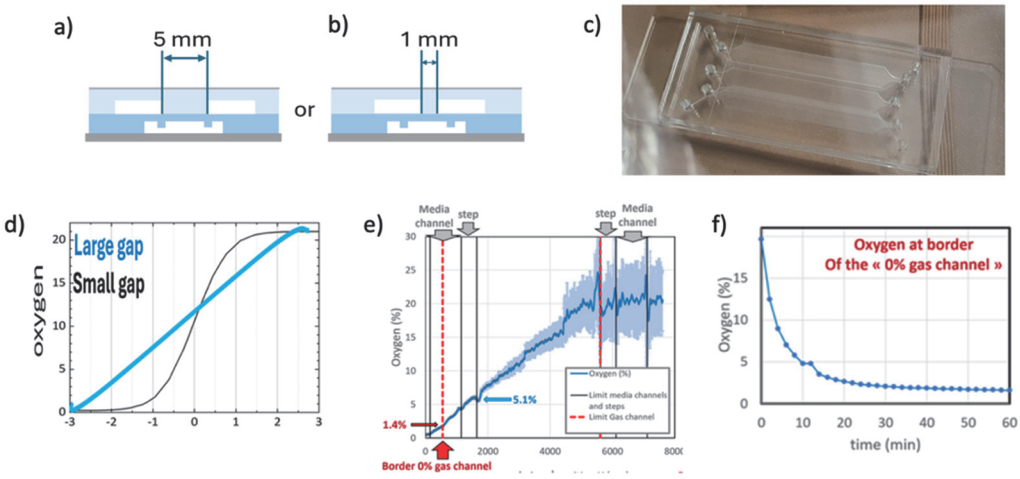


Figure 1. Evaluation of oxygen levels in different organ-on-chip configurations. **(a,b)** Simulations focused on two representative designs: a small-gap device (1 mm) and a large-gap device (5 mm). **(c)** Picture of the organ-on-chip. **(d)** COMSOL simulation result showing oxygen concentration profile in the small-gap (1 mm) device under the 0–21% O_2 condition. Combined simulation profiles comparing the small-gap and large-gap devices. The small-gap device exhibits a steeper gradient than the large-gap design. **(e)** Experimental oxygen concentration measurements which demonstrated good alignment between the gas channel layer and the main channel layer. The 0% and 21% O_2 borders aligned well, resulting in a relatively linear gradient. **(f)** Stable O_2 gradient is reached after 30-40 minutes.

Specific aim 2: Study of cellular responses of keratinocytes to oxygen gradients

The objective of this second aim was to investigate how controlled oxygen conditions modulate fundamental keratinocyte behaviors, with a specific focus on proliferation and cell motility. We next examined the response of N/TERT-1 human keratinocytes to normoxic and hypoxic environments in both 2D monolayer and 3D spheroid culture systems, thereby linking oxygen tension to biologically relevant epidermal functions. To assess the impact of oxygen availability on keratinocyte proliferation, cells were cultured under normoxic (21% O_2) or hypoxic (1% O_2) conditions in standard 2D monolayers and monitored over multiple passages. Representative phase-contrast images revealed comparable epithelial morphology in both conditions, with subtle differences suggestive of altered cell state rather than overt stress (Figure 2a). Quantitative analysis of cell numbers across six consecutive passages showed no statistically significant difference between normoxia and hypoxia (Figure 2b), indicating that chronic hypoxic exposure does not impair keratinocyte proliferative capacity. These results suggest that keratinocytes can sustain growth under low oxygen tension while maintaining overall population expansion, consistent with the hypoxic environments encountered in physiological and pathological skin contexts. To extend these observations to a more physiologically relevant 3D context, keratinocytes were cultured as spheroids generated in ultra-low attachment plates and subsequently embedded in Matrigel within the STEADY-STEM 3D culture system. Under both normoxic and hypoxic conditions, spheroids remained viable and structurally intact (Figure 2c). While growth spheroid integrity was preserved, hypoxic spheroids appeared less compact, suggesting that oxygen tension may influence cell–cell cohesion or peripheral cell dynamics in three-dimensional assemblies. Together, these results indicate that hypoxia does not compromise keratinocyte survival or growth in 3D culture, while potentially modulating structural organization.

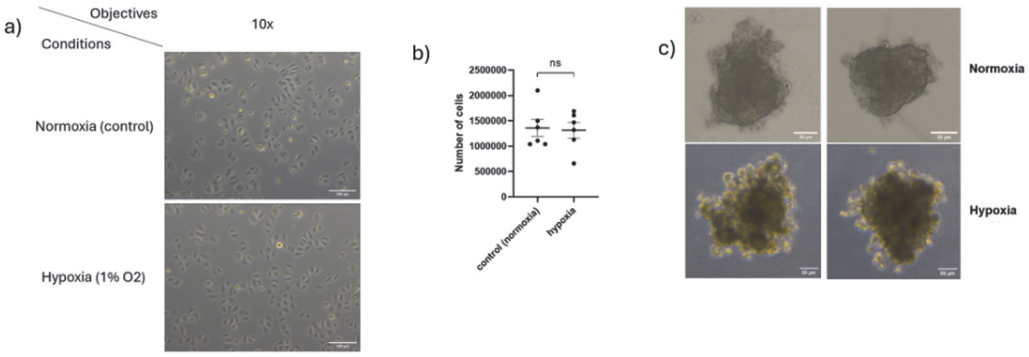


Figure 2. Impact of hypoxia on keratinocytes proliferation in 2D and 3D.
(a) Representative images of 2D monolayer cultures of N/TERT-1 keratinocytes maintained under normoxic and hypoxic conditions. Scale bar = 100 µm. **(b)** Cell counts across six passages (n = 6), measured using KOVA Glasstic slides, to assess proliferation in different oxygen environments. ns = not significant, p value is not lower than 0.05.**(c)** 3D spheroids formed in ultra-low attachment (ULA) 96-well plates, subsequently embedded in Matrigel within the STEADY-STEM Technology and cultured under normoxic or hypoxic conditions. Scale bar = 50 µm.

In parallel, we investigated the effect of oxygen gradients on keratinocyte motility using live-cell imaging within the microfluidic device developed in Aim 1. Keratinocyte monolayers exposed to spatially defined normoxic and hypoxic regions exhibited active migration throughout the culture chamber. Bright-field imaging revealed coordinated collective motion, including rotational behavior near both hypoxic and normoxic borders (Figure 3a). Single-cell tracking analysis confirmed robust migratory activity under both conditions, with clear differences in migration dynamics (Figure 3b). Quantitative analysis demonstrated a significant increase in migration speed under hypoxic conditions compared to normoxia (Figure 3c–d). In addition, trajectory analysis revealed a modest but significant increase in path curvature in hypoxia, indicating more complex migration patterns. Although these motility data are derived from a limited number of experiments and should be considered exploratory, they suggest that reduced oxygen availability enhances keratinocyte migratory behavior without compromising proliferation. This combination of preserved growth and increased motility is highly relevant to epidermal repair processes, such as wound healing, where keratinocytes are exposed to hypoxic microenvironments while undergoing coordinated migration. Collectively, the results of this aim demonstrate that oxygen gradients selectively regulate keratinocyte behavior, maintaining proliferative capacity while promoting dynamic migratory responses, thereby underscoring the importance of oxygen tension as a key regulator of epidermal function.

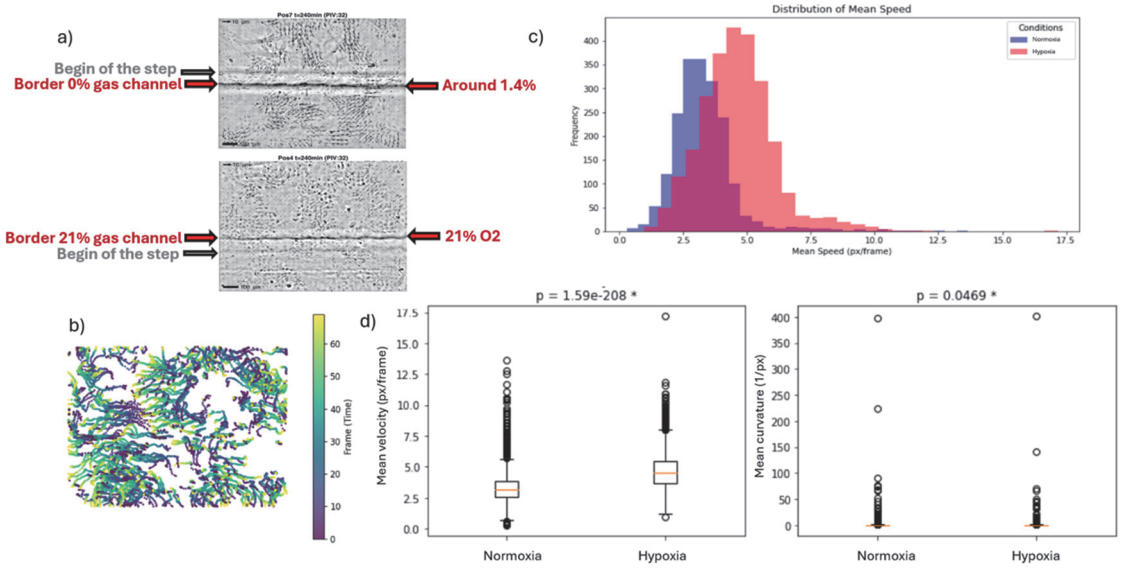


Figure 3. N/TERT-1 keratinocyte motility under normoxic and hypoxic conditions. **(a)** Microscopic BF images of 2 ROIs in hypoxic and normoxic conditions. **(b)** Representative single-cell trajectory maps showing keratinocyte migration paths under normoxia and hypoxia. **(c)** Distribution of single-cell mean speed, with normoxic cells shown in pale blue and hypoxic cells in peach/pink color. **(d)** Quantification of mean velocity and mean trajectory curvature analyzed using Python-based image analysis with Cellspose algorithm (Stringer et al., 2021).

3. Achievements

- We designed an innovative 3D cell culture system combined with oxygen gradient.
- Hypoxic condition has no impact on keratinocytes proliferation.
- Hypoxic condition increases keratinocytes migration.

4. Summaries and future plans

This project is expected to yield significant advancements in the study of hypoxia and its effects on keratinocyte biology. By developing an innovative microfluidic chip capable of reproducing precise and controlled oxygen gradients, we will establish a robust platform for investigating the influence of hypoxic conditions on keratinocyte viability, proliferation, and differentiation. Through this model, we aim to unravel the molecular pathways activated by hypoxia, including key signaling mechanisms such as HIF and VEGF. These insights will deepen our understanding of the cellular and molecular responses to oxygen deprivation, providing a foundation for novel therapeutic strategies. Ultimately, this research will facilitate the development of interventions to enhance skin regeneration and treat chronic wounds.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] S. Aratake, M. Roinard, L. Gerossier, D. Yoshino, J.-P. Rieu, K. Funamoto, N. Aznar: Investigation of a Predictive Therapeutic Response under Controlled Oxygen Condition in Cancer Patient-derived Organoids, *Proceedings of the 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)
Not applicable

(Award)
Not applicable

(Press release)
Not applicable

課題番号	J25Ly03
区分	リヨンセンター公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	3 年目

超音波反射にもとづく配管内面の腐食の形状推定

Shape Estimation of Pipe Inner Corrosion Based on Ultrasonic Reflection

中本 裕之*†，藤井 滉太郎*
内一 哲哉**††，Philippe Guy***
*神戸大学大学院システム情報学研究科，**東北大学流体科学研究所
***Laboratory of Vibration and Acoustics, INSA-Lyon
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

原子力発電所をはじめとする発電プラントでは，高温・高圧の流体が流れる配管が重要な構成要素となる．配管内面では流体との機械的・化学的作用により腐食が生じ，その進行により配管の破断リスクが高まる．このため，配管の減肉と亀裂の検出に関して多くの研究が行われ，流体力学にもとづく減肉シミュレーションも進められてきた．これらの成果は互いに補完的であり，減肉形状を詳細にモニタリングし，その結果を用いて精緻なシミュレーションを行うことで，破断リスク推定のさらなる高精度化が期待される．本研究では，配管内面の減肉形状を高精度にモニタリングすることを目指し，粗面で反射した超音波の周波数スペクトルにもとづく粗面形状推定方法の確立を目的とする．

2. 研究成果の内容

本研究では，パルスエコー法によりきずのない面から超音波を入射し，繰り返し配置された矩形の平行きずを有する対向面で反射した超音波信号を計測する．昨年度は，ニューラルネットワークを用いて，これらの繰り返しの矩形きずのピッチと深さを推定した．この推定には，きず面で反射した超音波の主反射波に遅れて続く微小な信号（以下，遅れ波とする）に起因する特徴的な周波数スペクトルを入力として用いたが，この遅れ波の生成メカニズムが明らかでなかった．そこで本年度は，その遅れ波の生成メカニズムの解明に取り組んだ．

超音波の伝搬と反射の様子を確認するため，有限差分時間領域法（Finite-Difference Time-Domain method, FDTD）によりシミュレーションを行った．FDTD 法では，計算領域をメッシュに分割し，各メッシュ格子点における応力と粒子速度を時間ステップ毎に交互に計算する．モデルを繰り返しのきずの方向と直交する断面を 2 次元等方性弾性体とした．物理的なパラメータに試験体の材料である炭素鋼のパラメータを設定した．境界条件には，固体 - 空気界面に対応した自由境界条件を適用した．

繰り返しの矩形きずの形状をピッチ：2.00 mm，深さ：0.2 mm，きずの幅：0.25 mm とし，計算によって得た時刻 3.6 s から 4.43 s までの反射の様子を図 1(a)から(h)に示す．赤い点線はきずの中間点と一致させたプローブの中心を示す．各グラフの左側のきずの右面の座標を z 軸の 0 とし，x 軸は各グラフの下部の反射面を 0 として上方向がきずの深さ方向である．同じ時刻の x 軸と z 軸方向の応力 T1 と T3 のグラフが対になり，それが(a)から(h)まで時間的な進行を示す．図 1(b)，(c)，(d)，および(e)の T3 のグラフの下部に四角で囲った小さな応力が観察された．これらは，それぞれ 1 つ前の T1 のグラフで示された入力波の波動成

分によって励起されたものである．図 1(f)から(h)では，図 1(e)で励起された正の T3 成分がきずから隣のきずへ表面波として伝搬していることが確認できる．特に，図 1(g)および(h)では，表面波からバルク波への再変換が示されている．この表面波からバルク波への再変換は，表面波が減衰するまで継続的に発生することが，4.43 s 以降の結果（図は割愛）から確認できた．

以上のことから，遅れ波が，主たる反射波の反射時の表面波への変換と再変換を介した遅れを伴うバルク波によることが明らかとなった．

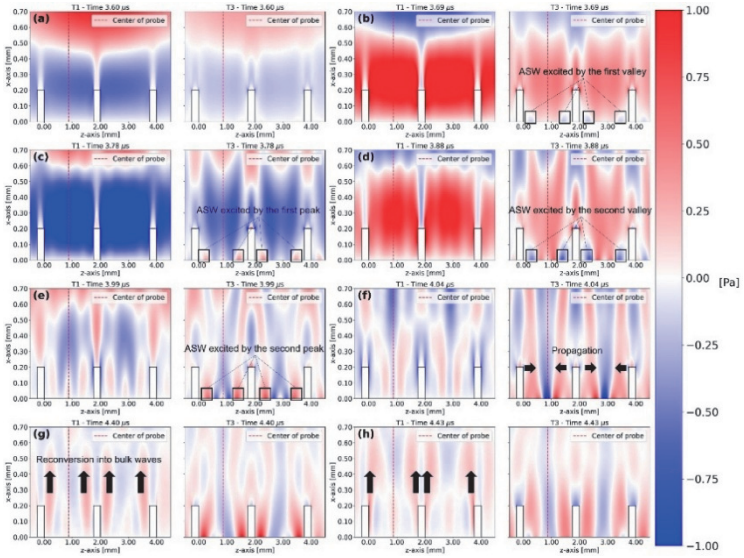


図 1：きずのある面で超音波反射

3. 研究目標の達成状況

繰り返しのきずが矩形であれば，3 年間の知見にもとづいて，一定の精度で形状推定が可能である．本年度の発表件数も目標通り達成し，予定通りの成果が得られたと考える．

4. まとめと今後の課題

本研究では，3 年間の研究期間において，繰り返しのきずの形状推定方法を提案し，その推定に用いる超音波信号の発生メカニズムを解明した．今後との課題として，きずの形状が矩形ではなく三角や円弧などの場合への推定方法の拡張が挙げられる．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] K. Fujii, H. Nakamoto, P. Guy, T. Uchimoto: Visualization of surface wave generation and tail wave formation in acoustic Wood anomalies, *J. Acoust. Soc. Am.*, 159, (2026), pp. 2477-2486, doi: 10.1121/10.0042999.

[2] H. Nakamoto, K. Terada, P. Guy, T. Uchimoto: Effects of Rough Reflection Surface on the Frequency Spectrum of Ultrasonic Wave, *Stud. in Appl. Electromag. Mech.*, 48, (2025), pp. 132-139, doi: 10.3233/SAEM250021.

[3] K. Fujii, H. Nakamoto, P. Guy, T. Uchimoto: Estimation of Flaw Parameters in Periodic Rough Surfaces via Ultrasonic Simulation, *Proc. 2025 SICE Festival with Annual Conf.*, (2025), pp. 1456-1460, doi: 10.23919/SICEFES67750.2025.11236656.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[4] K. Fujii, H. Nakamoto, P. Guy, T. Uchimoto: Neural Network-based Prediction of Flaw Parameters in Periodic Rough Surface Using Ultrasound Reflection Data, 22nd Int. Conf. on Flow Dynamics, Sendai, (2025), pp. 1762-1764.

[5] 藤井滉太郎, 中本裕之, Philippe Guy, 内一哲哉, 周期粗面における音響 Wood 異常の発生メカニズム, 第 26 回公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, (2025), pp. 192-196.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

[6] 藤井滉太郎, 超音波を用いた周期粗面の形状推定, SICE 関西支部奨励賞（2026 年 1 月）.

課題番号	J25Ly04
区分	リヨンセンター公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	2 年目

三次元造形した SiC の電子顕微鏡内局所圧縮試験
Local Compression Test of 3D-printed SiC in an Electron Microscope

栗田 大樹*†，内一 哲哉**††
*東北大学大学院環境科学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究は当初，「三次元造形した SiC の電子顕微鏡内局所圧縮試験」により，微視的な変形・破壊挙動の解明を目的としていた．しかし，研究を進める中で，材料の力学特性は単なる局所応答だけでなく，構造設計（特に密度分布）に強く依存することが明らかとなった．特に，DIW による造形プロセスでは，焼結助剤組成の制御により空間的な密度勾配を導入できるため，材料内部に残留応力場を設計的に付与できる可能性がある．このような構造起因の強化メカニズムは，電子顕微鏡内の局所圧縮試験だけでは本質的に評価が困難であり，マクロな曲げ試験との組み合わせによる体系的な評価が必要となった．そこで，直接インクライティング（DIW）法を用いた密度勾配シリコンカーバイド（SiC）の創製とその力学特性評価を行った．特に，曲げ負荷時に最も破壊起点となりやすい引張応力側表面に着目し，き裂発生を抑制するための構造設計（低密度層の配置および層構成）の有効性を検証することを主眼とした．また，焼結過程で生じる収縮差に起因した残留応力を積極的に利用した強化機構の解明を目指した．

2. 研究成果の内容

Al_2O_3およびY_2O_3を焼結助剤として用い，その混合比を制御することで，異なる相対密度を有する SiC 層（低密度層 L：約 78%，高密度層 H：約 88%）を作製した．これらを組み合わせることで，3 層および 9 層の密度勾配構造（特に LHL 構造）を DIW により造形した．

三点曲げ試験の結果，LHL 構造は単一組成の高密度 SiC と比較して最大約 48%の比曲げ強度向上を示し，軽量化と高強度化の両立が可能であることを実証した．特に 3 層構造 LHL111 では，平均 145 MPa 程度の曲げ強度を示し，従来構造を明確に上回る性能を達成した． 高速カメラ観察により，すべての試験片において破壊は引張応力が作用する下面から開始することが確認された（図 1）．通常，低密度層は気孔を多く含むため強度低下が予想されるが，本研究では逆に，低密度層を表面に配置した LHL 構造で強度向上が見られた．これは，焼結時の収縮差（H 層>L 層）により L 層内部に圧縮残留応力が発生し，き裂発生を抑制したためと考えられる(図 2).

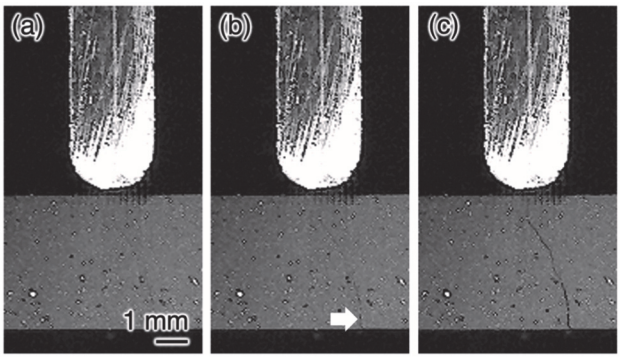


図 1 高速カメラ観察によるき裂発生の観察

さらに, SEM および EDX 解析から，L 層と H 層の間には明確な界面不連続ではなく，緩やかな組成勾配が形成されていることが確認された．このような連続的な構造は応力集中を緩和し，界面剥離の抑制およびき裂進展の偏向に寄与することが示唆された．また，9 層構造においては，表面から界面までの距離（層厚比）が強度に影響することが確認され，残留応力場の分布設計が重要であることが明らかとなった．

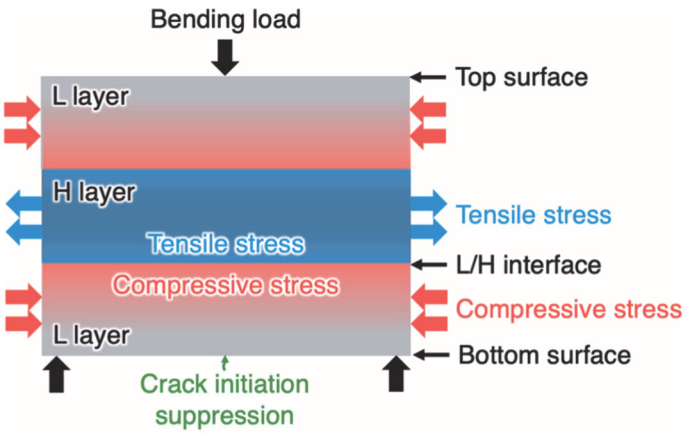


図 2 LHL 構造を有する密度傾斜 SiC の強化機構

3. 研究目標の達成状況

本研究では，DIW を用いた密度勾配 SiC の造形プロセスを確立し，組成制御による局所的な密度設計が可能であることを示した．さらに，密度勾配構造により従来の均質材料では実現困難であった「軽量化と強度向上の両立」を実験的に達成した．特に，低密度層を表面に配置するという一見不利な構造が，残留応力設計により強度向上に寄与するという新たな知見を得た点は重要であり，当初の研究目的であった構造設計指針の提示という観点で，目標は十分に達成されたといえる．

4. まとめと今後の課題

本研究により，密度勾配構造を有する SiC において，焼結収縮差に起因する圧縮残留応力を利用することで，き裂発生を抑制し，曲げ強度を向上できることが明らかとなった．特に，引張応力が作用する表面に低密度層を配置し，その近傍に高密度層との界面を設ける構造が有効であることが示された．一方で，本研究では残留応力の定量分布やその空間的広がりについては十分に解明されておらず，層厚比や界面位置との関係も含めてさらなる検討が必要である．また，DIW 特有の気孔形成やスラリー吐出のばらつきが構造精度に影響を与える点も課題である．今後は，有限要素解析や応力可視化手法との連携により残留応力場の定量評価を進めるとともに，最適な層構成設計の指針を確立することが求められる．さらに，本手法を他のセラミックス材料や機能性材料へ展開することで，高機能軽量構造材料の開発につながることが期待される．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Kurita H*, Wang Z, Kudo T, Kanno T, Uchimoto T, Noto H, Gremillard L, Cottrino S, Narita F*. Bending strength increase of silicon carbide by density gradient structure design by direct ink writing. *Ceramics International* 2026;52(10):13766-13773. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2026.02.018.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

なし

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project Code	J25Ly05
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject Area	Nano-micro
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year (progressing)

Carbon Diffusion in Iron Assisted by an Electric Field: Model and Experiment

Patrice Chantrenne*†, Takashi Tokumasu**††
*Université de Lyon, France
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Thermal treatment processes using Joule heat for metals have attracted considerable attention due to their significantly higher heating rates compared to conventional methods and the improvement of energy efficiency. Furthermore, when the electric current used for Joule heating is generated from renewable energy sources, the process can suppress emissions of greenhouse gases such as CO_2, making it an environmentally favorable approach from the perspective of mitigating global warming. It is known that, during such thermal treatment processes, a carbon transport phenomenon specific to electric fields, referred to as electromigration, occurs in steels (Fe–C alloys). Since the microstructure of steels is strongly influenced by the distribution of carbon, understanding carbon electromigration is of great importance. In this study, electromigration was investigated using both simulation and experimental approaches. Specifically, through simulation techniques and modeling, new insights into the electromigration behavior of carbon atoms under high electric fields were obtained. In addition, an experimental approach was employed to examine the influence of initial grain boundaries on carbon electromigration and the resulting microstructural evolution of steels.

2. Details of program implement

●Simulation approach

The drift velocity of carbon atoms in steels due to electromigration was investigated using molecular dynamics simulations. Both ferrite and austenite structures were considered for the iron crystal. Carbon atoms were placed at octahedral interstitial sites in the iron lattice. Since the carbon atoms induce a local strain field in the lattice, the simulation system was constructed to account for this effect. The drift velocity of carbon atoms was evaluated under various temperatures and electric field strengths, and a modeling approach was employed to interpret the observed behavior.

●Experimental approach

The influence of initial grain boundaries in iron prior to heat treatment on carbon electromigration during Joule heating and the resulting microstructural evolution of steels was examined. This experiment was carried out using a heating furnace (Figure 1) developed at the Matériaux Ingénierie et Science (MATEIS) laboratory of Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon).

3. Achievements

Through the simulation and modeling approaches described above, new insights into the electromigration behavior of carbon atoms in Fe–C alloys, particularly under high

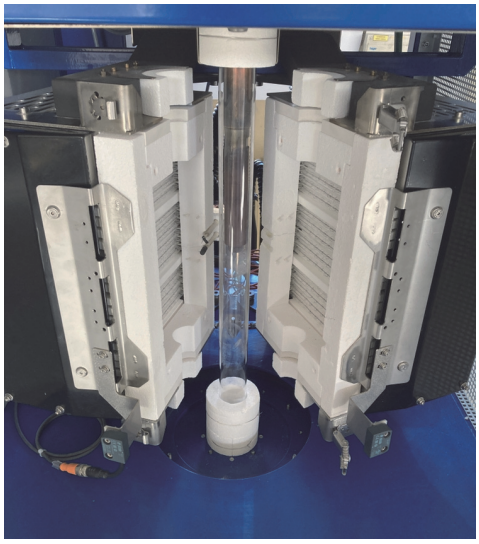


Figure 1. Experimental equipment

electric fields, were obtained. Through the experimental approach, it was suggested that the initial grain boundaries in iron may influence carbon electromigration during Joule heating as well as the microstructural evolution of steels.

4. Summaries and future plans

Using molecular dynamics simulations and a modeling approach, new insights into the electromigration behavior of carbon atoms in Fe–C alloys were obtained. In future work, the obtained results will be organized and prepared for publication in a scientific journal. In addition, through an experimental approach, the relation between initial grain boundaries prior to heat treatment and the microstructural evolution of steels after Joule heating was examined. To improve the reliability of the experimental results, similar experiments will be conducted multiple times in future work.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] R. Onozuka, P. Chantrenne, T Tokumasu: Analysis of the Drift Velocity of Carbon in Iron Crystal under High Electric Fields, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics (ICFD)*, Sendai, (2025), pp. 1759-1761.

[2] R. Onozuka, C. Adessi, J. Kioseoglou, P. Chantrenne, T. Tokumasu: Effect of non-equilibrium state on the C drift velocity in iron with electric field, *Abstract Book ELyT workshop 2026*, Sendai, (2025).

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

Project code	J25Ly06
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject Area	Health, Welfare and Medical Care
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Monitoring Eukaryotic Cell Functions under Various Hypoxic Conditions with Microfluidic Differential Oxygenators

Jean-Paul Rieu*†, Christophe Anjard*, Nasser Ghazi*
Satomi Hirose**, Naoto Kawahara***, Shohei Yanagita***, Kenichi Funamoto***††
*Institute of Light and Matter, Claude Bernard University Lyon 1
**ThinkCyte
***Institute of Fluid Science, Tohoku University
† Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The general purpose of this project is to develop new polydimethylsiloxane (PDMS)-based oxygenator devices for cell culture with controlled oxygen (O_2) permeation through PDMS. It is well known that cells sense O_2 tension and change their behavior. Two quick, almost instantaneous responses are aerotaxis and aerokinesis: cells can move along O_2 gradients (aerotaxis), or, even in the absence of any gradient, simply be stimulated (or inhibited) by changes in the overall O_2 level (aerokinesis). In contrast, a prolonged stay at low O_2 (hypoxia) triggers genetic responses and changes in metabolic activity, proliferation or even differentiation.

Our first LyC project 2019-2022 ("Microfluidic Tools to Study Aerotaxis in Eukaryotic Cells") investigated the aerotaxis and aerokinesis of the social amoeba *Dictyostelium discoideum* (*Dd*). In particular, we developed a double-layer microfluidic device with gas channels and media channels to generate O_2 gradients during cell culture. We showed that *Dd* amoebae respond to O_2 gradients in the 0-1.5% O_2 range (Cochet-Escartin, Funamoto, Rieu et al. eLife 2021).

We are now interested in developing various types of microfluidic devices compatible with long-term in-situ culture of cancer cells or amoebae and capable of O_2 level control (homogeneous levels or gradients) to test the adaptation of cells to hypoxia. We have been comparing two types of amoebae (the social amoeba *Dd* and the solitary amoeba *Acanthamoeba castellanii* (*Ac*)), as well as a human breast cancer cell line (MDA-MB-231 cells). We plan to test immune cell lines (HL-60 cells or dendritic cells) in the forthcoming years.

2. Details of program implement

In the year 2022 and early 2023, we performed experiments with various *Dd* mutants and pharmacological substances affecting cell metabolism and the O_2-sensing abilities of cells, separately in Sendai and Lyon. In Sendai, S. Hirose (PhD student of K. Funamoto) performed aerotaxis experiments with the devices. Meanwhile, in Lyon, J. Hesnard (PhD student of C. Anjard) performed cellular O_2 consumption and cell proliferation experiments. N. Ghazi (PhD student of J.-P. Rieu) performed numerical simulations of the aerotactic behavior. An article on the role of oxidative stress and certain metabolic functions in the aerotaxis of *Dd* was submitted to *Frontiers in Cell and Developmental Biology* in December 2022 and accepted in March 2023. N. Ghazi performed preliminary aerotaxis experiments with *Ac* cells in Lyon using the two-layer device developed by S. Hirose. Preliminary

results were presented by N. Ghazi at ICFD 2023.

During the year 2024, N. Ghazi finished these experiments as well as their numerical modeling. He clarified the role of cell density in *Ac* aerotaxis. He defended his PhD on Dec. 19th, 2024, in Lyon. We are now preparing a comprehensive scientific review article on *Ac*'s main results for a broad-audience journal.

In the meantime, N. Kawahara continued at the IFS the development of new PDMS-based oxygenator devices for cell culture. The device was initially tested previously in Lyon during short stays (S. Hirose in 2022, S. Yanagita in 2024, K. Funamoto at various occasions). In the so-called "four-chamber device" (Figure C) the O_2 concentration solubilized in the culture medium is controlled by gas permeation through the PDMS and the external gas atmosphere, which is carefully controlled using stage-top incubators and gas blenders. To validate the O_2 level calibration, J.-P. Rieu visited Japan twice in 2024 (during the summer and at ICFD 2024) to bring O_2 sensing films prepared in Lyon, and once in summer 2025 to complete the experimental and numerical (COMSOL) calibration of the O_2 levels in the four-chamber devuce. M. Roinard (Lyon) visited Sendai for ICFD2025, delivered a talk on a related side project, and discussed possible improvements to the devices for cancer research.

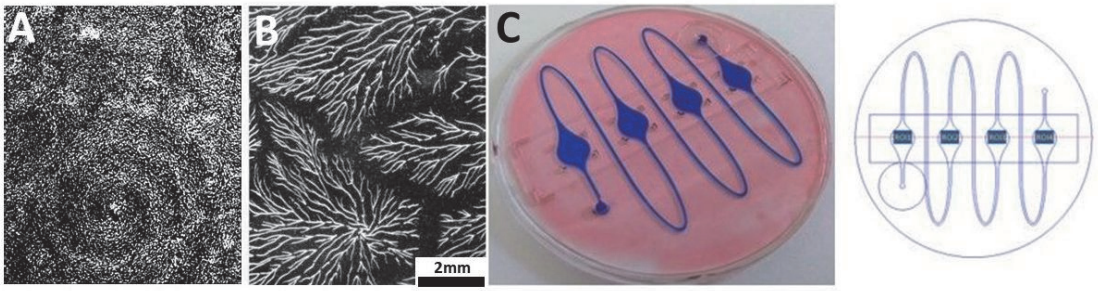


Figure 1: (A) Contrast image showing *Dd* cell activity due to propagating spiral waves of cAMP at 9 h after starvation, and (B) the resulting cell streams approximately 2 h later toward aggregation centers (Hirose *et al. BMC Mol. Cell Bio.*, 2025). (C) Microfluidic four-chamber device with an exponentially decreasing O_2 gradient inside each chamber.

3. Achievements

The achievements of our collaborative research are summarized as follows.

- We developed new PDMS-based four-chamber devices exploiting O_2 permeation through a PDMS layer toward the controlled external gas atmosphere (Fig. C). The O_2 concentration inside each chamber was predicted by a simple analytical model, validated by COMSOL simulations, and experimentally verified using phosphorescent O_2-sensing films in 2025. So far, two cellular studies have been conducted with this device. The motility of cancer cells was investigated in Sendai in 2025. The motility and proliferation of Dicty cells were investigated in Lyon in 2025. A scientific article is in preparation.

- In a starvation buffer (SB), *Dd* cells start to secrete small signaling molecules, self-organizing into spiral waves (Fig. A). The centers of the spirals become the centers of future aggregation centers, toward which cells stream (Fig B). During the last year, we verified that aerotaxis occurs in SB and investigated how low O_2 conditions (hypoxia) modify the developmental cycle of Dicty. Preliminary results

using the DL device indicated that aggregation centers formed at O_2 levels above 10% O_2. However, under usual laboratory conditions, the distance between aggregation centers is usually several mm (Fig. B); hence, the current cell channel width (2 mm) of the DL device is probably not large enough to determine a precise value for that oxygen threshold. It is particularly interesting to study how aggregation occurs under various simultaneous hypoxic conditions. Another PDMS-based oxygenator device, the 4-chamber device (4C device), based on controlling O_2 permeation through PDMS and consisting of four successive chambers, will be useful for that purpose (Fig. C).

4. Summaries and future plans

We plan to continue the development of the four-chamber device with controlled O_2 levels in each chamber. We will repeat the motility and proliferation experiments in the four chambers with *Dd* and cancer cells. For cancer cells, we plan to quantify vinculin expression and localization to analyze O_2 concentration-dependent dynamic changes in protein expression. A significant amount of time will be devoted to completing the publication of the aerotactic study with *Ac* cells.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] S. Hirose, J. Hesnard, K. Funamoto, J.-P. Rieu, and C. Anjard. "Dictyostelium discoideum chemotaxis is altered by hypoxia to orient streaming toward higher oxygen levels". *BMC Mol Cell Biol* 2025 Nov 3;26(1):34. doi: 10.1186/s12860-025-00557-

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[2] N. Ghazi, N. Kawahara, S. Hirose, S. Yanagita, K. Funamoto, C. Anjard, J.-P. Rieu, Monitoring Eukaryotic Cell Functions under Various Hypoxic Conditions with Microfluidic Based Oxygenators. *International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, (2025).

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

Project Code	J25Ly07
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject Area	Environment and Energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Experimental Study of New Model Electroactive Materials (TEmPuRA)

G. Coativy[1]†, MF. Rivera Cabrera[1,2,3,4], V. Perrin[1], L. Seveyrat[1], F. Dalmas[5], S. Livi[6]
H. Takana[2,3,4]††, JY Cavaillé[3,4]
[1]LGEF, INSA Lyon, [2]Lyon Center Lyon, [3]Institute of Fluid Science, Tohoku University
[4]ELyTMaX IRL, [5]MATEIS, INSA Lyon, [6]IMP, INSA
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In this project, we are studying the electroactuation of dielectric elastomers doped with ionic liquids. These materials can bend under the application of an electric field and maintain their deformation when the electric field is removed. The remanent deformation observed after turning off the electric field was unexpected; therefore, the objective of our project is to understand its origin.

2. Details of program implement

We have synthesized and characterized model epoxy-amine networks doped with 5%wt of ionic liquids (BMIM-TFSI). Then the samples have been studied electro-mechanically under the application of an electric field of 0.1 MV/m for 4 hours. After this electric treatment, the samples have been characterized electrically (dielectric spectroscopy electric field), mechanically (mechanical spectroscopy), chemically (FTIR, Raman microscopy) and structurally (EDX, WAXS, AFM, GiSAXS). The data have been compared with those obtained on the samples which were not treated with the electric field.

3. Achievements

In this work, we showed that epoxy-amine doped with 5%wt of BMIM-TFSI bends under the application of an electric field and that after removing the electric field, a remanent deformation is observed. A structural investigation (by Energy Dispersive Xray analysis) evidenced that after removing the electric field, a rich anionic layer persists close to the positive electrode. This anionic rich layer has a reinforcing effect as showed by Atomic Force Microscopy. Besides, macroscopically, it leads to an asymmetric bending under the effect of gravity. When the sample is held horizontally, it bends less when the anion-rich layer is on the bottom and more when it is on top, compared to a sample that has not undergone electrical treatment. Based on a COMSOL Multiphysics numeric simulation, we interpret it as the presence of an internal expansive stress close to the positive electrode. These results have been published in the journal “Polymer”.

Besides, in this study, the role of cations was not clear. Indeed, due to a lack of chemical contrast between the matrix and the cations, the mapping of the cations was not possible by EDX. Therefore, we study systems having the same type of anions and in which the cations are attached to the polymer backbone. In this case, the bending occurs and the remanent displacement is observed, suggesting that the cations do not play an

important role in the stabilization of the anionic rich layer.

In parallel with this primarily experimental work, we have continued to develop a theoretical model capable of predicting both the current density and the deformation of similar samples; a paper is ready for submission.

4. Summaries and future plans

To sum up, the following results were obtained:

- We evidenced a remanent deformation after removing the electric field
- An anionic rich layer was detected close to the positive electrode
- The anionic rich layer has a stiffening effect
- The cations do not play an important role in stabilizing the anionic rich layer.

Regarding the perspectives, we aim to write an article on the comparison between systems in which the cations and anions are mobile with systems in which the cations are attached to the polymer backbone. We would like to further study the mechanical reinforcement and improve our modeling and simulation of the electro-mechanical behavior. Finally, we started to study the reverse effect (mechanical to electrical energy conversion) with Mr.Manuel Felipe Rivera Cabrera, PhD student co supervised in the frame of a dual-degree doctoral program between Tohoku University and INSA Lyon.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

[1] G. Coativy, L. Seveyrat, V. Perrin, D. Djoumoi, D. Albertini, J. Courbon, H. Takana, J.-Y. Cavaillé, K. Ryskulova, S. Livi, F. Dalmas, Remanent deformation and local stiffening induced by electric field in low glass transition epoxy-amine polymer network doped with ionic liquid, *Polymer (Guildf)*. 339 (2025) 129169. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.129169.

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[2] Gildas Coativy, Laurence Seveyrat, Véronique Perrin, Djasma Djoumoi, David Albertini, Joël Courbon, Hidemasa Takana, Jean-Yves Cavaillé, Gaël Sebald, Kanykei Ryskulova, Florent Dalmas, Sébastien Livi, The Role of Cation on the Bending of Ionic Liquid Doped Elastomer Under Constant Electric Field, *Twenty-second International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, Sendai, 2025.

[3] Manuel Rivera, Gildas Coativy, Véronique Perrin, Laurence Seveyrat, Yuanyuan Guo, David Albertini, Joël Courbon, Gaël Sebald, Yutaka Kaneko, Florent Dalmas, Sébastien Livi, Jean-Yves Cavaillé, Hidemasa Takana, Role of ions in time evolution of bending of electro-responsive polymers, *ElyT Worshop*, Sendai, 2026.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J25Ly08
区分	リヨンセンター公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	１年目（発展）

回転二重円筒／円すい間に発生する非線形流れ挙動の動的モード分解と安定性解析のクロスオーバー

Crossover Study between Dynamic Mode Decomposition and Stability Analysis of Nonlinear Flow Behavior Occurring between a Rotating Double Cylinder / Circular Cone

足立 高弘*†，谷田　開*，秋永 加奈*，小宮 敦樹**††，Valery Botton***
*秋田大学理工学部/理工学研究科，**東北大学流体科学研究所，***Lyon INSA
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

流体に回転運動を与えたときの不安定現象についての研究は，混合を考慮するような多くの産業用途にとって重要である．例えば，回転システムの研究はあらゆる同心駆動装置やタービンロータなどの回転機械設計に役立つだけでなく，小型の回転熱交換器やミキサーなど化学装置の最適化にも役立つ．これらの流れをより良く制御するためには，流れの不安定性が発生する臨界パラメータや，不安定性による流れのパターンの遷移メカニズムを解明する必要がある．本研究では，ミキサー等のモデルとして，同心同軸で回転する二重円すい間の流れを取り扱う．

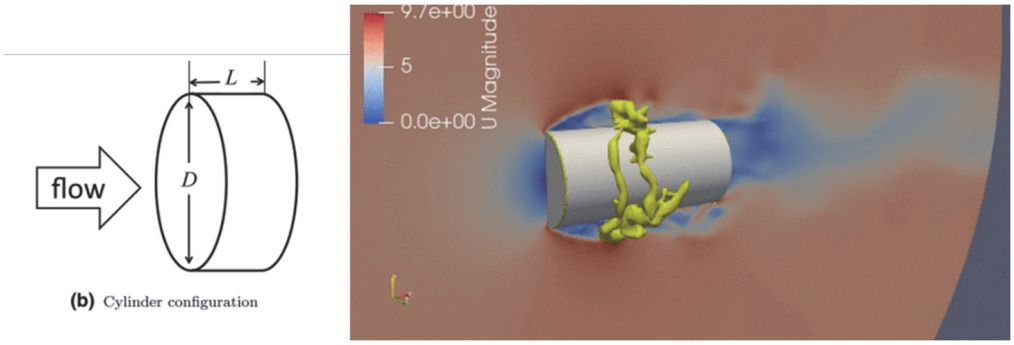
先行研究として，二重円筒間のテイラー・クエット流に関する研究は数多くなされている．その中でも，内側の円筒のみを軸中心に回転させて円筒間の流れ挙動を調べた研究では，内円筒の回転速度に応じたある臨界点で周方向の回転流が不安定となり円筒間にはテイラー渦が発生する．この遷移の形態は，円筒長さと円筒の幅の比で表されるアスペクトを無限大(円筒が無限長)としたときに， 完全なピッチ・フォーク分岐となることがわかっている．しかし，アスペクト比が有限の大きさ(上下に蓋のある系)の場合には，渦の発生形態は不完全分岐となり，さらに回転数を大きくすることで複雑な分岐現象を示す．アスペクト比の変化に対して，豊富な遷移現象が現われるため分岐理論を用いた観点から多くの研究が行われている． 一方で，本研究ではアスペクト比が有限で容器の上下に蓋のある系において，円筒の側壁が傾斜した同心二重円すいの場合を取り扱う．上述のように分岐の様相は不完全分岐となり複雑となることが予想される．また，回転による遠心力の斜面成分により，このシステムでは回転と同時にテイラー・クエット流と似た渦が生じることが先行研究より分かっているが，それらの渦の遷移条件等については不明な点が多い．

本研究では同心二重円筒/円すい間内の渦形態が遷移する条件を解明するために，線形安定性および非線形分岐理論を用いた安定解析を行う．さらに，分岐が生じた後の流れを実験および基礎方程式の時間発展をシミュレーションすることで明らかにする．得られた実験結果および数値シミュレーションの結果を用いて動的モード解析を行う．動的モード解析では，多数のモードが出力され，対象とする現象を説明する支配的なモードがどのモードであるかを動的モード解析の結果のみから特定することは一般に難しい．そこで，線形安定解析から得られた不安定モードと動的不安定解析で得られたモードの比較を行い，現象を支配するモードを抽出する方法の確立を目指す．

2. 研究成果の内容

25 年度の研究テーマは，これまでの研究の発展系となっており，これまでに蓄積してきた DMD 解析手法を二重円筒以外の物理モデルに適用し，手法の有効性を確認した．今回取り扱ったモデルは，図 1(a)に示すように円柱の中心軸を流れに平行に設置したモデルである．レイノルズ数を円柱の直径と流入速度，および流体の動粘度(空気)で定義した．本研究におけるレイノルズ数は，およそ 45000 である．数値計算においては，WALE モデルに基づく LES 計算を OpenFOAM を用いて実施した．図 1(b) は円柱の縦横比 L/D=2 の場合についての OpenFOAM による計算結果であり，速度場の大きさ(背景)と圧力場(黄色)を示している．圧力場については，低圧力分布を可視化しており，円柱先端の淀み域から剥離した渦の渦中心に相当する位置に分布している．

図 2 は，円柱の縦横比 L/D が 1 と 2 の場合の抗力係数 C_D の時間発展を示す．時刻 t=3 で，流れは十分に発達しており，抗力係数の時間発展も十分に発達している．図 3 は，抗力係数の時系列から時間平均を算出し，円柱の縦横比に対して示したものである．他の研究者による既存の研究結果も同時に示しており，値がよく一致していることがわかる．抗力係数の値は，$L/D<1$ と $L/D>1.5$ では傾向が異なるように見える．すなわち，$L/D>1$ では抗力係数はおよそ 1 程度の値を取り，$1<L/D<1.5$ 程度の範囲における遷移区間を過ぎて，$L/D>1.5$ では抗力係数の値はおよそ 0.8 程度の値を取る．この抗力係数の変化が流れに潜在する乱れモードの交代によるものと予測し，DMD によるモード解析を実施することにより現象の理解に取り組んだ．



(a) 物理モデル　　(b) 速度場(背景)と圧力場(黄色)

図 1 物理モデルと OpenFOAM による計算結果の一例

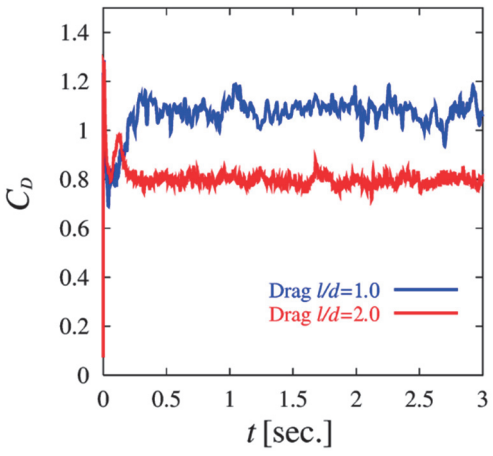


図 2 抗力係数の時間発展

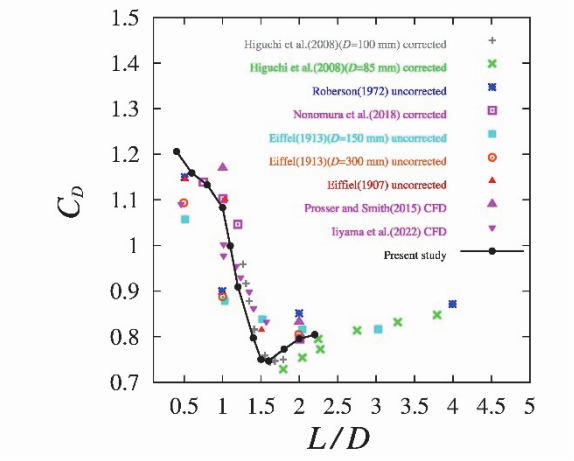
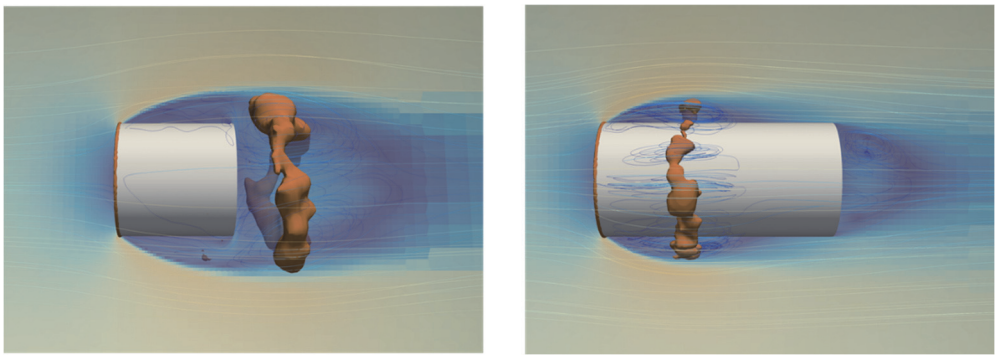


図 3 抗力係数の時間平均と円柱の縦横



(a) $L/D = 1$　　(b) $L/D = 2$

図 4 DMD 解析のおける第 1 モードの速度および圧力分布

DMD 解析による結果を図 4 に示す．図 4 は，DMD 解析の結果得られる各モードの振幅が一番大きな第 1 モードの可視化画像である．第 1 モードは，貪欲法において DMD の系を構成する L2 ノルムを最小化する際に最も寄与の大きなモードとなっている．円柱前縁からの剥離の渦中心に低圧力領域が分布している．この低圧力領域は，L/D が 1 から 2 へと変化してもほぼ動かないことが図 4 より明らかとなった．このことは，L/D の変化にかかわらず，流れを支配する主要なモードが同一であることを示しており，当初のモード交代により抗力係数の変化がもたらされるという描像とは異なる．抗力係数の変化を DMD 解析より得られた本第 1 モードを用いて説明すると，円柱の全長 L の増加に対して主要なモードは交代せず，渦中心(低圧域)の位置は変化しない．一方で，全長の増加により剥離渦の再付着が発生し，$L/D = 2$ の場合には円柱表面に境界層領域が形成される．抗力係数は，低圧域が円柱後流に位置する L/D=1 の場合には，剥離剪断層が円柱後流にまで達し，円柱後流が低圧になることで圧力抗力が増大することで大きくなる．一方，L/D=2 の場合には，低圧域が円柱側面途中に位置し，剥離剪断領域が壁面途中で再付着することで円柱後流の圧力が回復し，圧力抗力の増大が抑制される．さらに，詳細は省くが円柱側面に形成される境界層において，逆圧力勾配が発生している領域が存在し，そこでは粘性抵抗が抗力を打ち消す向きに作用する．これらの効果により，円柱の縦横比の変化により抗力係数の値が増減することが明らかとなった．

3. 研究目標の達成状況

本研究では，線形安定性　および非線形分岐理論を用いた安定解析と動的モード分解解析との比較を行い，動的モード解析から得られる多数のモードから対象とする現象を説明する支配的なモードを特定することが目的である．今回の発展的な問題として取り扱った数値シミュレーションの結果では，DMD を用いてうまく現象説明ができたと考えられる．ただし，現象を支配するモードを抽出する一般的な方法の確立には至っていない．

4. まとめと今後の課題

OPENFOAM を用いた数値シミュレーションにより，円柱を通過する流れの時空間データを取得した．このデータを用いることで，これまでに蓄積した DMD 解析手法の妥当性と発展的な応用力を確認した．今後は，線形安定性解析など既存の理論解析とのクロスオーバーを検討し，現象を支配するモードを抽出する一般的な方法を確立する必要がある．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] H. Yata, K. Akinaga, A. Komiya, T. Adachi: Identification of Transient Aspect in Taylor Vortex Structures between Double Cylinders using DMD, *Proceedings of the Twenty-second International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025).

[2] H. Yata and T. Adachi, A. Komiya, V. Botton: DMD analysis of the length-to-diameter ratios for flow passing through a cylinder with its axis parallel to the flow direction, *ElyT workshop*, Sendai, (2026).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project Code	J25Ly09
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject Area	Nano-micro
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Mass Transfer Enhancement and Control by using Ultrasound Induced Flow

Atsuki Komiya*†, Valéry Botton**††
Sophie Miralles**, Ruiyao Zhu*, ***
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**LMFA, INSA Lyon, Université de Lyon
***Department of Mechanical Engineering, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

This study focuses on the active control of protein mass diffusion by using membranes and localized flow induced by ultrasound. We experimentally and numerically evaluate how ultrasound-induced flow in the liquid phase affects the protein mass transport. The ability of ultrasound-induced flow to control temporally constant mass flux conditions is evaluated by transient concentration field in the vicinity of the macro-pore membrane. A series of visualization experiments of hindered diffusion concentration field is performed, and the effect of localized flow is discussed. Since this is the first year of the study, experimental conditions were examined with the aid of numerical simulations.

2. Details of program implement

In this international collaboration research, we have been developing experimental equipment for generating local and weak flow around a membrane. To achieve this point, the SAW device was positioned at the liquid surface on a piezoelectric substrate. Upon excitation, acoustic energy was transferred from the substrate into the fluid, where it generated acoustic streaming at the water–solid interface. This flow field propagated downward and eventually reached the membrane positioned at the bottom of the liquid domain. The resulting flow was weak but spatially localized and confined up the membrane interface. As shown in Fig. 1, the velocity is highest near the water surface, where the acoustic energy is introduced. With increasing depth, the flow gradually diminishes due to viscous attenuation and geometric spreading. In the lower region of the area, only weak residual flow remains. The velocity distribution was measured using particle image velocimetry (PIV). From the PIV image, the velocity along the vertical centerline was extracted, showing a peak of approximately 200 μm/s near the membrane position.

To visualize the solute concentration field near the membrane, the Mach–Zehnder interferometer with phase-shifting capability was employed. Upon SAW excitation, we observed fringe compression and local deformation in the region above the membrane, suggesting a steepened concentration gradient and modified mass transport behavior. Experimental interferometric imaging, as Fig. 2 shown, clearly revealed fringe compression and localized bending near the membrane surface when SAW excitation was applied. Although the SAW device was located far from the membrane, the flow generated at the water surface propagated through the fluid and significantly altered the concentration field in the vicinity of the membrane.

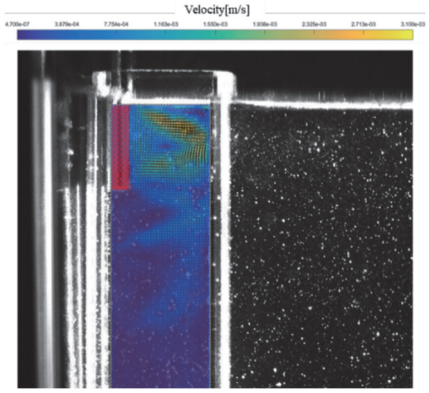


Figure 1: Velocity distribution and flow field obtained by PIV under SAW excitation.

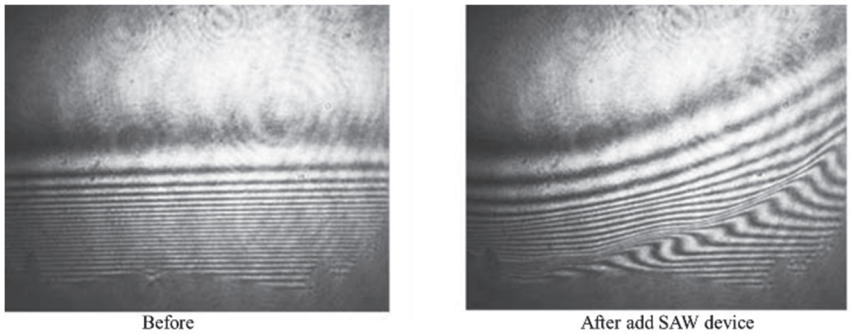


Figure 2: Experimental fringe images without (left) and with (right) SAW excitation.

3. Achievements

We successfully performed the measurement of local flow induced concentration field. The achievement level of this year could be evaluated at 80%. We have two presentations at international conference/workshop. Through this collaborative research achevements, we're preparing for the publishment of our findings.

4. Summaries and future plans

This study demonstrates that mass transfer across porous membranes can be actively enhanced and regulated by ultrasound-induced flow generated by a SAW device located at the water surface. The acoustic streaming, initially generated at the solid–liquid interface, propagates through the fluid domain and reaches the membrane.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] R. Zhu, V. Botton, S. Miralles, A. Komiya: Mass Transfer Enhancement and Control by using Ultrasound Induced Flow, *Proceedings of the 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, Sendai, (2025),

[2] R. Zhu, S. Miralles, S. Margueron, V. Botton, A. Komiya, Towards the Control of Protein Mass Transfer via Ultrasound and Macro-porous Membranes, *Abstract book of ELyT Workshop 2025*, Lyon and Annecy, (2025), pp.40-41.

3) Patent, award, press release etc.
(Patent) (Award) (Press release) Not applicable

Project Code	J25Ly10
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject Area	Environment and energy
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	1st year

Evaluation of VIP Performance and Investigation of Degradation Mechanism by Aging Effect

Atsuki Komiya*†, Genevieve Foray**††
Matéo Groux**
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**MATEIS, INSA Lyon
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

This study focuses on elucidating the heat transfer mechanisms in thermal insulation materials. Many thermal insulation materials contain a gaseous phase, and their heat transfer behavior is complex. Among these heat transfer mechanisms, convective heat transfer due to natural convection within the gaseous phase generally does not satisfy the conditions for convection to occur because the characteristic length of the gaseous phase is small. Therefore, the three mechanisms that must be considered are conductive heat transfer by solid, by gas, and radiative heat transfer. Among these heat transfer mechanisms, vacuum insulation panels (VIPs)- which eliminate heat conduction by gas - are widely used in many products due to their high thermal insulation performance. However, performance degradation caused by gas ingress over time has become a significant issue.

In this study, we measure the effective thermal conductivity of vacuum insulation panels using a steady-state method, namely Guarded Hot Plate (GHP) method , and evaluate how the structural characteristics of VIPs affect this conductivity. We also evaluate, both experimentally and analytically, the effects of the presence or absence of getters and the influx of gas over time.

2. Details of program implement

In this study, we have established a collaborative framework in which the French team will fabricate multiple types of VIPs, while the Japanese team will conduct precise measurements of their effective thermal conductivity. In this research, we will integrate these two approaches to clarify how the performance of VIPs changes over time (i.e. aging effect). We will also incorporate numerical simulations to elucidate the effects of radiative heat transfer. A doctoral student who is already considering a double degree program is on the French side, and we plan to proceed with the project in collaboration with this graduate student.

Figure 1 shows a schematic diagram of the GHP apparatus used in this study. The apparatus consists mainly of the main plate, sample, guard plate and the cold plate.

The measurement of effective

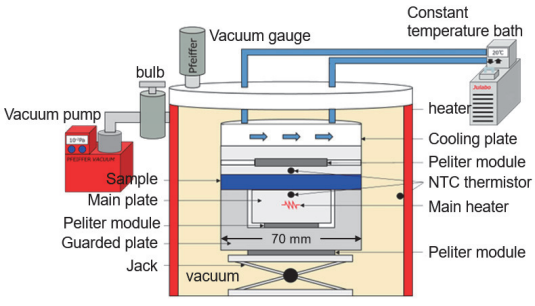


Figure 1: Schematic of GHP apparatus.

thermal conductivity was terminated when the temperature difference between the main and protective plates approached zero, and the applied voltages of the main heater, the high temperature surface temperature, and the low temperature surface temperature of the specimen reached steady state. Based on Fourier's law, the total thermal resistance and effective thermal conductivity of the samples were obtained from the experimental data.

In this year, we have completed the 1st trial of precise measurement of effective thermal conductivity of several VIPs. By changing the inner pressure of VIPs, the contribution of conductive heat transfer by gas phase was discussed. As shown in Fig.2, each sample has unique characteristics of heat conduction variety by pressure change.

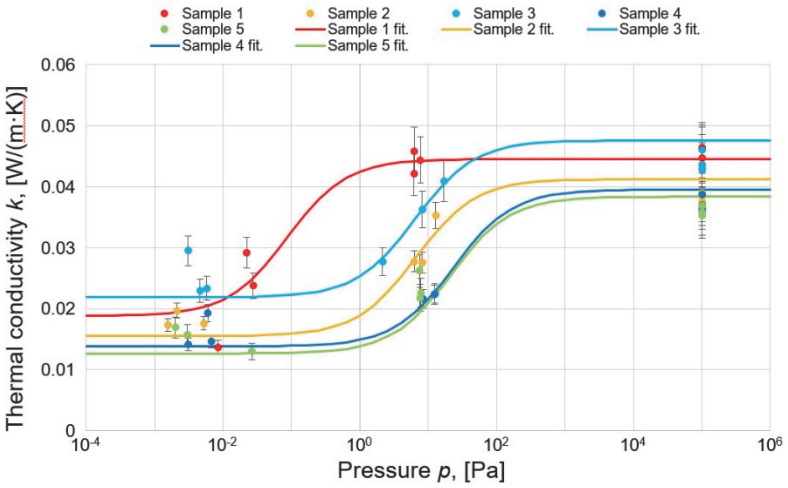


Figure 2: Variation of thermal conductivities, which are a function of pressure.

3. Achievements

We successfully performed the measurement experiment. The achievement level of this year could be evaluated at 90%. We have two presentations at international conference/workshop. Through this collaborative research, Now we're preparing for the publishment of our findings.

4. Summaries and future plans

We have initiated a new international collaborative research project on VIPs. Through two experimental aspects, we will evaluate the aging degradation of VIPs. This knowledge will contribute to the development of novel VIPs that maintain longer lifespans and higher performance.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.

[1] A. Komiya, M. Groux, G. Foray: Elucidation of Degradation Mechanism of VIP Performance by Aging Effect, *Twenty-second International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, Sendai, (2025), OS29.

[2] G. Foray, M. Groux, J. Adrien, F. Martoia, P. Dumont, A. Komiya: Towards greener Vacuum Insulation Panel, X-ray tomography measurements to understand fiber network as pressure decrease, *Abstract Book of ELyT Workshop 2026*, Sendai, (2026), pp. 56-57.

3) Patent, award, press release etc.
(Patent), (Award), (Press release) Not applicable

２．研究成果報告書
＜統合流動科学国際研究教育センター
戦略的共同研究プログラム＞

区分	統合流動科学国際研究教育センター 戦略的共同研究プログラム
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	2 年目

実験・理論統合解析による毛細管流マイクロ発電機構の解明

Experiment/Simulation Integrated Analysis toward Understanding Mechanism of Micro Power Generation by Capillary flow

高奈 秀匡*†，Anthony Dichiara**††
Renata Bura**，Igor Novosselov**, Dylan Edmundson**
金子　泰*，猪狩　涼*
*東北大学流体科学研究所，**University of Washington
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

カーボンブラック（CB）を含侵させた綿布に 0.25 mL 程度の微量の水やプロトン性極性溶媒を滴下するだけで，布の両端に電位差が生じ，発電する現象が 2019 年に初めて報告され，毛細管流マイクロ発電（TEPG）として大きな注目を集めている．簡単な構造でありながら，数 100 mV 程度の端子間電圧が生じ，一時間以上持続して発電することから，本技術のエネルギーハーベストへの応用が期待されている．米国ワシントン大の Dichiara らは，カーボンナノチューブ（CNT） をパルプに混合した CNT 複合紙を独自に開発し，従来技術を上回る高出力化を実証した．これまで，本マイクロ発電に関する研究は実験的な研究が主であり，電極材料の組み合わせや電極構造，CNT 含有率などの最適化による高性能化が図られてきた．しかしながら，その詳細な発電メカニズムについては未だ十分に解明されておらず，更なる高性能化・実用化の上でのボトルネックとなっている．

本研究では，当該分野において世界をリードするワシントン大学との共同研究を推進し，本物理現象を実験とシミュレーションの両面から統合的に解析することで，毛細管流マイクロ発電機構を世界に先駆けて解明することを目的とする．

2. 研究成果の内容

昨年度に構築した TEPG に対する物理モデルの妥当性を評価するため，カーボンナノチューブ含有紙を用いた発電実験をワシントン大学にて行った．図 1 はカーボンナノチューブ含有率が 2.9 w%の導電紙に対して純水もしくは濃度 1M の塩酸溶液を滴下した際の開放電圧および短絡電流をシミュレーション結果と比較して示したものである．図より，純水に対しては，シミュレーションでの開放電圧，短絡電流はともに過小評価しているものの，塩酸溶液に対しては概ね良い一致が見られる．また，塩酸溶液の方が高い電圧・電流が得られるという点においては定性的に一致している．この結果より，本物理モデルは現象理解および性能予測の上では妥当であると判断される．なお，純水の場合においてシミュレーション結果が低い値を示すのは，本モデルにおいてパルプと溶液中へのプロトン抽出反応を考慮しておらず，実効的なイオン導電率を過小評価しているためである．

図 2 に導電紙中のカーボンナノチューブ含有率が開放電圧に与える影響を示す．純水および塩酸溶液の場合ともカーボンナノチューブ含有率の増加とともに開放電圧が減少し，その減少率は塩酸の場合の方が大きい．これは，カーボンナノチューブ含有量の増加に伴い，湿

潤状態での導電紙の内部抵抗が減少し，湿潤領域内で内部短絡が生じるためである．なお，塩酸溶液におけるカーボンチューブ含有量に対する開放電圧の減少は，実験値と同様の傾向を示す．

図 3 に乾燥・湿潤状態での導電紙の内部抵抗に対する発電出力の関係を示す．昨年度に構築した TEPG の等価回路モデルから TEPG 発電出力の理論式を導き，発電出力に対する最適条件を示すことに成功した．本理論式から，乾燥状態での抵抗値が低く，湿潤時での抵抗が高いほど高出力化することが明らかになった．また，カーボンナノチューブ含有量の増加に伴い，乾燥時での抵抗値が低くなる一方で湿潤時での抵抗値も低くなるために，発電出力が低下することが明らかとなり，最適なカーボンナノチューブ含有率が存在することが示された．

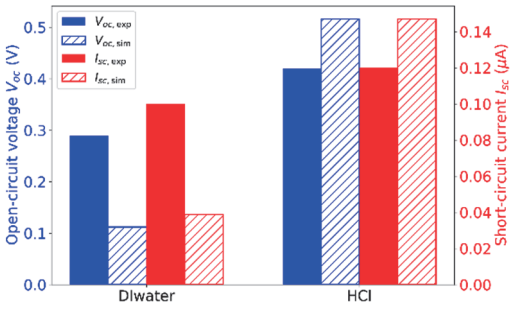


図 1：開放電圧および短絡電流の実験値との比較

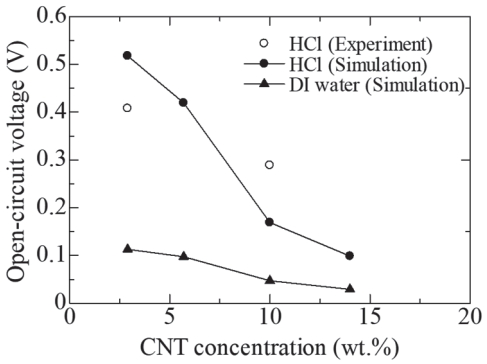


図 2 導電紙中のカーボンナノチューブ含有率に対する開放電圧

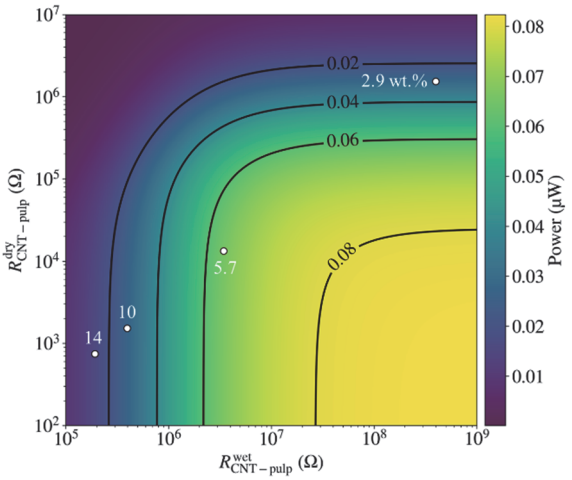


図 3：乾燥・湿潤状態での導電紙内部抵抗と発電出力の関係

3. 研究目標の達成状況

ワシントン大学で行われた実験値との比較により，昨年度に構築したカーボンナノチューブ複合紙を用いた毛細管流マイクロ発電（TEPG）に対する物理モデルの妥当性が示され，カーボンナノチューブ含有率に対する発電特性が明らかとなった．さらに，発電出力に対する理論式を導出することで，発電出力の最適条件およびカーボンナノチューブの最適含有量を解明することに成功した．本共同研究によって得られた成果は，当該分野におけるトップジャーナルである *Energy Conversion and Management: X* に掲載された．以上の成果より，本

研究目標は概ね達成されたと考えられる．

4. まとめと今後の課題

本共同研究プログラムで得られた成果は，国際共著論文として論文誌に掲載された．これにより，ワシントン大学との協力体制を強固なものとした．また，本研究テーマの他にも同大学において新たな共同研究先を開拓することができ，ワシントン大学との研究ネットワークのさらなる拡大に繋がった．今後は，本共同研究により得られた知見を基に，導電性セルロース繊維による微小水分検出センサーへの応用を切り拓く方針である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] R. Igari, D. Edmundson, A. Dichiara, H. Takana: Power generation mechanism by ion transport in electrically conductive papers, *Energy Conversion and Management: X*, 30 (2026), 101739 (12 pages), doi: 10.1016/j.ecmx.2026.101739.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 猪狩　涼，高奈秀匡: 導電紙内のイオン輸送による発電現象解明と基礎特性解析，2025 年度電気学会新エネルギー・環境研究会，(2025)，pp. 1-5.

[3] Ryo Igari, Hidemasa Takana: Numerical Simulation on Ion Transport in Carbon Nanotube Composite Paper for Water Energy Harvesting, *Extended Abstract of the 11th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, Okinawa, (2025), JK-TFEC11-1226, pp.530-535.

[4] Ryo Igari, Hidemasa Takana: Numerical Simulation on Power Generation by Ion Transport in Carbon Nanotube Composite Paper Considering Electrode Redox Reaction, *Proceedings of 22nd International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS5-2.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（受賞）

[1] Best Presentation Award for Young Researcher，“Numerical Simulation on Power Generation by Ion Transport in Carbon Nanotube Composite Paper Considering Electrode Redox Reaction”，Ryo Igari and Hidemasa Takana，Nov. 13, 2025，The 22nd International Conference on Flow Dynamics.

[2] 令和 7 年度電気学会優秀論文発表賞，「導電紙内のイオン輸送による発電現象解明と基礎特性解析」，猪狩　涼，高奈秀匡，2025 年度 電気学会 新エネルギー・環境研究会，2026 年 3 月 31 日

区分	統合流動科学国際研究教育センター 戦略的共同研究プログラム
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

理論・数値計算・実験によるアンモニア燃焼における着火・火炎特性の調査

Theoretical, Numerical and Experimental Investigations of Ignition and Flame Characteristics in Ammonia Combustion

森井 雄飛*†，Huangwei Zhang**††，Epaminondas Mastorakos***，Deanna Lacoste****
丸田　薫*
*東北大学流体科学研究所，**National University of Singapore，***Cambridge University，
****King Abdullah University of Science and Technology (KAUST)
†申請者，††海外コーディネータ

1. 研究目的

本研究の目的は，従来の燃焼理論では説明が困難なアンモニア燃料の火炎動態を，申請者らが開発した着火と火炎の関係を導く基礎理論に基づいて体系化することである．ルイス数が低い燃料は通常，高い反応性と速い燃焼速度を示すが，アンモニアはルイス数が低いにもかかわらず燃焼速度が遅いという特異な挙動を示す．本研究では，この特異な燃焼特性に着目し，基礎理論を活用してアンモニア燃料の燃焼動態を深く理解することを目指す．さらに，現存燃焼モデルのアンモニアへの適用可能性を詳細に検討し，これに基づく実用化を通じて，アンモニア燃焼の実用化を加速させることを目標とする．加えて，アンモニア燃料の燃焼速度が遅いという問題点を解決するため，申請者らが開発した理論により予測された超音速条件下で着火により高効率に燃焼させる手法を実験で実現することを目的に，低温プラズマの研究も実施する．

2. 研究成果の内容

2025 年度 (2025.4-2026.3) は，本共同研究の継続 2 年目として，申請書に示した研究計画 (1) 理論モデルの構築と検証，(2) 数値シミュレーションとデータ解析および簡易実験，(3) 国際共同研究の活用，(4) 論文執筆と成果発表，の四つのステップに沿って研究を進めた．

(i) 理論モデルの構築と検証: 着火と火炎の連続的遷移を統一的に記述するため，Autoignitive Reaction Wave (ARW) および Explosive Transition of Deflagration (ETD) を含む反応波の一般理論を整備した．本枠組みは，低ルイス数かつ低燃焼速度という組合せを持つアンモニアなど特異燃料への適用可能性を有する．本理論の伸長を含む形での拡張として，火炎伸長が ETD 遷移境界に与える影響を系統的に評価した研究を Physics of Fluids に発表した (角田・森井・丸田, 2025)．また，弱デトネーションの安定存在を超音速 ARW 概念と Rayleigh 流の等価性から示す研究を arXiv preprint として公開した (森井・丸田, 2025)．これらは，申請書で言及した「超音速条件下での高効率燃焼」の理論的基盤となるものである．

(ii) 数値シミュレーションとデータ解析: 詳細化学反応 DNS コードを用い，アンモニア混焼系のような複雑機構への高効率評価の見通しを得た．エンジンにおけるノッキング挙動と基礎燃焼解析を結ぶ研究について，1D DNS と CFR エンジン試験を組み合わせた成果を SAE Technical Paper 2 編に発表した (Moriyama, Morii, Tsunoda, Yasutake, Misono, Suzuki, Naiki, Watanabe, Maruta, 2025; Yasutake, Misono, Suzuki, Naiki, Watanabe, Moriyama, Morii, Tsunoda, Maruta, 2025).

(iii) 国際共同研究の活用: フランス オルレアン大学 Christine Mounaïm-Rousselle 教授グループ (Hurault, Foucher, Brequigny) との共同研究として，アンモニア／水素混焼エンジンにおけるノッキング挙動を 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025, 2025 年 11 月) で口頭発表した．また，2025 年 12 月に National University of Singapore で開催された 1st Annual Combustion Meeting of the Singapore Section of the Combustion Institute (SSCI2025) にて，森井が超音速 ARW 概念と Rayleigh 流の等価性に基づく弱デトネーションの安定存在に関する招待講演を行った．
(iv) 論文執筆と成果発表: 上記活動に基づき，年度内に査読論文複数編を出版し，多数の国際会議・国内会議で成果を発信した (詳細は「5. 研究成果」に記載).

3. 研究目標の達成状況

申請書「予想される成果」に記載した各項目について，達成状況は以下の通りである．
(1) 従来モデルでは説明が困難なアンモニア燃焼の特性に対する新しい視点の提供: ARW/ETD の統一枠組みに基づく解析を進めた．概ね計画通りの進捗である．
(2) 実用計算に資する化学反応要素の抽出: 1D DNS と CFR エンジン実験を組み合わせたノッキング予測手法の検証を進め，SAE Technical Paper に成果を発表した．
(3) 超音速条件下・低温プラズマによる高効率アンモニア燃焼手法の実現: 理論的基盤として，超音速 ARW 概念に基づく弱デトネーションの安定存在の解析を進め， arXiv preprint として発信した．低温プラズマを含む実験的検証は，予備解析の段階にとどまり，本格的な実現は今後の課題として整理した．
(4) アンモニア燃焼の基礎的理解の深化と脱炭素社会への貢献の加速: 上記の理論・数値・国際共同研究の成果を通じ，アンモニア燃焼の理論的基礎の深化と国際的な成果発信を達成した．フランス オルレアン大学との共同 DNS 研究 (アンモニア／水素混焼エンジン) を ICFD2025 で発表し，本研究の実用化に向けた道筋を国際的に示した．

4. まとめと今後の課題

継続 2 年目となる 2025 年度は，申請書に示した 4 ステップの研究計画に沿って，理論モデルの整備・数値シミュレーションと DNS 適用・国際共同研究の推進・論文および国際会議発表を並行して進め，年度内に査読論文複数編の出版および国際会議・国内会議での多数の成果発信を達成した．次年度以降は，(a) アンモニア混焼系の DNS，(b) 低温プラズマを含む超音速条件下での高効率アンモニア燃焼手法の検証，(c)シンガポール・フランス オルレアン大学との共同 DNS 研究を継続し，脱炭素社会に資するアンモニア燃焼の実用化に貢献する成果を発信する．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] A. Tsunoda, Y. Morii, K. Maruta: Effect of flame stretch on the transition boundary of “explosive transition of deflagration”, Physics of Fluids, Vol. 37, Issue 12 (2025).

[2] H. Moriyama, Y. Morii, A. Tsunoda, Y. Yasutake, K. Misono, Y. Suzuki, T. Naiki, M. Watanabe, K. Maruta: Bridging Fundamental Combustion Analysis and Engine Knock Behavior - 2nd Report: Detailed Analyses of Knock Behavior Based on Fundamental 1D DNS and Its Relationship with Engine Knock, SAE Technical Paper Series (2025-10-07).

[3] Y. Yasutake, K. Misono, Y. Suzuki, T. Naiki, M. Watanabe, H. Moriyama, Y. Morii, A. Tsunoda, K. Maruta: Bridging Fundamental Combustion Analysis and Engine Knock Behavior - 1st Report: CFR Engine Test for Various RON Fuels, SAE Technical Paper Series (2025).

2) MISC（プレプリント等）

[4] Y. Morii, K. Maruta: Weak Detonations Revisited: Uncovering Its General Nature Using Autoignitive Reaction Wave Concept, arXiv:2507.10022 (2025).

3) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[5] Y. Morii, K. Maruta: (Invited Talk) Analytical Evidence for the Existence of Stable Weak Detonation Based on Supersonic Autoignitive Reaction Wave Concept Interpreted through Rayleigh Flow, 1st Annual Combustion Meeting of the Singapore Section of the Combustion Institute (SSCI2025), National University of Singapore, (2025-12-09).

[6] F. Hurault, F. Foucher, P. Brequigny, C. Mounaïm-Rousselle, H. Moriyama, T. Fukaya, Y. Morii, K. Maruta: Knocking Processes in NH3/H2 Engine, 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025), Sendai, (2025-11-11).

[7] Y. Morii, K. Maruta: Rayleigh Flow as a Platform for Examining General Behaviors of 1D Reactive Flows: From Theoretical Prediction to Stable Realization of Weak Detonations, 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025), Sendai, (2025-11-10).

[8] A. Tsunoda, Y. Morii, K. Maruta: Theoretical Analysis on Flame Propagation with Chemically Unfrozen Preheat Zone: ZFK-FKPP Transition and Knock Onset, 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025), Sendai, (2025-11-11).

[9] H. Moriyama, Y. Morii, A. Tsunoda, Y. Yasutake, Y. Suzuki, T. Naiki, M. Watanabe, K. Misono, K. Maruta: Validation of 1D DNS knock-onset prediction methodology using CFR engine data, 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025), Sendai, (2025-11-11).

[10] S. Miyazaki, H. Moriyama, T. Tezuka, Y. Morii, K. Maruta: 1D DNS Analysis of Knocking in PRF20/O2/Ar Mixtures within a Constant Volume Chamber, 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025), Sendai, (2025-11-11).

[11] H. Okada, Y. Morii, A. Tsunoda, K. Maruta: 1D DNS on Shock Formation and Detonation Transition Triggered by Reaction Wave Speed Exceeding the Subsonic CJ Speed, 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025), Sendai, (2025-11-11).

[12] 森井 雄飛, 丸田 薫: 2 次元 CFD を用いた弱デトネーションの安定性に関する数値的研究 第 39 回数値流体力学シンポジウム (CFD39), (2025-12-17).

[13] 深谷 峻大, 宮﨑 将吾, 森山 陽太, 森井 雄飛, 丸田 薫: 顕著に予熱されたメタン/空気平面予混合火炎の振る舞いに関する研究, 日本燃焼学会 第 63 回燃焼シンポジウム, (2025-11-06).

[14] 鈴木 智也, 森井 雄飛, 手塚 卓也, 丸田 薫: PRF における多重着火型 FREI 現象に関する数値的研究, 日本燃焼学会 第 63 回燃焼シンポジウム, (2025-11-06).

[15] 森山 陽太, 森井 雄飛, 角田 陽, 安武 優希, 御園 勝博, 鈴木 善克, 内木 武虎, 渡邊 学, 丸田 薫: CFR エンジン実験による 1D DNS ノッキング発生予測手法の検証, 日本燃焼学会 第 63 回燃焼シンポジウム, (2025-11-05).

4) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

区分	統合流動科学国際研究教育センター 戦略的共同研究プログラム
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	2 年目

液体アンモニアの噴霧燃焼特性に関する混相流体解析
Multiphase Flow Computing of Liquid Ammonia Atomization and Spray Combustion Characteristics

石本　淳*†，Sławomir Pietrowicz**††
*†東北大学流体科学研究所
**††Wrocław University of Science and Technology, Poland
†申請者，††所外対応研究者

1. Objectives

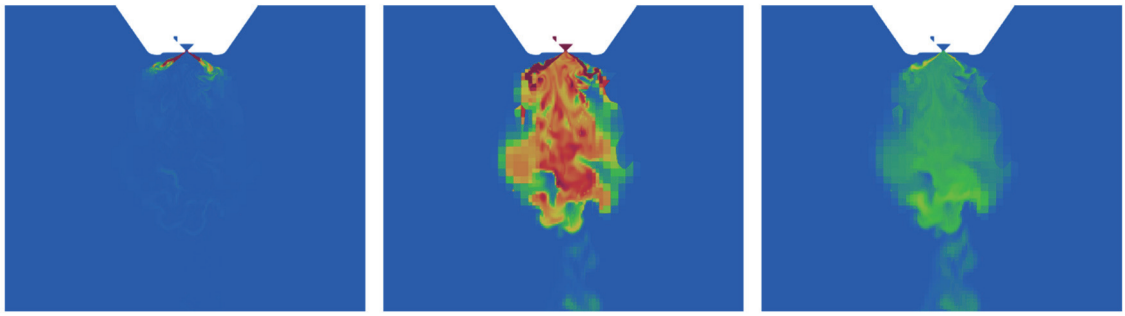
We focus on the primary breakup process of liquid ammonia, and the supercomputing of liquid ammonia atomization with phase change characteristics in an injector nozzle will be conducted using a modified Hertz-Knudsen model with the thermodynamic LES-VOF method. Furthermore, the combustion behavior of a liquid ammonia spray will be examined, accounting for chemical reactions in the NH_3 gas phase. In the second year (2025.4–2026.3), the research objectives are extended to include: (i) a systematic comparison of representative evaporation models (Lee, diffusionGasEvaporation, and Hertz–Knudsen) for reproducing the non-equilibrium flash boiling of liquid ammonia; (ii) three-dimensional LES–VOF analyses of a hollow-cone swirl injector constructed from actual nozzle CAD geometry, including a parametric study of the injection velocity; (iii) a comparative evaluation of liquid ammonia and a conventional gasoline surrogate fuel (iso-octane, C8H18) to clarify the distinctive thermophysical features of ammonia sprays; and (iv) a proof-of-concept reactive combustion analysis of the liquid ammonia spray field.

2. Contents of Research Results

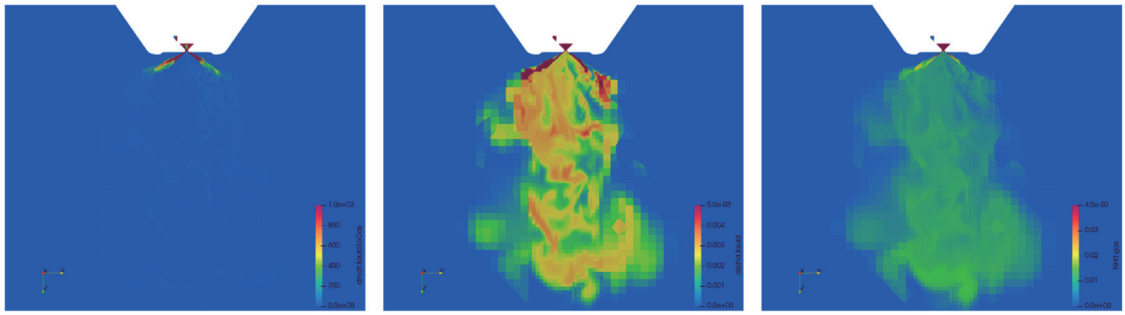
Figure 1 shows the time evolution (yz cross-section) of the mass transfer rate (left), the liquid-phase volume fraction (center), and the vapor-phase volume fraction (right) obtained by the three-dimensional spray analysis of LNH_3 (Liquid Ammonia). It can be seen that a hollow conical spray of LNH_3 is formed after passing through the nozzle throat, reproducing the three-dimensional structure characteristic of the hollow-cone injector, and that evaporation (mass transfer) is clearly initiated at the throat section, where the flow velocity increases and the pressure drops sharply, driving the flash-boiling breakup and atomization of the LNH_3. Furthermore, after injection, the mass transfer is particularly activated along the outer edge of the spray, where the liquid volume fraction is high, and it can be seen that the vapor generated by the evaporation of LNH_3 expands volumetrically, diffuses over a wide region, and rapidly flows into the low-pressure region inside the spray cone. Applied turbulence model and mesh resolution significantly affect spray angle prediction. It is found that the atomization and evaporation can be accurately captured with actual nozzle geometry, and it is also found



(a) $t = 0.0005$ s



(b) $t = 0.0055$ s



(c) $t = 0.01$ s

Figure 1 Time evolution of the mass transfer rate (left), LNH_3 (center), and GNH_3 (right) distributions of the three-dimensional liquid ammonia spray (y-z cross-section)

that the pressure boundary conditions (pressureInletOutletVelocity) improve jet stability. The Hertz-Knudsen model provides consistent evaporation patterns matching physical expectations.

Focusing on the internal nozzle flow characteristics, the liquid-to-vapor phase change due to flash boiling occurs at the nozzle throat. Immediately after the start of spraying, it can be seen that vapor-phase change is being especially promoted in the contour of the spray cone. The phase change rate decreases downstream of the spray due to diffusion and reduced heat transfer between the liquid droplets and the surrounding gas phase.

In the second year of the project, a systematic comparison of three representative evaporation models was first performed using a two-dimensional pressure-swirl nozzle configuration. The Lee model, which assumes linear temperature relaxation with a fixed saturation temperature, predicted unrealistically early evaporation upstream of the nozzle throat, whereas the

diffusionGasEvaporation model, driven by species concentration gradients at the gas–liquid interface, was unable to capture volumetric bubble generation within the superheated liquid interior. In contrast, the Hertz–Knudsen model, formulated based on thermodynamic non-equilibrium and the local vapor pressure at the interface, successfully reproduced the onset of flash boiling in regions of steep pressure gradients and was therefore confirmed as the most robust phase-change formulation for liquid ammonia spray analysis.

Three-dimensional LES–VOF analyses of a hollow-cone swirl injector constructed from actual nozzle CAD data were then conducted. As in the two-dimensional case, evaporation of liquid ammonia is triggered by the rapid pressure drop at the nozzle throat, and the phase change is particularly promoted at the outer edge of the conical spray where the liquid volume fraction is high, while the generated ammonia vapor is distributed not only along the spray periphery but also inside the spray cone. A parametric study of the inlet velocity (2.0–3.5 m/s) revealed that the penetration and dispersion range of the ammonia vapor increase with the inlet velocity, whereas the spray angle decreases; this is interpreted as a consequence of the intensified swirl component, which forms a strong negative-pressure region near the central axis, draws in the surrounding air, and pulls the spray apex deeper into the nozzle. Furthermore, when the phase change is taken into account, the temperature near the nozzle decreases by up to 22 K compared with the non-phase-change case, owing to the latent heat absorbed during evaporation. This evaporative temperature depression may increase the ignition delay and reduce the burning velocity of ammonia sprays.

In addition, a comparative analysis with iso-octane (C_8H_{18}), a major gasoline surrogate, was conducted under identical injection conditions. At the supply temperature of 294 K, the saturation vapor pressure of NH_3 (8.73 bar) is far higher than that of C_8H_{18} (0.054 bar); consequently, the C_8H_{18} spray behaves as a thermodynamically stable, essentially single-phase flow, whereas liquid ammonia spontaneously undergoes flash boiling without external heating, which is advantageous for atomization enhancement and evaporation promotion. Finally, a proof-of-concept combustion analysis was performed by coupling the computed spray field with a one-step global reaction ($4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 6H_2O + 2N_2$) with extended-Arrhenius kinetics; ignition triggered by a localized external heat source led to flame formation accompanied by a temperature rise and water-vapor generation, demonstrating that the present framework can numerically reproduce the spray combustion of liquid ammonia.

3. Progress toward research objectives

In the second year, this study aimed to extend the numerical framework developed in the first year toward three-dimensional flash-boiling spray analyses based on actual injector geometry, a comparative evaluation with a conventional fuel, and reactive spray combustion of liquid ammonia. Through the present numerical investigations, the Hertz–Knudsen formulation was confirmed to be the most robust phase-change model through a systematic comparison of three representative evaporation models, the influence of the injection velocity on vapor penetration and spray-angle formation was quantitatively clarified, and the temperature depression of up to 22 K associated with the liquid-to-vapor phase change during atomization was reproduced in a physically consistent manner. Furthermore, the comparative analysis with iso-octane clarified the distinctive thermodynamic instability that drives the flash boiling of liquid ammonia, and a proof-of-concept combustion analysis successfully demonstrated ignition, flame formation, and water-vapor generation in the

liquid ammonia spray field. While detailed chemical kinetics, including NOx formation, and quantitative combustion characteristics remain to be further refined, the core objectives defined for the second year were substantially fulfilled. Overall, approximately 90% of the research goals set for this fiscal year were achieved, thereby validating the effectiveness of the extended numerical methodology and establishing a solid foundation for future combustion-oriented and safety-oriented analyses.

4. Summary and Future Strategies

This study has demonstrated the feasibility of numerically simulating the complex flash-boiling and combustion behavior of liquid ammonia using a customized OpenFOAM-based solver. By incorporating a newly proposed phase-change model, the present framework successfully reproduced pressure-driven flash-boiling phenomena that are characteristic of liquid ammonia under rapid depressurization conditions. In addition, the application of an advanced Hertz–Knudsen model enabled physically consistent evaporation behavior, yielding evaporation patterns that align well with fundamental thermodynamic expectations. Overall, the results confirm that the developed numerical methodology can capture the essential multiphase and phase-change processes governing liquid ammonia atomization and combustion, thereby providing a reliable computational tool for future investigations into ammonia-based combustion systems.

The present work focuses on a computational analysis of transient atomization characteristics—specifically, spray angle, breakup length, and liquid film thickness—during the primary breakup process in an injector nozzle, employing a thermodynamic large-eddy simulation combined with a volume-of-fluid (LES–VOF) approach. In the second year, these numerical results were systematically compared with the corresponding atomization characteristics of a conventional gasoline surrogate fuel (iso-octane), and it was clarified that liquid ammonia can spontaneously induce flash boiling near room temperature owing to its high saturation vapor pressure, and therefore possesses thermodynamically favorable characteristics for atomization enhancement and evaporation promotion.

Furthermore, the influence of flash boiling on atomization behavior—including the evaporative temperature depression of up to 22 K near the nozzle—was quantitatively assessed, and a proof-of-concept reactive-combustion analysis of the liquid ammonia spray field was conducted. As the next step, combustion simulations incorporating detailed chemical kinetics, including NOx formation and ignition-delay characteristics, will be conducted to quantitatively evaluate the effect of the evaporative cooling on flame stability and burning velocity. Building upon these findings, reactive spray combustion analyses of liquid ammonia will be extended to establish fundamental safety theories applicable to the design of effective firewalls for ammonia and hydrogen storage facilities, ammonia and hydrogen fueling stations, rapid fire suppression strategies for ammonia flames, and predictive methodologies for ammonia leakage and fire hazards.

5. Research Findings

[1] Jun Ishimoto, Computational Study of Liquid Ammonia Atomization Characteristics with Phase Change in an Injector Nozzle, *Proceedings of the ILASS-Americas 35th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, May 18-21, 2025,

Bozeman, Montana, USA
https://ilass.org/RDDS/ResearchDataDetails.php?aid=1856

[2] Tomasz Durazinski, Andrzej Ireneusz Nowak, Jun Ishimoto, Slawomir Pietrowicz, Oscillatory two-phase flow dynamics in capillary tubes under microgravity conditions: Numerical modeling and qualitative analysis of the flow structures, *International Journal of Multiphase Flow,* Volume 184, 2025, 105107, ISSN 0301-9322. https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.105107

[3] Marcin Opalski, Tisha Dixit, Bertrand Baudouy, Przemyslaw Blasiak, Jun Ishimoto, Slawomir Pietrowicz, Modeling of cryogenic pulsating heat pipe using CFD techniques, *Cryogenics*, Volume 147, 2025, 104061, ISSN 0011-2275. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2025.104061

[4] 印宮 惇, 相変化を伴う液体アンモニアの微粒化噴霧特性に関する混相流体解析, 東北大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻 修士学位論文 (指導教員 : 石本 淳) , 2026 年 1 月.

1) International conferences, domestic academic meetings, research seminars, oral presentations, etc.

[1] 印宮 惇 (東北大), 石本 淳 (東北大), 液体アンモニアの微粒化噴霧特性に関する混相流体解析, 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2025, 2025 年 9 月 3 日, 神戸大学工学部 (神戸市)

[2] イ スンミン (東北大), 石本 淳 (東北大), 大島 逸平 (東北大), 相変化を伴うレーザー溶融プロセスに関する混相流シミュレーション, 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2025, 2025 年 9 月 3 日, 神戸大学工学部 (神戸市)

[3] 内山 舜太 (東北大), 石本 淳 (東北大), ラバルノズル内極低温液体水素の混相流動特性に関する数値解析, 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2025, 2025 年 9 月 3 日, 神戸大学工学部 (神戸市)

[4] 金田 太樹 (東北大), 石本 淳 (東北大), 回転ディスク間オイルの混相流体潤滑特性に関する数値解析, 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2025, 2025 年 9 月 3 日, 神戸大学工学部 (神戸市)

[5] M. Opalski, A. Ruziewicz, A. I. Nowak, C. Czajkowski, J. Ishimoto, S. Pietrowicz, Numerical Analysis of Multi-loop Pulsating Heat Pipes on Cooled Cylinder for Rotary Applications (Invited)
The 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025) OS1: The Third International Symposium on Integrated Flow Science I & III, Sendai International Center, Sendai, Japan, Nov.10th - 13th, 2025.

[6] S. Pietrowicz , J. Ishimoto, Experimental and Numerical Analyses of the Flow Pattern in Pulsating Heat Pipes in Micro and Hypergravity,
The 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025) OS1: The Third International Symposium on Integrated Flow Science I & III, Sendai International Center, Sendai, Japan, Nov.10th - 13th, 2025.

[7] K. Oguchi , K Hijiri, M. Nakano, J. Ishimoto, T. Adachi, K. Hirata, Investigation of the Aerodynamic Characteristics of a Cylindrical Wing using Wind Tunnel Testing and Free Flight Testing,
The 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025) OS1: The Third International Symposium on Integrated Flow Science I & III, Sendai International Center, Sendai, Japan, Nov.10th - 13th, 2025.

[8] K. Hijiri , K. Oguchi, T. Adachi, J. Ishimoto, M. Nakano, K. Hirata, Aerodynamics and Flow of Ring Wing by Numerical Simulation,

The 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025) OS1: The Third International Symposium on Integrated Flow Science I & III, Sendai International Center, Sendai, Japan, Nov.10th - 13th, 2025.

[9] On a Rotating Hollow Cylinder in Flight by Using Experiment and Computation, K. Hirata, J. Ishimoto, M. Nakano, T. Adachi, K. Oguchi, K. Hijiri
OS28: The 25th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2025) IFS Collaborative Research Forum, Sendai International Center, Sendai, Japan, Nov.10th - 13th, 2025.

区分	統合流動科学国際研究教育センター 戦略的共同研究プログラム
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	1 年目

HAXPES を用いたアンモニアエネルギーシステムにおける超合金の窒化の高分解能調査
High-Resolution HAXPES Investigation of Nitridation in Nickel Superalloys for Ammonia-Based Energy Systems

Felipe Campuzano*, Estefany Sarabia*, Keisuke Kanayama**, S. Mani Sarathy*††
Hisashi Nakamura**†
*Clean Energy Research Platform (CERP), King Abdullah University of Science and Technology (KAUST)
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††Oversea coordinator

1. Research Purpose

The aim of this research is to develop a fundamental understanding of the nitridation processes occurring in nickel-based superalloys exposed to high-temperature, high-pressure ammonia (NH_3) environments. As NH_3 emerges as a promising carbon-free energy carrier and hydrogen vector, understanding the degradation mechanisms of these materials in NH_3-rich environments has become increasingly important for the design and reliable operation of NH_3 utilization technologies. Nickel-based superalloys are widely employed in high-temperature energy conversion and chemical processing systems due to their excellent mechanical strength, oxidation resistance, and microstructural stability under aggressive operating conditions [1]. Among these materials, Hastelloy X, Haynes 230, and Haynes 214 have attracted considerable attention for applications involving elevated temperatures and reactive gaseous environments. Hastelloy X is a Ni–Cr–Fe–Mo alloy extensively used in gas turbine combustors, petrochemical processing equipment, and industrial furnace components owing to its exceptional high-temperature strength, thermal stability, and resistance to oxidation and carburization. Haynes 230 is a Ni–Cr–W–Mo alloy designed for long-term exposure to elevated temperatures, offering excellent creep strength, thermal stability, and resistance to oxidation and carburization, which has led to its widespread use in industrial furnaces, heat-treatment equipment, and gas turbine components. Haynes 214, in contrast, is a Ni–Cr–Al alloy specifically developed for superior environmental resistance at temperatures exceeding 1000 °C, making it suitable for furnace components, heat-treatment equipment, and other applications involving severe thermal and corrosive conditions.

Exposure to NH_3 at elevated temperatures and pressures introduces a unique corrosion challenge due to the generation of highly reactive nitrogen species capable of penetrating metallic substrates and promoting nitride formation. NH_3 is metastable and dissociates at high temperatures, forming nascent nitrogen (N) prior to its recombination into molecular nitrogen (N_2). Due to its high reactivity, nascent nitrogen can diffuse into the alloy and react with nitride-forming elements, with the extent of nitridation depending on both the affinity of the alloying constituents for nitrogen and the characteristics of the nitriding environment. Elevated pressure

further enhances the driving force for nitridation, as the nitridation potential is directly related to the partial pressure of NH_3 in the atmosphere [2]. Although nitridation is widely employed as a surface-engineering treatment, uncontrolled nitridation can alter alloy chemistry, microstructure, and mechanical integrity, ultimately reducing component lifetime and leading to premature failure [3].

This study investigates the nitridation behavior of Hastelloy X, Haynes 230, and Haynes 214 when exposed to a continuous flow of NH_3 at 700 °C under pressures of 1 and 8 bar for exposure times of up to 500 h. These alloys were selected as representative nickel-based superalloys with contrasting compositions, allowing the relationships between alloy chemistry, nitrogen uptake, and microstructural degradation to be systematically evaluated. Detailed microstructural characterization using SEM/EDS cross-sectional analysis and synchrotron HAXPES has been performed to examine nitrogen-induced degradation, penetration depth, phase evolution, and nitridation morphologies. Overall, this research aims to establish the relationships between alloy chemistry and nitridation resistance under high-pressure NH_3 environments, contributing to the limited understanding of material degradation mechanisms in highly nitriding environments and informing the design and optimization of NH_3 utilization technologies.

This work is an ongoing collaboration between the Clean Energy Research Platform (CERP) at KAUST and the Institute of Fluid Science at Tohoku University. CERP has developed highly instrumented facilities capable of conducting long-duration nitridation studies under extreme NH_3 environments. The results presented in this report include materials exposure testing and characterization performed at KAUST, together with advanced characterization of the exposed materials conducted at the NanoTerasu facility at Tohoku University.

1.1 KAUST Nitridation Test

Hastelloy X, Haynes 230, and Haynes 214 specimens were exposed to high-temperature, high-pressure NH_3 environments using the reactor shown in **Figure 1**. Experiments were conducted at pressures of 1 and 8 bar under a continuous flow of pure NH_3 for exposure times of 100, 250, and 500 hours. The reactor consists of a nominal 4-inch SCH80 Inconel 625 pipe and was specifically designed for long-duration nitridation testing at temperatures up to 800 °C and pressures up to 10 bar.

An alumina tube positioned within the reactor isolates the process gas from the reactor walls, minimizing NH_3 interactions with the hot metallic surfaces that could otherwise promote additional NH_3 dissociation into N_2 and H_2. By limiting NH_3 decomposition on the reactor walls, this configuration increases the contribution of surface reactions occurring on the test specimens and facilitates a more reliable assessment of their nitridation behavior. The reactor configuration also enables the extraction of samples at predetermined exposure intervals. Before removal, specimens were cooled to room temperature inside the reactor under an inert atmosphere to suppress further reactions and ensure that the observed changes were associated solely with the nitridation process.

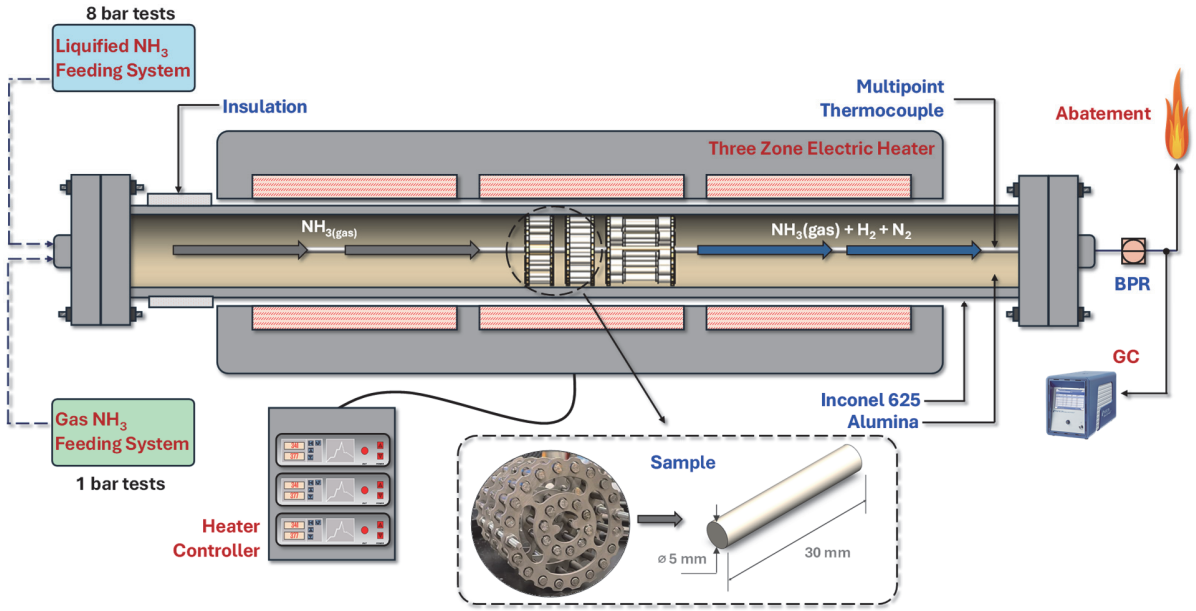


Figure 1. KAUST nitridation test facility.

Heating is provided by a three-zone Thermo 1200X clamshell box furnace positioned around the reactor. The three-zone configuration enables precise temperature control along the reaction zone and minimized axial temperature gradients. Any exposed sections of the reactor were covered with high-temperature insulation to reduce heat losses and maintain a uniform temperature profile within the sample region. Temperature monitoring is performed using two 77-inch multipoint K-type thermocouples, each equipped with eight measurement locations. One thermocouple is installed externally to monitor the reactor skin temperature and ensure that the Inconel 625 vessel remains within safe operating limits throughout heating, exposure, and cooling. A second thermocouple is positioned within the reactor to measure the process gas temperature, facilitating accurate control of the nitridation environment. Additional thermocouples are installed at critical locations, including the reactor flanges, to verify compliance with the temperature-pressure limitations of the system components. For experiments conducted at 1 bar, NH_3 is supplied using a gaseous feed system, whereas experiments at 8 bar employed a liquefied NH_3 feed system. Further details regarding the feed systems, instrumentation, and pressure-control architecture can be found in our previous work [2,4]. Although the reactor vessel used in the present study differs from that reported previously, the supporting subsystems and control philosophy remained unchanged.

Cracking of NH_3 within the high-pressure vessel was expected due to the elevated temperatures and interactions with both the sample surfaces and reactor materials. Preliminary NH_3 cracking experiments were conducted to establish operating conditions that would provide comparable NH_3 concentrations at the sample location for both pressure conditions (1 and 8 bar). Concentration profiles along the reactor length were determined following the methodology described in our previous work [2]. Based on these results, a constant NH_3 flow rate of 13 g/min was employed throughout the study, resulting in an average NH_3 concentration of 75 ± 5% and a peak temperature of 700 °C at the sample location.

1.2 Test Materials

Specimens of Hastelloy X (Ni–Cr–Fe–Mo), Haynes 230 (Ni–Cr–W–Mo), Haynes 214 (Ni–Cr–Al, alumina-forming) and were CNC machined into cylindrical rods with a diameter of 5 mm and a length of 30 mm, resulting in a surface roughness ranging from 0.68 to 0.95 µm, as measured using a Mitutoyo Surftest SJ-400. This roughness range was maintained to ensure a consistent surface finish across all specimens and to facilitate reliable post-exposure characterization. The nominal compositions of the selected alloys are reported in **Table 1**.

Table 1. Nominal chemical composition (wt%).

Material	Ni	Cr	W	Fe	Mo	Co	C	Mn	Si	B	Nb	Al	Ti
Haynes 214	75	16.0	0.5	3.0	0.5	2.0	0.04	0.5	0.2	0.010*	0.15*	4.5	0.50*
Haynes 230	57	22.0	14.0	3.0	2.0	5.0	0.10	0.5	0.4	0.015*	0.5 *	0.3	0.10*
Hastelloy X	47	22.0	0.6	18.0	9.0	1.5	0.10	1.0	1.0	0.008*	0.5 *	0.5	0.15*

Before exposure to the nitriding environment, all samples were ultrasonically cleaned in acetone for 10 min, rinsed with ethanol, and dried under flowing dry air. Initial masses were measured using a Mettler Toledo analytical balance (±0.0001 g). Sample dimensions were measured at three locations using Mitutoyo micrometers (±0.5 µm) and digital calipers (±0.05 mm) to determine the initial surface area (SA_{ini}). Following reactor exposure, the samples were cooled to room temperature under flowing N_2 and reweighed using the same balance.

2. Results and Discussion

Figure shows the transition from a bright metallic sheen in the as-received condition (top row) to a dark, opaque, and pitted surface after NH_3 exposure at 700 °C (bottom row). This change is associated with the formation of nitridation products and surface degradation during exposure. The reducing character of the NH_3 atmosphere limits the development of dense protective oxides, while the nitridation of reactive alloying elements such as Cr and Al promotes internal precipitation and localized volumetric expansion. These processes contribute to surface roughening, cracking, and the development of pitted surface morphologies.

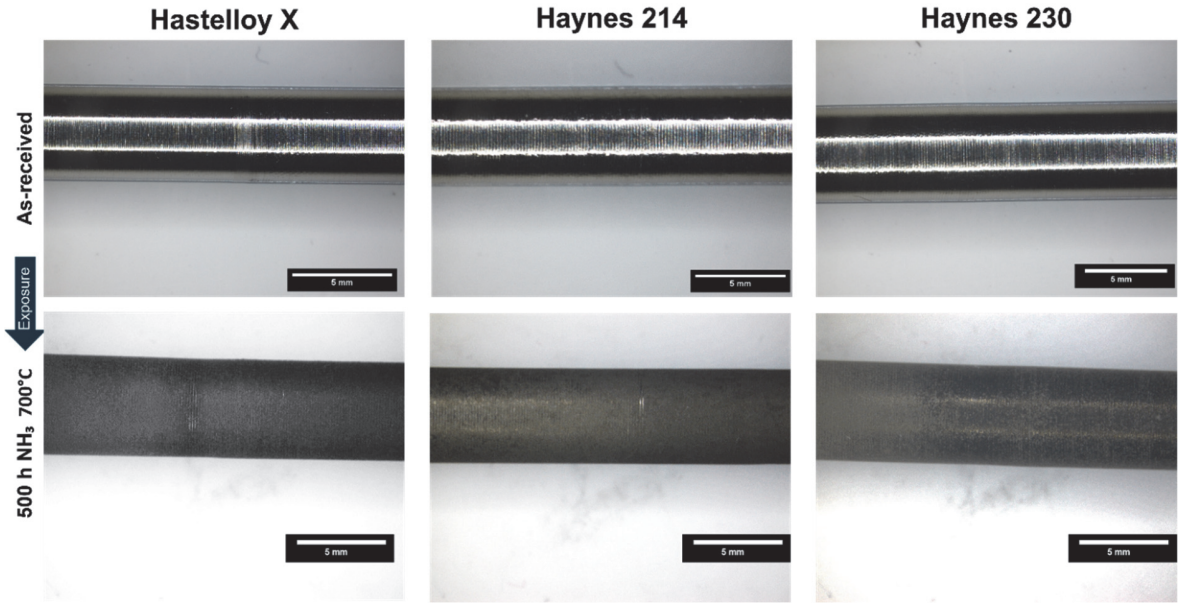


Figure 2. Macrographs of the three alloys at 0.63× magnification in the as-received condition (top row) and after 500 h exposure (bottom row).

Representative surface images of the three alloys after 500 h of exposure and subsequent tensile deformation are shown in **Figure 3**. The images were acquired from the strained sections to enable a direct comparison of the scale integrity and surface rumpling under the combined effects of thermal exposure and mechanical deformation. The surface appearance differs markedly among the alloys. Hastelloy X (**Figure 3a**) developed a heavily textured, wrinkled ("elephant-skin") surface morphology across the entire gauge section, decorated with discrete second-phase particles. Haynes 214 (**Figure 3b**) exhibited a similar wrinkled morphology, although on a considerably finer scale, whereas Haynes 230 (**Figure 3c**) retained a relatively bright and adherent surface with no apparent evidence of cracking or rumpling.

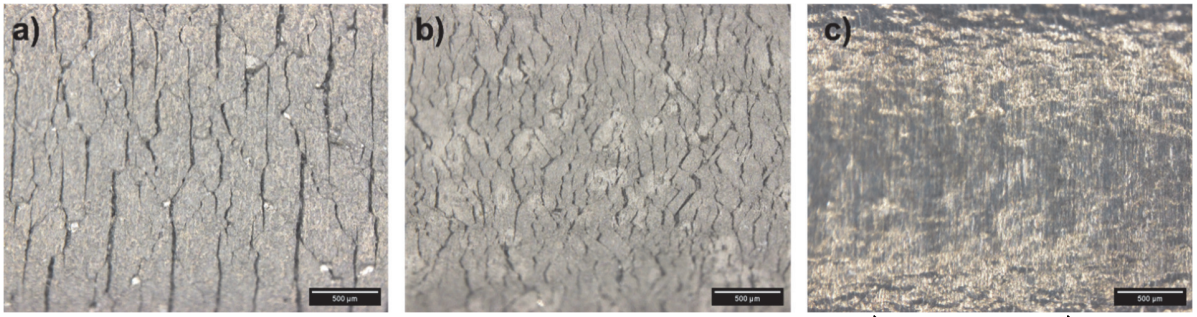


Figure 3. surface appearance after 500h NH_3 exposure at 8 bar for **a)** Hastelloy X, **b)** Haynes 214, and **c)** Haynes 230.

The pronounced rumpling observed in Hastelloy X and Haynes 214 is consistent with the development of thicker reaction layers and more extensive nitridation, which generate growth stresses and localized deformation during exposure. In contrast, the smooth, crack-free surface of Haynes 230 suggests the formation of a thinner and more adherent reaction layer, indicative of superior resistance to nitridation under the investigated conditions. The rumpled, particle-decorated surfaces of Hastelloy X and Haynes 214 are consistent with the reduced ductility

associated with nitride precipitation within the exposed material, whereas the bright, crack-free surface of Haynes 230 suggests better retention of ductility following exposure.

2.2 Cross-sectional analysis

Cross-sectional analysis was performed to evaluate the microstructural changes induced by NH_3 exposure (**Figure 4**). In Hastelloy X (**Figure 4a**), a distinct boundary separates the nitrided region from the unaffected substrate. Within the affected zone, the nitrogen signal is relatively uniform, indicating the development of a fully and homogeneously nitrided diffusion layer. In contrast, Haynes 214 (**Figure 4b**) exhibits a finger-like internal nitridation morphology, reflecting localized and relatively deep nitrogen penetration beneath the external compound layer. For Haynes 230 (**Figure 4c**), nitrogen is largely confined to a thin external compound layer, with only a weak nitrogen signal detected within the underlying substrate. This behavior is consistent with the formation of a more protective reaction layer that effectively limits inward nitrogen transport.

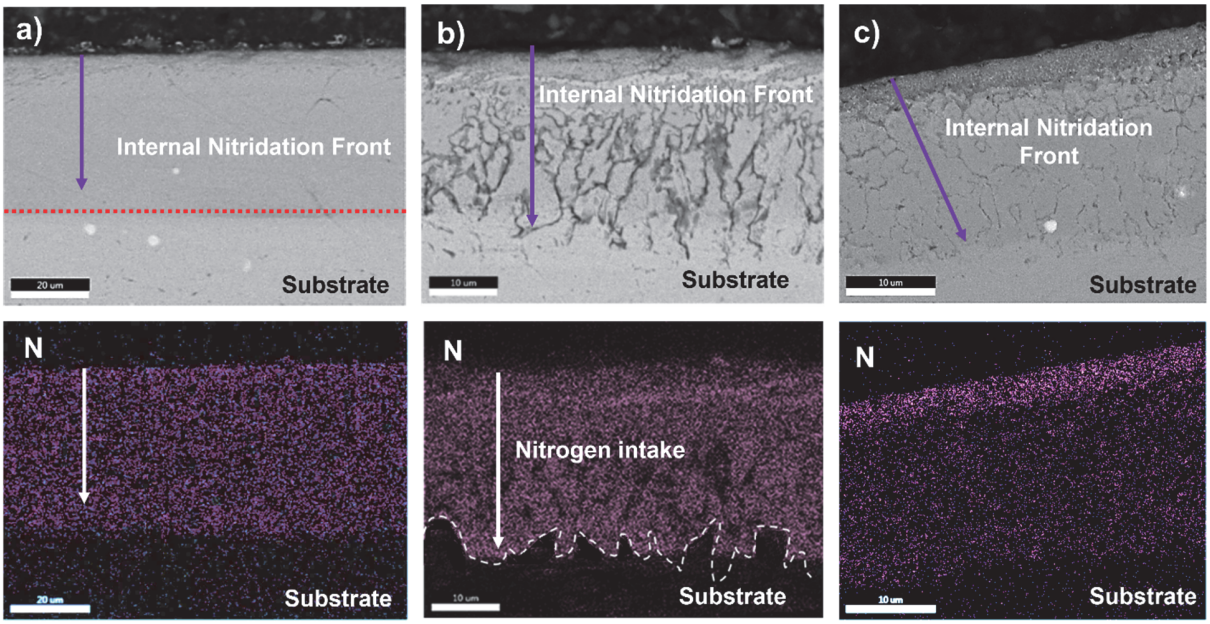


Figure 4. Cross-section and EDS spectra for N: a) Hastelloy X, b) Haynes 214 and C) Haynes 230.

2.3 HAXPES

High-resolution HAXPES characterization was conducted at the NanoTerasu synchrotron facility at Tohoku University. **Figure 5** shows the specimens and their arrangement within the HAXPES analysis chamber prior to the measurements.

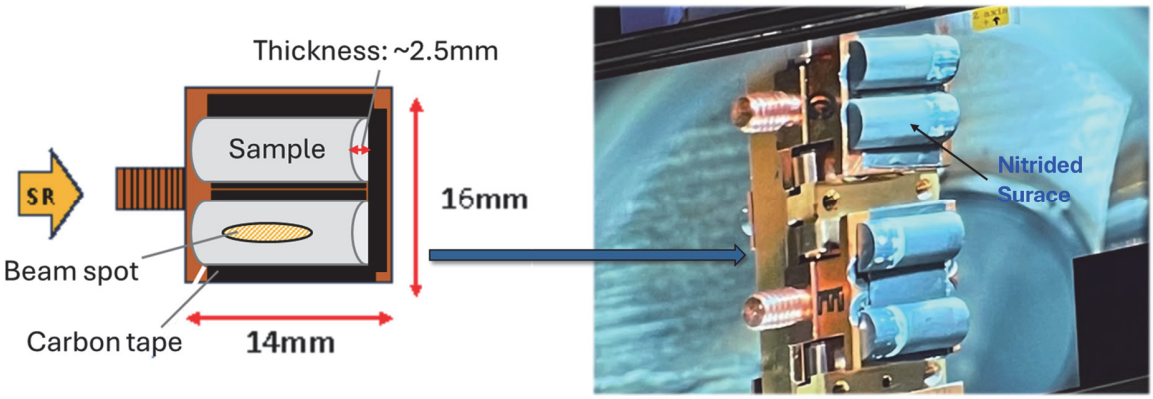


Figure 5. sample characteristics and preparation for HAXPES test.

All three alloys exhibit a dominant N 1s component at 396.8–396.9 eV, corresponding to the binding energy of lattice metal nitrides (M–N). No contributions associated with molecular nitrogen or N–H species are observed, confirming that the absorbed nitrogen is present as metal nitrides rather than as adsorbed species. The integrated N 1s intensity differs markedly among the alloys (**Figure 6**), indicating that nitrogen uptake follows the order: Hastelloy X ≫ Haynes 230 > Haynes 214.

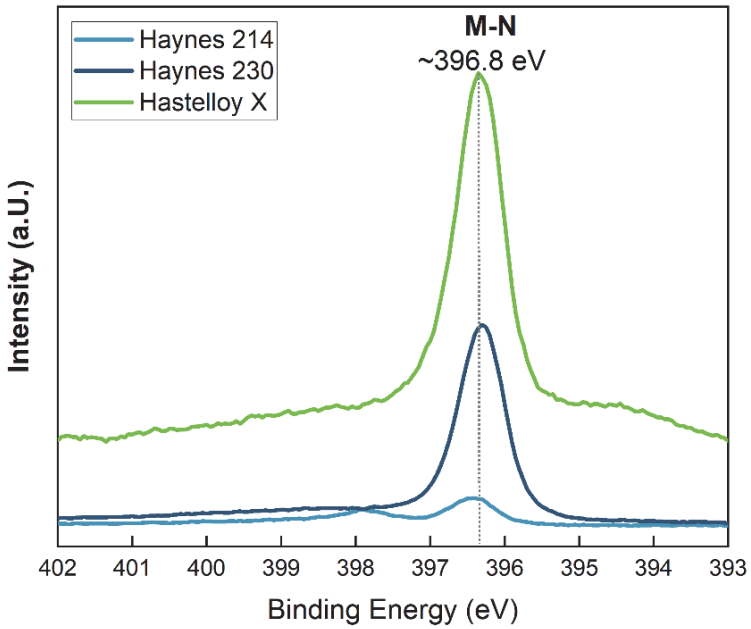


Figure 6. N 1s spectra for the 500 h NH3 exposed surface. Intensity scale as: Hastelloy X >Hastelloy 230 > Haynes 214.

Peak fitting using a Shirley background and pseudo-Voigt components reveals a second nitrogen environment at higher binding energies (398–399 eV) in addition to the main nitride peak (**Figure 7**). This higher binding energy component is consistent with nitrogen in a more electronegative environment, such as oxynitride species or nitrogen trapped within or beneath the surface oxide

layer. The increased intensity of this component in Haynes 214 may be associated with the presence of the alumina-rich surface layer formed on this alloy.

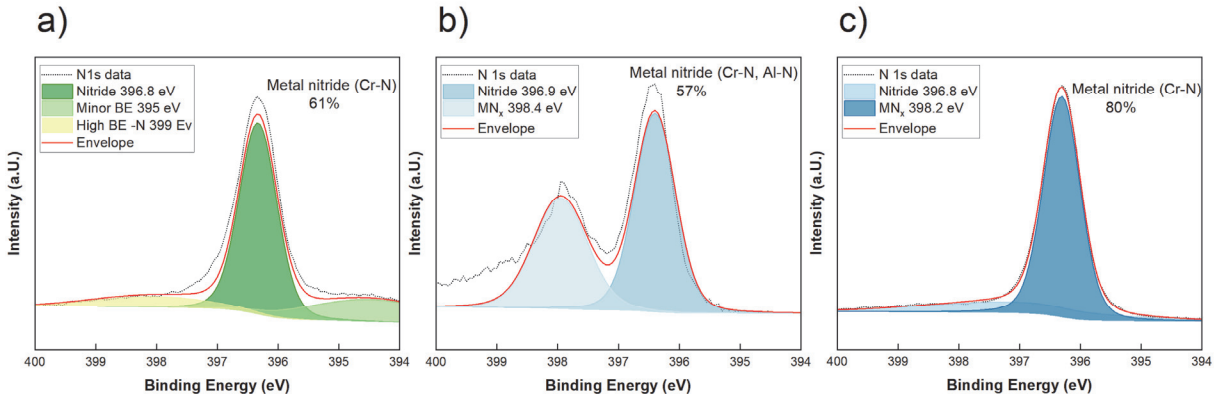


Figure 7. Nitrogen deconvolution. Main nitride component shaded ~396.8 eV: a) Hastelloy X, b) Haynes 214 and c) Haynes 230.

The Cr 2p3/2 line sits at ~575.5 eV in all three alloys, shifted up by ~1.4 eV from metallic Cr (574.1 eV) and showing the multiple structure typical of Cr^{3+} (**エラー! 参照元が見つかりません。**). This position is consistent with chromium nitride (CrN/Cr_2N) and, where oxygen is present, with Cr_2O_3, indicating that chromium is the principal element reacting with nitrogen. The Cr 2p intensity tracks the N 1s intensity strongest for Hastelloy X, weakest for Haynes 214, reinforcing a Cr-nitride-controlled surface chemistry.

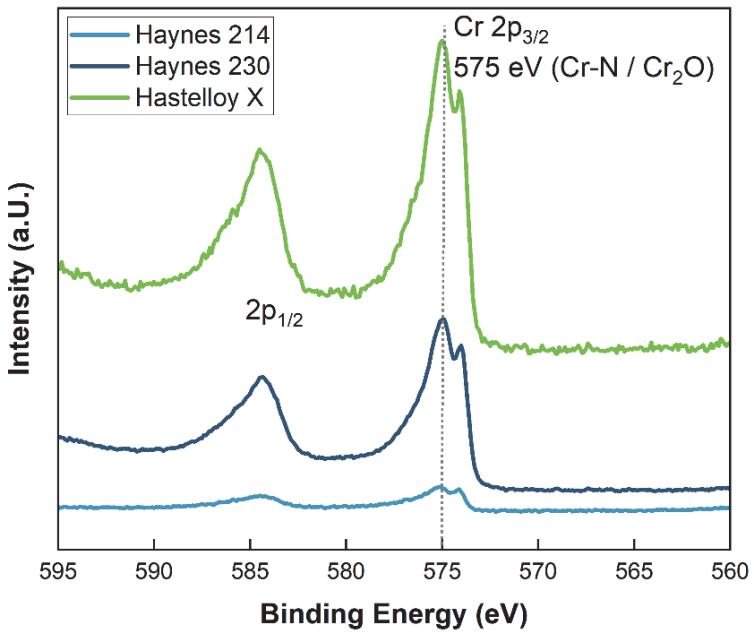


Figure 8. Cr 2p spectra. Cr 2p 3/2 at ~575.5 eV with the $2p_{1/2}$ partner near 585 eV. Intensity matches the N 1s ranking.

The extent and nature of nitridation are strongly influenced by the characteristics of the surface reaction layer. Haynes 214 exhibits the lowest nitrogen uptake and a pronounced high-binding-energy nitrogen component associated with nitrogen in an oxidized environment, consistent with the presence of an alumina-rich surface layer. Haynes 230 exhibits intermediate nitrogen uptake, whereas Hastelloy X shows the highest degree of nitridation. In all three alloys, iron- and nickel-containing species remain predominantly metallic throughout the analyzed depth. These surface observations provide important context for the cross-sectional and EDS analyses discussed below.

The surface and cross-sectional analyses provide complementary information, and reconciling their apparent differences is central to interpreting the degradation mechanisms. HAXPES is inherently surface sensitive, with an information depth of approximately 15–25 nm and therefore probes primarily the outermost compound layer. Consequently, the measured N 1s intensity reflects the local nitrogen concentration near the surface rather than the overall extent of nitrogen penetration into the alloy. Although Haynes 230 exhibits a relatively strong surface nitrogen signal, the cross-sectional observations (EDS spectra) demonstrate that this nitrogen is largely confined to a thin external reaction layer, with minimal ingress into the underlying substrate. In contrast, Hastelloy X and Haynes 214 exhibit substantially deeper nitrogen penetration, resulting in a fully nitrided diffusion zone and finger-like internal nitridation morphology, respectively. The two techniques therefore provide complementary insights: HAXPES characterizes the near-surface chemical state and nitrogen distribution within the external reaction layer, whereas the cross-sectional analysis reveals the depth and morphology of nitrogen penetration. Taken together, these results indicate that Haynes 230 most effectively restricts nitrogen to a thin surface layer and therefore exhibits the greatest resistance to bulk nitridation, while Hastelloy X and Haynes 214 experience more extensive internal degradation associated with deeper nitrogen ingress.

3. Progress Toward Research Purpose

To date, we have made significant progress toward understanding the influence of alloy chemistry on the nitridation behavior of nickel-based superalloys. In the present work, the nitridation behavior of Hastelloy X, Haynes 230, and Haynes 214 has been systematically investigated under flowing NH_3 at 700 °C and pressures of 1 and 8 bar for exposure times of up to 500 h using gravimetric kinetics, cross-sectional SEM/EDS analysis, and synchrotron HAXPES characterization. The resulting dataset provides a comprehensive description of nitrogen uptake, penetration depth, phase evolution, and microstructural degradation across alloys with distinct chemistries and under different nitriding conditions. The information generated in this study establishes the foundation for the development of data-driven models capable of correlating alloy composition, nitriding environment characteristics, and exposure conditions with nitridation behavior and degradation severity. Such relationships are expected to improve the prediction of material performance in NH_3-rich environments and support the development of composition–property frameworks for alloy selection. Ultimately, this work contributes to addressing the current lack of understanding regarding material behavior in highly nitriding high-temperature and high-pressure environments. The findings provide valuable guidance for materials selection, component lifetime assessment, and the design and optimization of emerging NH_3-based energy technologies.

4. Summary and Future Challenges

The present results demonstrate that the nitridation response of nickel-based superalloys is strongly dependent on alloy chemistry, resulting in markedly different nitrogen uptake, penetration depths, and degradation morphologies under identical NH_3 exposure conditions. While Haynes 230 effectively restricted nitrogen ingress, Hastelloy X and Haynes 214 exhibited more extensive internal nitridation and microstructural damage. These findings highlight the importance of considering both surface chemistry and bulk nitrogen penetration when assessing material performance in NH_3 environments. Future work will focus on developing predictive models that correlate alloy composition, nitriding conditions, and exposure time with degradation behavior. In addition, a more comprehensive evaluation of the mechanical properties and fracture characteristics of the exposed materials will be conducted to establish quantitative relationships between nitridation damage and structural integrity.

5. Research outcomes

Manuscripts in Progress

- Estefany Sarabia, Nicole Laws, Keisuke Kanayama, Hisashi Nakamura, Mani Sarathy, William L. Roberts, Felipe Campuzano. "Influence of Alloy Chemistry on the Nitridation Behavior of Nickel-Based Superalloys Exposed to Ammonia at Elevated Pressures and Temperatures." *In progress.* ***Target Journal****: Corrosion Science*.

- Estefany Sarabia, Nicole Laws, Keisuke Kanayama, Hisashi Nakamura, Mani Sarathy, William L. Roberts, Felipe Campuzano. "Role of Alloy Matrix on Nitrogen Uptake and Degradation in High-Temperature Alloys Exposed to NH_3." *In progress.* ***Target Journal****: Corrosion Science.*

References

[1] Long H, Mao S, Liu Y, Zhang Z, Han X. Microstructural and compositional design of Ni-based single crystalline superalloys d A review. J Alloys Compd 2018;743:203–20.

[2] Laws N, Sarabia E, Roberts WL, Campuzano F. Aluminization and pre-oxidation treatments for enhanced nitridation resistance of reformer alloys under high-pressure ammonia cracking. Mater Chem Phys 2026;358:132426.

[3] Laws N, Sarabia E, Campuzano F, Roberts WL. Failure analysis of FeCrAl heating coils exposed to a high-temperature , high-pressure ammonia environment. Eng Fail Anal 2024;161:108286.

[4] Laws N, Abdullah K, Roberts WL. Design and performance assessment of an experimental rig to conduct material nitridation studies at extreme ammonia conditions. Proc ASME Turbo Expo 2023:1–12.

区分	統合流動科学国際研究教育センター 戦略的共同研究プログラム
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	2 年目

PIA(Particle Image Analyzer)を用いた間欠噴霧液体アンモニア液滴径計測
Measurement of Droplet Diameter of Intermittent Liquid Ammonia Spray using PIA(Particle Image Analyzer)

早川 晃弘*†，Yi-Rong Chen*，Christine Mounaïm-Rousselle**††
Camille Hespel**，Utkarsha Sonawane**
*東北大学流体科学研究所
**University of Orlèans
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

Particle Image Analyzer（PIA）は噴霧を直接観察する事によって液滴径などを計測できる手法である．本研究の目的は，液体アンモニア噴霧におけるフラッシュ沸騰条件下の微視的噴霧特性を明らかにすることである．燃料温度および雰囲気圧力を変化させることで過熱度を制御し，非減圧沸騰，少し減圧沸騰，強減圧沸騰の各条件における液滴径分布および噴霧挙動を PIA による観察を通して詳細に解析する．実験にはオルレアン大学の定容容器および単孔 ECN Spray M ノズル（エンジン中のノズル）を用いる．これにより，減圧沸騰が液滴微粒化，蒸発過程および近距離場における噴霧特性に及ぼす影響を明確化し，アンモニア噴霧モデルの構築および検証に資する基礎的な実験データを提供することを目指す．

2. 研究成果の内容

フランス・オルレアン大学を訪問して共同実験を実施した．本研究では，減圧沸騰条件下における液体アンモニア噴霧特性を明らかにするために噴霧の近距離観察を行う．図 1 に実験装置模式図を示す．単孔 GDI（Gasoline Direct Injection）用のノズルから液体アンモニアを噴射した．実験では，燃料温度（0，20，50 ºC）および雰囲気圧力（1，3，6 bar）を変化させることにより過熱度を制御した．高速度カメラ，顕微鏡光学系，Nd:YAG パルスレーザーを用いた Particle Image Analysis（PIA）法を適用し，ノズル下流 35 mm における液体アンモニア噴霧の液滴径分布を取得した．

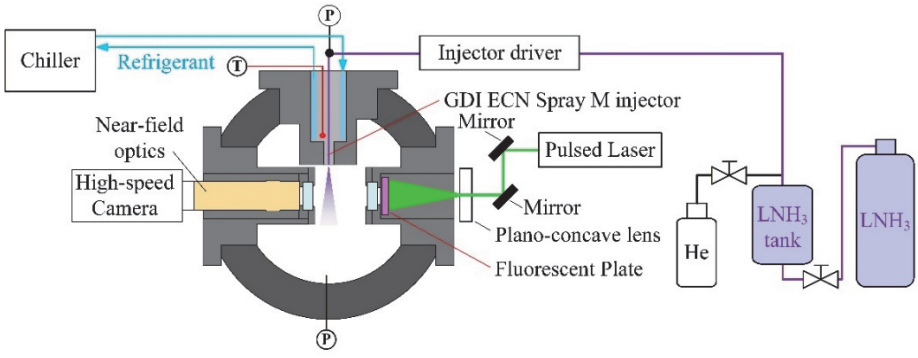


図 1：実験装置模式図．オルレアン大学保有の定容容器内に東北大学で設計した窓付きフランジを設置し，PIA 法による近接撮影を実施した．

まず図１の実験系のように液体アンモニア噴霧に対する PIA 計測手法を構築した．図２は撮影された粒子画像の例である．粒子画像の正規化，二値化，液滴抽出，粒径解析を行う事によって，数基準および体積基準の粒径分布を評価可能にした．算術平均径（AMD）D_{10} およびザウター平均粒径（SMD）D_{32} を各噴射条件および半径方向位置ごとに算出し，過熱度および空間位置が液滴径分布に及ぼす影響を定量的に評価した．

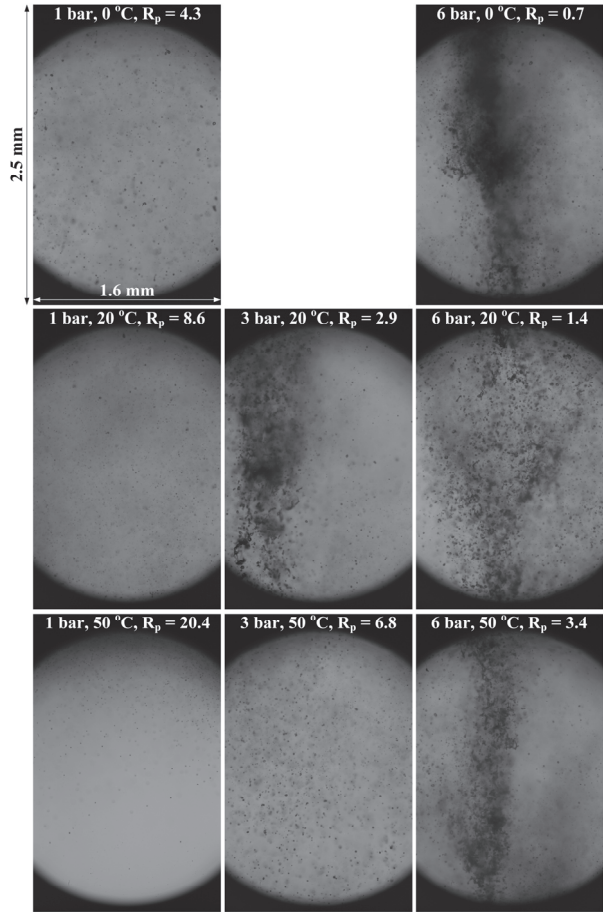


図２：各条件の液体アンモニア噴霧．

図３に液体アンモニア噴霧の粒子分布と液滴分布を示す．図のように，本実験によって得られた液体アンモニア噴霧は，数基準の粒径分布において小径液滴が支配的である一方で，体積基準の粒径分布では比較的大きな液滴の寄与が顕著となることが示された．また，液滴数密度は噴霧中心付近で高く，半径方向外側に向かって低下する傾向を示した．これらの結果は，噴霧内部における液滴分布が一様ではなく，噴霧中心部と周辺部で微粒化状態が異なることを示すものである．

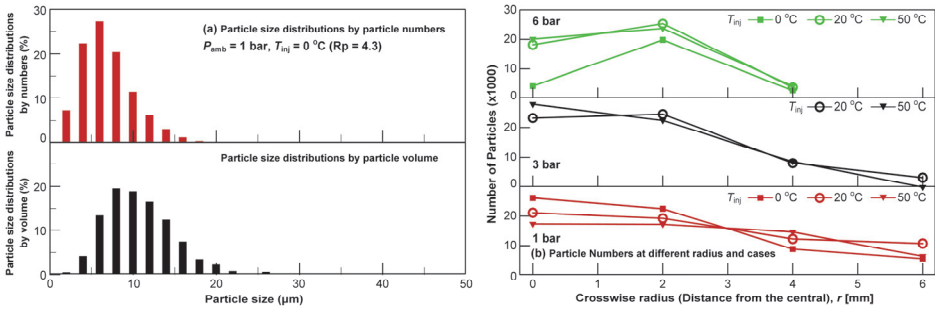


図３：液体アンモニア噴霧半径方向におけるの粒径分布と体積分布

図 4 に AMD と SMD の過熱度 Rp による変化を示す．過熱度 Rp が大きくなるにつれて SMD が低下する明確な傾向が確認された．これは，フラッシュ沸騰が液滴の分裂を促進し，より微細な液滴を生成することを示している．特にフラッシングの強い条件では，急速な蒸気生成および気泡崩壊により微粒化が促進され，液滴径が小さくなる傾向が顕著であった．したがって，燃料温度および雰囲気圧力により過熱度を制御することは，液体アンモニア噴霧の液滴径および噴霧構造を制御する上で有効である．

以上より，本研究は液体アンモニア噴霧のフラッシュ沸騰微粒化特性を実験的に明らかにし，アンモニア燃焼機器における燃料噴霧，混合気形成，および燃焼効率向上に資する基礎的知見を提供した．得られた液滴径分布および過熱度依存性のデータは，今後のアンモニア噴霧モデルの構築および検証に有用なベンチマークデータとなる．

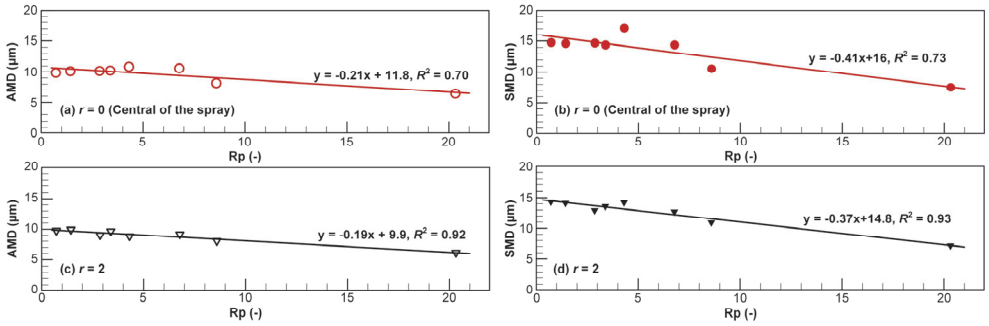


図 4：様々な減圧沸騰条件下における液体アンモニア噴霧の算術平均粒子径（AMD）およびザウター平均粒子径（SMD）の変化.

3. 研究目標の達成状況

本研究の主要な目標である「PIA(Particle Image Analyzer)を用いた間欠噴霧液体アンモニア液滴径計測」はおおむね達成された．一方，本研究は単孔ノズルおよび非燃焼場における計測を対象としているため，今後は多孔ノズルや燃焼場に実験条件に拡張し，噴霧特性と着火・燃焼挙動との関係を明らかにすることが課題である．

4. まとめと今後の課題

オルレアン大学における定容容器内に形成された液体アンモニア噴霧に対して PIA 法を適用し，液体アンモニア噴霧特性を明らかにした．今後の課題としては，まず，本研究で得られた非燃焼場における噴霧特性を，着火および燃焼挙動と関連付けて評価する必要がある．また，PIA により得られた液滴径計測結果の妥当性を検証するために，従来の噴霧粒径計測手法である PDPA（Phase Doppler Particle Analyzer）による計測結果との比較・検証を行うことも重要である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Y.R. Chen, A. Hayakawa, U. Sonawane, C. Hespel, C. Mounaïm-Rousselle: Near-Field Particle Image Analysis of Liquid Ammonia Sprays from a GDI Injector, ILASS Europe 2026, 34th Conference on Liquid Atomization & Spray Systems, 6th - 9th Sept. 2026, Lisbon, Portugal

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

区分	統合流動科学国際研究教育センター 戦略的共同研究プログラム
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	1 年目

燃料アンモニアに関する国際ワークショップ開催
International Workshop for Fuel Ammonia

徳増　崇*†
*東北大学流体科学研究所
†申請者

1. 研究目的

流体科学研究所では 2021 年度～2025 年度の間，Core to core プログラム「低炭素社会の実現に向けたアンモニア燃焼・材料国際研究交流拠点の構築」に採択され，燃料アンモニア研究に関して，リヨン大学(フランス)・アブドラ王立科学技術大学(サウジアラビア，以下 KAUST)，ワシントン大学(アメリカ)，国立陽明交通大学(台湾)との研究交流を推し進めてきた．このたび，2025 年度の ICFD の直後に燃料アンモニアに関するワークショップを行い，Core to core プログラムにおける研究交流の総括を行うとともに，シンガポールを含めた新たな拠点構築や外部資金獲得に関する議論を行う．

2. 研究成果の内容

2025 年 11 月 14 日に，流体科学研究所 2 号館 5 階大講義室において，流体科学研究所と強い連携を持つ諸外国の研究拠点を集めてワークショップを開催した．本ワークショップではリヨン大学連合，INSA-Rouen, KAUST，ワシントン大学，HYCOMS，流体研の 6 拠点が発表を行い，総勢 50 名程度の研究者が参加した．Core to core 関連のワークショップであったが，燃料アンモニアに限らず，今後の流体研の国際交流の核となる脱炭素エネルギー関連の研究に関して幅広く発表が行われた．また各拠点と流体科学研究所の共同研究やこれまでの連携の歩みなども発表され，活発な意見交換がなされた．また，ワークショップ終了後には Lunch Time が設けられ，各拠点の研究者が昼食をとりながら自由に Discussion を行った．本ワークショップにおける研究発表プログラムは以下の通りである．

Core-to-core Post ICFD workshop

2025 November 14 at IFS

Venue : Lecture Room, 5th Floor, 2nd building of Institute of Fluid Science, Tohoku University

9:30 - 9:40 Opening

Opening welcome: Prof. Takashi Tokumasu (Tohoku University)

9:40 – 12:20 Presentations from each base and discussion

(In this presentation, the presenter presents

- Collaboration between IFS and each base

- Decarbonization research including fuel ammonia or hydrogen at each base

and discuss about our stronger collaboration in the future.)

9:40 - 10:05 Prof. Nicolas Mary (INSA-Lyon)
10:05 - 10:30 Prof. Pradip Xavier (INSA-Rouen)
10:30 - 10:55 Prof. Mani Sarathy (King Abdullah University of Science and Technology)
10:55 - 11:20 Prof. Anthony Dichiara (University of Washington)
11:20 - 11:45 Prof. Epaminondas Mastorakos (University of Cambridge; The Cambridge Centre for Advanced Research and Education in Singapore)
11:45 – 12:10 Prof. Kaoru Maruta (Institute of Fluid Science, Tohoku University)

12:10 - 12:20 Closing
Closing Remarks: Prof. Epaminondas Mastorakos (University of Cambridge; The Cambridge Centre for Advanced Research and Education in Singapore)

12:20 - 14:00 Lunch and Photo



集合写真





Workshop, Lunch Time の様子

3. 研究目標の達成状況

本ワークショップの開催により，現在までに構築されてきた流体研と海外拠点との共同研究内容を流体研内外の研究者に広く周知させることができた．また本ワークショップでの Lunch Time 等における研究交流により，今後の新たな共同研究の構築にも繋がると考えられる．また，シンガポールを組み込んだ新たな枠組みの拠点構築や，それに必要な外部資金の獲得に関する議論も行われた．流体科学研究所が強く推し進めている脱炭素エネルギー研究の今後の発展に大きく寄与する会議となったと考えており，当初の目的は十分に達成したと考えている．

4. まとめと今後の課題

本ワークショップでは各拠点の研究者同士の相互交流を十分に図ることができたが，時間の制約の関係上，今回は若手研究者の発表を行うことができず，各拠点リーダーによる拠点

の研究紹介のみで終わってしまった感がある．今後は若手研究者の発表会が行えるように運営を行う必要があると感じた．

5. 交流成果

1）学術的価値

流体研では Core to core プログラムを通じて，多くの研究者が燃料アンモニアに関する国際共同研究を行っており，本ワークショップはその枠組みを脱炭素エネルギー研究にまで広げて展開するものである．特に 2026 年の 2 月にはこの会議の際に話し合われた国際交流の枠組みにより流体研の研究者数名が KAUST を訪問して研究発表を行うとともに，2026 年 3 月には Lyon とのワークショップ(ELyT Workshop)も開催され，非常に学術的価値の高い研究交流が行われた．

2）卓越研究大学 KPI を踏まえた将来発展可能性

流体研では 2026 年度から，脱炭素・革新製造プロセス国際センターを立ち上げている．本ワークショップの議論の内容はまさにその先駆けとなるものであり，本ワークショップで培われた国際連携が脱炭素センターの基盤になっている．また，このワークショップで得られた連携から多くの国際共著論文や学生交流が生まれる可能性があり，卓越研究大学の KPI に大きく貢献するものであると考えている．

3）その他特筆すべき成果

特になし

２．研究成果報告書

＜統合流動科学国際研究教育センター
燃料アンモニアサプライチェーン
公募共同研究プログラム＞

区分	統合流動科学国際研究教育センター 燃料アンモニアサプライチェーン公募共同研究プログラム
研究期間	2025.9 ~2026.3
継続年数	1 年目

低温廃熱を利用したゼロロス・アンモニア一水素変換プロセス開発

Zero-loss Hydrogen Production via Ammonia Decomposition Process Utilizing Low-temperature Waste Heat

笘居 高明*†，岩瀬 和至**
伊藤 尚良***，早川 晃弘***††
*東北大学　学際科学フロンティア研究所，**東北大学　多元物質科学研究所
***東北大学　流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

近年の化学メーカーでは，カーボンニュートラル化を見据え，プラスチック等の化学製品の原料の化石資源依存からの脱却が急務となっている．次世代の化学製品合成においては，バイオマスや CO_2 を原料とする必要があるが，そのためには脱酸素化処理が不可欠であり（例えばバイオマス(簡略表記 CH_2O)の脱酸素化による化学製品化(例：ポリエチレン CH_2 合成)の場合，$CH_2O+H_2=CH_2+H_2O$），生産量に比例した大きな水素需要が生じる．つまり，アンモニアを水素キャリアとしたサプライチェーンが構築される場合，化学産業ではアンモニアの分解による水素製造プロセスが不可欠となる．

アンモニア分解反応は，吸熱反応（$NH_3=0.5N_2+1.5H_2$ $\Delta H=46kJ/mol$）であり，外部からの熱供給を必要とする．これをアンモニアの燃焼熱で補い熱自立させる（$\Delta H=0$）場合（$1.12\ NH_3 + 0.09O_2 =0.56N_2+1.5H_2+0.18H_2O$）には，アンモニアの理論的水素転換率は最大でも 89%となることを意味する．コストを費やし海外から搬送してきた高いエクセルギーを有するアンモニアの 11%をロスしてしまうことは極めて不合理である(図 1).

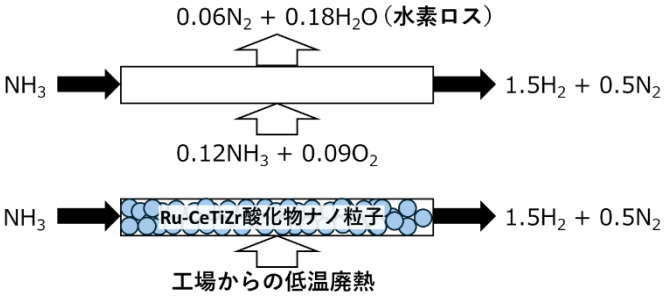


図 1 本研究で目指す低温廃熱利用ゼロロス・アンモニア分解水素製造

一方，産業から排出される廃熱は膨大であり，例えば 200～400℃に限っても年間 130 PJ におよぶ（「産業分野の排熱実態調査報告書」2019 年 3 月）．この低温廃熱でアンモニア分解の反応熱を補償すれば，水素転換率は 100%と出来る．これはシステム全体でみれば，低エクセルギーの低温熱が高エクセルギーの水素に転換していることと同義であり，工学的に極めて高い意義を有する．以上を背景として，本研究では，低温排熱を利用したアンモニアからの水素製造の高効率化を目指し，そのカギとなる「アンモニア分解反応の低温化」を目的とする．

2. 研究成果の内容

アンモニア分解反応を低温化するには，Ru 触媒の活性向上がカギとなる．近年，還元された CeO_{2-x} から Ru 触媒に電子を供給することでアンモニア分解活性の向上が可能であることが提案されており，本研究では笘居らが近年開発した CeZrTi 酸化物ナノ粒子（図 2，特許出願手続き中）を触媒担体として転用し，電子供与性の著しい向上に基づく低温アンモニア分解活性向上を試みた．

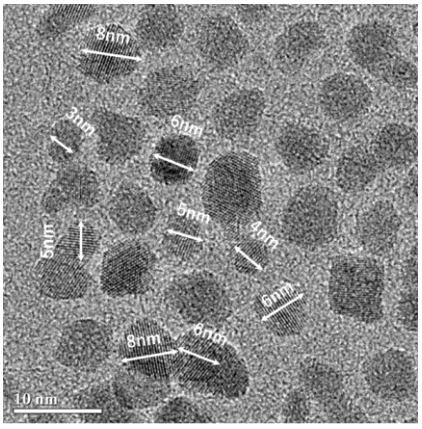


図2 近年開発した CeZrTi 酸化物ナノ粒子

本粒子は従来の CeO_2 ナノ粒子と比較し，酸素貯蔵脳 OSC (Oxygen Storage Capacity)が 10 倍以上にまで向上している．CeO_2 中の Ce は，周囲に電子を供与しながら Ce^{3+}から Ce^{4+}に価数変化する．この価数変化は，酸素供給時に酸素空孔への酸素貯蔵として観察されることから，高い OSC は本粒子の高い電子供与能の顕れとみなすことができる．

合成した CeZrTi 酸化物ナノ粒子に Ru を担持した後，流体科学研究所・早川准教授グループ保有のアンモニア分解反応試験装置を利用し，アンモニア分解反応試験を実施した．

内径 6 mm の石英管に上記ナノ粒子 500 mg を充填し，両端に石英ウールを詰め，管内で位置を固定した．環状炉の均熱帯にナノ粒子充填部が収まるように石英管をセットし，500℃に昇温後，50 sccm の設定でアンモニアガスを流通した．出口において，ガスを捕集し，水素濃度を分析することで，アンモニアの転換率を算出した．

結果を図 3 に示す．測定開始から 50 分程度経過した段階で，リアクターを通過したガスが，検出器まで到達したと考えられ，最大で 60%程度の転換率が達成されていることが分かる．その後，時間経過とともに転換率が徐々に低下した．

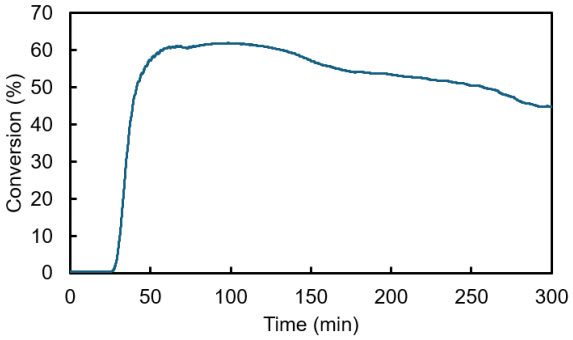


図3　アンモニア分解試験結果

3. 研究目標の達成状況

これまでの検討で得られた転換率は，目標として掲げた 90%を下回るものであった．その原因として，触媒サンプルの充填状態が挙げられる．前述の結果は，粉末サンプルを石英管に充填したものであるが，粉末サンプルを石英管に密に充填した状態では配管抵抗の増大による流量の低減，さらには，触媒充填箇所が移動し均熱帯から離脱してしまう現象が見られた．それを回避するために，粉末サンプルを石英管に疎に充填した場合では，初期はガスの吹き抜けが生じ，さらに時間経過後は，触媒粒子が移動し下流部で密な状態となり，当初から密に詰めた場合と同様の結果となってしまった．

現在この充填状態の改善にすでに取り組んでおり，ナノ粒子を圧粉成形し，砂粒状に加工したペレットサンプルを作製している．このペレット化サンプルでは，密に充填しても，配管抵抗が増大しないことを確認できており，今後はサンプルのペレット化を前提として，検討を継続していく．

4. まとめと今後の課題

近年開発された CeZrTi 酸化物ナノ粒子に Ru を担持した触媒を用い，アンモニア分解反応試験を実施し，本触媒でアンモニア分解反応が進行することを確認することができた．これまでの検討で得られた転換率は，目標として掲げた 90%を下回るものであったが，触媒の充填状態を改善し，反応部の配管抵抗を低く抑えた状態で，かつアンモニアガスが拡散し粒子一つ一つへのアクセスが実現するようなペレット化条件および運転条件を最適化することで，転換率の向上の余地が大いにあると考えている．

今後は，分解能の空間速度(SV)依存性の検証も含め，プロセス条件，およびペレット化条件の最適化を進めていく予定である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

なし

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）「酸化物ナノ粒子およびその製造方法」出願準備中

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

区分	統合流動科学国際研究教育センター 燃料アンモニアサプライチェーン公募共同研究プログラム
研究期間	2025.9 ~2026.3
継続年数	1 年目

アンモニアの電気エネルギー変換を指向した酸化還元活性な分子性触媒の創出

Creation of Redox-Active Molecular Catalysts
for the Conversion of Ammonia into Electrical Energy

芳野　遼*†, 伊藤 千紗*, 徳増　崇**††, 宮坂　等*
*東北大学金属材料研究所, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

高いエネルギー密度を有し，燃焼時に二酸化炭素を排出しない「アンモニア」(NH_3) が次世代のクリーンエネルギー資源として注目を集めている．本研究では，NH_3 自身をエネルギー源として用いる「直接アンモニア燃料電池」(Direct Ammonia Fuel Cell; DAFC) に着目した．NH_3 を直接燃料電池に使用できれば電気エネルギーを取り出す過程で CO_2 が排出されず，さらに H_2 を扱う上での課題 (貯蔵，安全性，エネルギーコストなど) の大幅な改善が見込まれるため，高効率な DAFC 技術の開発は産学官の各方面に対して基礎科学・応用研究双方の観点から極めて大きな波及効果が期待される．しかし，多電子酸化反応を伴う NH_3 から N_2 への変換は中間種の不安定性や N–N 結合生成など複数の変数を持つ高難易度の触媒反応であるため，DAFC に適した動作電位で高活性な NH_3 酸化反応 (AOR) を可能にする電極触媒の開発が重要な課題である．

本課題では，酸化還元電位を自在に変調可能，かつ金属–金属結合により優れた構造安定性を示す水車型ルテニウム二核 (II,III) 錯体 (**[$Ru_2^{II,III}$]**) の網羅的合成を通し，DAFC を指向した高活性な AOR 材料の設計指針の確立を目的とした．

2. 研究成果の内容

研究 1. 酸化還元電位の精密制御が可能な [$Ru_2^{II,III}$] の系統的開発

本研究の最初のステップとして，様々な 2-hydroxypyridine (hp) 類縁体を用いて **[$Ru_2^{II,III}$]** の系統的合成を行った．具体的に，新規の **[$Ru_2^{II,III}$]** ([$Ru_2^{II,III}$(4X-5Yhp)$_4$(THF)Cl] (**5Br**; X = H, Y = Br, **5Cl**; X = H, Y = Cl, **5Me**; X = H, Y = CH_3, **5NO$_2$**; X = H, Y = NO_2, **4Me-5Br**; X = CH_3, Y = Br)) を系統的に合成し，SPring-8 などの放射光施設での構造・電子状態解析を含めた精密構造解析に成功した (図 1)．**[$Ru_2^{II,III}$]** の合成は前駆体である[$Ru_2^{II,III}$(OAc)$_4$Cl] (OAc^-＝酢酸塩) を hp 配位子と反応させ，THF 中で還流することで目的の化合物が得られた．化合物の同定は，元素分析・赤外分光法 (IR)・ラマン分光法を用いて実施した．IR スペクトルでは hp 配位子に特徴的な吸収バンドが観測され，さらにラマンスペクトルでは Ru-Ru 結合に起因する振動モードが観測された．また，得られた結晶構造は，4 つの hp 配位子が **[$Ru_2^{II,III}$]** コアに完全に極性な (4:0) 配置で配位したパドルホイール型構造を形成することが分かった．特に，**[$Ru_2^{II,III}$]** コアの軸方向位置では，hp 配位子の 4 つの酸素原子に囲まれた Ru 原子が，再結晶溶媒として使用される THF 分子と結合しており，脱溶媒によって NH_3 に対する相互作用部位として機能することが期待できる構造であることが分かった．また，**[$Ru_2^{II,III}$]** の Ru–Ru 結合長は約 2.3 Å であり，これは先行研究の結果と比較すると結合次数が 2.5 であるこ

とを示唆している．先行研究で合成したカルボキシレート架橋の **[Ru$_2$]** 錯体では，Ru–O$_{eq}$（O$_{eq}$= エクアトリアル酸素原子）結合距離が **[Ru$_2$]** ユニットの電子状態を評価するための優れた指標であることが広く知られている．**[Ru$_2^{II,III}$]** の Ru–O$_{eq}$ 結合長は 1.99–2.00 Å の範囲であり，従来のカルボキシレート架橋の **[Ru$_2$]** 錯体の Ru–O$_{eq}$ 結合距離 (**[Ru$_2^{II,III}$]** の場合は 1.97–2.00 Å) と非常に近い値を示すことが分かった．つまり，Ru-O$_{eq}$ 結合長は，カルボキシレート架橋の **[Ru$_2$]** 錯体以外にケースでも電子状態を推測するための指標として使用できることがわかった．さらに，**[Ru$_2^{II,III}$]** の電子状態を詳細に調べるため，H = 1 kOe，1.8～300 K の温度範囲で磁化率 (χ= M/H) の温度依存測定を実施した．その結果，新規化合物の $\chi_M T$ 値は冷却過程で徐々に減少し，100 K 以下では急激に減少した．χ_M および $\chi_M T$ vs. T プロットは，中程度のゼロ磁場分裂 (ZFS; 一般的な **[Ru$_2^{II,III}$]** 錯体では $D \approx 69-119\ \mathrm{cm^{-1}}$) の影響を受ける S = 3/2 基底状態を持つ孤立した **[Ru$_2^{II,III}$]** 錯体の特徴を示しており，ZFS を考慮した S = 3/2 の Curie 常磁性モデルを使用してシミュレーションからも実験結果の妥当性が確認された．

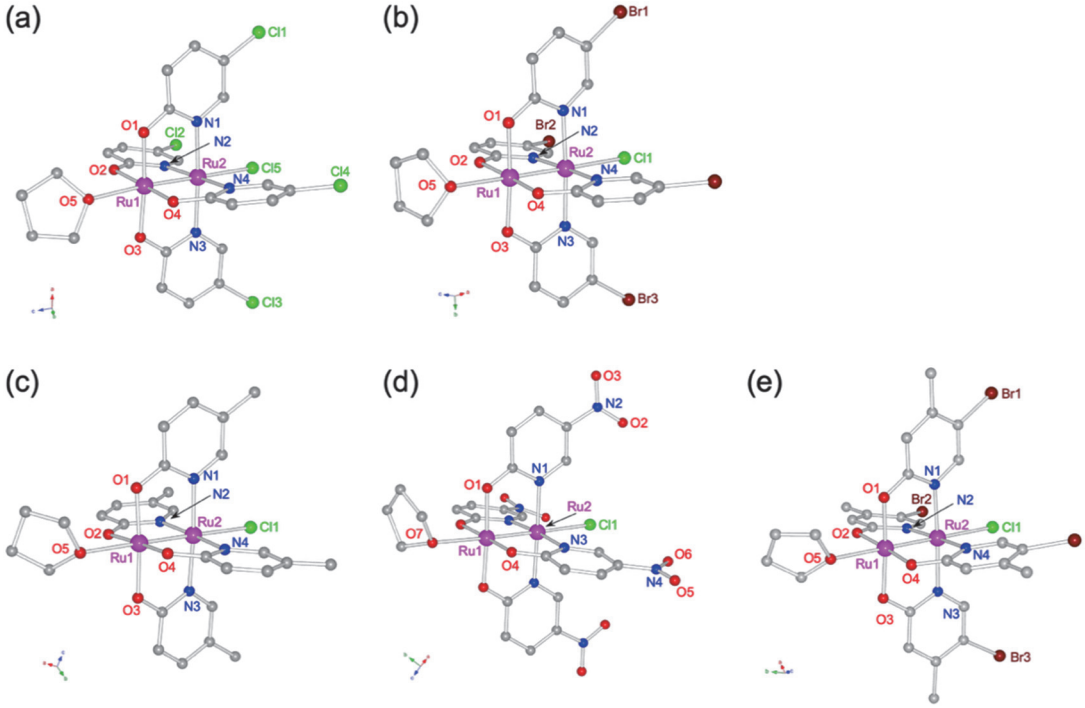


図 1：本研究で合成した **[Ru$_2^{II,III}$]** の結晶構造．(a) **5Cl**, (b) **5Br**, (c) **5Me**, (d) **5NO$_2$**, (e) **4-Me-5Br**．Displacement ellipsoids は 50%の確率レベルで描画されている．原子の色分け：Ru（ピンク），C（灰色），N（青），O（赤），Cl（黄緑色），Br（茶色）．図を見やすくするため，水素原子および結晶溶媒分子は省略されている．

本研究で合成した **[Ru$_2^{II,III}$]** の電気化学特性は配位子の置換基効果により精密に制御可能であり，Hammett 定数から酸化還元電位の傾向も予想できると考えたため，*n*-Bu$_4$N(PF$_6$) 支持電解質と Ag / Ag$^+$ 参照電極を用い，THF 溶液中で **[Ru$_2^{II,III}$]** のサイクリックボルタンメトリー (CV) を測定した (電気化学測定は窒素ガス雰囲気下のグローブボックス内で実施した). その結果, **[Ru$_2^{II,II}$]** / **[Ru$_2^{II,III}$]** に帰属される可逆な酸化還元波が観測された (図 2(a)), 想定通り **[Ru$_2^{II,III}$]** の電気化学特性は配位子の置換基効果により精密に制御できることが分かった (図 2(b)). 実際に, **[Ru$_2^{II,III}$]** の酸化還元電位も Hammett 定数と良好な関係を示し, さらに従来のカルボキシレート架橋の **[Ru$_2$]** 錯体よりも配位子効果が大きいことが明らかになった (図 2(c)).

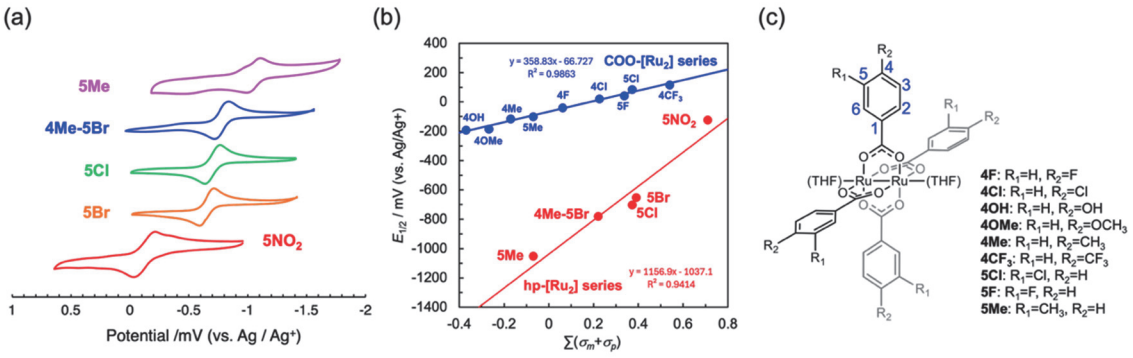


図 2：**[Ru$_2^{II,III}$]** の電気化学特性

実験的なアプローチだけでなく，流体研の徳増教授のご支援のもと，**[Ru$_2^{II,III}$]** の結晶構造に基づいた DFT 計算を行い，分子軌道 (MO) のエネルギー準位を評価した．すべての化合物において，**[Ru$_2^{II,II}$] / [Ru$_2^{II,III}$]** レドックス対に関与する LUMO は，δ*(β)フロンティア軌道に割り当てられ，図 3 には δ*(β) (LUMO) のエネルギー値を示している．その結果，**5Me** は –CH_3 基の強い電子供与性効果により比較的高い LUMO エネルギー (−3.151 eV) を示す一方，**5NO$_2$** は –NO_2 置換基の強い電子吸引性を反映して，著しく低い LUMO エネルギー (−4.736 eV) を示した．また，LUMO エネルギー準位の変動は，対応する配位子の pK_a 値および実験的に求められた酸化還元電位と直線的な相関関係を示した．

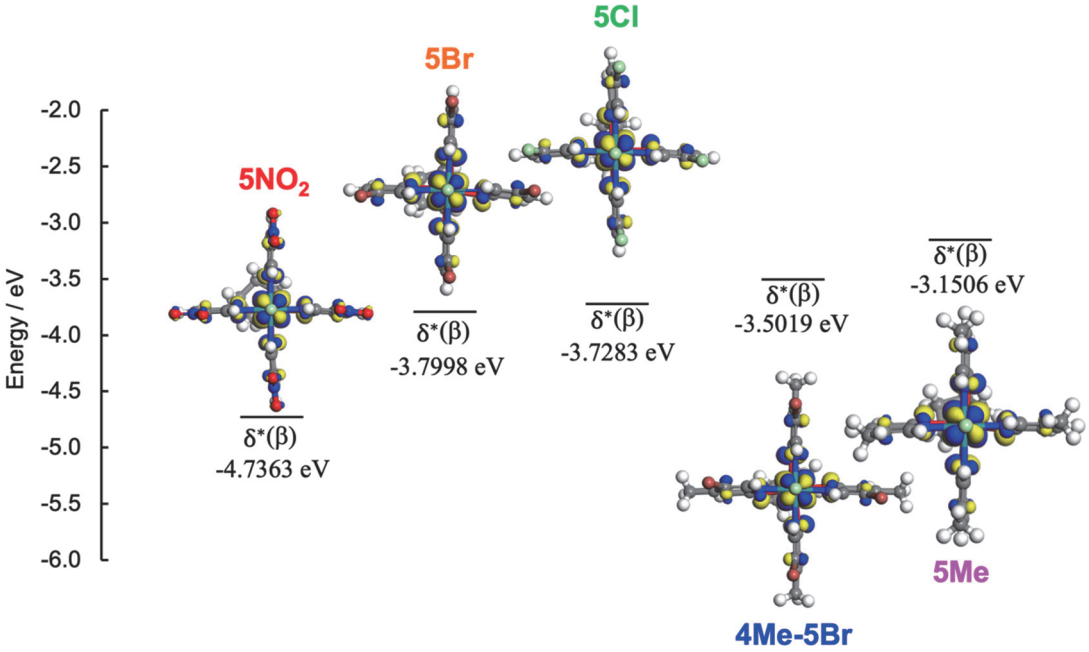


図 3：本研究で合成した **[Ru$_2^{II,III}$]** の結晶構造に基づいた δ*(β) (LUMO) のエネルギー図

研究 2. [Ru$_2^{II,III}$] を用いた高活性 AOR の発現・機構解明

研究 1. の成果を踏まえ，申請者はさらに新規錯体 (図 4(a)の上図) を合成し，DAFC を見据えた AOR の検証に取り組んでいる．具体的に，この錯体の NMP 溶液に NH_3 を加えると **[Ru$_2^{II,III}$]** は電子状態変化を示唆する色調変化を示し (図 4(a)の下図)，さらに電気化学測定では先行研究のどの化合物よりも低い酸化還元電位 (−0.499 V *vs.* $Fc^{+/0}$) が観測された (図 4(b))．この傾向は，戦略通り hp 配位子を用いたことによる誘起効果と共役効果が寄与していると考えられる．重要なことに，サイクリックボルタンメトリー (CV) 後の溶液を再結晶

すると 1 価の TBA カチオンを含む **[$Ru_2^{II,II}$]** 還元種が得られ，X 線構造解析にも成功したことから，NH_3 導入による **[$Ru_2^{II,III}$]** から **[$Ru_2^{II,II}$]** への還元に伴う NH_3 の酸化が示唆された (図 4(c))．実際に，定電位測定後にガス定量を行うと，N_2 および H_2 の生成が確認され，本研究のコンセプト・研究計画の妥当性を示す結果が得られた．

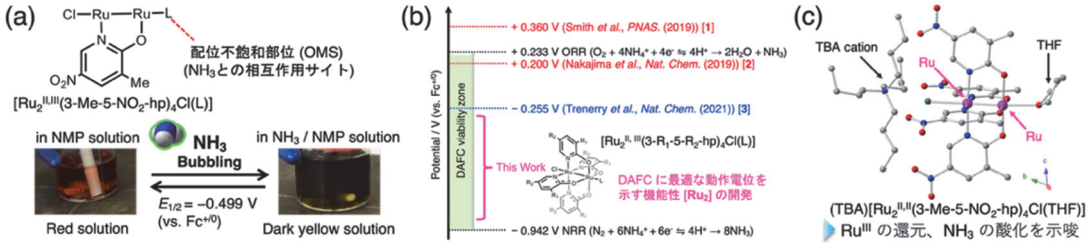


図 5 : (a) 新規 **[$Ru_2^{II,III}$]** の基本構造，および NH_3 導入後における色調変化，(b) AOR 材料に関する先行研究のまとめ，(c) CV 後に再結晶した化合物 (**[$Ru_2^{II,II}$]** 還元種) の結晶構造

3. 研究目標の達成状況

2. 研究成果の内容 (研究 1, 2) の成果より，本研究で開発した **[$Ru_2^{II,III}$]** は NH_3 を酸化することで錯体自身は還元され，そして **[$Ru_2^{II,II}$]** の酸化が非常に低い電位で進行するため，これまでで最も低い電位でアンモニアを触媒的に酸化する可能性を示した．この結果は，本研究課題の申請書の「予想される成果」で記載した，DAFC を指向した AOR 触媒開発に関して重要な基盤的知見となり得ると考えられ，当初の見込み通りの成果が得られてきている状況である．また，研究 1. の内容についてはすでに学術論文を執筆しており，各共同研究者の最終確認を行った後に投稿予定である．

4. まとめと今後の課題

本共同研究プログラムでは，実験 (芳野・金研)・理論 (徳増・流体研) の有機的な連携体制により，短い研究期間ながらも機能性錯体の精密な電気学特性の制御に成功し，さらに本研究コンセプトである AOR の基盤的知見を得ることに成功した．

本研究では DAFC を指向した触媒材料の開発を目指しており，触媒の電極への固定化が課題として考えられるため，今後は**[$Ru_2^{II,III}$]** の不均一触媒化に取り組み，未踏の高機能性 AOR 材料の創出に挑戦する．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし(研究 1. の共同研究成果を，2026 年度前期に査読ありの国際学術誌へ投稿予定)

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 芳野 遼, 伊藤千紗, 高坂 亘, 宮坂 等: 柔軟かつ階層的な多孔性空間を有する錯体ソフトマテリアルの合理的構築および機能開拓，令和 7 年度日本表面真空学会東北・北海道支部学術講演会，(2026), O-03.

(2026 年度に 2 件の学会発表予定)

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

区分	統合流動科学国際研究教育センター 燃料アンモニアサプライチェーン公募共同研究プログラム
研究期間	2025.9 ~2026.3
継続年数	1 年目

高純度な多孔性高分子の空孔表面修飾による革新的アンモニア吸着材の開発とシミュレーションによる最適化

Development of Innovative Ammonia Adsorbents by Modifying the Pore Surfaces of High-Purity Porous Organic Polymers and Optimization by Simulation

大窪 航平*†，高奈 秀匡**††
岡　弘樹*，金子　泰**
*東北大学多元物質科学研究所，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

二酸化炭素を排出しない発電方法として，液体アンモニアのみを燃料とする火力発電が注目されている．しかし，アンモニアの難燃性に起因して，特に発電所の始動時に ppm オーダーの未燃アンモニアが排出されることが，実用化に向けた課題となっている．本研究では，この課題を解決するため，吸着材を用いた未燃アンモニアの分離・回収技術に着目する．しかし，既存の吸着材であるゼオライトは，弱いファンデルワールス力（物理吸着）でアンモニアを吸着するため，低濃度のアンモニアに対する吸着容量が低く，この課題を解決するには不十分である．そこで本研究は，高純度の多孔性高分子表面に化学吸着を担う酸性の官能基を導入し，燃料アンモニア利用時に排出される低濃度の未燃アンモニアに対して高い吸着性能を示す，新規アンモニア吸着材を開発することを目的とする．本吸着材は，酸・塩基間の強い相互作用を利用するため，低濃度のアンモニアに対しても高い吸着容量を示す．さらに，吸着したアンモニアは減圧または昇温のような温和な条件下で容易に脱離し，再利用可能な高濃度のガスとして回収できるため，大気へのアンモニア排出削減と燃料利用効率の最大化を両立できる．加えて，数値シミュレーションと組み合わせることで，吸着・分離プロセスを最適化し，材料の吸収性能を最大化できる．したがって本研究は，流体・材料を統合する新たな学術基盤を創出するものであり，流体科学研究所との共同研究により，アンモニアの燃料としての利用を促進し，燃料アンモニアの国際サプライチェーンの構築を加速させるものである．

2. 研究成果の内容

（研究 a）高純度な多孔性高分子の合成法の確立

既存のアンモニア吸着材であるゼオライトは細孔内での弱い相互作用（物理吸着）でガスを捕捉するため，低濃度のアンモニアに対する吸着容量が低いという課題がある．一方，有機分子から成る吸着材である金属有機構造体（MOFs）や共有結合性有機構造体（COFs）は，空孔表面へアンモニアを捕捉する酸性官能基を導入できることから，低濃度アンモニアへの高い吸着容量が期待できるが，アンモニアのような反応性の高いガスに対する安定性が乏しい．これらの課題を解決するため，アンモニアに対する高い化学的安定性をもち，かつ酸性官能基を導入できる多孔性高分子に着目した．しかし，多孔性高分子の合成には一般的に金属触媒が用いられており，合成後に材料中に残留した金属不純物が微細な空孔を埋め，吸着性能を著しく低下させるという課題があった．そこで本研究では，**図 1a** に示すように，ヨウ素を触媒として活用した高純度な多

孔性高分子の合成法を確立した．モノマー，架橋剤，ヨウ素を溶媒中で反応させることで多孔性高分子（**pBn**）を合成した．**図 1b** に示すように，マトリックス支援レーザー脱離イオン化飛行時間型質量分析法（MALDI-TOF MS）で得られた **pBn** の分子量を確認したところ，モノマーがメチレンで架橋された化合物に対応するピークが存在し，重合反応が進行していることが示された．続いて，触媒として使用したヨウ素は，合成後の有機溶媒での洗浄により完全に除去された．**図 1c** に示すように，微量な元素成分を分析できる X 線光電子分光法（XPS）で材料の純度を評価した結果，**pBn** 中に残存したヨウ素および金属不純物は検出限界である 100 ppb 以下であることが示された．

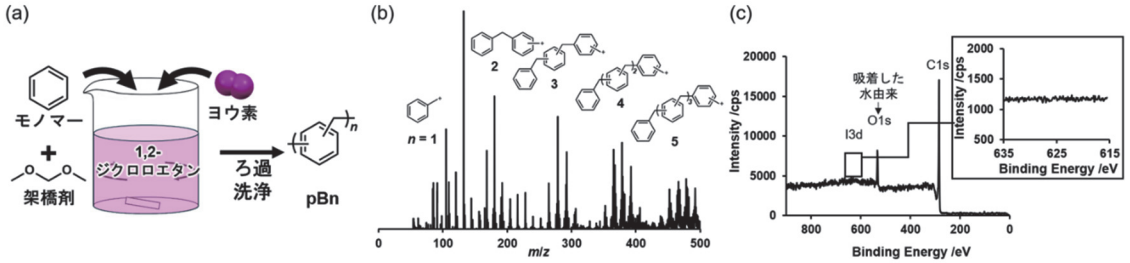


図 1：(a) ヨウ素を触媒とする多孔性高分子の合成法の概要図．**pBn** の（b）MALDI-TOF MS スペクトルおよび（c）XPS スペクトル．

（研究 b）空孔表面への酸性の官能基の導入

図 2a に示すように，得られた **pBn** をクロロスルホン酸と反応させることで，骨格へのスルホ基の導入を試みた．導入された官能基の割合を確認するため，材料の元素組成を定量できる XPS を用いて評価したところ，**図 2b** に示すスルホ基を導入したポリマー（**pSBn**）のスペクトルから，スルホ基の導入率は 24%であると推定された．**図 2c** に示すように，**pSBn** の現時点での吸着容量（3.5 mmol/g@0.1 kPa）はゼオライト（6.0 mmol/g@0.1 kPa）を上回るには至っていないが，物理吸着に依存するゼオライトは高温下で吸着性能が著しく低下するのに対し，本材料は酸・塩基間の強い化学吸着を利用するため，200℃のような高温環境下においてはゼオライトの吸着容量を上回ることが確認された．これは，高い熱的安定性と化学吸着サイトを兼ね備える多孔性高分子ならではの結果である．今後は，官能基の導入量や細孔構造の制御など，反応条件をさらに最適化することで，25℃のような温和な条件を含む幅広い温度域でゼオライトを上回る吸着容量を達成できる見通しが得られた．

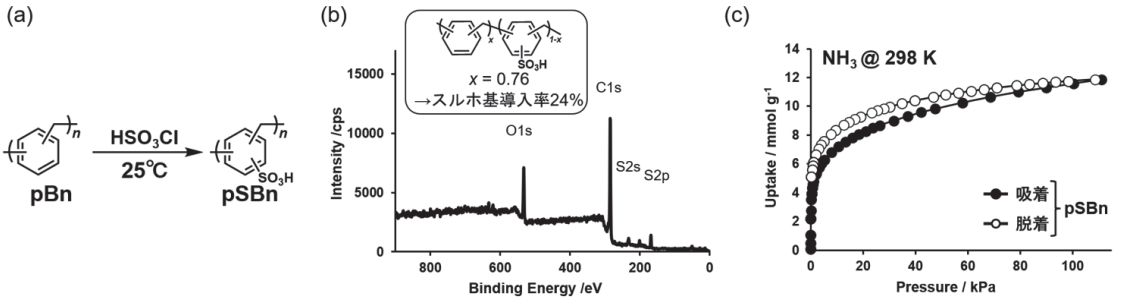


図 2：(a) **pBn** のスルホン化の反応式．**pSBn** の（b）XPS スペクトルおよび（c）298 K におけるアンモニアの吸脱着等温線

（研究 c）数値シミュレーションを駆使した吸着・分離プロセスの最適化

インフローによるペブル型吸収システム（インフローリアクタ）を用いた吸着・分離プロセスの数値シミュレーションモデルの構築には，使用する吸着材の総括反応速度や最大吸着量といっ

た基礎的なデータが必要である．本年はまず，実験系の確立に取り組んだ．**図 3a** に示すように，吸着材を充填したリアクタへ，アンモニアガスをマスフローコントローラにより流入する．流出側において設置した濃度計により計測された吸着材充填前後でのアンモニア濃度の差から，本吸着剤の最大吸着量を計測するとともに，濃度の経時変化から吸着速度を明らかにする．ただし，吸着性能の温度依存性を加味し，リアクタおよび濃度計は，恒温槽内部に設置し，一定温度下で実験を行う．**図 3b** にリアクタ内部構造の詳細を示す．外円筒と内部の円筒型フィルタによる同軸二重円筒構造となっており，円筒型フィルタの内側に吸着材を充填する．リアクタへ流れ込んだガスは２つの円筒間ギャップへと流れ，フィルタを通過して円筒内側へ流入し，吸着材層を通過して流出する．

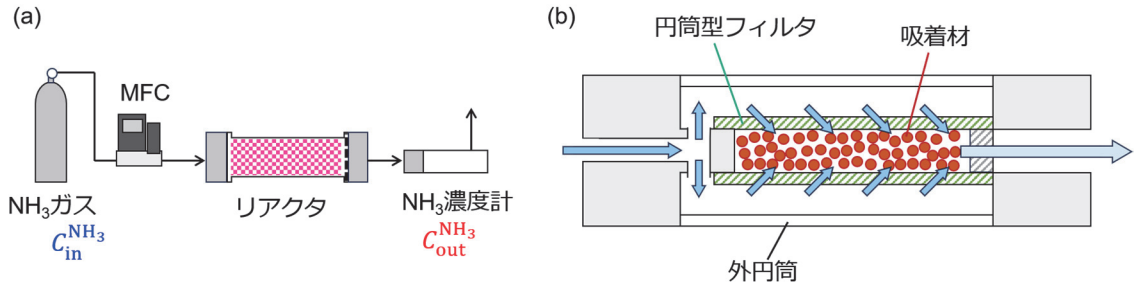


図 3：(a) アンモニアガス吸着・分離システムおよび (b) インフローリアクタ内部構造

3. 研究目標の達成状況

多孔性高分子への酸性の官能基での修飾により，低濃度のアンモニアに対し，既存の吸着材を凌駕する高い吸着容量を示す革新的なアンモニア吸着材の開発を目標として研究を進めた．アンモニア吸着に有利な微細孔を有する高純度な多孔性高分子の合成には成功したものの，現段階での吸着容量はベンチマークであるゼオライトを上回るには至っていない．目標達成に向けて，材料合成および官能基修飾における反応条件の最適化という課題が明確になった．また，数値シミュレーションモデルの構築に向け，ペブル型インフローリアクタの設計および吸着性能評価試験のための実験環境を構築した．これにより，数値シミュレーションにおいて必要となる基礎物理データの取得が可能となった．

4. まとめと今後の課題

本研究により，ヨウ素を使用した重合法による高純度多孔性高分子の合成と酸性官能基の導入に成功した．今後は，小規模施設向けのアンモニア回収ユニットの実用化を見据え，ゼオライトを凌駕する吸着容量を達成するため，細孔径分布および官能基密度を最適化するとともに，実機への充填を想定した材料の粒子径制御を進める．また，材料の繰り返し使用による高い経済性を実証するため，圧力スイングを利用した吸着・脱離サイクルを設計し，耐久性を評価する．これらを通じて，燃料アンモニアサプライチェーンを支える社会実装可能な基盤技術を創出する．これまでに構築した実験環境により，インフローでのガス吸着試験を実施し，数値シミュレーションモデルの構築に向けた基礎物理データを取得する．具体的には，既知濃度のガスを流入させ，吸着に伴う濃度変化を流路出口で計測し，吸収特性曲線を得る．これにより，最大吸着量や反応速度に関する知見を得る．これらの知見を踏まえ，実際に数値シミュレーションを行い，ユニット形状やガス流速，吸着材充填率の影響を明らかにし，最適なプロセス設計に資する知見を得る．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] K. Okubo, K. Omote, H. Kasai, K. Oka, “Synthesis of High-Purity Porous Organic Polymers and Exploration of Their Inherent Functionality”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 18 (2026), 19962-19971, doi: 10.1021/acsami.6c00001.

[2] K. Omote, K. Okubo, H. Kasai, K. Oka, “Development of carbazole-based porous organic polymers with large pore volume via iodine-based chemical polymerization”, *Polymer Chemistry*, under review.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[3] K. Okubo, H. Kasai, K. Oka, “Development of High-Purity Porous Organic Polymers by Iodine-Based Chemical Polymerization”, *Applied Materials & Interfaces Conference 2025*, Singapore, (2025).

[4] K. Omote, K. Okubo, H. Kasai, K. Oka, “Development of Iodine-Based Chemical Polymerization for High-Purity Porous Organic Polymers”, *2025 JOINT SYMPOSIUM-National Taipei University of Technology and Tohoku University (IMRAM)*, Taiwan, (2025).

[5] K. Omote, K. Okubo, H. Kasai, K. Oka, “High-Purity Carbazole-Based Porous Organic Polymers toward Efficient Iodine Capture”, *Chemistry Summer School 2025*, Miyagi, (2025).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

２．研究成果報告書
＜リーダーシップ共同研究＞

Project Code	J25L039
Classification	Discretionary Collaborative Research
Subject Area	Nano-micro
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	2nd year

Experiment and Molecular Dynamics Simulation for Plasma-dependent Interface

Siwei Liu*†, Kosuke Tachibana**††
Tomoki Nakajima*, Takehiko Sato*
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Faculty of Science and Technology, Oita University
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Halogenated organic compounds (HOCs) are persistent pollutants that are difficult to decompose because of their strong carbon-halogen bonds. Plasma-based treatment is a promising approach for degrading these compounds, as it generates highly reactive species at the gas-liquid interface under relatively mild conditions. However, the interfacial processes governing plasma-driven reactions remain poorly understood. Therefore, this project aims to clarify plasma-dependent interfacial dynamics through experiments and molecular dynamics (MD) simulations, and to provide fundamental knowledge for efficient plasma-assisted dehalogenation technologies.

2. Details of program implement

Plasma was generated at the gas-liquid interface using a tungsten needle electrode connected to a pulsed high-voltage power supply. This configuration enabled short and controllable pulsed discharges toward the water surface. Schlieren visualization of the flow is shown in Figure 1, revealing a circular flow structure inside the liquid induced by the plasma. The results suggest that charge accumulation at the interface can modify the flow behavior through the establishment of an asymmetric electric field.

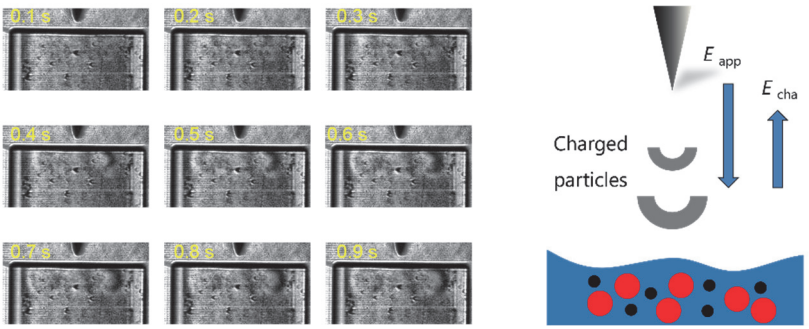


Figure 1: Schlieren visualization for the flow and the electric field induced by charges.

MD simulations were performed to investigate the penetration of energetic Ar^+ ions into the water surface. Repeated simulations were carried out to evaluate ion penetration depth and interfacial deformation. For each ion energy condition, 100 independent simulations of 100 ps were conducted to ensure statistical reliability. The results, shown in Figure 2, demonstrate the penetration distance of charge into the liquid. By varying the ion kinetic energy, the model enabled analysis of ion penetration, local surface deformation, and interfacial energy transfer. This computational framework provides microscopic insight into the early-stage processes associated with plasma-liquid interactions, including charge accumulation and the structural response of interfacial water molecules.

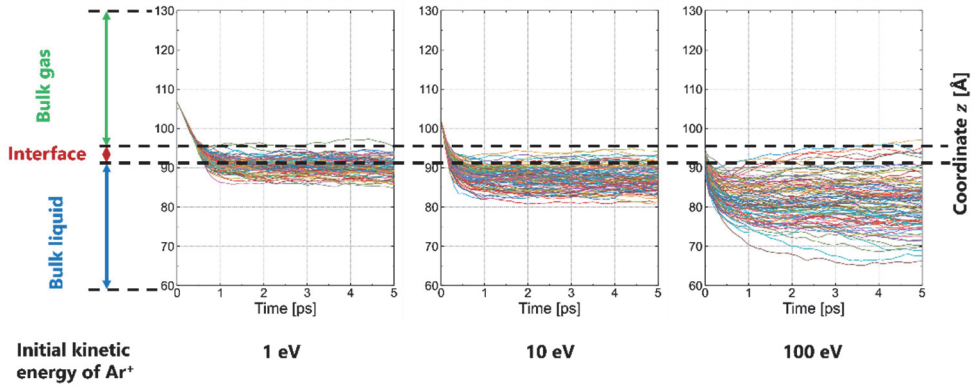


Figure 2: MD simulation results for the penetration distance of charge into the liquid.

3. Achievements

Schlieren visualization successfully captured plasma-induced flow motion in the liquid phase and revealed the formation of a circular flow structure near the interface. The results also indicated that interfacial charge accumulation influences the flow behavior. MD simulations studied the penetration of Ar^+ ions into the liquid. The simulations showed that the penetration depth and degree of surface deformation depend strongly on the ion kinetic energy. These results offer direct microscopic evidence of energy transfer and charge transport across the gas-liquid interface.

4. Summaries and future plans

Experimental visualization and MD simulation were used to investigate interfacial dynamics at the gas-liquid boundary. These results provide new insight into the role of charge and energy transfer at the plasma-liquid interface, which is important for understanding plasma-assisted degradation of halogenated organic compounds. In the next period, we will further develop the MD model to better describe charge transport from the interface into the bulk liquid, and we will strengthen the quantitative comparison between the experimental flow visualization and the simulation results.

5. Research results

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

Not applicable

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] D. B. Preso, Siwei Liu. Effect of Dissolved Gas on Cavitation Bubble Dynamics. *25th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, 2025, CRF-55, pp.157-159.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

課題番号	J25L056
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~2026.3
継続年数	1年目（発展）

カーボンフリー燃料の噴射制御に関する研究
Study on the Injection Control of Carbon-Free Fuels

川原田 光典*†，大島 逸平**††
*交通安全環境研究所，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

低炭素社会の実現にむけて，燃料アンモニアなどカーボンフリー燃料は社会を支えるエネルギー分野で次世代燃料として注目されている．それらはエネルギー分野の大型内燃機関のみならず，輸送分野の小型内燃機関でも活用することが可能である．内燃機関の特徴として始動から定格運転，過負荷まで幅広い運転領域が必要であることがあげられる．この運転領域拡大のためには内燃機関に供給する燃料噴射の緻密な制御が必要である．アンモニアの液化特性は従来燃料の LPG と近く，燃料噴射系において液相から気相への相変化が容易に発生する．そのためインジェクタ内で生じるキャビテーションや噴孔でのフラッシュボイリングなどの現象が燃料噴射後の噴霧形成を支配し，内燃機関の出力に直結する燃焼過程に影響するものと考えられる．しかし，噴射時のインジェクタ内流動やインジェクタ近傍での可視化・光学計測は容易でないため，噴射過程およびその後の噴霧形成過程について十分に理解されていない．そこで本研究では，実機ノズルを参考に相変化の生じやすい箇所を検討し，該当箇所の拡大モデルなどを用いた実験により噴射過程における相変化の影響を調査する．将来的には，噴射量や噴射圧，ノズルのさらされる環境温度などの運転条件等をパラメータとする噴射過程のモデル化と，それによる制御方法の検討を実施する．

2. 研究成果の内容

小型エンジンに燃料アンモニアを利用した研究として，国際エネルギー機関 (IEA)で実施されたコラボレーションプログラムのレポートなどがあるものの，いずれも運転条件が限られる．さらにこれらの研究は主として燃焼に着目しており，燃料噴射/混合気形成は十分に検討されていない．アンモニアは，噴射時に急激な相変化が生じると燃料物性から想定されるため，従来の液体燃料噴射制御技術をどの程度流用できるのか不明である．そこでアンモニアを液体用インジェクタで噴射する場合を想定し，これまでに既存の数値解析モデルを用いて計算を行ってきた．

その結果，従来のモデルでは特に相変化の生じやすい縮流部での予測が難しいことが示唆された．しかし，モデル改良に必要となる噴射条件付近で相変化を容易に起こす流体を用いた実験結果が非常に限られることが文献調査からわかり，拡大ノズル等による可視化実験を実施した．可視化実験にあたり特に相変化に影響を与える温度条件を変化されることが可能な 2 次元ノズル（図 1）を設計製作した．左が装置の概要であり，タンクから吸い上げた水の流量および圧力を調整して 2 次元ノズルに供給し，壁面に囲まれたオリフィス部を通過させ，容器内に噴射される様子を撮影する．基本的には透過型の可視化用 2 次元ノズルである

が，図 1 右に示す通り，オリフィス部の両サイドの壁面を加熱可能なものとし，上部の液体の圧力，温度，および流量，オリフィス部で温度，圧力，およびキャビテーション形状，そして容器内で噴霧形状を同時に得るものである．

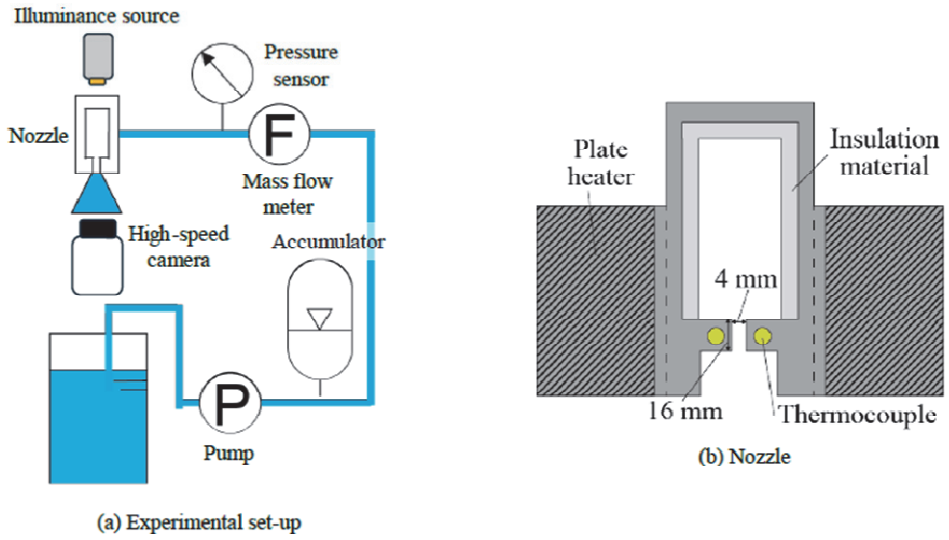


図 1：加熱壁面を有する 2 次元ノズル

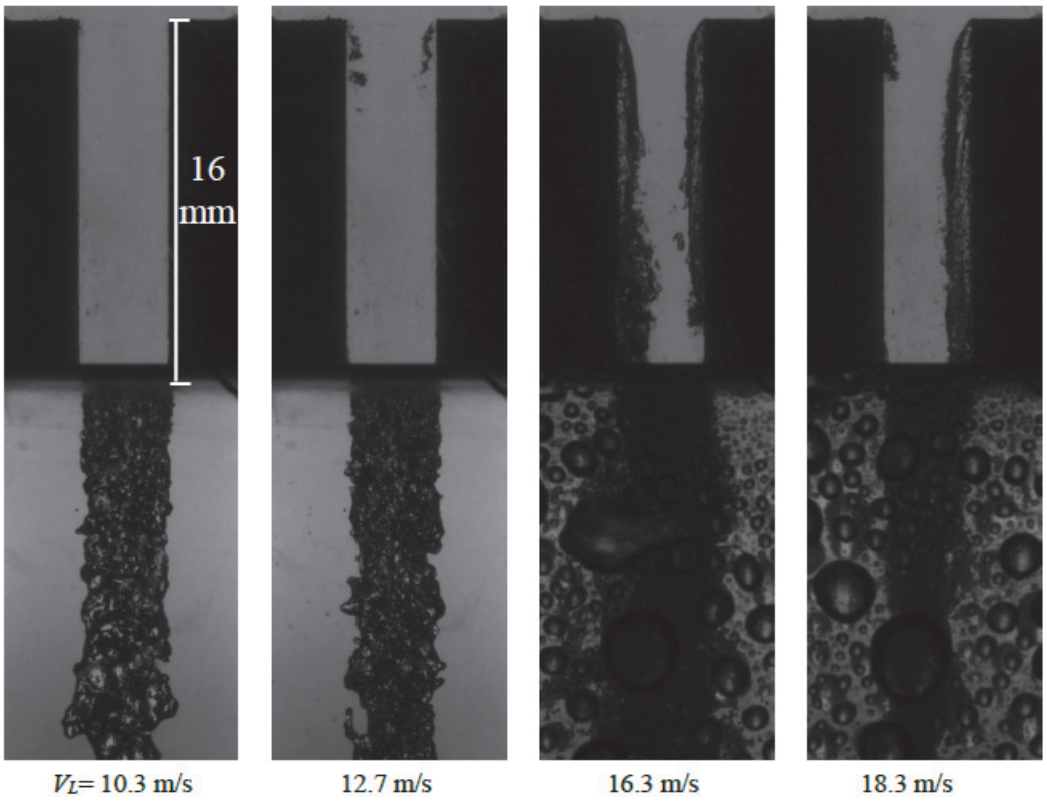


図 2：2 次元ノズルにおける非加熱時のキャビテーション形状

まず典型的なノズル内キャビテーション現象と加熱状況下でのノズル内キャビテーション現象を比較した．縮流部が未加熱の状態で得られた水温と壁面温度共に常温時のノズル内流動の様子を図 2 に示す．流速 V_L=10.3 m/s から 18.3 m/s まで変化させるとキャビテーションが促進する様子が確認できる．縮流部が未加熱状況下での実験結果は多数ある先行研究と同等と考えて差し支えないものと考えられる．

次に縮流部での熱の入力がキャビテーションの生成に及ぼす影響を調べるため，T_P=50, 80°C における各流速におけるキャビテーションの様子を図 3 に示す．T_P=50°C のとき，T_W は流速の上昇に伴って 26 から 23°C まで低下した．一方, T_P=80°C のとき, T_wは 33 から 21 °C まで低下した．このように，水流と縮流部壁面間の熱交換は著しく促進されていることがわかる．図 2 および図 3 のノズル内キャビテーションの様子を比較すると，T_P を上昇させることによって，キャビテーションが明確に弱まっていることがわかる．

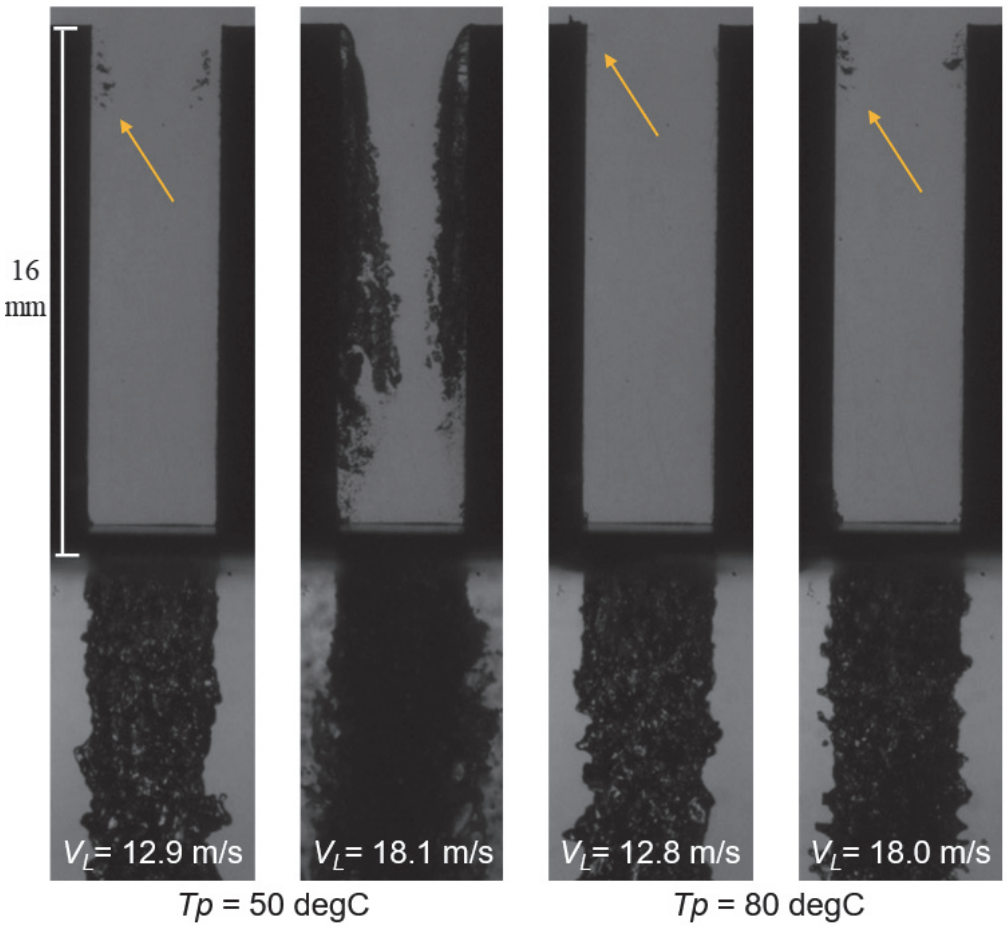


図 3：2 次元ノズルにおける加熱時のキャビテーション形状

ノズル内キャビテーションが壁面加熱によって抑制される仮説を説明する．縮流部エッジ近傍の水温が，縮流部壁面での加熱によってわずかに上昇し周囲よりも飽和蒸気圧が上昇することで，キャビテーションが発生しやすい状況となる．ここまでは通説と同様と考えてよい．しかしエッジ近傍で成長を始めた気泡核は，エッジでの流れの剥離により縮流断面中央方向へ流れていく．その結果，気泡は高温域から低温域へ移動するため，気泡内部の温度よりも周囲の温度の方が低い状況となる．このことにより気泡が成長するために必要な蒸発潜

熱を周囲から奪うことができず，気泡は収縮してしまうことになり，キャビテーションが抑制されたと考えられる．

このことから，2 次元可視化ノズル内の圧力，温度場を模擬し，非平衡熱輸送を考慮した気泡力学モデルにより気泡径の時間発展を計算した．液溜まり空間にある非凝縮ガス気泡が縮流部に流入し，縮流により急減圧する．急減圧によってキャビテーションが形成されている．キャビテーション区間を超えると，圧力は回復して，その後ノズル出口まで緩やかに減少する．以上の圧力分布を仮定する．一方，気泡は加熱壁に近い位置から縮流の影響により，急激に主流側 (-y 方向)に流動する．したがって，加熱壁から遠ざかり気泡位置の温度は低下する．解析領域の模式図と以上の推察に基づく簡単化した温度場の時系列分布を図 4 に示す．

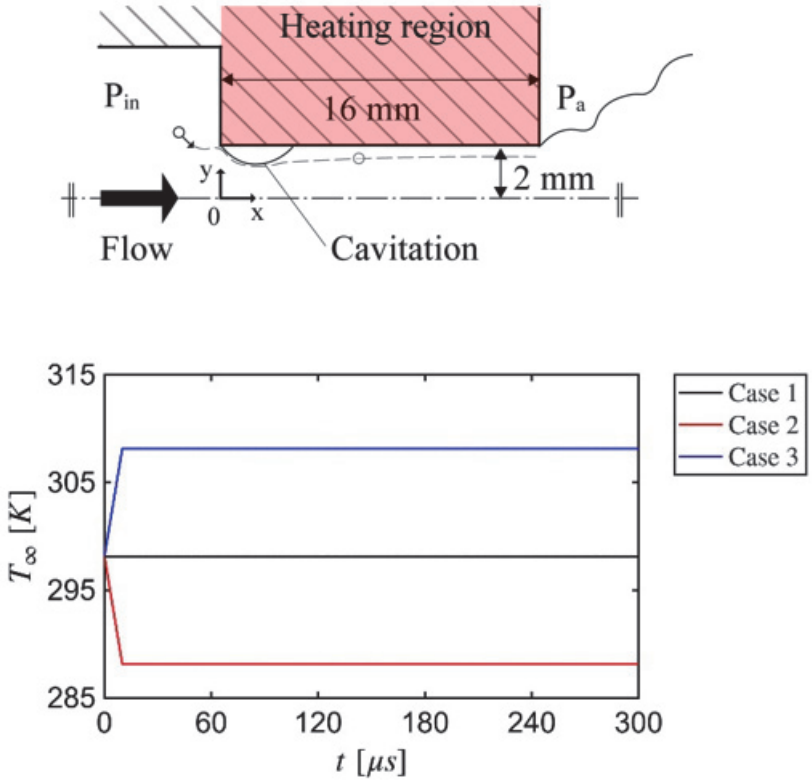


図 4：解析領域および温度場の時系列変化

温度変化が気泡の成長崩壊に及ぼす影響を明らかにするため，T_∞=298.15 K とした Case 1，T_∞を 10 ms で 10 K 減少させた Case2，T_∞を 10 ms で 10 K 増加させた Case3 の三条件を解析した．なお，時刻 t=0 で T_V=298.15 K とするため，状態方程式より各気泡を占める非凝縮性ガスは 98.3%となった．

各温度条件における，初期気泡径 R_0=10 μm の気泡膨張収縮過程を図 5 左に示す．一定温度プロファイルである Case1 では，圧力降下に伴い R が急上昇し，t =120 ms で最大気泡径 R_{max}=59 μm に到達した．その後，気泡は急収縮し気泡は崩壊する．非凝縮性ガスを中心に再膨張，再収縮をくり返し最終的に R_0 で落ち着く．T_∞を減少させた Case2 では，t = 91 ms で最大気泡径 R_{max}= 44 μm，T_∞を増加させた，Case3 では，t = 140 ms で最大気泡径 R_{max}= 113 μm となった．すなわち，極短時間の加熱であっても，T_∞の増加は気泡成長を促し，T_∞の減少は気泡成長を抑制する．

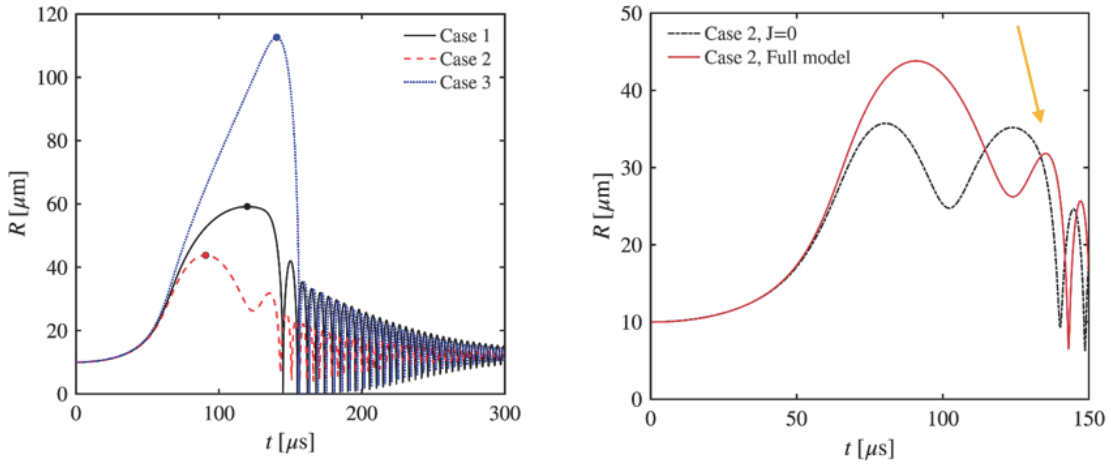


図 5：剥離によって温度場が変化する際の気泡成長の時間変化（左）と
気泡界面相変化モデルの有無による気泡成長の時間変化（右）

Case 2 における R の時系列変化を図 5 右に示す．フルモデルでは，蒸発と界面への熱流入が前半の膨張を補助し加速度的に成長した．一方，相変化無しの参照解は膨張率がゆるやかであった．フルモデルの場合，減衰振動の位相が参照解に対して遅れ方向にずれ，反跳時の気泡径は参照解を下回った．これは凝縮により崩壊が促進されたことを示唆している．以上，縮流部で流れが剥離する状況，つまり気泡位置の温度が低下する環境下では，界面での熱輸送に起因して気泡内圧を低下させる効果が生じることにより，気泡成長が抑制されることが明らかとなった．このようなメカニズムは従来のキャビテーションモデルや噴霧モデルには組み込まれておらず，実機モデルの改良のうえで考慮が必要な項目の 1 つが明らかになった．これはモデル改良とその後の高効率化に資する成果といえる．

3. 研究目標の達成状況

燃料アンモニアを小型エンジンにて利用する際に問題となる燃料噴射系における相変化の噴射過程への影響を明らかにすべく，まずは既存のキャビテーションモデルを用いた数値解析を行った．その結果，特にノズル出口付近の相変化の状況について数値解析と実験で大きく異なった．検証に必要なデータが不足していることから，比較可能なデータを取得するための 2 次元ノズルを検討し製作した．実験によって得られた結果は加熱時にキャビテーションが抑制される場合があるというこれまでの知見とは大きく異なるものであったため，数値解析により検討を行った．その結果，2D ノズル内の気泡は壁面加熱によって成長が抑制されることが解析的にも確認された．

本研究の最終的な目標は，これまで明らかにされていなかったアンモニアを内燃機関で利用する際に問題となる燃料噴射系における相変化の噴射過程への影響を明らかにし，噴射過程のモデル化と運転に不可欠な制御方法の検討を行うことである．今年度，実機燃料噴射系で起こり得る壁面加熱の影響に関する新たな知見が得られたことから，目標の根本的な部分である燃料噴射系における相変化の噴射過程への影響を検討することができたため，直近分については順当に進んでいると考える．

4. まとめと今後の課題

これまでに燃料温度と雰囲気圧力を変化させて行われた実験結果と既存のキャビテーショ

ンモデルを用いた数値解析の結果を比較した．その結果，従来のモデルでは特に相変化の生じやすい縮流部での予測が難しいことが示唆された．しかし，モデル改良に必要となる噴射条件付近で相変化を容易に起こす流体を用いた実験結果が非常に限られることが文献調査からわかり，拡大ノズル等による可視化実験を実施した．可視化実験にあたり特に相変化に影響を与える温度条件を変化されることが可能な 2 次元ノズル（図 1）を設計製作した．その結果，壁面過熱によりキャビテーションが抑制される場合があるという新たな知見が得られた．このメカニズムについて検討した報告例は見当たらず，既存のモデルでは考慮されていない．このことは相変化の影響を大きく受ける液化燃料を壁面からの大きな熱入力がある内燃機関で用いる場合，実機とシミュレーションでの乖離につながりかねないことを意味する．そのため，メカニズムについて仮説を立て，理論解析を行った．その結果，縮流部で流れが剥離する状況，つまり気泡位置の温度が低下する環境下では，界面での熱輸送に起因して気泡内圧を低下させる効果が生じることにより，気泡成長が抑制されることが明らかとなった．このようなメカニズムは従来のキャビテーションモデルや噴霧モデルには組み込まれておらず，実機モデルの改良のうえで考慮が必要な項目の 1 つが明らかになった．これはモデル改良とその後の高効率化に資する成果といえる．

今後は，検討したメカニズムと発生条件を組み合わせた 1 つのサブモデルを作成し，キャビテーションや噴霧シミュレーションに組み込むことを目指す．気泡界面での熱輸送の検討のためにノズル内の温度場等を計測するなどしながら現象の理解を深め，既存キャビテーションモデルと一体化もしくは置き換えを図りたいと考えている．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 大島逸平, 川原田光典: 壁面加熱によるノズル内キャビテーション抑制の考察, 微粒化シンポジウム 2025 講演論文集, 東京, (2025), pp. 1-6.

[2] N. Kawaharada and I. Oshima: Study on the Injection Control of Carbon-Free Fuels, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2025), CRF-37, pp. 106-108.

[3] I. Oshima, N. Kawaharada and J. Ishimoto: Effect of the heated wall on the cavitation phenomenon inside a 2D nozzle, *Proceedings of 12th International Conference on Multiphase Flow, Toulouse,* (2025), pp. 1-2.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（受賞）

・優秀講演賞, 壁面加熱によるノズル内キャビテーション抑制の考察, 大島逸平, 2025. 12. 1, 日本エネルギー学会.

・2025 年度日本エネルギー学会奨励賞，壁面加熱によるノズル内キャビテーション抑制の考察，大島逸平，2025. 2. 25，日本エネルギー学会.

課題番号	J25L077
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目（発展）

着火構造を考慮した火炎構造の再解釈
Re-interpretation of Flame Structure with Ignition Nature

松江　要*,**†，森井 雄飛***††
*九州大学マス・フォア・インダストリ研究所
**九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所
***東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究課題では，森井・丸田による「火炎・着火対応」を広範な火炎に対して特徴づけるために，様々な拡散特性，特に 1 以外の Lewis 数を持つ(予混合)可燃気体に対する 1 次元火炎構造の考察を行う．具体的には，1 次元火炎構造を記述する方程式系に対し，分岐理論に基礎を持つ数理的技術により，機械的に解を追跡する枠組みを用いて，1 以外の Lewis 数を持つ系の解の構成を試みる．2024 年度の研究を発展させたものであり，火炎構造を記述する方程式の「境界条件」の見直しに焦点を当てる．

2. 研究成果の内容

2024 年度は cold boundary difficulty により，古典的な 1 次元火炎構造の方程式には根本的な数学的欠陥があること，その回避のために「恣意的に」未燃境界を定めることで解の構成を実現した．

2025 年度は圧縮性流体の基礎に基づき，この恣意性を解消することを試みた．ただし当初の計画と変更して，簡単のために Lewis 数は 1 に限定している．実際は Rayleigh 流（図）の構造を基盤として，反応域の外側では気体の運動量・エネルギー保存則により 0 でない熱流束のやり取りがあることを認めて，未燃気体側の境界条件を修正した．これにより，cold boundary difficulty を自然に解消する問題設計（の 1 つ）が構築できた．他方で，新たに得られた火炎構造を記述する問題はシンプルな構造を持つ非線型方程式の境界値問題ながら，解の一意存在が担保されておらず，燃焼学，数学共に自然な火炎構造の記述は非自明な問題として生じているため，次にその解決を試みた．

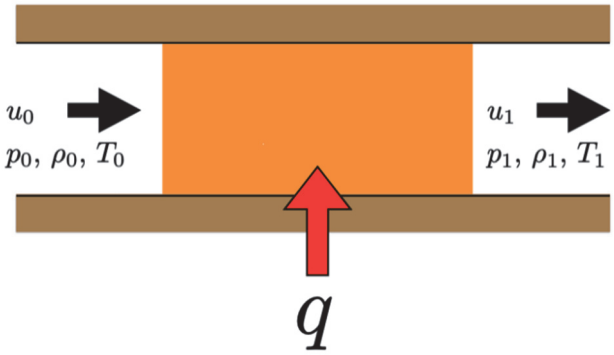


図１： Rayleigh 流の模式図.
オレンジ色の領域でのみ，外部からの熱のやり取り q が存在する.
燃焼においては，これが火炎の反応域に対応する.

$$\theta' = \phi, \qquad \zeta \in \mathbb{R}$$
$$\phi' = \phi - \mathcal{W}$$
$$\mathcal{W} = \Lambda(1-\theta)\exp\left(\frac{-\beta(1-\theta)}{1-\alpha(1-\theta)}\right)$$

既燃境界条件
$$(\theta(+\infty), \phi(+\infty)) = (1, 0)$$
未燃境界条件
$$(\theta(0), \phi(0)) = \left(0, \Lambda\exp\left(\frac{-\beta}{1-\alpha}\right)\right)$$

図２：無次元化温度 θ と，燃焼速度固有値 Λ を未知変数とする１次元火炎の境界値問題

$$\alpha = \frac{T_{\mathrm{ad}} - T_u}{T_{\mathrm{ad}}} \qquad \text{熱膨張比}$$
$$\beta = \frac{E_a(T_{\mathrm{ad}} - T_u)}{RT_{\mathrm{ad}}^2} \qquad \text{Zel'dovich数（無次元化活性化エネルギー）}$$

図３：図２の方程式系に生じるパラメータ

3. 研究目標の達成状況

2. の考察の結果，直接的な境界値問題の（数値計算）ソルバーの適用では解が一切構成できないことが確認された．そこで，境界条件を実際の（Rayleigh 流による新たな）条件よりほんの少しずらすことで，漸近解析で典型的な「無次元化活性化エネルギーが非常に大きい」という制約を与えずに，機械的に火炎伝播速度を与えるパラメータの同定を含めて解を構築することに成功した．漸近解析における暗黙の仮定を除外できたことは大きい．その成果は国際会議にて発表している[1]．さらに，実際にこのような解が典型的な燃焼パラメータ領域において一意に存在する事の数学的証明も試み，部分的に完成している．

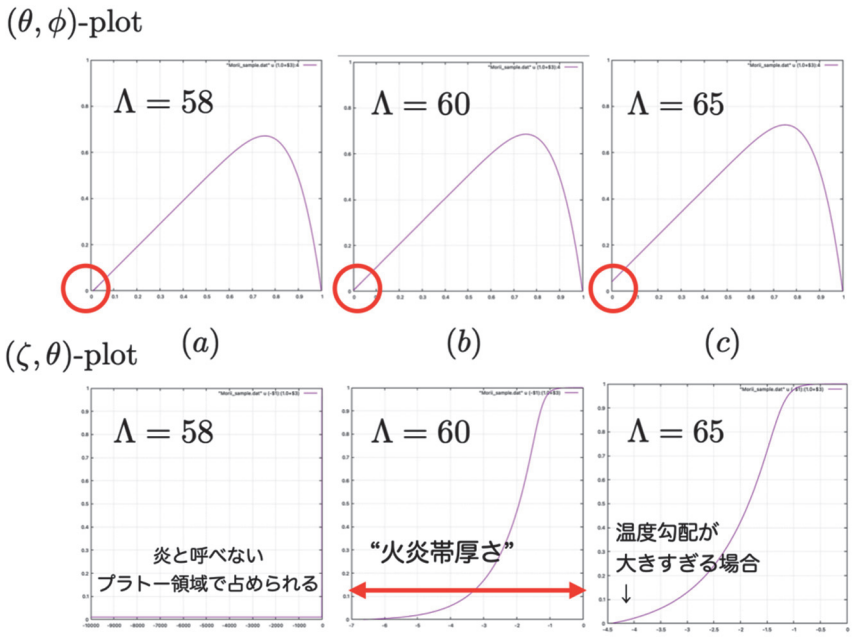


図 4：（α，β）＝（0.8，10）における火炎プロファイルの候補．適度な Λ において

数学的考察を概説すると以下の通りである．反応項を表す関数を

$$f(\eta) := \eta \exp\left(\frac{-\beta\eta}{1-\alpha\eta}\right), \quad \eta \in [0,1]$$

とし，この関数の振る舞いを詳細に調べることで火炎プロファイルの概形を抽出する．

補題 上の関数 f は，$(1-\alpha)^2 \leq \beta$ の時，またその時に限り

$$\eta = \eta_1 \equiv \frac{(2\alpha+\beta) - \sqrt{4\alpha\beta+\beta^2}}{2\alpha^2}$$

において $f'(\eta) = 0$ となる．これ以外の場合は狭義短調増加関数となる．

補題 上の関数 f は，次を満たす η で常に上に凸となる：

- $(2\alpha+\beta+\alpha^2)^2 \leq 4\alpha^4$ の時は，全ての $\eta \in [0,1]$.
- 上の条件が成り立たない時は，$\eta \in [0, \eta_2)$，ただし

$$\eta_2 = \left[\frac{(2\alpha+\beta+\alpha^2)^2}{4\alpha^4} - 1\right]^{-1}.$$

定理 次を仮定する：

- $(1-\alpha)^2 < \beta$,
- $(2\alpha+\beta+\alpha^2)^2 > 4\alpha^4$, かつ $\eta_1 < \eta_2$.

この時,

$$\Lambda < \eta_1 \exp\left(\frac{\beta}{1-\alpha\eta_1}\right)\left\{\eta_1 \exp\left(\frac{\beta(1-\eta_1)}{1-\alpha\eta_1}\right)-1\right\}$$

となる Λ では, 温度勾配 ϕ が狭義単調減少する解は存在しない.

定理の条件を満たす(α, β)において, θ は図 4 のような形をすることが厳密にわかる. この構造は漸近解析の仮定を必要としないので, 本考察は広範囲の物理化学的特性を持つ火炎に対する構造決定基盤となりうる.

一方で, この問題設定では未燃境界条件を満たす Λ は「1 点で決まる保証がなく」, 図 4 の「プラトー領域」を生成するデータでも解となりうる. 数値計算において, 境界条件を「ほんの少しずらす」という恣意的な工夫を入れて初めて解が捕えられたことがもう 1 つの主要な (否定的) 結果で, 新たに得た境界条件でも, 境界側で問題の一意可解性を壊す「退化性」が生じることを観察した. これは解を「ある条件を満たす関数族の上限あるいは下限」としてしか火炎構造を記述する解を特徴付けられないことを示唆しており, 燃焼学的な火炎構造記述の自然さとその数学的構造の間にギャップが生じている. ここで, 森井らとの議論により「火炎の自然な記述には, まだ足りないものがある」との視点を持つに至った. その視点が別の燃焼現象の記述に貢献しうるという森井の示唆を踏まえて, 今後はこの点をより深掘りすることを試みる.

4. まとめと今後の課題

1 次元火炎構造は燃焼学の基礎をなす問題でありながら, その「燃焼学 / 数学」双方の自然さを担保する設定と解の記述に根本的な困難があることを新たに見出した. Rayleigh 流の考え方は予混合デフラグレーション波だけでなくデトネーション波の構造決定にも用いられる考え方であり, 本考察における「燃焼学 / 数学」双方に妥当な燃焼現象の記述と森井・丸田理論の接続により, より広範な燃焼波の基盤構築が期待される.

非自明な Lewis 数による火炎構造記述を元々の研究の方向性としていたが, 単位 Lewis 数の場合ですら非自明性が非常に多い問題であることが発覚したため, 本考察の完成と同時に当初の目的に戻って火炎構造の記述体系を構築することも今後の課題とする.

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] K. Matsue, Y. Morii: Re-interpretation of flame structure based on flow fields, *The 22nd International Conference on Flow Dynamics*, Sendai International Center, Sendai, Japan, (2025).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J25L082
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	その他（火山防災）
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

火山噴石に対するシェルター補強用人工軽石の衝撃圧縮変形挙動
Impact Compressive Deformation Behavior of Artificial Pumice for Reinforcement of Shelter against Ballistic Ejecta

立山 耕平*†，大谷 清伸**††
*室蘭工業大学大学院工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

近年頻発する突発的な水蒸気噴火において，飛散噴石の衝突によって人的および物的な被害が多く生じている．その対策として，山小屋のような既存施設を補強し耐噴石シェルターとして使用する手法が推進されている．本研究では，既存施設の補強手法として，人工軽石を敷設する手法に注目する．しかし，集合体としての人工軽石は経験的な使用がほとんどであり，その衝撃吸収メカニズムは十分に明らかになっていない．そこで本研究では，火山噴石に対するシェルター補強用人工軽石の衝撃圧縮変形挙動を解明することを目的とする．

2. 研究成果の内容

弾道飛行装置を用いて，ターゲット（人工軽石で補強した山小屋屋根）に対して飛翔体（火山噴石を模擬した飛翔体）を射出する衝突試験を実施し，山小屋屋根に対する人工軽石の補強効果について評価した．飛翔体は，直径 40 mm，高さ 50 mm の砥石とし，サボを使用して発射した．この際，飛翔体後部に速度計測のための測定部を設けた．ターゲットは，アクリルパイプに充填された人工軽石とし，背面に加速度センサを取り付けた．軽石の変形挙動可視化および速度計測のために，高速度カメラによる撮影を行った（図 1）．

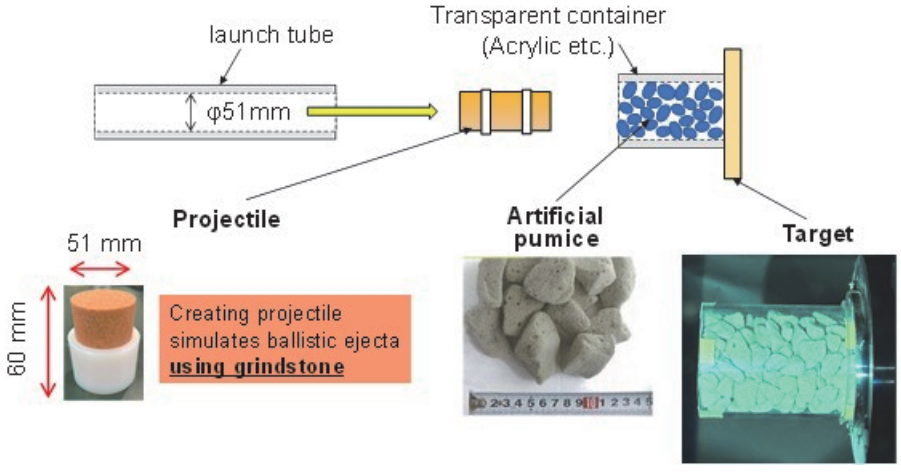


図 1：実験装置概略

3. 研究目標の達成状況

衝突試験によって，任意の射出速度で飛翔体が衝突した際の人工軽石の変形挙動を高速度カメラによって可視化した（図 2）．また，飛翔体後部に設けた測定部の速度を計測することで，飛翔体が人工軽石に貫入する際の速度減衰を得た．これまでに得られた実験式を用いて破砕された人工軽石から算出された衝撃エネルギーと飛翔体の運動エネルギーはよく一致することが示唆された．これより，人工軽石の集合体としての高速変形メカニズムを予測するための実験結果が得られた．以上より，2025 年度の目標はおおむね達成されたといえる．ターゲット背面の荷重測定については，次回実験にて取得予定である．

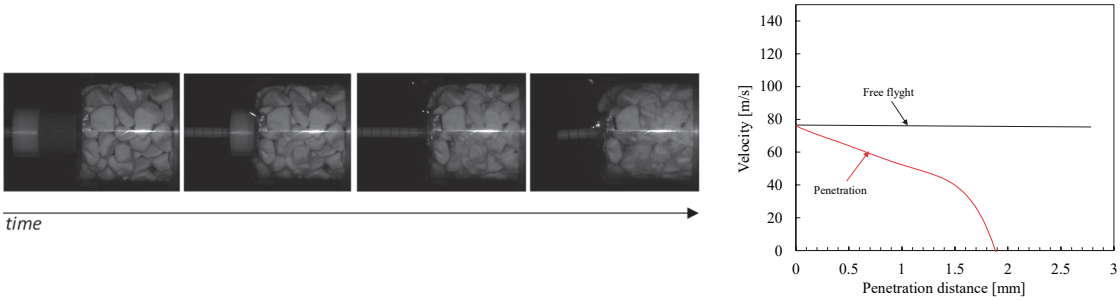


図 2：飛翔体が衝突した際の人工軽石の変形挙動および減衰挙動

4. まとめと今後の課題

2025 年度の課題である飛翔体貫入時の飛翔体の減衰挙動測定についてはおおむね達成することができた．また，ターゲット背面の荷重測定については，ロードセルの作製が完了し次回測定時に測定可能な段階である．今後は，実験より得られた結果から人工軽石の集合体としての力の連鎖およびその衝撃吸収メカニズムを解明することが課題である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] K. Tateyama, K. Abe, H. Fujiki, H. Sasaki, H. Yamada: Compressive Deformation Behavior of Artificial Pumice for Reinforcement of Existing Shelter Against Ballistic Ejecta of Volcanic Eruption, *Applied Mechanics*, Vol. 6, No. 2 (2025), pp. 6020043, doi: 10.3390/applmech6020043.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] K. Abe, K. Tateyama, H. Fujiki, H. Sasaki, H. Yamada: Improvement of Prediction Formula for Impact Absorption Energy of Artificial Pumice Considering Strain Rate Dependence, *Proceedings of 2nd JSME International Conference on Materials & Processing*, Guam, (2025).

[3] 阿部一真，立山耕平，藤木裕行: 粒径が異なる軽石を充填した軽石集合体のエネルギー吸収特性，*日本機械学会 M&M2025 材料力学カンファレンス*，(2025).

[4] 大谷清伸，立山耕平: 多孔質材料衝突による衝撃緩和効果の数値解析的検証，日本機械学会 M&M2025 材料力学カンファレンス，(2025).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project Code	J25L092
Classification	Discretionary Collaborative Research
Subject Area	Fundamentals
Research Period	April 2025 - March 2026
Project Status	3rd year

Density and Surface Tension Effects on Vortex Dynamics

Stefan Llewellyn Smith*†, Yuji Hattori**††
*Department of Mechanical and Aerospace Engineering and Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The dynamics of singular flow structures provides insight into fundamental processes in engineering applications such as aerodynamics and in geophysics, planetary science and oceanography. Such reduced models can enable predictions in extreme parameter regimes. Point sources/sinks, vortex sheets, and vortex patches are singular flow configurations at points, along curves and within domains, respectively. We will investigate their dynamics and equilibrium configurations in the presence of density differences and surface tension.

2. Details of program implement

The applicant had hoped to visit Sendai in 2026, but was not able to do so because of responsibilities as Department Chair. As a result, no funds were spent. Work has continued on aspects of density effects in vortex dynamics.

3. Achievements

Numerical solutions for the Rankine oval in a two-fluid case, with a recirculating region containing a source and sink, have been obtained using a Newton–Kantorovich (NK) method, coupled to the alternating quadrature rule, leading to spectrally accurate solutions.

This approach requires augmenting the underlying discretized equations with supplementary conditions to obtain a well-posed problem (i.e. a non-zero Jacobian in the NK iteration). A number of auxiliary conditions have been investigated, and while some correspond to fixing the centroid of the oval, others do not have such a clear interpretation. Adding surface tension to the problem leads to numerical difficulties, which seem related to the auxiliary conditions.

The focus of the current work is on verifying the consistency of the numerical procedure by computing alternative expression for functional derivatives. These should give insight into whether the numerical difficulties are due to an inconsistent formulation, an underspecified physical formulation or an issue with the numerical implementation.

Work is also continuing on a manuscript with a detailed pedagogical explanation of why current vortex sheets are not a long-term physically consistent model.

Both projects focus on dimensional reductions of systems to equations on curves, either equilibrium solutions when it is possible or time-evolving systems whose evolution

generates quantities in the bulk.

4. Summaries and future plans

Unfortunately, because of work constraints as Department Chair, the applicant was not able to visit Sendai in 2025. We are currently investigating whether a visit will be possible in September 2026. In the meantime, we will continue to explore surface tension effects on vortex sheet motion, as well as density effects

5. Research results

Not applicable

課題番号	J25L099
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	2 年目

セルロースナノファイバー分散液中のナノファイバーのミクロ構造とレオロジー特性との相関
Relationship between Micro-structure of Nano-Fiber and Rheological Property in Cellulose Nano-Fiber Dispersion

本澤 政明*†, 高奈 秀匡**††, 鎭守 智彰***
*静岡大学工学部, **東北大学流体科学研究所
***静岡大学大学院総合科学技術研究科
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

セルロースナノファイバー（Cellulose Nano-Fiber : CNF）は，軽量・高強度・耐熱性などの性質を持ち，様々な産業分野への応用の可能性を秘めていることから近年注目を浴びる植物由来のバイオマス材料の一つである．セルロース繊維は軽量で優れた機械的特性を持つため，CNF の応用利用として，多くの研究者によって高強度繊維の作成方法が研究されている．本共同研究の所内対応者である高奈らも繊維配向に対して流体力学的な制御方法に交流電場を組み合わせる手法を提案している．CNF 分散液中のナノファイバーの配向性・絡み合い・繊維長分布等のマイクロ構造は，繊維の力学的特性に大きく影響を与える．このため，優れた力学特性を有する繊維を実現するためには，そのマイクロ構造や流動特性を明らかにする必要が有る．マイクロ構造の直接観察には原子間力顕微鏡法（Atomic Force Microscopy: AFM）が有用である一方で, CNF 分散液のレオロジー特性はその繊維長分布を始めとしたマイクロ構造と強い相関を有すると予想される．そこで本研究では，CNF のレオロジー特性と繊維長分布との相関を明らかにすることで，レオロジー計測による間接的なマイクロ構造予測法を確立し, 優れた力学的特性を有する CNF 繊維の創製に資する知見を得ることを目的とする．

2. 研究成果の内容

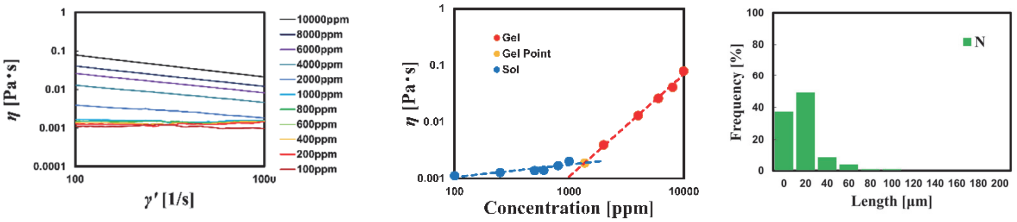
今年度は，レオロジー特性として分散液のゲル化点濃度に着目して，繊維長分布とゲル化点濃度の関係性について調べた．試験試料として，繊維長の異なるスギノマシン製の CNF 分散液を 3 種類用意し，繊維長の長い方から CNF(SL : Super Long)，CNF(N : Normal)，CNF(SS : Super Short)と分類した．これらの分散液について，マグネチックスターラーと超音波分散機により希釈し，100 ppm～10000 ppm まで種々の濃度の試料を用意した．加えて， CNF(SL)と CNF(SS)を 1:1 に混合させた分散液（CNF(SL:SS=1:1)と記す）も用意した．

ゲル化点濃度は高分子溶液等において，分散質が系全体にわたりネットワーク構造を形成することで，流動的なゾル状態から弾性的なゲルへ転移する最低濃度である．本研究では，Thermo Fisher Scientific 社製のレオメータ HAAKE MARS iQ Air を用いてゲル化点濃度の計測を行った．種々の濃度に調製した CNF 分散液のせん断粘度のせん断速度依存性をレオメータにより測定し，ニュートン流体的性質を示すか否かにより CNF 分散液のゾル・ゲル状態を判別し，ゲル化点濃度を導出した．

繊維長分布については，キーエンス社製のデジタルマイクロスコープ(VHX-900F)を用いて各試料の観察し，それぞれ 120 本の繊維の長さをマイクロスコープ付属の解析ソフトウェアで測定した．

結果の一例として，図 1 に CNF(N)における(a)せん断粘度とせん断速度の関係，(b)ゲル化点濃度の導出，(c)繊維長分布を示す．図 1(a)に示されるように低濃度ではせん断粘度がほぼ一定なゾル状態であるが，ある濃度以上から Shear-thinning 挙動を示すゲル状態に移行する．そこで，図 1(b)はせん断速度 100 1/s におけるせん断粘度と CNF 濃度の関係を示したものであるが，ゾル状態・ゲル状態でそれぞれ異なる濃度依存性を示し，この交点がゲル化点濃度となる．CNF(N)の試料においては，おおよそ 1660 ppm と求まった．また，繊維長分布は図 1(c)のとおり，主に 40 μm 未満に分布のピークが見られることが分かる．

このように求めたゲル化点と繊維長分布について，単体試料である CNF(SL)，(N)，(SS)では平均繊維長とゲル化点に相関がみられたが，混合試料 CNF(SL:SS=1:1)では異なる挙動となった．そこで，長繊維の存在を強く反映する平均値である長さ加重平均繊維長L_l（$L_l = \sum l_i^2 / \sum l_i$，ここで$l_i$は測定した繊維 1 本の長さを表す．）を用いて整理をすると，混合試料を含む全試料において，繊維長とゲル化点濃度に一定の相関を得ることができた．



(a) せん断粘度　　(b) ゲル化点濃度　　(c) 繊維長分布

図 1：CNF(N)分散液における結果の一例

3. 研究目標の達成状況

CNF 分散液に対してかゲル化点濃度を捉えることで，長さ加重平均繊維長の推定が可能になった．長短の繊維長の CNF を含む分散液の繊維長分布の推定は現時点では達成していないが，今後，動的粘弾性挙動を用いることで推定方法を検討する予定である．

4. まとめと今後の課題

繊維長分布の異なる CNF 分散液について，レオメータによるせん断粘度測定を基にゲル化点濃度を求め，マイクロスコープの画像から繊維長分布を求めることで，ゲル化点濃度と繊維長分布の関係について検討した．その結果，長さ加重平均繊維長を用いることで繊維長の異なる CNF 分散液を混合した試料も含めてゲル化点濃度との相関を得ることができた．今後の課題として，CNF 分散液の繊維長分布をより詳細に計測することと，動的粘弾性挙動によりその分布を推定する方法を検討することが挙げられる．

5. 研究成果

1) **学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）**　なし

2) **国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等**

[1] M. Motozawa, Y. Ueda, H. Takana, Change in Drag Reducing Effect and Rheological Property of Surfactant Solution by Adding Cellulose Nano-fiber, *Proceedings of the 22nd International Conference on Flow Dynamics (ICFD2025)*, Sendai, (2025), pp.573-574.

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**　なし

課題番号	J25L103
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2025.4 ~ 2026.3
継続年数	1 年目（発展）

局所的応力及び熱流束を用いた微細流路内部の水液滴を介した熱および運動量輸送特性の解析
Analysis of Heat and Momentum Transport Characteristics via Water Droplets in Microchannels using Local Stress and Heat Flux

福島 啓悟*†，徳増　崇**††
*福井大学学術研究院，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

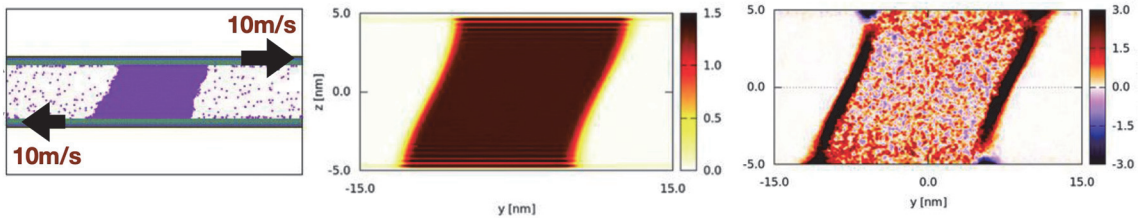
1. 研究目的

微細流路内部に存在する液滴の熱および運動量輸送現象は，液相・気相・固相から構成される接触線や，従来のマクロな流体力学では十分に考慮されていない固体壁の特性に大きく依存するため，非常に複雑な挙動を示す．これまでの研究は主にモデル液体を対象として行われてきたが，本研究では，最終的に水を対象とすることで，実用的な応用に直結するより現実的な知見を得ることを目指す. 具体的には, 水を対象とした実験および数値解析への展開を見据え, 液滴の動態, 熱輸送特性，および運動量輸送特性を分子スケールから詳細に解明し，微細流路内での液滴挙動を理解することを目的とする．

2. 研究成果の内容

当初は, 水を対象系として用い, 分子動力学計算により界面近傍における局所的な応力分布を解析する計画であった．しかし，検討を進めた結果，水のような強い極性を有する系では，クーロン相互作用の長距離項の寄与を局所応力としてどのように空間分配するかが重要な問題となることが明らかとなった．特に，長距離静電相互作用を通常の原子間二体力と同様に局所領域へ割り当てることは物理的に一意ではなく，得られる応力分布の解釈に任意性が残ることが明らかになった．このため，現段階では，水を用いた局所応力分布解析を当初の方法で実施することは困難であると判断した．そこで本年度は，長距離静電相互作用の取り扱いに起因する問題点を整理するとともに，局所応力の定義と空間分配方法を再検討した．

その一方で，微細流路内における液滴の運動量輸送解析そのものについては，長距離静電相互作用を含まない Lennard-Jones（LJ）流体系を用いて検証を行った．具体的には，固体壁に挟まれた微細流路内に LJ 液滴を配置し，壁面を相対運動させる Couette flow 条件下で分子動力学計算を実施した．この系では，液相・気相・固相が接する接触線近傍において，速度場，密度分布，応力分布が強く不均一となる．そのため，微細流路内の液滴運動に対する局所応力解析手法の有用性を検証する上で適したモデル系である. LJ 液滴を対象とした解析では, 分子間に働く短距離相互作用に基づき，原子間力および粒子間距離から各相互作用が与えるビリアル寄与を評価し，それを空間グリッド上へ分配することで，局所的な応力テンソル分布を算出した．その結果，液滴内部，気液界面，固液界面，および接触線近傍において，応力分布が空間的に大きく変化する様子を捉えることができた．特に，壁面せん断により液滴が変形・移動する過程において，接触線近傍に応力が集中する領域が生じることを確認し，液滴の巨視的な運動が界面近傍の局所的な運動量輸送と密接に関係していることが示唆された．



(a) (b) (c)

Fig. Simulation system and distributions(a)Simulation system (b) 2D-Density profile (c) 2D-Shear stress profile

3. 研究目標の達成状況

本研究の当初目標は，水を対象とした微細流路内液滴の分子動力学計算を行い，液滴の動態および熱・運動量輸送特性を明らかにすることであった．このうち，本年度は特に運動量輸送現象の解析に着目し，局所応力分布解析手法の適用可能性を検討した．当初計画では，水を対象系として局所応力分布を直接解析する予定であったが，検討の過程で，水のような強い極性を有する系では，長距離静電相互作用の寄与を局所応力として定義・分配することが本質的な課題となることが明らかとなった．したがって，水系に対する当初手法の単純な適用については，現段階では達成に至っていない．一方で，長距離静電相互作用を含まない Lennard-Jones 液滴の Couette flow 系を対象として，局所応力分布解析を実施し，微細流路内における液滴運動や接触線近傍の運動量輸送を評価する上で，本解析手法が有用であることを確認した．これにより，短距離相互作用を主とする系に対しては，局所応力解析が液滴の変形・移動と界面近傍の力学状態を結びつける有効な手段であることを示すことができた．

4. まとめと今後の課題

短距離相互作用を主とするモデル液体に対しては，原子間力に基づく局所応力分布解析が，微細流路内の液滴運動および界面近傍の運動量輸送を評価する有効な手法であることを確認した．一方で，本研究の最終的な対象である水系へ展開するためには，長距離静電相互作用の寄与をどのように局所応力として定義するかという課題を解決する必要がある．今後は，短距離相互作用に対して有効である原子間力ベースの局所応力解析を基盤としつつ，長距離静電相互作用については，特定の原子間相互作用として空間分配するのではなく，電場に基づく場の応力として扱う方法を検討する．これにより，水を対象とした微細流路内液滴の熱・運動量輸送現象を，分子スケールの構造，界面特性，局所的な力学応答の観点から統一的に理解することを目指す．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

特になし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] A. Fukushima, T. Tokumasu: Analysis of Heat and Momentum Transport Characteristics Through Droplets Inside Nano-Order Channels, *Proceedings of the Twenty-fifth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2025), CRF-54, pp. 155-156.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

特になし

索　引

東北大学流体科学研究所
2025 年度共同利用・共同研究拠点「流体科学国際研究教育拠点」
活動報告書

2026 年 11 月発行

編集・発行： 東北大学流体科学研究所　所長　佐藤 岳彦

〒980-8577　仙台市青葉区片平二丁目 1 番 1 号
電話：022-217-5302（総務係）　FAX：022 (217) 5311

E-mail：ifs-kyodo@grp.tohoku.ac.jp
URL：https://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/koubo/index.html

製作： 株式会社センキョウ