東北大学

２０２４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 2024
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」を目的に掲げ研究を行っている。2010 年（平成 22 年）度から流体科学分野の共同利用・共同研究拠点「流体科学研究拠点」として文部科学省に認定され、2016 年（平成 28 年）度および 2022 年（令和 4 年）度には同拠点「流体科学国際研究教育拠点」として認定更新を受けた。本拠点では、物質のみならずエネルギーや情報の流れなど、人間生活の中で避けて通れない「時間軸」と「空間軸」上で展開されるあらゆる「流動」を対象とする「流体科学」を核として、人類社会のさまざまな重要問題を解決するため、国内外の研究者と本研究所の教員とが行う「公募共同研究」を実施している。本公募共同研究では、その成果と適用先としての観点から、環境・エネルギー、ナノ・マイクロ、健康・福祉・医療（ライフサイエンス）、宇宙・航空、基盤研究の 5 分野における流体科学に係わる研究課題を公募し、共同研究委員会の審査を経て、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。得られた研究成果は、毎年 11 月に流体科学研究所主催で開催される国際会議における公募共同研究成果報告会（IFS Collaborative Research Forum）において発表され、また共同利用・共同研究拠点「流体科学国際研究教育拠点」活動報告書として公表されている。

拠点活動開始以降、公募共同研究の申請件数は順調に増加し、当初は採択率はほぼ 100% であったが、第 2 期中期計画期間終了時に実施された期末評価での指摘と、限られた予算の中、申請数が年々増加する状況を踏まえ、第 3 期中期計画期間では、社会の要請に応える課題を選別し、採択額の充足率（＝採択額／申請額）を保つ方針とした。ただし、不採択となった申請は、所長リーダーシップ経費により「リーダーシップ共同研究」として支援している。第 4 期中期計画期間に入った 2022 年（令和 4 年）10 月には、本研究所に「統合流動科学国際研究教育センター（IFS-GCORE）」が設置され、欧米・中東・アジアの複数海外拠点とともに共同研究教育を展開するアライアンス型国際研究教育体制が整備された。

本報告書は 2024 年度に実施された拠点の活動を取り纏めたもので、公募共同研究の概要、123 件の公募共同研究およびリーダーシップ共同研究の成果報告書を収録している。本拠点は、本公募共同研究を通じて、国内外の様々な異分野の英知を結集させ、流動現象の基礎研究とそれを基盤とした先端学術領域との融合ならびに重点科学技術分野への応用によって、世界最高水準の多様な流動現象に関する学理の探求及び研究を推進し、社会に貢献するとともに、次世代の若手研究者及び技術者の育成にも努めている。今後ともご関係各位のご支援ご鞭撻をお願い申し上げると共に、本報告書について、忌憚のないご意見を頂ければ幸甚である。

2025 年 9 月

東北大学流体科学研究所長

丸田　薫

目　次

1. 2024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 …… 6
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 …… 9

2. 研究成果報告書

＜2024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＞

J24I001　低速尾翼バフェットの理論・解析モデルの構築 …… 15
大塚 啓介（東北大学工学研究科）、阿部 圭晃（東北大学）

J24I002　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 …… 17
北川 一敬（愛知工業大学）、大谷 清伸（東北大学）

J24I003　マグネシウム系半導体材料を用いたエネルギー変換素子開発 …… 19
鵜殿 治彦（茨城大学）、大堀 大介（東北大学）

J24I005　YSZ 相転移とイオン伝導性メカニズム …… 21
郭　玉婷（京都大学）、小原　拓（東北大学）

J24I006　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 …… 26
常松 佳恵（山形大学）、大谷 清伸（東北大学）

J24I007　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 …… 29
江目 宏樹（山形大学）、岡島 淳之介（東北大学）

J24I008　Evaluation of Wall Thinning with Thick Insulator Based on Pulsed Eddy Current Testing Method using Novel Signal Processing Way …… 33
Shejuan Xie（Xi'an Jiaotong University）、内一 哲哉（東北大学）

J24I009　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 …… 39
槙原 幹十朗（東北大学工学研究科）、大谷 清伸（東北大学）

J24I010　Investigation of Aerodynamic Noise Mechanism of Multi-Directional Wing of Aero-Train and Active Flow Control for Noise Reduction …… 41
Chenguang Lai（Chongqing University of Technology）、大林　茂（東北大学）

J24I011　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 …… 45
大塚　光（金沢大学）、永井 大樹（東北大学）

J24I012　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 …… 47
大塚　光（金沢大学）、伊神　翼（東北大学）

J24I013　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 …… 49
井上 雄介（旭川医科大学）、岡島 淳之介（東北大学）

J24I014　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 …… 53
立山 耕平（室蘭工業大学）、大谷 清伸（東北大学）

J24I015　飛行しながら回転する中空円筒の実験と数値解析 …… 55
平田 勝哉（同志社大学）、石本　淳（東北大学）

J24I016 気象改変技術の構築に向けた大規模自由度場の再現とアクチュエータ位置の最適化アルゴリズムの研究 …… 57
野々村　拓（名古屋大学）、大林　茂（東北大学）
J24I017 立ち上り時間の長いソニックブーム波形と乱流干渉における時間・長さスケールの関係の解明 …… 61
鵜飼 孝博（大阪工業大学）、大谷 清伸（東北大学）
J24I018 Supercritical Real-Fluid Oxidations of Ammonia by Using the SP-Virial Thoery …… 65
Hao Zhao（Peking University）、中村　寿（東北大学）
J24I019 Emulating Atherosclerotic Conditions on an 'Organ-on-a-Chip' Device …… 67
Eugenia Corvera Poiré（National Autonomous University of Mexico）、船本 健一（東北大学）
J24I020 Exploring the Effects of Shear Stress Magnitude and Variation on Endothelial Injury: From Current Evidence to in Vitro Experiment of Cellular Responses …… 70
Mingzi Zhang（Macquarie University）、太田　信（東北大学）
J24I021 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 …… 73
森田 行則（産業技術総合研究所 (AIST)）、遠藤 和彦（東北大学）
J24I022 Experimental and Kinetics Modeling Study of Tri-Methyl-Phosphate (TMP) and Bis (2,2,2-trifluoroethyl) Methylphosphonate Combustion –Toward P-Containing Fire Suppressants for Lithium-Ion Battery Electrolytes …… 75
Olivier Mathieu（Texas A&M University）、中村　寿（東北大学）
J24I023 プラズマ誘起電荷・電界による生体膜輸送変移の大規模数値解析 …… 79
内田　諭（東京都立大学）、佐藤 岳彦（東北大学）
J24I024 リブレット加工による粘性抵抗低減メカニズムの解明 …… 81
大山　聖（宇宙航空研究開発機構）、焼野 藍子（東北大学）
J24I025 スパースプロセッシング PIV とプラズマアクチュエータによる翼周り流れ制御 …… 84
野々村　拓（名古屋大学）、阿部 圭晃（東北大学）
J24I027 アンモニアを燃料とした航空機の概念設計に関する研究 …… 87
中村　寿（東北大学）、下栗 大右（広島大学）
J24I028 直交格子による超音速／極超音速下における熱流束予測 …… 101
佐々木 大輔（大阪公立大学）、大林　茂（東北大学）
J24I029 火星飛行機実現に向けた柔軟膜翼の数値的・実験的研究 …… 104
佐々木 大輔（大阪公立大学）、永井 大樹（東北大学）
J24I030 Statistical Learning Approaches for Data Mining in Multi-objective Aerodynamic Design Optimization … 107
Pramudita Satria Palar（Bandung Institute of Technology）、大林　茂（東北大学）
J24I031 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 …… 110
伊藤 靖仁（名古屋大学）、服部 裕司（東北大学）
J24I032 Study on Micro-scale Evaporation for Heat Transfer Enhancement …… 113
岡島 淳之介（東北大学）、Peter Stephan（Technical University of Darmstadt）
J24I033 Combination of Atmospheric Pressure Plasma with Mist Generated by Condensation of Water Vapor in Pressurized Air …… 116
Yun-Chien Cheng（National Yang Ming Chiao Tung University）、佐藤 岳彦（東北大学）
J24I034 乱流渦における渦流と渦線バンドル束の相互作用による 3 次元渦構造形成に関する解析 …… 119
中山 雄行（愛知工業大学）、服部 裕司（東北大学）
J24I035 大動脈弁を考慮した大動脈・左心室系の血流解析 …… 123
宮内　優（宮崎大学）、船本 健一（東北大学）
J24I038 高速超微小液滴の生成と液滴特性 …… 126
佐藤 岳彦（東北大学）、金澤 誠司（大分大学）

J24I039 Generation of Charged Cavitation Bubbles and the Characteristics …… 128
佐藤 岳彦（東北大学）、Mohamed Farhat（Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)）
J24I041 Numerical Simulation of Mass Transfer in Supercritical Carbon Dioxide …… 130
神田 雄貴（東北大学）、Yingxue Hu（Xi'an Jiaotong University）
J24I042 Effect of Charge Distribution on the Plasma-induced Fine Bubble Dynamics …… 133
Siwei Liu（東北大学）、Outi Supponen（ETH Zurich）
J24I044 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 …… 135
伊神　翼（東北大学）、金崎 雅博（東京都立大学）
J24I045 空気衝撃波背後の微弱な放射に関する基礎的研究 …… 137
舩津 賢人（群馬大学）、大谷 清伸（東北大学）
J24I046 Transient Structural Analysis of the Interaction of Stiffness and Compliance between Aorta and Carotid Arteries by Performing Numerical Simulations …… 139
Yujie Li（Torrens University Australia）、太田　信（東北大学）
J24I048 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 …… 142
吉川　穣（宮城県産業技術総合センター）、高奈 秀匡（東北大学）
J24I049 Molecualr Simulation of CO_2 Permeation though Microalgae Lipid Memebrane…… 145
馬渕 拓哉（東北大学）、Fayza Yulia（Pertamina University）
J24I050 Research on Turbulence Models that Reproduce Spatially and Temporally Nonequilibrium Flows … 151
焼野 藍子（東北大学）、Richard Sandberg（The University of Melbourne）
J24I051 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 …… 153
小林 宏充（慶應義塾大学）、高奈 秀匡（東北大学）
J24I052 Characterization of Particulate Morphology Generated from Lithium-Ion Battery (LiB) Combustion Processes …… 159
Samuel L. Manzello（Reax Engineering）、丸田　薫（東北大学）
J24I053 高感度表面変位検出による量子ナノ構造内のフォノン伝搬特性評価 …… 161
福山 敦彦（宮崎大学）、大堀 大介（東北大学）
J24I054 Molecular-scale Design of Flame Retardant Polymer Materials by Using an Integrated Scheme of Quantum Chemistry and Molecular Simulation …… 164
Yinbo Zhao（Tongji University）、菊川 豪太（東北大学）
J24I055 マグナス風車の性能向上に向けたフィン付き回転円柱の非定常流れ場の解明とフィン形状の最適化 … 167
長谷川 裕晃（宇都宮大学）、大林　茂（東北大学）
J24I056 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 …… 171
吉木 宏之（仙台高等専門学校）、佐藤 岳彦（東北大学）
J24I057 ナノメモリ高性能化のためのデバイス加工技術に関する研究 …… 176
大野 武雄（大分大学）、遠藤 和彦（東北大学）
J24I059 多様なプラズマ照射による植物種子への影響解析 …… 178
林　寧生（光産業創成大学院大学）、大堀 大介（東北大学）
J24I060 Harnessing Machine Learning for Enhancing Fluid Mechanics Understanding in Riblet Surfaces …… 182
Lavi Rizki Zuhal（Bandung Institute of Technology）、焼野 藍子（東北大学）
J24I061 らせん渦の乱流遷移メカニズムと乱流の統計的性質の解明 …… 185
服部 裕司（東北大学）、Ivan Delbende（Sorbonne University）
J24I062 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 …… 188
太田 匡則（千葉大学）、永井 大樹（東北大学）
J24I063 遷音速／超音速境界層の層流制御技術の開発 …… 191
服部 裕司（東北大学）、Adrian Sescu（Mississippi State University）

J24I064 複雑流動場に対する圧縮センシング技術の構築 …… 194
松田　佑（早稲田大学）、永井 大樹（東北大学）
J24I065 Pathobiology-Hemodynamics Interaction in Aneurysms Genesis, Growth and Rupture…… 197
Muhamed Albadawi（Alexandria University）、太田　信（東北大学）
J24I066 着陸時における空陸両用車の横風に対する空気力及び流れ場の解析 …… 202
森澤 征一郎（沖縄工業高等専門学校）、大林　茂（東北大学）
J24I067 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 …… 206
竹内　希（東京科学大学）、高奈 秀匡（東北大学）
J24I068 A Novel Research for Performance Optimization of Microchannel Heat Exchangers Using Fins, Magnetic Field, and Hybrid Nanofluids…… 209
高奈 秀匡（東北大学）、Shabbir Ahmad（Universidade Federal do Rio Grande）
J24I070 表面修飾ナノ粒子／分散媒のナノスケール界面現象に関する研究 …… 213
久保 正樹（東北大学工学研究科）、小宮 敦樹（東北大学）
J24I071 不透明媒質中での衝撃波形成と伝播過程の実験的解明 …… 217
水書 稔治（東海大学）、大谷 清伸（東北大学）
J24I072 Analysis of Power Generation from Ammonia Based Fuel in Solid Oxide Fuel Cells …… 220
Jeongmin Ahn（Syracuse University）、中村　寿（東北大学）
J24I073 Sonic-boom Surrogate Model Integration in a Chemistry-climate Model …… 224
山下　博（German Aerospace Center）、大林　茂（東北大学）
J24I075 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 …… 227
Abid Ustaoglu（Bartin University）、岡島 淳之介（東北大学）
J24I076 高速電離流を伴う宇宙航行システムの数値的研究 …… 239
高橋 聖幸（東北大学工学研究科）、永井 大樹（東北大学）
J24I077 サブ 10 μ m micro-LED の開発 …… 243
寒川 誠二（National Yang Ming Chiao Tung University）、大堀 大介（東北大学）
J24I078 Investigation of Organophosphorus Flame Retardants: Enhancing Fire Safety in Materials through Advanced Experimental and Computational Techniques …… 246
Yang Li（Northwestern Polytechnical University）、中村　寿（東北大学）
J24I079 Development of Transparent Ultrasound Phantom Material: Sound Velocity Study …… 248
Muhammad Shiddiq Sayyid Hashuro（Bandung Institute of Technology ）、太田　信（東北大学）
J24I080 数値シミュレーションを用いた那覇空港の滑走路上に生じる流れ場の解析 …… 250
森澤 征一郎（沖縄工業高等専門学校）、焼野 藍子（東北大学）
J24I081 Combined In situ & Ex situ, Multi-scale Stress Measurements in Crystalline Geothermal Reservoirs … 253
Xiaodong Ma（University of Science and Technology of China）、椋平 祐輔（東北大学）
J24I082 Research on the Transition Mechanism on the Surface of High-speed Flying Vehicle and a Turbulence Model that Reproduces It …… 255
焼野 藍子（東北大学）、Jens Fransson（KTH Royal Institute of Technology）
J24I083 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 …… 258
後藤　実（宇部工業高等専門学校）、内一 哲哉（東北大学）
J24I084 揚力型大気圏突入カプセルの自由運動型風洞試験 …… 260
上野 和之（岩手大学）、永井 大樹（東北大学）
J24I086 ヒト中枢神経疾患モデル化三次元血液脳関門チップの開発 …… 264
立川 正憲（徳島大学）、船本 健一（東北大学）

J24I087 Hemodynamics at Internal Carotid Artery with Aneurysm in Elastic Full-scale Patient Specific Model 267
Nadia Shaira Binti Shafii（Universiti Teknologi Malaysia）、太田　信（東北大学）
J24I089 高圧環境における酸素富化火炎の計測技術の高度化に関する研究 …… 270
早川 晃弘（東北大学）、中谷 辰爾（東京大学）
J24I090 抗力係数に減速が与える効果の高精度計測 …… 272
菊池 崇将（日本大学）、大谷 清伸（東北大学）
J24I091 Fabrication of Nanofibrous Layer Covered Stents …… 275
Angéla Jedlovszky-Hajdú（Semmelweis University）、太田　信（東北大学）
J24I092 バイオミメティックスを活用した流体と音波の透過性に大きな差異をつけた多孔質材料による効果的な流動抵抗・空力騒音低減技術の開発 …… 281
寺島　修（富山県立大学）、永井 大樹（東北大学）
J24I093 超音速飛翔体表面の圧力場計測の高精度化を目指した新型 AA-PSP の基礎研究…… 284
沼田 大樹（東海大学）、大谷 清伸（東北大学）
J24I094 スライディングメッシュ法による稼働エンジンと機体の統合解析 …… 286
千葉 一永（電気通信大学）、大林　茂（東北大学）
J24I097 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 …… 289
本澤 政明（静岡大学）、高奈 秀匡（東北大学）
J24I098 Analysis of Thermophysical Properties of Formic Acid as Phase-Change Material Based on Aluminum Fumarate as Metal-Organic Frameworks Using Molecular Dynamics Simulation as a Reviewing Approach …… 292
Nasruddin Yusuf Rodjali（Universitas Indonesia ）、徳増　崇（東北大学）
J24I099 Development of High-Precision Estimation Techniques for Aerodynamic Heating Using Functional Molecular Sensors …… 296
永井 大樹（東北大学）、Bok Jik Lee（Seoul National University）
J24I100 Hybridization of Nanocellulose with Silver Nanoparticles for the Fabrication of Antibacterial Filament Composites by a Field-Assisted Flow Focusing Method …… 300
高奈 秀匡（東北大学）、Anthony B. Dichiara（University of Washington）
J24I101 金属／酸化チタン界面構造の分子動力学解析 …… 303
宇佐美 徳隆（名古屋大学）、徳増　崇（東北大学）
J24I102 Understanding the Role of Fluids in the Nucleation Process of the Noto, Japan, 2024, Mw 7.5 Earthquake … 307
Cornelius Langenbruch（Freie Universität Berlin）、椋平 祐輔（東北大学）
J24I103 Multi-scale Analysis of Oxygen Ion Conduction Property in Solid Oxide Electrolyte Membrane …… 310
徳増　崇（東北大学）、Jeongmin Ahn（Syracuse University）
J24I104 Feature Extraction for Better Prediction of Thermo-Physical Properties of Organic Materials Using Machine Algorithms …… 313
Hari Krishna Chilukoti（National Institute of Technology, Warangal）、菊川 豪太（東北大学）
J24I105 Evaluation of the Dynamics of Natural Convection Thermal Boundary Layer under High Grashof Number Condition …… 315
小宮 敦樹（東北大学）、Nicholas Williamson（The University of Sydney）
J24I106 Schlieren Imagery of Low Frequency AC Voltage EHD of Phase Change Materials …… 318
James Cotton（McMaster University）、佐藤 岳彦（東北大学）

＜2024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＞
J24H001 多様な拡散特性を持つ可燃性物質の「火炎・着火対応」の構築 …… 325
松江　要（九州大学）、森井 雄飛（東北大学）
J24H002 3 自由度の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…… 329
石出 忠輝（木更津工業高等専門学校）、大林　茂（東北大学）

J24H003 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）…… 331
泉　源（木更津工業高等専門学校）、大林　茂（東北大学）
J24H004 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 …… 334
新竹　純（電気通信大学）、阿部 圭晃（東北大学）

＜2024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＞

J24R001 Numerical Simulation of the Effect of Viscosity on the Directional Movement of Droplets on the Bioinspired Micro/nanostructured Surfaces …… 339
Aike Qiao（Beijing University of Technology）、太田　信（東北大学）
J24R002 Prediction and Optimisation of Axisymmetric Shock Reflection in Supersonic Aerospace Applications … 344
Hideaki Ogawa（九州大学）、大谷 清伸（東北大学）
J24R003 機能性材料の合成における量子・分子論的考察 …… 359
金子　智（神奈川県立産業技術総合研究所）、徳増　崇（東北大学）
J24R004 Towards Fluid-structure Interaction Analysis using High-order Flux-Reconstruction Scheme and Cross-platform-based Parallel Computation …… 362
阿部 圭晃（東北大学）、Freddie D. Witherden（Texas A&M University）

＜2024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＞

J24Ly01 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 …… 371
加藤 文武（茨城工業高等専門学校）、内一 哲哉（東北大学）
J24Ly02 三次元造形した SiC の電子顕微鏡内局所圧縮試験 …… 376
栗田 大樹（東北大学環境科学研究科）、内一 哲哉（東北大学）
J24Ly03 Epoxy Polymer for Ammonia Storage Solution …… 378
Nicolas Mary（MATEIS Lab, INSA Lyon）、内一 哲哉（東北大学）
J24Ly04 Vascular Integration in Three-Dimensional Organoid-on-Chip Platform …… 381
Nicolas Aznar（Claude Bernard University Lyon 1）、船本 健一（東北大学）
J24Ly05 Monitoring Eukaryotic Cell Functions under Various Hypoxic Conditions with Microfluidic Differential Oxygenators …… 384
Jean-Paul Rieu（Claude Bernard University Lyon 1）、船本 健一（東北大学）
J24Ly06 Numerical Study on Electrical Drift and Diffusion of Ions in Polymer Strips …… 387
Joel Courbon（MATEIS Lab. INSA Lyon）、高奈 秀匡（東北大学）
J24Ly07 Experimental Study of New Model Electroactive Materials (TEmPuRA) …… 389
Gildas Coativy（LGEF, INSA Lyon）、高奈 秀匡（東北大学）
J24Ly08 統合型混相エネルギーシステムに関する連成解析的アプローチ …… 391
石本　淳（東北大学）、Thomas Elguedj（LaMCoS, INSA Lyon）
J24Ly09 超音波反射にもとづく配管内面の腐食の形状推定 …… 394
中本 裕之（神戸大学）、内一 哲哉（東北大学）
J24Ly10 回転二重円筒／円すい間に発生するテイラー渦の非線形分岐挙動と動的モード分解 …… 396
足立 高弘（秋田大学）、小宮 敦樹（東北大学）
J24Ly11 Active Control of Protein Mass Transfer by Membranes with Various Pore Patterns…… 399
小宮 敦樹（東北大学）、Sébastien Livi（IMP, INSA Lyon, Université de Lyon）
J24Ly12 Mass Transfer Enhancement and Control by using Ultrasound Induced Flow…… 401
小宮 敦樹（東北大学）、Valéry Botton（LMFA, INSA Lyon, Université de Lyon）
J24Ly13 Carbon Diffusion in Iron Assisted by an Electric Field …… 403
Patrice Chantrenne（Université de Lyon）、徳増　崇（東北大学）

＜2024年度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＞
エネルギー有効利用における成熟技術間の橋渡し技術連成に関する研究集会の開催 …… 407
小宮 敦樹（東北大学）、Chengwang Lei（The University of Sydney）
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 …… 409
高奈 秀匡（東北大学）、Anthony Dichiara（University of Washington）
偏光比を考慮した SLIPI による液体アンモニア噴霧液滴径計測…… 412
早川 晃弘（東北大学）、Christine Mounaïm-Rousselle（University of Orléans）
液体アンモニアの噴霧燃焼特性に関する混相流体解析 …… 415
石本　淳（東北大学）、Sławomir Pietrowicz（Wrocław University of Science and Technology）
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 …… 419
森井 雄飛（東北大学）、Huangwei Zhang（National University of Singapore）

＜2024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＞
J24L004 ナノ構造体の組成が抗菌・殺菌性へ及ぼす影響評価 …… 425
伊藤　健（関西大学）、大堀 大介（東北大学）
J24L026 応力降下量と，観測に基づくせん断応力の直接比較 …… 427
椋平 祐輔（東北大学）、吉光 奈奈（京都大学）
J24L036 ファインバブル燃料の微粒化と燃焼特性 …… 429
中武 靖仁（久留米工業高等専門学校）、早川 晃弘（東北大学）
J24L037 次世代液化燃料の噴射過程に関する研究 …… 431
川原田 光典（交通安全環境研究所）、大島 逸平（東北大学）
J24L069 固体表面ナノバブルの三相界面における力学的バランスに関する分子動力学的解析 …… 437
永島 浩樹（琉球大学）、徳増　崇（東北大学）
J24L074 機能性流体を用いた地下開発高効率化に向けた基礎物性測定 その 3 …… 440
澤山 和貴（京都大学）、椋平 祐輔（東北大学）
J24L085 Experiment and Molecular Dynamics Simulation for Plasma-Dependent Interface …… 442
Siwei Liu（東北大学）、Kosuke Tachibana（ETH Zurich）
J24L088 Comparison of Different Numerical Solvers for Intravascular Treatment Simulation…… 444
Narendra Kurnia Putra（Bandung Institute of Technology）、安西　眸（東北大学）
J24L095 Tensity and Surface Tension Effects on Vortex Dynamics …… 446
Stefan Llewellyn Smith（University of California）、服部 裕司（東北大学）
J24L096 微細流路内部の液滴を介した熱および運動量輸送特性の解析 …… 448
福島 啓悟（福井大学）、徳増　崇（東北大学）

1. 2024 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。

2024 年度公募共同研究は、2024 年 4 月 1 日から 2025 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、2023 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。2024 年 10 月に運営委員会、共同研究委員会、11 月には、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

2024 年 11 月 18 日～20 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-2024 において開催した。本報告会では 93 件（一般・国際連携・萌芽区分 77 件、リヨンセンター公募共同研究 16 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、174 人の出席者があった。その他、同時開催された ICFD2024 にて、39 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。（http://afidb.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）
登録済みデータ総数	442	442	442
流体科学データベースへのアクセス件数	3,657	4,383	4,111

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

2024 年 10 月に、2023 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、関係機関、研究者に配布した。報告書の内容（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の申請・採択状況を示す。表 4 にはリヨンセンター公募共同研究の申請・採択状況を示す。表 5 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の採択状況を示す。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示す。

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)
申請数（件）		87	90	102
採択数（件）		64*	67	92
国内・国際	国内	38	33	51
	国際	26	34	41
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)
	ナノ・マイクロ	2 (1/1)	4 (2/2)	9 (4/5)
	健康・福祉・医療	10 (5/5)	15 (8/7)	14 (7/7)
	宇宙・航空	14 (11/3)	13 (10/3)	21 (17/4)
	基盤流体科学	15 (9/6)	14 (5/9)	18 (10/8)
	その他	1 (1/0)	0 (-/-)	2 (2/0)
採択率（%）		74	74	90
申請金額（千円）：a		28,136	29,624	38,591
採択金額（千円）：b		15,930	16,284†	19,130
平均充足率（金額）（%）：b/a		57	55	50
平均採択金額（千円）		249	243	208

*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。
†記載誤りが判明したので 2024 年度報告書にて訂正

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			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)	2022 年度(令和 4 年度)	2023 年度(令和 5 年度)	2024 年度(令和 6 年度)
申請数（件数）	3	3	4	7	2	4
採択数（件数）	3	3	4	7	2	4
採択率（%）	100	100	100	100	100	100
申請金額（千円）：a	4,800	5,880	8,300	1,292	341	785
採択金額（千円）：b	2,223	3,129	3,014	1,008	242	599
平均充足率（金額）（%）：b/a	46	53	36	78	71	76
平均採択金額（千円）	741	1,043	754	144	121	150

	特別国際公募共同研究			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)	2022 年度(令和 4 年度)	2023 年度(令和 5 年度)	2024 年度(令和 6 年度)
申請数（件数）	1	0	0	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	-	-	-	-	-

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)
申請数（件数）	20	14	13
採択数（件数）	20	14	13
採択率（%）	100	100	100
申請金額（千円）：a	11,030	7,580	7,584
採択金額（千円）：b	8,950	6,480	6,400
平均充足率（金額）（%）：b/a	81	85	84
平均採択金額（千円）	448	463	492

※リヨンセンター公募共同研究に係る経費は、「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 5：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)
申請数（件数）	5
採択数（件数）	5
採択率（%）	100
申請金額（千円）：a	7,500
採択金額（千円）：b	6,500
平均充足率（金額）（%）：b/a	87
平均採択金額（千円）	1,300

※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)
実施数（件）		21	23	10
国内・国際	国内	18	20	8
	国際	3	3	2
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)
	ナノ・マイクロ	1 (1/0)	1 (1/0)	3 (3/0)
	健康・福祉・医療	1** (1/0)	2 (2/0)	2 (1/1)
	宇宙・航空	4 (3/1)	4 (4/0)	0 (-/-)
	基盤流体科学	3 (2/1)	6 (5/1)	1 (0/1)
	その他	0 (-/-)	0 (-/-)	0 (-/-)
申請金額（千円）：a		7,152	7,970	3,118
採択金額（千円）：b		1,775	2,017	703
平均充足率（金額）（%）：b/a		25	25	23
平均採択金額（千円）		85	88	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)
国内	798 (307)	927 (379)	957 (504)
国外	858 (307)	1,460 (610)	1,090 (454)
合計	1,656 (614)	2,387 (989)	2,047 (958)

（ ）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) *
物件費（千円）	11,414	7,984	14,193
旅費（千円）	15,200	17,637	20,624
合計（千円）	26,614	25,621	34,817

*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)
学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）	56	51	49
国際会議、国内会議、研究会、口頭発表等	231	237	267
その他（特許・受賞・マスコミ発表等）	23	37	29
合計（件）	310	325	345

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

†両年度の数字が誤って入替り記載されていたので 2024 年度報告書にて訂正

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。
†令和 3 年度数値に記載誤りがあったので 2024 年度本報告書にて訂正

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。
†両年度の数字が誤って入替り記載されていたので 2024 年度報告書にて訂正

※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	J24I001
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	2 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***
Shuonan DONG*，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」ことを利用して，主翼後流を解析する高忠実度 CFD ソルバと尾翼振動を解析する空力弾性ソルバを独立させ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．さらに，目的達成の過程で主翼と尾翼の概念設計に役立つ尾翼バフェット振動振幅予測式の構築も目指す．

2. 研究成果の内容

研究２年目となる 2024 年度はより多様な主翼後流場を生成できる実験装置の製作を行った．図１に示すようにモータで駆動する加振版を平板尾翼前方に配置し，任意の周波数成分を持った後流場を生成できるようにした．図２に示すように，この後流場によって，尾翼平板翼模型にバフェット振動を模擬した挙動が生成できるようになった．図３には加振板の周波数と平板尾翼模型のレーザ変位計で得られた振動振幅/圧電素子センサで得られた電圧の関係を示す．これら実験結果は提案する解析で得られた結果と良好に一致した．

3. 研究目標の達成状況

研究目標達成に必要な実験装置を製作できたので，共同研究全体の目標達成状況としては 60%といえる．

4. まとめと今後の課題

研究目標達成に必要な実験装置と解析技術の基盤ができた．その成果を迅速に論文としてまとめることが今後の課題である．

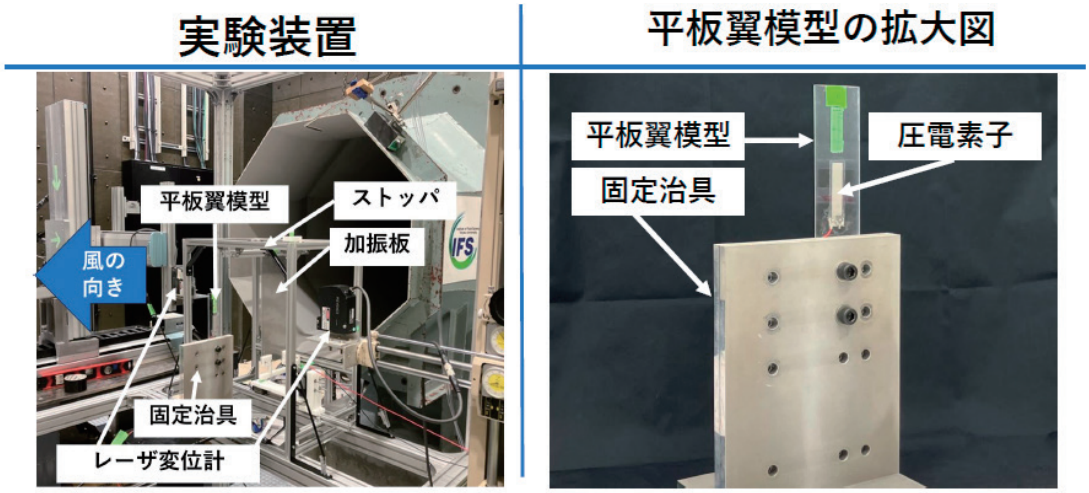


図１ 低速バフェットの風洞実験装置

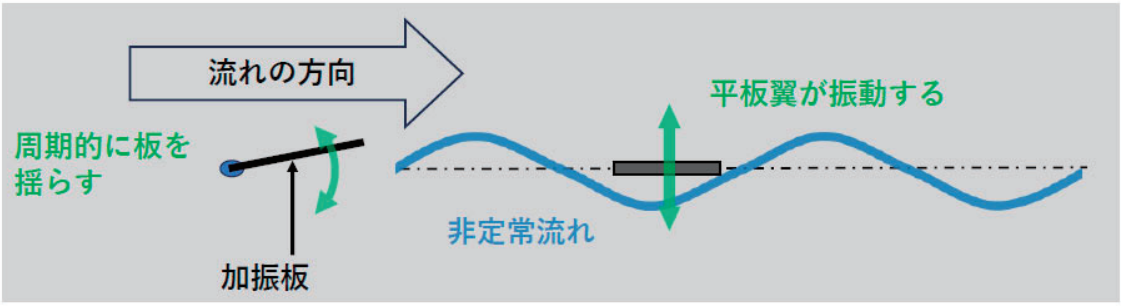


図２　流速と振動振幅の関係

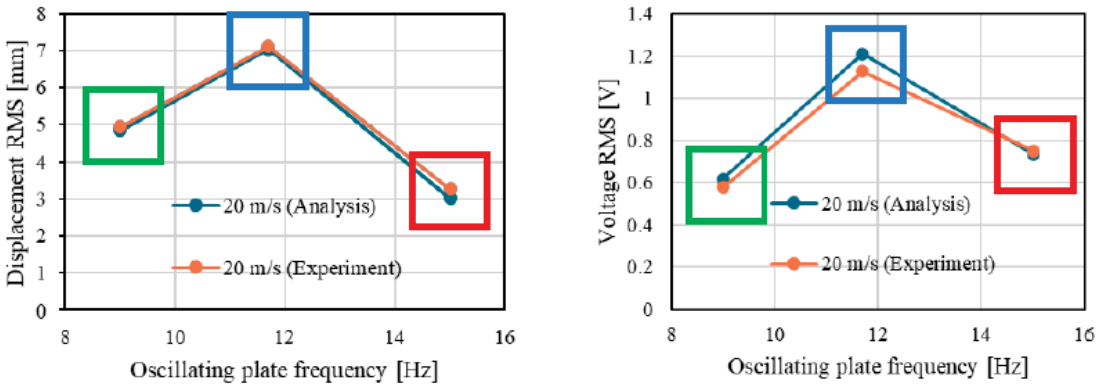


図３　平板尾翼模型の変位と圧電素子の電圧

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., He, H., Yamashita, H., Sugiyama, H., Abe, Y., Haga, T., Otsuka, K.: Nonlinear Aeroelastic Simulation Framework with Machine Learning for High Aspect Ratio Wings, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-55, pp. 153-154.

3)　その他（特許，受賞，マスコミ発表等）なし

課題番号	J24I002
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	2 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
***愛知工業大学大学院
†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．

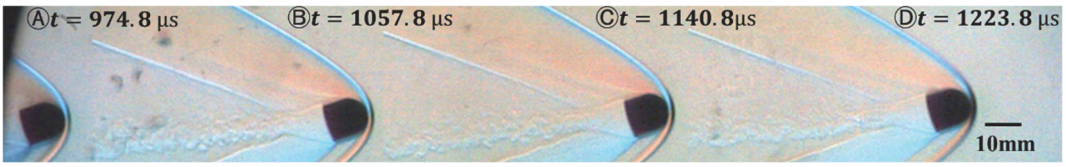
2. 研究成果の内容

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．射出試験体に用いた柔軟弾性体は安定した飛行条件導出のためアスペクト比 1 の丸頭形状の試験体を用いた．火薬銃式弾道飛行装置で使用した剛体の材質はアルミニウム，弾性体の材質はシリコンゴムである．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 より自由飛行している物体の前方に離脱衝撃波が発生している．弾性体の飛行速度は，弾性体の移動距離と飛行時間から算出し，剛体模型$M = 2.43 \pm 0.01$，弾性体模型$M = 1.81 \pm 0.02$ となる．剛体模型は，離脱衝撃波により，迎角α=16.9±0.4°，衝撃波角度θ=54.4±2.8°となった．弾性体は飛行に伴い離脱衝撃波の造波抵抗によって弾性変形し，飛行速度は 25.5%減速した．その時の衝

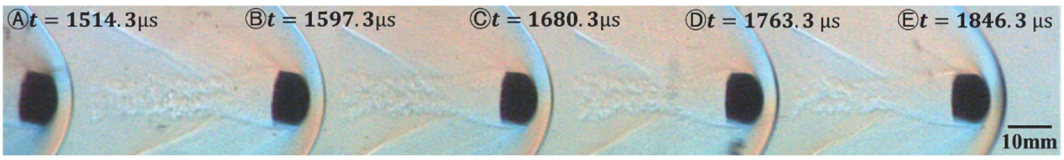
撃波角度 θ =93.0±6.4°であった．t = 1514.3~1763.3μs間の迎角は，α=−7.5±1.5°となり，下向きで飛行している．直径は 11.1mm(+11%)，全長は 8.7mm(-23%)，曲率半径は 8.7mm(+74%)である．弾性体は変形によって流れが変化し，剛体に比べて衝撃波角度が約 40°大きくなることがわかった．衝撃波角度の増加は，衝撃波背後のエネルギ，静圧，周囲の温度，密度勾配を減衰させる可能性が考えられる．

(a)丸頭試験体(剛体)　(b)丸頭試験体(弾性体)　(c)寸法　(d)設置状態

図 1：試験体寸法図



(a)丸頭剛体



(b)丸頭弾性体

図 2：自由飛行時に発生する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，衝撃波角度が減少する．

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] N. Makita, H. Ueda, K. Ohtani, N. Sato, T. Ogawa, Y. Konishi, K. Kitagawa:Attenuation Effect of Shock Environment in Supersonic Flows using the Soft Body, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-66, pp.187-188.

[2] 牧田直樹，上田颯，佐藤暢也，北川一敬，大谷清伸，小川俊広:超音速環境下の弾性体周りに発生する衝撃波の非定常干渉に関する研究, 2024 年度衝撃波シンポジウム，仙台, (2025), #2c2-3.

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

課題番号	J24I003
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 年目

マグネシウム系半導体材料を用いたエネルギー変換素子開発

Development of Energy Conversion Devices Using Magnesium-based Semiconductor Materials

鵜殿 治彦*†，大堀 大介**††
坂根 駿也*，鮎川 瞭仁*
*茨城大学工学部，**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

熱と電気の直接変換を可能にする熱電材料のうち小型で軽量な薄膜型材料は，室温域の身近な熱源を対象に，Iot センサーやウェアラブルデバイス向けの小型独立電源としての応用が期待されている．一方で，実用化に向けては高変換効率で安価な材料開発が求められる．そこで我々は，Mg を原料とした有望材料である Mg_3Sb_2 に着目した．これまでに報告されている Mg_3Sb_2 薄膜の多くは粒界や格子歪みを含む薄膜であり，高品質な単結晶薄膜の達成は Mg 系半導体材料を用いた高性能熱電素子開発の新たなベースとなることが期待できる．

本研究では，Mg 系半導体材料を用いた熱電変換素子開発の先駆けとして，高品質な Mg_3Sb_2 薄膜の作製及び熱電特性評価を行なった．

2. 研究成果の内容

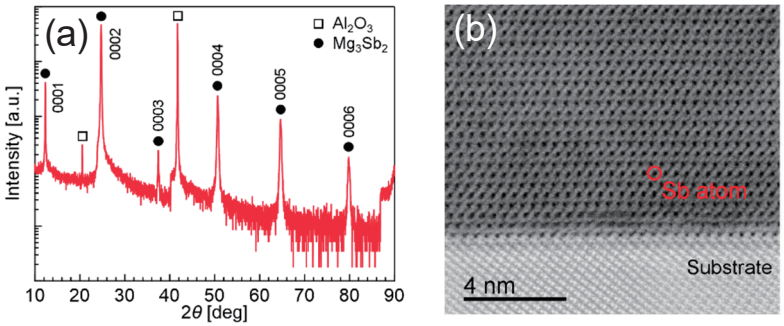


図 1：Mg_3Sb_2 薄膜の(a)X 線回折パターン(b)断面の透過型電子顕微鏡像

分子線エピタキシー装置を用いて成長させた Mg_3Sb_2 薄膜の X 線回折パターンを図 1(a)に示す．基板である c 面 Al_2O_3 に由来するピークの他には c 面 Mg_3Sb_2 に由来するピークのみが確認でき，高度に c 面配向した Mg_3Sb_2 薄膜であることが分かった．また，薄膜断面の透過型電子顕微鏡像を図 1(b)に示す．基板と薄膜の界面付近を観察しており，白いコントラストがついた部分が Al_2O_3 基板である．その上には黒く点状に映る Mg_3Sb_2 中の Sb 原子が，理想的な結晶構造を反映して並ぶ様子が確認できたことから，基板へダイレクトに成長し，厚みが数 Å の時点で既に格子緩和したほぼ歪みのない Mg_3Sb_2 薄膜であることが分かった．

物性評価の結果，従来の Mg_3Sb_2 薄膜の報告と比較しキャリア移動度が 4 倍以上，熱電特

性が約 3 倍向上した．これらは，結晶欠陥の少ない高品質な薄膜成長によりキャリア散乱が抑制されたことに起因すると考えられる．この結果は，膜の結晶品質を高めることで，高い出力因子が得られることを示しており，今後の微細加工による熱電変換素子構造の形成においてもダメージの少ない加工が高い出力因子を保持するためには必要なことを示している．

3. 研究目標の達成状況

本研究により，平坦で高品質な Mg_3Sb_2 薄膜を形成することが可能となり，膜の高品質化が高い出力因子につながることが示された．Mg_3Sb_2 薄膜のエッチングについては詳細な報告はなく，その微細加工技術の開発はこれからの新たな課題である．本研究で作製した Mg_3Sb_2 薄膜を用いて微細加工技術の開発を今後進めていく．

4. まとめと今後の課題

本研究では分子線エピタキシー装置を用いて c 面 Al_2O_3 基板上に Mg_3Sb_2 薄膜を作製した．結晶構造評価では，結晶方位が揃い，基板近傍での格子歪みが数 Å で緩和した，高配向・低欠陥密度の Mg_3Sb_2 薄膜が作製できたことが分かった．また，物性評価では，キャリア移動度が大幅に向上したことから，従来の Mg_3Sb_2 薄膜と比較して高い熱電特性が得られたことが分かった．今後は，より実用的なデバイスとしての応用に向け，ドーピングを施した n 型材料の作製や微細加工による高性能な熱電モジュールの作製に取り組んでいく．

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] Akito Ayukawa, Nozomu Kiridoshi, Takeru Kuriyama, Wakaba Yamamoto, Akira Yasuhara, Haruhiko Udono, Shunya Sakane: Epitaxial Growth of High-quality Mg_3Sb_2-based Thin Films and Their Thermoelectric Properties, *The 21st International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2024).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）

なし

（受賞）

Best Presentation Award for Young Researcher, Epitaxial Growth of High-quality Mg_3Sb_2-based Thin Films and Their Thermoelectric Properties, Akito Ayukawa, 2024. 11. 20, The 21st International Conference on Flow Dynamics.

（マスコミ発表）

なし

課題番号	J24I005
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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*
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，高温・還元雰囲気下で Ni が YSZ に固溶し，結晶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 O^{2-}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 モデルを作成し，MD により各イオンの配置の時間発展を計算することによって，イオン伝導率の変化，構造の変化について解析した．また，2024 年 10 月に東北大学流体科学研究所（仙台）にて開催された共同研究集会において，京都大学工学研究科と東北大学流体科学研究所の研究メンバーが集まり，これまでの計算結果の検討を行い，Ni の第二近接サイトにおける拡散特性とイオン伝導率低下の関係，および今後取り組むべき相変態現象の再現方法について議論した．本集会では，今後の研究計画として，異方的圧力条件を導入した計算手法の導入や，Ni 析出を含む界面現象の解析に関しても合意が得られた.

2.1 Ni が固溶した YSZ モデルの作成と検証

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 5 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.

図 1 に，計算した 1273 K における YSZ のイオン伝導率と Y_2O_3 の添加率との関係を，文献値と比較したグラフを示す．なお，MD の文献値は本研究と同じポテンシャルを用いている．実験値と比較すると，値のオーダーは一致しており，ピーク位置に 3~4 mol%ほどのずれはあるものの，極大をとる傾向も再現できている．以上より，本研究で作成した YSZ モデルはイオン伝導特性を適切に再現できていると判断できる．

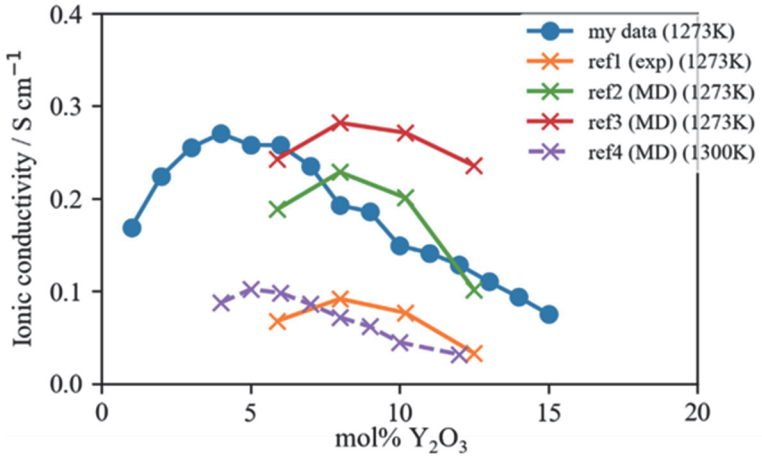


図 1：YSZ モデルのイオン伝導率の検証．Ref1 [1] は実験の文献値，Ref2, 3[2] and 4[3] は MD の文献値．

2. 2 イオン伝導率の解析

図 2(a)に，8YSZ に Ni^{2+}，また，比較対象として Y^{3+}を同様に置換型固溶させた場合の酸化物イオン伝導率の変化を示す．横軸のモル分率は，固溶させた Ni^{2+}もしくは Y^{3+}の個数の，金属イオン（Zr^{4+}，Y^{3+}，Ni^{2+}）の総数に対する割合である．また，図 2(b)に，8YSZ に Ni^{2+}もしくは Y^{3+}を固溶させることで形成された酸素空孔のモル分率とイオン伝導率の関係を示す．なお，横軸の酸素空孔のモル分率は，追加で形成された酸素空孔数の，酸化物イオンサイト総数（酸化物イオン総数＋酸素空孔総数）に対する割合である．図 2(a)より同量の Ni^{2+}および Y^{3+}を固溶させたときに，Ni^{2+}を固溶させた時の方がイオン伝導率の低下が顕著である．また，図 2(b)より，同量の酸素空孔数に対しても，Ni^{2+}を追加した場合の方が，イオン伝導率が低くなることがわかる．これは，Ni^{2+}は Y^{3+}に比べて O^{2-}の拡散をより強く阻害することを示している．

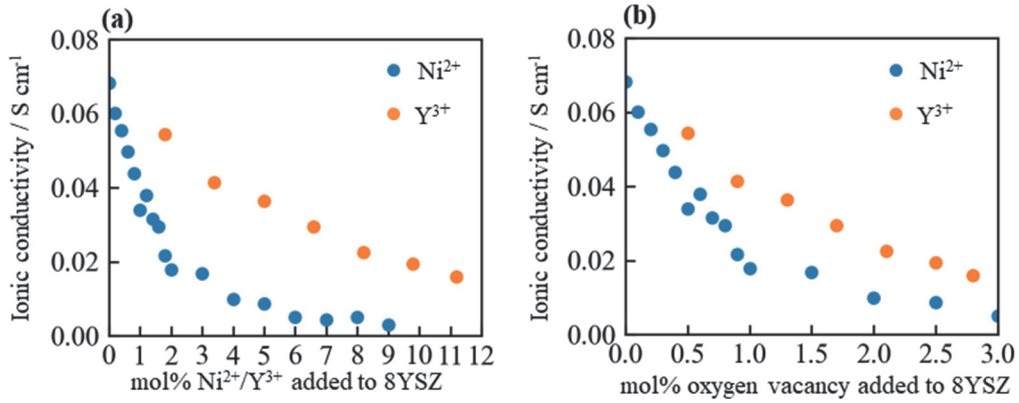


図 2：(a) イオン伝導率と Ni^{2+}/Y^{3+}のモル分率の関係，(b)イオン伝導率と酸素空孔のモル分率の関係．

次に，シミュレーション開始時の初期状態に Ni^{2+} および Y^{3+} の最近接，第二近接に位置する O^{2-} について，拡散係数を計算した．図 3(a)に，初期状態における金属イオン M^{+} と最近接，第二近接に位置する O^{2-} の位置関係の模式図を示す．図 3(b)には，図 3(a)に示した金属イオン M^{+} と O^{2-} 間の RDF を示す．図 3(c)に初期状態で Ni^{2+} および Y^{3+} の最近接，第二近接に位置する O^{2-} の拡散係数と Ni^{2+} のモル分率との関係を示す．まず，Ni^{2+} および Y^{3+} の最近接に位置する O^{2-} の拡散係数は同程度の大きさであり，いずれも系全体の O^{2-} の拡散係数より小さいことがわかる．一方で，Ni^{2+} の第二近接に位置する O^{2-} の拡散係数は，Y^{3+} の第二近接 O^{2-} と比較して小さい．これは，Ni^{2+} の第二近接の位置は，Y^{3+} の第二近接の位置と比べて酸素空孔が形成されづらく，その結果 O^{2-} の拡散経路として機能しづらいと考えられる．Ni^{2+} が Y^{3+} よりもイオン伝導率の低下に大きく寄与するのは，この第二近接の O^{2-} の拡散特性の違いによるものであると考えられる．

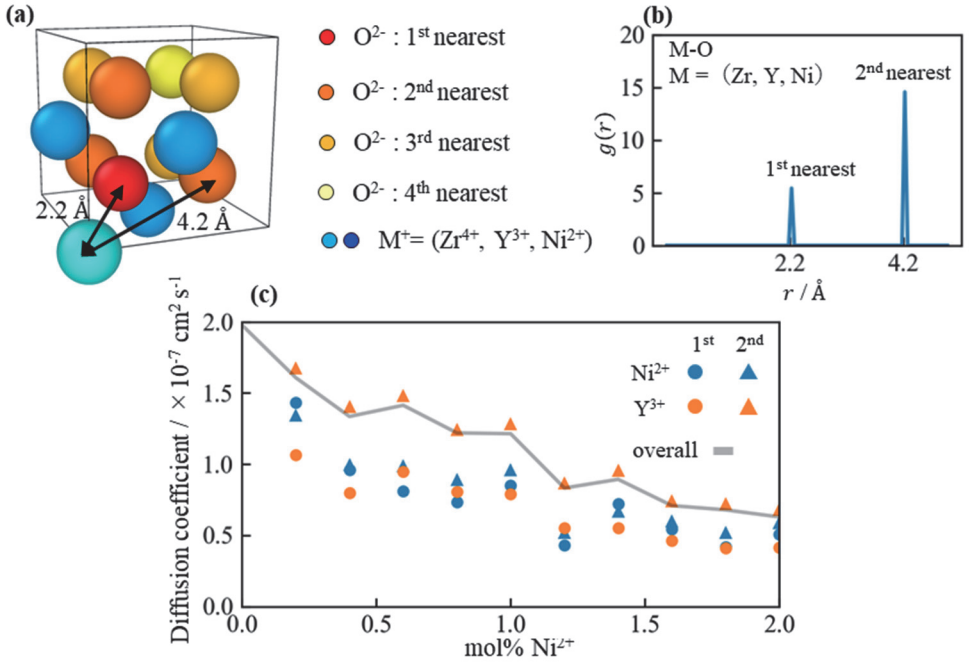


図 3：(a) 初期状態における金属イオン M^{+} と最近接，第二近接に位置する O^{2-} の位置関係の模式図，(b) 金属イオン M^{+} と O^{2-} 間の RDF，(c) 初期状態で Ni^{2+} および Y^{3+} の最近接，第二近接に位置する O^{2-} の拡散係数と Ni^{2+} のモル分率．

2. 4 構造の変化の解析

図 4 に固溶させた Ni^{2+} のモル分率が 0%，1.4%，4.0%の YSZ モデルにおける RDF を示す．Ni^{2+} のモル分率が増加しても，いずれのイオン間の RDF においてもピーク位置はほとんど変化しなかった．これは，結晶の格子定数がほとんど変化せず，実験で観察される Ni の固溶による YSZ の立方晶から正方晶への相変態が起こらなかったことを示している．これは，本研究では等方的に圧力制御を行ったため，特定の方向への変形が顕著に進行するような相変態が再現されなかったためであると考えられる．図 5 に各 RDF における，固溶させた Ni^{2+} のモル分率に対する第一ピークおよび第二ピークの値の変化を示す．Ni^{2+} のモル分率が増加すると，RDF のピーク強度は減少することがわかる．これは，Ni^{2+} の固溶量の増加に伴い，YSZ 結晶のイオン配置が乱れ，結晶性が低下するためだと考えられる．この結晶性の低下が，O^{2-} の移動経路の乱れを引き起こし，実験で確認される相変態と同様にイオン伝導率の低下に寄与している可能性がある．

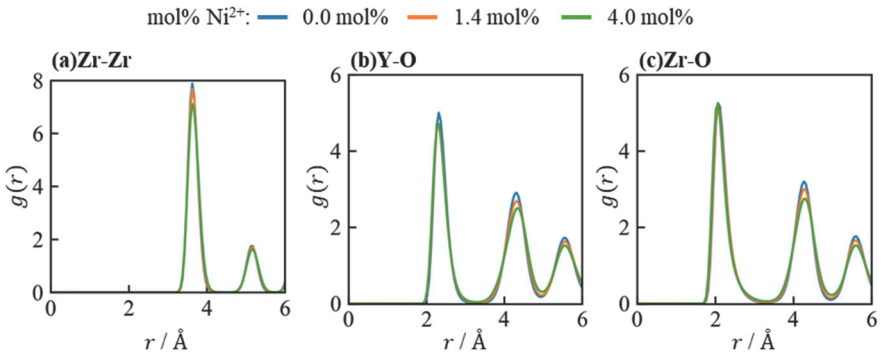


図 4：Ni^{2+}のモル分率が 0%，1.4%，4.0%の YSZ モデルにおける，(a)Zr-Zr，(b)Y-O，(c)Zr-O の RDF

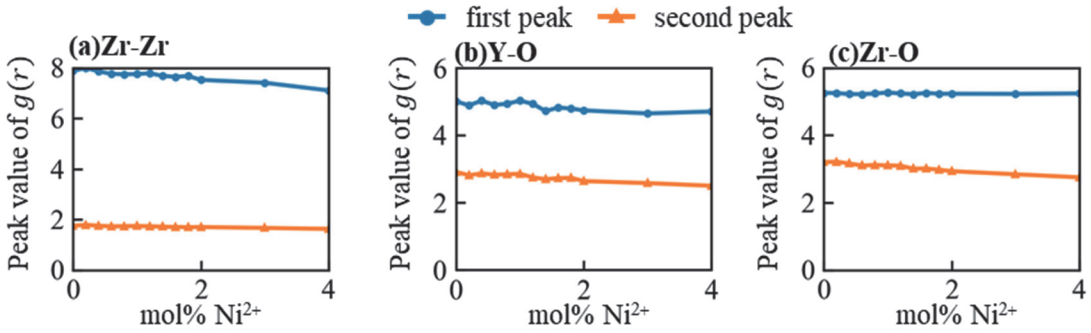


図 5：Ni^{2+}のモル分率と(a)Zr-Zr，(b)Y-O，(c)Zr-O の RDF の関係.

参考文献
[1] S. Ikeda et al., “Electrical conductivity of yttria-stabilized zirconia single crystals”, J. Mater. Sci. 20(1985)4593-4600.
[2] Y. Yamamura et al., “Molecular dynamics analysis of ionic conduction mechanism in yttria-stabilized zirconia,” Solid State Ionics 126(1–2)(1999)181–189.
[3] V. S. Vladimir et al., “Molecular dynamics simulation of oxygen diffusion in cubic yttria-stabilized zirconia: Effects of temperature and composition”, Solid State Ionics 266(2014)29–35.

3. 研究目標の達成状況

本研究では，Ni 固溶モデルの構築を完了し，YSZ モデルに対するイオン伝導率と構造特性の検証を行った．作成したモデルは実験値および既存の MD 研究とよく一致し，モデルの妥当性が確認された．また，Ni^{2+}およびY^{3+}を固溶させた場合のO^{2-}拡散挙動や酸素空孔の関係性を定量的に評価し，Ni 固溶が第二近接O^{2-}の移動を強く阻害することを明らかにした．これにより，イオン伝導率の低下機構を分子論的に解明することに成功した．進捗は当初計画に対して順調であり，想定された成果をほぼ達成している．今後は，YSZ の相変態挙動の再現に向け，異方的な圧力制御の導入や，Ni 析出・再溶解を伴う界面モデルへの拡張を検討する．これにより，より実系に近いシミュレーション環境の構築と，相変態メカニズムの精緻化を目指す．

4. まとめと今後の課題

本研究では，Ni の固溶が YSZ のイオン伝導性や構造に及ぼす影響とそのメカニズムを解明す

ることを目的として，Ni を固溶させた YSZ モデルに対して分子動力学（MD）シミュレーションを行った．Ni が固溶した YSZ のイオン伝導率の変化および構造の変化を解析した．まず，イオン伝導率を解析することで，YSZ に固溶した Ni^{2+}は Y^{3+}に比べて O^{2-}の拡散をより強く阻害することがわかった．その要因として，それぞれの第二近接の位置における O^{2-}の拡散特性の違いに起因することが明らかになった．また，RDF を計算し構造の変化を解析し，Ni の固溶量が増加するにつれて周囲のイオンの配置が乱れ，結晶性が低下することがわかった．

本研究には以下のような課題が残されている．今回のシミュレーションでは等方的な圧力制御を用いたため，実験で観測される YSZ の相変態を再現することができなかった．このため，今後は異方的な圧力制御法の導入を含め，相変態を忠実に再現可能な計算条件への見直しが必要である．本研究で構築したモデルでは，すべての方向に周期境界条件を適用したため，Ni と YSZ の界面で起こる実際の固溶現象を模倣することができていない．実際には，Ni^{2+}が YSZ と接する界面において固溶し，さらに還元されて析出するような現象が報告されている．これらの界面特有の現象を再現するためには，モデル構築手法の抜本的な見直しと，界面を含むより現実に即したシミュレーション条件の設定が求められる．

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] Yuting Guo, Taiyo Taniuchi, Jin Shiomi, Keisho Fukumoto, Taku Ohara, Masashi Kishimoto, Hiroshi Iwai: A Molecular Dynamics Investigation of Ionic Conductivity in YSZ Phase Transitions, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-34, Poster (presented on November 20).

[2] 塩見仁，谷内 太陽，郭 玉婷，岸本 将史，岩井 裕: Ni の固溶による YSZ の相変態と劣化メカニズムの分子動力学解析，日本機械学会 関西支部 2024 年度関西学生会卒業研究発表講演会，大阪公立大学 (2025).

3）その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J24I006
区分	一般公募共同研究
課題分野	その他（火山学）
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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

Flight Dynamics of Shockwave and Volcanic Ballistic Block in Explosive Eruptions

常松 佳恵*†，大谷 清伸**††
Steinau Nils*，瀬尾 和哉***，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
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

火山で発生する爆発的噴火では，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，この現象についてのメカニズムの解明はあまり進んでおらず，特に噴出速度がどのように決定されるかについての研究成果はほとんどない．そこで，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，ガスの流れの構造と岩塊の速度の関係から岩塊の飛翔に関する物理法則を導くことを本研究の目的とする．

2. 研究成果の内容

2024 年 7 月 24 日から 26 日にかけて，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爆発を再現する実験を行った．具体的には，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膜（セロハン，マイラー膜など）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ュリーレン法もしくは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．膜の強度やビーズのサイズ，また破膜してから外部に噴出するまでのノズルの長さを変えて実験を行い，26 ケース分の実験結果を得た．

実験の結果，衝撃波管の出口付近におけるガスの構造(図 1 a)，ビーズの軌跡を得ることができた(図 1 b)．また，軌跡の時間変化を解析することで速度の分布を得ることもできた（図 1c)．さらに，解析の結果ビーズサイズと噴出速度の関係についてもデータを得ることができた（図 2)．

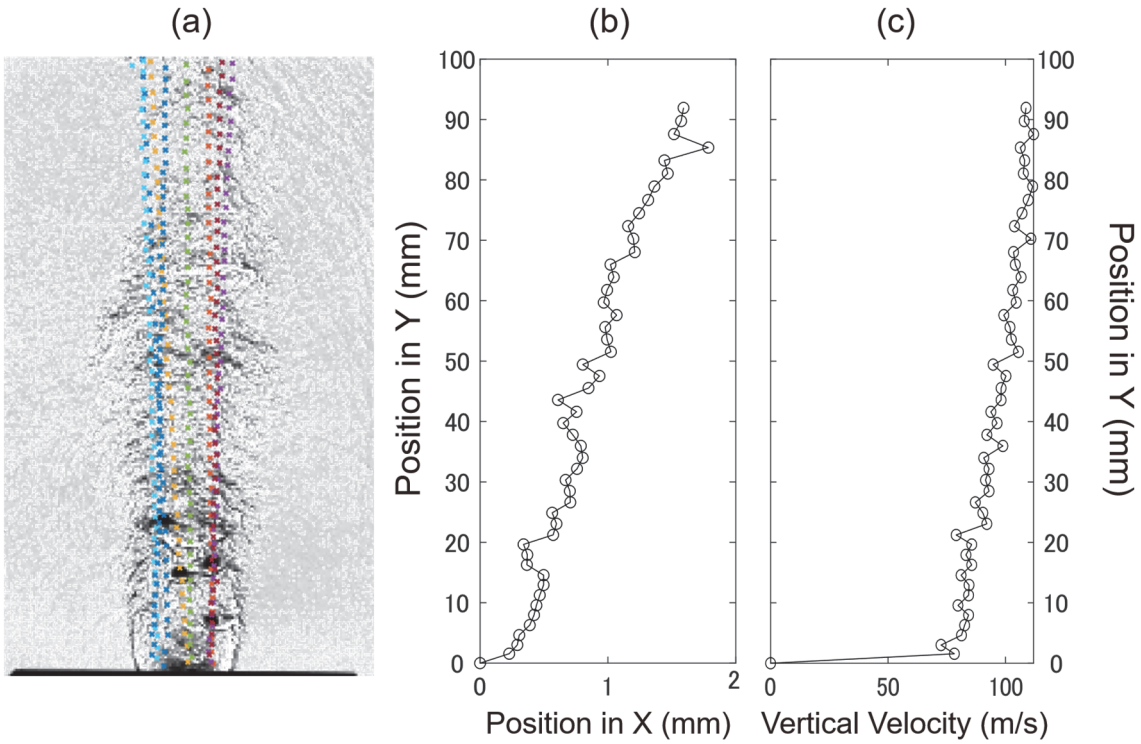


図 1：衝撃波管実験から得られた(a) ジェットの構造，一つのビーズの (b) xy 座標，(c) 速度プロファイル．(a)の中の色つきの点は，時間ごとのビーズの位置をまとめた物であり，色の違いはビーズの違いを表す．

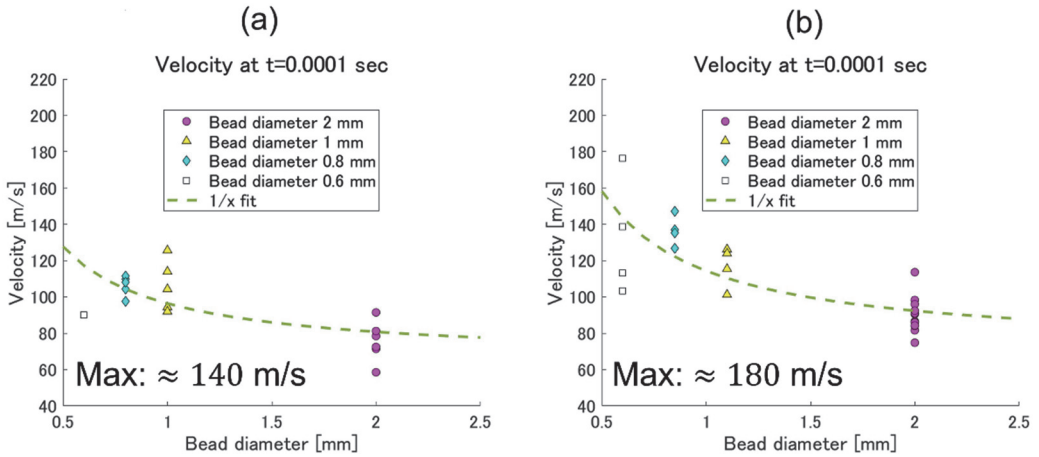


図 2：ビーズのサイズと噴出速度の関係．(a) ノズルの長さ 39 mm の場合．(b) ノズルの長さ 62 mm の場合．

3. 研究目標の達成状況

衝撃波管実験の結果，ビーズのサイズと，噴出速度または圧力の関係については関係性が見えてきている．しかし，噴出速度は，主にビーズのサイズ，爆発直前の管内の圧力の大きさおよびノズルの長さの 3 つのパラメータによって支配されていると考えられる．このうち，ノズルの長さについては 39 mm と 62 mm の 2 種類の結果が得られているのみであるため，関係性を議論するには情報が足りない．そのため，目標を達成するには，ノズルの長さのバリエーションを増やして実験をすることが必要である．

また，衝撃波管実験の際には主に出口付近に注目して画像を取得し，解析を行ってきた．しかし，ビーズがガスの流れの速度場にどのように影響を受けて大気中を飛翔するかは，現在よりも広い幅でビーズの軌跡を追うことが必要である．よって，達成度としては，1 年目で目標のおおむね半分くらい達成していると考えている．

4. まとめと今後の課題

火山の爆発的噴火を再現した衝撃波管実験を行い，ガスとともにビーズを噴出させることによって，火山岩塊の噴出を再現することができた．この実験によって，岩塊の大きさと噴出速度の関係を，ビーズの大きさと噴出速度の関係から導くための実験データが得られた．ただし，ビーズの噴出速度はビーズのサイズだけでなく，爆発直前の衝撃波管内の圧力の大きさおよびノズルの長さに依存していると考えられる．これは火山の爆発における，火道内部の圧力とマグマの破砕深度から地表までの距離にそれぞれ対応している．破砕深度と噴出速度の関係について，実際の噴火で分かっている例は少ないが，本研究で行う実験からその関係についても導くことができると考えられるため，この点についても着目して実験を行っていくことを課題とする．

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] N. Steinau, K. Tsunematsu, K. Ohtani, K. Seo, A. Kaneko, T. Ogawa: Jet Features of Explosive Volcanic Eruptions based on Shock Tube Experiments, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2024), GS1-9.

[2] K. Tsunematsu, K. Ohtani, N. Steinau, K. Seo, A. Kaneko: Shock Tube Experiments to Reveal the Dynamics of Ballistic Projectiles in Explosive Volcanic Eruptions, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2024), CRF-71, pp. 198-200.

[3] 常松佳恵，大谷清伸，Steinau Nils，瀬尾和哉，金子明人，小川俊広: 2024 年度衝撃波シンポジウム (2025), 1B3-2.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（受賞）

21st International Conference on Flow Dynamics Best Presentation Award for Young Researcher，GS1-9: “Jet Features of Explosive Volcanic Eruptions based on Shock Tube Experiments”, Nils Steinau, Kae Tsunematsu, Kiyonobu Ohtani, Kazuya Seo, Akuto Kaneko, Toshihiro Ogawa, November 2024, ICFD.

課題番号	J24I007
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	2 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*, 河野 凌也*, 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
***八戸工業高等専門学校産業システム工学科
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

本研究は，熱中症発症プロセスの詳細な解明を目指し，生体細胞内におけるふく射伝熱の光と熱のエネルギー変換をサイズスケールおよびタイムスケールの両面からミクロ的に解明し，細胞内でふく射により生じた熱がどのように拡散するかを明らかにすることを目的とする. 熱中症の原因や本質を解明し, 有用な熱中症対策の確立に貢献することが期待される.

本稿の目的は，地表面から放射される熱輻射を減衰させ，遮断する能力という観点からミストのスペクトル特性を評価することである．ミストの透過スペクトルと熱輻射との相互作用を理解することによって，過剰な熱曝露に対する防護壁としてのミストの可能性を評価する．実験では，熱輻射に関連する波長範囲におけるミストの透過スペクトルを測定し，ミスト中の水滴の大きさ，ミスト発生源と地表面との距離，ミストの体積密度など，さまざまなパラメータを考慮した.

2. 研究成果の内容

実際のミスト層の遮蔽性能を調べるため，実験装置を用いてミスト層による輻射減衰量を測定した．熱源には，1,000℃に設定した黒体炉（IR-R2, チノー）を使用し，検出器にはレーザーパワーメータ（PM10, シグマ光機）を使用した．黒体炉とレーザーパワーメータとの距離を 300 mm に設定し，その中点の垂直方向に距離 h を 50, 100, 150, 200 mm とし，ノズルから水平方向にミストが噴霧されるように実験装置を構築した．まず，黒体炉からレーザーパワーメータへの初期熱伝達量を測定した．その後，ミスト噴霧を開始し，ミスト噴霧が安定した後の 10 秒間におけるミストを介した熱伝達量を測定した．そこから，ミスト層の輻射遮蔽率 η を算出した.

ミスト層のノズル位置および水滴粒径を変化させた場合の輻射遮蔽率の測定結果と近似曲線，さらに全火炎反射率（TFR）の数値解析結果を図 1 に示す．エラーバーは 5 回の測定で記録された最大値と最小値を示している．ノズルの噴霧口から離れるほど遮蔽率は減少する．これは，ノズル噴霧角の影響で，ミスト層の水滴の体積分率がノズル位置 h が離れるほど減少するためである．また，h = 50, 100 mm では粒径が小さくなると遮蔽率が増加した．h = 50 mm において d_{10} = 7.26 μm では 15.1%の遮蔽率だったのに対し，d_{10} = 5.72 μm では 19.0%まで増加している．本実験では水流量が一定の条件下で，ミスト層の水滴粒径が輻射遮蔽性能に影響を及ぼすことが示された．この結果は解析結果の傾向と一致している．しか

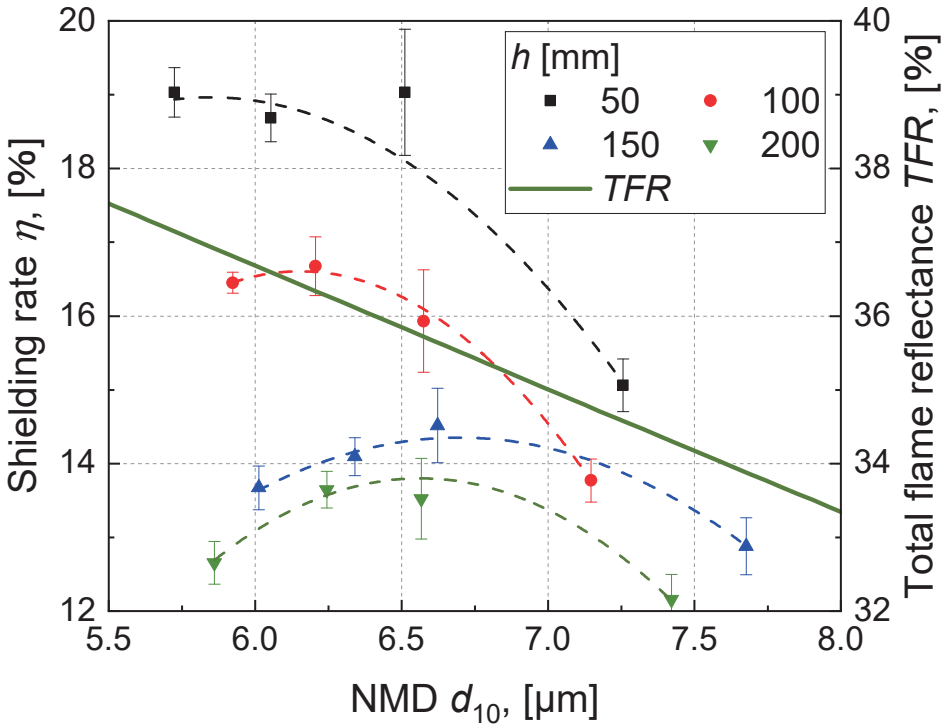


図 1：輻射遮蔽率に及ぼす粒子径とノズル位置の影響

し，$h = 150, 200$ mm では $d_{10} = 6.8$ μm で遮蔽率のピークがあり，解析結果とは異なる傾向を示した．これは空気圧力変動に伴う噴霧流速の変化により，ミスト層の形状が変化し，後流部で体積分率の影響が顕著に現れた可能性がある．

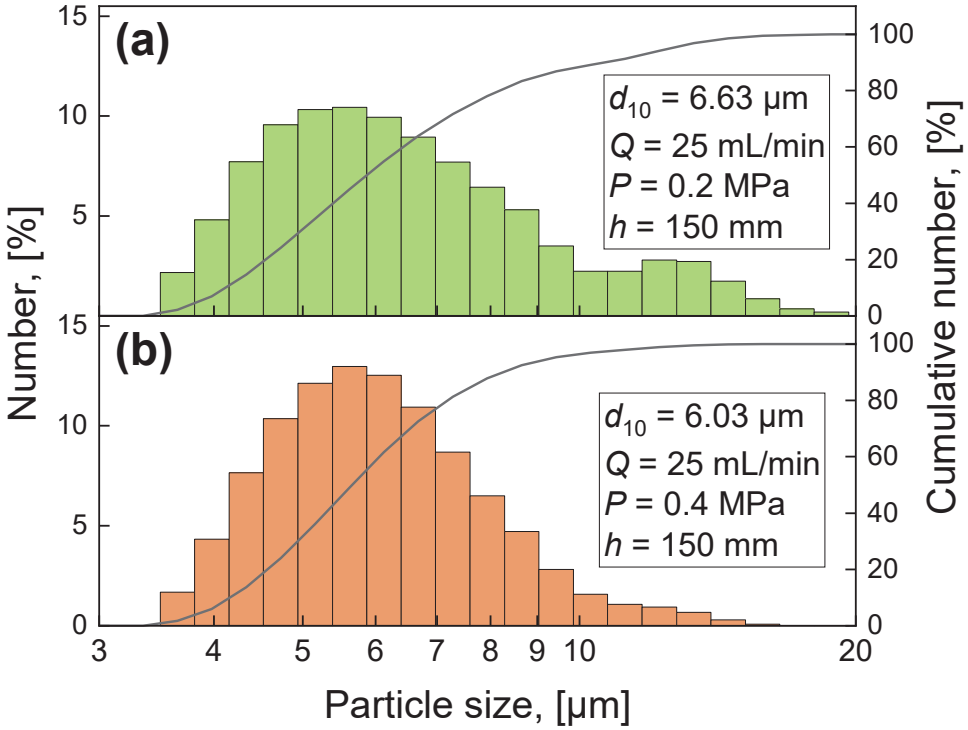


図 2：個数基準粒度分布 (a) $d_{10} = 6.63$ μm, (b) $d_{10} = 6.03$ μm

また，$h = 150$ mm において最も遮蔽率が大きくなった $d_{10} = 6.63$ μm と最も粒径の小さい $d_{10} = 6.03$ μm の個数基準粒度分布を図 2 に示す．両者を比較すると，図 2(a)では 10 μm 以上の粒子数が多くなり，粒度分布が広域化している．粒度分布の広域化は，さまざまな粒径を有するミスト層を示し，黒体放射光のさまざまな波長に干渉する要因となる．その結果，$d_{10} = 6.03$ μm のほうが輻射遮蔽に有効な小さい粒子を多く含むにも関わらず，$d_{10} = 6.63$ μm の場合よりも遮蔽率が低かった可能性が示唆された．

3. 研究目標の達成状況

熱中症対策として有用性が検討されているミスト冷却装置について，スペクトル学的な観点から有効性を評価した．本研究は，ミストのスペクトル特性と熱中症予防対策としての可能性に関する重要な知見を提供するものであり，この知見は熱輻射に対する防護バリアとしてのミストの理解に貢献し，熱中症予防分野における今後の研究開発の指針となる．

4. まとめと今後の課題

本研究では，地表面からの熱輻射に対する熱中症予防の潜在的な解決策として，ミストのスペクトル遮蔽性能を調査した．ミストの透過スペクトルと熱輻射との相互作用を評価することにより，過剰な熱曝露に対する防護壁としてのミストの有効性についての知見を得た．

今後の課題として，細胞周囲の光熱変換過程の実験的評価や，生体全体の熱中症発症プロセスに関する熱評価を行う予定である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] 江目 宏樹, 城野 雅斗, 古川 琢磨, 川井 喜与人, 岡島 淳之介: ウォーターミストによる火災熱輻射の遮蔽の高機能化, 第 72 回全国消防技術者会議資料, (2024), pp. 344-353.

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: 生体温熱モデルを用いた熱中症評価のための数値解析手法の確立, 日本機械学会 東北支部 第 60 期総会・講演会講演論文集, 仙台, (2025), pp. 39-40.

[3] 江目 宏樹, 城野 雅斗, 古川 琢磨, 川井 喜与人, 岡島 淳之介: ウォーターミストによる火災熱輻射の遮蔽の高機能化, 第 72 回全国消防技術者会議会議資料, 東京, (2024), pp. 344-353.

[4] H. Gonome, M. Jono, K. Kawai, W. Xing, S. Moriya, J. Okajima, T. Kogawa: Effect of Atomization Characteristics of Two-Fluid Nozzle on Radiative Shielding of Mist for Heat Stroke Prevention against Thermal Radiation from the Ground Surface, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-26, pp. 87-88.

[5] M. Jono, T. Kogawa, K. Kawai, W. Xing, S. Moriya, J. Okajima, H. Gonome: Effect of Atomization Characteristics of Two-fluid Nozzle on Radiative Heat Transfer in Fire Accident, *Proceedings of the 21st International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2024), pp. 1369-1370.

[6] M. Jono, T. Kogawa, K. Kawai, W. Xing, S. Moriya, J. Okajima, H. Gonome: Effect of Atomization Promotion by Mist Spray on Radiative Shielding Performance, *Proceedings of the 12th International Conference on Smart System Engineering 2024*, Yonezawa, (2024), 1P3.

[7] 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: 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, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2024 講演論文集, 山口, (2024), H23.
[8] M. Jono, T. Kogawa, K. Kawai, W. Xing, S. Moriya, J. Okajima, H. Gonome: Experimental Evaluation for Radiative Heat Transfer in Polydisperse Water Mist, *Program Book of 5th International Workshop on Nano-Micro Thermal Radiation (NanoRad2024)*, Sapporo, (2024), p. 98.
[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: ウォーターミストのふく射遮蔽に有効な水滴径に関する実験的評価, 日本伝熱学会東北支部第 24 回学生発表会講演論文集, 仙台, (2024).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（受賞） 令和 6 年度消防防災科学技術賞，ウォーターミストによる火災熱輻射の遮蔽の高機能化，江目 宏樹，城野 雅斗，古川 琢磨，川井 喜与人，岡島 淳之介，2024 年 11 月 22 日，総務省消防庁．2024 年 12 月 2 日に流体科学研究所のホームページに掲載（https://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/news/5318/）

Project code	J24I008
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd 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.

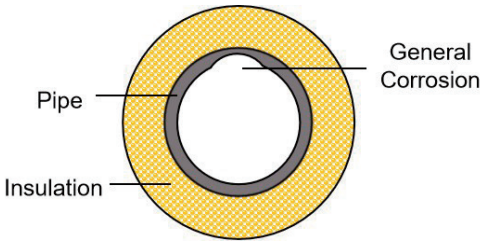


Figure 1：Corrosion under insulation.

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.

Next, the effectiveness of Gauss-ICA and HT methods is verified through experiments under two modes of power supplying.

1) Experiment system

In this part, ferromagnetic plates with different thickness are used to verify the effectiveness of the proposed methods. The experiment system and the specimen are represented in Figure 2.

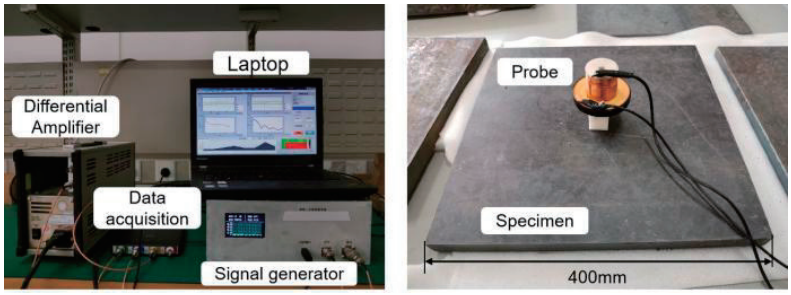


Figure 2: The experiment system and specimen.

The experiment system includes signal generator, data acquisition, differential amplifier and laptop. Where, the signal generator can provide two modes of power supplying which are battery power and grid power. Under the mode of grid power supplying, the power-frequency interference in the signal is stronger, which will bring stronger interference to the PEC detection signal. In addition, the excitation coil and the pickup coil is coaxially placed.

For different plate thicknesses, to verify whether the proposed methods in the previous part are generally effective under different power supplying modes and different excitation frequencies, two experiments are carried out according to the parameters in Table 1. In both experiments, square wave is stimulated with an amplitude of 8V and the duty cycle is 50%.

Table 1 : The experimental parameters

Mode of power supplying	Excitation frequency/Hz	Plate thickness/mm
Battery	4	8 10 12 14
Grid	1	10 15 20 25

2) Under the mode of battery power supplying
The detected raw PECT signals for different plate thicknesses are shown in Figure 3(a). The raw PECT detection signals are processed through Gauss filter. The filtered and normalized signals are shown in Figure 3(b). The filtered signals are smooth and the difference between different plate thicknesses is obvious. This demonstrates that Gauss filter can effectively eliminate the random noise in PECT detection signal. Then, the HT is used to extract the late-stage linear attenuation segment of the filtered signal, and the result is shown in Figure 3(c). The linear attenuation of the late-stage PECT signal can be accurately identified by HT, which proves the validity of the proposed feature extraction method based on HT.

The relationship between the thickness angle and the residual thickness is shown in Figure 3(d). It can be seen from Figure 3(d) that there is a positive correlation between the thickness angle and the residual thickness, and the repetition error of the thickness angle is very small. Next, the above mentioned several thicknesses is repeatedly detected, the corresponding thickness angle is extracted, and the thickness of the specimen is estimated by the fitting relation. The thickness quantitative measurement results are shown in Table 2.

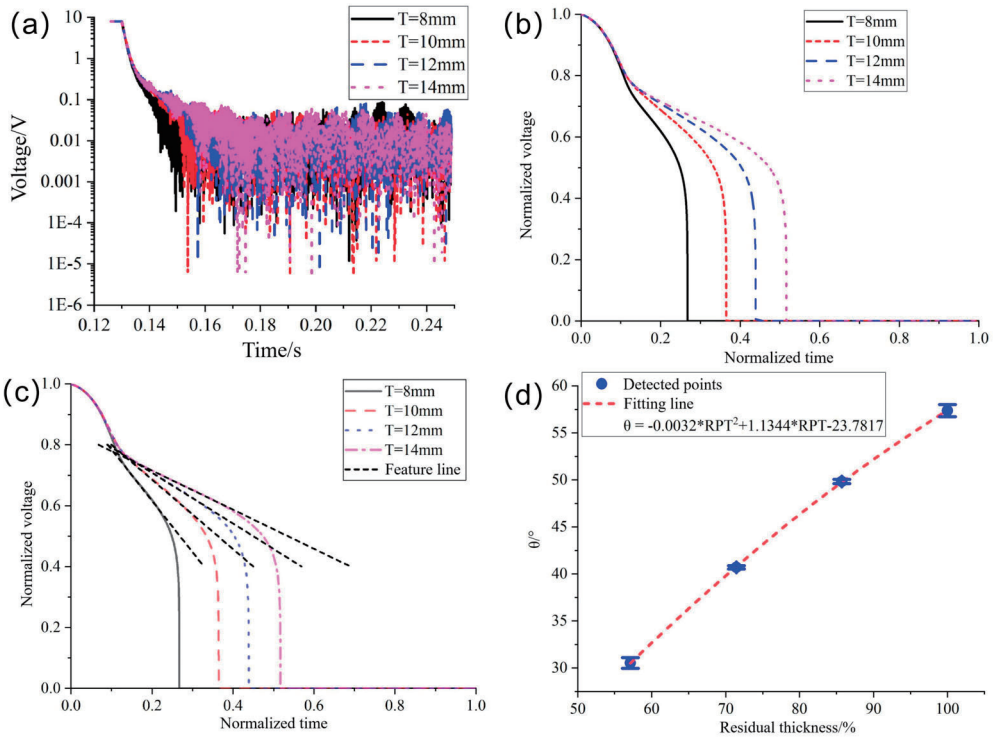


Figure 3: The detection results under the mode of battery power supplying. (a)Raw PECT detection signals under single logarithmic coordinate system. (b)The normalized filtered signals under different plate thicknesses. (c)The signal feature line extracted by HT under different plate thicknesses. (d)The relationship between the thickness angle and residual thickness.

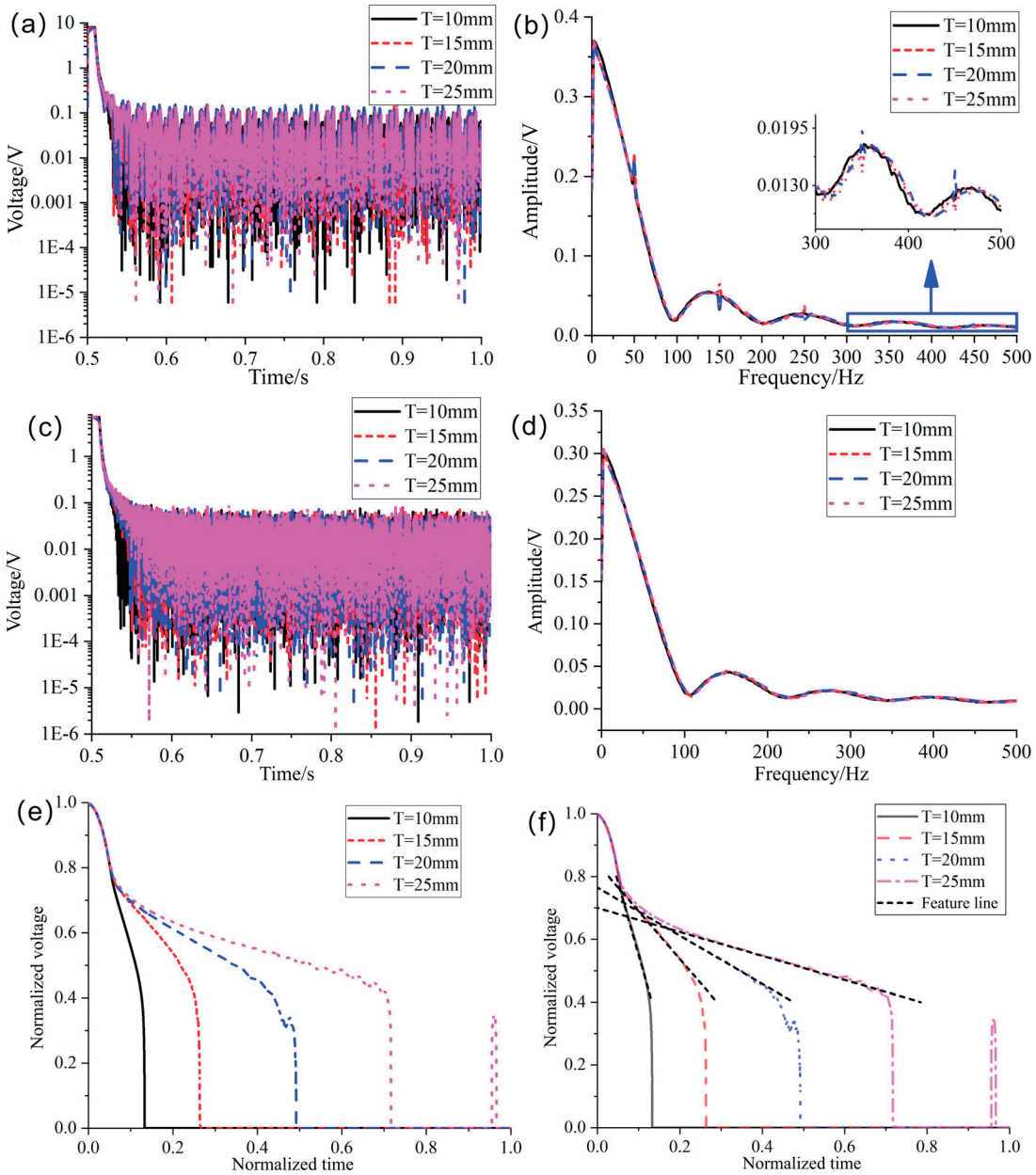
Table 2 : The thickness quantitative measurement results under battery power supplying

Actual wall thickness /mm	θ /°	Residual thickness		Error/%
		Actual value /%	Estimated value/%	
8	30.70	57.142	57.42	0.49
10	41.20	71.42	71.93	0.70
12	50.20	85.71	86.65	1.09
14	57.30	100.00	99.75	-0.25

3) Under the mode of grid power supplying

When the grid power supplying is employed, the detection signal contains power-frequency interference and Gauss noise. Therefore, ICA and Gauss filter are used to process the detection signal. Figure 4 shows the original PEC signals for different plate thicknesses. As seen in Figure 4(a), there is periodic noise interference in the signals. The amplitude spectrum of the original PECT signals is shown in Figure 4(b). From Figure 4(b), there are noise interference at the frequencies of 50Hz, 150Hz, 250Hz, 350Hz and 450Hz. The detection signals can be obtained by ICA filtering. As can be seen from Figure 4(c), the filtered signals are free of periodic interference noise and the corresponding amplitude-frequency is shown in Figure 4(d). It can be seen that the positions with abrupt changes in the

amplitude-frequency of the original signals become smooth after ICA filtering, which shows that the power-frequency interference in the original detection signal can be effectively eliminated by ICA filtering. Similarly, after eliminating the random noise in the signals by Gauss filtering, the normalized detection signals are shown in Figure 4(e). Next, the late-stage linear attenuation segment of the filtered signal is extracted by HT, and the result is shown in Figure 4(f). Then, five repetitive experiments are conducted and the obtained relationship between thickness angle θ and RPT is shown in Figure 4(g). It can be seen that the thickness angle still has a positive correlation with the residual wall thickness, and the repetition error of θ is very small, which shows the stability of the method based on ICA-Gauss filter and HT feature extraction. Similarly, the accuracy of the proposed thickness detection method is shown in Table 3.



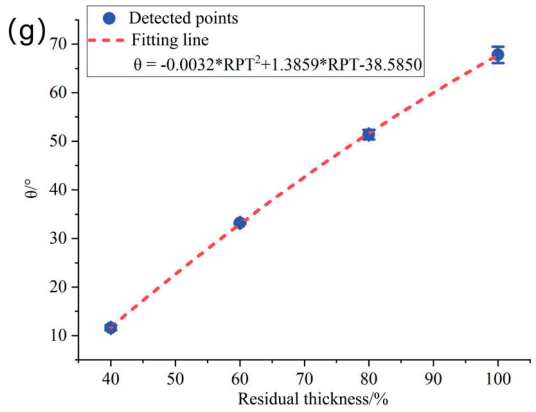


Figure 4: The detection results under the mode of grid power supplying. (a) Original PECT signals. (b) Amplitude-frequency chart of original PECT signals. (c) ICA filtered PECT signals. (d) Amplitude-frequency chart of ICA filtered PECT signals. (e) Normalized ICA-Gauss filtered PECT signals for different plate thicknesses. (f) The extracted signal feature lines by HT for different plate thicknesses. (g) The relationship between the thickness angle and residual thickness.

Table 3 : The thickness quantitative measurement results under grid power supplying

Actual wall thickness /mm	θ /°	Residual thickness		Error/%
		Actual value /%	Estimated value/%	
10	11.30	40	39.72	-0.70
15	33.30	60	59.89	-0.18
20	51.80	80	79.12	-1.11
25	65.90	100	100.82	0.81

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.

3. Achievements

1) Test-pieces with different wall thinning of ferromagnetic material plate were designed. The effectiveness of the proposed ICA-Gauss and HT methods was verified under two modes of power supplying.
2) Under the mode of battery power supplying, the experimental result demonstrated that Gauss filter can effectively eliminate the random noise in PECT detection signal. And the linear attenuation of the late-stage PECT signal can be accurately identified by HT.
3) Under the mode of grid power supplying, the experimental result demonstrated the power-frequency interference in the original detection signal can be effectively eliminated by ICA filtering. Gauss filtering can effectively eliminate the random noise in the signals. HT can extracted the late-stage linear attenuation segment and the errors between the estimated value and the actual value of residual thickness do not

exceed 1.11%

4. Summaries and future plans

1) Summaries

①For 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.

②The 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%.

2) Future plans

①Optimization for the developed ICA-Gauss filter by discussing the power-line harmonics to be removed and the downsampling factor.

②Discussion on the feasibility and superority of the developed new signal processing way for better quantification accuracy of ferromagnetic material thinning with thick insulator.

5. Research results

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

[1] J. Zhang, S. Fan, G. Lu, S. Yang, S. Xie, Z. Chen, Y. Zheng, T. Uchimoto, T. Takagi: Wall thinning quantiffcation with a lift-off distance for ferromagnetic structures using pulsed ECT equipped with ICA-Gauss filter and Hough Transform, *NDT&E International*, Vol.149, (2025), 103272 (12 pages), doi: 10.1016/j.ndteint.2024.103272.

[2] W. Guo, S. Xie, Y. Du, H. Chen, Z. Chen, T. Takagi, T. Uchimoto: A Numerical Simulation Method for High-Frequency Eddy Current Testing Considering Displacement Current Effect, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.60, No.3, (2024), 7200804 (4 pages), doi: 10.1109/TMAG.2023.3323810.

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

[3] S. Xie, S. Yang, L. Guo, G. Lu, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi: PECT Signal Processing Algorithm for Better Thickness Quantification of Ferromagnetic Material, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-19, pp. 67-70.

[4] L. Guo, L. He, Z. Tong, S. Xie, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi: Super-Resolution Reconstruction of Microdefects on Metal Spherical Surfaces using Eddy Current Pulsed Thermography, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamic*, Sendai, (2024), OS25-14, pp. 1484-1487.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

[1] “Eddy current infrared integrated detection system and method for typical defects of re-ignited blade thermal barrier coating”, Shejuan Xie, Jingshu Yi, Zhenmao Chen, Qingning Yang, Tairan An, October 25, 2024, apply.

[2] “Conformal non-sheltered eddy current infrared curved surface sensor of complex structure and defect evaluation method”, Qiang Wan, Gongqi Wang, Shejuan Xie, Jingshu Yi, August 2, 2024, apply.

課題番号	J24I009
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1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 on Shielding Performance of Cured Inflatable Structures

槙原 幹十朗*†，大谷 清伸**††
高橋　輝*，杉山 喜洋*
*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

超高速衝突実験の具体的方法は以下である．図１に示す様に，部分熱硬化型デブリシールドを模擬したターゲットをチャンバ内に設置する．ガス銃を用いて，アルミ球を衝突させる．衝突による破壊孔発生の物理現象を，高速度カメラで撮影する．部分熱硬化有り無しのシールドそれぞれで面密度条件を600～2500 g/m²で変化させ，ターゲット直後に設置した評価板の貫通面積を測定することで防護性能を評価した．実験結果を図２に示す．同一面密度における比較で，部分熱硬化有りの方がなしよりも評価板貫通面積は小さくなり，部分熱硬化で有意に防護性が高まったことが示された．

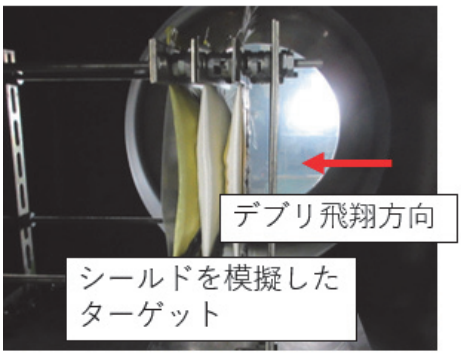


図１　チャンバ内ターゲット

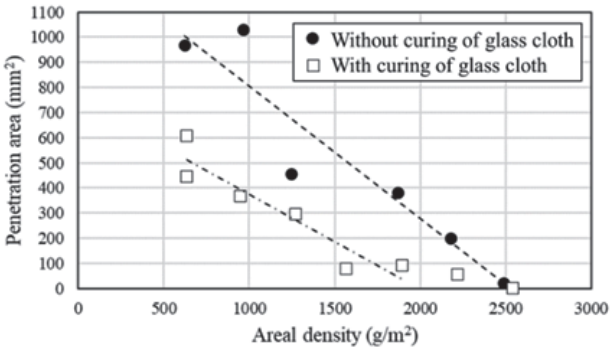


図２　部分熱硬化有り無しターゲットの評価板貫通面積

次に，硬化箇所を変化させた実験を行った．図３に結果を示す．ここで，B1-3 はそれぞれ１層目上流側，１層目下流側，２層目を硬化した実験条件である．衝突実験の結果，硬化箇所を変えることで有意に防護性が変化することが示された．また，１層目上流を硬化したときに防護性が最大となることが明らかになった．

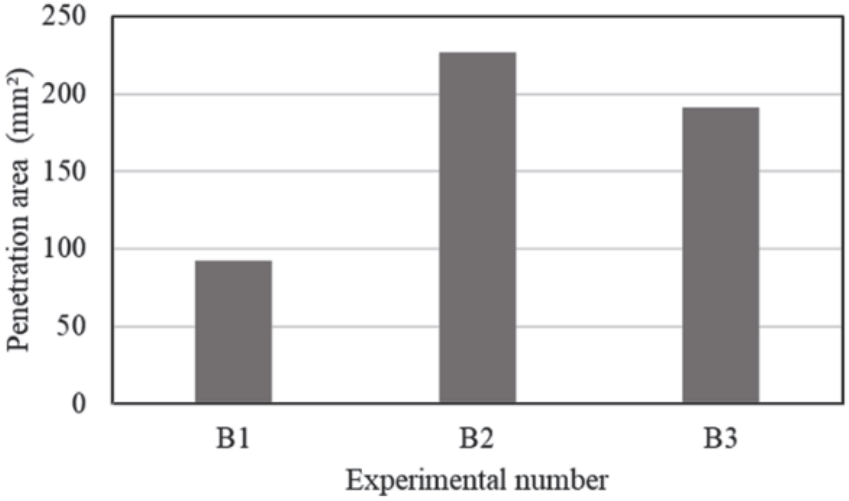


図３　硬化箇所を変化させたときの貫通面積比較

3. 研究目標の達成状況

研究目標である衝突による損傷を定量的に評価できており，十分に研究目的を達成している．

4. まとめと今後の課題

今年度は，部分熱硬化の有無による同一面密度下での貫通面積比較，硬化箇所の防護性能への影響調査を行った．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．また，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．そのため，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．今後は衝突の角度や層間の距離などさらに多くのパラメータが変動したときの損傷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）なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Takahashi, H., Sugiyama, Y., Kikuji, Y., Ohtani, K., Hara, Yushin., and Makihara, K.: Hypervelocity Impact Experiments for Risk Assessment of Inflatable Structures, *Proceedings of the Twenty-Fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, November 2024, CRF-65, pp. 183–186.

[2] 杉山喜洋，高橋輝，菊次祐紀，原勇心，槙原幹十朗，「機械学習を用いたデブリクラウド輪郭検出と統計的手法によるクラウド速度の推定」，日本機械学会東北支部第 59 期秋季講演会，ハイブリッド，仙台，2024 年 9 月 28 日．

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）　なし

Project code	J24I010
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Investigation of Aerodynamic Noise Mechanism of Multi-directional Wing of Aero-train and Active Flow Control for Noise Reduction

Chenguang Lai*†, Shigeru Obayashi**††, Yuting Zhou*, Guangtao Zhai*, Yujie Zhu* and Junhai He*
*Chongqing University of Technology
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Considering the mutual interference of the front and rear multi-directional wings, explore the main generation area, main contribution frequency, propagation characteristics and sound source intensity difference between the front and rear wing fuselage area of the multi-directional wing aerodynamic noise of aero-train, based on which, the active flow control is used to realize the noise reduction of the multi-directional wing aerodynamic noise, and explore the possibility of applying to the real vehicle.

2. Details of program implement

This study examines three geometric models of TE serrations, designated as Serrated TE1, TE2, and TE3. Fig. 1 illustrates the specific structures and parameters. The airfoil's mean chord length C is 1000 mm, with a span width S of 0.4 C. The serration amplitudes A and wavelengths λ are 0.1 C and 0.05 C, respectively. These serrations are incorporated at a 5° angle of attack on the TE of the NACA 4412 airfoil. A 2-mm-thick uniform serrated plate aligns with the TE's centerline, matching the chord's angular slope. To maintain identical chord lengths across all models, a flat plate (d = 2 mm) is affixed to the smooth wing's TE.

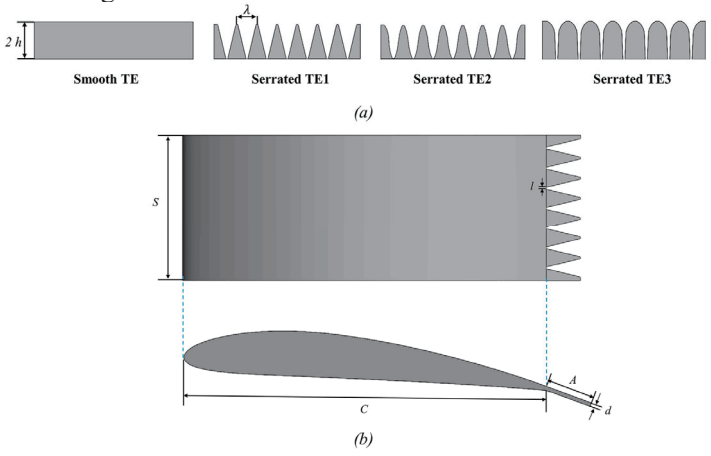


Fig. 1 Schematic of geometric models. (a) Three geometric models of serrated TE designs, (b) airfoil schematic

Fig. 2 illustrates the computational domain and boundary conditions. To ensure the accuracy and reliability of the numerical study, the domain extends 22 C, 10 C, and 5 C in the free-stream, wing-span, and vertical directions, respectively. A central mesh refinement in the blue acoustic data region ensures high-fidelity data, with a permeable boundary set on the wall. The Reynolds number

is 6.8 x 106, based on the chord length of the GEW. The velocity of the free flow is set at Ma = 0.3, and the angle of attack is 5°. The static pressure at the outlet is 101,325 Pa. The inlet boundary is set as the pressure far-field, ensuring appropriate pressure and velocity distribution in the inlet region. The ground surface is modeled as the moving floor with the same velocity as the incoming flow to considering WIG effect. The wall surface is defined as the free-slip wall to simulate the fluid motion characteristics. The noacoustic-reflection boundary condition is applied at the downstream domain outlet to prevent artificial reflections, while the no-slip boundary condition is enforced on the solid wing surface for realistic high-speed and near-wall conditions.

To capture aerodynamic noise in the 0 - 2300 Hz range, the transient simulation uses a time step Δt of 0.0001 s over a total sampling period of 0.25 s. This setup ensures that physical perturbation propagation is smaller than Δt, meeting the CFL condition for numerical convergence. All flow field simulations are conducted using the ANSYS Fluent 21.0 software.

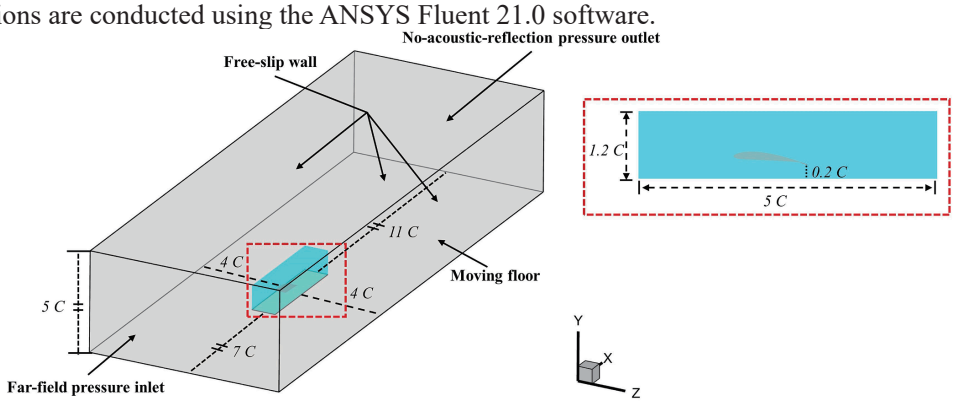


Fig. 2 Schematic diagram of calculation domain and boundary conditions

The experimental setup for aerodynamic noise, as shown in Fig. 3, involved a wind tunnel jet velocity of 40 m/s, with the airfoil's chord measuring 200 mm and span measuring 400 mm, and the NACA4412 airfoil includes both smooth and serrated TE designs. Specifically, this experiment utilized a vertical wing fixation similar to standard cylindrical noise experiments due to the design of the wind tunnel. The upper surface of the airfoil was positioned directly in front of the microphone array; the LE of the airfoil located near the air outlet; and the mounting platform parallel to the lower surface of the outlet. The setup included a 120-channel microphone array (Gfai Fibonacci 120 AC Pro) and signal collector (MCDREC-721C).

Fig. 3 Sketch of aerodynamic noise wind tunnel experimental setup. (a) Smooth TE, (b) Serrated TE.

3. Achievements

Acoustic monitoring was conducted using 181 points distributed across the infinite element region. These points were arranged at 1° intervals ranging from 0° to 180° Specifically, the 180° point corresponded to the free flow direction, the 90° point was orthogonal to the normal, and the sound source's ground center served as the radiation center with a radius of 5 C. To investigate the noise reduction potential of serrated TE designs under high-speed near-wall conditions, this study performed a Fourier transform of transient energy fluctuations on a GEW with one smooth and three serrated TE designs. The frequency response of the SPL in the region of the sound source is illustrated in Fig. 4.

Fig.5 reveals that three bio-inspired serrated TE designs effectively reduce noise under high-speed near-wall conditions, with the TE2 exhibiting superior noise reduction. The noise energy of the smooth TE design primarily consists of central and discrete frequency tones, resulting in greater frequency response fluctuations. In contrast, the serrated TE designs significantly reduce the energy of discrete frequency tones. The noise suppression by the serrated TE designs is most noticeable above 200 Hz, with less impact below this threshold on peak noise SPL. Above 1800 Hz, a slight increase in SPL is observed for the serrated TE designs. Fig. 11 presents the overall sound pressure level (OASPL), calculated from the average SPL across different frequency bands within the range

of 0 – 2300 Hz, divided into low (0–200 Hz), intermediate (200–1500 Hz), and high (1500–2300 Hz) ranges. The TE2 achieves a significant noise reduction of approximately 10 dB within the 1500–2300 Hz range and 8.6 dB across the full 0–2300 Hz spectrum. The serrated TE designs significantly reduce the SPL in all directions. Furthermore, the combined effects of reflection, refraction, and diffraction from the wall, contribute to a nonuniform noise distribution. An evaluation of the shape of three serrated TE designs supports these findings, with TE1 and TE3 featuring wider grooves and sharper serrations, while TE2 has larger, more obtuse serrations with smaller gaps. Acoustic simulations suggest that narrower, sharper serrations are more effective for suppressing noise energy.

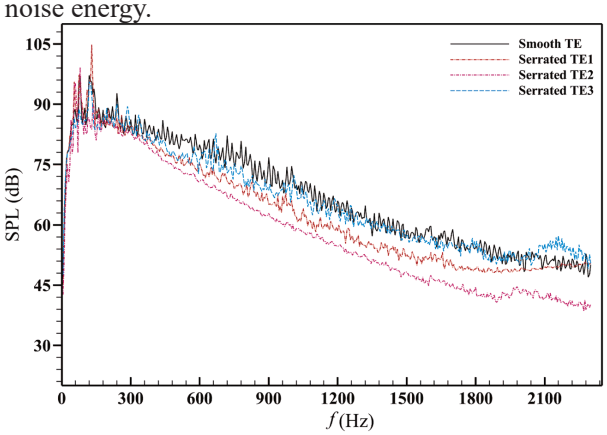


Fig 4 f - SPL curves in the sound source region for smooth TE and three serrated TE design

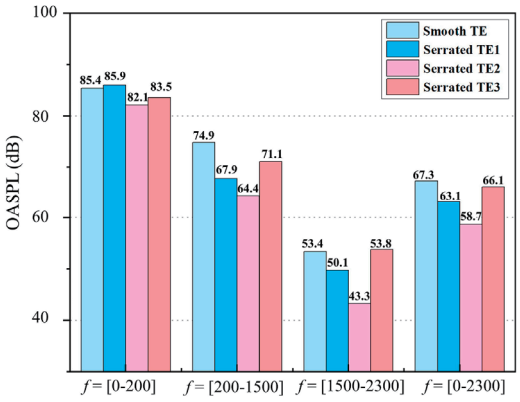


Fig. 5 OASPL in the sound source region integrated with different frequency bands

However, the incorporation of serrated TE designs modifies the mean camber line and chord length of the wing, leading to significant changes in flow dynamics. Consequently, the effect on the wing's lift-to-drag ratio is of critical concern. The inclusion of serrated TE designs maintains the superior aerodynamic performance of the GEW, exhibiting negligible differences compared to the GEW with a smooth TE design. This highlights the potential of the serrated TE reduction design for high-speed, near-wall conditions.

4. Summaries and future plans

(1) The results of numerical simulations indicate that the three serrated TE designs possess the capability to significantly reduce the TE noise generated by the GEW in high-speed, near-wall conditions, concurrently preserving the superior aerodynamic properties. The most significant noise reduction occurs within the intermediate-frequency range of 200 – 1500 Hz, with the TE2's sharp-edged and widely spaced serrations providing the best results. These serrated designs result in a reduction of approximately 10 dB in the intermediate-frequency band and a reduction of approximately 8.6 dB across the full frequency range of 0 – 2300 Hz. However, the effectiveness of the designs is limited for frequencies below 200 Hz, with a slight increase in the SPL observed for frequencies above 1800 Hz.

(2) Coherence analysis of transient flow details reveals that the serrations help diminish airflow separation and inverse pressure gradients within the airfoil's boundary layer, leading to a smoother transition of boundary-layer airflow. This reduction in cyclic vortex strength at the wing's tail helps mitigate turbulence noise from unstable pressure pulsations, particularly in the mid frequency range. Pressure pulsation and Reynolds stress distributions confirm that the serrated GEW exhibit lower pressure pulsation intensities compared to the smooth-edged counterpart, with the lowest intensity observed at the sawtooth base. This reduction is attributed to minimal trailing vortex–wall interactions, facilitating stable vortex transition. Notably, the TE2 enhanced noise reduction is attributed to its wider serration gaps, which effectively disrupt boundary layer vortices. These vortices interact with those beneath the wing's pressure side, reducing the high-velocity airflow and resulting in a negative acoustic feedback loop that attenuates pressure pulsations under the wing.

(3) Analysis of vortex evolution patterns at the GEW's TE, under four TE designs, provides insight

into the noise reduction mechanism of serrated TE designs. The serrations do not significantly impede the large, long vortex structures from the wing tip, thereby not impacting low-frequency noise. However, they do fragment larger vortices at the TE into smaller horseshoe and hairpin vortices. This fragmentation converts turbulence energy into in ternal energy, reducing fluid momentum and shear stresses near the TE, resulting in a reduction of mid-frequency noise. Moreover, the smaller vortices that result from this fragmentation are isotropic and low-energy, absorbing energy from larger vortices. Interactions between these smaller vortices through viscous dissipation manifest as high-frequency energy pulsations, leading to a slight increase in high-frequency noise.

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] Chenguang Lai, Junhai He, and Shigeru Obayashi: Layout of Ducted Fan between Aero-Train Wings, *Proceedings of the 24th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2024), CRF-51, pp. 144-146.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J24I011
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 年目（発展）

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**††
得竹　浩*，大川 真生***
伊神　翼**，赤羽 峻瑛****
*金沢大学理工研究域，**東北大学流体科学研究所
東北大学工学研究科，*金沢大学自然科学研究科
†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

本課題では，ロータ間での流れ干渉について，地面効果中と一様流れ中に分けて研究を行っている．2024 年度は前者に注力して研究を推進した．胴体を有するクアッドロータ機について地面近傍での周囲流れ場を可視化実験により把握し，推力変化量を評価した．さらに，2023 年度までの地面効果研究の成果をとりまとめ論文投稿を行った．後者については，数値流体(CFD)による解析を行っているが，研究所の計算機のシステム更新にともなって解析ツールが対応できていない状態が続いており，2024 年 6 月より新たな解析は行っていない．

・胴体を有するクアッドロータ機の地面効果

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，実際の機体は中央にある胴体があり，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ー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ー状態よりも大きくなることを確認した．

胴体がある状態での流れ場についてレーザーシート法による可視化実験を行い，胴体とロータの位置関係で変化する周囲の流れ場を比較した(図 1, 2)．胴体は，地面側から噴流を受ける一方で，噴流がロータに循環することを防ぎ，機体中央で吸い込まれる上流の流れの乱れを小さくしていることを確認した．

・コーナー効果の可視化実験

これまでの CFD 解析の成果を踏まえ，2 枚の壁と地面の 3 つに囲まれた頂点におけるロータ推力変化の評価と，流れ場に関する論文を出版した(成果 1)．

3. 研究目標の達成状況

地面効果に関して，胴体がある場合の機体後流の 3 次元構造とロータ推力への影響を把握した．一方で，一様流れ中のロータ間流れ干渉について，新たな解析を実施できていない．

4. まとめと今後の課題

地面効果について，より実機に近い状態で機体が受ける空気力とロータ推力の変化を把握し，地面効果による推力変動を受けにくい機体を設計する示唆を得た．今後，ロータ配置のパラメータと胴体形状についてパラメトリックスタディを行い，胴体形状の設計に必要な情報を収集する．

ロータ間流れ干渉について，計算機が解析ソフトウェアに対応次第，一様流れ中で 2 枚のロータが受ける推力や，ロータ面での Inflow 速度を評価する．本解析により，気流速度，ロータ面迎角，ロータ間隔に対する推力変化量を明らかにする予定である．

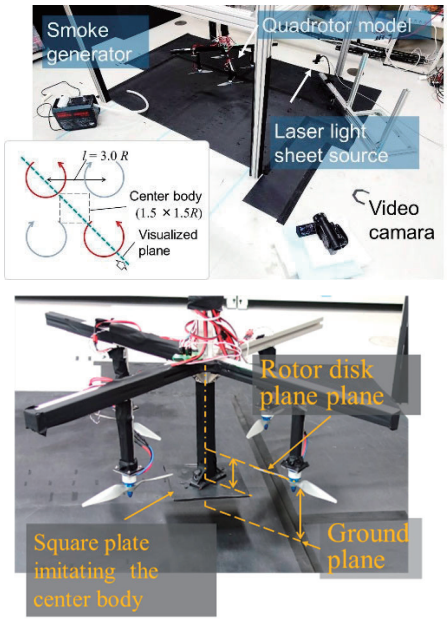


図 1：可視化実験装置

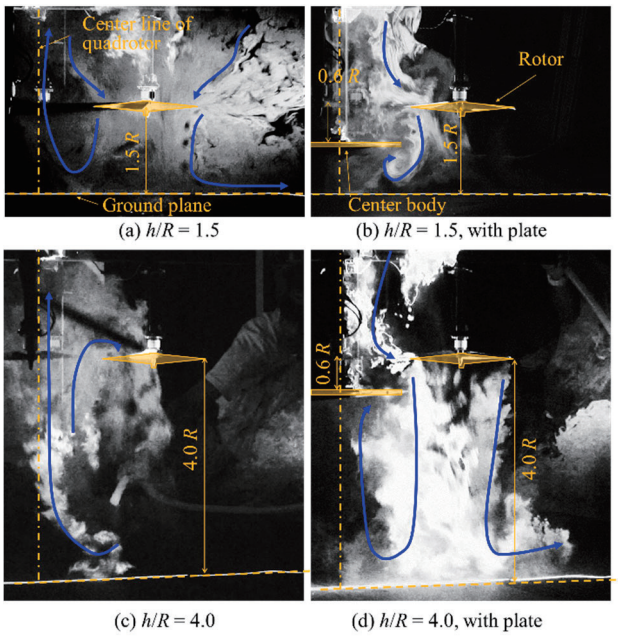


図 2：胴体の有無によるクアッドロータ機後流構造の比較

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, S. Akaba, T. Hara, H. Nagai, H. Tokutake: Thrust variations in small rotors due to corner and vertex effects on the ground side, *The Aeronautical Journal*, Vol. 129, No. 1334, (2025) pp. 1077–1095, doi:10.1017/aer.2024.148.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] H. Otsuka, Y. Kobayashi, S. Akaba, H. Tokutake, M. Okawa, T. Ikami, H. Nagai: Smoke-Visualized Wake of Quadrotor in Ground Effect, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-2, pp. 18-20.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J24I012
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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**††，吉本 遥人***，得竹　浩*

大崎 歩乃花****，佐々木 大輔****，川本 裕樹*****，永井 大樹**

*金沢大学フロンティア工学系，**東北大学流体科学研究所，***金沢大学自然科学研究科

****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)　実験の初期段階で，突起によるロータ空力性能である Figure of merit の改善が認められなかったため，空力騒音の低減効果を狙った突起配置形状の探索行った．NACA0012 翼型上に突起を配置した 4 形状について，低騒音風洞の半無響室で騒音計測を行った．実験結果に基づいて突起の大きさに依存して騒音が増減することを確認した．計測を行ったブレードの中で最も効果のある形態では，騒音レベル(A 特性)を 2.3dB 低減させることができた．

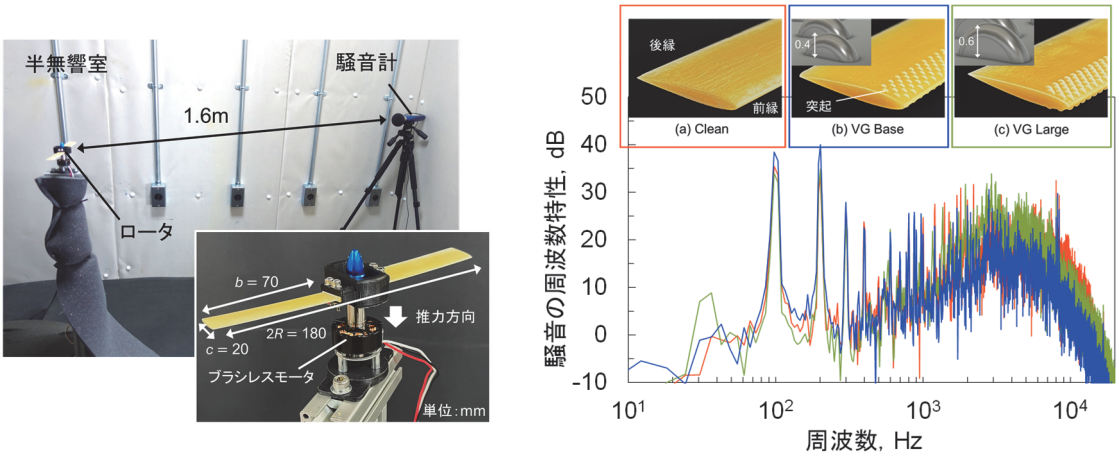


図 1：半無響室での騒音計測実験の様子と騒音レベルの比較

2) ブレード表面の突起背後の領域について，cntTSP による流れ場の可視化を行い，流れ場を解明する可視化像の取得を試みた．ロータ回転速度が，研究グループで実施していた従来実験の回転数よりも速いため，可視化像が得られないことが懸念されていたが，可視化像を得ることができた．可視化像には，突起に起因すると考えられる筋が現れており，取得した可視化像の分析を行っている．

3) 流れ場の 3 次元構造を解明するため，CFD 解析により，突起周りの流れ場の特性把握を試みている．2024 年度は，突起のついた平板の 3 次元的な流れ場を解析した．

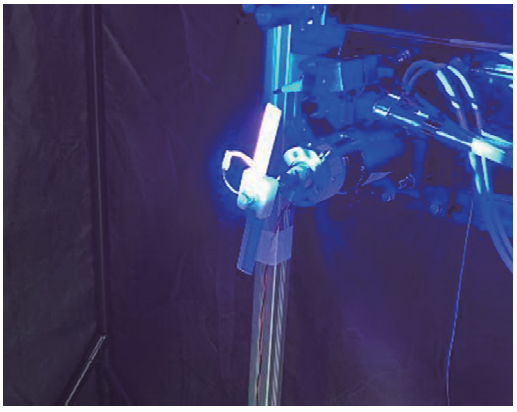
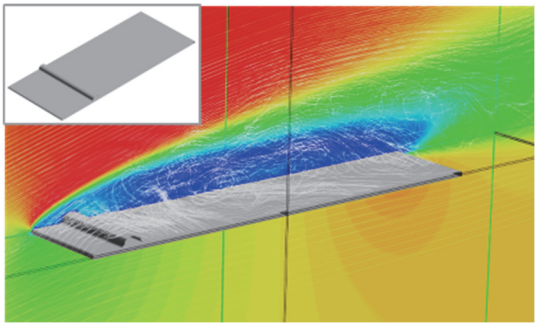


図 2：cntTSP による可視化実験の様子



(解析例は，段を持つ平板の 3 次元解析)
図 3 平板状の突起周り流れの解析例

3. 研究目標の達成状況

cntTSP による可視化像を得られ，突起背後における流れ場構造を分析できることを確認した．今後実施する，突起の配置やロータピッチ角の違いによる，流れ場の比較を行える見込みを得た．ロータ形状検討では，当初想定していた空力性能に優れるロータブレードではないが，騒音低減の効果をもつブレードを設計できる見込みを得た．CFD 解析では，2 次元翼に対して段を設けることで，突起を模擬した剥離流れの解析を行った．一方で計算資源の制約から，突起形状に忠実な形態での 3 次元計算には至っていない．

4. まとめと今後の課題

1 年目となる 2024 年度では，各グループで形状検討と，解析の可否確認を行った．3 者ともに，突起によるロータ性能の改善と，そのメカニズムを解明できる見込みを得た．一方で，cntTSP については解析手法の難しさ，CFD 解析については計算資源の制約から，解析を行える条件数が限られる．ロータ形状の探索結果と，これまでに取得した可視化像を分析し，突起周りの流れ場把握に必要な解析条件の絞り込を行う．

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] H. Otsuka, H. Sasaki, H. Tokutake, T. Ikami, H. Nagai, H. Osaki, D. Sasaki, Y. Kawamoto: Plan to Study the Surface Flow of a Small Rotor Blade with a Vortex Generator, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), 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	J24I013
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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**,****, 坏本 晃海*****, 関　布美子******
*旭川医科大学先進医工学研究センター, **東北大学加齢医学研究所
***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 マーモセット医学生物学研究部, ******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

アルツハイマー病の症状を緩和する薬が登場したが, その早期診断の難しさから薬の効果を十分に役立てることができていない. 我々は霊長類を使った嗅覚刺激と functional MRI による脳機能評価によってアルツハイマー病患者で認められている嗅覚障害を超早期のバイオマーカーとして確立することを目指している. 脳機能評価のために刺激装置の応答速度は重要な要素であるが, 匂いは光や音の刺激とは異なり物質の拡散で広がるため, 刺激の開始と終了の明確な計測が難しい. MRI 下で使用可能な非磁性で構成した嗅覚刺激デバイスの刺激応答速度を, 気体流れの可視化によって定量評価することが本研究の目的である.

2. 研究成果の内容

2-1 模擬 MRI 環境下での嗅覚刺激物質の流体可視化

MRI と同等の物理環境下での嗅覚刺激物質の流れを可視化するために図 1 で示す MRI 嗅覚刺激シミュレーション環境を作製した. そのシミュレーション環境は, MRI ボアを模した内径 72mm, 全長 600mm のアクリル筒(図 1-4)とマーモセットを型取りして作製した顔型（図 1-3）とマーモセット拘束具（図 1-2）と内径 4mm のシリコーン製の排気管（図 1-5）,吸気管（図 1-6）を用意した. これらを実際の MRI 撮像を行う場合と同様に配置して, MRI 嗅覚刺激シミュレーション環境とした. 気体流れを可視化するために, トレーサー粒子源として油煙 (Z-800II, FLG-5, Antari) を用い照射角 70 度

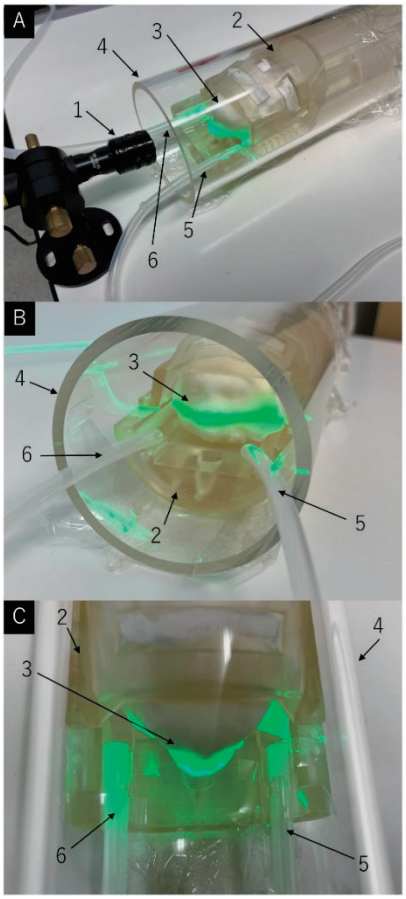


図 1 模擬 MRI 環境における嗅覚刺激物質の流体可視化
（A : 全体像、B : チューブ先端からの吸排気、C : チューブ側面からの吸排気）

のレーザー光源（エス・ティ・エス株式会社, GML-7010）を用いて気体の流れを可視化した．レーザーはマーモセットの鼻の先端にあたる高さで水平に照射した．送排気流量は0.1L/min とした．

2-2 高速度カメラによる撮像と PIV 解析

高速度カメラ（Miro C321, AMETEC）を用いて，粒子の動きを記録した．撮像はレーザー照射面と水平の位置で行い，1500 fps で 1280x1024 の解像度で行った．筒の内部を観察するために，MRI ボアを模したアクリル筒は透明なものを使用した．撮像した画像の PIV 解析を行い，速度ベクトルを求めた．

2-3 吸排気管の変更による匂い物質の流れの変化

匂い物質を供給・排気する管の開口位置を変更して，匂い物質の流れの変化を調査した．図 1B で示す実験では吸排気管の先端から匂い物質が送出・排気した．管の先端はマーモセットの鼻に向かって設置した．図 1C で示す実験では管の側面に内径 4mm の穴をあけて，管の先端は閉塞させた．管の送排気口の線上にマーモセットの鼻が位置するように設置した．

我々は複数の拠点に在籍する研究者が協力しているため，オンラインの進捗報告と論文訂正を 1 ヶ月に 1 回以上こまめに行った，2024 年度は 14 回のオンライン打ち合わせを実施し，東北大学での会合を 3 回（2024 年 9 月，11 月，2025 年 3 月）実施し，旭川医大で 1 回（2025 年 2 月），川崎の実中研で 1 回（2025 年 2 月）実施した．

3. 研究目標の達成状況

Fig. 2 にチューブの先端から匂い物質を供給・排気した時の結果を示す．図 2A1~3 は供給管から出た油煙が鼻にあたり，左右に分かれた流れを示す連続画像で，A4 は PIV 解析による速度ベクトルの結果である．

Fig. 3 にチューブの側面から匂い物質を供給・排気した実験の結果を示す．図 2B1~3 は供給管から出た油煙は顔に沿って流れ排気されことを示す連続画像で B4：PIV 解析による速度ベクトルの結果である．

C1, 2：条件は一定であっても，時折流れの剥離が生じて，油煙が渦をまいた．

図 2 と 3 の結果を比べると，チューブの側面から匂い物質を放出する実験系が，チューブの先端から放出する実験系に比べてスムースに匂い物質が放出されていることを示していた．匂い物質が滞留すると，嗅覚刺激の応答速度は低下する．刺激の応答速度が低下すると意図した実験結果が得られなくなることが懸念される．同じ匂いによる刺激に対して嗅覚は慣れによる反応の鈍化が生じるため，嗅覚刺激の応答速度は重要な要素である．PIV 解析によって速度ベクトルを求めたが，画像から読み取れる気体の流れと整合性のある結果を得ることは非常に困難であった．これは追跡すべき粒子のサイズに対して，取得している画像の解像度が十分でないこと，照射しているレーザーの厚みが十分に薄くないことの 2 点が，原因として考えられる．本実験は基本的な実験系の構築を目的に簡便に入手可能な機器を用いて実施したが，先に示す問題点が明らかになったため，専門的な知識と機器を有する東北大学流体研のサポートを得て，より正確なデータを取得していく予定である．今回はチューブの放出口の変更を行って気体の流れの変化を調査した．研究の本来の目的である匂い刺激物質の流量と流速の最適化を行うために実験系の改良を行う予定である．

これまでの結果を基に 1 本の論文に採択されることが出来た．また，現在実施している研究でさらに論文に出来る予定であり，想定されている進捗以上に成果を上げられていると考える．

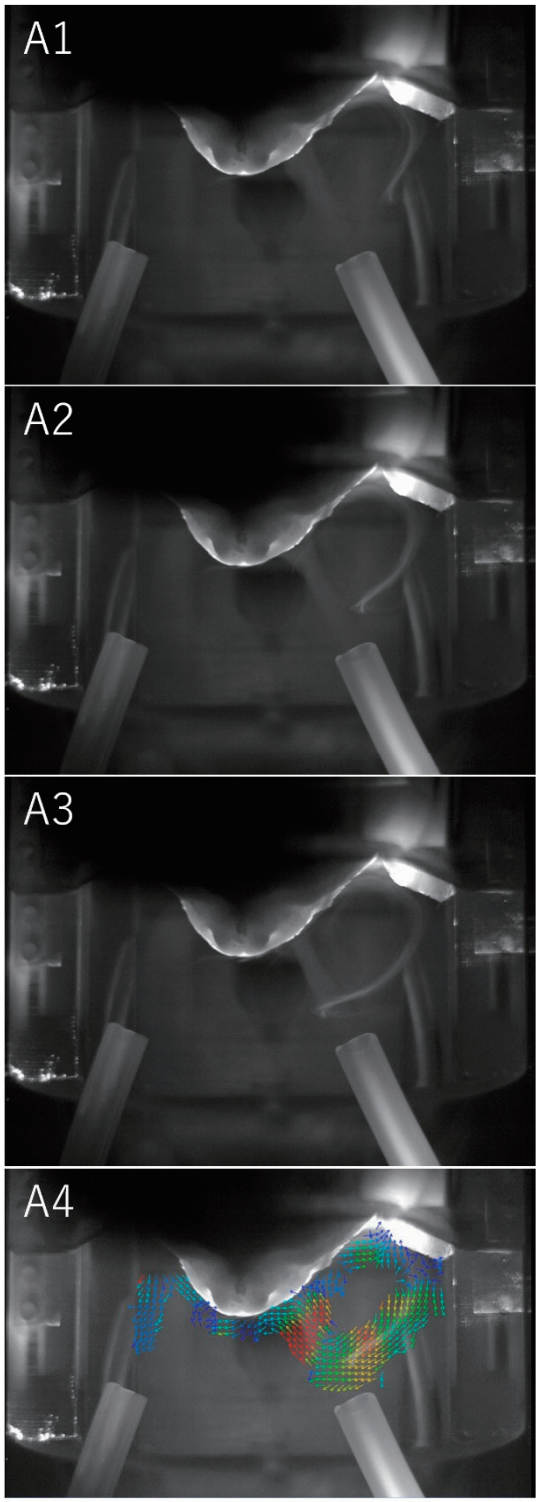


図2 チューブ先端からのにおい物質の送気と排気の結果
（A1~3：送気チューブからの油煙がノーズに当たって左右に分かれる流れを示す連続画像、A4：PIV 解析による速度ベクトル結果）.

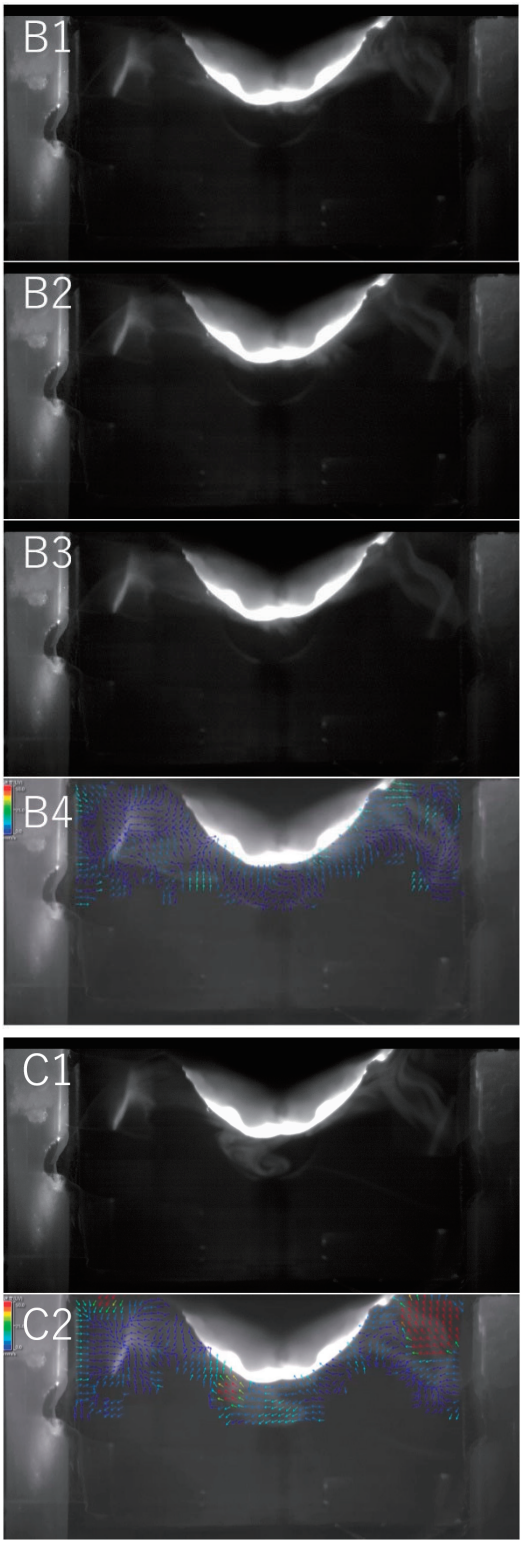


図 3 におい物質を供給し，チューブ側面から吸引した実験結果（B1~3：送気チューブからの油煙が面に沿って流れ，チューブから吸引される様子を連続撮影したもの，B4：PIV 解析による速度ベクトル結果，C1,2：条件は一定でも流れが剥離することがあり，油煙が旋回した.

4. まとめと今後の課題

本研究では，基本的なにおい気体の流れを可視化する実験系を構築することを目的として，吸排気方法を変更して嗅覚刺激物質の流れの変化を調査した．気体の流れ可視化に成功したが，詳細な PIV 解析を行うためには光源とカメラの解像度を改善すべきであることが明らかとなった．今後は改良した実験系を用いて，嗅覚刺激の最適化を行う予定である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Terumi Yurimoto, Fumiko Seki, Akihiro Yamada, Junnosuke Okajima, Tomoyuki Yambe, Yoshiaki Takewa, Michiko Kamioka, Takashi Inoue, Yusuke Inoue, Erika Sasaki: Development of a noninvasive olfactory stimulation fMRI system in marmosets, *Scientific Reports*, volume 14, Article number: 17830, doi: 10.1038/s41598-024-72803-3
（流体科学研究所 HP および東北大学 HP にて研究成果発表，2024 年 9 月 5 日）

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Yusuke Inoue, Akihiro Yamada, Terumi Yurimoto, Fumiko Seki, Yoshiaki Takewa, Junnosuke Okajima: Advection-diffusion solution of the internal MRI environment for analysis of brain function with olfactory stimulation, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-31, pp. 98-100.

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）

プレスリリース：実中研ホームページ, 2024.08.01, 起きているマーモセットが匂いをかいだときの脳の活動を MRI で観察できる装置の開発,
https://www.ciea.or.jp/img/topics/pdf/press_release_20240801.pdf
プレスリリース：東北大学流体科学研究所ホームページ, 2024.09.05, 起きているマーモセットが匂いをかいだときの脳の活動を MRI で観察できる装置の開発 ～疾患モデルマーモセットの早期の症状の発見に期待～, https://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/news/5007/

課題番号	J24I014
区分	一般公募共同研究
課題分野	その他（火山防災）
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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）に対してプロジェクタイル（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．プロジェクタイルは，直径 40 mm，高さ 50 mm の砥石とし，サボを使用して発射した．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．本年度は特に射出条件の見出しおよび軽石の変形挙動の可視化に着目して実験を行うため，速度計測および高速度カメラ撮影を行った（図 1）．

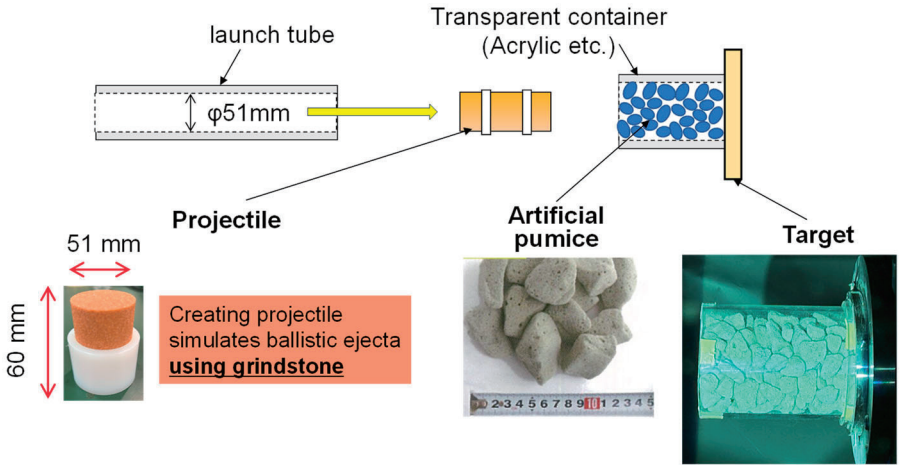


図 1：実験装置概略

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することができた（図 2）．また，破砕された人工軽石と破砕されなかった人工軽石の質量を計測し，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は飛翔体の運動エネルギーと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，2024 年度の目標はおおむね達成されたといえる．一方で，飛翔体の減衰挙動測定やターゲット背面の荷重測定等については今後の課題である．

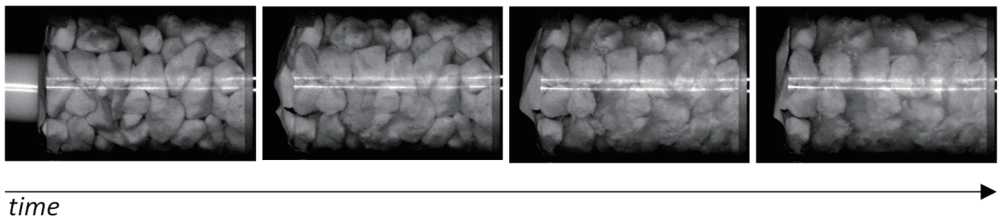


図 2：飛翔体が衝突した際の人工軽石の変形挙動

4. まとめと今後の課題

2024 年度の課題である人工軽石の集合体としての高速変形挙動の可視化についてはおおむね達成することができた．しかし，更なる詳細なメカニズムの探求のために，飛翔体の減衰挙動測定やターゲット背面の荷重測定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] T. Kubo, M. Yoshimoto, R. Honda, T. Nishizawa, K. Tateyama, H. Yamada: Experimental study on reinforcement method of 461 impact-resistant shelters against ballistic ejecta using artificial pumice, *Bull. Volc. Soc. Jpn.*, (2025), 70, pp. 3-12.

2） 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] K. Tateyama, H. Fujiki, K. Ohtani: Impact Energy Absorption Properties of Artificial Pumice, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-72, pp. 201-202.

[3] K. Tateyama, H. Fujiki, H. Sasaki, N. Ogasawara, H. Yamada: Impact Compression Properties of Artificial Pumice Under Confined Condition, *14th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading*, Zurich, (2024).

[4] 阿部一真，山田浩之，佐々木寿，立山耕平，藤木裕行: 噴石衝突に対する山小屋の補強を想定した人工軽石の圧縮特性評価，日本火山学会 2024 年度秋季大会，札幌，(2024).

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	J24I015
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	2 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 勝哉*†, 石本淳**††
足立 高弘***, 小口 晃太朗****, 日尻 昂希*
*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, ****同志社大学大学院理工学研究科
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究の目的と目標

1.1 研究の背景と目的

航空機の翼には翼端が存在し，誘導抗力が発生する．リング翼には翼端がなく誘導抗力を減少することが期待されているが，実用化はされておらず不明な点も多い．そのため我々は回転しながら飛行する中空円筒に注目する．目的としては，回転しながら飛行するパイプの飛行メカニズムを空気力学的な観点から明らかにすることを目的とする．

1.2 研究期間内の最終目標

射出装置による精密な投擲を行い，より詳細なモデルの軌道・姿勢を得る．その飛行中の様子をハイスピードカメラで撮影し，各種空力特性に関するデータを取得する．さらに様々なアスペクト比の円筒を飛行させ，形状による空力特性への影響を調査する．数値解析では実験と同様の条件で 3 次元シミュレーションを行い，モデル周囲の詳細な流れを得る．

2. 研究成果の内容

2.1 モデルに作用する空力特性の解明

射出装置を用いて実験を行うことで，広い迎角範囲での多数の実験データを得ることが出来た．そしてそれらのデータを運動解析することで，モデルに作用する揚力，抗力，空力モーメントと迎角，角速度との関係性を解明した．(Fig.1) また，シミュレーションの基礎を作成した．揚力，抗力，揚抗比のデータと実験データを比較し，妥当性を検証した．

2.2 回転数による空力特性への影響の解明

回転数を変化させた実験を行うことでこれまで本研究の課題であったばらつきを減少させることができた. その結果, リング翼の迎角と揚力係数との関係を解明することができた. また, 歳差運動と空力特性の関係についても解明することができた. (Fig.2)

2.3 シミュレーションによる空力特性の計算

シミュレーションの基礎を作成し,実験との比較を行った.揚力係数のデータは増加傾向が, 抗力係数のデータは断面形状の違いにより大きく差が出たと結論付けており，以降翼型で計算を進める予定である．(Fig.3)　また，流れの構造把握も行った．(Fig.4)

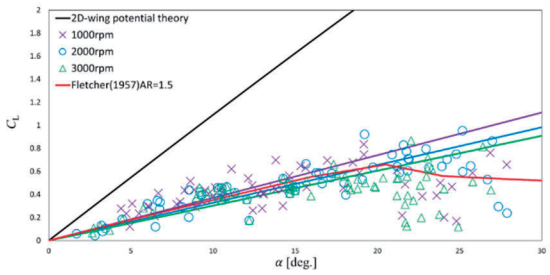


Fig.1 迎角と揚力係数との関係

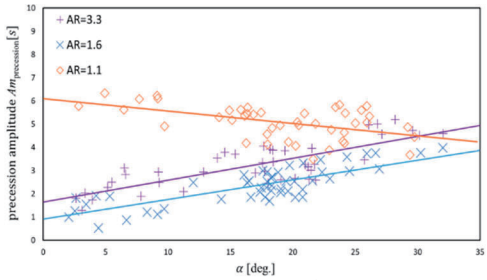


Fig.2 各 AR での迎角と揚力係数の関係

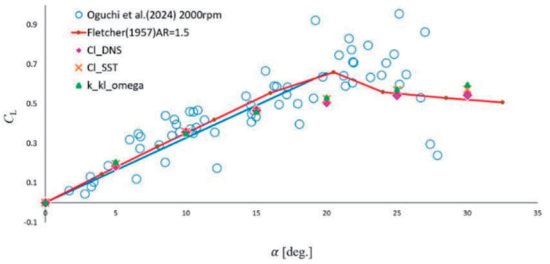


Fig.3 計算結果と実験の比較

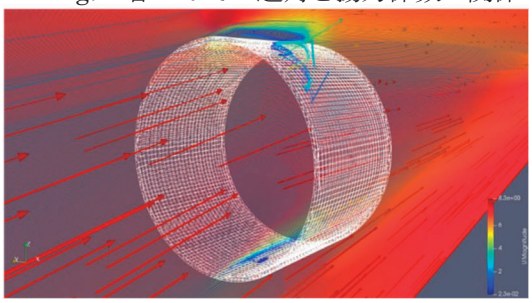


Fig.4 リング翼における速度分布

3. 研究目標の達成状況

回転数を変化させた実験により，高回転数での発射が飛翔体の飛行を安定させる効果を得ることができた．また，アスペクト比を変化させた実験を実施したことで，効率的なアスペクト比を解明することができた．また，シミュレーションを実施することで計算結果と流れ構造の把握ができるようになった．

4. まとめと今後の課題

本年度の活動で，広い迎角の範囲で，より精密，詳細な飛行パイプに働く流体力やモーメントを得ることが出来，それらがパイプの軌道にどう影響しているかを確認できた．さらには回転数とアスペクト比が空力特性に与える影響についても確認することができた．しかしながら，さらなる解明には実験精度の向上を図っていく必要がある．またシミュレーション結果については相対誤差 5%以内を目標にさらに精度向上を図る予定である．

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. Oguchi, D. Tanaka, M. Nakano, J. Ishimoto, T. Adachi, K. Hirata: Geometric Effect on the Aerodynamics of a Spinning Hollow Cylinder in Flight, *The Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, (2024).

[2] 小口晃太郎，田中大貴，石本淳，中野政身，平田勝哉：回転しながら飛行する中空円筒における形状による空力特性への影響，エネルギー変換と流れの基礎数理，(2024).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J24I016
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 年目

気象改変技術の構築に向けた大規模自由度場の再現と アクチュエータ位置の最適化アルゴリズムの研究

Reproducing Large Degree-of-freedom Fields and Developing Actuator Placement Optimization Algorithm Toward Development of Weather Modification Technology

野々村　拓*†，大林　茂**††
永田 貴之***，佐々木 康雄***，渡辺 昌仁***
*名古屋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

本研究は近年の激甚災害のリスク低減に向けて，気象制御のための大規模自由度場に対するアクチュエータ位置の最適化アルゴリズムの構築に取り組む.

2. 研究成果の内容

アクチュエータの位置を最適化するためには，入力に対する感度を計算する必要がある．一般に利用される特異ベクトル法は Lanczos 法などによるため繰り返し計算が必要である．そのため，気象場の計算など計算コストが大きい問題では反復計算に時間を要する．そこで，乱択特異ベクトル法を提案し，大規模自由度場での効率的な感度解析を実現した．この手法は，一般的な特異ベクトル法と同様に接線形モデルと随伴モデルの時間積分を必要とするが，従来手法が接線形モデルと随伴モデルを交互に繰り返して時間積分をする代わりに，提案手法は多数の独立した計算を行いその結果を用いて上位の特異ベクトルを近似するため並列化効率が非常に高く，実実行時間で大幅に計算時間を短縮できる．米国大気研究センターを中心に開発された気象モデルの WRF に接線系/随伴モデルを備えた WRFPLUS を組み合わせることで，対象事例における積算降雨量に対する地表水蒸気量の感度モードおよび積算降雨量の応答モードを算出した.

アクチュエータ位置の最適化においては，乱択特異ベクトル法で算出した感度モードを用いて終端状態の出力を最大化する初期場に対する入力位置を求める線形逆問題のフィッシャー情報行列の行列式最大化を目的関数とした．この目的関数を用いて，貪欲法でアクチュエータ位置を選択する方法を研究グループでこれまでに開発してきたセンサ位置最適化アルゴリズムを応用して構築した．また，ここで選択したアクチュエータ位置は場を大きく変化させるための位置であり，雨量を最小化するための入力を決定する必要がある．本研究では，乱択特異ベクトル法で得た低次元モデルを用いて，各アクチュエータの on/off を変化させ，終端状態での最大降水量地点の雨量を最小化するアクチュエータの on/off の組み合わせを総当りで探索する方法を実装した.

本研究では，2018 年 7 月 5 日 12 時から 18 時を対象に西日本地域の解析を行った(図 1)．この時間帯は集中豪雨の初期に相当する．図 2, 3 に示すように応答モードと感度モードが得られた．なお，これらのモードは Lanczos 法により得られた特異ベクトルとおおよそ一致す

ることを確認した.

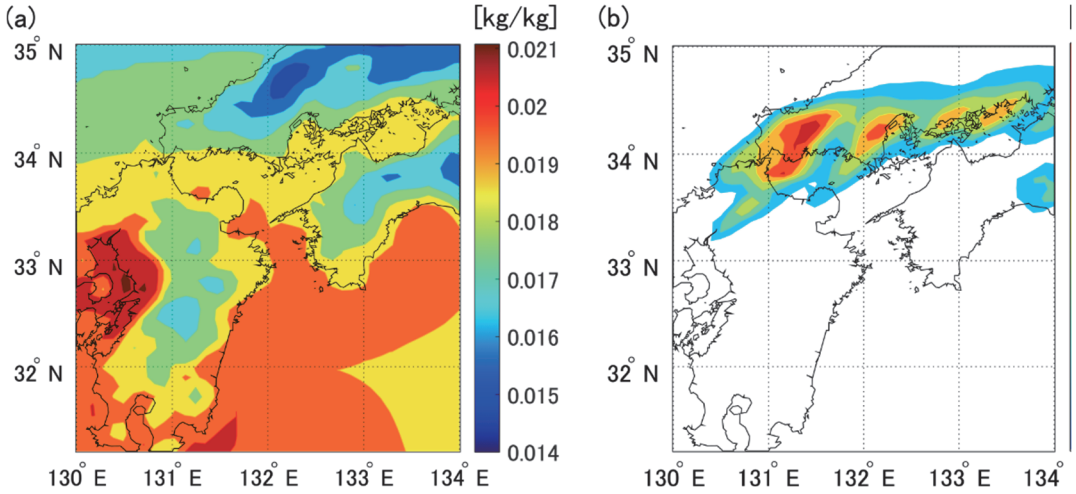


図１：ベースの状態量分布．(a) 地表水蒸気量（初期状態); (b) 積算雨量（終端状態).

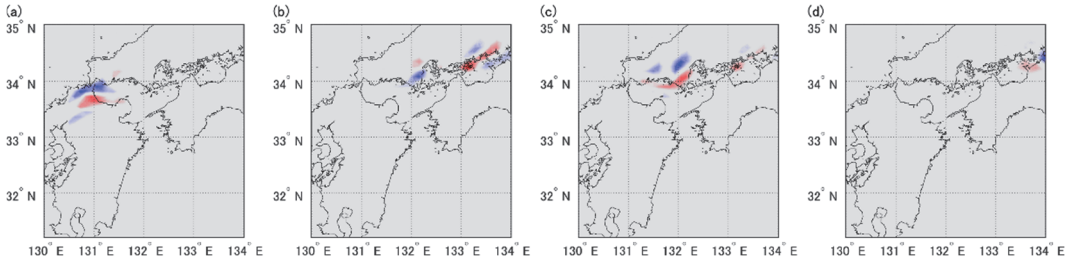


図２：得られた特異モード（左特異モード).

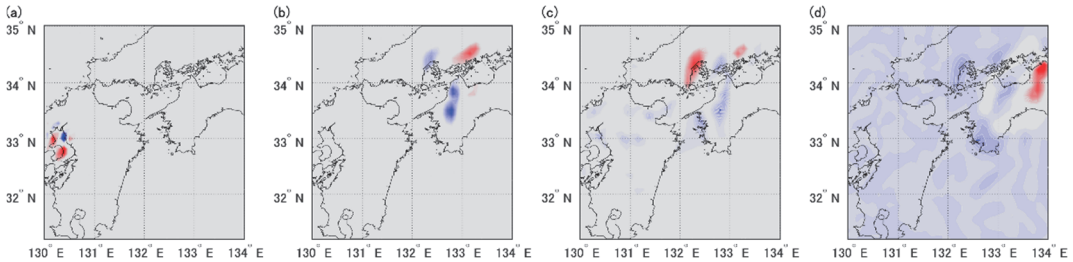


図３：得られた特異モード（右特異モード).

図 4 に終端状態における積算雨量分布と提案手法により選択されたアクチュエータ位置を示す. 図から，アクチュエータ位置は強雨域の南西側，つまり風上側が選択された．これは，地表での介入が上空のなど雲へ影響を与え，降雨量を変化させると考えれば妥当な配置と考えられる．図 5 には，地表水蒸気量に対する介入により終端状態がどれだけ変化したかを示す．”Greedy”は提案手法により選択した 16 点の候補の中から p 点を乱択して介入を行った場合で，”Random”は関心領域全体から p 点を乱択して介入を行った場合である．尚，入力は 3×3 セルのガウス分布で行い，300 パターンのアクチュエータ位置を生成して解析した．図から，領域全体から乱択して介入を行った場合に比べて提案手法で選択された場所で介入

を行った場合の方が終端状態における状態が大きく変化する.

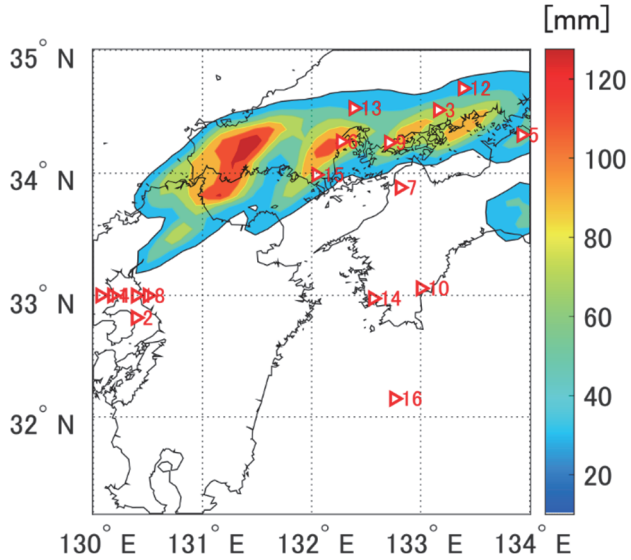


図４：積算雨量分布と選択されたアクチュエータ位置.

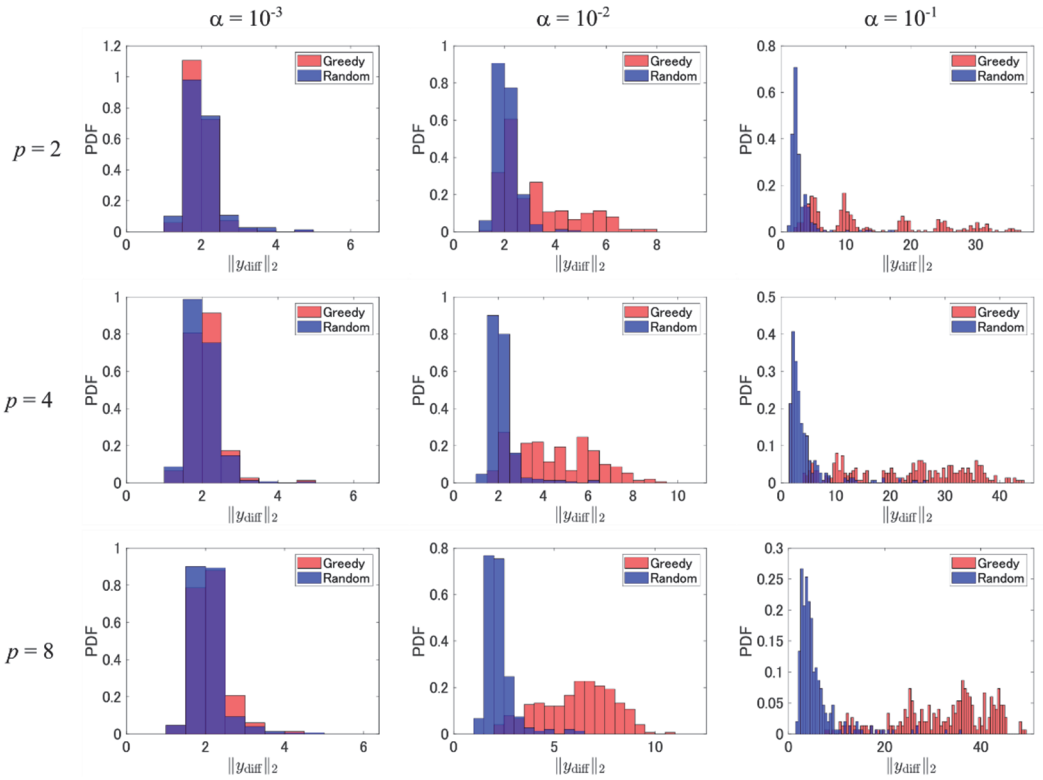


図５：アクチュエータ位置で地表水蒸気量を除去した場合の終端状態の変動の L2 ノルムの確率密度分布（αは水蒸気量の減少倍率）.

3. 研究目標の達成状況

本研究により，気象場等の大規模自由度場においてアクチュエータ位置を最適化することが可能となった．実際に気象場に介入を行うには，介入に利用するアクチュエータの問題，シミュレータと現実の差異，倫理的・法的問題を含む社会的な合意形成などが必要となるが，限られた入力でより効果的な介入を行うための手法が構築された．これにより，将来的には極端な気象現象の制御及び，激甚災害のリスク低減に繋がる技術が構築された．

4. まとめと今後の課題

乱択特異ベクトル法と WRFPLUS により集中豪雨の積算雨量に対する地表水蒸気量の感度解析を行い，効率的な介入が実施できると期待されるアクチュエータ位置の最適化が行えた．また，介入を行ったシミュレーションにより，提案手法で選択したアクチュエータ位置で介入することで乱択で決定したアクチュエータ位置で介入した場合よりも終端状態がより大きく変化することを確かめた．今後は，他の集中豪雨イベントへの適用や，時系列入力の最適化，非線形最適化への拡張を行っていきたい．また，介入する状態量や介入における制約条件を変えた実験により，より効率的な介入方法の探索および介入による気象場への影響の物理的洞察を得ることも可能であると考えている．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Watanabe,: Actuator Placement Optimization in a Linear Impulsive Control System by Determinant-based Greedy Algorithm, *IEEE Access* (to be submitted).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] H. Naruse, T. Nagata, Y. Sasaki, M. Watanabe, K. Yamada, J. Ito, J. A. I. Paski, D. Tsubakino, S. Obayashi, and T. Nonomura: “Actuator Placement Optimization Based on Randomized Singular Value Decomposition for Weather Control by Impulsive Input,” *AOGS 22nd Annual Meeting*, AS34-A013, Singapore, August (2025, to be presented).

[3] H. Naruse, T. Nagata, Y. Sasaki, M. Watanabe, K. Yamada, J. Ito, J. A. I. Paski, D. Tsubakino, S. Obayashi, and T. Nonomura: “Construction of Actuator Placement Optimization Framework Toward Realization of Efficient Weather Modification Technology,” *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-63, Japan, November (2024).

[4] 永田貴之，佐々木康雄，渡辺昌仁，成瀬寛高，山田圭吾，伊藤純至, Jaka Anugrah Ivanda Paski，椿野大輔，大林茂，野々村拓 : 効率的な気象場への介入に向けたアクチュエータ位置最適化フレームワークの検討-WRFPLUS と乱択特異ベクトル法による感度解析-，日本流体力学会年会 2024，3FH110-14-05，東京，2024 年 9 月．

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	J24I017
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	2 年目

立ち上り時間の長いソニックブーム波形と乱流干渉における時間・長さスケールの関係の解明
The Investigations of The Length and Time Scales Related to Turbulence Interaction with a Long Rise-Time Sonic Boom Pressure Signature

鵜飼 孝博*†，大谷 清伸**††
荒川 陽平*
*大阪工業大学工学部，**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

超音速旅客機の実用化にはソニックブーム騒音の低減が必要であり，機体形状を最適設計することで低騒音化が見込まれている．この機体形状の中でも，細長機体が最も低ソニックブーム騒音である．この機体から発生した「立ち上がり時間の長い圧力波形」が地上まで伝搬する過程で，地上付近に形成された大気乱流の影響を受けるが，どのような影響を受けるか解明されていない．先行研究の実験研究によると（APPL ACOUST 114, pp.179-190, 2016），低ソニックブーム波形である「立ち上がり時間の長い圧力波形」が乱流効果を受けづらいと示唆された．また，数値的調査よって，実機形状における「立ち上がり時間の長い圧力波形」においても同様な効果が得られることが分かってきた．しかし，限られた乱流場における調査に留まっており，立ち上がり時間の長さが乱流効果を受けにくいことを断定するためには，さらなる調査が求められる．そこで，「立ち上がり時間の長い圧力波形」と一般的なブーム波形は，時間スケールが異なることから，乱流場の時間/長さスケールに着目し，本研究では，圧力波形の時間スケールと乱流場の長さ/時間スケールの関係を明らかにする．昨年度では，乱流干渉が圧力波形の時間スケールに与える影響を明らかにした．本年度では，乱流場の積分長さスケールを変化させて，「立ち上がり時間の長い圧力波形」が乱流場から受ける影響を明らかにする．

2. 研究成果の内容

本実験では，東北大学流体科学研究所の弾道飛行装置を用いて，飛行体から発生する衝撃波にジェット乱流を干渉させ，圧力波形を計測した．弾道飛行装置の 1 段式火薬銃モードを選択し，直径 15 mm の 2 種類の円錐型の飛行体（図 1）をマッハ数 1.4 で射出させた．飛行体のモデル A-1 と A-3 では，それぞれ先端部の長さが $l = 97$ and 62 mm であり，意図的に “立ち上がり時間” のスケールが異なる圧力波形を発生させ（図 2），立ち上がり時間の時間スケールによる乱流効果を調査した．「立ち上がり時間の長い圧力波形」の影響と比較するため，通常の N 字型圧力波形のような「立ち上がり時間の短い圧力波形」も飛行体から発生する（図 2 の A-3 モデルにおける Time = 150 μs 付近の圧力上昇）．乱流干渉による圧力波形の歪みを評価するには，統計値が必要であるため，9 箇所で圧力計測を実施し，数回の射出で統計値が得られるようにした．なお，1 箇所の圧力計測では，乱流場が干渉しない圧力波形が計測できる．圧力計測では，鉄板に埋め込まれた PCB 社製の圧力変換機（PCB, 113B28）を

使用し，出力された信号をシグナルコンディショナー（PCB, 482C05）に介してデータロガー（横河計測，DL750）で記録した．ジェット乱流を発生させるため，弾道飛行装置内に 4 本のパイプ出口にノズルを設置し，約 20 mm の幅で一様な乱流場を生成させた．乱流の積分長さスケールΛ_fを変化させるため，ノズル出口の内径を変化させ，Λ_f = 4.37 ± 0.27, 5.49 ± 0.06, and 5.80 ± 0.31 mm の乱流場を生成させた．なお，たとえノズル内径が変化しても，乱流干渉に影響を与える速度変動が u_{rms} = 9.0〜10.5 m/s となるようにノズルの形状を工夫した．

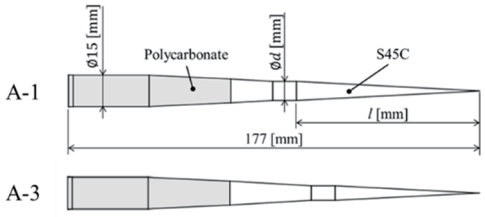


図 1：飛行体

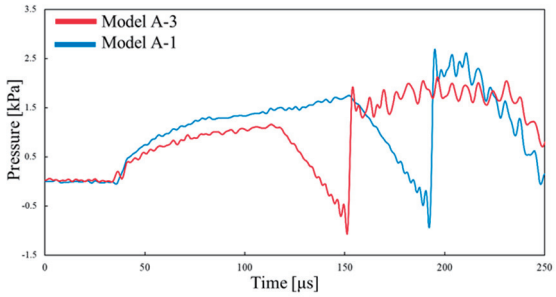
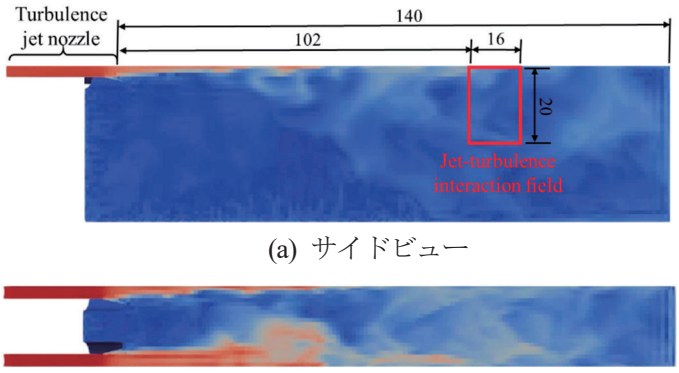


図 2：飛行体から発生した圧力波形



(a) サイドビュー

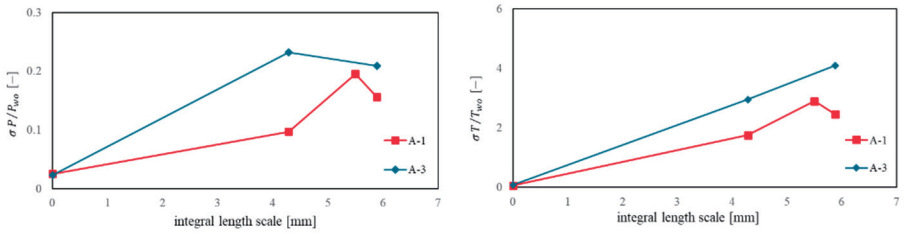
(b) トップビュー

図 3：数値解析によるジェット乱流場

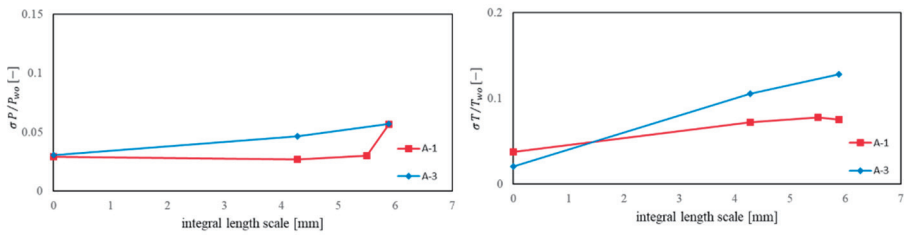
乱流干渉の影響を詳細に調査するため，数値解析を用いて衝撃波と乱流干渉を模擬した．飛行体から発生する近傍場圧力波形は，Ansys Fluent を用いて算出した．定常流の圧力ベースソルバーを用い，空間離散化スキームの勾配計算には最小二乗セルベース法を用いた．計算モデルは半裁形状とし，正確な近傍場圧力波形を算出するためにモデル直下（半裁面）の計算格子を細かくした．その後，得られた近傍場圧力波の乱流場での伝播を模擬するため，KZK 方程式を基にした圧力波伝播解析ツールを用いた．一方，乱流場の生成には，実験で用いたノズル形状を模擬して，CFD ツールである OpenFOAM において非圧縮粘性流れの非定常ソルバーである pisoFoam を選択して，実験と同様な乱流場を生成した．また，実験で生成した乱流の積分長さスケールを再現するため，Large Eddy Simulation（LES）とした．

計算メッシュの間隔は，実験の積分長さスケールと計算コストを考慮してベースの計算格子のサイズを 1 mm とし，ノズル出口から下流の空間の計算格子のサイズを 0.5 mm に設定した．計算コストを削減するため，ジェット乱流が生じる 4 本のノズルのうち，2 本の間に生成される乱流場を計算した（図 3）．数値計算では，Λ_f = 5.57～7.70 mm および u_{rms} = 9.78～10.6 m/s の乱流場が生成でき，実験結果と同様な乱流場が得られた．

図 4 に実験で得られた最大過剰圧と立ち上がり時間の変動値を示す．実験では，飛行体の射出毎に，飛行姿勢，軌道および飛行速度が異なるため，圧力波形の変形の指標となる立ち上がり時間 τ と最大過剰圧 P を，同一射出で得られた乱流干渉していない圧力波形の立ち上がり時間 $\tau_{\mathrm{w/o}}$ と最大過剰圧 $P_{\mathrm{w/o}}$ で無次元化して評価した．一般的に，P が 10－90 %に変化する時間を τ とする一方，本研究では，圧力波到達前後の計測ノイズの影響を避けるため，「立ち上がり時間の長い圧力波形」と「立ち上がり時間の短い圧力波形」では，それぞれ P の 30－90 %，10－80 %の時間を τ と定義した．「立ち上がり時間の短い圧力波形」では（図 4 (a)），乱流干渉を受けていない状態（積分スケールが 0）に対して，積分長さスケールの増加によって τ と P の標準偏差が増加する．一方，「立ち上がり時間の長い圧力波形」では（図 4 (b)），積分スケールが増加しても，変動値が比較的小さい．特に，積分スケール Λ_f = 5.80 ± 0.31 において，立ち上がり時間の標準偏差が，$\tau/\tau_{\mathrm{w/o}} \approx 0.1$ に対して，「立ち上がり時間の長い圧力波形」では，$\tau/\tau_{\mathrm{w/o}} \approx 4$ であり，約 40 倍の差が現れた．次に，飛行体 A-1 と A-3 の圧力波形に着目する．「立ち上がり時間の短い圧力波形」では（図 4 (a)），A-3 の圧力波形において，大きな変動が生じる．「立ち上がり時間の短い圧力波形」においては，A-1 と A-3 の圧力波形の τ は変わらないものの，A-3 の最大過剰圧は大きい（図 2）．つまり，弱い圧力波形（最大圧力値が小さい）では，乱流干渉の影響を受けやすいため，A-1 の圧力波形の変動が大きくなったと考えられる．一方，「立ち上がり時間の長い圧力波形」では（図 4 (b)），立ち上がり時間の時間スケールが長い A-1 の圧力波形が，A-3 よりも標準偏差が小さくなっているため，立ち上がり時間のスケールが長いと乱流干渉の影響を受けにくいことが示唆される．図 5 に数値解析で得られた最大過剰圧と立ち上がり時間の変動値を示す．数値解析においても実験結果と同様な結果が得られた．しかし，「立ち上がり時間の短い圧力波形」における A-1 と A-3 に対する乱流干渉の影響が反転している．現在この原因は分かっていないため，今後の調査が必要となる．本実験および数値解析の結果，積分長さスケールが増加しても τ と P の変動が小さいことから，「立ち上がり時間の長い圧力波形」は，乱流の積分長さスケールの影響を受けにくいことが明らかになった．

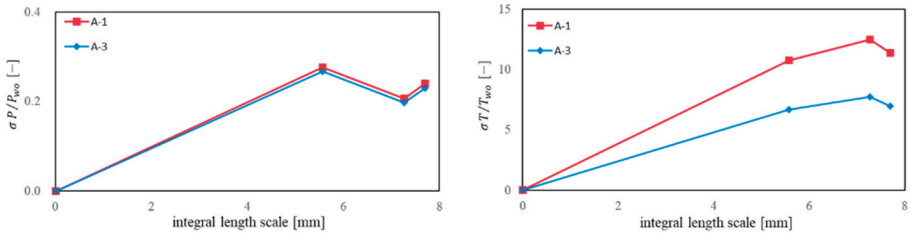


(a)「立ち上がり時間の短い圧力波形」

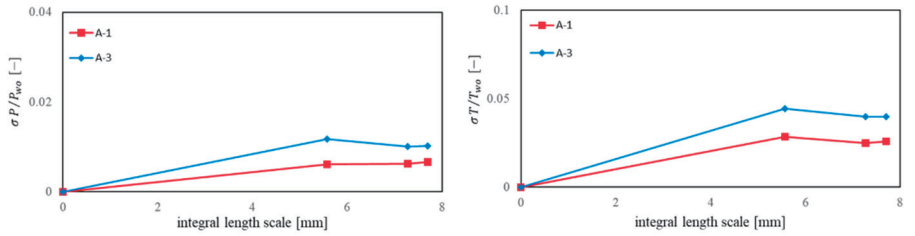


(b)「立ち上がり時間の長い圧力波形」

図 4：実験で得られた乱流干渉による立ち上がり時間と最大過剰圧の標準偏差



(a)「立ち上がり時間の短い圧力波形」



(b)「立ち上がり時間の長い圧力波形」

図 5：数値解析で得られた乱流干渉による立ち上がり時間と最大過剰圧の標準偏差

3. 研究目標の達成状況

いままでは，低ソニックブーム波形である「立ち上がり時間の長い圧力波形」の乱流効果に対して，特定の乱流場における乱流効果の調査に留まっていた．そこで本研究において，圧力波形の時間スケールおよび乱流場の積分長さスケールの関係を調査して，乱流場や圧力波形が変化した際の乱流効果を明らかにした．これらの成果は，乱流干渉に対するロバスト性に優れた超音速旅客機の設計に活かすことができるため，当初の目標を概ね達成できた．

4. まとめと今後の課題

本研究では，低ソニックブーム波形である「立ち上がり時間の長い圧力波形」に対する乱流効果を実験・数値的に評価した．特に，“立ち上がり時間”の時間スケールおよび乱流場の積分長さスケールを変化させて，乱流干渉における最大過剰圧と立ち上がり時間の変動を調査した．その結果，“立ち上がり時間”の時間スケールが長いと乱流効果を受けにくくなることが分かった．また，「立ち上がり時間の長い圧力波形」は，積分スケールが大きくなっても，乱流干渉の影響を受けにくいことが分かった．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Y. Arakawa, T. Ukai, K. Ohtani: Experimental and numerical studies on the correlation between pressure rise time and the turbulence length scale in shock-turbulence interaction. *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-67, pp. 189-190.

[2] 荒川陽平，鵜飼孝博，大谷清伸: 衝撃波－乱流干渉における乱流長さスケールが長い立ち上がり時間の圧力波形に及ぼす影響．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，(2025) (発表前)

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J24I018
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

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

Hao Zhao*†, Hisashi Nakamura**††
*College of Engineering, 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 SP-Virial 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 a Boltzmann-weighted Full-dimensional (BWF) potential model to characterize intermolecular interactions under supercritical conditions, coupled with the virial equation of state for thermodynamic properties and Enskog theory for transport corrections. The BWF potential can capture anisotropic molecular forces, while the virial expansion incorporates pressure-dependent corrections up to the third-order coefficients. This unified framework enables high-fidelity prediction of real-fluid combustion characteristics, including ignition delays and flame speeds, validated against quantum calculations, shock tube experiments, and laminar flame measurements up to 200 atm.

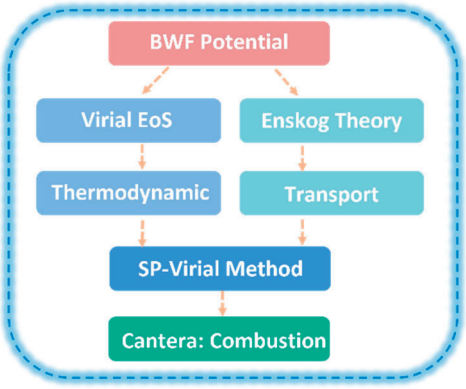


Figure 1: The theoretical structure of the SP-Virial method.

2.2 Numerical validation

1) The SP-Virial method shows excellent agreement with experimental data for H_2 (700K), H_2O (900K), and NH_3 (700K) across 1-600 atm. Over 400 atm, the SP-Virial method maintains <5% error, while the LJ-Virial method diverges significantly, reaching 270% errors, especially for NH_3.
2) For ignition delay at 60 atm, the SP-Virial method matches experimental data within 0.1 ms, whereas ideal gas models overpredict by 2.5 ms. In flame speed

predictions, the SP-Virial method accurately captures the 50%NH_3/50%CH_4 mixture behavior, showing <3% deviation from experiments at φ=1.0, while ideal gas models underestimate speeds by 35% at 200 atm.

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

2.3 Conference participation

Results presented at the AFI-2024 Forum (CRF-11, Sendai, November 2024).

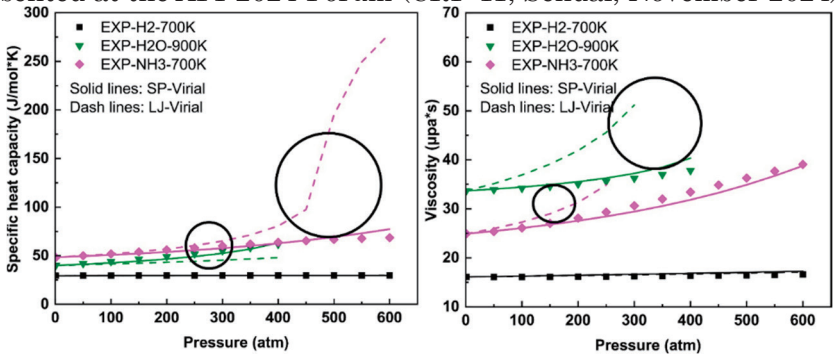


Figure 2: The thermodynamic and transport properties computed employing the SP-Virial and LJ-Virial methods with comparison to NIST data.

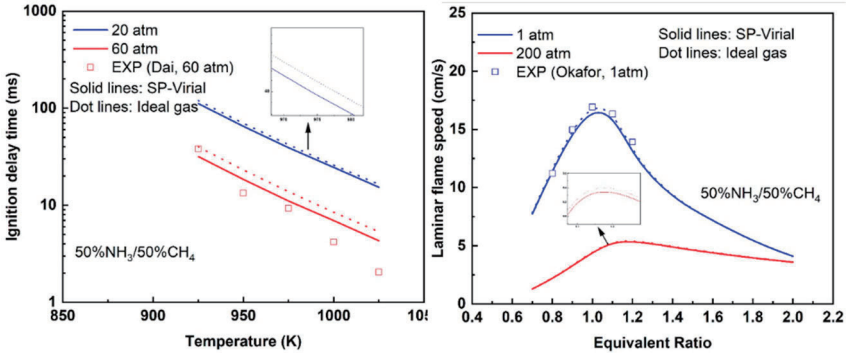


Figure 3: The combustion characteristics computed employing the SP-Virial and LJ-Virial methods with comparison to NIST data.

3. Achievements

1) Accuracy: the SP-Virial method outperformed LJ-Virial at pressures >200 atm, reducing errors in specific heat capacity and viscosity predictions (from 270% to <5%).
2) Combustion insights: the SP-Virial method predicted shorter ignition delays and lower laminar flame speeds under supercritical conditions, closer to the truth.
3) Dissemination: 1 conference presentation (CRF-11) and 1 manuscript in preparation (ICFD).

4. Summaries and future plans

4.1 Summary

The SP-Virial method enables reliable supercritical fluid modeling, addressing gaps in supercritical ammonia combustion research.

4.2 Future work

1) Extend validation to multi-component fuels.
2) Publish results in peer-reviewed journals (target: Combustion and Flame).

5. Research results

1) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.

[1] X. Zhang, H. Nakamura, H. Zhao, Supercritical Real-Fluid Oxidations of Ammonia by Using the SP-Virial Thoery, *Proc. AFI-2024*, Sendai (2024), CRF-11.

Project code	J24I019
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Emulating Atherosclerotic Conditions on an 'Organ-on-a-Chip' Device

Eugenia Corvera Poiré*†, Kenichi Funamoto**††
*Faculty of Chemistry, National Autonomous University of Mexico
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
† Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Atherosclerosis implicates localized hemodynamic forces, especially shear stresses, in lesion development. Arterial waveforms - "athero-prone" and "athero-protective" - characterize vulnerable (like in carotid sinus, for example) and resilient (like in distal internal carotid artery, for example) regions to atherosclerosis, reflecting distinct shear stress dynamics. Our study aims at emulating key flow features of athero-prone and athero-protective sites, by recreating physiological shear stress conditions on an 'Organ-On-A-Chip' device. Rather than exact replication of the waveforms, we focus on capturing essential aspects of the shear stress dynamics to assess their influence on endothelial monolayer integrity. Using a microfluidic platform built *ad hoc*, we simulate pulsatile shear stresses with different frequencies and with shear stress amplitudes akin to physiological conditions. We aim at unveiling how these variations impact monolayer integrity and cellular responses. This research offers valuable insights into the frequency-specific responses of endothelial cells to pulsatile shear stresses, enhancing our understanding of the origins of atherogenesis and potentially guiding the development of targeted therapies for cardiovascular diseases.

2. Details of program implement

In 2024, Prof. Corvera stayed at IFS for five weeks to perform theoretical analysis and conduct cellular experiments for the collaborative research project. Our collaborative research aimed to investigate the impact of physiological shear flow on endothelial cell behavior using an innovative microfluidic device. Oscillating fluid shear stresses were generated using a combination of a piezoelectric actuator and a microfluidic device. While previous collaborative efforts revealed cellular responses to shear flow frequencies, additional experiments under varying conditions were necessary. In addition, limitations in achieving physiological shear stresses necessitated modifications to the device. Consequently, the objective was to enhance the microfluidic setup to better replicate physiological shear conditions, leveraging fluid dynamics methodologies developed at UNAM.

Fluid shear stress generated by a fluid slug containing two fluid-air interfaces with surface tension was reviewed by theoretical analysis. The driving force of the system is a pulsatile pressure drop along the flow direction and external to the fluid slug, $\Delta p(t)$. By applying the linearized Navier-Stokes equation for the fluid and the Laplace condition for the pressure jump at air–fluid interfaces, a linear relationship between velocity and pressure drop in the frequency domain was derived. Deriving this one with respect to the coordinate perpendicular to the flow direction and evaluating it at one of the walls, gives an expression for shear stress as a function of pressure drop in

frequency domain.

As for the cellular experiments, human umbilical vein endothelial cells (HUVECs) were seeded and cultured to form a monolayer in the microchannel. Following that, a slug of fresh cell culture medium was injected into the microchannel just before the experiments. The microchannel was placed in a stage incubator (5% CO_2, 37℃) mounted on an inverted microscope. The movement of the piezoelectric actuator displaced the air in the cylinder and transduced an oscillatory movement to the slug of cell culture medium situated in the middle of the microchannel. The oscillation frequency and amplitude of the piezoelectric was controlled by a function generator and magnified by a multifunction-data acquisition-device. The pressure drop was measured using a differential pressure sensor connected to two points along the microchannel: upstream and downstream of the slug. Phase-contrast microscopy images of the cells were taken every 5 min for 6 h, and analyzed with particle image velocimetry (PIV) to measure the migration of HUVECs. In addition, the protein expression in HUVECs was observed by immunofluorescence staining.

3. Achievements

In the case of pulsatile fluid shear stress with magnitude and frequency (0.003 Pa, 6 Hz) applied to the cells, cell migration was decreased, and the intracellular actin filaments were oriented toward the flow direction. In addition, the expression of ICAM-1 tended to increase slightly compared to the one under a static condition without fluid shear stress. These results suggest that vascular endothelial cells may alter their responses even by very low shear stresses with temporal variations.

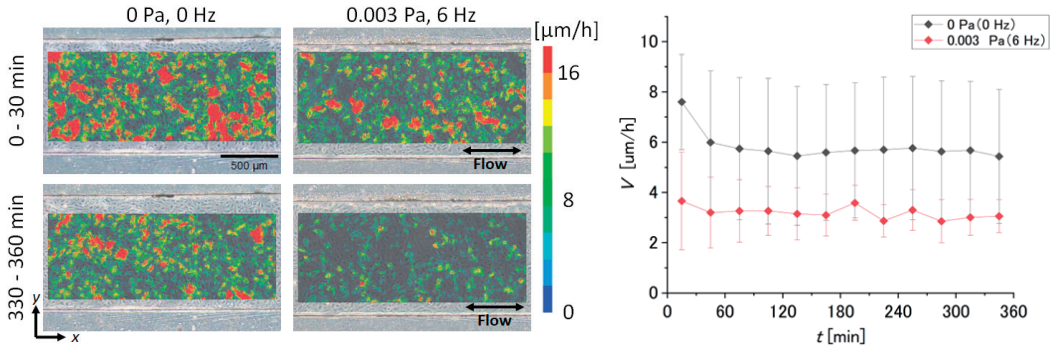


Figure 1: a) Speed color map of migration in vascular endothelial monolayer obtained by particle image velocimetry at the first and last 30-min intervals during observation under a static condition and a flow condition with 6 Hz pulsatile flow in a microchannel. Cells migrate basically in random directions, forming clusters; b) Average speed as a function of time under static and flow condition at 6Hz. Error bars come from the statistics of three experiments.

4. Summaries and future plans

We have presented preliminary results of a project to emulate atherosclerotic conditions on an organ-on-a-chip. Our future work will increase the magnitude of shear stresses to better mimic physiological flows. Varying shear flow frequencies is expected to reveal frequency-specific impacts on cellular morphology, protein expression, and monolayer integrity. This advancement aims to bridge the gap between experimental conditions and real-life scenarios, enabling a more accurate representation of endothelial responses to shear flow and contributing significantly to our understanding of cellular behavior in disease-relevant mechanical environments.

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] M. Sasaki, K. Funamoto, E.Corvera Poiré, Emulating atherosclerotic conditions on an organ-on-a-chip, *Proceedings of the 24th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2024)*, (2024), CRF-52, pp. 147-148.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J24I020
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st 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 link between endothelial cell dysfunction and blood flow-induced luminal shear stress has been repeatedly identified, with the wall shear stress (WSS), oscillatory shear index (OSI), and relative residence time (RRT) being the representative parameters of plausible prognostic efficacy in predicting endothelial dysfunction and, in clinic, atherosclerotic plaque formation and progression. Recently, emerging efforts have been to elucidate the impacts of shear stress multi-directionality and topological skeleton.

However, there are contradicting findings in regard to the critical values (i.e., cut-off) of each parameter that best predicts unfavourable events, and the interdependent effects of those parameters remain inconclusive. Here, we seek to quantify the interdependent effects of shear stress magnitude (i.e., WSS) and variation (i.e., OSI) on endothelial cell dysfunctions, and thereby elucidate the underlying haemodynamic mechanism driving vascular injury through use of computational simulation and cell experiment.

2. Details of program implement

We have performed a systematic literature review and meta-analysis to stay current with relevant literature. We retrieved existing quantitative data from both basic and clinical reports and statistically synthesise them to review the standardised effects of all relevant haemodynamic parameters. This effort will identify the heterogeneity of past studies and conclude the current understanding of haemodynamic drivers (WSS, OSI, RRT, *etc.)* in the process of endothelial dysfunction and the subsequent atherosclerotic plaque formation and rupture. Currently, we are looking into the effects of OSI at the cellular levels, i.e. the effects on atherosclerosis-related gene expression. We have screened the literature to date related to VCAM-1, ICAM-1, E-Selectin, MCP-1, KLF-2, nfkB, IL-6, etc. (Figure 1)

3. Achievements

Our preliminary study using this experimental setting has revealed a pattern similarity between the density difference and haemodynamic parameters when the cells were exposed to the condition where the time averaged WSS peak is significantly higher. Currently, the team is in the process of screening published papers with pertinence to the research topic. To search for relevant works, we implemented various keyword combinations, with the main keywords used in all keyword combinations being “oscillatory shear”. For VCAM-1 protein expression, we identified a total of 11 article meeting the selection criteria and recorded the OSI values with the background TAWSS

environments. We found that most studies assessed the effects of OSI at the cutoff of 0.5 while the background TAWSS values varied from 0.19 to 0.38 Pa. For VCAM-1 expression, the expression level varied from 1.77 to 10 folds, suggesting the heterogeneity of the included studies (Table 1).

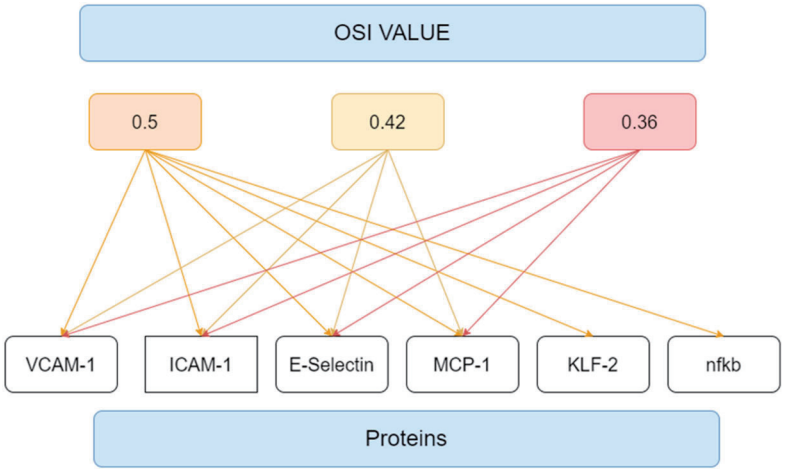


Figure 1: Number of published studies on different types of endothelial cells and the Protein/mRNA expressions together with frequency of different OSI values tested.

Table 1: Articles included for the effects of OSI on the expression of VCAM-1 under different background TAWSS conditions.

Cell Type	Flow Chamber Type	OSI	TAWSS [Pa]	T [h]	Expression Type	Expression Level (Folds)
Human Aortic Artery	Parallel Plate	0.50	0.25	4		4
Human Carotid Artery	Ibidi / Parallel Plate	0.43	0.38	24		2.77
	Cone-plate chamber	0.50	0.32	24		3.24
Human Umbilical Vein	Parallel Plate	0.50	0.25	6		1.77
	Parallel plate	0.50	0.32	24	mRNA	9
	Ibidi / Parallel Plate	0.50	0.32	24	mRNA	10
	Cone-plate chamber	0.50	0.32	8	Protein	2
	Parallel Plate	0.40	0.26	6	mRNA	2.64
	Cone-plate chamber	0.50	0.19	6	mRNA/tRNA	2.37

4. Summaries and future plans

Our project investigates the relationship between endothelial cell dysfunction and blood flow-induced shear stress, focusing on the interdependent effects of wall shear stress magnitude and oscillation. Our meta-analysis has revealed significant heterogeneity in published studies regarding critical values and cellular responses.

We will complete meta-analysis of atherosclerosis-related proteins, finalise manuscript incorporating systematic review findings, conduct benchtop cell experiments to clarify shear stress effects, develop standardised protocols to address literature heterogeneity, and create a computational model to predict endothelial responses under varied flow conditions.

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-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, Japan, (2024), CRF-21, pp. 73-74.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J24I021
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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**††
間部 謙三*, 入沢 寿史*
*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, CET に最も大きな影響のあるチャネル界面層制御, および原子層堆積法（ALD）により形成した high-k 絶縁膜のポストプロセス, 新規ゲートスタック材料に関して研究を行う.

2. 研究成果の内容

初期表面の化学的性質の違いによって, ゲートスタックの電気的特性がどのように影響を受けるかを検証した. 水素終端および極薄の酸化膜を形成した Si 表面に対し, ALD を用いて HfO_2 ゲート絶縁膜を堆積した. HfO_2 堆積後にポストアニールを行い, NiSi 電極を形成して, キャパシタの電気的特性を測定した.

水素終端 Si 表面上での形成の場合, 容量—電圧曲線はトラップに伴う大きなヒステリシスと, 理論曲線から外れた特性を示す. それに対し極薄酸化膜上での形成の場合では, ヒステリシスが小さく, 理想特性と一致する容量—電圧特性が得られた. この結果は, HfO_2 ゲートスタックの電気的特性が, HfO_2/Si 界面の品質によって支配されていることを示唆している.

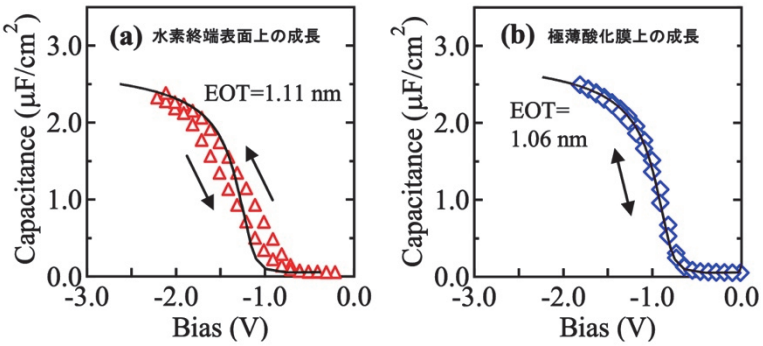


図 1：(a) 水素終端 Si 表面および (b) 極薄酸化膜上に作製された NiSi/HfO_2/Si MOSCAP の容量—電圧特性. HfO_2 の厚さは 3.2 nm.

3. 研究目標の達成状況

産総研内で形成した界面層/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．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．研究進捗によっては，新規チャネルに対する検討も進める．

4. まとめと今後の課題

Si 基板上の High-k ゲートスタックの電気的特性に対する界面の化学的性質の影響を調査した． 水素終端表面上に比較して，極薄の酸化膜を形成した Si 上に形成した HfO_2 ゲートスタックは優れた界面特性を示した．今後はゲートスタックの電気的膜厚の更なる薄膜化を進める．

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, H. Ota, S. Migita: Interface Design Concept of HfO_2/Si Gate Stack for Nanosheet MOSFETs, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics* (ICFD 2024), Sendai, (2024), pp. 403-404.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J24I022
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year (progressing)

Experimental and Kinetics Modeling Study of Tri-Methyl-Phosphate (TMP) and Bis(2,2,2-trifluoroethyl) Methylphosphonate Combustion. Toward P-Containing Fire Suppressants for Lithium-Ion Battery Electrolytes

Olivier Mathieu*†, Hisashi Nakamura**††
*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 is to develop detailed kinetics models for a class of fire suppressants containing a phosphorus atom, for lithium-ion battery applications. Two molecules are considered: Tri-Methyl-Phosphate (TMP) and Bis(2,2,2-trifluoroethyl) Methylphosphonate (bTFEMP). TMP is one of the smallest P-containing fire suppressants with a relatively simple structure ($(CH_3O)_3PO$). Its study will allow validating P-chemistry during combustion processes. The molecule bTFEMP, on the other hand, is considered a candidate agent for battery fire and has a more complex structure and composition ($(CF_3CH_2O)_2P(O)CH_3$). Experimental measurements to both validate the models and assess the fire suppressant efficiency of the agents are planned for this project. Note this project also encompass the study of Bis(2,2,2-trifluoroethyl) Carbonate (BtFEC), which has been the topic of the previous' years of the General Collaborative research between Texas A&M University and the Institute of Fluid Science at Tohoku University.

2. Details of program implement

As mentioned above, the project focuses mainly on studying candidate fire suppressants for lithium-ion batteries. Three fire suppressants were studied. First, a fire suppressant that presents the same structure of an electrolyte, Bis(2,2,2-trifluoroethyl) Carbonate was studied over a wide range of conditions and apparatuses. Table 1 presents the conditions under which the CO formation was measured in a shock tube:

Table1: Mixtures investigated for the CO formation during Bis(2,2,2-trifluoroethyl) Carbonate combustion.

ϕ	XBtFEC	XO_2	XHe	XAr	Temperature (K)	pressure (atm)
0.5	0.00071	0.00429	0.2	0.795	1288–1609	1.25–1.42
1.0	0.00125	0.00375	0.2	0.795	1240–1583	1.27–1.41
1.5	0.00167	0.00333	0.2	0.795	1265–1624	1.25–1.39

An updated model was developed and this model was able to capture with a higher degree of accuracy the results. An example is given below for the pyrolysis data (Fig. 1).

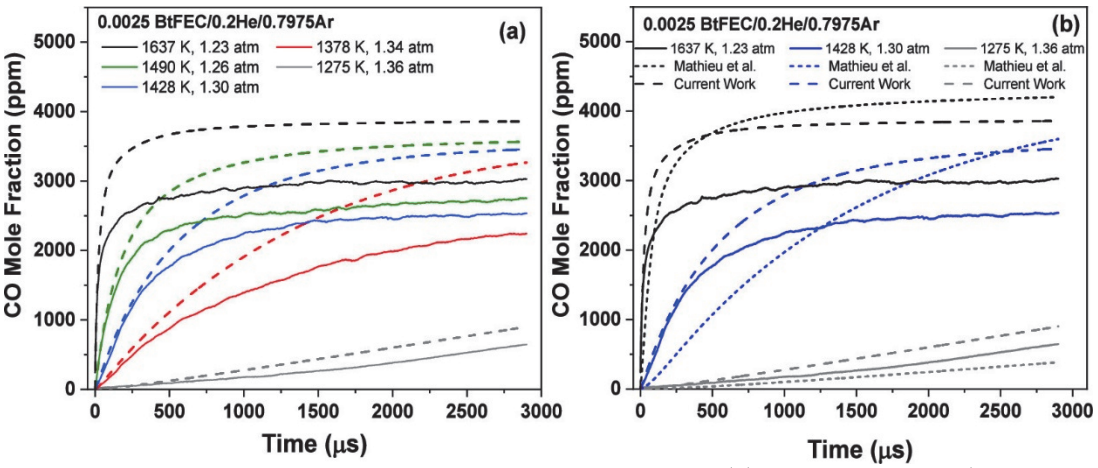


Figure 1: CO time-history profiles for BtFEC pyrolysis (a) Current model (dashed lines in same color as experiment) for temperature range 1275–1637 K compared with experimentally obtained profiles (solid lines). (b) Comparison of previous model (dotted lines) with new model from current work for temperatures of 1275, 1428, and 1637 K against experimentally obtained time histories.

On the TMP front, beside the new CO measurements obtained at Texas A&M University, the group of Prof. Nakamura at Tohoku University significantly improved the model predictions, as visible in Fig. 2.

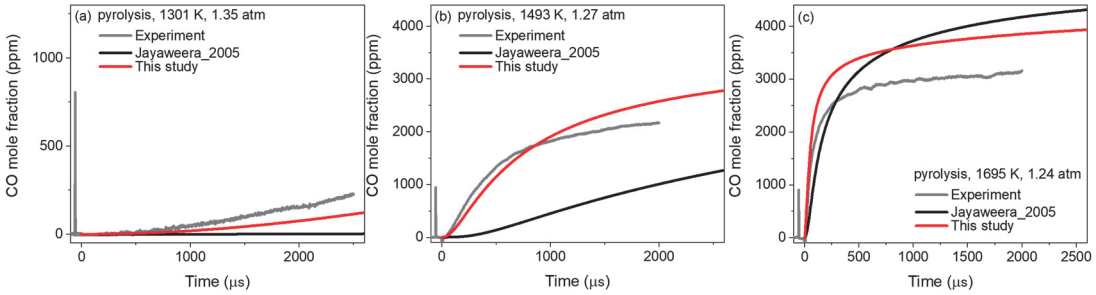


Figure 2 CO time-history profiles for TMP pyrolysis and comparison with a model from the literature and the work-in-progress model developed during this collaborative project.

Lastly, new ignition delay time measurements were performed for diluted mixtures of CH_4/O_2 seeded with bTFEMP in a heated shock tube. These results will serve as a base for model development and validation.

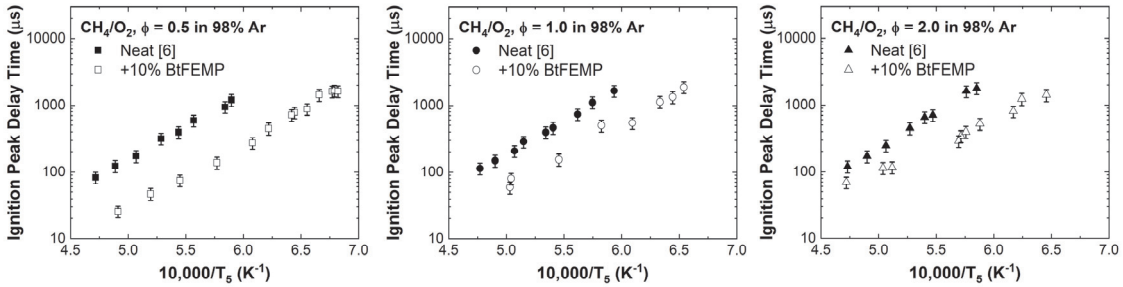


Figure 3: Ignition delay time measurements for a CH4/O2 mixture seeded with BtFEMP (corresponding to 10% of the CH4 concentration) for equivalence ratios of 0.5, 1.0, and 2.0 and comparison with neat CH4/O2 data.

3. Achievements

A great deal of experimental results has been already obtained at Texas A&M University already: Ignition delay time for bTFMP/O_2/Ar, H_2/O_2/bTFMP/Ar, and CH_4/O_2/bTFMP/Ar mixtures have been measured near atmospheric pressure. Similarly, the CO formation from TMP and bTFMP pyrolysis and oxidation (equivalence ratios of 0.5 and 1.0) was measured using a laser absorption diagnostic.
Laminar Flame speed measurement for H2-based mixtures seeded with the agents considered will be conducted at Texas A&M University. Experiments are currently ongoing with Tri-Methyl-Phosphate and will then continue with Bis(2,2,2-trifluoroethyl) Methylphosphonate. Some progress on the TMP detailed kinetics model have been made at Tohoku University.
Notably, the work on another fire suppressant for batteries, Bis(2,2,2-trifluoroethyl) Carbonate, was completed and lead to a journal publication. Lastly, the ongoing collaboration also lead to the publication of a paper concerning the combustion chemistry of a key battery electrolyte component (ethylene carbonate). Details on these publications are provided in the next section.

4. Summaries and future plans

To summarize, the team has made significant contribution in the field of fire suppressant candidates for lithium ion batteries, with a detailed kinetics model and a paper for Bis(2,2,2-trifluoroethyl) Carbonate. Progress have been made on other fire suppressants such as trimethylphosphate (TMP) and bis(2,2,2-TriFluoroEthyl) MethylPhosphate.
Future plans include further work on fire suppressant candidates for lithium-ion batteries, notably with a new class of components containing Phosphorus in their structure. As such, TMP will be the topic of additional research as its structure is one of the most simple for a P-containing fire suppressant. Lastly, more complex molecules like bis(2,2,2-TriFluoroEthyl) MethylPhosphate, more likely to fit the needs of a lithium-ion battery, will be further studied experimentally and numerically.

5. Research results

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

[1] M. Khan-Ghauri, P. Dievart, C.M. Grégoire, K. Kanayama, Y. Almarzooq, S. Takahashi, T. Tezuka, H. Nakamura, L. Catoire, K. Maruta, E.L. Petersen, O. Mathieu: Bis(2,2,2-trifluoroethyl) Carbonate As a Fire Suppressant Candidate for Lithium-Ion Batteries, *Energy & Fuels* 39 (2025), pp. 4893-4908, doi: 10.1021/acs.energyfuels.4c05359.

[2] K. Kanayama, C. M. Grégoire, S. P. Cooper, Y. Almarzooq, E. L. Petersen, O. Mathieu, K. Maruta, H. Nakamura: Experimental and chemical kinetic modeling study of ethylene carbonate oxidation: A lithium-ion battery electrolyte surrogate model, *Combustion and Flame*, 262 (2024), p. 113333, doi: 10.1016/j.combustflame.2024.113333.

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

[3] C.M. Grégoire, K. Kanayama, K. Maruta, H. Nakamura, O. Mathieu, E.L. Petersen. CO time-history measurements and kinetic modeling of trimethyl phosphate pyrolysis. *14th National US Combustion Meeting*, Boston MA, USA, Mach 16-19, 2025. Work in progress poster (PP#58).

[4] M. Khan-Ghauri, C. M Grégoire, K. Kanayama, P. Diévart, Y. Almarzooq, S. Takahashi, T. Tezuka, H. Nakamura, L. Catoire, K. Maruta, E.L. Petersen and O. Mathieu, Experimental and detailed Kinetics Modeling Study of Bis(2,2,2-trifluoroethyl) Carbonate, a Fire Suppressant for Lithium-Ion Batteries. *2024 Spring Technical Meeting of the Central States Section of The Combustion Institute* May 12-14, 2024, Cleveland, Ohio.

[5] M. Khan-Ghauri, C. M Grégoire, K. Kanayama, P. Diévart, S. Takahashi, T. Tezuka, H. Nakamura, L. Catoire, K. Maruta, E. L. Petersen, O. Mathieu. Experimental and Detailed Kinetics Modeling Study of Bis (2,2,2trifluoroethyl) Carbonate, a Fire Suppressant for Lithium-Ion Batteries. *21st International Conference on Flow Dynamics*, November 18-20, 2024, Sendai, Japan.

3) Patent, award, press release etc.

The paper "Bis(2,2,2-trifluoroethyl) Carbonate As a Fire Suppressant Candidate for Lithium-Ion Batteries, Energy & Fuels 39 (2025), pp. 4893-4908, doi: 10.1021/acs.energyfuels.4c05359" was selected for journal cover in Energy & Fuels (March 2025 volume). Below is the journal cover we created.

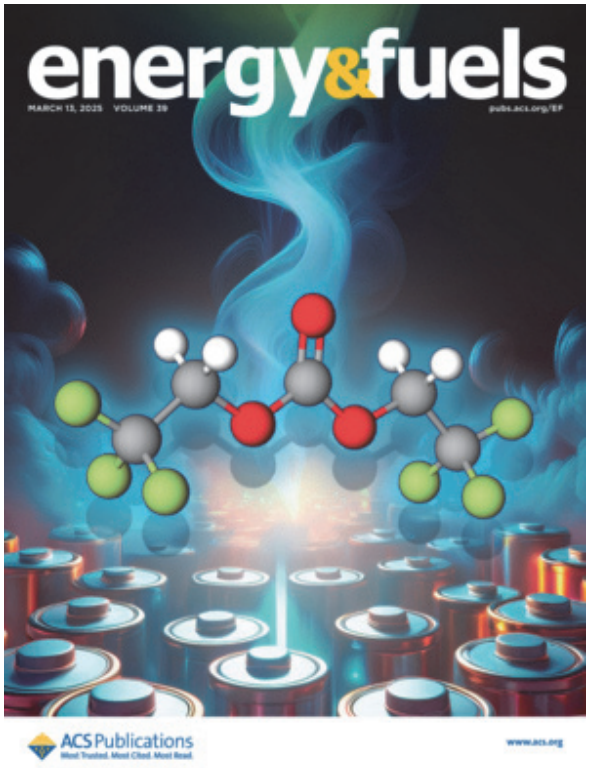


Figure 4: journal cover for the journal Energy & Fuels based on the paper developed from work performed under General Collaborative Research between the Institute of Fluid Science at Tohoku University and Texas A&M University.

課題番号	J24I023
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	3 年目

プラズマ誘起電荷・電界による生体膜輸送変移の大規模数値解析

Numerical Exploration of Plasma-Induced Charge and Electric Field-Induced Transport Transformations in Biological Membranes

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

近年，大気圧下における非平衡プラズマの安定形成技術が確立し，様々な直接接触応用が進められている．既に医療分野では，プラズマ照射によるう蝕治療や止血処置が実用化されつつある．また，がん細胞へのアポトーシス誘導，創傷治癒や効率的な遺伝子導入といった先進的な成果も得られている．

上記の医療効果は，放電活性種と細胞膜分子との酸化反応を含む外的刺激が起点となって生じることが実験的に示されている．一方で，プラズマが細胞近傍に誘起する電荷や電界も，界面の電気二重層を含む表面帯電や膜電位変動を直接的に生じさせる重要因子である．しかしながら，膜機能，とくに物質輸送機能への影響については，プラズマ照射下でのリアルタイム計測が実験的に困難であるため，明確な検証がなされていない．

本研究では，プラズマが誘起する電荷および電界が細胞膜の物質輸送機能に対してどのような影響を与えるか，その物理的特性を明確にするため，プラズマ・希薄水層・細胞膜の各階層を数値的にモデル化して，界面パラメータを介した統合を行うとともに，電流電圧条件を精査することで，膜帯電および膜電位に対する細胞電気定数ならびに膜輸送係数の変移を定量化する．

2. 研究成果の内容

前年度に作成した計流体近似計算および等価回路解析による統合的モデルにおいて，径方向の分割数を増倍し，解析精度を大きく向上させた．また，細胞間緩衝液の配置を工夫することで，細胞膜間電圧や細胞内伝導電流の放電パラメータ依存性をより明確にすることができた．

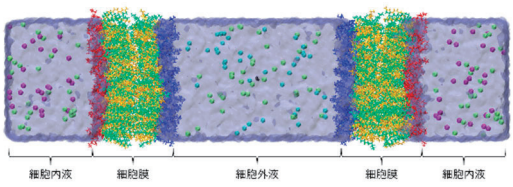


図１：内外層を考慮した複合細胞膜モデル

また，細胞膜の内外層を考慮し，それぞれの層側で組成の異なる複合細胞膜モデルを構築し（図１），誘起重畳電界の有無下における細胞膜近傍における活性種の過渡的挙動や定常空間分布を古典分子動力学法により定量的に模擬した（(図２)．

3. 研究目標の達成状況

今回の研究において，前年度に基本設計を終えた流体近似計算と等価回路を併用した統合的モデリングを更に高精度化し，細胞膜間電圧や細胞内伝導電流の挙動を詳細に検討することができた．また，細胞の内外層を考慮した複合膜モデルを構築し，活性種の存在分布や重畳電界に対する影響評価も定量的に解析することができた．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（COMSOL および AMBER）で，より実際的な並列高速計算による大規模膜解析も実施した．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．

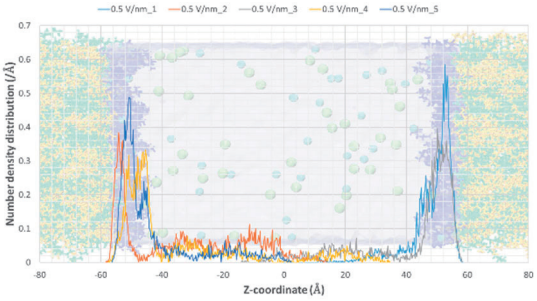


図 2：H_2O_2 の定常空間分布

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内外層を考慮した細胞膜および活性種の長時間挙動解析が実施され，生体組織および細胞膜への重畳電界モデルがより精緻化した．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] Kosuke Tachibana, Siwei Liu, Satoshi Uchida, Tomoki Nakajima, Takehiko Sato: Experiment and Molecular Dynamics Simulation for Plasma-Dependent Interface, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-41, pp. 123-124.

[2] Yuki Iijima, Satoshi Uchida, Ryo Ninomiya, Yuto Ninagawa, Ippei Yagi, Kosuke Tachibana, Akinori Oda, Takehisa Sato: Membrane Permeation Characteristics of Reactive Oxygen Species under Cold Atmospheric Pressure Plasma Irradiation, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-45, pp. 131-132.

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	J24I024
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	2 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**††
金子 賢人***
*宇宙航空研究開発機構，**東北大学流体科学研究所
***東京大学大学院工学系研究科
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は，近年粘性抵抗低減法として注目されている表面加工技術であるリブレットについて，圧縮性流れおよび圧力勾配流れにおける抵抗低減効果およびその効果のメカニズムを明らかにすることである．

2. 研究成果の内容

まず，圧縮性がリブレットの抵抗低減性能に与える影響を調査するために，主流マッハ数 0.2 と 0.85 の場合において，リブレットまわりの流れを DNS により調査した．リブレット断面は正三角形とし，各マッハ数における滑面上の壁単位で無次元化した無次元溝幅s^+を 12, 15, 18, 21, 24, 30 となるように設定した．昨年度実施した乱流遷移流れを対象とした DNS で得た乱流流れ場データを流入に与えることで，計算領域全体で乱流場を再現した．

図 1 に，滑面に対するリブレットによる抵抗変化率分布を示す．図 1 において横軸はリブレットの無次元溝幅s^+，縦軸は抵抗変化率を示しており，縦軸の値が負であればリブレットにより抵抗が減少したことを表している．青のプロットはマッハ数 0.2（非圧縮性流れ），赤のプロットはマッハ数 0.85（圧縮性流れ）の場合である．

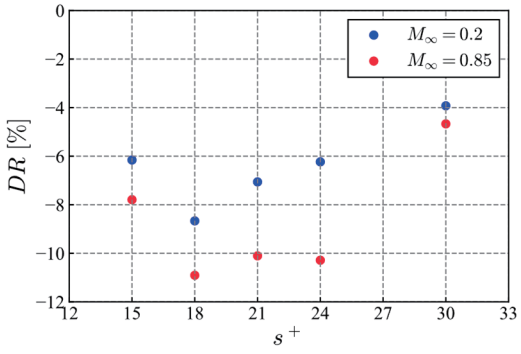


図 1. 非圧縮性流れと圧縮性流れにおけるリブレットによる抵抗変化率

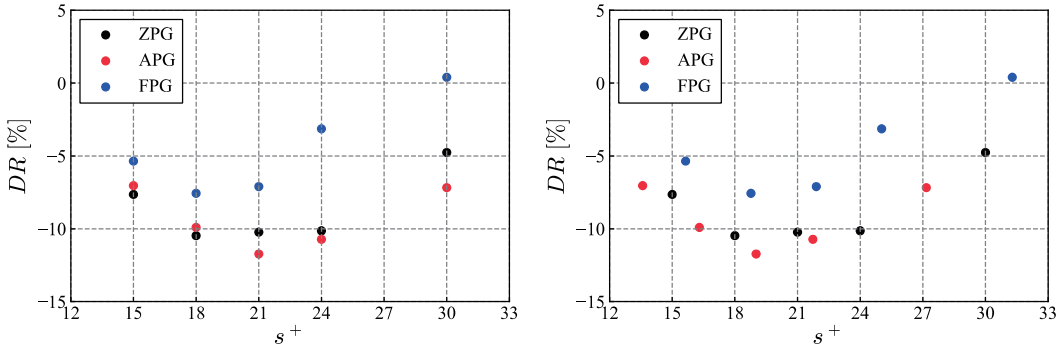
図 1 に示すように，マッハ 0.85 の条件下では，$s^+ = 18\sim24$において最大の抵抗低減効果が得られ，約 11%の抵抗低減が確認された．また，同一s^+で比較した際に，マッハ 0.85 におけ

る抵抗低減効果が，マッハ 0.2 の場合よりも大きいことが明らかになった．マッハ数の増加に伴い，縦渦の sweep および ejection 運動の強度が増加するが，この傾向が滑面に比べてリブレット面では抑制されるためであることが，レイノルズ応力の四象限解析より判明した．

本解析において，マッハ 0.2 の壁面単位を基に設定されたリブレットの無次元溝幅$s^+ = 18$は，マッハ 0.85 では$s^+ = 15.4$に相当することが示された．この差異は，流れの特性および対応する壁面単位がマッハ数に依存するために生じたものであり，マッハ 0.2 における壁面単位で設計されたリブレットは，マッハ 0.85 の実際の飛行条件には直接適用できない可能性を示唆している．一方で，飛行速度条件（圧縮性流れ条件）の壁面単位を用いて適切にリブレットを設計した場合，その抗力低減効果は，亜音速条件（非圧縮性流れ条件）で設計した場合と比較して向上することは，先述の通りである．

次に，圧力勾配がリブレットの抵抗低減性能に与える影響を調査するために，逆圧力勾配下と順圧力勾配下でのリブレットまわりの流れを DNS により調査した．壁面垂直方向の遠方境界に，流れ方向に一定の圧力勾配を与えることで圧力勾配流れを再現した．なお，主流マッハ数はいずれも 0.85 とした．

図 2 に各圧力勾配下におけるリブレットによる抵抗変化率分布を示す．図 2 において横軸はリブレットの無次元溝幅s^+，縦軸は抵抗変化率を示しており，縦軸の値が負であればリブレットにより抵抗が減少したことを表している．黒，赤，青のプロットはそれぞれ，ゼロ圧力勾配下，逆圧力勾配下，純圧力勾配下における結果である．また，図 2(a), (b)はそれぞれ，ゼロ圧力勾配下の滑面上における壁単位で整理した場合と，各圧力勾配下の滑面上における壁単位で整理した場合における抵抗変化率分布を示している．



(a) ゼロ圧力勾配下の滑面上における壁単位で整理した場合　(b) 各圧力勾配下の滑面上における壁単位で整理した場合

図 2. 圧力勾配を伴う流れ場におけるリブレットによる抵抗変化率

図 2(a)に示すように，同一s^+で比較した際に，逆圧力勾配はリブレットの抵抗低減効果を増加させる場合がある．一方で，順圧力勾配下では$s^+ < 30$においてリブレットによる抵抗低減効果はあるものの，その効果は小さくなることが確認された．逆圧力勾配によってリブレットの抵抗低減効果が増加する場合のその要因として，逆圧力勾配流れでは縦渦の sweep および ejection 運動の強度が増加するが，この傾向が滑面に比べてリブレット面では抑制されるためであることが観察された．対して，順圧力勾配流れでは縦渦の sweep および ejection 運動の強度は低下するが，その抑制の程度が滑面に比べてリブレット面の方が小さいためであることが明らかとなった．また，図 2(b)より，各圧力勾配下における壁単位で整理した場合には，圧力勾配の有無に関わらず$s^+ = 18, 19$程度のときにリブレットの抵抗低減効果が最大となることが確認された．つまり，圧力勾配が存在する場合にも，各圧力勾配下での滑面上の壁単位を基にリブレットを設計することによって，その性能を最大限引き出すことが可

能であることが示された.

3. 研究目標の達成状況

本研究では，圧縮性と圧力勾配がリブレットの粘性抵抗低減効果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し，2. に記したように達成した.

4. まとめと今後の課題

本研究成果により，圧縮性と圧力勾配がリブレットの抵抗低減性能に影響を及ぼすことが明らかになった．また，これらの結果を踏まえて，航空機のような圧縮性や圧力勾配が存在する流れ場におけるリブレットの設計知見を獲得することができた．今後は実際に翼型へリブレットを適用した場合の性能評価に取り組んでいく予定である.

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] 金子賢人，大山聖，焼野藍子：遷音速旅客機の巡航速度におけるリブレットの粘性抵抗低減効果，第 56 回流体力学講演会／第 42 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム，鹿児島，(2024).

[2] K. Kaneko, A. Oyama, A. Yakeno：Viscous Drag Reduction Effect of Riblet at Cruising Speed of Transonic Aircraft, *AIAA Aviation Forum*, Las Vegas, (2024).

[3] K. Kaneko, A. Oyama, A. Yakeno：Pressure Gradient Effect on the Riblet Performance at Cruising Speed of Transonic Aircraft, *EFDC1*, Aachen, (2024).

[4] K. Kaneko, A. Oyama, A. Yakeno：The Effect of Compressibility and Pressure Gradient on the Drag Reduction Performance of the Riblet, *ICFD*, Sendai, (2024).

[5] 金子賢人，大山聖，焼野藍子：宇宙輸送機への適用に向けたリブレットに関する研究，令和 6 年度宇宙航行の力学シンポジウム，相模原，(2024).

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	J24I025
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 年目

スパースプロセッシング PIV とプラズマアクチュエータによる翼周り流れ制御
Flow Control around Wing by Sparse Processing PIV and Plasma Actuator

野々村　拓*†，阿部 圭晃**††
Rodrigo Viguera***，　奈良 村遼*
*名古屋大学大学院工学研究科，**東北大学流体科学研究所
***東北大学大学院工学研究科
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

流体機器および輸送機器は近年の最適化技術により設計点では十分な性能を持つことが示されてきた．一方で，一度非設計条件にさらされたときにその性能は大幅に低下する．このような流体機器や輸送機器の性能を非設計条件においても維持し，様々な条件で運用できるようにすることが求められている．

そのような，非設計条件において流体機器の性能を維持するために流体制御が検討されてきた．受動制御や能動制御の様々なデバイスが適用され，その性能が評価されてきている．能動制御デバイスの一つとしてプラズマアクチュエータがあり，多くの研究が行われてきた．プラズマアクチュエータは，流体機器に貼付するだけで使用でき，電圧に応じて高速に出力が変化するため，流体制御のための実験機器として非常に優れた特性を持つ．これまでに，翼周り流れに適用されてきており，比較的浅い失速角では剥離を抑えその翼性能を大幅に向上することが示されている．一方で，大失速条件では，プラズマアクチュエータの出力が弱いためと考えられるが，その制御効果は十分ではない．

このような比較的制御が難しい条件において，制御効果を高めるためにはフィードバック制御が必要であると考えた．これまでに，翼面上に埋め込んだ圧力センサを用いてフィードバック制御を試みたが，電磁ノイズの問題に加え，翼面から離れた剥離流れに内在する渦構造は翼面上の圧力センサとの相関が弱く，流れ場の把握が難しいことがわかった．そこで，野々村らは，モード分解と圧縮センシングの技術を組み合わせたスパースプロセッシング PIV を提案し，これを利用することで高速気流中における画像計測から流れ場を 2kHz のサンプリングレートでリアルタイムに把握することを実現してきた．この技術をセンサとして利用し，プラズマアクチュエータと組み合わせることでこれまでに円柱周りの後流の非対称性を減ずる研究に成功してきている．

本研究では,スパースプロセッシング PIV とプラズマアクチュエータを組み合わせたフィードバック制御技術を翼型周り流れに適用し，その制御を試みる．

2. 研究成果の内容

本研究では，風洞の選定時に流体科学研究所の小型低乱熱伝達風洞の利用も考えたが，実験セットアップの兼ね合いから，名古屋大学基礎空力研究用小型風洞を用いて実験を行い，その成果を議論する形で進めた．

実験のセットアップを示す．本研究で使用した実験装置の概略図を図 1 に示す．

Figure 1: Experimental setup

実験は名古屋大学基礎空力研究用小型風洞（ν-BART）で実施した．樹脂性 NACA0015 模型（コード長 100mm，幅 300mm）を用いた．迎え角を 20 度とした．ハイスピードカメラに Photron 社の IDP-Express R2000 を利用した．主流速度は 10 m/s，PIV 計測時の撮影速度は 4,000 fps とした．Re 数は 6.4×10^4 とした．プラズマアクチュエータ は上面前縁と下面後縁に設置し，駆動にはピー・エス・アイ社の高電圧出力アンプ PSI-PA1050N を用いた．SPPIV 技術に関しては参考文献(Kanda et al. Experiments in Fluids, 2023)を，制御入力に関しては参考文献(Nonomura et al. Experiments in Fluids, 2025(掲載予定))を参照されたい．

ただし，翼型模型の制御の場合は，POD モード係数のターゲット値を決定し，そのターゲット値に POD モードが近づくように制御則を修正している．

これにより，翼型周り流れの制御を行った．今回の実験では，速度場のみを観測して実験を行ったため，POD モード係数がどう変化したかのみを議論する．

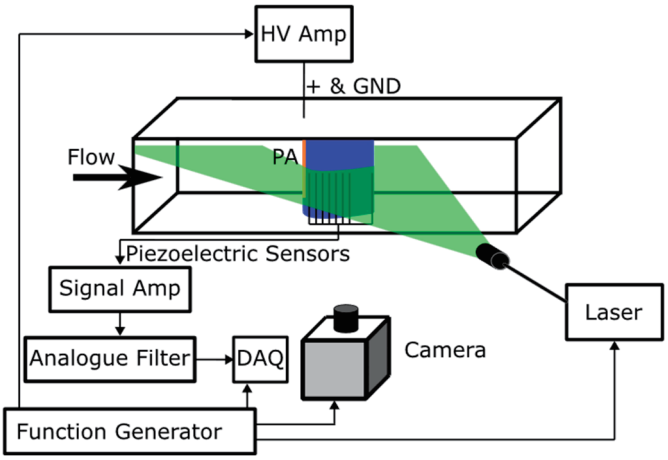


図 1　実験セットアップ

図 2 に平均流れ場を示す．プラズマアクチュエータをフィードバック制御したときの結果は，非制御時と比べほとんど変化がない．せん断層が厚くなるなどの効果が見られるが，大きく流れ場を変化させることはできなかった．

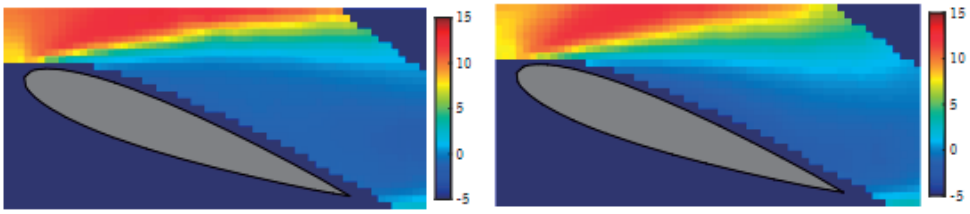


図 2　平均流れ（左：非制御時，右：フィードバック制御時）

モード係数の変化を図 3 に示す．横軸にはパラメタを変えた場合の結果（r：モード数，p: センサ数）を示すが,優位に第 1 モードの値を変化させることは出来ているが，この変化では図 2 に示す程度の違いのみしか得られないことがわかった．

今後より効果的な流体制御則の構築などが期待される．

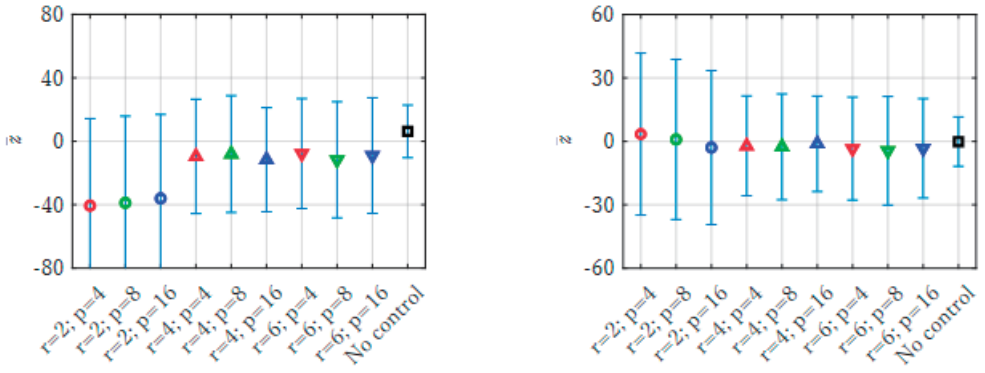


図３　POD モード係数の変化（左：第一モード，右第二モード）

3. 研究目標の達成状況

翼型周り流れを大きく変化させてその性能を向上させることを目標として研究を進めたが，円柱周りで成功した線形の流体制御則は，翼型周りでは限られた条件でのみ流体場を変化させることに．今後は，より効果的な流体制御則などと組み合わせてフィードバック制御を行うことが求められる．

4. まとめと今後の課題

スパースプロセッシング PIV とプラズマアクチュエータを組み合わせた流体制御に成功した．残念ながら，流体制御効果は，非制御時のそれとほとんど変化がなく，今後のより効果的な流体制御則との組み合わせなどが期待される．

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] Rodrigo Viguera, Ryo Naramura, Yasuo Sasaki, Yoshiaki Abe, Taku Nonomura: Advancement in Feedback Control Using Sparse Processing PIV, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-62, pp. 174-176.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J24I027
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	2 年目

アンモニアを燃料とした航空機の概念設計に関する研究
Study on Conceptual Design of an Aircraft Fueled with Ammonia

中村　寿*†，下栗 大右**††，Sharma Aprba**，藤本 洋平****，大林　茂*
早川 晃弘*，和田 朋也*,***，小佐田　一*,***
*東北大学 流体科学研究所，**広島大学大学院 先進理工系科学研究科
東北大学大学院 工学研究科，*三菱重工航空エンジン株式会社
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

航空機は，国際物流や移動手段において，重要であり，世界的にも航空機の需要が増加している. 現在, 航空分野の CO_2 排出量は全体の 2.6%を占め[1], 持続可能な発展のためには, CO_2 排出量の低減が必要である．2020 年に ICAO が，2050 年までに二酸化炭素の排出量を実質ゼロにする長期目標[2]を示したように，航空機産業において，カーボンニュートラルが重要な目標となっている.

カーボンニュートラルを達成するために提案されている代替燃料として，SAF と水素がある．SAF はバイオマス等から作られ，従来のジェット燃料より CO_2 削減効果がある．しかし，SAF は製造コストが高く，供給量が少ないことが課題である．水素燃料は，燃焼時に CO_2 が発生せず，様々な方法で製造することができる．一方で，輸送や貯蔵には，高圧化や液化のために非常に高い技術が必要とされるという課題がある．そこで，これらの課題を解決する代替燃料として注目が集められているのが，アンモニア燃料である．アンモニア燃料は，沸点が水素よりも高く，貯蔵・運搬性に優れており，安価という特徴がある.

アンモニア燃料を代替燃料として利用しようとする研究は世界中で始まっている．航空分野では，オーストラリアの Aviation H2 がアンモニア改質を利用した航空機の検討[3], Raytheon Technologies が電動航空機とアンモニア燃料の統合をした航空機の検討[4]を行っている. しかし, アンモニア燃料を直接利用した航空機の検討はまだされていない. そこで, 飯島[5]がアンモニア燃料を利用した民間航空機の機体成立性を, 概念設計を通じて検討した. その結果，アンモニア航空機特有の設計課題と運用上の特徴が明らかになった．一方で，この研究では，エンジン性能の評価が行われておらず，アンモニア燃料を使用した場合に，運用条件で，エンジンが要求された推力や燃費を達成できるのか検討されていない.

本年度の共同研究では，アンモニア航空機の要求に基づき，熱力学的サイクルを計算することで，アンモニアターボファンエンジンの実現性を検討するとともに，航空燃料としてのアンモニアの特徴を明らかにする.

2. 研究成果の内容

2.1 要求仕様

飯島[5]が行ったアンモニア航空機の機体成立性で用いたベース機体は，乗客席を 92 名とし，巡航マッハ数は，$\boldsymbol{M_{mo} = 0.78}$としている．就航予定年は 2035 年とした.

アンモニア航空機の機体成立性から得られた要求仕様を表 1 に示す．エンジンを検討するにあたり，地上状態での推力と巡航状態での SFC(燃料消費率 ：Specific Fuel Consumption)が要求仕様として与えられた．以降の検討では，この要求を満たすエンジンを検討する．

表 1　アンモニア航空機の要求仕様

地上時の推力	F_{ssl}	12500	lbf
巡航時の SFC	SFC_{cruise}	1.1	(lb/h)/lbf

2.2　エンジンモデル

本研究に用いたエンジンモデルとして，民間機に一般的に用いられている 2 軸のターボファンエンジンを選んだ．ターボファンエンジンでは，ファンを通過した空気が，圧縮機，燃焼器を通りタービンを出て高温高圧のガスとなってコアノズルから排出されるコア流と，ファンを通過した後，ファンノズルから排気されるバイパス流に分かれ，各ノズルから別々に排気される．

2.3　サイクル計算概要

サイクル計算においては，作動流体がエンジンの入口から出口に至り，その後入口に入ってきた状態に戻るまで，熱力学的にどのような変化をたどってきたのか，各点の温度と圧力を計算することで，エンジンの性能や効率を評価するためのプロセスである．サイクル計算における主要なパラメータとして，タービン入口温度 (TIT)，全体圧力比 (OPR)，バイパス比 (BPR)，ファン圧力比 (FPR)がある．本研究では，これらを総称して，サイクルパラメータと呼ぶ．エンジン性能を表すパラメータとして，SFC(燃料消費率)，比推力 (Specific Thrust)，推力 (Thrust)が使われる．これらは，サイクルパラメータが決定することで，計算できる．

2.4　計算方法[6]

エンジンモデルの概略図を図 1 に示す．本研究で用いた 2 軸のターボファンエンジンの中で，主要な要素の入口と出口の位置を番号で表した．本研究では，下付き文字を位置番号で表す．

本研究で使用した，エンジン性能を表すパラメータの計算方法について述べる．

エンジンが発生させる推力は，各ノズルの運動量変化による推力と圧力による推力の合計で表される．コアの推力$\boldsymbol{F_{core}}$は，

$$\boldsymbol{F_{core}} = (\boldsymbol{m_6 C_7} - \boldsymbol{m_h C_a}) + (\boldsymbol{P_7} - \boldsymbol{P_a})\boldsymbol{A_{s7} m_6} \tag{1}$$

ファンの推力F_{fan}は，

$$F_{fan} = (m_c C_8 - m_c C_a) + (P_8 - P_a) A_{s8} m_c \tag{2}$$

となるから，推力は，

$$F = F_{fan} + F_{core} \tag{3}$$

と表せる．ここで，$\boldsymbol{m_h, m_c}$はそれぞれ，コアとファンの空気流量，Cは速度，Pは全圧，$\boldsymbol{A_{s7}}$はノズルを通過する単位質量流量あたりの，ノズルの出口面積を表している．燃料と空気の比率である燃空比fは，燃焼器前後のエンタルピ保存の関係から，以下のように書ける．

$$f = \frac{\overline{c_{pg}}(T_{04} - T_{ref}) - \overline{c_{pa}}(T_{03} - T_{ref})}{\eta_b Q_{net} - \overline{c_{pg}}(T_{04} - T_{ref})} \tag{4}$$

ここで，$\overline{c_{pa}}$，$\overline{c_{pg}}$はそれぞれ空気，燃焼ガスの平均定圧比熱．η_bは燃焼効率，Q_{net}は燃料の低位発熱量，T_{ref}は基準温度(298 K)である．

SFC は単位推力当たりに必要な燃料流量より，

$$SFC = \frac{m_f}{F} = \frac{fm_{35}}{F} \tag{5}$$

と表せる．m_fは燃料流量を表している．

比推力は，単位空気流量あたりの推力であり，エンジンの大きさは，通過する空気流量によって決まるから，比推力により，エンジンのサイズが推定できる．比推力は，以下の式で書ける．

$$F_s = \frac{F}{m} \tag{6}$$

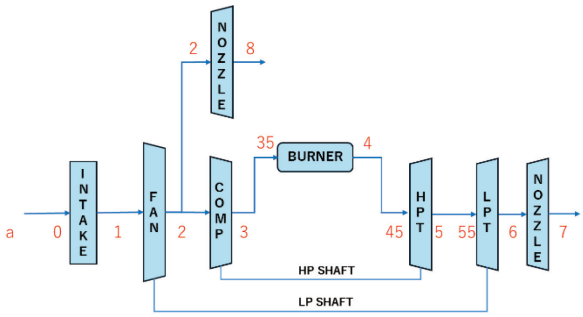


図 1　エンジンモデルの概略図

2.5　計算プログラムの妥当性検証

サイクル計算を行う計算プログラムを作成して，現在使用されているエンジンデータと計算結果を比較することで，計算精度の妥当性を検証した．妥当性検証に使用したデータは，現在使われているターボファンエンジンの中で，推力，SFC，型式証明時の年代，空気流量，サイクルパラメータが既知のデータを選んだ[7]．データはエンジンの静止海面上(SSL：Static Sea Level)での値である．計算結果と実機データにおける推力と SFC の相対誤差を10%以内に収めることを目標とした．計算に使用した燃料はケロシン燃料であり，化学式は$C_{12}H_{24}$，低位発熱量 LHV = 43200 [kJ/kg]として計算を行った．

表 2　ターボファンエンジンの実機データ

エンジン名	推力 [lbf]	SFC [(lb/h)/lbf]	FPR [-]	TIT [K]	BPR [-]	OPR [-]
CFM56-2C1	22000	0.35	1.45	1543.0	6.0	24.7
ATF3-6	5200	0.52	1.60	1449.0	2.9	21.0
D-18T	51660	0.36	1.56	1600.0	5.6	25.0
JT9D-7R4H1	56022	0.36	1.68	1616.0	4.8	26.7
PW2037	38250	0.33	1.63	1678.0	5.8	27.4
CFM56-2A2	24000	0.36	1.45	1628.0	5.9	25.4
JT8D-219	21700	0.52	1.91	1411.0	1.8	19.2
CFM56-5A1	25000	0.33	1.55	1537.0	6.0	26.5
CF34-3A	9220	0.35	1.50	1477.0	6.2	21.0
CFM56-5C2	31200	0.32	1.58	1633.0	6.6	31.5
FJ44	1900	0.46	1.60	1291.0	3.3	12.8
PS-90	35250	0.38	1.60	1640.0	4.6	31.9

2.6　サイクルモデル

サイクル計算を行う計算プログラムは，Python を用いて作成した．このプログラムの大きな特徴は以下の点である．定圧比熱を温度の関数，技術革新による要素効率等の向上を考慮，Bleed を考慮する条件で計算を行った．計算に使用した，空気とケロシンの燃焼ガスのモル質量と割合については，表 3 に示す．

表 3　空気と燃焼ガスの化学種

空気			ケロシンの燃焼ガス		
名称	モル質量	割合	名称	モル質量	割合
N_2	28.013	78.0%	N_2	28.013	76.2%
O_2	31.999	21.0%	H_2O	18.015	4.6%
Ar	39.948	1.00%	CO_2	44.010	4.6%
			O_2	31.999	13.5%
			Ar	39.949	1.00%

2.7　定圧比熱

サイクルモデルでは温度の関数として計算を行った．定圧比熱の式は，NASA の文献の式[8]に基づいて温度の関数とした．以下に，定圧比熱の式を示す．

$$\frac{C_P}{R'} = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5T^4 \tag{7}$$

定圧比熱$\boldsymbol{C_P}$ [**J/kg**]は，多項式の係数$\boldsymbol{a_i}$，温度$\boldsymbol{T}$ [**K**]と気体定数$\boldsymbol{R'}$[J/(kg K)]を用いて表せる．混合ガスの比熱に関しては，式(2)で表せる．

$$\text{混合ガス比熱} \quad = \quad \sum(\text{モル分率} \times \text{各比熱}) \tag{8}$$

これらの式によって，各気体の温度と組成が分かれば，定圧比熱を求めることができる．

燃焼ガスの定圧比熱の計算には，燃焼ガスの成分割合を求める必要がある．$C_{12}H_{24}$の理論燃空比燃焼に必要な空気のX倍空気があるとき，化学反応式は，以下のように書ける[9]．

$$\begin{aligned} &C_{12}H_{24} + 18X(O_2 + 3.714\,N_2 + 0.048\,Ar) \\ &\rightarrow 12CO_2 + 12H_2O + 18X(3.714N_2 + 0.048Ar) + 18(X-1)O_2 \end{aligned} \tag{9}$$

燃料に対する空気の割合Xが分かると，燃焼ガスの成分割合が分かり，燃焼ガスの定圧比熱を計算できる．空気過剰率Xは理論燃空比f_{sto}を用いて計算できる．理論燃空比f_{sto}とは，燃料が完全燃焼したときに理論上必要となる，最小の空気の質量と燃料の質量の比のことである．理論燃空比は，以下のようになる．

$$f_{sto} = \frac{\text{燃料の質量}}{\text{空気の質量}} \tag{10}$$

なり，$C_{12}H_{24}$の場合，$f_{sto} = 0.0678$となる．空気過剰率Xは，燃空比に対する理論燃空比の比で表され，

$$X = \frac{f_{sto}}{f} \tag{11}$$

と定義される．当量比ϕは，空気に対して，理論量の何倍の燃料が供給されたかを表す．当量比ϕは，

$$\phi = \frac{f}{f_{sto}} = \frac{1}{X} \tag{12}$$

と定義され，空気過剰率の逆数である．

2.8　要素効率

航空エンジンの各コンポーネントの要素効率は，技術革新により年々向上している．サイクルモデルでは，実機エンジンデータの，型式証明取得年の効率を用いた[10]．図 2 と図 3 に各年代の，ポリトロープ効率と等エントロピ効率を示す．図の●印が，文献値であり，2015 年以降の数値は予測値を示している．文献データの存在しない点は，近似曲線により予測を

行った．ファン，圧縮機，タービンのポリトロープ効率については，実機の傾向に一致するように調整を行った．

燃焼器の圧力比$\boldsymbol{\pi_b}$，燃焼効率$\boldsymbol{\eta_b}$，機械効率$\boldsymbol{\eta_m}$は，年代ごとにほぼ変化しないと考え．一定値を用いて計算を行った．$\boldsymbol{\pi_b}$ = 0.94，$\boldsymbol{\eta_b = 0.99}$，$\boldsymbol{\eta_m = 0.99}$とした．

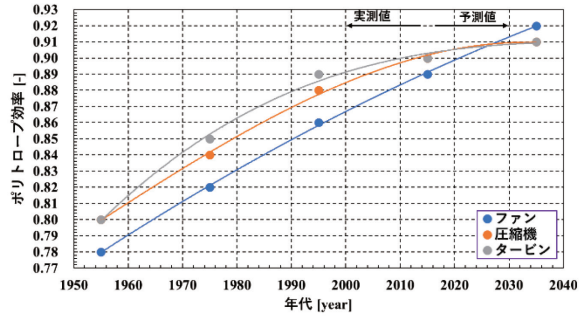


図 2　ファン圧縮機タービンのポリトロープ効率

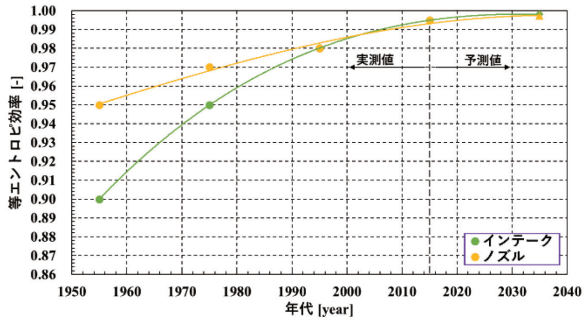


図 3　インテークとノズルの等エントロピ効率

2.9　Bleed 計算

Cooling bleed は，微小量ずつ混合するとして計算を行った．Cooling bleed の量については，図 4 の系にて，表 4 に示すタービン入口温度(**TIT**)の関数として計算を行った．

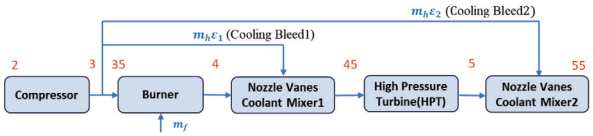


図 4　Cooling bleed の流れ

表 4　Cooling bleed の量と割合

Cooling bleed	$(0.03 \times \mathrm{TIT} - 35)/100$
ε_1	Coolingbleed × 0.75
ε_2	Coolingbleed × 0.25

2.10　検証結果

図 5 と表 5 にサイクルモデルの計算結果と実機データの比較を示す．図 5 をみると，推

力が小さいエンジンでは，推力の相対誤差が大きい．推力と SFC，それぞれの相対誤差は，目標値の 10%以内にほぼ収まった．

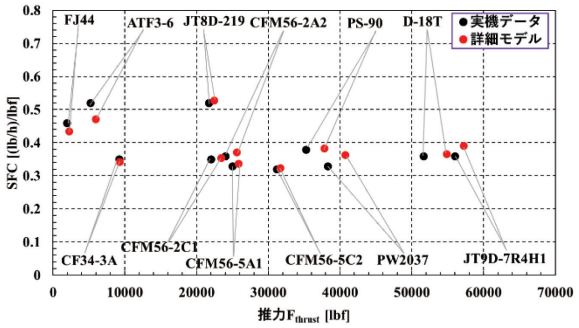


図 5　サイクルモデルの計算結果と実機データの比較

表 5　サイクルモデルの計算結果と実機データの比較

	実機データ		詳細モデル			
エンジン名	推力[lbf]	SFC[(lb/h)/lbf]	推力[lbf]	SFC[(lb/h)/lbf]	推力相対誤差	SFC相対誤差
CFM56-2C1	22000	0.35	23389	0.35	6.3%	1.2%
ATF3-6	5200	0.52	5918	0.47	13.8%	9.2%
D-18T	51660	0.36	54822	0.37	6.1%	1.8%
JT9D-7R4H1	56022	0.36	57188	0.39	2.1%	8.8%
PW2037	38250	0.33	40733	0.36	6.5%	10.2%
CFM56-2A2	24000	0.36	25614	0.37	6.7%	3.1%
JT8D-219	21700	0.52	22459	0.53	3.5%	1.7%
CFM56-5A1	25000	0.33	25853	0.34	3.4%	2.3%
CF34-3A	9220	0.35	9257	0.34	0.4%	1.9%
CFM56-5C2	31200	0.32	31678	0.32	1.5%	1.5%
FJ44	1900	0.46	2232	0.43	17.5%	5.5%
PS-90	35250	0.38	37761	0.38	7.1%	0.9%
平均					6.2%	4.0%

2.11　アンモニア燃料の燃焼ガス

アンモニア燃料が，理論燃空比燃焼に必要な空気の X 倍空気があるとき，化学反応式は以下のように書ける．

$$\mathrm{NH_3} + \frac{3}{4}X(\mathrm{O_2} + 3.714 \cdot \mathrm{N_2} + 0.048\mathrm{Ar}) \rightarrow \frac{3}{2}\mathrm{H_2O} + \left(\frac{11.142}{4}X + \frac{1}{2}\right)\mathrm{N_2} + \frac{3}{4}(X-1)\mathrm{O_2} + \frac{0.144}{4}X\mathrm{Ar} \tag{13}$$

式(10)と同様にして，アンモニア燃料の理論燃空比は，$\boldsymbol{f_{sto} = 0.1646}$ となる．

2.12　ケロシンとアンモニアの比較

ケロシンとアンモニアの特性値の比較を表 6 に示す．理論燃空比は，アンモニアが 2.43 倍大きく，低位発熱量は，ケロシンが 2.32 倍大きい．ケロシンと

アンモニアの燃焼ガスの組成を表 7 に示す．アンモニアの燃焼ガスでは，CO_2 は発生しない．ケロシンとアンモニアの推力と SFC を示す．第三章の妥当性検証に用いた，実機データのサイクルパラメータを変えずに，ケロシン燃料とアンモニア燃料の推力と SFC を計算した．比較すると，全てのアンモニアエンジンで SFC が大幅に悪くなっている．アンモニアでは，低位発熱量が低いため，多くの燃料が必要となり SFC が悪くなる．

表 6　ケロシンとアンモニアの特性値

		ケロシン	アンモニア
理論燃空比 [-]	fsto	0.0678	0.1646
低位発熱量 [kJ/kg]	Qnet	43200	18600

表 7　ケロシンとアンモニアの燃焼ガス組成

ケロシンの燃焼ガス			アンモニアの燃焼ガス		
名称	モル質量	割合	名称	モル質量	割合
N2	28.013	76.2%	N2	28.013	70.4%
H2O	18.015	4.6%	H2O	18.015	16.4%
CO2	44.010	4.6%	O2	31.999	12.2%
O2	31.999	13.5%	Ar	39.949	0.96%
Ar	39.949	1.00%			

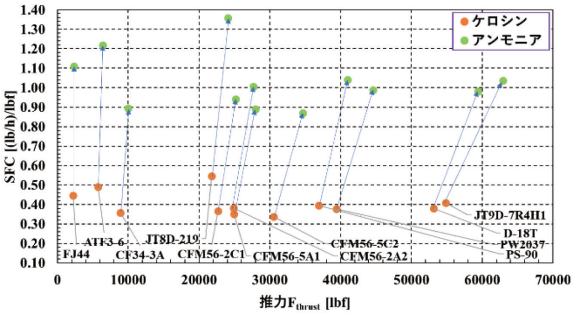


図 6　ケロシンとアンモニアの推力と SFC

次に，ケロシンとアンモニアの燃焼ガスの定圧比熱を比較した．ケロシン燃料とアンモニア燃料の燃焼ガスが，燃焼器出口から LPT 出口で取りうる定圧比熱の範囲を図 7 に示す．ケロシン燃料とアンモニア燃料では，燃焼ガスの組成が異なるため，定圧比熱も異なる．アンモニア燃料の定圧比熱は，ケロシン燃料の定圧比熱よりも大きい．

タービンや，圧縮機ファンでの仕事は，

$$W = mC_p\Delta T \tag{14}$$

と表され，流量と定圧比熱と温度変化の積で表される．アンモニアの燃焼ガスの定圧比熱は大きいので，タービンでの仕事を大きくできる．しかし，ケロシンとアンモニアでは，ファンと圧縮機の仕事は等しいため，タービンでの仕事も等しくなる．その結果，アンモニアでは，定圧比熱が大きい分，温度降下ΔTが小さくなり，コアの排気ノズルの入口温度が大きくなる．コアの排気ノズルの流速は，コアの排気ノズルの入口温度に比例するため，流速は速くなり，コアの排気ノズルでチョークして，音速に達する．そのため，地上でショックノイズ(騒音)が発生することで問題になる．

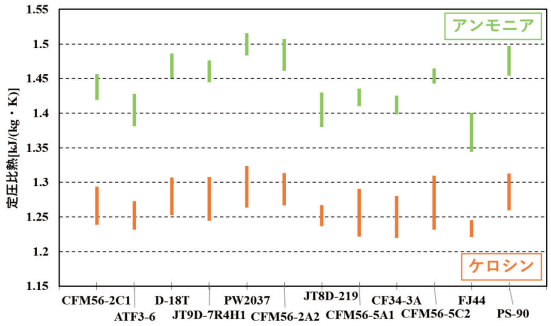


図 7　各燃料の燃焼ガスの定圧比熱

2.13　バイパス比の調整結果

コアノズルの圧力比が，臨界圧力比より大きくなると，チョークが発生して，ショックノイズにより騒音が大きくなる．図 8 に地上状態でのケロシンとアンモニアのコアノズルの圧力比を示す．ケロシン燃料とアンモニア燃料の臨界圧力比は，1.86 程度となった．アンモニア燃料では，全てのエンジンで，コアノズルの圧力比が，臨界圧力比よりも大きくなっており，チョークしていることが分かる．そのため，コアノズルの圧力比は臨界圧力比よりも小さくする必要がある．そこで，タービンでの仕事を増やすために，ケロシンのコアノズルの平均圧力比 1.6 になるように，BPR(バイパス比)を調整することとした．

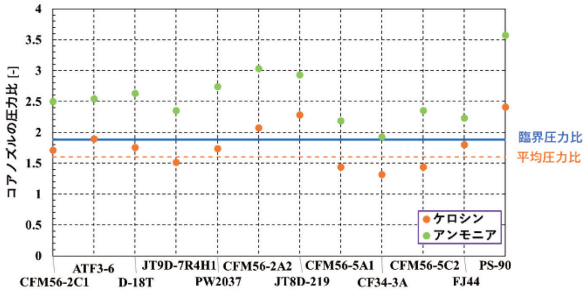


図 8　地上状態での各燃料のコアノズルの圧力比

図 9 と表 8 に，アンモニア燃料の BPR 調整前後とケロシンの計算結果の比較を示す．表 8 に示す BPR 調整係数により，BPR の調整を行った BPR を調整することで，SFC はかなり改善することが分かる．今回の場合は，BPR を調整することで，SFC を改善できた．アンモニア燃料に適したサイクルパラメータを選定することで，SFC を改善できる．

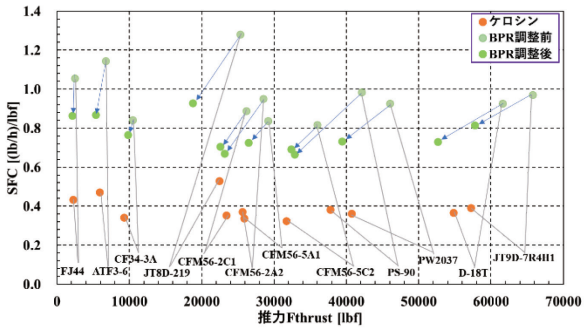


図 9　アンモニア燃料の BPR 調整前後の推力と SFC

表 8　アンモニア燃料の BPR 調整前後の推力と SFC

	ケロシン		アンモニアBPR調整なし		アンモニアBPR調整あり		
エンジン名	推力[lbf]	SFC[(lb/h)/lbf]	推力[lbf]	SFC[(lb/h)/lbf]	推力[lbf]	SFC[(lb/h)/lbf]	BPR調整係数
CFM56-2C1	23389	0.35	26154	0.89	22530	0.71	1.54
ATF3-6	5918	0.47	6717	1.14	5349	0.87	1.88
D-18T	54822	0.37	61580	0.93	52613	0.73	1.56
JT9D-7R4H1	57188	0.39	65756	0.97	57741	0.82	1.43
PW2037	40733	0.36	46041	0.93	39427	0.73	1.56
CFM56-2A2	25614	0.37	28538	0.95	23182	0.67	1.87
JT8D-219	22459	0.53	25336	1.28	18757	0.93	2.35
CFM56-5A1	25853	0.34	29196	0.84	26472	0.73	1.32
CF34-3A	9257	0.34	10444	0.84	9796	0.77	1.2
CFM56-5C2	31678	0.32	35961	0.82	32338	0.69	1.36
FJ44	2232	0.43	2451	1.06	2093	0.87	1.56
PS-90	37761	0.38	42093	0.98	32855	0.67	2.09

2.14　アンモニア燃料を用いたエンジンのパラメトリック解析

パラメトリック解析は, 4 つのサイクルパラメータ(TIT, OPR, FPR, BPR)の値があり, 値を振って SFC が最小となる点を最適点として選んだ．パラメトリック解析は，地上時と巡航時の 2 つの設計点で行った．パラメトリック解析を行う際，2 つの要求がある．

1 つ目の要求として，巡航時の SFC がある．表 1 に示したアンモニア航空機の要求がある．巡航時の SFC の要求は，先行研究で，2035 年に予想されるケロシンエンジンの巡航時の SFC と，ケロシン燃料とアンモニア燃料の低位発熱量が反比例の関係があるとして推算を行っている．

2 つ目の要求として，地上状態のコアの流速とバイパスの流速の比がある．コアでは，燃焼器を通り高温となった燃焼ガスが，タービンに仕事をして排出されるため，バイパスの流速より速い．そのため，コアの流速が，バイパスの流速より速い必要がある．また，地上状態では，エンジンからの排気流による騒音を抑える必要がある．コアから排出される高速の排気流とファン排気流との速度差が大きいと，せん断層が発達して乱流や渦を引き起こし，これに伴う圧力変動（音波）が増大して騒音が発生する．ジェット騒音の強度は速度差の 8 乗に比例するため，騒音を低減するにはコアとファンの排気速度差を抑えることが必要となる．地上状態の要求として，

$$\frac{C_7}{C_8} = \frac{\text{コアの流速}}{\text{バイパスの流速}} \geq 1 \tag{15}$$

となるように選ぶ.

上記に示した,この 2 つの要求を満たすような点の中で，巡航時の SFC が最小となる点を選び最適点とした.

2.15　パラメトリック解析の計算条件と計算範囲

表 9 にパラメトリック解析に用いた数値を示す．ファン，圧縮機，タービンのポリトロープ効率については，NASA の技術目標である，N+2[11]を用いた．これは，2020 年の技術目標であるが，2017 年時点では達成できていない．そのため，2035 年ではこの目標を達成することは可能と考え，計算に使用した.

表 9　パラメトリック解析に使用した数値

名称	記号	数値
ファンのポリトロープ効率	η_{pf}	0.97
圧縮機のポリトロープ効率	η_{pc}	0.91
HPTのポリトロープ効率	η_{pht}	0.90
LPTのポリトロープ効率	η_{plt}	0.92
インテークの等エントロピ効率	η_i	0.998
ノズルの等エントロピ効率	η_j	0.997
動力伝達効率	η_m	0.999
燃焼器の圧力比	π_b	0.960
燃焼器の燃焼効率	η_b	0.999

図 10 に，ケロシン燃料を用いた航空機エンジンのタービン入口温度(TIT)の変遷を示す．軍用機と比べて，民間機の TIT の変遷は緩やかに向上している．民間機の TIT の変遷を考えて，2035 年では，TIT＝1800 K ～2200 K と想定した．一般的に，TIT は高いほど，SFC は良くなるので，TIT＝2100 ,2200 を取り上げた．図中の赤色の星印が，パラメトリック解析を行った点である．図 11 に，ケロシン燃料を用いた航空機エンジンの全体圧力比(OPR)の変遷を示す．OPR は，年々上昇傾向があり，民間機全体のトレンドとしては，2035 年は OPR＝35～75 になると想定した．リージョナルジェット機は，各年代のトレンドは，中盤ぐらいにある．そのため，リージョナルジェット機の変遷を考えると，2035 年は OPR＝35～50 と想定した．一般的に，OPR は高いほど，SFC は良くなるので，民間機とリージョナルジェット機の 2035 年の最大値である OPR＝50, 75 を取り上げた．図中の赤色の星印が，パラメトリック解析を行った点である．図 12 に，ケロシン燃料を用いた航空機エンジンのバイパス比(BPR)の変遷を示す．BPR も年々上昇傾向がある．近年は，リージョナルジェット機でも，SFC をよくするため，高バイパス比化が行われている．アンモニアエンジンでは，燃焼ガスの定圧比熱が大きいので，ケロシンエンジンよりも BPR を大きくできるため，上限は設定しなかった．BPR は 7 以上とした．図 13 に，ケロシン燃料を用いた航空機エンジンの中で，ファンが 1 段で構成されている民間機のファン圧力比(FPR)の変遷を示す．民間機では，通常騒音低減のため，1 段のファンが用いられている．近年は，騒音規制のため，ファン圧力比は，臨界圧力比以下になるように設定されている．

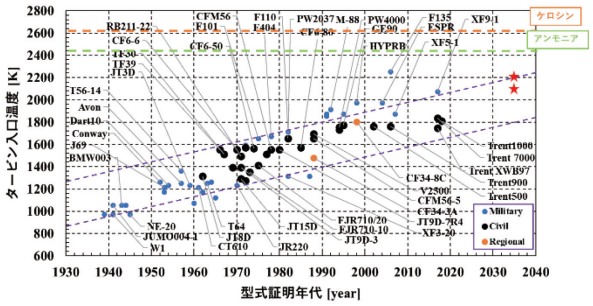


図 10　タービン入口温度(TIT)の変遷

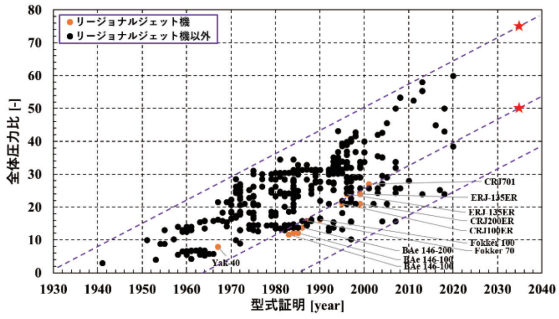


図 11　全体圧力比(OPR)の変遷

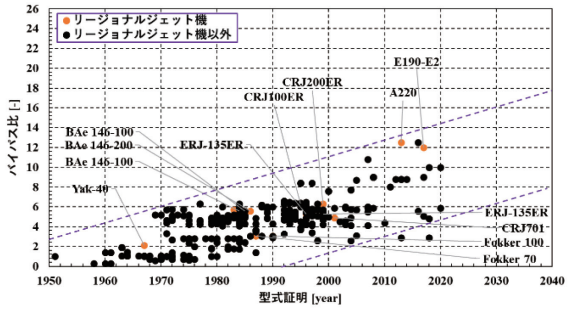


図 12　バイパス比(BPR)の変遷

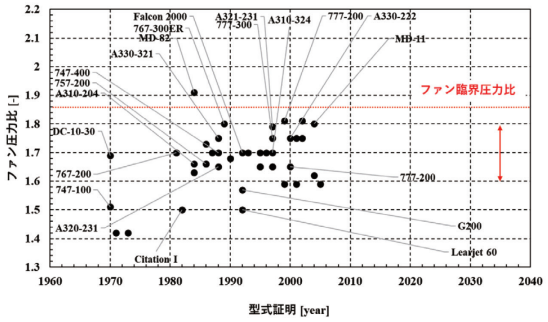


図 13　ファン圧力比(FPR)の変遷

2.16　パラメトリック解析の結果

パラメトリック解析は，2.14 に記載した要求を満たす点の中から，SFC が最小となる点を最適点として選んだ．SFC は，TIT と OPR が高いほど小さくなるため，(TIT, OPR) = (2100, 50), (2100, 75), (2200, 50), (2200, 75)の 4 つの条件を取り上げた．TIT は高いほど SFC は良くなるので，TIT = 2200 を選んだ．アンモニア航空機は，2 軸のターボファンエンジンを用いており，リージョナルジェット機を想定しているため，OPR = 50 を選んだ．この時の FPR ごとの巡航時の SFC を図 14 に示す．赤で色付けしてある点が要求をすべて満たす範囲である．●で示した点が SFC 最小となる点である．FPR = 1.6, BPR = 25.4 の時，SFC = 0.986 となり最小となり，要求から 10%低い結果となった．

(TIT, OPR, BPR, FPR) = (2200, 50, 25.4, 1.6)の最適点における，巡航時と地上時の SFC と比推力と当量比をまとめる．地上時の比推力から，表 1 に示した地上時の推力の要求 12500 lbf を満たすように，空気流量を計算すると，式(6)から

$$m = \frac{F}{F_s} = \frac{12500}{29.60} = 422.3\ [\mathrm{lb/s}] \tag{16}$$

となった.

図 15 に現在就航している航空機における，地上状態での比推力と空気流量のグラフに，アンモニアエンジンの最適点をプロットしたグラフを示す．これより比推力，空気流量のどちらもケロシンエンジンのリージョナルジェット機と，同程度であることが分かる.

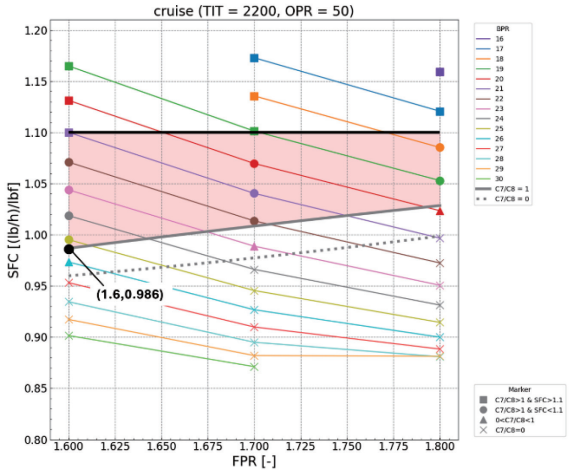


図 14　FPR ごとの巡航時の SFC

表 10　巡航時と地上時の性能

巡航時		
名称	数値	単位
SFC	0.986	(lb/h)/lbf
比推力	14.84	lbf/(lb/s)
当量比	0.944	-

地上時		
名称	数値	単位
SFC	0.456	(lb/h)/lbf
比推力	29.57	lbf/(lb/s)
当量比	0.87	-

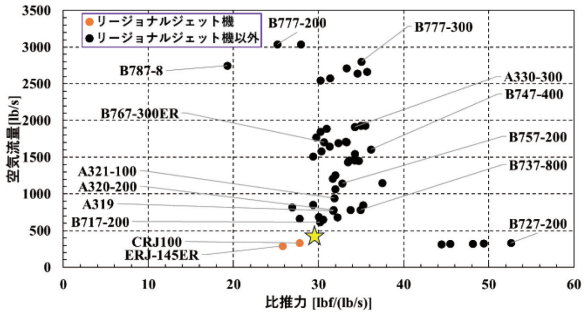


図 15　比推力の妥当性

3.　研究目標の達成状況

アンモニアの特性に起因するアンモニアターボファンエンジンの特徴，利点，欠点を見つけ出すことができた.

4.　まとめと今後の課題

本研究では，先行研究のアンモニア航空機の要求に基づき，アンモニアターボファンエン

ジンについて，熱力学的サイクルを計算することで，エンジンの実現性を検討するとともに，航空燃料としてのアンモニアの特徴を明らかにすることを目的とした．

サイクル計算のプログラムの妥当性検証のために，実機のエンジンデータと比較することで計算精度の妥当性を検証した．詳細モデルでは，定圧比熱を温度の関数，技術革新による要素効率の向上，Bleed を考慮した条件とした．詳細モデルでは，推力，SFC の相対誤差が，目標値の 10%以内にほぼ収まった．アンモニア燃料とケロシン燃料を用いて，妥当性検証で用いた実機データのサイクルパラメータを変えずに，サイクル計算を行い比較した．その結果，アンモニアエンジンでは，ケロシンエンジンよりも SFC が大幅に悪くなった．アンモニアの燃焼ガスの定圧比熱は，ケロシンの燃焼ガスの定圧比熱の方が大きくなる．定圧比熱が大きいとタービンでの仕事を増やすことができるため，BPR を大きくすることで，SFC を改善することができた．

次にアンモニア燃料でパラメトリック解析を行い，アンモニア航空機の要求を満たすエンジンについて検討を行った．要求として，巡航時の SFC が 1.1 以下であること，地上時のコアの流速とバイパスの流速の比が 1 以上であることの 2 つを満たし，2035 年の技術レベルで，達成できる最適な点を選んだ．リージョナルジェット機に搭載することを考え，SFC が最小となる点は，(TIT, OPR, BPR, FPR) = (2200, 50, 25.4, 1.6)と求まった．この点では，巡航時の SFC = 0.986 となり，SFC の要求を十分に満たす結果となった．また，アンモニアエンジンの空気流量と比推力は，ケロシン燃料のリージョナルジェット機と同程度である．

以上より，アンモニアの特性に起因するアンモニアターボファンエンジンの特徴，利点，欠点を見つけ出すことができた．アンモニアの燃焼ガスは，ケロシン燃料の燃焼ガスより，定圧比熱が大きいため，タービンでの仕事を大きくできる．そのため，アンモニアエンジンでは，コアを小さくすることができ，バイパス比を大きくできる．アンモニアは，ケロシンよりも低位発熱量が低いが，SFC に関しては，アンモニア燃料に適したサイクルパラメータを設定することで，低位発熱量ほどの差はないことが分かった．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

該当なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Tomoya Wada, Keigo Iijima, Daisuke Shimokuri, Akihiro Hayakawa, Hisashi Nakamura, Yohei Fujimoto and Shigeru Obayashi: Feasibility Study of Ammonia Fueled Commercial Aircraft, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-12, pp. 46-48.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

該当なし

6. 参考文献

[1] 経済産業省, “次世代航空機に向けた 研究開発・社会実装の方向性,” 2021. [Online]. Available: https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/001_06_00.pdf. (参照日 2024-01-25).

[2] ICAO, “Statement by the International Civil Aviation Organization (ICAO) at the

Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice Fifty-seventh session (SBSTA57),” 2022.
[3] NEWS ATLAS, “First ammonia-powered jet flight in 2023: A roadmap to clean aviation, ” 2022. [Online]. Available: https://newatlas.com/aircraft/aviation-h2-ammonia-fuel-jet-aircraft/.(参照日 2024-01-27).
[4] ARPAE, “Zero-carbon Ammonia-Powered Turboelectric (ZAPTurbo) Propulsion System,” 2024. [Online]. Available: https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/search-all-projects/zero-carbon-ammonia-powered-turboelectric-zapturbo-propulsion-system.(参照日 2024-01-27).
[5] 飯島啓吾, “アンモニア民間旅客機の機体成立性に関する研究, ” 修士論文, 東北大学, 2024.
[6] HIH Saravanamuttoo et al., “ガスタービンの基礎と応用: 発電用からジェットエンジンまで,” 東海大学出版会, 東京, 2012.
[7] Élodie Roux, “Turbofan and Turbojet Engines: Database Handbook,” Elodie Roux, 2007.
[8] Bonnie J. McBride et al., “Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species,” NASA-TM-4513, 1993.
[9] HIH Saravanamuttoo et al, “Gas Turbine Theory seventh edition,” Pearson, London, 2017.
[10] Jack D. Mattingly et al., “Aircraft Engine Design Third Edition,” AIAA, Reston, 2018.
[11] H. Kobayashi et al., “Science and technology of ammonia combustion,” Proceedings of the Combustion Institute 37, pp. 109–133, 2019.

課題番号	J24I028
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	3 年目

直交格子による超音速／極超音速下における熱流束予測

Numerical Prediction of Heat Flux of Cartesian Mesh CFD in Supersonic/Hypersonic Flows

佐々木 大輔*†，大林　茂**††
小川 秦一郎*，中山　悠*，森合 秀樹***，吉永 翔哉***，高橋　俊****，焼野 藍子**
*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
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

近年，民間の宇宙船による宇宙飛行に成功する等，宇宙ビジネスに注目が集まっている．宇宙旅行をより身近にすることが期待される宇宙往還機等では，衝撃波に伴う熱流束の予測が不可欠であり，CFD における精度良い推算が求められている．近年注目を集めている直交格子法は，実機等の複雑形状に対して容易に解析を実施することが可能であるが，熱流束の予測精度は実用レベルに達しているとは言い難い．そこで，本公募共同研究では，超音速／極超音速流れ下における熱流束予測精度の向上を目的として，埋め込み境界法の改良を図る．具体的な解析対象として，円柱とくさび型から生じる衝撃波背後の熱流束を推算し，構造格子による解析結果との比較を通して妥当性を明らかにする．

2. 研究成果の内容

本研究では，直交格子法における超音速流れの熱流束の予測精度を向上させるために，埋め込み境界法の開発と改良を行ってきた．2 年目までの研究により，くさび型と円柱を対象とした超音速流の解析を行い，妥当性の検証を行ってきた．これまでの研究では圧力等は，構造格子の解析（BFC）とよく一致する一方，表面熱流束予測に関しては更なる改善が必要とされていた．今年度は，熱流束解析にかかる解析時間の短縮を目的として，くさび背後の後流部分を除いた解析を実施した．その結果，図 1 に示すように物体近傍の温度分布は，後流部分の有無にかかわらず一致する結果を得た．また，後流の速度の遅い領域がないこともあって CFL 数を大きくすることが可能となったことにより，解析時間も大きく短縮することができた．

また，表面熱流束予測に関しては，物体近傍の取り扱いの改善を図ると共に，後処理法の改善を図った．その結果，円柱まわりの超音速流れにおいて，図 2 に示すように直交格子法の解析結果と BFC の解析結果がよく一致するようになった．ただ，BFC の解析に比較して，予測値に振動も確認できることから，更なる改良の余地がある．

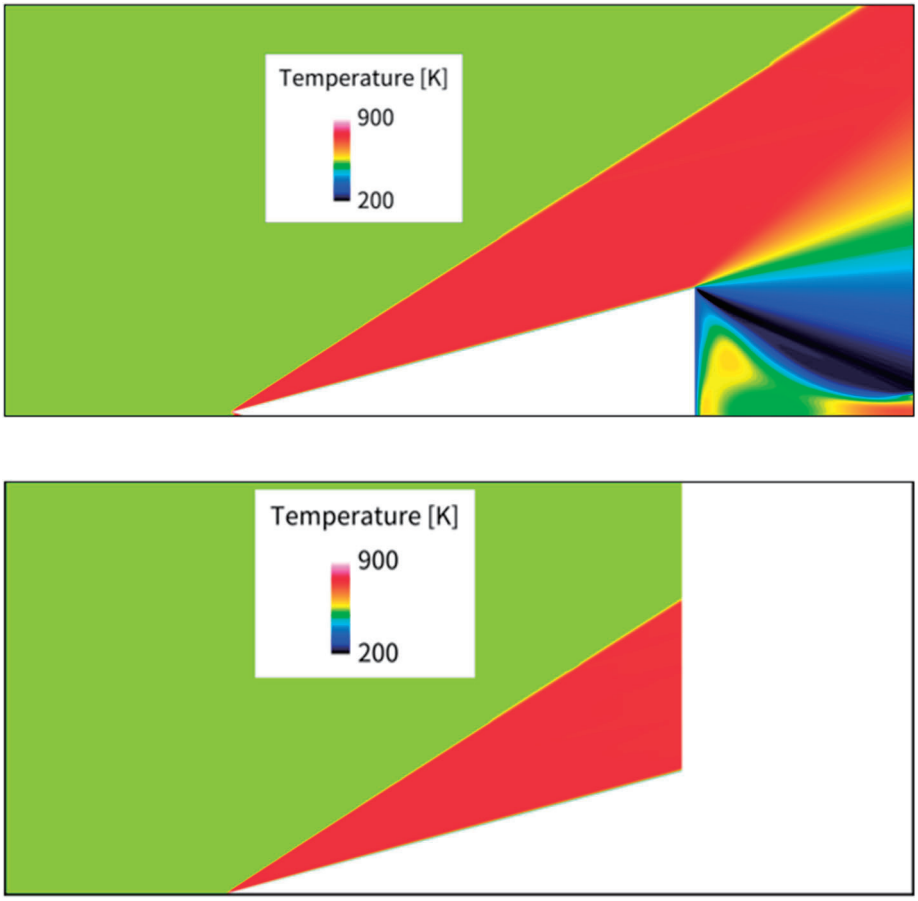


図 1：温度コンターの比較（上図：後流含む解析，下図：後流無し解析）

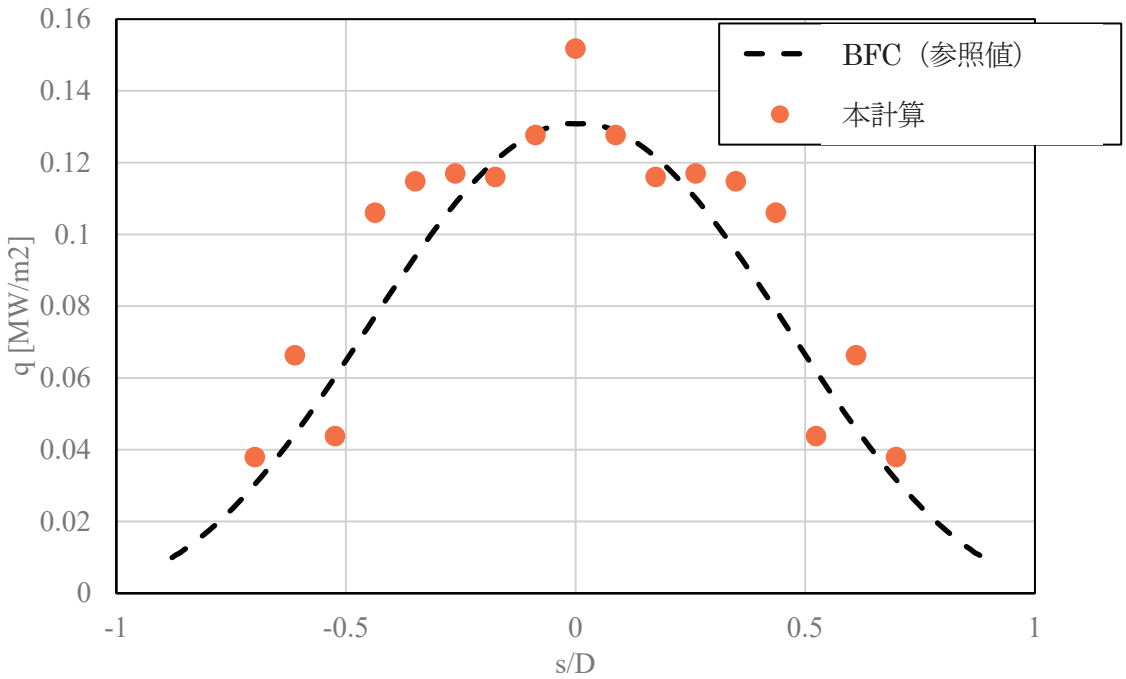


図 2：表面熱流束分布の比較

3. 研究目標の達成状況

当初予定では，実用的な熱流束解析問題に対して直交格子法が適用可能であることを示す予定であったが，熱流束の予測精度の改善に時間がかかってしまい，その問題に取り組むことができなかった．しかし，後流域を含まない解析による解析速度の高速化，後処理法等の変更による表面熱流束予測精度の向上により，本手法の実用性向上を図ることができた．

4. まとめと今後の課題

本研究では，くさび型周りの超音速流解析に後流域を含まないことで，解析速度の高速化を諮ることができた．また，円柱まわりの超音速流解析において，手法の改善を図ったことで，表面熱流束予測精度を向上させることができた．今後，複数衝撃波の干渉を伴う超音速流れを対象とした熱流束解析を実施し，その有効性を示すことで，本手法の実用性を高めることが可能である．

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. Sasaki, M. Yukimitsu, S. Ogawa, S. Yoshinaga, H. Moriai, S. Takahashi, A. Yakeno, S. Obayashi: Study on Heat Flux Prediction Method for Cartesian-Mesh CFD under Supersonic Flows, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-76, pp. 213-214.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J24I029
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	3 年目

火星飛行機実現に向けた柔軟膜翼の数値的・実験的研究

Computational and Experimental Study of Unsteady Flowfield around Flexible-Membrane Wing at Low Reynolds Number toward Mars Airplane

佐々木 大輔*†，永井 大樹**††
大崎 歩乃花*，近本 悠真*，船田 光星*，藤田 昂志***，高橋　俊****，川本 裕樹*****
伊神　翼**，大川 真生**，倉橋 晴香**
*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，機体重量の削減が可能な柔軟膜翼を主翼に用いた火星飛行機が提案されている．先行研究では，柔軟膜翼を用いた翼では膜の変形を積極的に利用することで最大揚力，最大揚抗比が向上することが報告されている．しかし，柔軟膜翼では，翼面上の非定常流れ場に応じて膜が振動するため，翼周りの非定常流れ場を理解することが重要である．本公募共同研究では，実験（PIV）による柔軟膜翼の変位と非定常流れ場を調査し，その変位を流体・構造連成解析により再現することで，柔軟膜翼周りの非定常流れ場の詳細を明らかにすることを目的としている．

2. 研究成果の内容

初年度は強制変位を与えた CFD 解析を実施し，平板との比較を行った．強制変位の場合，上下面の両面を振動させることで，揚力が向上することを示した．2 年目は，本手法を発展させて，流体・構造連成解析への拡張を行い，柔軟膜翼と剛体翼の比較を行った．今年度，柔軟膜翼の解析手法において，構造解析に使用する粒子数を変化させて，流体・構造連成解析を実施した．解析条件は，レイノルズ数 10,000，迎角 4.5 度であり，粒子数を 3 点，9 点，15 点と変化させた解析を実施した．図 1 は，粒子数が 3 点と 9 点の場合の平均圧力コンター図である．この図より，粒子数が 9 点の場合，柔軟膜翼が滑らかに表現されていることが分かる．実際，図 2 に示す平均表面圧力係数分布を比較すると，粒子数が 3 点の場合は，25%コード長付近に圧力の不連続が確認できる．一方，粒子数を増やした解析では，そのような不連続が見られない．更に，柔軟膜翼の変位量を比較すると，粒子数 3 点の最大変位位置も粒子数 9 点以上の場合と大きく異なっている．これらのことから，9 点以上の粒子数を設定することで，実用的な柔軟膜翼の解析が可能であると結論づけた．

本解析手法を用いて，風洞実験と同様の解析条件を設定し，柔軟膜翼の解析を行った．実験では柔軟膜翼の振動が確認できるのに対し，解析では安定性を向上させるために振動が生じないような設定になっているため，実験の再現にはまだ至っていない．

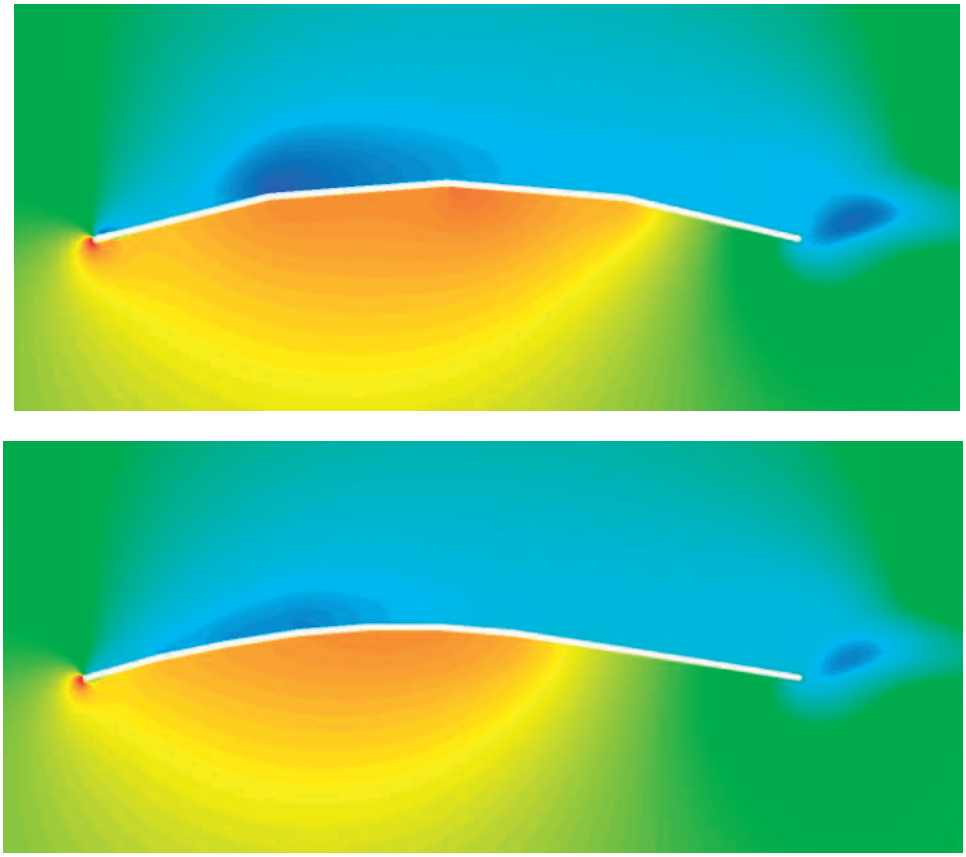


図 1：平均圧力コンター図（上図：粒子数 3 点，下図：粒子数 9 点）

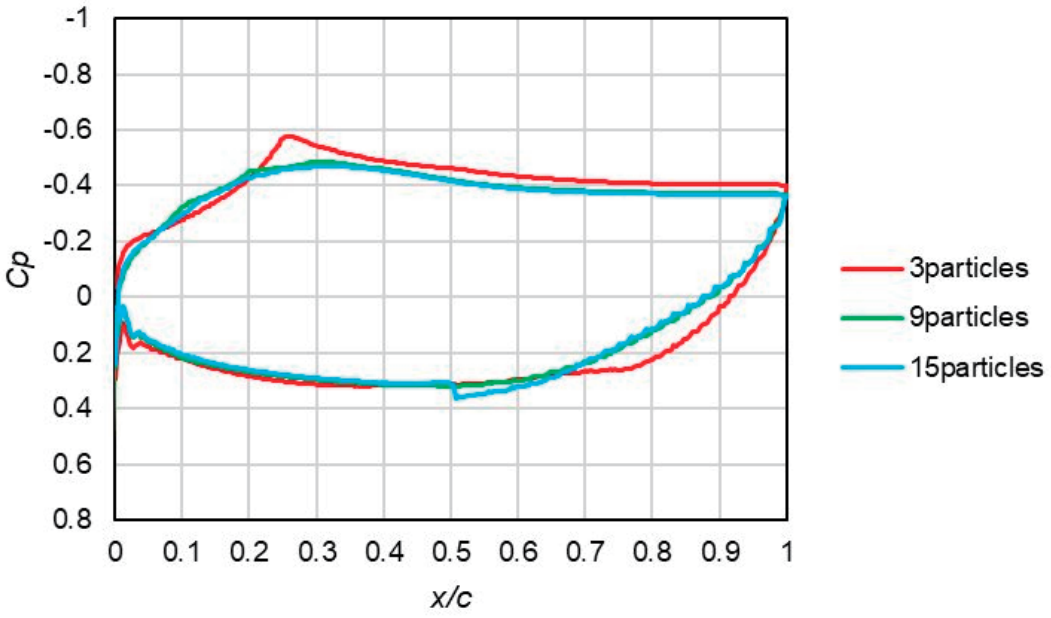


図 2：平均表面圧力係数分布の比較

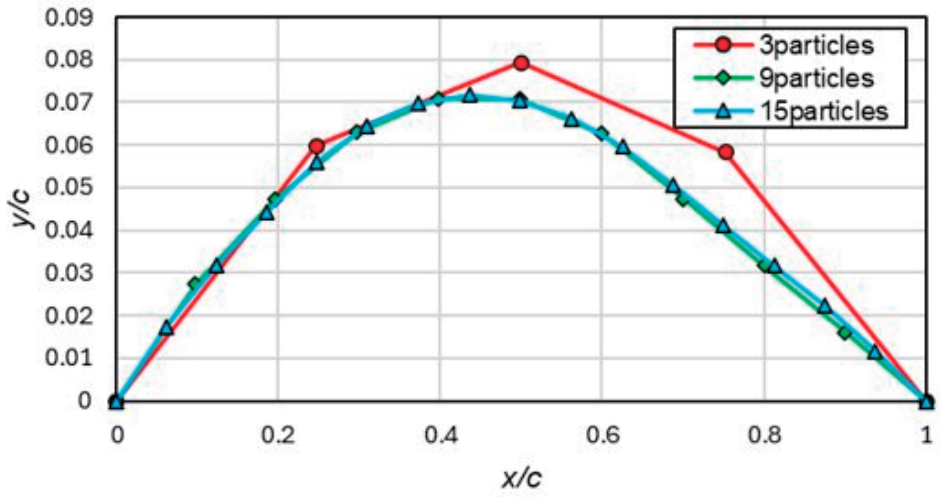


図 3：柔軟膜翼の変形量の比較

3. 研究目標の達成状況

本研究では，柔軟膜翼周りの非定常流れ場を数値解析により解析し，粒子数を増やすことで滑らかな形状表現が可能であることを示した．そこで，風洞実験の諸条件を再現した解析を実施した．風洞実験では，柔軟膜翼の振動が生じているが，数値解析では解析の安定性を高めた解析条件のために振動を再現することはできず，柔軟膜翼の動的空力特性を明らかにするには至っていない．

4. まとめと今後の課題

本公募共同研究では，直交格子法に基づく非定常流体構造連成解析手法を構築し，柔軟膜翼の滑らかな変形を解析することが可能となった．風洞実験との妥当性を検証し，柔軟膜翼に生じる流れ場の詳細を再現するためには，風洞実験において柔軟膜翼に生じる振動を再現できる設定が必要である．そのためには，現在の解析手法を拡張することが必要である．

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] K. Funada, H. Osaki, Y. Chikamoto, D. Sasaki, Y. Kawamoto, S. Takahashi, K. Fujita, H. Kurahashi, M. Okawa, T. Ikami, H. Nagai: Fluid-Structure Interaction Analysis of Flexible-membrane Wing at Low Reynolds Number, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), OS23-29, pp. 1351-1353.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J24I030
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Statistical Learning Approaches for Data Mining in Multi-objective Aerodynamic Design Optimization

Pramudita Satria Palar*†, Lavi Rizki Zuhal*, Koji Shimoyama**
Shigeru Obayashi***††
*Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Bandung Institute of Technology
**Department of Mechanical Engineering, Kyushu University
***Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

By systematically evaluating trade-offs and optimizing aerodynamic designs with multiple objectives, engineers can reduce resource consumption and ensure the long-term viability of their projects. This research endeavours to bridge the existing gap in methodologies and offer a comprehensive framework for multi-objective design space analysis, empowering engineers and researchers to create innovative aerodynamic designs. Analysis of multi-objective design space is essential so that engineers can effectively and easily extract important design insights useful for complex design endeavours. However, there is still a lack of research and methodology that can be readily used for such purposes. To that end, this research aims to develop data mining tools based on statistical learning that can handle multiple objectives frequently encountered in aerodynamic design optimization; these methods are expected to produce novel insight that cannot be extracted through conventional data mining methods alone.

2. Details of program implement

The project focuses on the development of two methods from the realm of explainable machine learning: partial dependence plot (PDP) and individual conditional expectation (ICE). The ultimate goal is to take the advantage of PDP and ICE to extract useful information from a surrogate model applied to the aerodynamic database. To that end, we use a database comprises of hundreds airfoils parameterized from the Class-Shape Transformation (CST) parameterization (see Figure 1), evaluated using Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) solver.

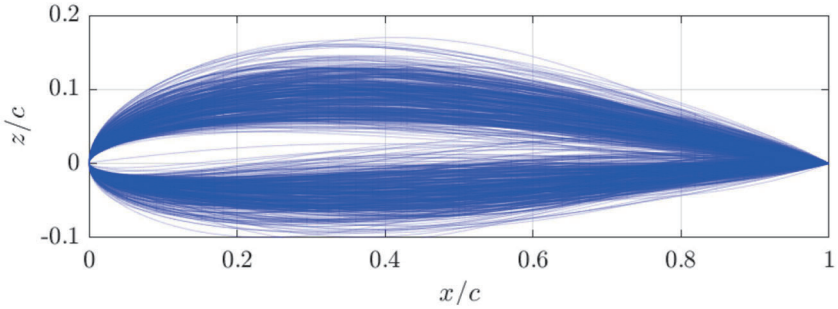


Figure 1: Samples of low-speed airfoils generated from the CST parameterization.

Some examples of results are shown in Figure 2. In this plot, one can investigate how the change in the CST coefficients affects the aerodynamic drag. This way, it is possible to see the global sensitivity of drag on the CST coefficients. Also, this plot makes it possible to analyze whether increasing a certain geometric parameter would lead to the increase or decrease in aerodynamic performance. Similarly, similar plots were also created for the lift-to-drag ratio.

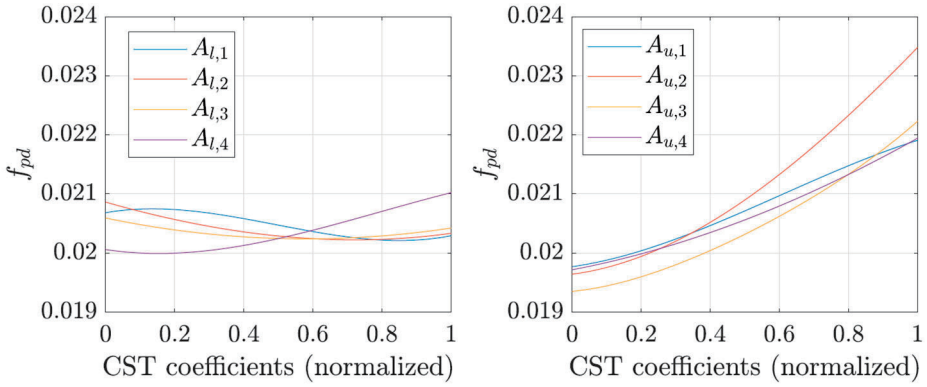


Figure 2: Examples of the partial dependence plots extracted from the polynomial chaos surrogate model applied to the airfoil database problem.

The outcome of this research has been published in the ICFD 2024 Proceeding and also AIAA Scitech 2025 conference (see research results).

3. Achievements

The research has successfully developed statistical learning methods based on partial dependence plots and individual conditional expectations for design exploration in aerodynamic design. The two methods are implemented together with the polynomial chaos expansion and Gaussian Process surrogate model, in which they are capable of revealing the complexity of the functions. In particular, both methods highlight and visualize the individual impact of input variables and interactions on aerodynamic performances.

4. Summaries and future plans

This research project aims to create a set of tools that aids aerodynamic engineers to visualize the input-output relationship in aerodynamic design. To that end, PDP and ICE were used as tools to explain and visualize such relationship. Future work could explore applications to other aerodynamic databases generated using alternative parameterization methods (e.g., B-splines or PARSEC). Comparing these parameterization techniques would provide valuable insights into the complexity of aerodynamic responses as influenced by different geometric parameterization methods. Furthermore, in terms of explainability methods, there is a need to perform comparison with other methods such as SHAP and accumulated local effects, to assess their respective strengths and weaknesses. This comparison will help establish useful guidelines for selecting and applying explainability methods effectively.

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] P. S. Palar, Lavi Rizki Zuhal, K. Shimoyama, and S. Obayashi, *AIAA SCITECH 2025 Forum, (2025)*, pp. 2808.

[2] P. S. Palar, Lavi Rizki Zuhal, K. Shimoyama, and S. Obayashi, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-57, pp. 158-161.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J24I031
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学
研究期間	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	1 年目（発展）

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*†，長田 孝二**，渡邊 智昭**
Zhou Yi***，服部 祐司****††
*名古屋大学大学院工学研究科，**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

強い非平衡性を有する現象のひとつとして非圧縮一様等方性乱流中を伝播する弱い垂直衝撃波の大規模数値計算を実施し，乱流との干渉による垂直衝撃波の変形と周辺流れ場の関係に着目した．乱流中を伝播する衝撃波の変形には乱流の速度変動のほか，衝撃波面での局所的な衝撃波強度変動が関わっていると考えられる．

局所形状の最大曲率κ_1及び最小曲率κ_2から平均曲率$H=(\kappa_1+\kappa_2)/2$とガウス曲率$K=\kappa_1\kappa_2$を計算した．HとKの値によって，変形した衝撃波の局所形状を次の四種類に分類した．$H>0, K>0$のとき局所形状は楕円凹面であり，$H<0, K>0$では楕円凸面，$H>0, K<0$で鞍状凹面，$H<0, K<0$で鞍状凸面となる．速度場に対して Helmholtz 分解を実施して乱流の速度変動成分に対応する solenoidal 成分u_sと衝撃波背後の誘起速度成分に対応する dilatational 成分u_dに分解した．

ここでは dilatational 成分u_dに着目し，u_dの接線方向速度勾配$\partial u_d/\partial\alpha=\Theta_\alpha$ $(\alpha=t1,t2)$

と局所形状を関連付けて解析した．t_1方向は最大曲率κ_1に対応する方向であり，t_2方向は最小曲率κ_2に対応する方向である．局所形状の指標である(H,K)で条件付けたΘ_αの条件付き平均$\langle\Theta_\alpha|H,K\rangle$について，$\Theta_\alpha$の平均値$\langle\Theta_\alpha\rangle$からの偏差$\langle\Theta_\alpha|H,K\rangle-\langle\Theta_\alpha\rangle$によって局所形状と$u_d$の接線方向勾配の関係を評価した．図１に変動 rms 値で標準化した偏差を$H-K$平面に可視化した結果を示す．図 1(a)がκ_1に対応するt_1方向の分布であり，楕円凸面でのみ偏差が正となり他の形状では負の値をとることがわかる．対して図 1(b)がκ_2に対応するt_2方向の分布であり，楕円凹面でのみ負となり他の形状では正の値を取ることがわかる．

圧力の輸送方程式における圧力ー速度勾配相関項が流体の圧縮・膨張を表すことから，ある方向の速度勾配の正負と流体の圧縮・膨張は対応すると考えられる．衝撃波面の局所形状は接線方向に流体が圧縮するとその方向に凹形状となり，流体が膨張するとその方向に凸形状となることが明らかになった．

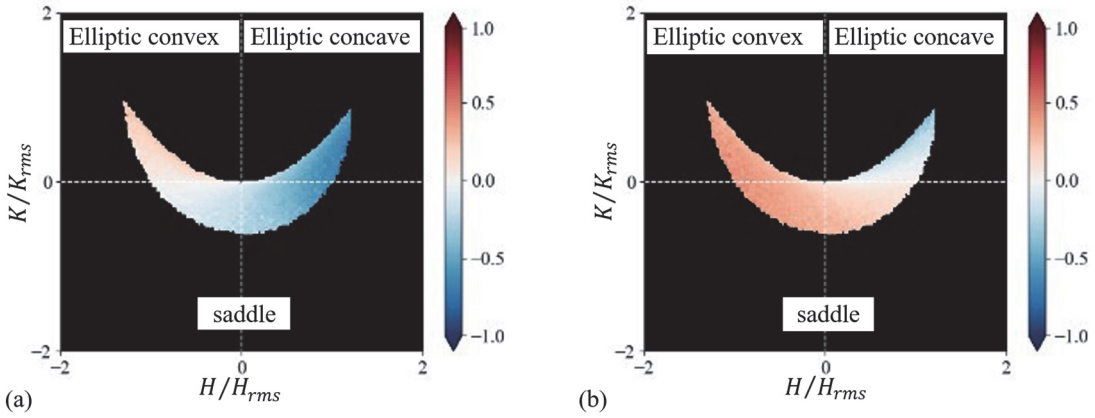


図１：変動 rms 値で標準化したu_dのα方向勾配の(H,K)条件つき平均の全体平均からの偏差$(\langle\Theta_\alpha|H,K\rangle-\langle\Theta_\alpha\rangle)/\Theta_{\alpha_{rms}}$．　(a) κ_1に対応する接線方向$\alpha=t_1$，　(b) κ_2に対応する接線方向$\alpha=t_2$．

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１年目である本年度は，上記の圧縮性流れに対する研究に加えて，これまで行ってきた物体後流流れに関する研究も発展させた．以上のことから，研究はおおむね順調に進捗していると言える．

4. まとめと今後の課題

次年度は，上記の流れ場に加えてせん断乱流場を対象とするほか，スカラ輸送に及ぼす非平衡性の影響についても取り組む予定である．特徴的/特異的な流れ場と平衡性/非平衡性との関連について，今後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）

[1] Y. Xie, X. Zhang, X. Xiong, Y. Zhou*, Temporal evolution of the turbulence interface of a turbulent plane jet, *Journal of Fluid Mechanics*. 1001, A39, 2024.

[2] S. C. Tao, Y. Xie, X. T. Shi, and Y. Zhou*, Detection of the irrotational boundary using machine learning methods, *Physics of Fluids*. 36, 075101, 2024.

[3] J. Xing, T. Watanabe, and K. Nagata, Hybrid large eddy simulation and Lagrangian

simulation of a compressible turbulent planar jet with a chemical reaction, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 96, pp. 962-990, 2024.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[4] A. Kusuhata, K. Tanaka, T. Watanabe, K. Nagata, Y. Ito, Y. Hattori, The Behavior of Local Geometries of Shock Wave Surfaces Propagating in Turbulent Flow, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-8, pp. 33-35.

[5] Muyang Wang, Yasumasa Ito, Yasuhiko Sakai, The Modulating Effect of Coherent Structures on Inter-scale Energy Transfer in Turbulent Mixing Layer, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, pp.1012, 2024.

[6] A. Kusuhata, K. Tanaka, T. Watanabe, K. Nagata, and A. Sasoh, Solenoidal and dilatational velocity statistics for a planar shock wave propagating in turbulence, *The 34th International Symposium on Transport Phenomena*, 4 pages, 2024, Taoyuan, Taiwan.

[7] Y. Nishimoto, T. Watanabe, and K. Nagata, Local dissipation scaling in temporally developing grid turbulence, *The 34th International Symposium on Transport Phenomena*, 4 pages, 2024, Taoyuan, Taiwan.

[8] Y. Xie, K. Nagata, and Y. Zhou, Connecting the temporal evolution of the turbulence interface to the entrainment and detrainment in a turbulent plane jet, IUTAM bookseries (J. Wang and I. Marusic eds.), *Proc of the IUTAM Symposium on Turbulent/non-turbulent interface in turbulent shear flow*, 174-181, 2024, Beijing, China.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J24I032
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

Study on Micro-scale Evaporation for Heat Transfer Enhancement

Junnosuke Okajima*†, Naka Yutaro*, 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.

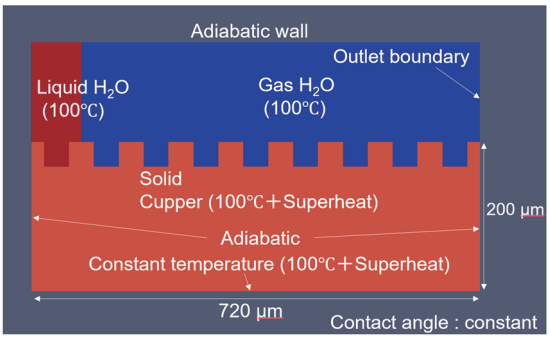
2. Details of program implement

This year, we numerically investigated the cooling performance of evaporative heat transfer on a structured surface. We developed a numerical model to simulate the interface deformation and its evaporation by OpenFOAM, as shown in Fig. 1(a). It is a three-dimensional structure that consists of fluid and solid regions. The rectangular blocks with 40 μm of side length were regularly allocated on the solid surface with a 40 μm pitch. Initially, the liquid column was located on the right side of the calculation domain. This numerical model can evaluate time variation of interface shape and the local evaporative mass flux on the structured surface as shown in Fig.1(b). In addition, the influence of contact angle in total evaporative mass was also evaluated as shown in Fig. 1(c). The smaller contact angle has better evaporative heat transfer because it makes thinner liquid layer in the structure.

In addition, to simulate the phenomenon inside vapor chamber, we are going to develop the numerical model to calculate the steady-state evaporative meniscus. By adjusting the inlet liquid velocity and wall temperature, the steady-state condition of evaporative meniscus can be found. Through this simulation, the dryout characteristics in vapor chamber will be evaluated. In parallel, availability of our numerical model to more complex structures is also evaluated.

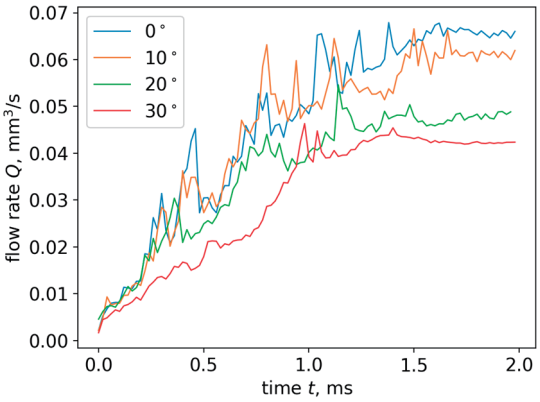
3. Achievements

The obtained results contribute to modeling macroscopic wetting behavior and heat transfer on the micro-structured surface. 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.

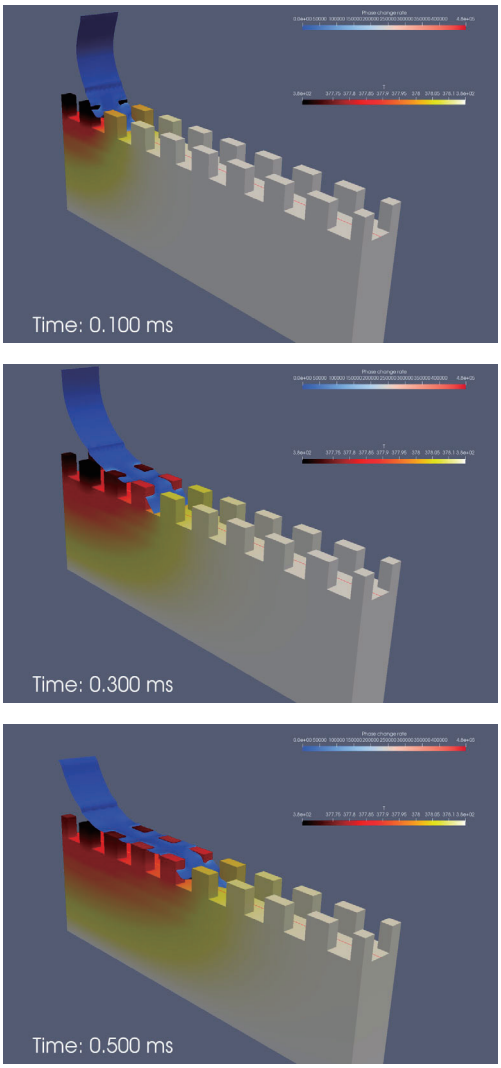


Structure size: half cube of 40 x 40 x 40 μm

(a) Calculation model



(c) Time variation of evaporation mass flow rate for various contact angle



(b) Snapshot of interface shape and temperature distribution of wall

Figure 1: Calculation results of evaporation phenomena on microstructure.

4. Summaries and future plans

Currently, we collaborate with the numerical simulation of nucleate boiling and evaporation in microstructure. 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 in the future. Thus, our new simulation results provide new insight for understanding the evaporation phenomena in micro-scale. Additionally, the student interaction is also planned. 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.

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] 中裕太郎, H. Sontheimer, T. Gambaryan-Roisman, P. Stephan, and 岡島淳之介: 微細構造体での蒸発と気液界面進展の数値シミュレーション, 日本伝熱学会東北支部第24回学生発表会講演論文集, (2024), 講演 1.

[2] 石橋輝, 大田光希, P. Stephan, 岡島淳之介: 数値シミュレーションによるプール核沸騰におけるミクロ液膜形成過程の評価, 第 61 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2024), E312.

[3] J. Okajima, Y. Naka, H. Sontheimer, T. Gambaryan-Roisman, and P. Stephan: Study on Micro-scale Evaporation for Heat Transfer Enhancement, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2024), CRF-32, pp. 101-102.

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

Project code	J24I033
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd 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
†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.

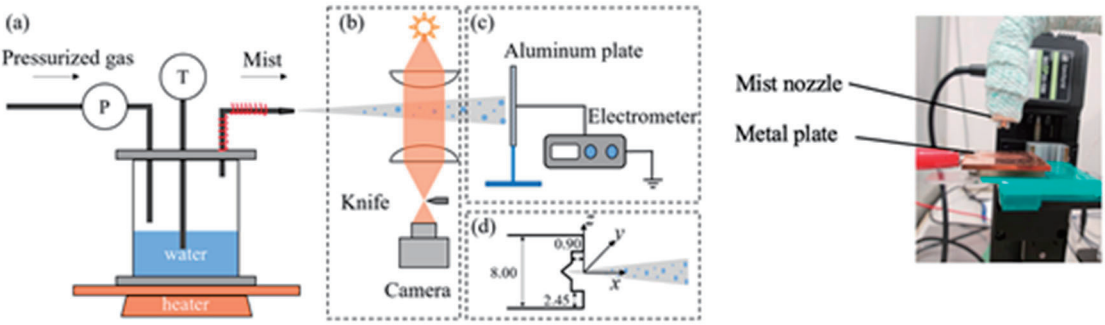


Figure 1. Sketch of the mist system [11] (left) and the photograph (right).

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.

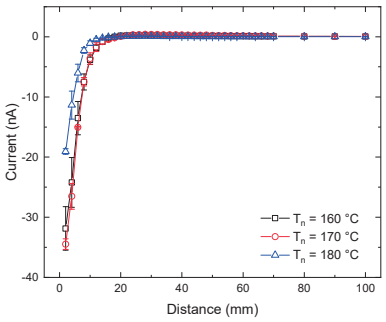


Fig. 2 The electrical current as a function of distance at T_n = 160, 170, 180 ℃

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.

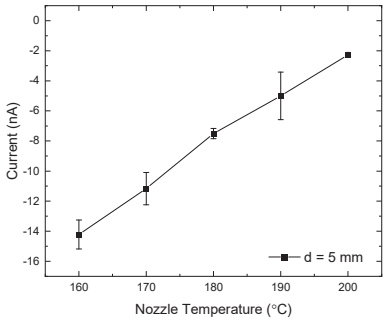


Fig. 3 The electrical current as a function of nozzle temperature at d = 5 mm

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)
Not applicable

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

[1] J.-S. Lee, Y.-C. Cheng, T. Okuma, S Liu, T. Nakajima, and T. Sato, "Charging Phenomenon of the High-speed Nanodroplets." *The 17th International Conference on Electrostatic Precipitation (ICESP)*, Kyoto, Japan, October 28th-31st, 2024 (Oral presentation)

[2] J.-S. Lee, Y.-C. Cheng, S Liu, T. Nakajima, and T. Sato, "Electric Current Measurement of Nanodroplets Generated by Condensation of Water Vapor with High-speed Flow." *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-46, pp. 133-134.

[3] J.-S. Lee, Y.-C. Cheng, S Liu, T. Nakajima, and T. Sato, "Current Induced by High-speed Nanodroplets Impinging on Copper Plate." *The 8th Japan-Taiwan Workshop on Plasma Leading Science and Technology (8th JTPL 2024)*, Muroran, Japan, December 13th-15th, 2024 (JTPL poster presentation)

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) JTPL2024 Excellent Poster Presentation Award, Jiun-Shian Lee, December 15, 2024, Muroran Institute of Technology

(Press release) Not applicable

課題番号	J24I034
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	1 年目

乱流渦における渦流と渦線バンドル束の相互作用による 3 次元渦構造形成に関する解析

An Analysis of Self-organization of Three Dimensional Turbulent Vortical Structure Derived from Interaction between Vortical Flow and Bundle of Vorticity Lines

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，乱流渦における渦流と渦線バンドル束のトポロジー(幾何)の相互作用により形成される 3 次元の渦構造のメカニズムとして，渦線バンドル束のトポロジーが渦流における軸流の発生を定める特性があることを数理的考察並びに一様等方性乱流のシミュレーション，統計解析により明らかにする．また，渦コア領域中の圧力場の渦流形成への影響を解析する．この研究では，渦流という速度場と渦線の流れという渦度ベクトル場の二つの流れに着目し，これらに存在する相互作用により 3 次元の渦構造が形成される，という視点で渦のメカニズムの解明を狙い，渦形成の根本的な性質の解明に寄与するものである．

乱流渦また様々な流動分野の流れで発生する渦は，気象・海洋等の環境の他，発電や航空・宇宙或いは化学装置等に至る非常に広範囲な分野に関わり，流れの特性や製品・施設の性能や信頼性に大きく影響する．渦度ベクトル・渦線バンドル束は渦領域や渦軸の同定に用いられるが，渦中心領域では渦伸長作用により渦状のトポロジーになることが理論と流動解析により示され (Nakayama, Doi and Hattori, ICFD2020(AFI2020))，更にその作用は渦線自身のトポロジーにより変化し，様々な渦流のパターンになることが示された．また，乱流渦の 3 次元渦流が渦伸長を通して渦線バンドル束のトポロジーに作用する一方で，逆に渦線バンドル束が渦流の軸流の生成に影響していることが示され(Nakayama, Uchima and Hattori, ICFD2023 (AFI2023))，この相互作用的な渦構造形成の究明が渦の 3 次元渦構造のメカニズム解明に寄与すると共に，様々な分野における渦の基本的な特性の知見や制御に貢献すると考えられる．

本研究では，ローカルトポロジーが定める旋回平面に基づく渦空間座標系において渦線バンドル束の旋回平面での旋回と軸流に関する理論検討を行い，一様等方性乱流の Direct Numerical Simulation (DNS)において乱流渦中の渦流と渦線バンドル束の相互作用による軸流の特性について解析を行う．

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 の空間に関する導関数，ヘシアンからこれの極大点を求めて渦中心とし，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，本平面を通過する渦線バンドル束を同定し，その幾何学的特性を特定して渦構造の解析を行った．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

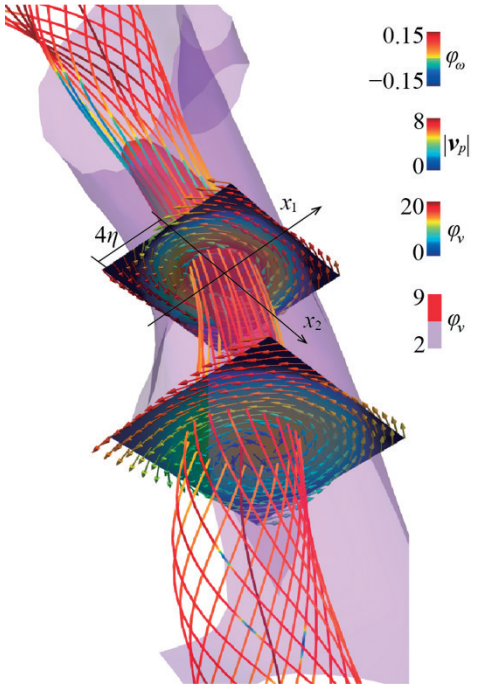


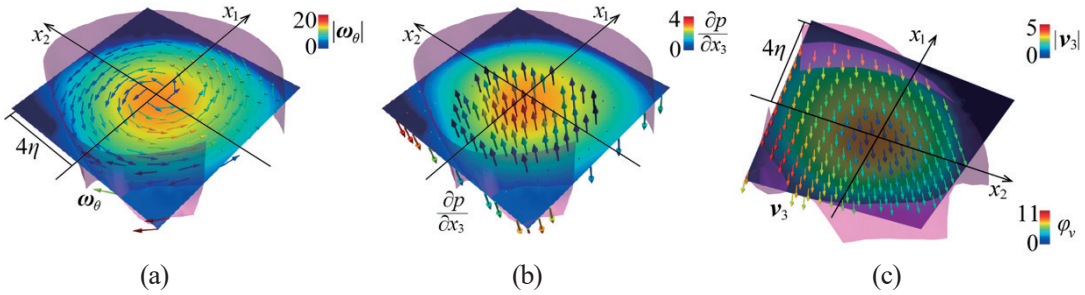
図 1 : 一様等方性乱流における速度場の swirlity φ_v で表した一つの渦領域と旋回平面，本平面上の渦流 $\boldsymbol{v}_p$，並びに渦線バンドル束の(LAG) swirlity φ_ω のコンターで示した渦線バンドル束．（η：コルモゴロフ長さ）

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．渦線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）とこれに平行な平面（下部），並びにこれらの平面上の渦流 $\boldsymbol{v}_p$, 並びに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 LAG 上の本バンドル束（渦度ベクトル場）の swirlity φ_ω で表している．また，η はコルモゴロフ長さである．本渦領域では，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．特に，上部の平面より上側では時計回り，また下部平面より下側では時計回りに螺旋軌道を描きながら旋回している．

図 1 中の渦線バンドル束と軸流，圧力との関連の解析に関し，下側の平面上における渦線バンドル束の旋回成分, 即ち渦度ベクトルの周方向成分 $\boldsymbol{\omega}_\theta$ のベクトル場, 渦流の軸流成分 v_3, 並びに軸流方向の圧力勾配 $\partial p/\partial x_3$ のベクトル場を図 2 にそれぞれ示す．これによると，渦度ベクトルが反時計回りに旋回しており，一方で圧力勾配は本平面に対して上を向いている．しかし，軸流は圧力勾配とは反対の下の方向を向いており，圧力に逆らって軸流が発生している様に見える．

渦空間では，速度勾配テンソルの成分が全てガリレイ不変の量で表されるが，これによると軸流の旋回平面に平行な導関数は 0 であることが示され，即ち渦中心における軸流 v_3 の勾配は本平面で 0 となり，v_3 の本平面上のヘシアンが渦中心周辺の速度分布特性を表すことが解る．一方，非圧縮性流体において，v_3 のラプラシアンは，渦度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ のローテーションの第 3 成分 $(\nabla\times\boldsymbol{\omega})_3$ の符号を反転したものに等しい．旋回平面上のラプラシアンが 3



(a) (b) (c)

図 2: 図 1 中の速度場の swirlity φ_v のコンターで表された下側の旋回平面における(a)渦線バンドル束の周方向成分$\boldsymbol{\omega}_\theta$, (b)渦流の軸流成分 $\boldsymbol{v}_3$, 並びに (c) 圧力勾配の軸方向成分のベクトル場.

次元全体のラプラシアンにおける支配的な成分であるとすると，$\boldsymbol{v}_3$ の本平面上のヘシアンと渦度ベクトルの渦度・回転成分には強い相関があると考えられる．そこで，$\boldsymbol{\omega}_\theta$のローカルトポロジーに関する固有値と $\boldsymbol{v}_3$ ベクトル場のヘシアンの結合確率密度関数を分析すると，ほぼ直線状の非常に強い相関があることが示された．圧力との相関は$\boldsymbol{\omega}_\theta$の固有値と比べて低く，軸流の分布特性は渦線バンドル束・渦度ベクトルの周方向成分の固有値によって概ね表されることから，圧力の作用に依らず渦線バンドル束の旋回によって軸流特性が定められることが明らかになった．

3. 研究目標の達成状況

本研究は，渦流と渦線バンドル束の相互作用による 3 次元渦構造・渦領域の形成のメカニズム解明に寄与するものである．渦流による圧力勾配，また渦線バンドル束による軸流の誘導作用は，共に速度場・渦度ベクトル場におけるトポロジーによる力であるが，渦流・渦線バンドル束のトポロジーが軸流を生成させ，またその速度分布特性を定め，3 次元渦構造を形成の一つの役割を果たしていることが明らかになった．これは，渦特有の性質に関する新たな一つの興味深い基盤的知見であり，一様等方性乱流の乱流渦に限定しない渦の共通的な性質に関わるものある．従って，本研究成果は，研究目標を達成したものと考えられる．

4. まとめと今後の課題

渦線バンドル束が渦領域中にて旋回, 即ち旋回平面上で旋回することにより軸流が発生し，旋回平面上の渦線バンドル束・渦度ベクトルにおける周方向成分のローカルトポロジーの固有値が軸流の分布特性を定めることが明らかになった．旋回平面上下の圧力勾配は，軸流が発生する方向とは反対の方向に作用するが，渦線バンドル束の作用が軸流においては強い作用があると考えられる．

一方, 渦線バンドル束だけでなく渦軸の定義として提案されている eigen-vortical-axis line や pressure minimum line 等のバンドル束もそれぞれの幾何学的特性を有している．渦線バンドル束の周方向・半径方向成分の分布特性等の詳細な定性定量分析と併せ，これらを解析することが渦構造形成の詳細なメカニズムの解明に繋がると考えられる．

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] K. Nakayama: Vortical Flow Structure Derived from Local Flow Geometry, *24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, Daegu, (2024), TuFM1613.

[2] K. Nakayama, Uchima K. and Y. Hattori: An Analysis of Self-Organization of Three Dimensional Turbulent Vortical Structure Derived from Interaction between Vortical Flow and Bundle of Vorticity Lines, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-9, pp. 36-38.

[3] K. Nakayama: An Asymmetric Vortical Flow Structure Based on Local Flow Geometry and Galilei Invariant Vortex Space, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), pp. 1076-1078.

[4] K. Uchima and K. Nakayama: Passage Characteristics of Bundle of Vortical Axis Lines in Homogeneous Isotropic Turbulence, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), pp. 1398-1400.

[5] 中山雄行: ローカルトポロジーから導かれる渦流の 3 次元構造の基本的特性, 第 67 回理論応用力学講演会, (2024), N-OS14-2-03.

[6] 内間海斗, 中山 雄行: 一様等方性乱流における渦軸バンドル束と渦構造の形成に関する解析, 第 67 回理論応用力学講演会, (2024), N-OS14-2-02.

[7] 内間海斗, 中山 雄行: 乱流渦における渦軸バンドル束の進行特性と渦構造に関する解析, 日本流体力学会年会 2024, (2024), 2M605-09-03.

[8] 内間海斗, 中山 雄行: 乱流渦における渦軸バンドル束の勾配テンソルを用いた曲率の可視化, 第 52 回可視化情報シンポジウム, (2024), No. 154.

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	J24I035
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	1 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

本研究では，大動脈弁のない左心室・大動脈系モデルに対して数値流体解析を実施し，提案する流動抵抗モデルの有効性を調査した．

左心室と大動脈が結合した血管モデルは，先行研究（Miyauchi S. et al., Proc. of AFI2021, pp.159-160, 2021）と同じものを使用した（図 1）．大動脈弁の流動抵抗を再現するために Navier-Stokes 方程式の外力項に，以下の流動抵抗モデル$\boldsymbol{f}$を導入した．

$$\boldsymbol{f} = -K\boldsymbol{u}$$

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．この流動抵抗モデルは左心室と大動脈の結合部から大動脈の方向へ，その中心軸に沿って 2mm の範囲内に存在する流体セルにのみ与えた．

流体解析には，熱流体解析ソフトウェア（Fluent 2022 R1, ANSYS, USA）を使用した．簡単化のために，左心室と大動脈の変形は考慮せず，境界条件として図 1 の Inlet（僧帽弁位置に相当）には圧力 100Pa，Outlet 1，Outlet 2, Outlet 3, Outlet 4 には圧力 0Pa を与えた．初期条件は解析領域全域で流速 0m/s であり，定常状態になるまで解析を実行した．血液の物性値を参考に，流体の密度は 1050 kg/m^3，粘度は 3.5×10^{-3} Pa・s である．パラメータKには，$K = 0, 1\times10^5, 5\times10^5, 1\times10^6, 2\times10^6, 3\times10^6, 4\times10^6$ kg/m^3 s の 7 通りの値を用いた．なお，$K = 0$は流動抵抗モデルを用いていない解析を意味する．

図 2 にパラメータKに対する体積流量の変化を示す．4×10^6 kg/m^{3}s の解析では，各タイムステップの繰り返し計算において残差が十分小さな値に収束しなかったため，その結果を省いている．体積流量はKの増加に対して単調に減少している．ただし，Kの増加による体積流量の減少量の変化は，Kが大きいほど小さくなっている．$K = 0$に対する$K = 3\times10^6$ kg/m^3 の流量比は 0.11 である．

図 3 に定常状態における圧力分布を示す．$K = 0$では解析領域全体において圧力が連続的に変化している．一方で，$K = 3 \times 10^6$ kg/m^3 s の解析では，左心室と大動脈の境目で急激に圧力が低下している．大動脈弁が閉じるときには，大動脈弁を境に圧力は急激に低下するため，定性的には妥当な結果であると考えられる．

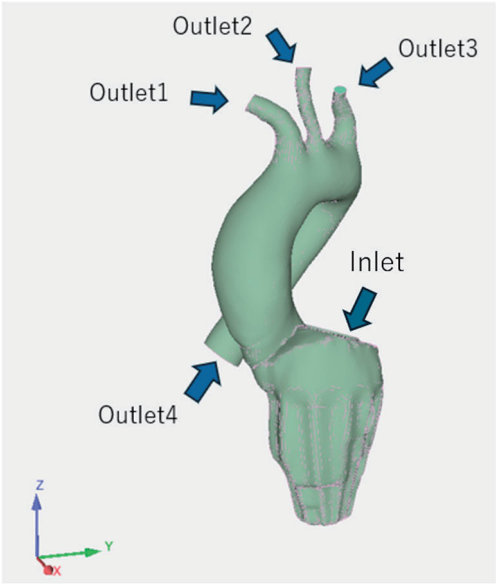


図 1　大動脈・左心室モデルの形状

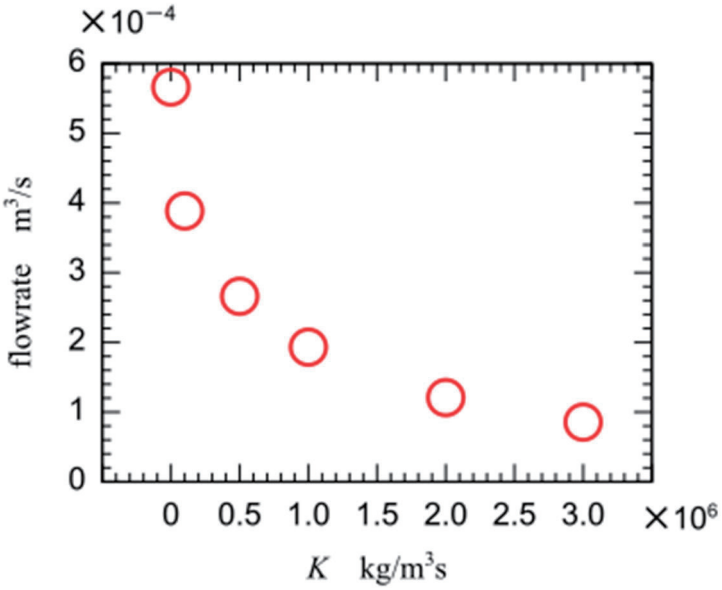


図 2 パラメータKに対する流量の変化

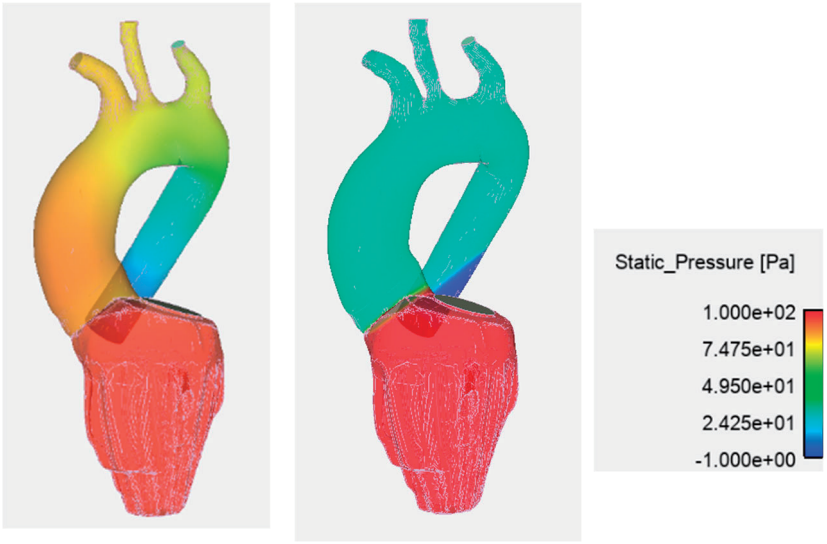


図 2 定常状態における圧力分布．左：$K = 0$ 右： $K = 3 \times 10^6$ ．

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，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た．このモデルでは Navier-Stokes 方程式の外力によって大動脈弁が表現されているため，大動脈弁の動きに合わせて流体メッシュを動かす必要はない．そのため，大動脈弁を通過する血流解析で課題となっていたメッシュの過度な歪みによる計算不安定は問題にならない．ただし，パラメータを大きくするほど，流動抵抗を大きくすることができるが，今回計算できたパラメータの値では流速が十分に小さくなったとはいえず，より大きなパラメータを適用できるように計算条件や計算アルゴリズムの変更を検討する必要がある．今後は，左心室壁の変形を考慮した非定常計算での有効性を確認する予定である．

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] Takumi Shimabuku, Suguru Miyauchi, Kenichi Funamoto: Two-dimensional Analysis of Flow through an Orifice Using Extended Finite Element Method, *The Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-43, pp. 127-128.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J24I038
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	3 年目

高速超微小液滴の生成と液滴特性
Generation of High-Speed Ultrafine Droplets and Droplets Characteristics

佐藤 岳彦*†，金澤 誠司**††
劉　思維*，中嶋 智樹*，岩澤 慶祐***
*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

微小液滴は，一般に直径数μm～数百μm 程度の粒径を有し，身の回りでは霧や雲として見ることができる．また，産業分野においても幅広く利用されている．液滴は微粒化することで，(1) 比表面積が大きくなり気液界面における輸送を促進する，(2) 液滴数の増加により液滴分散の均一性が向上する，(3) 重力の影響が小さくなり流れによる制御が容易になる，などの効果が知られている．また，微小液滴の高速衝突は洗浄などの産業分野で幅広く応用が進められている．そこで本研究では粒径が 1 ～3 桁小さいナノメートルスケールの液滴（超微小液滴）の生成法の確立とその液滴特性について明らかにすることを目的とする．

2. 研究成果の内容

図 1 にミスト発生装置を示す．この装置は主に，ヒーター，ステンレス製容器，ガスボンベ，圧力計，温度計，ノズルで構成されている．この装置の原理は，5 気圧（絶対圧）に加圧した空気と沸騰させ生成した水蒸気を混合しノズルから噴出させ，水蒸気を凝縮し高速ナノ液滴として生成するものである．

本研究では，高速ナノ液滴に OH が生成されているのかどうかを ESR を用いて検証した．ESR（電子スピン共鳴）は，不対電子が磁気モーメントを持ち，外部磁場にさらされたときに電磁放射を吸収するという原理に基づいている．OH ラジカルは非常に反応性が高く，寿命も短いため，OH ラジカルと反応してより安定したラジカルを形成するスピントラップ（5,5-ジメチル-1-ピロリリン-N-オキシド（DMPO））を用いて補足し検出した．OH ラジカルは DMPO と反応して安定な DMPO-OH 付加体を形成し，特徴的な ESR 信号を発する．

図 2 は，OH ラジカルの ESR スペクトルにおける分裂パターンを示している．このパターンには 4 本の

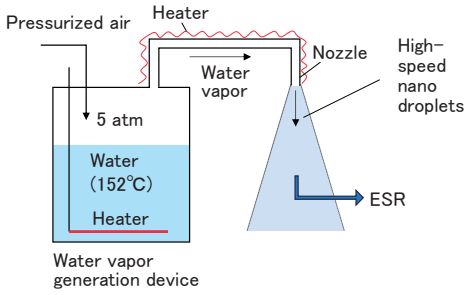


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

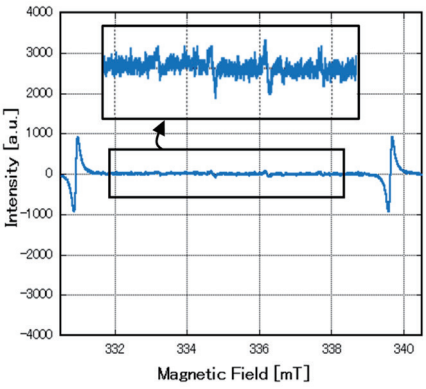


Fig. 2 The splitting patterns in the ESR spectrum of OH radicals.

明確なピークが現れており，OH ラジカルの存在を示している．しかしながら，その強度はかなり小さく，OH の生成量は極めて少ないことも明らかになった．

3. 研究目標の達成状況

高速ナノ液滴に極微量の OH ラジカルが生成されることを ESR を用いて明らかにすることに成功した．これにより，本装置により生成される水の極めて小さな液滴に OH が生成されることを実験的に確認することができた．この結果は，高速ナノ液滴の化学的特性の一端を明らかにしており，大きな成果となった．

4. まとめと今後の課題

高速ナノ液滴の化学特性を明らかにすることができたが，どのような状態にあるときに生成されるのかどうかが不明であり，衝突する場合などについても検討していきたい．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

該当なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] T. Sato, S. Fujimura, S. Kanazawa, S. Liu, T. Nakajima, Y. Xiao: Generation of High-Speed Nanodroplets and the Cleaning Effect, *The Nanobubble 2024,* Kyoto, Japan, (2024), Presentation No. AB00033.

[2] T. Sato, S. Fujimura, S. Kanazawa, S. Liu, K. Tachibana, Y. -C. Cheng, J. -S. Lee, T. Okuma, K. Iwasawa, Y. Xiao, T. Nakajima: Application of High-Speed Nanodroplets to Cleaning and Sterilization Treatments, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024),* Sendai, (2024), OS8-15, pp. 654-655.

[3] T. Sato, S. Kanazawa, K. Tachibana, S. Liu, T. Nakajima: Generation of High-Speed Ultrafine Droplets and Droplets Characteristics, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2024)*, Sendai, (2024), CRF-47, pp. 135-136.

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

Project code	J24I039
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

Generation of Charged Cavitation Bubbles and the Characteristics

Takehiko Sato*†, Mohamed Farhat**††
Kiyonobu Ohtani*, Tomoki Nakajima*, Siwei Liu*, Kouta Kurihara***
*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 bubble 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 achieve the project goals.

2. Details of program implement

Figure 1 shows the experimental setup used in this study. Two stainless steel electrodes are positioned in a vessel, with a laser-focused lens integrated into the vessel's side wall [2]. A nano-pulse laser generates a cavitation bubble between the electrodes, captured by a high-speed camera with 1 Mfps under background light. The electrodes are cylindrical in shape, sufficiently large relative to the bubble size to facilitate bubble generation in a quasi-flat plate configuration.

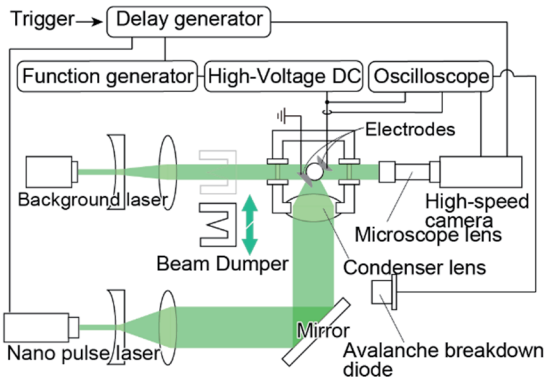


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

High-voltage DC applied to the electrodes, triggered with the nano-pulse laser and high-speed camera by a delay pulse generator. The experimental procedure begins with the nano-pulse laser irradiating the vessel to generate a bubble. Approximately 850 ns after laser initiation, the camera shutter opens, simultaneously triggering high-voltage DC. As the bubble expands and its internal pressure decreases, it eventually reaches a discharge condition where electrical discharge occurs between the electrodes. The oscilloscope monitors changes in current and voltage during discharge.

Paschen's law describes the relationship between a breakdown voltage V and the product of the pressure p and the electrode gap distance d. The equation for Paschen's law is given as [3]:

$$V = \frac{Bpd}{lnA + lnpd + ln\left(ln\left(1 + {}^{1}/_{\gamma}\right)\right)} \qquad (1)$$

Figure 2 shows the relationship between the normalized bubble radius and the corresponding pressure when the main gas is assumed as water vapor. The radius of the bubble is normalized by the maximum bubble radius obtained by the high-speed camera. The inner pressure of the bubbles decreases with a greater radius and reaches around 0.4 atm. This result implies that the hypothesis used for the cavitation bubble might have an error.

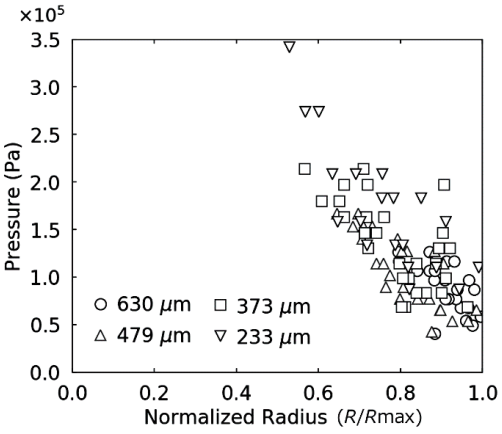


Fig. 2 Relation of vapor gas pressure inside bubbles and normalized radius.

3. Achievements

We have developed an innovative pressure measurement method to determine the internal pressure of cavitation bubbles. Using this method, we successfully measured the pressure inside the bubbles and found it to be approximately 0.4 atm—significantly higher than the commonly held hypothesis. This result demonstrates that we have achieved the primary objective of our collaborative research.

4. Summaries and future plans

The successful measurement of internal bubble pressure paves the way for the next phase of our research: estimating the energy of charged cavitation bubbles.

5. Research results

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

[1] S. Uehara, T. Sato, S. Kamata, S. Kanazawa, Y. Iga, T. Nakajima, M. Farhat: An innovative method of pressure measurement inside a laser-induced cavitation bubble, *Physics of Fluids*, Vol. 36, Issue 4 (2024), Article No. 041706 (5 pages), DOI: 10.1063/5.0206640.

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

[2] S. Liu, K. Nitto, O. Supponen, T. Nakajima, M. Farhat, T. Sato: Gas Component Identification for Laser-Induced Cavitation Bubbles, *The 51st IEEE International Conference on Plasma Science & The 4th Asia-Pacific Conference on Plasma and Terahertz Science (ICOPS & APCOPTS 2024),* Beijing, China, (2024), Presentation No. 65-299.

[3] 栗原輝太, 劉思維, 中嶋智樹, O. Supponen, M. Farhat, 佐藤岳彦: 絶縁油中帯電レーザー誘起気泡の特性, 日本機械学会東北支部第 60 期秋季講演会, (2024), 講演番号: A204.

[4] 上原聡司, 佐藤岳彦, 鎌田さやか, 金澤誠司, 伊賀由佳, 中嶋智樹, M. Farhat: 放電現象を用いたレーザー誘起キャビテーションバブル内の圧力計測法, 日本機械学会第 102 期流体工学部門講演会, (2024), 講演番号: OS06-04.

[5] S. Liu, K. Nitto, O. Supponen, T. Nakajima, M. Farhat, T. Sato: Gas Component Identification for Laser-Induced Cavitation Bubbles, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2024),* Sendai, (2024), CRF-40, pp. 121-122.

[6] S. Uehara, T. Sato, M. Farhat, S. Kanazawa, Y. Iga, T. Nakajima, S. Kamata, S. Liu: Pressure Measurement in Laser-Induced Cavitation Bubble Using Discharge Characteristics, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2024),* Sendai, (2024), CRF-48, pp. 137-138.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J24I041
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year (progressing)

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

In this study, the mass transfer in supercritical carbon dioxide ($scCO_2$) was numerically evaluated to understand the diffusion phenomenon under supercritical conditions. In particular, this study focused on the pore-scale mass transfer characteristics to understand the remediation of soil contaminants.

2. Details of program implement

2.1 Numerical model

In this study, a pore-scale direct numerical simulation method was developed to study two-phase flow and interphase mass transfer processes in porous media.

The two-phase flow and mass transfer process between $scCO_2$ and the contaminant in a porous medium were simulated using the conventional fluid volume method, and the interface was tracked. The governing equations for two incompressible isothermal immiscible fluids (e.g., organic contaminants and $scCO_2$) are as follows:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}\mathbf{u}) - \nabla \cdot (\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) = -\nabla p + F_\sigma$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

The interphase mass transfer of species includes several major mechanisms, such as advection, molecular diffusion, and partitioning. A brief description of the equation system in the solute transport model is as follows.

$$\frac{\partial \alpha C_e}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\alpha C_e \mathbf{u}\right) - \nabla \cdot \left(\alpha D_e \nabla C_e\right) = S_e$$

The source term of the interphase mass transfer is calculated as follows:

$$S_e = -k_\alpha C\left(C_e - C_{e,\infty}\right)\delta$$

The model was implemented in the open-source software for computational fluid dynamics, OpenFoam.

2.2 Quasi-static mass transfer between $scCO_2$ and NAPL

The pore-scale simulation model captures liquid-gas interfaces, simulates two-phase displacement, and represents the mass transfer in multiphase porous media.

The mass transfer coefficients were calculated based on the interfacial and concentration distributions, and the effects of the initial saturation and flow rate were also quantitatively analyzed (Fig.1).

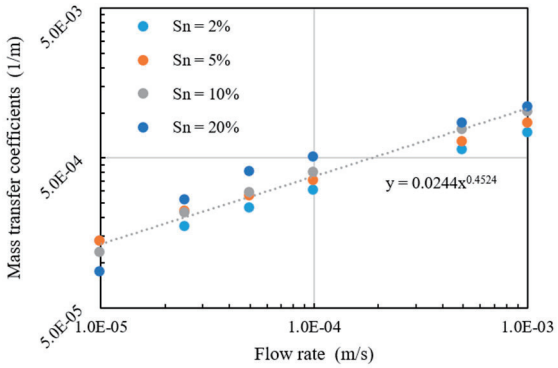


Figure 1: Mass transfer coefficient versus flow rate at different initial saturations of non-aqueous phase liquid (NAPL).

2.3 Dynamic mass transfer between $scCO_2$ and NAPL

A novel interfacial mass transfer was proposed to capture the dissolution of residual non-aqueous phase liquid (NAPL) in porous media during $scCO_2$ flooding. The time evolution of the NAPL-$scCO_2$ multiphase flow and NAPL concentration field are presented (Fig.2).

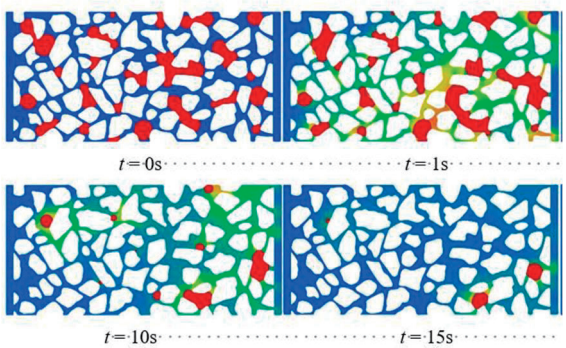


Figure 2: Time evolution of phase and concentration distribution patterns in porous media.

3. Achievements

As expected, a pore-scale direct numerical simulation method was developed. We provide knowledge that will serve as the basis for technological development in $scCO_2$ remediation. We also reported our research results at an international conference as shown in “Research results” section.

4. Summaries and future plans

In this study, a pore-scale direct numerical simulation method was developed, and the mass transfer coefficients of the NAPL under $scCO_2$.

In the future, we plan to analyze the flow and pore structure more precisely as parameters in numerical calculations by utilizing experimental 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. Hu, Y. Xu, Y. Kanda and A. Komiya: Pore-Scale Simulation of Mass Transfer during Supercritical Fluid Remediation for Soil Contaminants, *Proceedings of the 24th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2024)*, Sendai, (2024), CRF-27, pp. 89-90.
[2] Y. Kanda: Experimental visualization for transport phenomena in supercritical carbon dioxide, the *2024 International Conference on Supercritical CO_2 Power Cycle and Comprehensive Energy System*, (2024).
[3] Y. Hu, Y. Xu, H. Wang, Y. Kanda, J. Su: Pore-scale simulation of interfacial mass transfer during CO_2 dissolution trapping, *Third Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS-2024)*, (2024).

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

Project code	J24I042
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

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

Siwei Liu*†, Outi Supponen**††
Tomoki Nakajima*, Takehiko Sato*, Kaito Nitto***, Kota Kurihara***
*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

Due to the inherent complexity of the underlying physical and chemical phenomena—particularly the lack of reliable methods for identifying and monitoring the gas composition inside cavitation bubbles in real time—it remains a significant challenge to accurately characterize bubble behaviors. This limitation hampers efforts to achieve a comprehensive understanding of how electrical charge influences bubble dynamics.

2. Details of program implement

A bubble generation platform was developed over the past year to experimentally investigate the identification of gas components within laser-induced cavitation bubbles. This was achieved by introducing homogeneous plasma into the bubbles via a minimally invasive needle electrode. The dynamic behavior of bubble generation and oscillation was recorded using an ultra-high-speed camera (Figure 1), while the spectral characteristics of the plasma-induced self-emission were monitored using a spectrometer (Figure 2). The high-speed recordings enabled the observation of distinct phases of bubble dynamics, including generation, expansion, shrinkage, collapse, and rebound. Initially, plasma is generated in water through rapid energy deposition at the laser focus, resulting in molecular ionization and the formation of a cavitation bubble. The bubble then expands against the surrounding liquid until reaching its maximum radius. Subsequent shrinkage occurs due to pressure imbalance, culminating in collapse and rebound phases. By introducing homogeneous plasma into the bubble using the

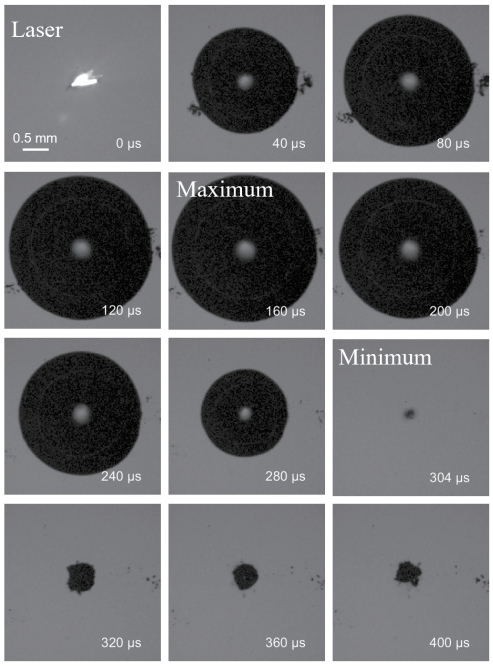


Figure 1 Images of the bubble at different stages of motion.

needle electrode, the self-emission spectra provide valuable insight into the gas composition within the bubble during each phase of its oscillation. These emission signals offer a promising means to analyze and understand the gas species involved throughout the cavitation process.

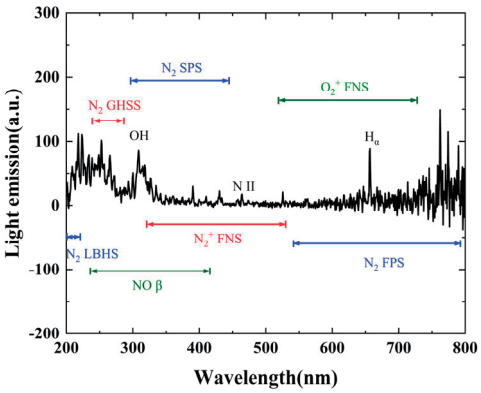


Figure 2 Self-emission of the bubble while homogenous plasmas were introduced.

3. Achievements

An experimental method for identifying gas components within laser-induced cavitation bubbles was proposed and successfully implemented. This approach offers a novel alternative for monitoring the evolution of gaseous species within cavitation bubbles and enables the potential identification of chemical reactions occurring during bubble dynamics.

4. Summaries and future plans

The results validate the effectiveness of using self-emission spectral characteristics from homogeneous plasma for analyzing the gas composition inside the bubble. In the next period, we will continue this topic and study the motion control of bubble dynamics by charge.

5. Research results

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

[1] S. Liu, K. Nitto, O. Supponen, T. Nakajima, M. Farhat, T. Sato: Gas Component Identification for Laser-Induced Cavitation Bubbles, *Proceedings of 2024 IEEE International Conference on Plasma Science*, Beijing, China, (2024) DIO: 10.1109/ICOPS58192.2024.10627355.

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

[2] S. Liu, T. Nakajima, T. Sato: Towards Advanced Control and Application of Charged Cavitation for Biomedicine, *Proceedings of Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2024), OS8-7, pp.633-634.

[3] S. Liu, K. Nitto, O. Supponen, T. Nakajima, M. Farhat, T. Sato: Gas Component Identification for Laser-Induced Cavitation Bubbles. *Proceedings of 24th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2024), CRF-40, pp.121-122.

[4] S. Liu, Y. Liu, Y. Ren, T. Nakajima, T. Sato: Energy-efficiency improvement of plasma-induced shock waves, *Proceedings of The 1st Asian Symposium for Building Future of Plasma*, Morioka, Japan, (2024), O-24.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

課題番号	J24I044
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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**††
徳尾野　陸**，工藤 惣士**，倉橋 晴香*，木村 梨花*，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

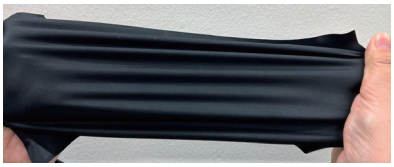


図１：柔軟膜の例（ラテックス膜）

火星飛行機実現の重要課題は，火星の低大気密度下で十分な揚力を得る大きな翼にある．加えて，大気突入カプセルへの収納性も要求される．それらの課題を解決する手段として，膜を展開して翼として機能させる柔軟膜翼がある．柔軟膜は，図１のラテックス膜に代表される柔軟かつ伸縮性を持つ膜であり，収納性・軽量性に優れている．さらに，柔軟膜翼では，失速特性の向上や揚抗比の向上が報告されており，空力面での利点もある．一方，柔軟膜翼を張る桁構造にも高い収納性が求められる．そこで本研究では，テントウムシなど甲虫類の後翅にみられる翅脈構造に着目した．翅脈構造は，羽ばたきに耐える構造強度と高い収納性を同時に実現し，さらに翅脈の弾性により自律的に展開するという特徴もある．しかし，翅脈を有する柔軟膜翼を小型航空機に適用する際，構造・空力の特性向上の指針を示した研究は未だない．そこで本研究では，翅脈状構造による空力への影響も斟酌した空力-膜構造連成計算と最適設計，風洞試験を行い，翅脈状構造と柔軟膜翼の収納性・構造強度・空力性能との関係に関する知見を得ることが目的である．

2. 研究成果の内容

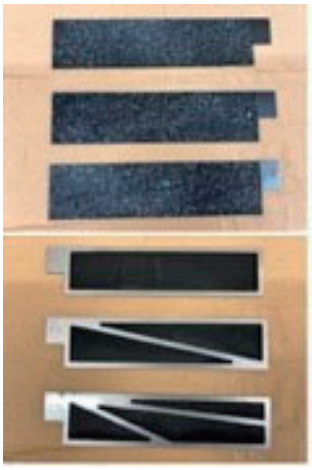


図２：単純な翅脈をもつ柔軟膜翼（上：膜面，下：桁）

１年目である 2024 年度では，まずは数値計算手法および実験手法の確立のため，図２に示す翅脈構造を単純化したモデルを用いて研究を進めた．数値計算においては，翅脈を模倣した柔軟膜翼に対する空力-構造連成計算のために，膜構造・空力ともに大変形・複雑変形に対応できる計算ソルバを用い，膜面構造計算に多粒子系膜モデル，空力計算に直交格子流体ソルバを取り入れた設計手法の検討を進めた．

また，実験側では，流体科学研究所の小型低乱風洞において風洞実験を実施した．この風洞実験は，数値計算の検証に資するデータの取得と，膜の変形・流れ場・空力の相互関係の調査を目的とした．天秤による空力，DIC による柔軟膜の動的変形，PIV による非定常流れ場の同時計測に成功した．

実験で取得した高次元データは解析中だが，空力計測からは翅脈状の桁構造が多い方が低抵抗となることが分かっており，数値計算の結果を裏付ける結果を得た．

加えて，翅脈構造の柔軟膜翼を火星飛行機実機へ適用することを見据えて，モデル機を作製し， 展開・収納性を評価した．図３が設計した全機形状であり，翅脈構造は前縁桁として配置するのみの簡単な構造とし，バイコンベックステープスプリングを構造にすることで自律展開を可能とした．設計には，数値流体力学を用いた構造・膜部の空力干渉評価や，膜にかかる力に対して，前縁桁のたわみを構造解析により評価した．モデル機に対しては，展開性能の評価に加えて，簡単な飛行試験も実施した．

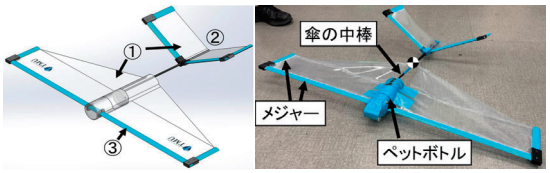


図３：設計したモデル機
（左：CAD モデル，右：簡易作製例）

3. 研究目標の達成状況

1 年目では，生物を模倣した翅脈をもつ柔軟膜翼を単純化したモデルを用いて，数値計算および風洞実験手法を検証することができた．これらの手法を融合することで，数値計算による翅脈構造の最適化と風洞実験による検証が可能であり，現状ではそれぞれが独立しているものの，デジタルツイン研究開発に向けた要素技術は獲得できた．

4. まとめと今後の課題

火星飛行機実現を目指し，翅脈をもつ柔軟膜翼の構造・空力特性向上の指針を獲得するため，数値計算と風洞実験手法の確立に取り組んだ．これまでの数値計算と風洞実験での解析結果から，翅脈構造が多いほど低抵抗になる傾向が明らかとなっており，今後，流れ場や膜の変位などの詳細な解析と比較を行う予定である．また，ここまでの研究では，数値計算，風洞実験，モデル機による飛行試験は独立して進めてきたが，今後はこれらを融合していく必要がある．具体的には，数値計算を用いて翅脈構造および膜物性値を最適化し，風洞実験により検証を行い，モデル機の設計に反映させ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] 工藤惣士，髙木大成，河野日香，正木拓斗，大島草太，金崎雅博，伊神翼，永井大樹: 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 68 回宇宙科学技術連合講演会，姫路，(2024).

[2] S. Kudo, T. Takagi, H. Kono, T. Masaki, S. Oshima, M. Kanazaki, T. Ikami, H. Nagai: Conceptual Study on a Conventional Micro-sized Mars Airplane with Stowable and Deployable Membrane Wings, *the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-3, pp. 21-23.

[3] K. Nakai, M. Kanazaki, H. Nagai, T. Ikami, Y. Tamaki, T. Imamura: Numerical Study on Structural Pattern Dependency of Aerodynamic Performance of Membrane Wings, *AIAA SciTech Forum 2025*, Orlando, FL, USA, (2025), AIAA-2025-0672.

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	J24I045
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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*†，下山 佳祐*，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（マッハ数3；矩形100 mm×180 mm）や弾道飛行装置（マッハ数4～7）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

2024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程度の空気衝撃波を発生させ，その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．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．

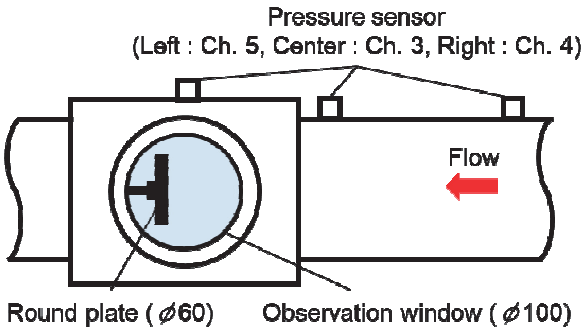
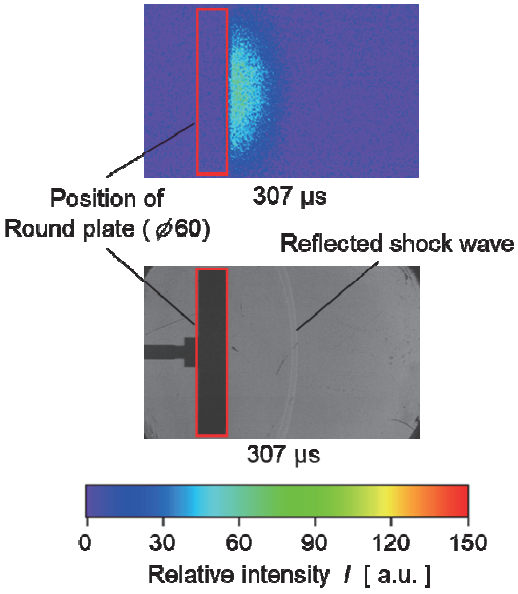


図１：計測部概略



Top : Pseudo color image of radiation of shock waves (M = 4.29)
Bottom : Schlieren image of shock waves (M = 4.27)

図 2：計測結果

3. 研究目標の達成状況

マッハ数 4 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．また，シュリーレン光学系により衝撃波を可視化した．しかし，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を試みたが，計測することができなかった．

4. まとめと今後の課題

マッハ数 4 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が，計測することができなかった．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, K. Shimoyama, K. Shibusawa, and K. Ohtani: Fundamental Study of Weak Radiation behind Air Shock Waves, *Proc. of 21st Int'l Conf. Flow Dynamics [24th Int'l Sympo. Advanced Fluid Information]*, Sendai, Miyagi, Japan, November 18-20 [Presented on November 20], (2024), CRF69, pp. 193-195.

[2] 下山 佳祐, 荻野 智也, Aqwahaziq Bin Fakhrul Anwar, 舩津 賢人, 大谷 清伸（東北大），澁澤 健二（茨城高専）：空気衝撃波背後の微弱な放射に関する実験的研究，2024年度衝撃波シンポジウム論文集，3C3-3.pdf，4pages，東北大学片平さくらホール，東北大学流体科学研究所（宮城県仙台市），March 12-14 [Presented on March 14], (2025).

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）** なし

Project code	J24I046
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical cares
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	3rd year

Transient Structural Analysis of the Interaction of Stiffness and Compliance between Aorta and Carotid Arteries by Performing Numerical Simulations

Yujie Li*†, Marjana Petrova*
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

This project aims to investigate the influence of a variety of parameters – blood pressure level, pulse pressure, artery stiffness, arterial wall thickness, and artery morphology - on the mechanical properties as well as the blood flow dynamics of the aorta and carotid arteries, by performing computer simulations with a series of patient-specific aorta models and its blood flows.

2. Details of program implement

Arterial stiffness is an important predictor of adverse cardiovascular events and an independent predictor of hypertension, which can be described as the loss of distensibility and compliance of blood vessels from an engineering perspective. However, while studies have focused on aortic stiffness, its influence on other main cardiovascular arteries have largely been neglected. To address this problem, an advanced computer simulation method has been established in this study to conduct a comprehensive structure analysis and flow simulations for a patient-specific aorta-carotid system under realistic physical and physiological environment. The simulated data will then be analysed to evaluate the influence of aorta stiffness on carotid arterial compliance, as well as to investigate the interaction of stiffness and other key mechanical properties between the aorta and carotid arteries.

A series of data was first collected, including patient images of aorta and carotid arteries, the thickness of the aorta and carotid arteries, blood pressure, blood flowrate, pulse pressure, and pulse wave velocity. With the medical images, a series of patient-specific aorta-carotid artery models was reconstructed into 3D arterial models for simulation. Artery stiffness was then be derived and defined according to the measured pulse wave velocity. Computational meshes were then be generated and tested to meet the accuracy requirement of the simulation. A series of fluid and structure simulations under different wall definitions was performed to resolve the mechanical properties, including artery deformation, compliance, distensibility, etc., and haemodynamic parameters, including the velocity profile, wall shear stress, flow pattern, etc. Through the variation of input parameters and the comparison between results from different arterial models, the influence of each investigated parameter on the arterial mechanical properties and haemodynamics was studied.

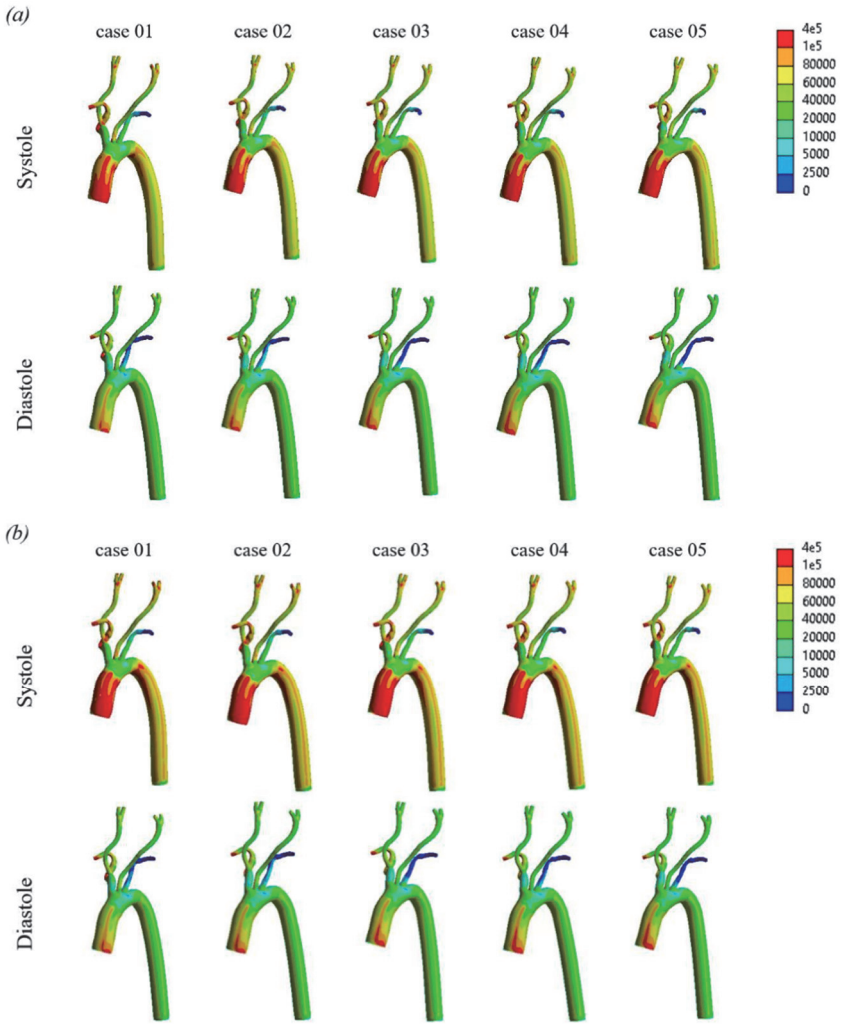


Figure 1: von-Mises stress on arterial wall at systole and diastole under two pulse pressure (PP) conditions: (a) PP = 5994 Pa, (b) PP = 7369 Pa. (Overall arterial Young's Modulus was set to progressively increase from case 01 to case 05, with sectional values rising sequentially from the ascending aorta, to the aortic arch, descending aorta, and carotid arteries.)

3. Achievements

This study presented the first computer simulation of the aorta and carotid arteries to evaluate complex interactions between independent aortic stiffness interactions and carotid mechanical properties. Specifically, the role of deformation and compliance with medical imaging can be used to simulate changes relevant to clinical cases.

4. Summaries

Though the three-year project, this study presented simulation models that demonstrate a significant interaction of aortic stiffness on the compliance of both carotid arteries. This study provides future perspectives in computer simulation models for better evaluation and assessment.

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, M. Petrova, C. S. McLachlan, M. Ohta: Interaction between Aortic Stiffness and Carotid Arterial Stiffness: Computational Simulations Using a Realistic Arterial Model, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-22, pp. 75-76.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

課題番号	J24I048
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	1 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，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とし，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)のための最適条件を明らかにす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 3 次元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

過去の研究により，自転液滴の角速度上昇に伴い気孔がより短い時間で排出されることがわかっている．今年度は，その排出に要する時間t_cがどのような条件に依存するのかを調べるべく，液滴内部に含まれる気孔径d_pと液滴中心位置からの気孔中心位置のオフセット量x_pを変化させたパラメトリックスタディを行った．なお，3 次元シミュレーションの事前検討として，今年度は 2 次元シミュレーションにて解析を進めた．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．液滴径は0.1 mmとし，初期の速度場には液滴内部を剛体回転領域とする Rankine の渦モデルを採用した．溶融金属の粘性係数と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 の物性値を採用し，定数として扱った．

図 1 に気孔径$d_p = 0.05$ mm，オフセット量$x_p = 0.01$ mmの場合における液相体積分率分布を示す．それぞれのスナップショットの時刻tは自転周期Tで規格化されている．自転によって液滴が変形し，1 回転を超えたあたりで気孔が排出される．ここで，液滴と気孔の中心位置にオフセットを設けたことで，$t = 0$における液相領域では図 1(a)に「a」で示す位置の液膜厚さが最も薄く，その薄い液膜領域が自転によってさらに薄くなることで最終的に気孔の排出に至ることがわかった．

そこで，気孔径d_pとオフセット量x_pをパラメータとし，初期状態で最も薄い液膜厚さaに対して気孔が排出に至る時間t_cを調べた．その結果を図 2 に示す．気孔の排出時間はほぼ気

孔径には依らず，初期液膜厚さaで整理できることがわかった．また，この排出時間は 1 ms を下回るオーダーであり，直径0.1 mmの液滴が凝固に至るまでの時間 10 ms に比べて十分に小さいことがわかった．

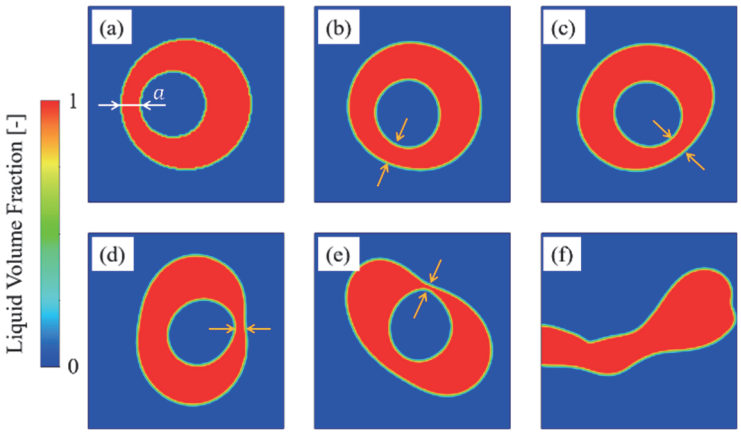


図 1：液相体積分率の時間変化($d_\mathrm{p} = 0.05$ mm, $x_\mathrm{p} = 0.01$ mm):
(a) $t/T = 0$, (b) $t/T = 0.256$, (c) $t/T = 0.512$, (d) $t/T = 0.768$, (e) $t/T = 1.024$, (f) $t/T = 1.280$

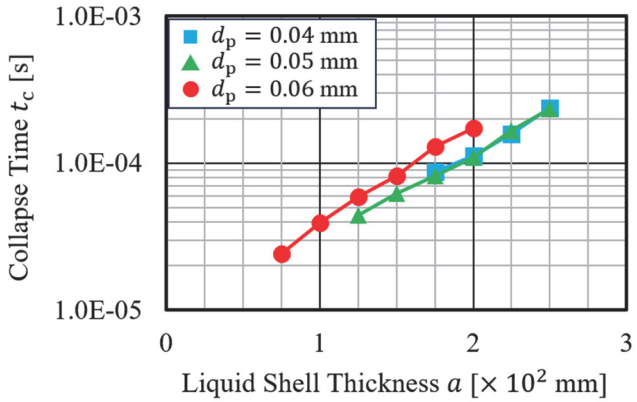


図 2：初期液膜厚さaに対する気孔排出時間t_cの変化

3. 研究目標の達成状況

液滴の運動によって内部気孔が排出される否かを判断するためには，気孔排出に要する時間スケールを把握することが必要である．すなわち，その時間スケールが凝固時間よりも長い場合には，金属粉末中に気孔が残留すると判断できる．今年度の研究では，その判断基準となる時間スケール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，自転液滴による内部気孔排出の時間スケールが明らかとなった．次年度は，この知見を元に気孔の残留/排出について無次元数を用いてマップ化する．さらに，液滴の並進運動による気孔排出のマップ化，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: 金属液滴の粘性と表面張力が自転による内部気孔排出に与える影響，日本混相流学会混相流シンポジウム 2024，(2024), OS0106.

[2] J. Yoshikawa, K. Itoh, H. Takana: Collapse Process of Gas Pore from a Rotating Metal Liquid Droplet, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2024), OS5-15, pp.506-508.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（受賞）Best Presentation Award for Young Researcher，Collapse Process of Gas Pore from a Rotating Metal Liquid Droplet，Joe Yoshikawa, Keisuke Itoh, Hidemasa Takana, November 20, 2024，The 21st International Conference on Flow Dynamics.

Project code	J24I049
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 ~ March 2025
Project status	2nd 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, ††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 2024, 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 18-20, 2024. 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. The study begins with an equilibration phase to stabilize the system, after which we initiate the actual permeation of CO_2. This involves CO_2 molecules starting to penetrate the DPPC lipid membrane, engaging in interactions with the lipid molecules as they traverse across the membrane. The simulation is conducted over a period of 30 ns using a total of 32 CO2 molecules. The designated simulation box measures 3 x 3 x 6 nm, maintained at a temperature of 310 K under atmospheric pressure. Initially, the CO_2 molecules are positioned in the water region of the simulation at time t=0.The movement of these molecules primarily in the z-direction through the phospholipid bilayer is observed and analyzed as depicted in Figure 1. Notably, CO_2 molecules begin to permeate through the DPPC bilayers within the first nanosecond. By the 30 ns, most CO_2 molecules have successfully entered the bilayer, indicating significant permeation. Total numbers of CO_2 molecules which had been penetrated in the lipid membrane are observed every 1 ns as presented in Figure 2.

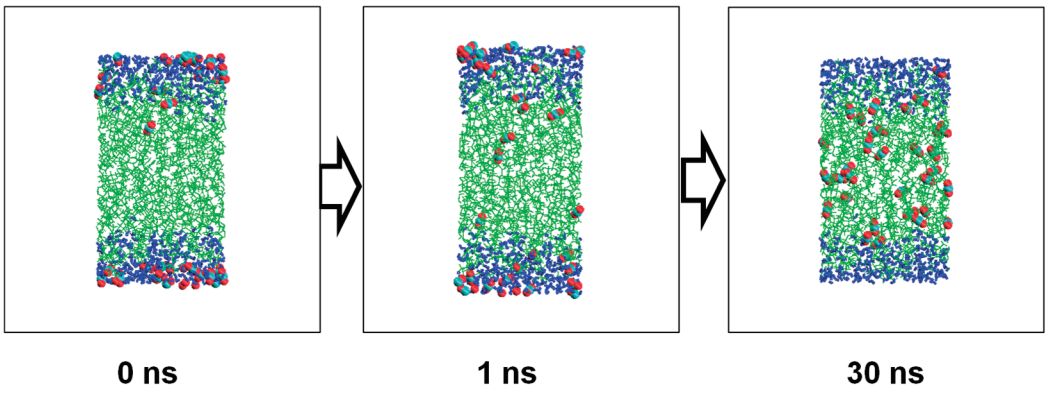


Figure 1: Visualization of CO_2 Permeation in DPPC Lipid Membrane

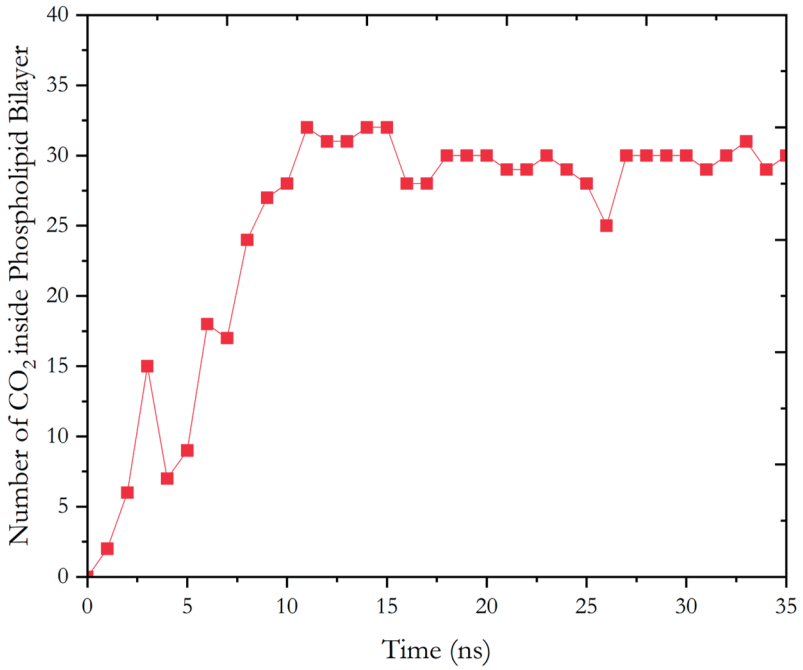


Figure 2: Number of CO2 Molecules inside DPPC Lipid Membrane

In our study, we analyze the density of CO_2 gas within the DPPC lipid membrane, a key aspect of understanding how CO_2 interacts with and is absorbed by the membrane. This analysis is visually represented in Figure 3, which depicts the gas density profile along the z-axis of our simulation box. This profile is crucial for assessing the mass accumulation of CO_2 on the membrane over time. Initial measurements taken at 3 ns reveal that CO_2 molecules have not yet significantly penetrated the lipid membrane, with the majority of the gas still located outside the membrane at a distance of 30 Å from it. However, by the end of the simulation period at 30 ns, the situation changes markedly. The CO_2 gas is observed to be uniformly distributed and absorbed within the membrane at a reduced distance of 15 Å. This progression demonstrates a significant shift in the CO_2's position relative to the membrane, suggesting effective permeation and absorption processes occurring over the duration of the simulation.

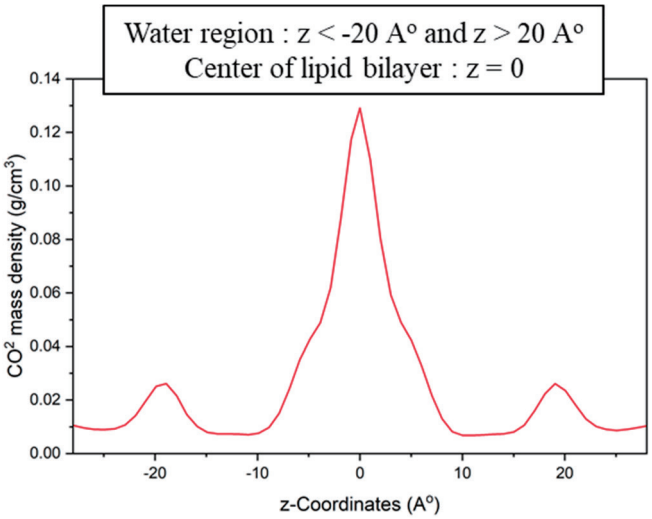


Figure 3: CO_2 Mas Density in DPPC Lipid Membrane

In this study, we employed the Non-Equilibrium Molecular Dynamics (NEMD) simulation technique, specifically utilizing the umbrella sampling method to compute the free energy profile along the permeation direction (z-direction). In this approach, a series of simulations are conducted with the solute restrained relative to the membrane's center of mass using a harmonic potential. We then compared the free energy profile obtained from the umbrella sampling method with the free energy profile previously calculated using the equilibrium molecular dynamics simulation (free sampling), based on the relation: $\Delta G = -k_B \ln\left(\frac{\rho(z)}{\rho(z_0)}\right)$, with k_B is the Boltzmann constant, $\rho(z)$ is CO_2 density at specific z-coordinates, and $\rho(z_0)$ is the minimum CO_2 density in the system Both methods yielded similar results, with the highest energy barrier observed between 6.5 and 7.0 kJ/mol, located near the interface between the lipid and water regions, as shown in Figure 4.

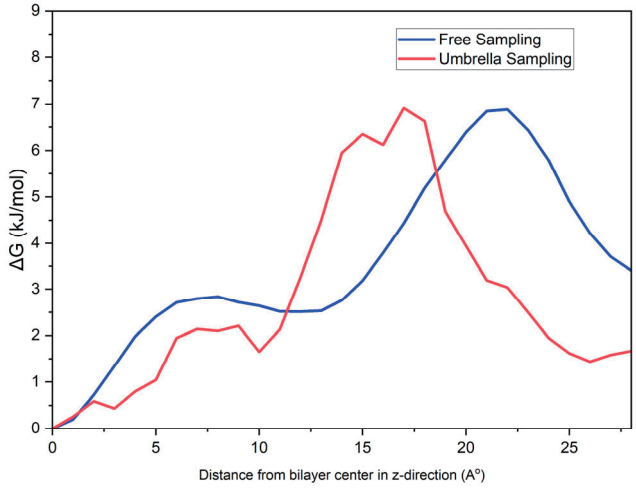


Figure 4: Free Energy Profile of CO2 Molecules in DPPC Lipid Bilayer from Umbrella Sampling and Free Sampling

Additionally, we investigated the effect of cholesterol content, which is abundant in microalgae cell membranes, on the transport properties of CO_2 molecules. Variations in cholesterol content of 0%, 25%, 50%, and 75% were considered. The equilibrated systems for each cholesterol variation are shown in Figure 5.

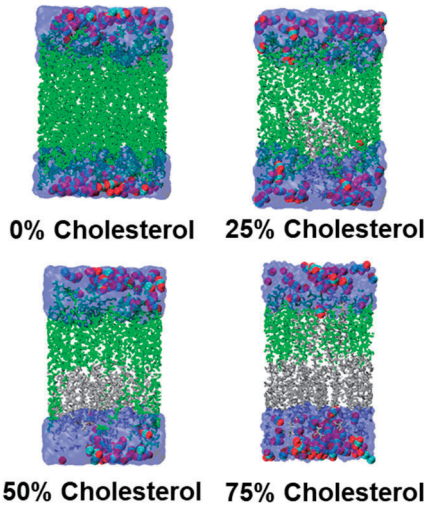


Figure 5: Visualization of Cholesterol Content Variation

An increase in cholesterol content, which typically results in a higher area per lipid, is generally thought to enhance the permeation of small molecules through a lipid bilayer. However, the Mean Squared Displacement (MSD) curve shown in Figure 6 suggests the opposite trend. This unexpected result may be attributed to the aggregation of cholesterol molecules in the lower portion of the lipid bilayer. Such aggregation could lead to the formation of regions with slightly increased free volume or less tightly packed lipids on the side of the bilayer that is not surrounded by cholesterol. These structural changes could interfere with the normal permeation process, reducing the overall transport of CO_2 molecules through the membrane.

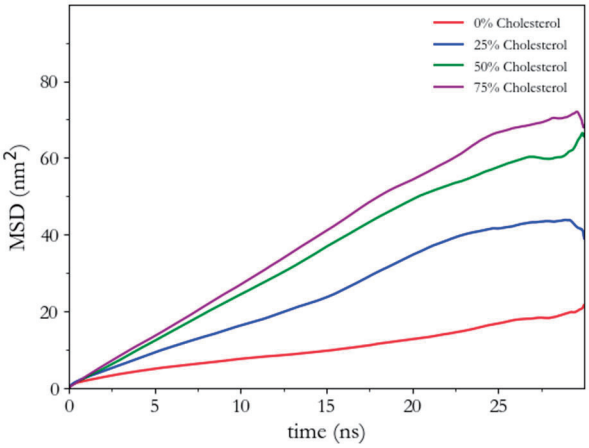


Figure 6: MSD Curves of Cholesterol Content Variation

4. Summaries and future plans

The final goal of this research is to calculate permeation coefficient (PC), which based on several literatures is calculated with following equation:

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

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, while ΔG(z) and Dz denote the excess free energy and the local diffusion coefficient of a small molecule permeating the membrane, which is CO_2, respectively. Kb is the Boltzmann constant, and T is the temperature. We have successfully calculated the excess free energy profile, using the umbrella sampling method. Currently, we are still refining our approach to calculating the local diffusion coefficient . To achieve this, we are employing the Force Autocorrelation Function (FACF) technique, as demonstrated in the following equation:

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

,where R is the gas constant, T is temperature. ΔFz(t)=Fz(t)−⟨Fz⟩ is the deviation of the instantaneous force exerted on the molecules fixed at z. The, the calcuation of diffusion coefficient requires an additional molecular dynamics simulation with the permeant fixed at particular z position, similar to the free energy profile calculation. Having successfully calculated the permeation coefficient as outlined in this study, our next step is to investigate the influence of key environmental factors in microalgae cultivation on this coefficient. Specifically, we will focus on temperature, pH, and salinity—critical parameters that could significantly affect the transport properties of molecules across the cell membrane. By understanding how these factors interact at the molecular level, we aim to uncover valuable insights that could not only optimize the microalgae cultivation process but also improve the efficiency of biotechnological applications involving microalgae. If successful, this research could pave the way for further scaling up, allowing for more comprehensive studies and potential real-world applications in larger-scale environments.

5. Research results

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

Project code	J24I050
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Research on Turbulence Models that Reproduce Spatially and Temporally Nonequilibrium Flows

Aiko Yakeno*†, Richard Sandberg**††
Atsuhito Kawabata*, ***
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Mechanical Engineering, Melbourne University
***Department of Aerospace Engineering, Tohoku University
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Turbulence models is one of the representative industrial methods, but even though most of the flows we deal with in engineering are non-equilibrium flows in space and time, it remains difficult to predict the flow. In this project, we will carry out research aimed at expanding the scope of application of the model, especially by considering the influence of spatiotemporal changes on shear stress.

2. Details of program implement

We have received the GEP program from Prof. Richard Sandberg, and are ready to apply the program immediately after constructing the database. We have built the database and it is completed. We sent a master's student (Atsuhito Kawabata) to the University of Melbourne for two months from January 2024 to learn the basics of applying GEP (Figure 1).

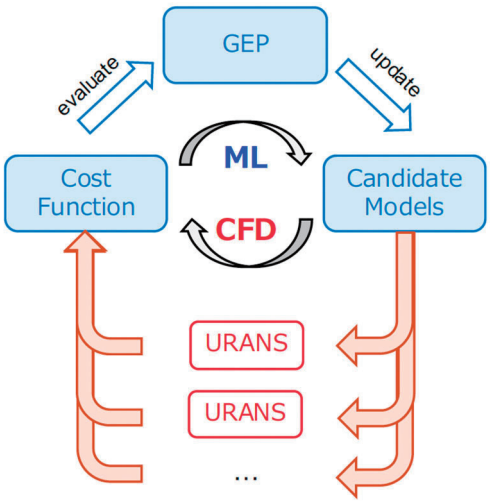


Figure 1 The framework of developing new models using CFD-driven GEP (Y. Fang, Y. Zhao, F. Waschkowski, A. S. H. Ooi, R. D. Sandberg, AIAA J., 61 (5), 2023).

3. Achievements

By assimilating experimental PSP data into URANS for the unsteady flow of Karman vortices in the wake of a prism, we have succeeded in improving the prediction performance such as wake flow frequency. By applying Gene Expression Programming (GEP), we work on creating the closure itself for a turbulent flow model with a higher degree of freedom. In particular, we believe that by considering the influence of spatiotemporal changes on shear stress, we can try to expand the scope of application of turbulence models (Figure 2).

4. Summaries and future plans

A CFD-driven GEP framework (including one of the evolutionary algorithm

techniques) is used to construct the closure of the RANS model and apply it to the SA model. We consider a case study of a square cylinder with Re = 2,000. The average velocity field profile or Strouhal number obtained by DNS is used as the Hi-Fi data. The goal is to verify that the predictions of the developed model approach the Hi-Fi data used as the reference value, compared to the traditional Spalart-Allmaras 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] A. Kawabata, A. Yakeno, R. Sandberg: Unsteady RANS Simulations of Vortex-shedding using CFD-driven Machine-learned Turbulence Closure, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-56, pp. 155-157.

3) Patent, award, press release etc.
(Patent) Not Applicable
(Award) Not Applicable
(Press release) Not Applicable

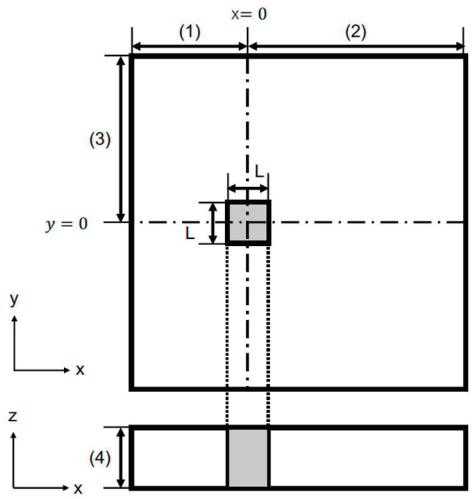


Figure 2 Computational domain of DNS and URANS computations around a square cylinder

課題番号	J24I051
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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***，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．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．この楔形ストリークは内円筒近傍に出現し続けるので，内円筒の回転トルクに周期的な変動を与え，風車の回転や性能に影響を与える可能性がある．

本研究では，MHD エネルギー変換装置の高度化に向けて，どのような条件で楔形の高速ストリークが発生するのか，さらに流路内の 3 次元渦構造はどのように変化し，回転トルクやエネルギー変換効率への影響があるのか，レイノルズ数，ハルトマン数，半径比などの影響を解明し，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，同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の概念図を示す．本装置から電気を外部へ取り出す場合は，回転する内円筒と静止している外円筒を金属製の電極とし，その間に外部負荷を接続する．本研究では，楔形の高速ストリークの発生する条件を調査することで，本装置における MHD 相互作用の強さを示す指標を明らかにする目的のために，内円筒，外

円筒，上下壁は絶縁壁とした．内円筒から外円筒までの幅hと，高さLとの比として定義されるアスペクト比を 1 に設定した．内円筒の回転速度u_{in}と液体金属の動粘性係数およびhを用いたレイノルズ数 $\mathrm{Re} = u_{in}h/\nu$ を用いる．磁束密度B，液体金属の密度ρ，電気伝導度σを用いたローレンツ力に対する粘性力の比であるハルトマン数を $\mathrm{Ha} = Bh\sqrt{\sigma/\rho\nu}$ と定義する．半径比は外円筒半径に対する内円筒半径として $\chi = r_{in}/r_{out}$と定義する．

図 2 に $\chi = 0.5$， Ha=100 の条件のもと，Re を 5000, 8000, 10000 と変化させた場合の内円筒近傍のストリークを示す．Re=8000 では，円周方向流速分布に楔形構造が現れている．その際の半径方向流速分布には，赤と青の楔形の分布が現れている．これは半径方向内向きと外向きの流れがあること示しており，楔形ストリークに沿って渦が存在していることを示している．このことから，円周方向流速に現れる楔形ストリークは，一対の渦対によって生成されていることがわかる．それに対して，Re=5000 では，周方向流速分布から，その楔形ストリークがローレンツ力に抑制された平坦化した高速領域が見られ，半径方向流速分布からは渦対が抑制されていることがわかる．Re=10000 では，ローレンツ力に対して，乱流の効果が勝り，周方向に延びた細かいストリークが多数見られ，半径方向流速分布から，それらは周方向に延びた渦対によって形成されていることがわかる．このように，Re は乱れの強さを，Ha は乱れの抑制の強さを示す指標と考えられ，Ha/Re で MHD 相互作用下での流れ場を整理できる可能性がある．そこで，$\mathrm{Hr}_0 = \mathrm{Ha/R} \times 10^4$とした指標を導入する．楔形ストリークが現れた条件では，Hr_0=125 となる．

図 3 には，Hr_0=125 となるように，Re=5000 では Ha=62.5，Re=10000 では Ha=125 とした場合の周方向流速分布と半径方向流速分布を示す．どちらの Re においても，周方向流速には楔形構造が現れ，半径方向流速分布には，図 2(c)の右図に見られるような周方向に延びた細かいストリーク群は見られない．このことから，Hr_0 という指標は，本流れ場における MHD 相互作用の強さを表現しており，Re と Ha に対する相似則を示していると考えられる．

次に，半径比の効果が本指標に及ぼす影響を考える．図 4(a)に，Re=8000，Ha=100 の場合に，χ を 0.75 とした場合の周方向と半径方向の流速分布を示す．半径比が増加すると円筒の曲率の効果が小さくなる．その結果，遠心不安定の効果は小さくなる．このとき，周方向の楔形ストリークは，図 2(a)のように平坦化しており，この Re と Ha の条件は，楔形ストリークが発生する条件に対して MHD 相互作用が強い条件であると考えられる．すなわち，χ は Ha とある種の反比例の関係にあると考えられる．そこで，Hr に χ を加えた新たな指標として$\mathrm{Hr}_1 = 2\chi\,\mathrm{Ha/Re} \times 10^4$ を考えてみる．Hr_1=125 となるように，Ha=67 とした場合の分布が図 4(b)である．半径方向流速分布に，赤と青の楔形の構造が見えるものの，周方向流速分布は楔形ストリークが少し平坦化しているように見えることから，Ha=67 の条件は Re=8000 に対して楔形ストリークが鮮明に見える条件に対して大きいことがわかる．同指標で Re=8000，χ=0.25 のときに Hr_1=125 となるように Ha=200 とした結果が図 4(c)である．この結果は，楔形ストリークがローレンツ力によってさらに抑制された際の分布に相当しており，Ha が大きいことがわかる．いずれにしても，Hr_1 の指標では半径比の効果を適切に考慮できないことがわかった．

半径比の効果，すなわち曲率による遠心不安定の効果を含めた無次元数としてテイラー数 $\mathrm{Ta} = \mathrm{Re}^2(1/\chi - 1)$ がある．これと先の指標 Hr_0 を組み合わせると，下記のようになる．

$$\mathrm{Hr}_2 = \frac{\mathrm{Ha}}{\sqrt{\mathrm{Ta}}} \times 10^4 = \frac{\mathrm{Ha}}{\mathrm{Re}}\left(\frac{1}{\chi} - 1\right)^{-1/2} \times 10^4$$

この指標でχ=0.75，0.25 の場合に Hr_2=125 となる Ha は，58 と 173 なる．このときの周方向分布を図 5(a)と図 5(b)に示す．χ=0.75 では，楔形ストリークが得られており，本指標に

よって半径比の効果を含んだ MHD 相互作用の強さが適切に表現されていることがわかる．一方で，χ=0.25 では，楔形ストリークが見られない．これは，遠心不安定の効果が増加したことで，内円筒と上下壁とが交わる角から発生する楔形ストリークの発生も抑制されたからと考えられる．そこで，χ=0.25 の場合に，より乱れの強い Re =10000 において，Hr_2=125 となる Ha=216 で検討した結果が図 5(c)であるが，このとき楔形ストリークが現れた．以上から，半径比も含めた MHD 相互作用の強さを示す指標として，Hr_2 の指標が適切であることがわかった. ただし, 半径比が小さくなると楔形ストリークが発生する Re に下限があり，その下限値は半径比が小さくなるにつれて大きくなることもわかった．ちなみに，図 4 の条件で Hr_2 を計算すると，それぞれ Hr_2= (a)217, (b)145, (c)144 となり，どの条件も Hr_2=125 よりも大きく，楔形ストリーク発生の条件に比べて，Ha が大きく設定されていたと考えられ，図 4 に関する考察結果と整合している．

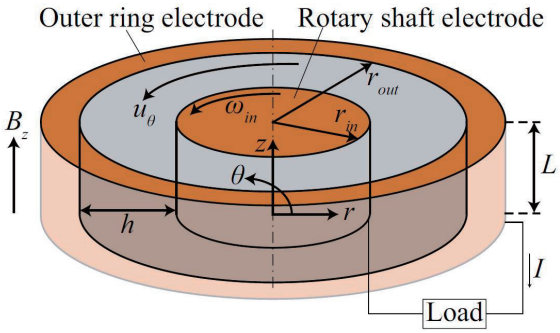


図 1：同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の概念図

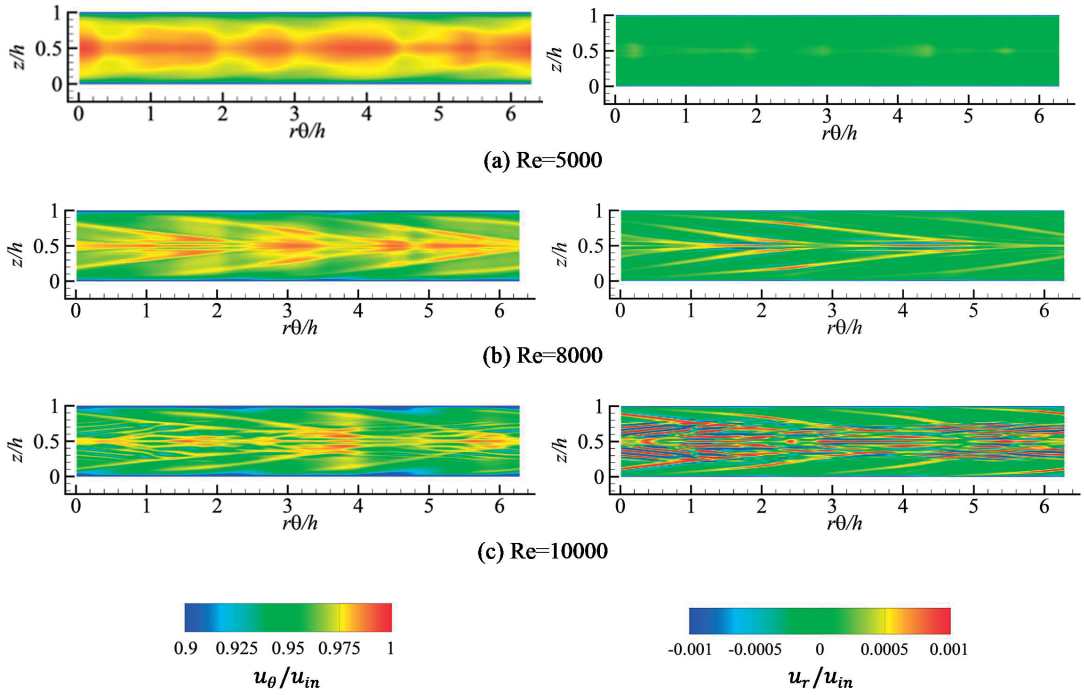


図 2：χ=0.5，Ha=100 における Re= (a)5000，　(b)8000 , (c)10000 とした場合の内円筒近傍の周方向流速分布（左図）と半径方向流速分布（右図）

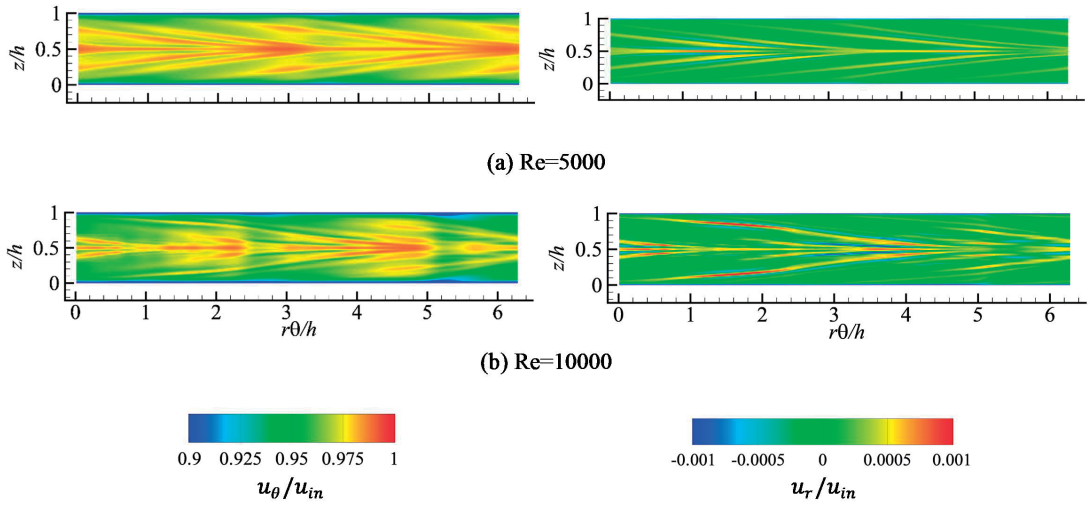


図 3：χ=0.5 において Hr_0=125 となるように (a)Re=5000, Ha=62.5, (b)Re=8000, Ha=125 とした場合の内円筒近傍の周方向流速分布（左図）と半径方向流速分布（右図）

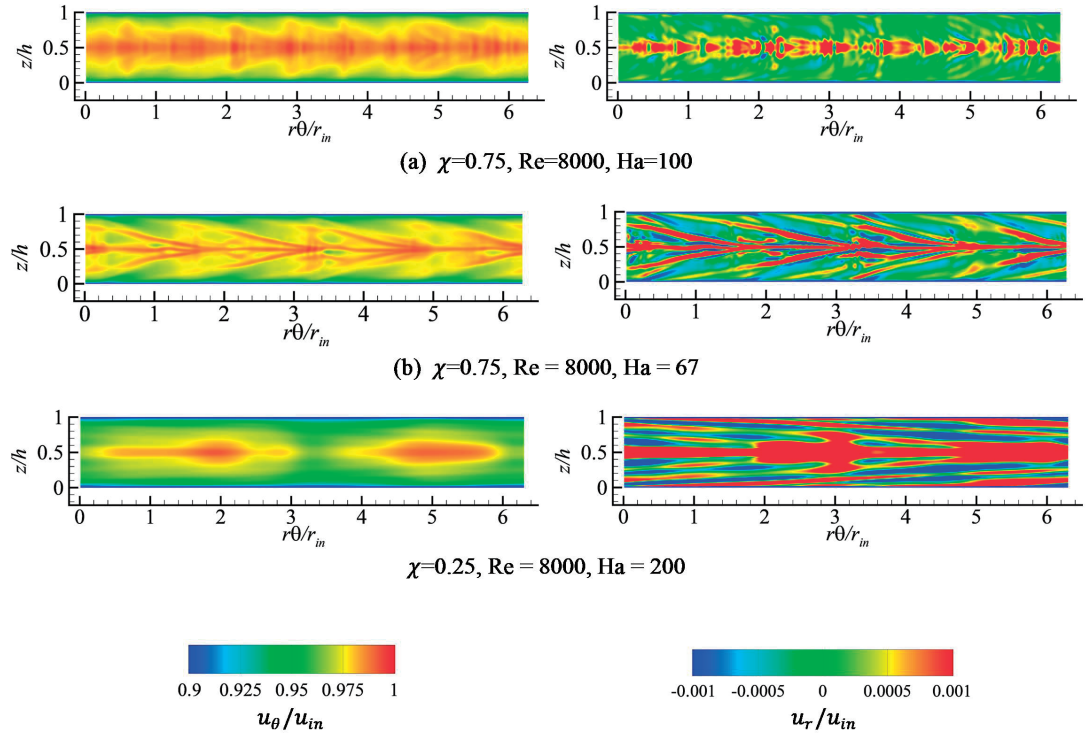


図 4：(a)χ=0.75, Re=8000, Ha=100, Hr_1=125 となるように Ha を調整した(b) χ=0.75, Re=8000, Ha=67, (c) χ=0.25, Re=8000, Ha=200 における内円筒近傍の周方向流速分布（左図）と半径方向流速分布（右図）

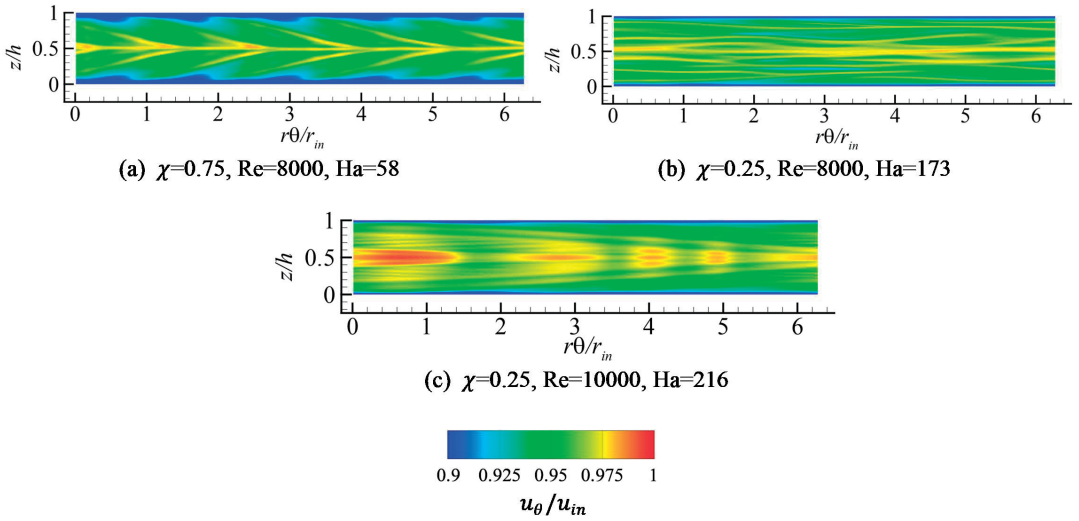


図 5：Hr_2=125 となるように (a)χ=0.75, Re=8000, Ha=58，(b) χ=0.25, Re=8000, Ha=173，(c) χ=0.25, Re=10000, Ha=216 とした場合の内円筒近傍の周方向流速分布

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，楔形の高速ストリーク発生条件に対する，レイノルズ数，ハルトマン数，半径比の影響を解明するとともに， MHD 相互作用の強さを示す指標を新たに導入することで，本現象を一般化することに成功した．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．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

今年度, 本変換装置内での新たな MHD 相互作用の指標を見出すことに成功し, レイノルズ数, ハルトマン数，半径比に対する相似則を見出した．楔形ストリークは流路内に渦の軸が印加磁場の方向に揃った準 2 次元構造 (Q2D) ができていることが, これまでの研究で示唆されているが, 本研究により得られた条件でも，Q2D が出現しているか，更なる研究が必要である．また，楔形ストリークが，回転トルクやエネルギー変換効率へ与える影響を解明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）

[1] Hiromichi Kobayashi, Takahiro Hasebe, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana: Turbulent Taylor-Couette flow with magnetohydrodynamic interaction in axial magnetic field, *Physics of Fluids*, 37 (2025), 027165, doi: 10.1063/5.0255100.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Takahiro Hasebe, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana, Hiromichi Kobayashi: Effects of Channel Geometry on MHD Taylor-Couette flow with end walls, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024)*, Sendai, Japan (2024) 2 pages.

[3] Hiromichi Kobayashi, Takahiro Hasebe, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana: Turbulent Taylor-Couette flow with MHD interaction in axial magnetic field, *26th International*

Conference of the Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2024), Daegu, South Korea (2024) 2 pages.

[4] Hiromichi Kobayashi, Takahiro Hasebe, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana: LES of MHD Taylor-Couette flow for control of wind turbines, *9th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS)*, Lisboa, Portugal (2024) 1 page.

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**

なし

Project code	J24I052
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd 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

In large outdoor fires, the release of combustion products is known to cause severe visibility and health concerns. 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 LiB cells found in EVs. In this project between Reax Engineering, Institute of Science Tokyo, and Tohoku University, the particulate morphology generated from LiB combustion will be quantified using thermophoretic sampling and subsequent transmission electron microscopy (TEM).

2. Details of program implement

To sample particulates that are generated, the well-known principle of thermophoretic sampling will be used. In the presence of a temperature gradient, the hot particles will be collected using cold grids that may be used for Scanning Electron Microscope (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) analysis. The very limited prior studies in for LiB combustion have used SEM. While the SEM images are useful, TEM analysis, and in particular high-resolution TEM (HRTEM) is needed to provide finer details of the interior structures of the particulates. The research project will harness TEM capabilities at Tohoku University. The LiB combustion experiments will also utilize combustion expertise in the Maruta laboratory at Tohoku University. To demonstrate the feasibility of the study, one type of LiB cell will be used in the project, and other cell types may be considered in the future. The work will also build on current working using the microflow reactor, where the combustion of various chemical constituents in LiB is being performed at Tohoku University.

Figure 1: LiB Cell Exposed to 30 kW Flame Exposure

3. Achievements

In the second year of this project, experiments were conducted to expose LiB cells to an actual fire exposure (Fig. 1). In these experiments, the LiB was placed in an aluminum support pan and a 30 kW direct flame exposure was applied under the LiB cell. Fig. 2 shows cell failure and resulting emissions. The research team presented the project at the 2024 ICFD symposium held in Sendai, Japan. The proposer was invited to be a speaker and panelist at the 7th International Sooting Flame Workshop, a prestigious workshop held in partnership with the International Combustion Symposium. Finally, proposer was also appointed Executive Guest Editor for a special issue for the journal Applications in Energy and Combustion Science.

Figure 2: LiB Cell Failure and Emission

4. Summaries and future plans

It is expected that the project will develop new knowledge on the morphology of particulates generated from LiB combustion processes. The proposer is the convenor of ISO TC92/WG14, by global ballot. A significant update was the publication of ISO TR/24188:2025, Secon Edition, *Large Outdoor Fires and the Built Environment –Global Overview of Different Approaches to Standardization*. Now that a method has been determined to initiate LiB failure, efforts to collect particulates will proceed.

5. Research results

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

[1] S.L. Manzello, Progress to Develop Globally Harmonized International Testing Standards for Large Outdoor Fires, Including Wildland-Urban Interface (WUI) Fires, *Fire and Materials*, published on-line, 2024. https://doi.org/10.1002/fam.3258

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

[2] S.L. Manzello, Wildland-Urban Interface (WUI) Fires, The Next Frontier in Particulate Characterization in the Face of Changing Climate, *7th International Workshop on the Measurement and Computation of Reacting Flows with Carbon Nanoparticles*, July 2024 (invited).

[3] S.L. Manzello, S. Suzuki, and K. Maruta, Characterization of Particulate Morphology from Lithium-Ion Battery Combustion Processes, *ICFD 2024*, Sendai, Japan, 2024.

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 ISO TR24188: 2025.

(International Standards) ISO TR/24188:2025, Large Outdoor Fires and the Built Environment — Global Overview of Different Approaches to Standardization, Second Edition (proposer project leader and convener of this international standard)

課題番号	J24I053
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	2024.4～2025.3
継続年数	3年目

高感度表面変位検出による量子ナノ構造内のフォノン伝搬特性評価

Development of Phonon Propagation in Quantum Nano-structures by Using High-sensitivity Detection of the Surface Displacement

福山 敦彦*†, 大堀 大介**††, 原田 知季*, 宇野 巧人*, 碇　哲雄*, 寒川 誠二***,**
*宮崎大学, **東北大学流体科学研究所, ***台湾陽明交通大学
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

超スマート社会の実現にはナノスケール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，量子ナノ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が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，デバイスの発熱・放熱が高性能化を阻害するため，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．そこで，流体科学研究所においてバイオテンプレートを用いた中性ビームエッチング（以下，NBE）法により規則配列ナノピラー（以下，NPs）を作製し，宮崎大学で新規に開発されたレーザーヘテロダイン光熱変位（以下，LH-PD）法を適用する．これによって NP のフォノン物性を明確にし，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 NBE 法により 725 μm の SOI 基板上に 90 nm の 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．バイオテンプレートであ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が，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)の三種類の試料を用意した．

新規開発した LH-PD 法は光照射によって形成したキャリア（電子あるいは正孔）の非発光再結合時に放出した熱で生じた表面変位量を測定出来る．昨年度は図 1 に示す様に 808 nm の励起光と 632.8 nm の検出光の照射位置を挟む形で Al 電極を蒸着し，5 V の電圧を印加して表面膨張量を測定した．その結果，NP-27 試料の変位量変化がもっとも小さいことが分かったが，その要因については分からなかった．

そこで今年度は実験条件の見直しから開始した．参照試料として Si バルク試料を用意して図 1 と同様に Al 電極を蒸着し，印加電圧を 0～5 V に変化させて表面変位量を測定した．その結果，印加電圧に比例して表面変位量が増加したことが確認できたことから，用意した 3 つの試料に対して電界印加前後の表面変位量時間変化を測定した．結果を図 2 に示すように，全ての試料の表面変位量が 5V 印加で増加した．変位量最大値における増加量を算出して表 1 に整理したところ，NP-27 試料の増加量が 0.2%ともっとも小さくなった．外部電界印加でキャリアがドリフトすることで非発光再結合損失が増加すると解釈されるが,NP-27 試

料の場合には電界印加によるキャリアの再結合損失が殆ど変化しなかったことを示唆している．この結果は昨年度と同じ結果であり再現性があることを確認できた．

NP-27 試料の増加量が小さかった原因を明らかにするために，COMSOL Multiphysics ソフトウエアによる理論計算を実施した．計算では，光吸収によるキャリア数の増加や再結合によるキャリア数減少の他に，外部電界（ドリフト）によるキャリア数の増加も考慮した連続の方程式を用いた．なお，今年度は電子だけでなく正孔の連続の方程式も用いた．その後，発生した熱の熱拡散方程式と熱弾性方程式を用いて表面変位量を算出した．実験結果へのフィッティング解析から，NP-27 試料がもっとも長いキャリア寿命を示すことが示唆された．NP 間隔が狭くなるとその間隔が電子の平均自由行程（～10 nm 程度）に近くなるため，電子の再結合損失割合が増加する．結果として，再結合で放出される熱量が増加するため表面変位量が増加した．一方，NP 間隔が広くなると埋め込み材料である SiGe の厚さが増加する．臨界膜厚を越えると Si と SiGe の格子定数の違いに起因する歪みが形成される．これによりキャリアの再結合損失が増加し，表面変位量が増加した．図 3 に示す様に，キャリア再結合損失を促す二つの要因の関係性から，今回 NP-27 試料の再結合損失が抑制されてキャリア寿命が長くなったと理解できる．

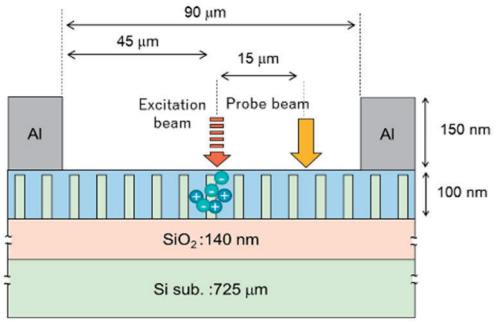


図 1：測定配置概略

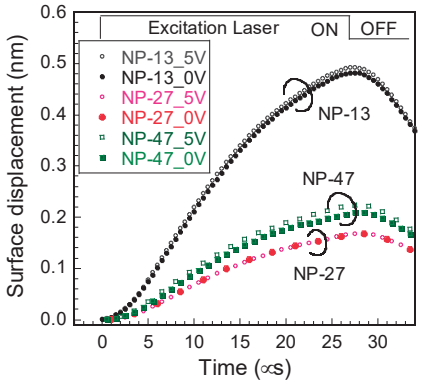


図 2：外部電場印加による変位量変化

表 1 ：5V 印加による変位量最大値の増加率

試料名	NP-13	NP-27	NP-47
増加率(%)	2.1	0.2	7.2

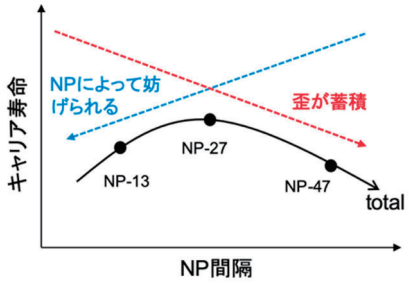


図 3：NP-27 のキャリア寿命が長い理由の考察

3. 研究目標の達成状況

今年度は参照試料として Si を用いて電界印加による表面変位量が増加することを改めて確認した後，東北大流体研で作成した Si-NP/SiGe 複合膜試料の電界印加による表面変位量変化を調査した．その結果，NP 間隔が 27 nm の時に表面変位量増加率がもっとも小さい結果を得た．電子と正孔の両方のキャリアを考慮した連続の方程式を用いた理論計算を実施して実験結果と比較した結果，NP 間隔が 27 nm 時にキャリア寿命がもっとも長いことが分かった．量子ナノ構造導入によって熱の伝播（発熱）を抑制しつつ電子移動（キャリア寿命）を保持できる可能性を提示できたことから，達成度は 8 割と判断する．

4. まとめと今後の課題

本研究課題では，電子とフォノンの平均自由行程の差に着目し数 10 nm の間隔で規則配列させた Si-NP を用いることで，電子移動を保持しつつ熱の伝播のみを抑制できる複合膜の実現を目指した．結果，NP 間隔が 27 nm 時に熱の伝播（発熱）が抑制されてキャリア寿命がもっとも長くなることが分かった．つまり量子ナノ構造導入で熱の伝播（発熱）を抑制しつつ電子移動（キャリア寿命）を保持できる可能性を提示できた．しかしながら，各層の界面熱抵抗が不明であったため，理論計算との比較から算出されたキャリア寿命の定量的確かさは低かった．そのため，新たにナノサイズ構造半導体および金属等界面の熱伝播特性の定量的評価を目的とした研究課題を提案し採択された．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読付き国際会議，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] 細越裕太，原田知季，碇哲雄，福山敦彦：光ヘテロダイン光熱変位法を用いた Si と Al 間の界面熱コンダクタンスの推定，第 15 回半導体材料・デバイスフォーラム，(2024)，P3-8.

[2] Y. Uno, T. Harada, D. Ohori, K. Endo, S. Samukawa, T. Ikari, A. Fukuyama: Estimation of Carrier Mobility in Si-Nanopillar/SiGe Composite Films by Laser Heterodyne Photothermal Displacement Measurements under Electric Field, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), OS3-3, pp. 390-392.

[3] T. Harada, T. Ikari, and A. Fukuyama: Development of a laser heterodyne photothermal displacement method to evaluate the carrier and heat propagation in semiconductors, *Abstracts of the 17th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications, Nagoya, (2025).*

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J24I054
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2024 ~ March 2025
Project status	1st 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, and has the feature of major factor limiting the application of epoxy resins. However, in one of our experiments, we found that it was difficult to achieve the expected crosslinking degree during the curing reaction of diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA) and 4,4'-diamino diphenyl sulfone (4,4'-DDS). There are several factors that contribute to this phenomenon, and here we speculate that the chain length may be one of the main reasons. It is both economically consuming and time-consuming to study the influence of chain length through experimental methods. Moreover, it is difficult to uncover the underlying mechanism of the chain length's effect due to the limited precision of existing experimental techniques for characterization at the molecular scale. Meanwhile, the nature of the crosslinked internal networks is significantly influenced by the chemical synthesis conditions, the composition of the reactive components, the stoichiometry of the constituents. Investigating the impact of these factors via experiment is expensive and times-consuming. In the meantime, it is difficult to observe the cross-linking structure, making it a challenge to uncover relationships between the polymer internal structure and its intrinsic physical and mechanical properties. Therefore, we try to use combined the scheme between quantum chemical calculation and molecular dynamics simulations to simulate the crosslinking process and investigate the relationship between the thermomechanical properties and the structure.

2. Details of program implement

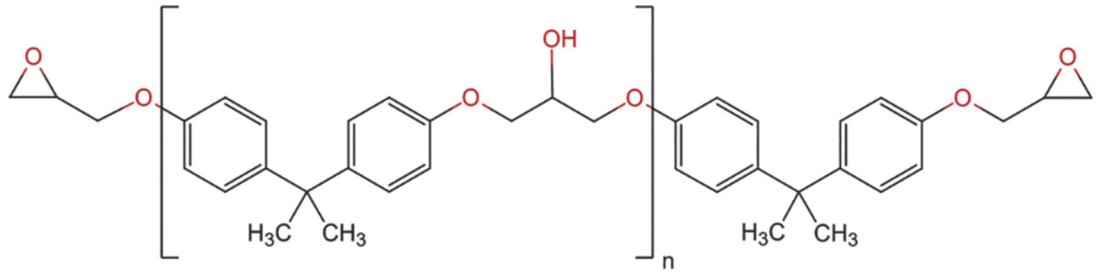
Initially, the GRRM software coupled with QC calculations using Gaussian 16 package, was employed to investigate reaction pathways from reactant to products, calculating activation energy and heat of reaction. The analysis was based on the B3LYP/6-31G* level theory.

Then, the crosslinking algorithm for the multicomponent system was developed. The basic idea of our algorithm is that we first detect the reactive pairs of C atoms in the epoxy group and N atoms in the amine group when their distances are within the cut-off distance of 5.64 Å, which can be seen as the first criterion. Next, the reaction probability k is considered as the second criterion for reaction, which is determined by the Arrhenius equation. The reaction will occur if $P < k$ (P is a uniform random number between 0 and 1) and the bonding state as well as the force field is redefined accordingly. Afterwards, the charges of the atoms around the reaction site will be updated.

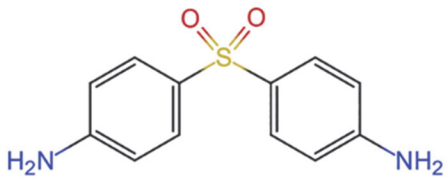
In the end, the curing process and thermomechanical properties of multicomponent system DGEBA/TGDDM/4,4'-DDS were investigated. When the proportions of each

component are comparable, the curing process is primarily determined initially by the component with a lower activation energy and subsequently by the component with a relatively greater quantity during the high conversion rate stage. Furthermore, a higher proportion of TGDDM in the DGEBA/ TGDDM/4,4′-DDS system results in an increased number of ring structures, which in turn leads to enhanced thermomechanical properties. Our Python-LAMMPS integrated algorithm can be further developed for designing new multi-component epoxy resin materials.

To investigate the effects of the chain length of base resin, three different samples of DGEBA, denoted with an index n = 0, 1, 2, respectively, were adopted, and 4,4′-DDS was chosen as the curing agent as shown in Fig. 1. The structure of each monomer was optimized at the B3LYP/6–31G* level based on quantum chemical (QC) calculations. Then, the B3LYP/6–31G* level was utilized to calculate the atomic charges, and the restrained electrostatic potential (RESP) method was applied to assign the charge. Subsequently, DGEBA with index n = 0, 1, 2 was randomly mixed with 4,4′-DDS, corresponding to (896, 448) (56,896 atoms), (512, 256) (53,504 atoms), and (384, 192) (55,872 atoms), respectively, and labelled as DGEBA_1, DGEBA_2, DGEBA_3, respectively (the numbers in parentheses denote the quantity of the DGEBA and 4,4′-DDS, respectively).



(a) diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)



(b) 4,4'-diaminodiphenyl sulfone (4,4'-DDS)

Fig. 1. Molecular structure of (a) base resin, DGEBA; and (b) curing agent, 4,4′-DDS. The number of repeating units is denoted by n.

3. Achievements

The crosslinking algorithm for the multi-component system was developed. We uncovered the relationship between the thermomechanical properties and the crosslinked structure based on our algorithm. Moreover, the negligible effect on thermal conductivity is closely linked with a slight change in the monomeric degree index (MDI), reflecting the whole internal intrinsic structure. Furthermore, the effect on Young's modulus and yield stress has a deep relationship with the ring degree index (RDI), i.e., higher RDI demands more non-bonded energy for the collective movement of monomer

chains. Our systematic investigation unifies the mechanism of the impact of chain length on various thermomechanical properties, which is instructive for the improved performance of epoxy resins

4. Summaries and future plans

We have already developed the crosslinking process for multi-component epoxy resin systems unified the mechanism of the impact of chain length on various thermomechanical properties. Furthermore, we investigate the relationship between multi-component systems and the thermomechanical properties. In the future, the plans are as follows: (1) developing the crosslinking process for the reactive polymer materials, (2) investigating the catalysist effects on the crosslinking process, and (3) uncovering the relationship between the thermomechanical properties and the structure and trying to design the high thermomechanical reactive polymer materials.

5. Research results

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

[1] Yinbo Zhao, Gota Kikugawa, Zhengming Huang, Yan Li, Length effect of short base resin on thermomechanical properties of crosslinked epoxy resin via molecular dynamics simulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 225 (2024), pp. 125400.

[2] Yinbo Zhao, Gota Kikugawa, Keiichi Shirasu, Yoshiaki Kawagoe, Tomonaga Okabe, Constructing and characterizing various multi-component crosslinked epoxy resins based on molecular dynamics simulations with a curing reaction model, *Polymer*, 297 (2024), pp. 126817.

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

Not applicable

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

課題番号	J24I055
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	2 年目

マグナス風車の性能向上に向けたフィン付き回転円柱の非定常流れ場の解明とフィン形状の最適化

Elucidation of Unsteady Flow Fields Induced by Rotating Cylinder With Fins and Optimization of Fin Shape Improving Magnus Wind Turbine Performance

長谷川 裕晃*†，大林　茂**††
中川 健一*，奥山 一気*
*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

マグナス風車では，回転円柱が生み出すマグナス力（揚力）を増大させることで風車の性能向上につながる．その際，回転円柱表面にフィンを取り付けることで揚力が増大することが知られている．また，これまでの成果で，フィン形状の違いが発生する揚力に影響を与えることを明らかにした．しかし，回転中に時々刻々と位置が変わるフィンと主流とが干渉することで生じる流体力変動と流れ場の関係は理解されていない．そこで，本研究ではフィン付き円柱回転中の流体力変動と流れ場の対比を行い，マグナス力増大につながるフィンの影響を明らかにすることを目的とする．加えて，その際に発生するマグナス力と流れ場との関係に関するデータを，機械学習でフィンを最適化する研究（並行して実施中）の学習データとして利用できるように整理する．

2. 研究成果の内容

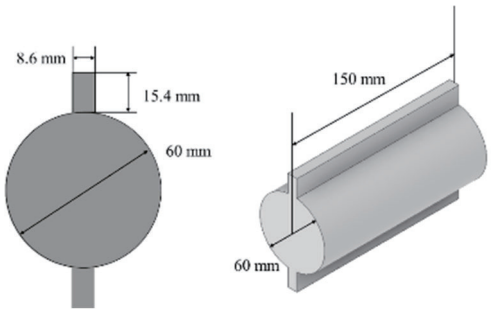
図 1 に従来の矩形断面のストレートフィンの実験モデルを示す. 直径D = 60 mm, 長さL = 150 mmの円柱に，フィンを 180° 離れた位置に 2 条取り付けてある．フィンのサイズは幅 8.6 mm，高さ 15.4 mm である．図 2 は，遺伝的アルゴリズム（GA）による最適計算で得られた GA フィンの実験モデルを示す. 周速比$\theta = 0.5$で揚力最大, 抗力最小となるように，フィンの断面形状を変化させた．円柱の回転は，円柱の回転速度と主流速の比である周速比 θ （$\theta = D\omega/2U_0$)で定義した．ここで，ωは円柱モデルの角速度である．実験は，東北大学流体科学研究所の小型低乱風洞を使用し，時系列 PIV による流れ場と流体力の取得を行った．

図 3 に，風洞実験で得られた周速比ごとの揚力係数 C_L の結果を示す．低風速風車の作動を考慮し実験は，主流速U_0 =4.0 m/s で行った．測定は，$\theta = 0.1 - 0.7$の範囲を 0.1 間隔で行った．GA フィンの最適化の条件として設定したU_0 =4.0 m/s，$\theta = 0.5$で，GA フィンがストレートフィンに比べ揚力の増大が達成できている．フィンの効果は，主流との干渉で発生する渦の挙動に関係する．そのため，フィンの断面形状が，発生する渦に影響している．そこで，１回転中の揚力変動と流れ場の対比を行った．回転円柱の実験系では，回転による慣性力の影響を完全に排除できない．そこで，揚力変動の傾向を詳しく見るために，慣性力の影響を無視できる条件としてU_0 =16 m/s, $\theta = 0.2$で揚力変動と流れ場の対比を実施した．

図 4 に揚力変動の結果を示す．測定は，1 回転で 1° ごとのデータを取得できるようサンプリングクロックを調整した．実験の結果，揚力には 1 回転中に 4 つのピークが存在し，ピークの角度では，ストレートフィンと GA フィンの揚力差が大きくなることが確認された．

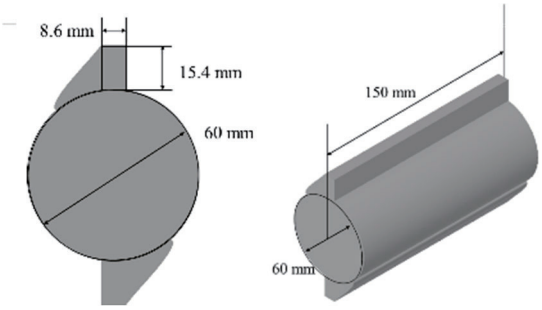
図 5 に，回転円柱周りの速度ベクトルと渦度コンターを示す．フィン位置を示す角度 α は，図中にポンチ絵で描いてある．$\alpha = 10°$では，円柱上面でフィンと主流との干渉により，フィン背後で時計回転の渦の成長が起こる（図 6（a）の赤丸印）．フィンの角度が増加すると干渉が強まり，より強い渦が生成される（図 6（b）の赤丸印）．この渦は，円柱周りの循環を強める．そのため，$\alpha = 30°$で C_Lの値がピークとなっている．このピークの角度は 2 つのフィン形状でほぼ同様となるが，GA フィンの方が大きな値となっている．GA フィンは，フィンの上流側が傾斜しており，上方への押し上げが弱くなる．この結果，より強い渦が円柱近傍に生成されるためである．一方，このフィン角度では，下面側の流れは，フィンの影響はない．そのため，2 つの形状で同様な流れとなり，C_Lのピークは上面側のフィンの効果で得られていると言える．

C_L が負のピークを迎える$\alpha = 80°$では，円柱上面の渦はフィンから剥がれ，フィンの影響がなくなる．また，円柱下面側の流れは，フィン形状の影響がない．下面側の流れは，フィンが上流側に向かう方向に回転する．そのため，フィンと主流との干渉で反時計回転の渦が生成される．この渦は円柱周りの循環を減少させるため，C_Lが低下する．2 つのフィンで比較した場合，GA フィンの上流側の形状は直線的で，ストレートフィンと同じである．回転時に主流と干渉するフィン形状が同じため，下側のフィンによる C_L の値に，あまり違いが出ていない．



(a) 断面形状　　(b) 3D view

図 1：ストレートフィン



(a)断面形状　　(b) 3D view

図 2：GA フィン

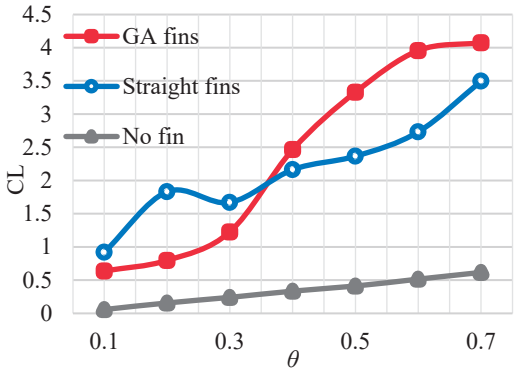


図 3：揚力係数（$U_0 = 4$ m/s）

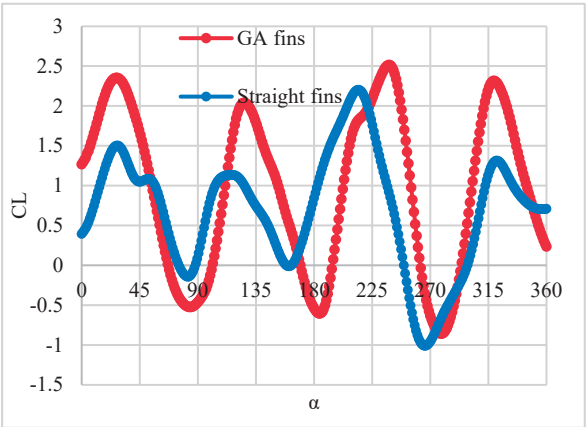


図 4：揚力変動（$U_0 = 16$ m/s, $\theta = 0.2$）

3. 研究目標の達成状況

円柱に取り付けたフィンの形状の違いによって引き起こされる流体現象を明らかにした．本年度は，フィンの三次元的な効果までは理解するには至らなかったが，時系列 PIV によりフィンの断面形状の違いが揚力獲得に与える影響についての知見を得ることができた．これにより，目標は概ね達成できた．

4. まとめと今後の課題

回転円柱に取り付けたフィンの断面形状が変わることで，主流とフィンとの干渉が変わり揚力生成に違いが生じる理由を調べるために，回転中の流体力変動と流れ場の関係を調べた．円柱上面では， 主流とフィンとの干渉により時計回転の渦が強まり，円柱周りの循環が強まることで，揚力が増大する．一方，円柱下面では，反時計回転の渦が生成されることで循環が減少し，揚力が低下する．今後は，後流での渦流れの三次元構造を構築することで，フィンの三次元的な効果について調べていく．

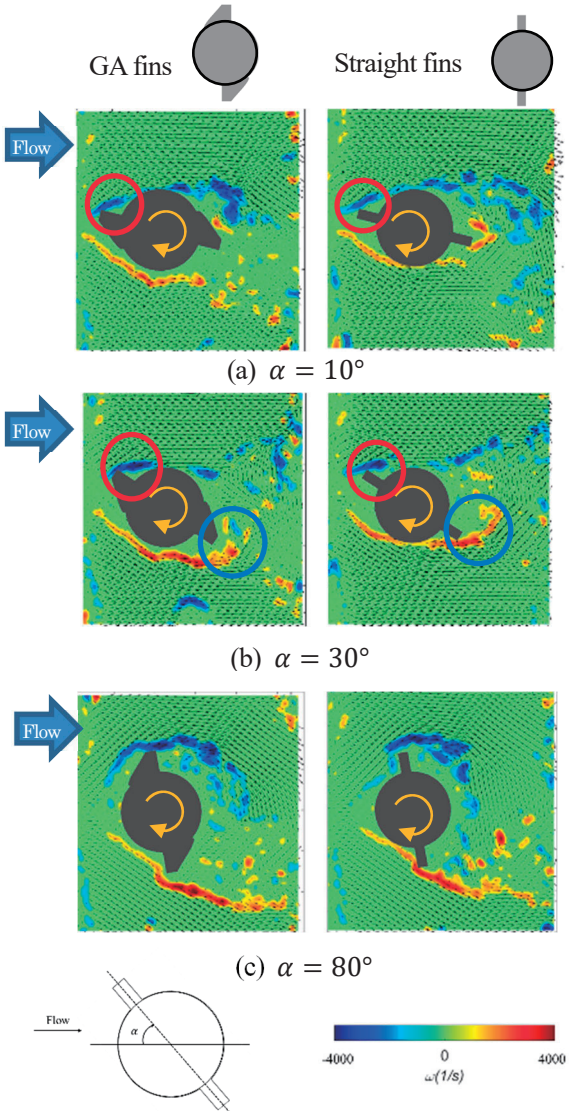


図 5：渦度コンター図($U_0 = 16$ m/s, $\theta = 0.2$, $\alpha = 10°$~$80°$)

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] 鳥飼和雄, 奥山一気, 長谷川裕晃, 大林茂: マグナス風車用フィン付き回転円柱のフィン形状の違いが揚力に及ぼす影響, 第 28 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 京都, (2024), GB122.

[2] I. Okuyama, H. Hasegawa, S. Obayashi: Flow Visualization of the Vortical Flow Field around Fins Attached to a Rotating Cylinder for a Magnus Wind Turbine, *International Workshop on Advanced Experimental Mechanics for Students and Young Researchers 2024（IWAEM-2024）*, Osaka, (2024), 64.

[3] I. Okuyama, H. Hasegawa, S. Obayashi: Scanning Stereoscopic PIV for 3D Wake Structure of Cylindrical Blades with Fins on a Magnus Wind Turbine, *The 24th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2024)*, Sendai, (2024), CRF-61, pp. 172-173.

[4] 奥山一気, 長谷川裕晃, 大林茂: マグナス風車の回転円柱ブレードに取り付けたフィンによる揚力増大, 日本機械学会東北支部第 60 期総会・講演会, 仙台, (2025), 1A4.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J24I056
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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

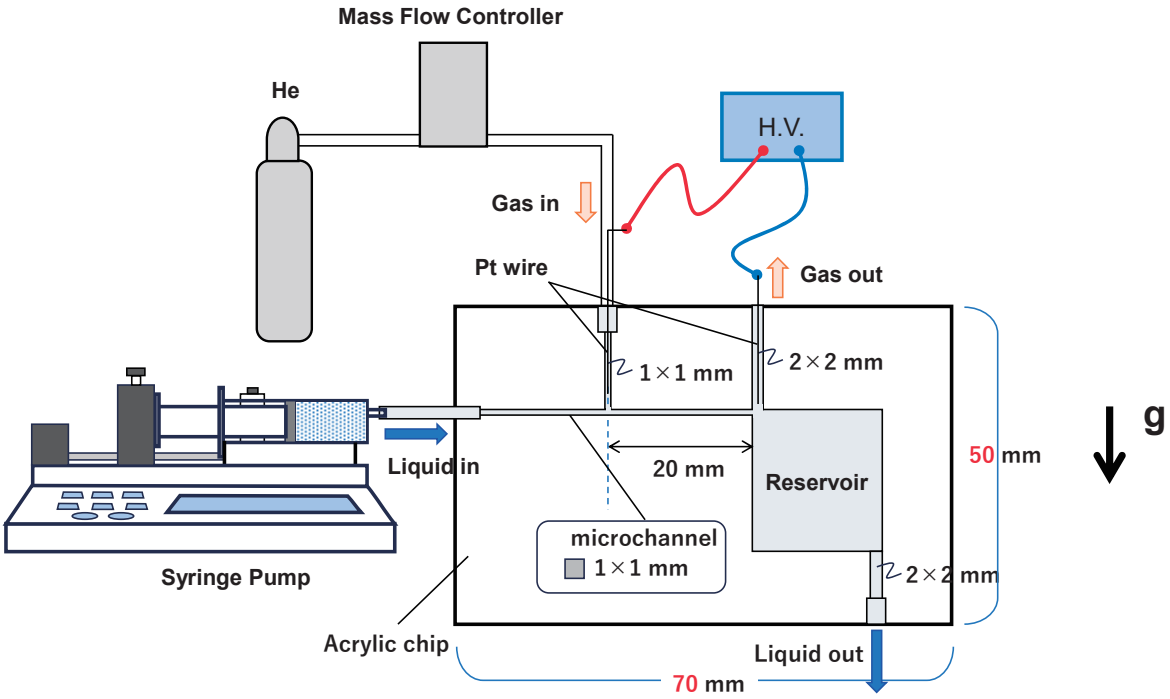
金ナノ粒子（AuNPs）は光電変換材料，触媒，バイオセンサー，医療診断（イムノクロマト診断薬）等で利用されている．なかでもエタノール酸化や，バイオセンサーへの応用が期待されるグルコース酸化等の触媒活性は粒径がφ2-5 nm で発現することが知られており**形状とサイズを均一に揃える単分散合成が重要**である．

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困難である．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，プラズマ気液界面積対溶液容積比率を大きくしてプラズマ還元効率を高めると共に，溶液の対流による核成長を抑えることが有効である．マイクロ流路化学反応装置では溶液中の物質移動は拡散が支配的であることが知られており，**“マイクロ流路内のプラズマ気液二相合流”**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**気液二相合流**を実現する流路構造および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）**を開発する．さらに**プラズママイクロリアクター**を用いて $HAuCl_4$ 水溶液中の金イオン還元による単分散 AuNPs の高速合成手法の確立を目的とする．

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（AS-ONE, SPE-1）で純水を導入し，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部にそれぞれ φ0.25 mm の Pt 線を挿入して正・負電極を形成する．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 50～250 mL/min，水流量を 950 μL/min および 1900 μL/min 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(1)プラズマ生成前，(2)プラズマ生成時の気液二相流の動画撮影の結果を示す．

(1) プラズマ生成前の気液二相流の観察結果：

初めにヘリウムガス流量を 200 mL/min から 50 mL/min へ徐々に減少させた場合の気液二相流の様子を**図 2** に示す．水流量を 950 μL/min 一定とする．ヘリウムガス流量 200 mL/min では気体が流路を塞ぐため液体が間欠的に流れる状況が生じて気液二相流は不安定となった．次に，ヘリウムガス流量 140～50 mL/min では安定した気液二相流が形成され，またガス流量の減少と共に気相が存在する面積割合（ボイド率）の減少が明らかに確認された．

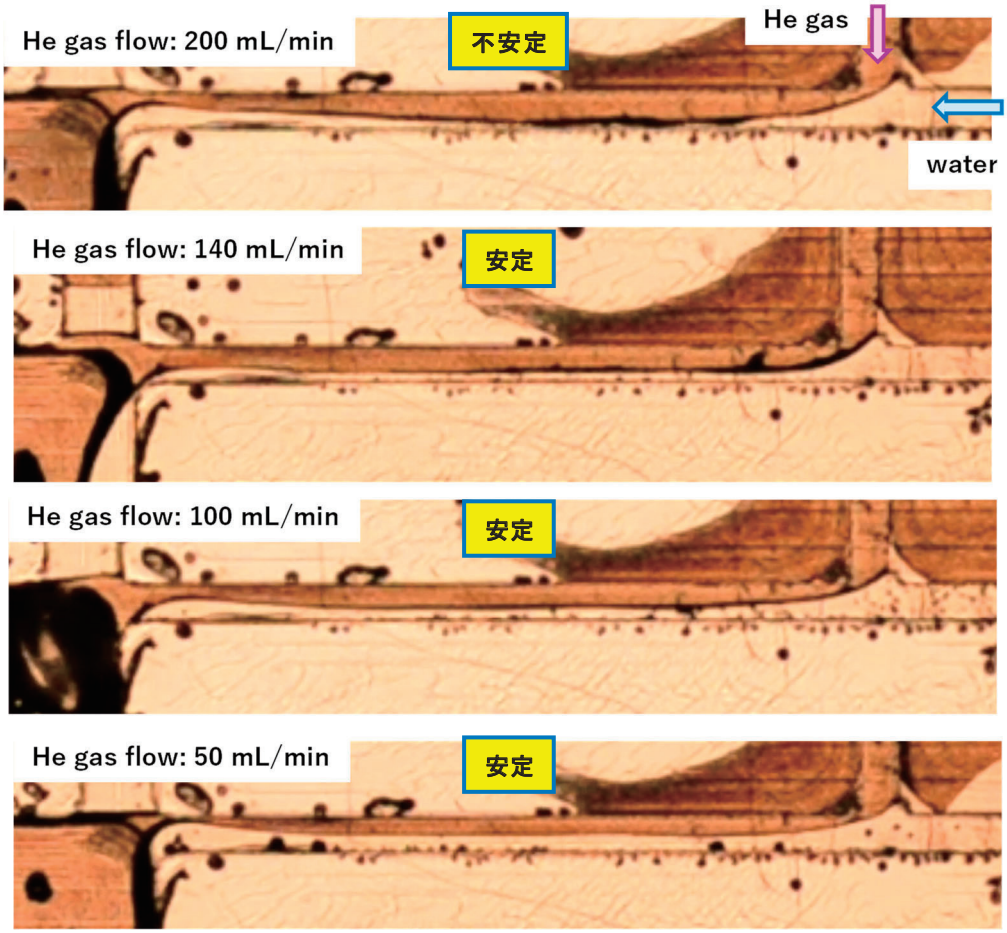


図 2：気液二相流のガス流量依存性

次に水流量を 2 倍の 1900 μL/min，ヘリウムガス流量を 250 mL/min にした場合の気液二相流の様子を調べた．気液界面が上下脈動する様子が確認された．**図 3** に脈動の 1/2 周期毎の画像を示す．気液界面の脈動の原因として，液体の流量増加による T 型ジャンクション部の水圧の増加による気相の圧縮と開放が要因と思われるが，詳細なメカニズム解明が必要である．

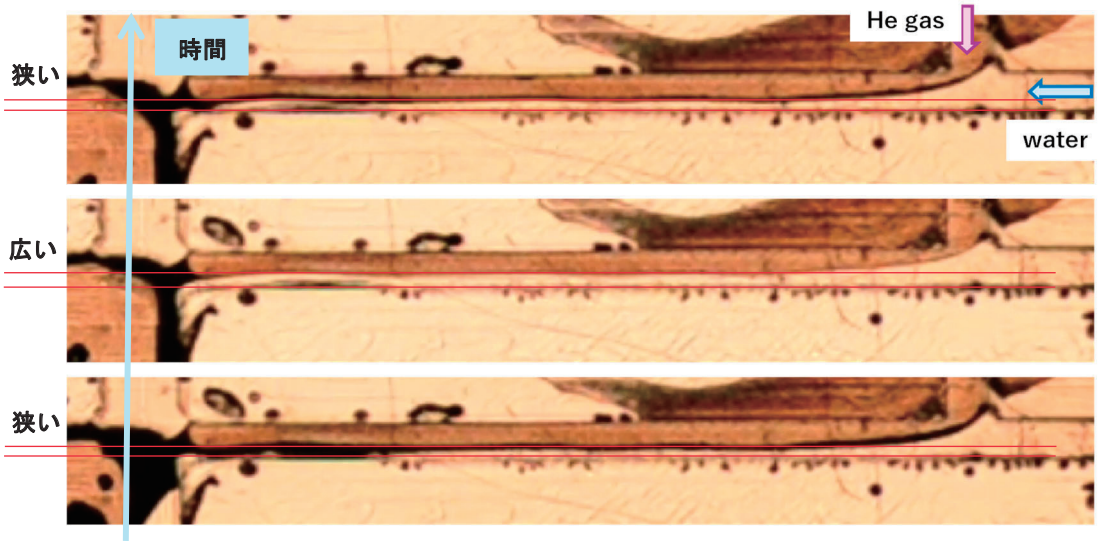


図 3：水流量増加による気液界面の上下脈動の様子

(2) プラズマ生成時の気液二相流の観察結果：

ヘリウムガス流量を 225 mL/min．水流量を 950 μL/min として，Pt 線電極に正極性パルス電圧（電圧値：15 kV，パルス幅：40 μs，パルス繰返し：50 Hz）を印加した時の気液二相流の様子を**図 4** に示す．流路内放電プラズマ発生に伴い水流が T 型ジャンクション手前で遮断される様子が確認された．これはストリーマ放電による衝撃波の発生，あるいはプラズマ化によるガス温度の上昇によるガス膨張のためと考えられる．

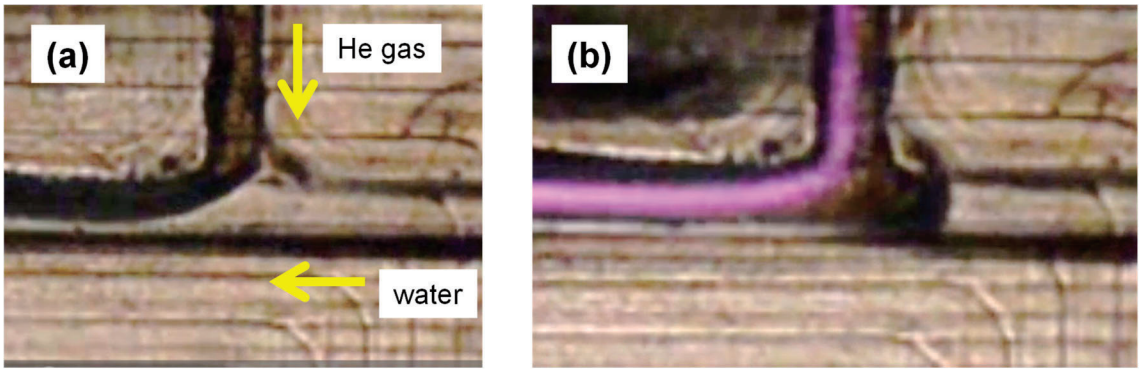


図 4：プラズマ気液二相流（パルス電圧値：15 kV）のプラズマ ON/OFF 時の様子

次にパルス電圧値を 11 kV に下げた場合の気液二相流の様子を**図 5** 示す．電圧値（投入電力）を下げることでプラズマ ON 時にプラズマ気相／液相の層状流の形成が確認できた．

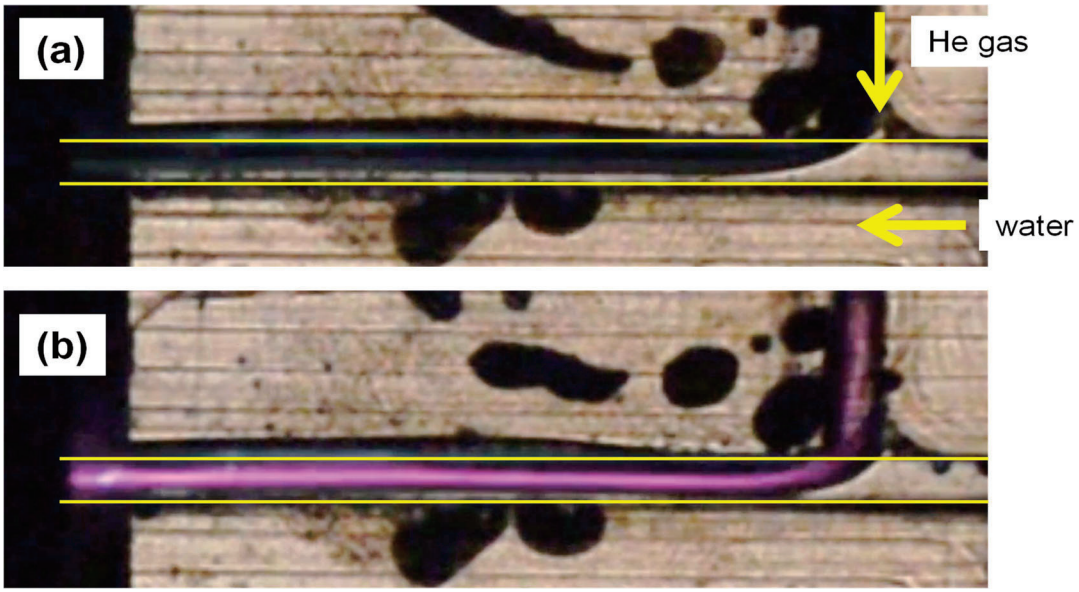


図 5：プラズマ気液二相流（パルス電圧値：11 kV）のプラズマ ON/OFF 時の様子

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上の 1 mm×1 mm 矩形断面流路（長さ 20 mm）内にプラズマ気液二相流を形成する条件（気/液流量，パルス電圧値）を見出した．また，水流量の増加による気液界面の上下脈動や，パルス電圧値の増加による液流の遮断現象などが明らかになった．しかし，気液二相流を用いた AuNPs 合成には着手できていないため**達成度は 70%**と評価される．

4. まとめと今後の課題

T 型ジャンクションを用いたマイクロ流路プレート（流路断面：1 mm×1 mm）上でプラズマ気液二相流を実現する条件（ヘリウムガス流量：50～250 mL/min，水流量：950 μL/min，パルス電圧値：11 kV）を明らかにした.

今後，$HAuCl_4$ 水溶液を液相としたプラズマ気液二相流による単分散 AuNPs 合成の知見を確立する.

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] H. Yoshiki, A. Enta, T. Nakajima and T. Sato: Development of a Plasma-Liquid Interfacial Reactor on a Microfluidic Chip, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-44, pp. 129-130.

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	J24I057
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	1 年目

ナノメモリ高性能化のためのデバイス加工技術に関する研究

Investigation of Device Fabrication Techniques to Improve Nano-memory Characteristics

大野 武雄*†，濱田 康誠*，西郷 寧晃*
大堀 大介**，尾崎 卓哉**，遠藤 和彦**††
*大分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

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，デバイス構造中の原子配列の乱れや欠陥の存在を低減することが要求される．本研究ではナノメモリ構造に対してスパッタリングやプラズマ照射などのデバイス加工技術を適用し，メモリ動作特性の高性能化を達成することを目的とする．

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 AZO/ZnO/ITO/PET 基板であり，AZO および ITO 電極に電圧を印加することで ZnO 中の酸素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．ここで，ZnO 膜はスパッタリング法によって成膜され，その膜に酸素プラズマから生成される酸素ビームの条件を変えて照射するとスイッチング特性に違いが見られた（図 1）．

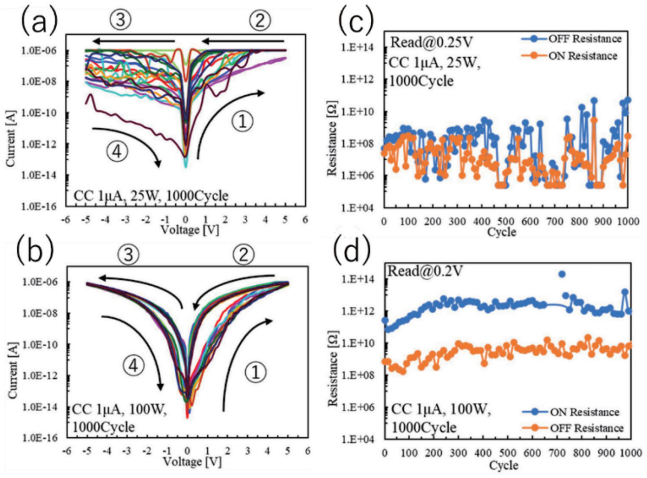


図 1：スイッチング特性への酸素ビーム生成に用いたプラズマパワーの影響．(a)および(b)は電流－電圧特性．(c)および(d)はスイッチング回数とオン・オフ抵抗値の関係

ICP プラズマパワーとして 25 および 100 W を用いたところ，100 W を用いた場合は安定したスイッチングが見られた一方で，25 W では不安定であった．それぞれのデバイスの ZnO/AZO 界面における酸素空孔濃度を X 線光電子分光法にて調査したところ，25 W デバイスでは 50.5%，100 W デバイスでは 44.8 %であった．つまり，100 W デバイスの方が欠陥濃度が低く，このことが安定したスイッチング動作となったことに関係していると考えられる．

3. 研究目標の達成状況

本研究の目標はナノスケールで制御された金属／イオン伝導体界面を得ることで主要なメモリ特性であるスイッチング回数の向上，駆動電流の低減であった．駆動電流については良好な結果となり，オン電流が 10^{-6} A，オフ電流は 10^{-14} A と非常に小さな値を得た．従って，本研究の目標の一つは達成したと言える．一方で，スイッチング回数に関しては1000回まで動作確認したが，この値はトップデータと比較すると劣っていた．

4. まとめと今後の課題

本研究ではデバイス加工技術としてプラズマをベースとした酸素ビーム照射の手法を用いてメモリ特性の向上を目指し，その結果，非常に小さな駆動電流を得た．この結果はメモリ動作の低消費電力化に対して有用であると考えられる．今後は，酸素ビーム照射条件の最適化を行うことでスイッチング回数の向上を目指す．

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] K. Hamada, T. Ohno, K. Minami, K. Endo: Effect of Oxygen Vacancies at the AZO/ZnO Interface on ReRAM Characteristics, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), OS3-8, pp. 405-406.

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	J24I059
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 年目

多様なプラズマ照射による植物種子への影響解析
Analysis of Plant Seed Radiated of Various Plasma

林　寧生*†，大堀 大介**††
蒲原 章広*
*光産業創成大学院大学，**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

未曽有の事態（大規模災害や大規模紛争等）が生じるとグローバル化されたサプライチェーンの機能が低下する．それにより，自国の物価上昇等の経済的不安定性が生じる.このような問題に対して，自国の食料自給率を高めておくことは有用である，その基盤の一つをなす農作物の生産において，種子の発芽制御は重要な要素である．プラズマ照射により種子の発芽が早くなったという研究事例は存在するが，その詳細は調査されていない．本研究では，その詳細を解明する．

2. 研究成果の内容

背景：観葉植物は，人間が仕事環境で感じるストレスを低減する効果がある[1,2]．観葉植物の内，ハオルチアという観葉植物は人気が高い．特にハオルチア属の中でもハオルチア・コーペリ・トルンカータ(学術表記：Haworthia cooperi ver. Truncate)という植物の葉は透明で美しく人気がある[3]．ハオルチア・コーペリは，気温 7℃から 25℃で良く育ち，生息地は南アフリカの日陰である．発芽時期は，春である．発芽に必要な期間は，2 週間から 1 カ月である．発芽が生じるための条件は，冬から春への温度変化を再現することである．種子の価格は比較的高価で通常の観葉植物の 3 倍程度である．欠点は，長い発芽期間である．種子の発芽を促進方法の一つとして，プラズマ照射法がある[4]．これは，種子にプラズマを照射する方法である[4]．種子へのプラズマ照射により種子表面の親水性が向上し発芽が促進される[4]．しかし，ハオルチア・コーペリの種子に対してプラズマを照射した例はない．そこで，ハオルチア・コーペリの種子にプラズマを照射して発芽を促進する．

原理：プラズマには，熱・光（紫外光・可視光）・イオン・ラジカル・ラジカル分子(酸素種等)の 5 つの要素が含まれる．この内，植物の発芽には，ラジカル・ラジカル分子(酸素種等)が影響を及ぼしている[5]．ラジカルにより種子表面の油分が除去され親水性が向上する．親水性向上により発芽促進が生じる[4]．また，各種植物に対して発芽に適したプラズマ照射時間には最適時間が存在する[6]．

実験方法：プラズマ発生装置を用いてハオルチア・コーペリ・トルンカータの種子にプラズマを照射する．手順は 3 つの部分で構成されている．最初の段階では，18 個の試料を 3 種類に分ける．プラズマ照射なしの種子を試料 1，5 分間プラズマ照射した種子を試料 2，プラズマ照射後の種子を試料 3 とする．プラズマの照射時間は，カイワレ大根の種子へのプラズマ照射時間を参考にし

た[4]. 次の段階では, 試料 2 と試料 3 にプラズマを照射する. 最後の段階では, 試料の発芽したときの変化長（発芽長）を測定する. 発芽長の測定方法は, 試料をカメラで撮影し, その画像のピクセル数から算出する. なお, これらの試料を冷蔵庫で 5 度に 24 時間冷却した後, 25 度の水を種子に加えた時点を測定開始時間と定義する.

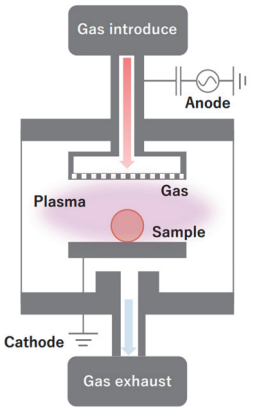


図 1 ：プラズマ照射装置の概略図

試料 : ハオルチア・コーペリ・トルンカータの表面の顕微鏡写真を図 2 に示す. 表面に直径 50 µm 程度の半球状透明な突起が複数ある. 全長は 1 mm, 重さは, 0.0001 g 以下であった. 種子は 18 個用意する.

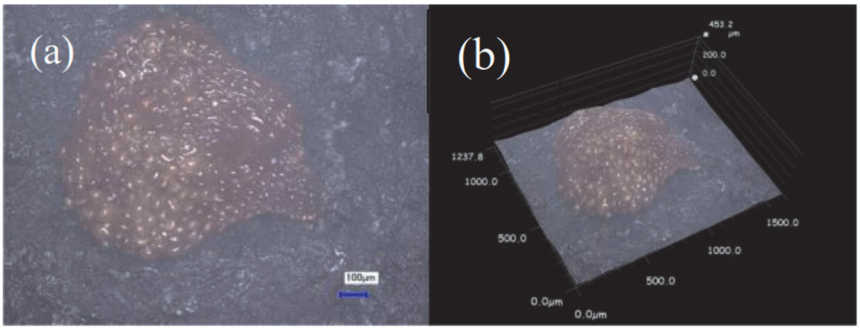


図 2: 試料の光学顕微鏡画像 (a)二次元画像, (b) 三次元画像

結果 : 240 時間後の試料 1～3 の発芽率は 17%であった. 発芽よる種子の変化長(発芽長)の時間依存性を図 3 に示す. 図 3(a)より 0 時間から 240 時間までは試料 1～3 は時間に対して単調増加した. 図 3(b)は図 3(a)の拡大図である. 70 時間において, 試料 1 の発芽長は 0 mm であった. 試料 2 の発芽長は 3 mm であった. 試料 3 の発芽長は 0.2 mm であった. これらより, プラズマ照射により発芽が促進された. また, プラズマ照射時間により発芽長に差異が生じた. これは, プラズマ照射時間プラズマ照射時間として最適なプラズマ照射時間がある可能性がある. これは, カイワレ大根の種子へのプラズマ照射実験(参考文献[6])の特徴と類似する. 図 3(c)に 70 時間後の試料 2 の画像を示す. 芽が出ていることが確認できる. 図 3(d)に 70 時間後の試料 1 の画像を示す. 芽が出ていないことが確認できる.

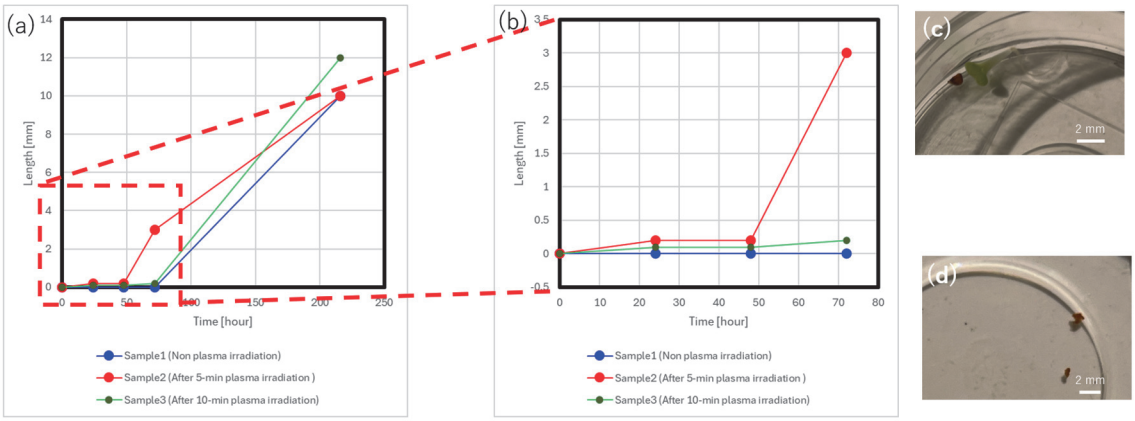


図 3 : (a) 発芽長の時間依存性, (b) 拡大図, (c) 70 時間後のプラズマ照射試料(試料 2)の画像, (d) 70 時間後のプラズマ照射なし試料画像(試料 1)

議論：種子の発芽促進プロセスは複雑であり多くの議論がなされている．発芽促進プロセスとして以下のような過程について提案したい．プラズマにより生成された OH ラジカルが水分と反応すると過酸化水素が生じる[7]．この過酸化水素という物質は，植物のアニューロン層を刺激し植物ホルモン(ジベレリン)の生成を促す作用をもつ[8]．さらに，この植物ホルモンはアルファアミラーゼを生成し種子の促進される [8]．つまり，プラズマ照射により植物内のホルモンがコントロールされている可能性があると考えられる．今回の実験で 10 分程度のプラズマを照射したときに 5 分程度のプラズマよりも発芽長の時間依存性が小さかった．この原因といて，プラズマ照射の長時間照射により水分量が減り過酸化水素の量が減少したことが考えられる．

参考文献：

[1] Wilson, A., Kendal, D. and Moore, J.L., 2016. Humans and ornamental plants: a mutualism. Ecopsychology, 8(4), p.257-263.
[2] Husti, A.M., Conţiu, I., Radu, M., Neacşu, I. and Cantor, M.A.R.I.A., 2015. Psychological benefits of ornamental plants used in office environments.
[3] Li, P., Ren, M., Chen, J., Yue, J., Liu, S., Zhu, Q. and Wang, Z., 2024. Transcriptomic Analysis of Green Leaf Plants and White–Green Leaf Mutants in Haworthia cooperi var. pilifera. Genes, 15(5), p.608. 4. Nuzhyna, N.V. and Gaydarzhy, M.M., 2015. Comparative characteristics of anatomical and morphological adaptations of plants of two subgenera Haworthia Duval to arid environmental conditions. Acta Agrobotanica, 68(1).
[4] Attri, P, Okumura, T, Koga, K., Shiratani, M., Wang, D., Takahashi, K. and Takaki, K. 2022. Outcomes of pulsed electric fields and nonthermal plasma treatments on seed germination and protein functions. Agronomy, 12(2), p.482.
[5] Kitazaki, S., et. al, 2014. Plasma induced long-term growth enhancement of Raphanus sativus L. using combinatorial atmospheric air dielectric barrier discharge plasmas. Current Applied Physics, 14, pp. S149-S153.
[6] Uchida Masato, Mikami Kazuyuki, Isomura Masao, and Kuwabata Shuji, 2015. "Dependence of Concentrations of Hydrogen Peroxide, Nitrate Ions, and Nitrite Ions on Irradiation Distance in Distilled Water Irradiated with Atmospheric Pressure Plasma Jet: HPLC Analysis." Proceedings of the School of Engineering of Tokai University, 55(2), pp.23-27.Ogawa Kenichi, "Plants Grow Vigorously with Reactive Oxygen Species," Chemistry and Biology, Vol. 40, No. 11, pp.752-756, 2002.

共同研究集会：1 回目，2024 年 10 月 25 日に種子(ハオルチアコーペリ・カイワレ大根)に対して高周波数プラズマ装置を用いてプラズマを照射した．1 回目，2025 年 2 月 26 日に種子(ハオルチアコーペリ・エンドウ豆の種子)に対して高周波数プラズマ装置を用いてプラズマを照射した．

3. 研究目標の達成状況

申請書記載事項「予想される成果」についての達成度は65%である. 理由は, 植物は様々な外乱の影響を受けやすく, 実験の精度を上げるにはより多くの実験が必要であるためである.

4. まとめと今後の課題

今まで調査されていなかった植物の種子へのプラズマ照射の影響について調査した. また, そのデータを元にプラズマの発芽への作用機序に対する仮説が立てられた.今後は, それらの影響の確実性を担保するべく多くの試料で実験を実施する. また, プラズマ照射による作用機序の仮説を検証する.

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議, 解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] A. Kanbara, N. Hayashi, D. Ohori: Evaluation of the Germination Process of the Haworthia cooperi ver. Truncate Under the Controllable Gas Plasma Radiation, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), OS-36, p.400-p.402.

[2] 林　寧生: プラズマ照射によるハオルチア・コーパリ・トゥルンカータの発芽促進, 第20回バイオオプティクス研究会, 津山工業高等専門学校, (2024), 12月13日―12月14日. p. 23-p. 26.

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	J24I060
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Harnessing Machine Learning for Enhancing Fluid Mechanics Understanding in Riblet Surfaces

Lavi Rizki Zuhal*†, Le Anh Tuan*, Kemas Zakaria*, Pramudita Satria Palar*
Duong Viet Dung**, Kento Kaneko***, Akira Oyama***, Aiko Yakeno****††
*Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Bandung Institute of Technology
**Vietnam National University, Hanoi
***Japan Aerospace Exploration Agency
****Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In recent years, riblet surfaces have garnered significant attention for their potential to reduce drag and enhance fluid flow characteristics in various engineering applications. This research proposal aims to advance our understanding of the complex fluid flows around riblet surfaces by employing Machine Learning techniques, including reduced order modelling and model decomposition. The primary objective is to unravel the intricate fluid flow structures and dynamics associated with riblet surfaces, shedding light on the underlying mechanisms responsible for drag reduction. Through the application of Machine Learning for reduced order modelling and model decomposition, this study seeks to provide valuable insights that can inform the design and optimization of riblet-based surfaces, ultimately leading to more efficient and effective engineering solutions in fluid dynamics.

2. Details of program implement

The project focuses on the utilization of dynamic mode decomposition (DMD) technique to investigate the flow physics of flow around riblets. DMD decomposes the flow field into several dynamic modes, in which we can then analyze each mode which is ranked according to the importance. The DMD is performed for the flow passes smooth plate and that with riblets of two different sizes. An example of the riblet shape is shown in Figure 1.

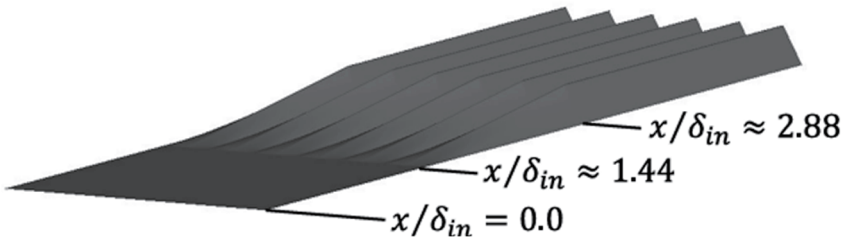


Figure 1: An example of the riblet attached to the smooth plate.

The DMD is applied to various flow quantities; Most notably, the vorticity and the wall normal velocity. The flow is already periodic, thus it was as expected that the modes lie exactly at the unit circle (no growing or decaying modes). However, the most important thing is that the modes can be successfully computed and visualized.

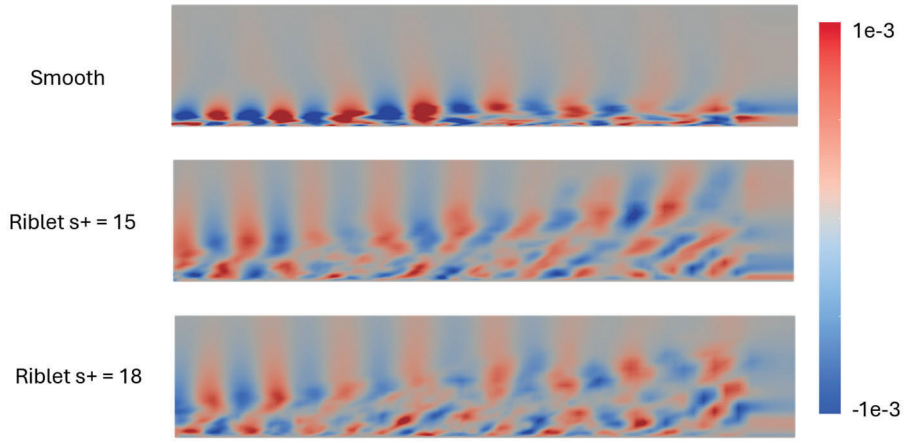


Figure 2: The first DMD modes for various plates (smooth and with riblets) for the normal wall velocity.

Figure 2 shows the first DMD modes. The figure shows how riblets affect flow structures in the boundary layer. The smooth plate shows a uniform pattern, indicative of stable flow, while the riblet-equipped plates display more chaotic and dispersed velocities, suggesting that riblets disrupt normal flow behaviors. This disruption is particularly evident as the spacing of the riblets varies, with smaller spacing (s = 15) seemingly organizing the turbulence more effectively compared to the larger spacing (s = 18). These visualizations underscore the potential of riblets to modify turbulence and reduce drag by influencing the wall normal velocities in aerodynamic applications.

The preliminary outcome of this research has been published in the ICFD 2024 Proceeding. The paper in the proceeding is the preliminary investigation of modal decomposition on the flow around a bluff body in a tandem configuration.

3. Achievements

The research has successfully applied DMD to understand the mechanisms of how riblets change the flow structure compared to the smooth flat plate. The relatively huge size of data has created a challenge to extract the DMD modes. Nevertheless, the DMD procedure has been successfully performed. This understanding is crucial to investigate the mechanism of how the introduction can lead to drag reduction.

4. Summaries and future plans

The project successfully applied the DMD for extracting important flow modes on the flow around riblets, which is compared to the flow around smooth flat plate. We applied the DMD on several flow quantities, that is, vorticity and wall normal velocity. Preliminary investigations that the presence of riblet significantly change the DMD modes, ultimately lead to the change in engineering quantities such as skin friction drag.

The research is still in the preliminary phase. We are currently investigating how these changes in flow characteristics ultimately lead to drag reduction. The DMD has proved to be a versatile data-driven methods for extracting such modes.

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] Bryan Goh, Kemas Zakaria, P. S. Palar, Viet Dung Duong, Lavi Rizki Zuhal, Akira Oyama, Kento Kaneko,and Aiko Yakeno, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-75, pp. 209-212.

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

Project code	J24I061
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	3rd year

らせん渦の乱流遷移メカニズムと乱流の統計的性質の解明
Study of Turbulent Transition and Statistical Properties of Turbulence of Destabilized Helical Vortex

Yuji Hattori*†, 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．ウインドファームの発生電力量を予測し，後流にあるタービンの疲労を予測する上で，風車タービン後流の速度分布を正確に予測することは重要な問題である．この問題の核心は，風車翼の翼端やハブにおいて生成されるらせん渦のダイナミクスである．

らせん渦は，長波長不安定性・短波長不安定性・相互作用型不安定性などにより不安定化し，最終的には乱流遷移する．研究代表者は，らせん渦のような曲りをもつ渦について，曲りに起因する曲率不安定性（短波長不安定性）が存在することを発見し，そのメカニズムを解明し，実証してきた．本研究は，物理的素過程としての不安定性に基づいて，らせん渦が乱流遷移する過程と遷移後の乱流の性質の体系的な理解を確立するものである．遷移過程と遷移後の乱流の性質が，らせん渦を特徴づける複数のパラメータ（太さ・捩り・軸流・本数・レイノルズ数）と擾乱の性質によってどのように決まるかを解明する．これにより，回転翼後流の統計的性質を予測可能な相図を作り，回転翼をもつ機器の性能向上に貢献する．

2. Details of program implement

2.1 らせん渦の長波長不安定性による乱流遷移過程の研究

Helical vortices appear in a number of devices which possess rotating wings such as helicopter rotors, wind rotors, ship propellers and turbine impellers. The nonlinear evolution of a helical vortex disturbed by a long-wave instability mode is studied by direct numerical simulation. The three-dimensional Navier-Stokes equations for an incompressible flow are solved using highly accurate numerical techniques assuming that the helical vortex extends periodically. Three values of the pitch are considered: L/R=0.2, 0.3 and 0.4. The wavenumber of the long-wave instability mode is set to k = 1/2 and 3/2 at which the growth rate is maximal. The Reynolds number based on the circulation of the helical vortex is Re = 3925.

It is found that the evolution and the topology of the resulting vortices depend crucially on the pitch L/R and the wavenumber at the nonlinear stage. In all cases, the helical vortex deforms significantly, which is followed by vortex reconnection for k=1/2. When k = 3/2, however, clear reconnection is not observed since the three-fold symmetry is preserved. The helical vortex expands as time proceeds (Fig. 1, left), while thin vortical structures emerge (Fig. 1, right). Eventually the flow becomes turbulent, although the fluctuations are weaker than k=1/2.

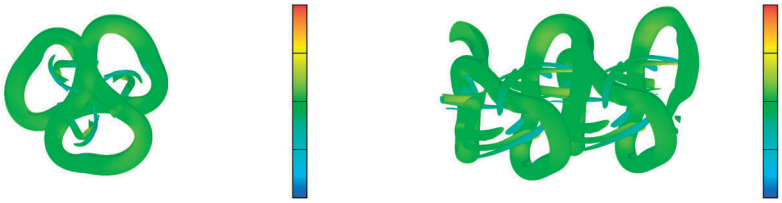


Figure 1: Structures of helical vortex shown by iso-surface of enstrophy.

3. Achievements

らせん渦が不安定化し乱流遷移する過程と遷移後の流れの性質を，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のが本研究の目的である．そのために，不安定性の全貌を明らかにし，各不安定性による乱流遷移過程を直接数値シミュレーションにより解明する．らせん渦を特徴づけるパラメータと複数の不安定性に対する依存性を理解するための枠組みを物理的素過程に基づいて構築するのが最終目標である．

本年度は長波長不安定性による不安定化過程について，非線形発展過程がらせんのピッチと擾乱の波長に強く依存することを明らかにした．k=3/2 の場合には，対称性のために渦の切りつなぎが明瞭な形では起こらず，らせん渦自体が半径方向に広がることがわかった．最終的に流れは乱流遷移するが，乱流強度は小さいこともわかった．

4. Summaries and future plans

本研究では 2021 年度までの公募共同研究で残された課題である乱流状態のパラメータ依存性および乱流の統計的性質の解明に取り組んだ．風車タービン後流の流れ構造は，乱流状態にあるため予測が困難である．このことがウインドファームの発生電力量の予測を困難にしている．本研究によりらせん渦の乱流化過程をパラメータ依存性と共に明らかにすることができれば，後流の構造の予測精度が向上し，発生電力の予測精度向上につながると期待される．さらには，下流に位置する風車タービンと後流の干渉を考慮することにより，ウインドファームにおける風車の配置を最適化する道を拓く．

5. Research results

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

[1] Yuji Hattori, Akihiro Hirano: Effect of pitch on nonlinear dynamics of helical vortex disturbed by long-wave instability, *J. Fluid Mech.* 991 (2024) R2. doi:10.1017/jfm.2024.529.

[2] Yonghui Xu, Ivan Delbende, Yuji Hattori, Maurice Rossi: A numerical procedure to study the stability of helical vortices, *Theor. Comput. Fluid Dyn.* 39 (2025), No. 15. https://doi.org/10.1007/s00162-024-00734-w.

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

[3] Yuji Hattori, Akihiro Hirano, Ivan Delbende, Maurice Rossi: Topological change of helical vortex disturbed by long-wave instability, *1st European Fluid Dynamics Conference*, 16 - 20 September 2024, Aachen, Germany.

[4] Yuji Hattori, Ivan Delbende, Maurice Rossi: Nonlinear Dynamics of Helical Vortex Disturbed by Long-Wave Instability, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, pp. 1091-1092, November 18 - 20, 2024, Sendai, Miyagi, Japan.

[5] Yuji Hattori, Makoto Hirota: Rotational-hyperbolic instability and ring-type elliptic instability: new unstable modes of rotating stratified fluids, *77th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics*, November 24–26, 2024, Salt Lake City, USA.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J24I062
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	２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，１つの多方向同時計測系のうち６台を小型の高速度カメラに置き換えて，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，２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，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次元密度計測に世界で初めて成功した．図１は小型高速度カメラで撮影された BOS 画像とそれらから３次元再構成を行なった結果である．二つの画像の撮影間隔は 200 μs で飛行マッハ数は約 1.2 である．カプセル模型の飛行方向から算出された模型の迎角は１枚目の画像の位置で 11.7°，２枚目の画像の位置で 11.1° であり，自由飛行中の迎角変化を捉えることに成功した．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り，より詳細な検証が実現できる．

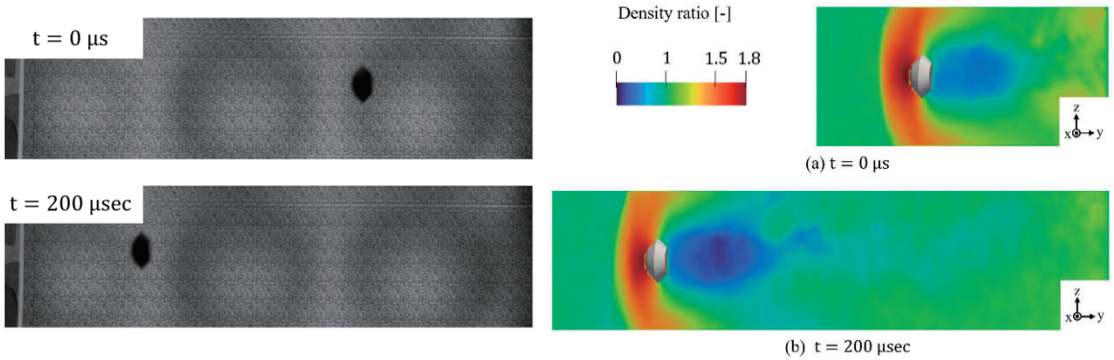


図１：小型高速度カメラによる異なる時刻における計測結果
BOS 画像（左）と３次元再構成結果（右，密度比分布）

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を用いた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ことに成功したため，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，11 台のデジタルカメラのうち 6 台を小型高速度カメラに置換し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箇所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．今後は新型カプセルを含むいくつかのカプセル形状を用いた実験データをさらに蓄積し，数値解析と併せて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] M. Yamagishi, M. Ota, K. Ohtani, H. Nagai: Three-dimensional density measurement around a Hayabusa re-entry capsule model in the ballistic range, *Experiments in Fluids*, Vol. 66, No.12 (2025), 9pages, doi: 10.1007/s00348-024-03943-5.

[2] M. Yamagishi, Y. Hirose, T. Inage, S. Udagawa, M. Ota, Y. Takikawa, K. Ohtani, H. Nagai: Three-dimensional density and flight direction measurement in the ballistic range, *21st International Symposium on the Application of Laser and Imaging technology to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal, No. 148 (2024)

2) **国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等**

[3] S. Nogi, M. Yamagishi, M. Ota, T. Inage, T. Ikami, J. Abe, K. Ohtani, H. Nagai; Measurement of Three-Dimensional Density Field around Hayabusa Capsule Model using Monochrome Random Dot Pattern at Two Different Moments, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-4, pp. 24-26.

[4] 山岸雅人, 野木 住隆, 堀尾 大行, 宮崎 龍汰, 廣瀬 裕介, 稲毛 達朗, 太田 匡則, 滝川侑弥, 大谷清伸, 永井大樹: 弾道飛行装置を用いたはやぶさカプセル模型周りの４次元密度場計測, 2024 年度衝撃波シンポジウム，仙台市，(2025), No. 1B2-2, 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	J24I063
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

遷音速/超音速境界層の層流制御技術の開発
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

We investigate the transition in high-speed boundary layer flows developing over concave surfaces and involving centrifugal instabilities (also known as Görtler vortices), using Direct Numerical Simulation (DNS). Our investigation focuses on the breakdown of these vortices into turbulence at different Mach numbers and wall temperature conditions. Specifically, we target high Mach number supersonic and hypersonic boundary layer flows, assuming a calorically perfect gas, and impose adiabatic or

isothermal wall conditions. We excite the centrifugal instabilities by imposing a small amplitude disturbance upstream. Downstream, high- and low-speed streaks develop in the flow, eventually evolving into mushroom structures before breaking into turbulence. The DNS results show that both sinuous and varicose-type instabilities dominate the breakdown process. We report and discuss multiple results, including iso-surfaces of the Q-criterion, contour plots of different variables, and statistical quantities.
In figure 1 we show iso-surfaces of Q-criterion colored by velocity magnitude for the Mach number M=5. This figure shows how the breakdown of Görtler vortices occur, as a combination of both varicose and sinuous type instabilities depending on the boundary conditions.

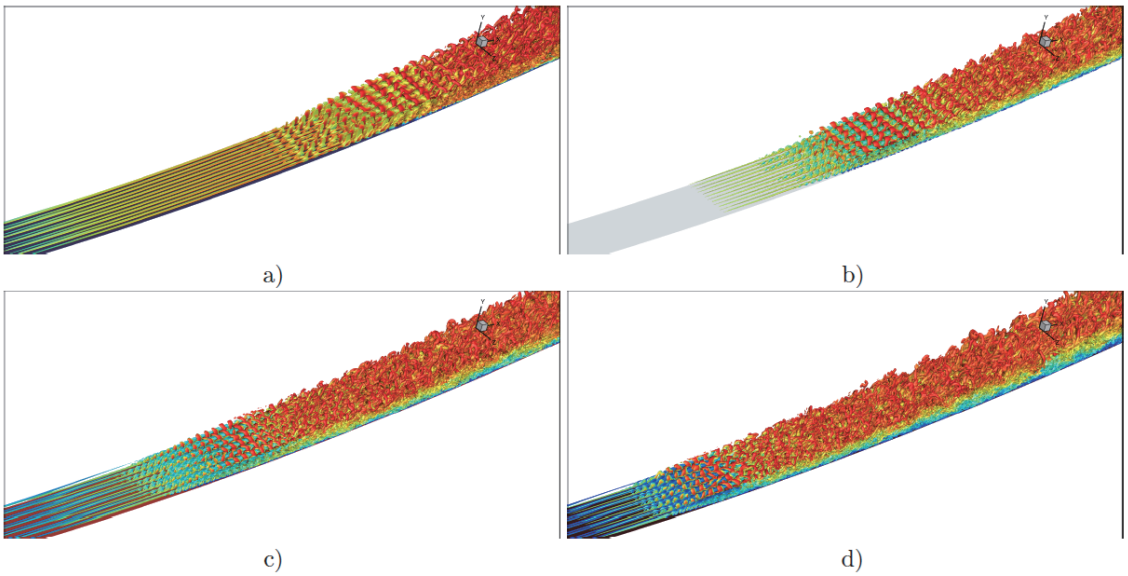


Figure 1: Iso-surfaces of Q-criterion colored by density, for Mach number 5: a) adiabatic; b) Tw = 300K; c)Tw = 200K; d) Tw = 100K.

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．

2024 年度は凹面上の超音速境界層に発生する Görtler 渦に対する温度境界条件の影響を調べた．壁面が低温になると，発生する渦のコヒーレンスが失われることなどを明らかにした．

4. Summaries and future plans

本プロジェクトの最終目的は遷音速/超音速境界層の乱流遷移の最適制御法を開発することである．そのために今後は最適制御理論と直接数値シミュレーションによる研究を行う．まず以前の公募共同研究で境界層方程式により確立された非線形最適制御法を直接数値シミュレーションにより検証する．2 次不安定性を抑制し乱流遷移を遅らせるための非線形最適制御法と熱輸送を最小化するための非線形最適制御法を検証する．壁面の温度境界条件として冷却・加熱の広い範囲の条件下で研究を行う．

さらに圧縮性 Navier-Stokes 方程式の随伴方程式を導き，変分法により制御アルゴリズムを導出する．導出された制御アルゴリズムを適用し，評価を行う．適用範囲を広げるため，

極超音速の場合を研究対象に加える.

5. Research results

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

[1] Omar Es-Sahli, Adrian Sescu and Yuji Hattori, Gauging Centrifugal Instabilities in Compressible Free-Shear Layers via Nonlinear Boundary Region Equations, *Fluids*, 9 (2024) 112. https://doi.org/10.3390/fluids9050112.

[2] Matthew Brockhaus, Adrian Sescu, Omar Es-Sahli, and Yuji Hattori, Breakdown of Görtler vortices in high-speed boundary layer flows: a DNS study, *AIAA Aviation Forum and ASCEND co-located Conference Proceedings* (2024) (15 pages). DOI: 10.2514/6.2024-3533.

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

[3] Matthew Brockhaus, Adrian Sescu, Omar Es-Sahli, Yuji Hattori, On the Breakdown of Gortler Vortices into Fully-Turbulent Boundary Layer, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, pp. 998-1001, November 18 - 20, 2024, Sendai, Miyagi, Japan.

[4] Asmaa Ahaggach, Adrian Sescu, Zamir Koshuriyan, Yuji Hattori, Effect of Wall Transpiration on Görtler Vortices in High-speed Boundary Layers, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, pp. 1068-1070, November 18 - 20, 2024, Sendai, Miyagi, Japan.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J24I064
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	2 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*†，都木　誠*，窪田 航陽*，小久保 琉史*，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．本研究では，感圧塗料（Pressure-Sensitive Paint; PSP）計測法によって角柱後方に生じるカルマン渦を計測したデータを取り上げ，この低次元化に取り組んだ．PSP 計測法は，りん光分子の酸素消光作用を用いた圧力計測法であり，PSP 発光強度の変化をカメラで計測することで圧力分布計測を行う．また PSP 計測法は絶対圧センサであるために大気圧近傍での微小な圧力変化の検出に際しては微小な発光強度変化を検出する必要がある．このため，一般に PSP 計測データは比較的大きなノイズを含む．前年度までに，このような大きなノイズを含むカルマン渦のような周期現象に対して，参照信号なしに位相平均データを作成するアルゴリズムを構築した．本年度は位相平均データを基に分解方法の検討を進めた．

2. 研究成果の内容

東北大学流体科学研究所次世代流動実験研究センター低乱風洞実験施設に設置の小型低乱風洞で実施した PSP 計測実験のデータを解析対象として用いた．これは角柱後方に生じるカルマン渦によって誘起される圧力分布を計測したデータとなっている．前年度までに，時系列クラスタリングすることにより位相毎にデータを分け，各位相帯で平均することで位相平均データを作成する手法を開発している．位相毎にデータを分けた後に，位相毎に平均化（位相平均）することで計測ノイズの影響を大きく低減することに成功している（図 1）．本研究ではこの位相平均されたデータをもとに，時系列の画像データを Triple-decomposition することを提案している．これにより図 2 に示すように，計測データを周期現象とそこからのズレならびにノイズに分離することに成功している．またこのように分解された圧力分布に基づいて最適化したセンサ位置により，固有直交分解（Proper Orthogonal Decomposition; POD）モードに基づいて最適化されたセンサ位置における表現に対してよりスパースな表現が可能となった．また本年度はここまでに提案してきた手法の汎用性を示すために Particle Image Velocimetry（PIV）による計測データに対する後処理法に関しても研究を進めた．

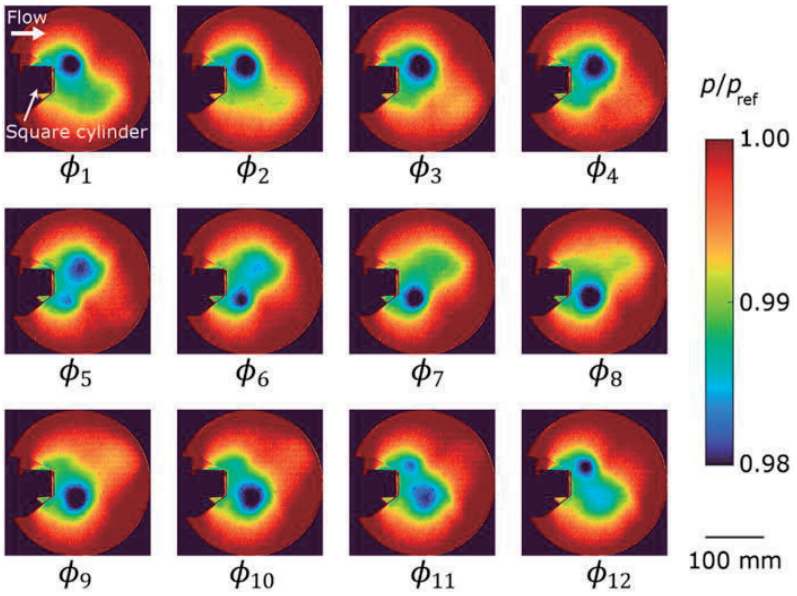


図 1：カルマン渦の位相平均データ例（文献[1]の Fig. 3 を転載）

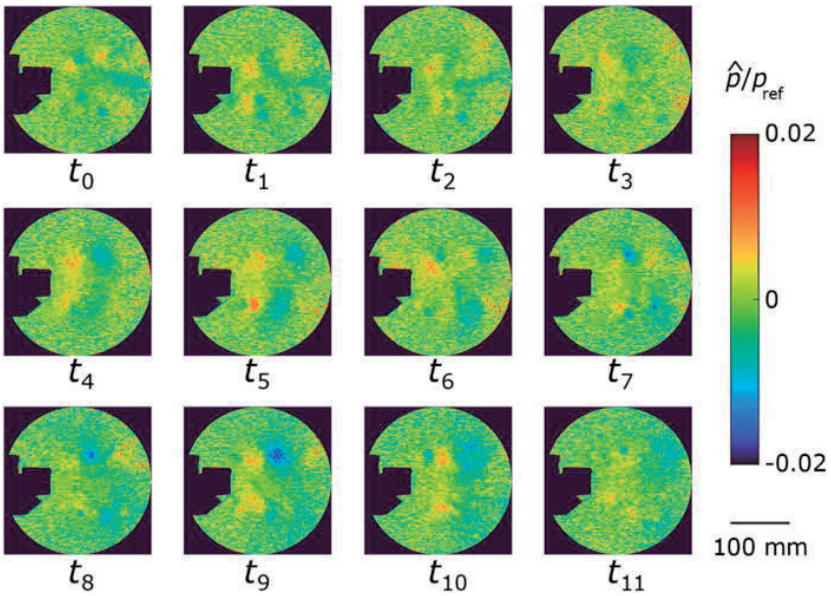


図 2：周期変動からのズレ（文献[1]の Fig. 7 を転載）

3. 研究目標の達成状況

前年度までの位相平均法を活用することで計測データの Triple-decomposition を実施し．よりスパースな表現を実現した．また計測ノイズが大きなデータにおいても周期変動と変動からのズレならびにノイズを分離することに成功した．

4. まとめと今後の課題

計測データの低次元化には，上位の POD モードのみを扱う方法が多く利用されている．しかし条件によっては上位のモードにおいてもノイズが含まれることがあり汎用性に問題があった．本研究では位相平均することで周期現象の解析においては汎用性の高い手法が提案できたと考える．今後は他の計測データにも適用していくことを検討する．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] K. Kubota, M. Takagi, T. Ikami, Y. Egami, H. Nagai, T. Kashikawa, K. Kimura, Y. Matsuda: Triple decomposition and sparse representation for noisy pressure-sensitive paint data, *Physics of Fluids*, Vol. 36, No. 7, (2024), 077158 (9 pages), doi: 10.1063/5.0220866.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] R. Kokubo, M. Takagi, T. Ikami, Y. Egami, H. Nagai, Y. Matsuda: Post Processing Method for PressureSensitive-Paint Data Using Machine Learning, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), OS18-11.

[3] M. Takagi, T. Ikami, Y. Egami, H. Nagai, T. Kashikawa, K. Kimura, Y. Matsuda: Whole Field Prediction from Sparse Sensors Using Neural Networks, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-6, pp. 29-30.

[4] 都木誠, 伊神翼, 江上泰広, 永井大樹, 柏川貴弘, 木村浩一, 松田 佑: ニューラルネットワークによる感圧塗料計測場のスパース予測, 可視化情報シンポジウム, 那覇, (2024).

[5] 黒澤美怜, 都木誠, 伊神翼, 小久保琉史, 江上泰広, 永井大樹,松田 佑: PIV 計測データにおける後処理法の検討と応用, 第 20 回学際領域における分子イメージングフォーラム, 調布, (2024).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J24I065
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd Year

Pathobiology-Hemodynamics Interaction in Aneurysms Genesis, Growth and Rupture

Muhamed Albadawi*†, Ryuhei Yamaguchi**, Khalid M. Saqr***, and Makoto Ohta**††
*Faculty of Engineering, Alexandria University, 21544 Alexandria, Egypt.
**Institute of Fluid Science, Tohoku University, 980-8577 Miyagi, Japan.
***Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport, 1029 Abou Keer, Egypt.
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Cerebral artery aneurysm (CAA) presents a significant risk to patient health, with the potential for rupture leading to life-threatening complications such as hemorrhagic stroke. Despite extensive clinical and research efforts, many questions remain regarding the mechanisms that govern aneurysm initiation, progression, and rupture. While hemodynamic forces are widely recognized as playing a central role, there is increasing evidence that aneurysm behavior is also influenced by wall biomechanics, cellular mechanobiology, and interactions with surrounding tissues.

Building upon the first-year findings, which successfully established a validated fluid-structure interaction (FSI) model for cerebral aneurysms, the second year of the project aimed to deepen our understanding of the multifactorial contributors to aneurysm evolution. The focus shifted toward more advanced and realistic modeling, incorporating variable mechanical properties and diverse boundary conditions to reflect the complex environment surrounding aneurysms in vivo.

2. Details of program implement

Cerebral artery aneurysms consider a substantial health risk, with rupture frequently resulting in critical outcomes such as subarachnoid hemorrhage and high mortality. Predicting rupture risk and understanding the biomechanical behavior of aneurysms are essential for guiding clinical decision-making and improving patient outcomes. This study investigates the hemodynamic and structural dynamics of cerebral artery aneurysms through fluid-structure interaction (FSI) simulations to model blood flow and arterial wall deformations under physiologically accurate conditions.

It is thought that cerebral aneurysms are caused mainly by acquired factors, with some contribution by congenital factors, such as genetic diseases, that increase vascular wall vulnerability. Vascular endothelial cells respond to enhancement of WSS associated hemodynamics by triggering inflammation, which contributes to cerebral aneurysm formation. in addition to WSS, mechanical stretching may be the trigger for cerebral

aneurysm formation.

Despite the agreement on the mechanism of aneurysm initiation, there is significant controversy regarding the mechanisms responsible for the growth and ultimate rupture of a cerebral aneurysm, with two main schools of thought: high-flow effects and low-flow effects. In each theory, the hemodynamic environment within the aneurysm interacts with the cellular elements of the aneurysmal wall to cause a weakening of the wall. From histological observations, investigators concluded that the mechanical properties of the aneurysmal wall are mainly related to collagen.

In addition to the attempts of unfolding the physics of cerebral aneurysm hemodynamics, Computational fluid dynamics CFD has been a very useful tool in the design, development, and evaluation of endovascular management methods.

This second-year project represents the natural extension of the foundational research completed during the first year. Previously, we developed and validated a comprehensive fluid-structure interaction (FSI) model to simulate blood flow through cerebral aneurysms using patient-specific geometries and experimentally obtained boundary conditions. The model successfully captured key hemodynamic patterns—such as wall shear stress (WSS), oscillatory shear index (OSI), and recirculation zones—and demonstrated strong correlation with experimental phantom data. These outcomes provided critical insight into the complex interplay between arterial wall mechanics and hemodynamic forces contributing to aneurysm growth and rupture.

In the second phase of the project, we expanded the study to explore a broader spectrum of physical and biological influences on aneurysm behavior. The primary focus was on incorporating variability in both boundary conditions and wall material properties to investigate their impact on intra-aneurysmal hemodynamics and wall stress distribution. A particular emphasis was placed on understanding how different values of the Young's modulus (representing wall stiffness) influence the dynamic response of aneurysmal walls under pulsatile flow. Furthermore, the model was enhanced to include peri-aneurysmal structural influences and a more integrated approach to wall mechanobiology and biomechanics.

Anatomic data of Intracranial Aneurysms (IA) were obtained from the micro-CT scan. Computed Tomography (CT) technique makes it possible to visualize the inside of the human body in a non-invasive way. It gives more capability for a more accurate diagnosis. Hence, a three-dimensional reconstructed patient-specific geometry with realistic boundary conditions is obtained to achieve the three-dimensional geometry (Figure 1).

The simulations examine how variations in arterial wall stiffness, characterized by Young's modulus values of 0.1, 0.67, 1.5, and 2.5 MPa, influence aneurysm behavior. Newtonian blood flow is simulated using experimental inlet velocity and outlet pressure profiles, providing a comprehensive representation of the physiological environment. The study underscores the significance of material properties—specifically arterial wall elasticity—in affecting flow patterns, wall stress distributions, and structural deformations within the aneurysm. Two-way FSI procedure was performed by applying

an Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation to calculate the arterial response.

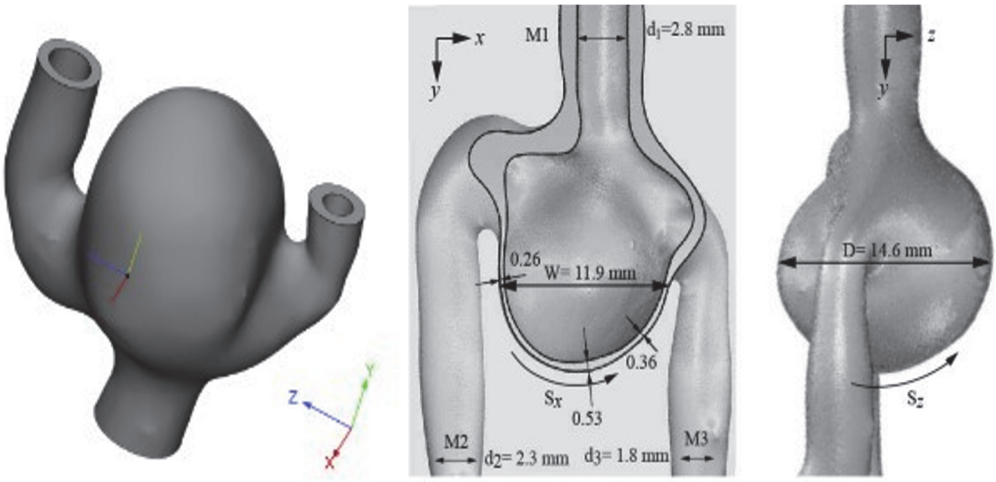


Figure 1: Phantom model development.

3. Achievements

The results of the FSI simulations provide valuable insights into the flow patterns, wall shear stress (WSS), and deformation characteristics of cerebral artery aneurysms.

The simulation results revealed significant variations in flow behavior, especially in the presence of altered wall stiffness. We observed that increases in Young's modulus led to reduced wall deformation but correspondingly amplified localized WSS gradients, particularly at the aneurysm dome. These conditions are clinically relevant, as elevated shear gradients may correlate with rupture-prone regions. Moreover, low-stiffness walls (more compliant tissues) exhibited increased vortex activity and wall displacement, contributing to stress concentration zones that may play a role in aneurysm expansion. The inclusion of peri-aneurysmal structural support resulted in altered wall motion and slight dampening of dynamic flow features near the aneurysm neck. These findings collectively support the hypothesis that aneurysm evolution is a product of complex interactions among hemodynamics, wall biomechanics, and local anatomy.

The flow patterns within the aneurysm varied significantly depending on the stiffness of the arterial wall as shown in Figure 2Figure 3. In the simulations with lower Young's modulus values (0.1 and 0.67 MPa), the flow remained relatively smooth, with limited recirculation zones. However, as the wall stiffness increased (1.5 and 2.5 MPa), more pronounced vortex structures developed within the aneurysm, indicating a higher degree of turbulence.

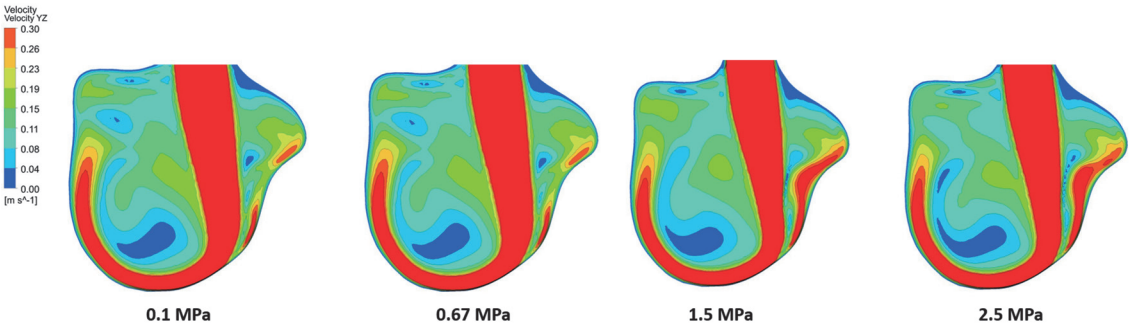


Figure 2: Velocity contours at XY plane through different Young's modulus of elasticity values

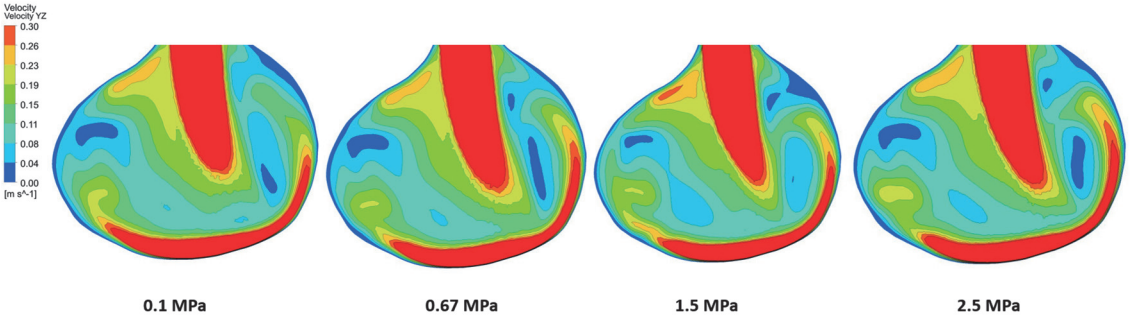


Figure 3: Velocity contours at YZ plane through different Young's modulus of elasticity values

Wall shear stress (WSS) plays a critical role in the initiation and progression of aneurysms. Our results show that WSS values were highest near the neck of the aneurysm, where the blood flow velocity was greatest as shown in Figure 4. As the stiffness of the arterial wall increased, WSS values also increased, suggesting that stiffer aneurysm walls are subjected to greater mechanical forces, which may contribute to aneurysm growth and rupture.

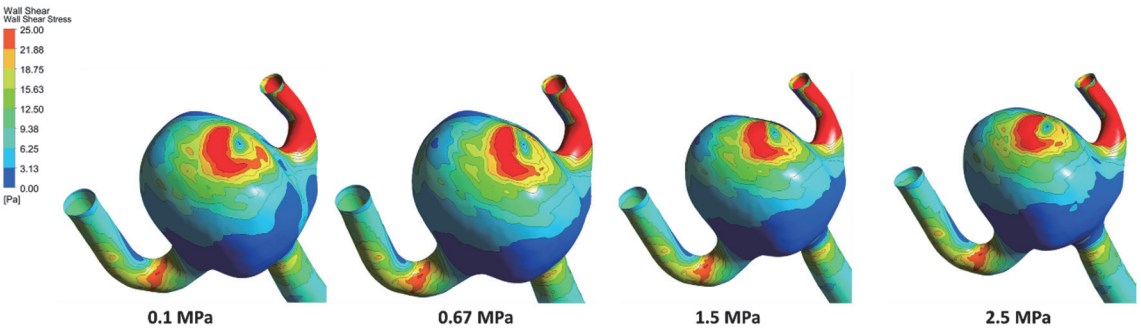


Figure 4: WSS contours through different Young's modulus of elasticity values at the peak systole of the wave form

In conclusion, Computational simulations revealed variations in aneurysm hemodynamics, shedding light on previously unexplored aspects of flow behavior. Notably, the model accurately captured the presence of vortices and recirculation zones within the aneurysms, demonstrating high fidelity. Interestingly, the flow dynamics exhibited a measurable sensitivity to the Young's modulus of the aneurysm wall. These

findings suggest a coupling between hemodynamic forces and the mechanical properties of the aneurysm wall. This comprehensive analysis highlights the multifaceted nature of hemodynamics within cerebral artery aneurysms and underscores the intricate interplay between aneurysm mechanics and flow dynamics. These insights contribute to a deeper understanding of the pathophysiology of these aneurysms, potentially leading to the development of more targeted therapeutic interventions and improved patient outcomes.

4. Summaries

The outcomes of this second-year research present valuable insights into advancing patient-specific risk assessment models. By linking biomechanical parameters to flow-induced stress and deformation patterns, the developed framework paves the way toward more precise prediction of aneurysm behavior and rupture risk. This research highlights the need to move beyond purely hemodynamic models by including mechanical and biological tissue properties for a more comprehensive understanding. In summary, the findings of this study demonstrate that variations in wall stiffness significantly influence intra-aneurysmal hemodynamics, with potential implications for rupture risk assessment and personalized treatment strategies.

5. Research results

Not applicable

課題番号	J24I066
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	2 年目

着陸時における空陸両用車の横風に対する空気力及び流れ場の解析

Analysis of Aerodynamic Forces and Flow Field on a Roadable Aircraft against Crosswind During Landing

森澤 征一郎*†，新里 侑右*，坂井 玲太郎**，菊地 亮太***，大林　茂****††
*沖縄工業高等専門学校，**宇宙航空研究開発機構，***名古屋大学
****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

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，悪天候時は波の高さ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気象条件を考慮しつつ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，機体の成立性を議論してきた．この空陸両用車は空港間を飛行後，空港着陸後に陸路の目的地まで自走することを想定している．その中で，着陸時において横風を受けると機体は不安定となり，事故を引き起こす危険がある．そのため，飛行するために必要な機体の空力性能を精緻に求めることは重要である．これらの背景のもと，本研究は，実際の気象条件を考慮した横風に対する空陸両用車の空力特性と流れ場の関係を調査し，車両を安定させるために必要となる空力設計の情報を得ることを目的とする．

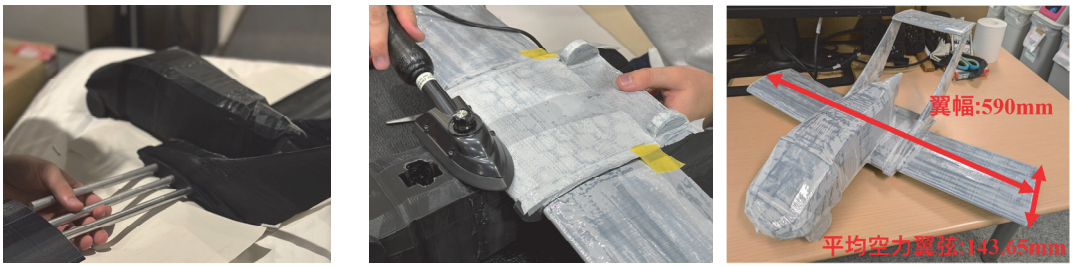
2. 研究成果の内容

本研究では，迎角および横滑り角を変化させることで機体に生じる空力 6 分力を計測する．空力計測は 500N 天秤，迎角と横滑り角は天秤に備えてついている角度調整機構を用いて調整した．風洞装置は東北大学流体科学研究所の低乱熱伝達風洞を用いて 2024 年 8 月 19 日～8 月 23 日（以下，2024 年夏休み実験）および 2025 年 3 月 24 日～3 月 28 日（以下，2025 年春休み実験）の計 2 回実施した．なお，供試モデルは模型をパーツ毎に分割し，3D プリンターで製作している．そして，図 1 で示すように主翼部分と胴体部分の中に円柱のパイプを通し，模型を組み立て，その周りをラジコン用のフィルムで張ることで表面の凹凸を解消している．特に，上述した 2024 年夏休み実験と 2025 年春休み実験の違いとして，円柱のパイプを主翼の外翼付近まで通すことで，気流中の振動を防ぐために剛性を強化している．

図2に風洞実験を実施した2024年夏休み実験および2025年春休み実験の結果例として，迎角を変化させた際に働く流れ方向に対して水平方向に働く力 C_x および垂直方向に働く力 C_z の比較結果を示す．このとき，レイノルズ数の違いを見るために，風速 30 m/s および 55 m/s のケースを掲載している．なお，模型を頭上げから頭下げまで 2 回計測が行われており，ヒステリシスが存在するが，これらの処理については未実施の結果であることも追記する．

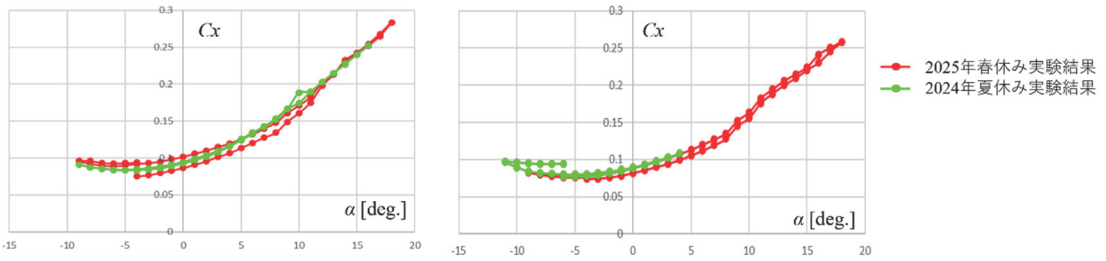
その結果，両実験においてC_xおよびC_zの分布は同様の傾向を示すことができ，本実験に関する再現性を確認できている．しかし，図 2(b)および図 3(b)において 2024 年夏休み実験では風速 55 m/s において，迎角 5°以上で機体，特に主翼の振動が顕著となるとともに迎角-4°から-10°で模型からフィルムが剥がれことで実験が中断する結果となった．加えて， 図 3(a)より 2024 年夏休み実験の結果について，高迎角でC_zの若干の低下はあるがすぐに増加傾向にあり失速特性が見られない．この原因は， C_x のときと同様に機体の振動が発生かつフィルムが表面から剥がれた可能性がある．

以上より，今年度において 2 回の風洞実験を実施したが，先の振動およびフォルム剥がれを防ぎ，高速域での空力計測を達成することができた．現在は，これまでに得た空力 6 分力のデータを精査中である．



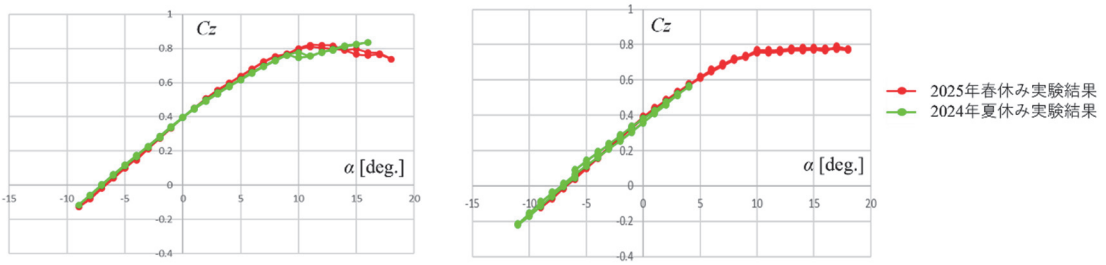
(a) 模型の組み立て　(b)　模型へのフィルムの張り付け (c) 完成した模型

図 1：　風洞実験用の供試モデルについて



(a) $Re = 2.91\times10^5$, $U_\infty = 30$ m/s　　(b) $Re = 5.41\times10^5$, $U_\infty = 55$ m/s

図 2：C_xの分布

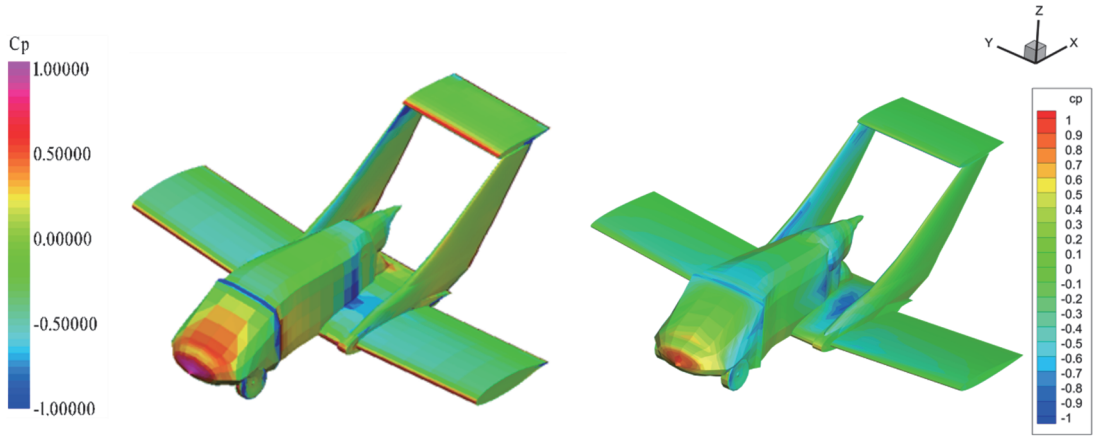


(a) $Re = 2.91\times10^5$, $U_\infty = 30$ m/s　　(b) $Re = 5.41\times10^5$, $U_\infty = 55$ m/s

図 3：C_zの分布

次に，風洞実験では得られない詳細な流れ場の情報獲得を目指し，ナビエ・ストーク方程式による CFD 計算を行った．CFD 計算には，東京大学・今村教授らが開発した直交格子ソルバーUTCart を用いた．結果の妥当性を検証するにあたって過去に行った VSPAERO によ

るパネル法による計算結果と比較し，計算条件は剥離が少ない巡航時を仮定した迎角 0°とした．図 4 にそれらの比較結果を示す．その結果，図 4 より胴体と内翼の低圧領域などの同様な傾向の流れ場を確認できた．



(a) VSPAERO の結果　(b) UTCart の結果
図 4：流体計算による流れ場の様子の違い

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．また，ナビエ・ストークス方程式による CFD 計算を実施できた．[達成度：80%]

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ナビエ・ストークス方程式による CFD 計算を実施した．今後は，今回実施した空力 6 分力の計測に加えて，圧力計測を同時に行うことで失速特性を実験的なアプローチによる明らかにする．CFD 計算では，格子収束性を確認し，適切な計算格子数の見積もりを行う．見積もり終了後は，剥離や横風の影響がある流れ場の計算を進めていく．そして，飛行シミュレーションのこの結果を適用することで横風に対する安定な飛行実現を目指した空陸両用車の空力設計を進めていく．

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] S. Morizawa and H. Kaneku: Feasibility study of a roadable aircraft between remote islands in Okinawa, *The 2024 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology*, 2024, ISBN number APISAT 2024 978-1-925627-87-9.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 森澤 征一郎：沖縄県を舞台とした新たな航空輸送実現に向けた提案とその紹介，衛星通信研究会（SAT），沖縄，2025 年 3 月 5 日 ～ 7 日．

[3] 森澤 征一郎，菊地 亮太，髙橋 暢宏：航空運航データを用いた離発着解析と気象情報抽出，〃 航空機観測研究集会，オンライン，2024 年 12 月 20 日．

[4] S. Morizawa, R. Sakai, R. Kikuchi, and S. Obayashi: Analysis of aerodynamic forces and flow field on a roadable aircraft against crosswind during landing," *Proceedings of the*

Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Japan, November 18-20, 2024, CRF-58, pp. 162-164.

[5] 森澤征一郎，兼久勇斗：離島間を移動できる空陸用両車の実現可能性の検討と評価，2C10，第 62 回飛行機シンポジウム，福井，2024 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	J24I067
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	2 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

有機溶媒であるキシレンの中でソリューションプラズマを発生させ，炭素材料を合成した．プラズマが発生する反応場において，ホモジナイザで発生させるキャビテーションの強度を変化させ，放電中の反応場の様子を観測するとともに，放電の電気的特性や，合成した炭素材料の比表面積などの材料特性を評価した．

図 1 に示すように，十字型のガラスリアクタ内に 100 mL のキシレンを入れ，電極間距離を 1mm としてタングステン電極対を設置し，また，電極間の上部にホモジナイザプローブを設置した．電極間に波高値が 1～1.5 kV のパルス電圧を印加してプラズマを発生させ，同時にその反応場にホモジナイザによってキャビテーションを導入することで，炭素材料を合成した．本実験は，ホモジナイザの出力 10 段階のうち，出力 0（キャビテーションなし），3（強度低），および 6（強度高）の 3 条件で行った．さらに，合成した炭素材料の比表面積を BET 計測（炭素材料へのガス吸着）により測定した．

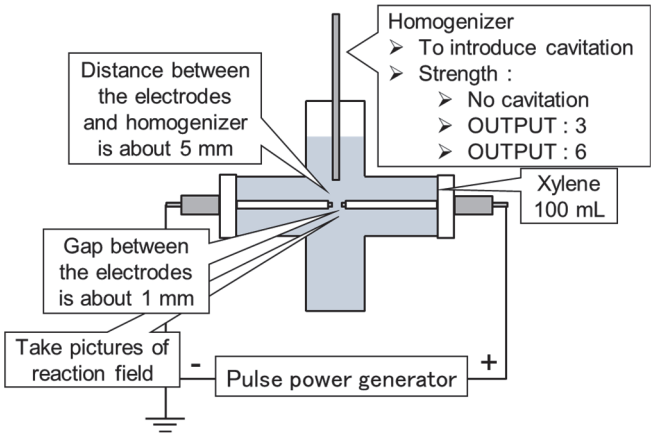


図 1：ソリューションプラズマによる炭素材料合成の実験装置

図 2 および表 1 に，3 段階のキャビテーション強度と，プラズマに投入された電力および合成した炭素の比表面積の関係を表す.

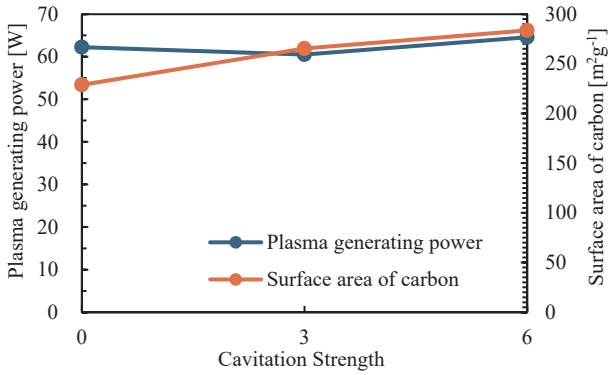


図 2：キャビテーション強度とプラズマの電力および炭素材料の比表面積の関係

表 1：キャビテーション強度とプラズマの電力および炭素材料の比表面積の関係

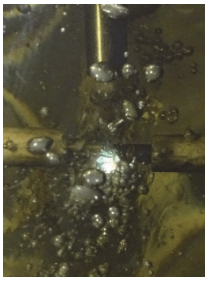
Cavitation strength	Plasma generating power [W]	Surface area of carbon [m^2g^{-1}]
0 (No cavitation)	62.2	228.8
3 (Weak)	60.5	265.4
6 (Strong)	64.6	283.6

いずれの条件でも，電圧印加時の放電確率はほぼ 100%であった．プラズマ電力はキャビテーション強度に対してほとんど変化はなかった．一方，炭素材料の比表面積は，キャビテーション強度が高くなるほど大きくなった.

図 3 に，放電により炭素を合成しているときの反応場の様子を示す．キャビテーションを導入しない場合と弱いキャビテーションを導入した場合では気泡の量やプラズマの体積に差がほとんど見られない．一方で，強いキャビテーションを導入した場合では，ホモジナイザから発生する流れと同じ下方向にプラズマが広がり，反応場が拡大した.

(a) 0
(キャビテーションなし)

(b) 3
(弱いキャビテーション)



(c) 6
(強いキャビテーション)

図 3：放電中の反応場の様子

3. 研究目標の達成状況

キャビテーション強度を高くすることによって，合成される炭素材料の比表面積を大きくできることが分かった．触媒としての応用を考えると，1,000 m^2g^{-1} 以上の比表面積が望ましい．炭素材料の合成速度や比表面積には，キャビテーション発生によって比表面積が増加する機構の解明を行うと共に，印加電圧パラメータやキャビテーション強度の最適条件を見いだす必要がある．また，炭素触媒としての性能向上には，キシレン・硫酸混合溶液中でプラズマを生成して，スルホン基を有する炭素材料が合成できるかを確認する必要がある．

4. まとめと今後の課題

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して，キシレンを原料とした炭素材料合成に関する研究を行った．キシレン中で超音波キャビテーションを併用してプラズマを生成することで，合成される炭素材料の比表面積を大きくすることが可能であることが明らかとなった．今後，ホモジナイザの出力を変化させて，キャビテーションと共に電極間に発生する液流の速度を細かく制御し，また，電極間距離や印加電圧パラメータを最適化することにより，合成炭素材料の比表面積の最大化を目指す．また，硫酸をキシレンに混合してプラズマを生成することで，炭素材料にスルホン基を修飾できると考えている．硫酸の混合比やプラズマ生成条件を変化させて，スルホン化炭素材料の合成と，比表面積の増大を目指す．微小気泡を含む流れ場とプラズマからなる複雑な反応場の解明により，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し，豊富な資源であるバイオマスエネルギーの利用拡大を実現する．

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] H. Ota, N. Takeuchi, M. Kodama, H. Takana, O. L. Li: Effects of Cavitation Intensity on Synthesis of Carbon Nanoparticles and Their Catalytic Performance, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2024), OS5-1, pp.470-471.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J24I068
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st 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
†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 heat transfer optimization using fins, magnetic fields, and hybrid nanofluids. This study aims to improve thermal management systems by investigating the combined effects of magnetic field strength, Reynolds number, fin height, and nanoparticle concentration on heat transfer and flow behavior within an enclosure, ultimately contributing to the development of more efficient thermal systems.

2. Details of Program Implementation

This project is being conducted under collaborative research at the Institute of Fluid Science (IFS), Tohoku University.
A key part of the project was presented at the *Twenty-Fourth International Symposium on Advanced Fluid Information* held at IFS, Sendai, Japan in 2024. The conference provided an excellent platform to share the preliminary outcomes and discuss future directions. The project involves advanced numerical simulations using the stream-vorticity formulation to solve the governing equations for nanofluid flow and heat transfer in magnetized enclosures equipped with fins.

3. Achievements

Significant progress has been made in achieving the objectives. The major achievements are summarized as follows:

- **Impact of Magnetic Field Strength (Mn):** It was observed that increasing the magnetic field strength (Mn) significantly enhances the Nusselt number (Nu), indicating a substantial improvement in heat transfer performance within the enclosure. As shown in Table 1, the Nusselt number increased significantly from 0.3336 at Mn=0 (no magnetic field) to 0.8098 at Mn=200 (strong magnetic field), demonstrating more than a twofold improvement. This enhancement is attributed to the magnetic field's ability to influence the flow structure by introducing Lorentz forces, which act perpendicular to both the magnetic field and the velocity field. These forces disturb the fluid motion, generate secondary flows, and promote

stronger fluid mixing throughout the enclosure. In the absence of a magnetic field (Mn=0), streamlines remain largely confined near the moving walls, leading to weaker convection. As Mn increases, the magnetic field induces noticeable changes in flow patterns, distributing the streamlines more evenly across the enclosure and enhancing thermal convection.

Table 1 The Influence of Magnetic Numbers on Nu for Re = 20, Mn = 200, and f_h=0.2

Mn	$\lvert Nu \rvert$
0	0.3336
10	0.3419
50	0.4080
100	0.5315
150	0.6696
200	0.8098

- **Effect of Reynolds Number (Re):** The influence of the Reynolds number (Re) on the thermal and flow behavior was thoroughly investigated, with the results illustrated in Figure 1. As the Reynolds number increases, the fluid motion becomes significantly more vigorous, leading to widespread circulation and enhanced mixing of the fluid within the enclosure. This intensification of flow is primarily due to the increased inertial forces at higher Reynolds numbers, which dominate over viscous forces and encourage stronger convective currents. Specifically, at low Re values (Re = 1–10), the flow is relatively weak and remains confined near the moving walls, resulting in limited fluid interaction and modest heat transfer rates. However, as Re increases to intermediate and high values (Re = 50–200), the fluid is energized, generating larger vortices that occupy a greater portion of the enclosure and intensify the heat transport process. The changes in streamlines and isotherms depicted in Figure 1 clearly reveal how increasing Re enhances both fluid mixing and thermal distribution across the enclosure.

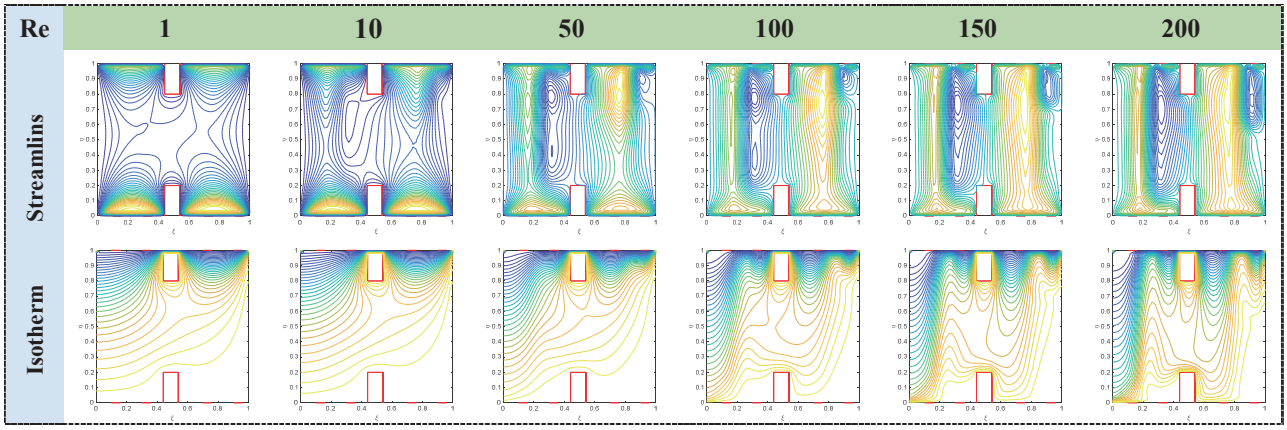


Figure 1 Streamlines, Isotherms for the Flow with Different Re for Mn=20, Pr=6.8, and f_h =0.2

- **Influence of Fin Height (f_h):** The introduction and variation of fin height (f_h) within the enclosure were carefully analyzed to understand its impact on the flow and

thermal characteristics. As depicted in Figure 2, increasing the fin height from 0 to 0.5 progressively partitions the cavity into two distinct zones, significantly altering the fluid motion and temperature distribution. The taller the fins, the greater the physical barrier they present to the fluid flow, leading to a clear division of the flow field into isolated circulatory regions on either side of the fins. This partitioning restricts fluid circulation between the upper and lower portions of the cavity, weakening the overall mixing and convective motion that are critical for efficient heat transfer. The streamlines in Figure 2 illustrate that with increasing fin height, the circulation becomes more localized and less vigorous, while the isotherms show less uniform temperature gradients, reflecting hindered heat transfer across the cavity. Consistent with these flow visualizations, the numerical data reveal that the Nusselt number (Nu) decreases sharply with increasing fin height. For instance, Nu drops from 3.3865 at f_h=0.0 (no fin) to 0.3292 at f_h=0.45, indicating a significant reduction in the system's heat transfer capability. The decline in Nu is attributed to the diminished bulk fluid motion and suppressed thermal convection caused by the obstructive effect of the fins.

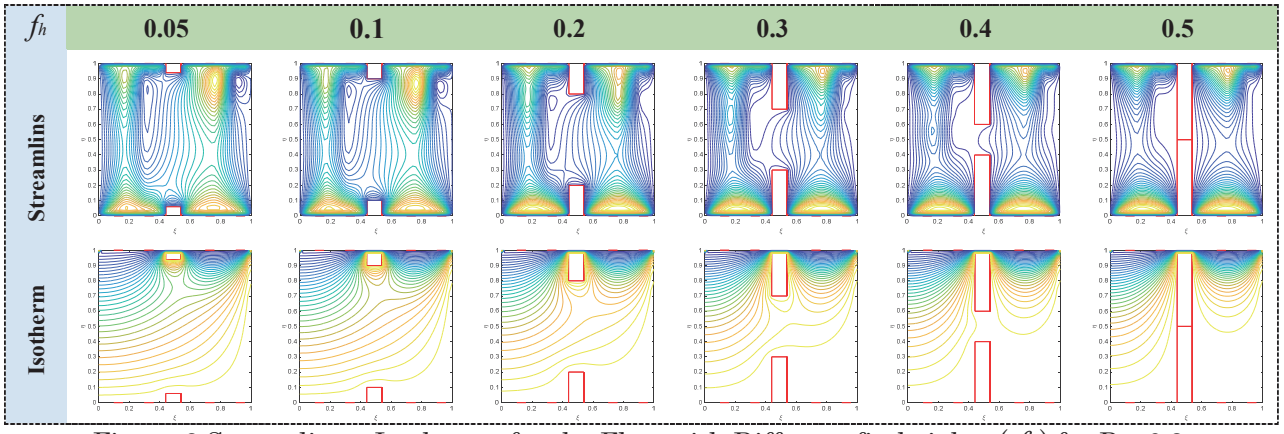


Figure 2 Streamlines, Isotherms for the Flow with Different fin heights (f_h) for Pr=6.8, Mn=20, and Re=2.

- **Role of Nanoparticle Concentration (ϕ):** The incorporation of hybrid nanoparticles into the base fluid was found to notably improve the thermal performance. This demonstrates that hybrid nanofluids can significantly enhance heat transfer without imposing additional flow resistance.

4. Summaries and Future Plans

In this study, the interplay between key parameters such as magnetic field strength, Reynolds number, fin height, and nanoparticle concentration has been systematically analyzed. The results provide a deeper understanding of their combined effects on heat transfer and fluid flow characteristics.

Future Plans:

- Extend the research to identify the optimal location, height, and width of fins to maximize heat transfer efficiency, and to explore more complex magnetic field configurations.

- Validate the numerical results through experimental studies.
- Develop optimized designs for microchannel heat exchangers for specific industrial applications.
- Prepare and submit a full-length journal article based on the comprehensive outcomes of this study.
- Present further findings at the ICFD Conference 2025.

5. Research Results

1) Journal (including international conferences with peer review and tutorial papers)

(Not yet published; under preparation.)

2) International and Domestic Conferences, Meetings, Oral Presentations, etc.

[1] Shabbir Ahmad, Hidemasa Takana: Efficient Thermal Management Through Heat Transfer Optimization in an Enclosure Using Fins, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2024), OS5-18, pp. 516-518.

3) Patent, Award, Press Release, etc.

Not applicable.

課題番号	J24I070
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	3 年目

表面修飾ナノ粒子／分散媒のナノスケール界面現象に関する研究

A Study on Nano-scale Interfacial Phenomena between Surface-modified Nanoparticle and Dispersed Media

久保 正樹*†，小宮 敦樹**††，菊川 豪太**，庄司 衛太*，斎藤 高雅*
*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

溶媒中にナノ粒子を分散したナノフルイドは，3D プリンターやプリンテッドエレクトロニクス用ナノインク等への応用が期待される流体材料である．また，高分子にナノ粒子を内包した高分子ナノコンポジット材料は，高分子材料の力学的，電気的，光学的，熱的機能などの飛躍的な向上が図れることから，機能性材料として様々な分野での応用が期待されている．いずれの材料も，工業的に利用するには，溶媒や高分子中でのナノ粒子の凝集制御・抑制に加えてナノ粒子の空間構造の制御が不可欠である．その一手法として表面を有機分子で修飾したナノ粒子を利用する方法が注目されている．

表面修飾ナノ粒子を含むナノフルイドあるいはナノコンポジット材料の応用においては，基板への塗布工程を伴う場合が多いため，ナノ粒子の分散安定性だけでなく，基板上での濡れ性の制御も重要である．実プロセスにおいては，単独溶媒よりも混合溶媒を利用することが多いため，混合溶媒中における表面修飾ナノ粒子の分散安定性を評価するために，混合溶媒と表面修飾ナノ粒子との親和性を評価することが望まれる．

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分散媒とのナノ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

表面修飾ナノ粒子／混合溶媒界面の一部を模擬した界面モデルを構築して全原子分子動力学(MD)シミュレーションを実行した．無機固体は表面を水酸化した α-Al_2O_3 (0001)，修飾鎖はデカン酸を対象とした．表面修飾率は最大修飾密度 4.9 分子/nm^2 を 100%と定義し，修飾鎖層への溶媒の浸透について調査するため，修飾率は 50%とした．混合溶媒は良溶媒としてシクロヘキサン，貧溶媒としてエタノールを対象とし，混合溶媒中のエタノール体積分率を種々変更した．温度は 300 K，圧力は 1 MPa とした．界面親和性の指標として表面修飾固体／溶媒間の付着仕事を取り上げ，熱力学的積分法の 1 つである Phantom-wall 法により求めた．全ての計算には LAMMPS を用いた．

はじめに，表面修飾無機固体と混合溶媒との界面現象に及ぼす溶媒組成の影響を可視化観察，解析した．図 1 にデカン酸修飾 Al_2O_3／混合溶媒の界面の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．混合溶媒におけるエタノール体積分率は，溶媒浸透前におけるエタノールの体積を全溶媒の体積で除した値として定義した．平衡状態において，固体表面における修飾鎖の構造は無秩序であり，溶媒は修飾鎖層に浸透した．いずれの条件に

おいても，エタノール分子が Al_2O_3 表面に吸着する様子が観察された．修飾鎖の周囲に存在する溶媒に着目すると，エタノール体積分率が 40 vol%の場合では，修飾鎖の周囲にはシクロヘキサンが多く存在した．エタノール体積分率が 60 vol%の場合，エタノールも修飾鎖の周囲に存在した．質量密度分布から，エタノール体積分率が 40 vol%の場合では，修飾鎖とシクロヘキサンの密度分布が重なっていることから，修飾鎖層にシクロヘキサンが浸透しており，一方で，エタノールは修飾鎖の密度分布とはほぼ重なっていなかった．エタノール体積分率が 60 vol%の場合では，修飾鎖とエタノールの密度分布が重なっている領域があり，シクロヘキサンに加えてエタノールも修飾鎖層に浸透することが確認された．

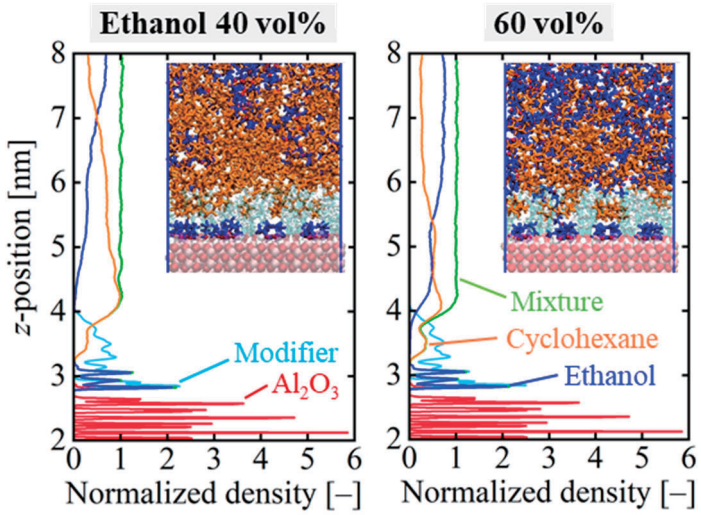


図 1：デカン酸修飾 Al_2O_3／混合溶媒界面近傍における界面垂直方向の質量密度分布および側面図

修飾鎖／混合溶媒間の相互作用を定量的に評価するため，修飾鎖／混合溶媒間の分離に必要な仕事を付着仕事から抽出して評価した．図 2 に修飾鎖／混合溶媒間の分離に必要な仕事に及ぼすエタノール体積分率の影響を示す．エタノール体積分率が 0–40 vol%の範囲では，仕事の値はほとんど変わらなかった．これは，このエタノール体積分率の範囲では，修飾鎖層にはシクロヘキサンのみが存在し，エタノールは浸透しなかったためと考える．エタノール体積分率が 40–100 vol%の範囲では，エタノール体積分率が大きいほど仕事は小さかった．これは，エタノール体積分率がある値を超えると，その存在量の多さゆえにエタノール分子が修飾鎖層へ浸透し，その結果として修飾鎖／溶媒間の相互作用が弱くなったためと考える．よって，修飾鎖／混合溶媒間の親和性には，修飾鎖層に浸透した溶媒の組成が影響すること，そして修飾鎖層に存在する溶媒の組成はバルクとは異なり，修飾鎖分子と個々の溶媒分子との相互作用の強さに左右されることが示唆された．

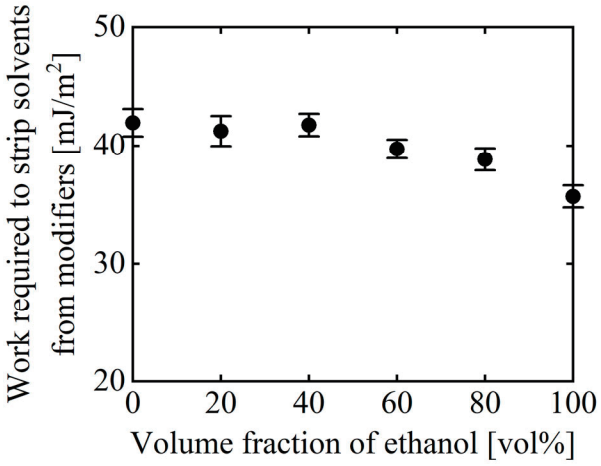


図 2：修飾鎖／混合溶媒間の分離に必要な仕事に及ぼすエタノール体積分率の影響

3. 研究目標の達成状況

これまでの検討において，単独溶媒を対象に，MD シミュレーションによる表面修飾ナノ粒子／溶媒間の親和性を評価するとともに，ナノフルイド液滴からのナノ粒子構造体の形成の実験的な観測に成功し，表面修飾ナノ粒子の設計指針を確立することができた．さらに，MD シミュレーションによる手法を，実プロセスで重要となる混合溶媒系へと展開，発展させ，ナノフルイドの界面現象に関する重要な知見を獲得することができた．よって，当初の目的以上の成果を達成できたと判断する．

4. まとめと今後の課題

本研究により，単独溶媒のみならず実プロセスにおいて重要な混合溶媒に対して，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指針を示すことができた．そして，表面修飾ナノ粒子を含むナノフルイドを利用した塗布・乾燥プロセスによる薄膜製造プロセスにおいて重要となる，ナノフルイドの濡れ特性に関する有用な知見を獲得する方法論を確立できた．

今後は，分子スケールで獲得される知見と粒子スケールでの知見を融合する方法論を確立し，表面修飾ナノ粒子を含有するナノフルイドを用いた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] Eita Shoji, Akira Hoshino, Tetsushi Biwa, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Takaaki Tomai, Tadafumi Adschiri, Superspreading Wetting of Nanofluid Droplet Laden with Highly Dispersed Nanoparticles, *Langmuir*, 40, (2024), 26509–26516. doi: 10.1021/acs.langmuir.4c03347

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 斎藤高雅，久保正樹，塚田隆夫，庄司衛太，菊川 豪太，Surblys Donatas: 表面修飾 Al_2O_3／ポリプロピレン間の界面熱抵抗に及ぼす表面修飾率の影響，第 61 回日本伝熱シンポジウム，神戸，(2024).

[3] 佐藤悠都，斎藤高雅，久保正樹，庄司衛太，菊川 豪太，Surblys Donatas，小宮敦樹: 分子動力学シミュレーションによる表面修飾 Al_2O_3／混合溶媒界面における親和性評価，第 61 回日本伝熱シンポジウム，神戸，(2024).

[4] 斎藤高雅，久保正樹，塚田隆夫，庄司衛太，菊川豪太，Surblys Donatas，久保百司: 表面修飾無機固体／高分子間の親和性および界面熱抵抗に及ぼすナノスケール構造の影響，化学工学会第 55 回秋季大会，札幌，(2024).

[5] 佐藤悠都, 斎藤高雅, 久保正樹, 庄司衛太, 菊川 豪太, Surblys Donatas, 小宮敦樹: Molecular dynamics study of interfacial phenomena between surface-modified Al_2O_3 and solvent mixture，令和 6 年度化学系学協会東北大会，秋田，(2024).

[6] 佐藤悠都，斎藤高雅，久保正樹，庄司衛太，菊川 豪太，Surblys Donatas，小宮敦樹: 分子動力学シミュレーションによる表面修飾無機固体／混合溶媒間の界面親和性の評価，化学工学会宇都宮大会 2024，宇都宮，(2024).

[7] Takamasa Saito, Yuto Sato, Masaki Kubo, Eita Shoji, Gota Kikugawa, Donatas Surblys, Atsuki Komiya: Molecular dynamics study for interfacial structure and affinity between surface-modified metal oxide and binary mixtures of organic solvents, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-33, pp. 103-104.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）該当なし.

（受賞）優秀ポスター賞，Molecular dynamics study of interfacial phenomena between surface-modified Al_2O_3 and solvent mixture，佐藤悠都，2024.9.15，令和 6 年度化学系学協会東北大会.

学生奨励賞，分子動力学シミュレーションによる表面修飾無機固体／混合溶媒間の界面親和性の評価，佐藤悠都，2024.11.7，化学工学会宇都宮大会.

（マスコミ発表）該当なし.

課題番号	J24I071
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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.

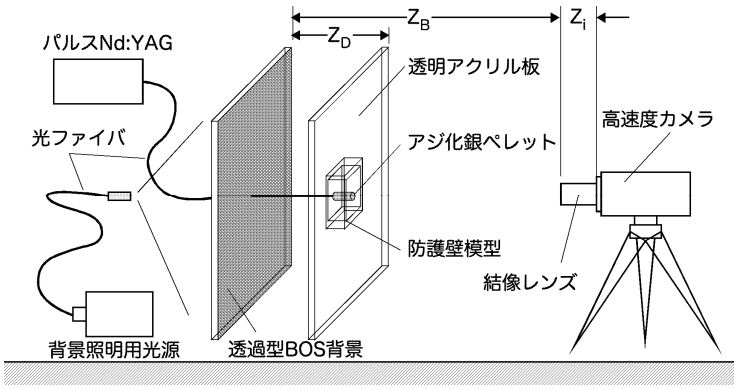
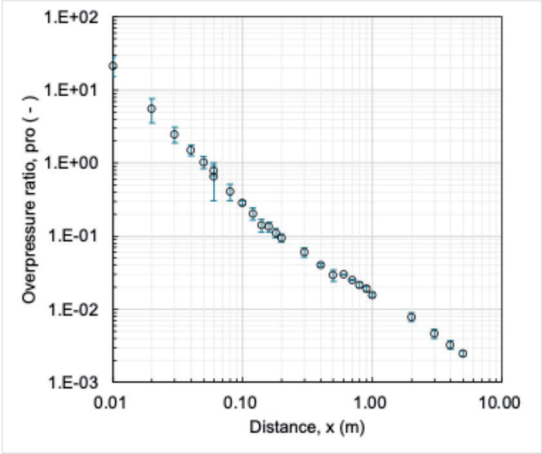
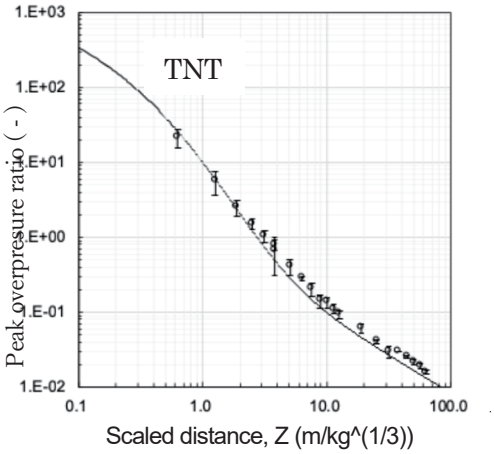


図 1：可視光及び近赤外光を利用した背景型シュリーレン法による衝撃波可視化系計測系

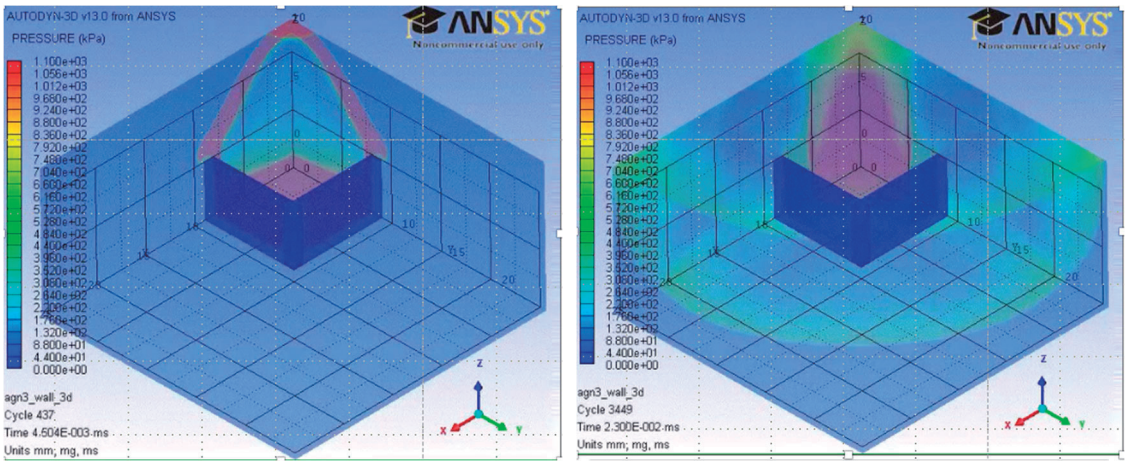


(a) AgN_3 ペレット 10 mg による過剰圧分布



(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，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., Nagayama, I., Ohtani, K. High Sensitivity and Quantitative Visualization around High-speed Projectile, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, CRF-64, pp.181-182.

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

Project code	J24I072
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

Analysis of Power Generation from Ammonia Based Fuel in Solid Oxide Fuel Cells

Cole Wilhelm*, Jeongmin Ahn*†,
Kenta Tamaoki**, Hisashi Nakamura**††
*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 the project is to generate electricity from a solid oxide fuel cell (SOFC) using an ammonia-based fuel source. To achieve this purpose, we will provide ammonia fuel mixtures to the nickel side (anode) of the fuel cell. Thermal cracking of the ammonia at high temperatures will provide the hydrogen necessary to complete reactions. The objective of the project is to evaluate the ability to directly source hydrogen from an ammonia mixture at the fuel cell interface, while also generating electricity with no hazardous emissions.

2. Details of program implement

In the simulation aspect, we constructed a model for the pre-reformed ammonia supply to the SOFC. The beginning of this work sought to determine the effectiveness of directly supplying pre-reformed ammonia synthesis gas (syngas) from a micro-flow reactor (MFR) to the SOFC. A model was developed to estimate the syngas compositions generated by the MFR. These estimations may also be validated experimentally through testing in a MFR. The concentrations were then replicated in the experimental portion of the project for the fuel supply to the SOFC during year 1 of this project. In the second year, a range of hydrogen/ammonia mixtures were tested to determine the necessary fuel supply for optimal SOFC performance.

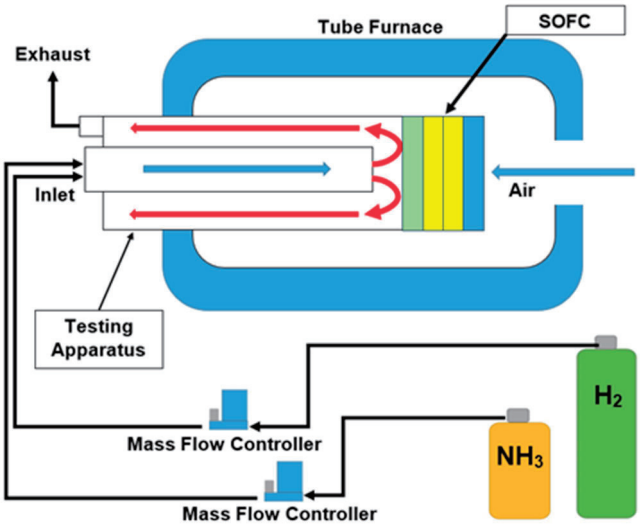


Figure 1: Experimental setup implemented for SOFC testing.

In the experimental approach, the fuel was first applied to planar geometry SOFCs. Cells in use include a nickel-yttria stabilized zirconia (60 wt% NiO 40 wt% $(Y_2O_3)_{0.08}(ZrO_2)_{0.92}$ (Ni-YSZ)) anode, YSZ electrolyte layer, samarium doped ceria ($Sm_{0.20}Ce_{0.80}O_{1.95}$ (SDC)) electrolyte buffer layer, and lanthanum strontium cobalt ferrite-SDC (70 wt% $(La_{0.60}Sr_{0.40})_{0.95}Co_{0.20}Fe_{0.80}O_{3-x}$ 30 wt% SDC (LSCF-SDC)) cathode layer. SOFCs were operated on a range of mixture compositions. Electricity generation was analyzed using a four-terminal DC technique. Figure 1 above depicted the testing setup of the SOFC. The SOFC is housed in a tube furnace to regulate temperature and mounted onto a quartz tube to create a seal between the anode and the cathode. Mass flow controllers were used to regulate the gas supply to the cell. Syngas components were combines for mixing in a manifold immediately after the mass flow controllers.

3. Achievements

A temperature of 750°C was chosen for testing because it promotes electrolyte activity while avoiding current collector degradation. A mass spectrometer (MS) was used with Hiden Analytical's Quantitative Gas Analysis (QGA) Professional software to obtain exhaust gas concentrations from the SOFC. Data was collected first with hydrogen and gradually shifted to ammonia. Table 1 shows the flow conditions which were utilized. Smaller increments were used above 90% ammonia to better simulate and compare the pre-reformation products of previously studied reformation systems.

Table 1: Supply mixtures used for testing. The vol% of ammonia, flow rate of hydrogen, and flow rate of ammonia are given.

$\%NH_3$	H_2 (mL/min)	NH_3 (mL/min)
0	30	0
25	22.5	7.5
50	15	15
75	7.5	22.5
90	3	27
95	1.5	28.5
98	0.6	29.4
100	0	30

Data has been compiled into voltage and power density versus current density plots, as depicted in Figs. 2 and 3. The voltage and power density curves begin at the upper left and lower left corner of the plot, respectively. The open circuit voltage (OCV) was consistent throughout testing, only seeing a drop from 0.988V on hydrogen to 0.967V on ammonia. In all cases, the cell provided a very good OCV. Additionally, all conditions exhibit high stability prior to the inflection point of the power density curves. The minor instability after the inflection point is shared by all fuel supply conditions, meaning that it is likely the result of an imperfection in the microstructure of the SOFC, rather than the supply conditions. It is shown that the OCV experiences very little change from 0% to 75% ammonia. The power density for 0% and 50% is nearly identical at 413mW/cm2 and 414mW/cm2, respectively. Additionally, the power density increases significantly at 25% ammonia, reaching 454mW/cm2. The ammonia concentration regime above 90% sees the most rapid changes in OCV and power density. Pure ammonia produced a power density of 309mW/cm2, which is approximately a 25% decrease from the pure hydrogen condition. However, this decrease in power density from hydrogen to ammonia is an improvement as compared to many previous works.

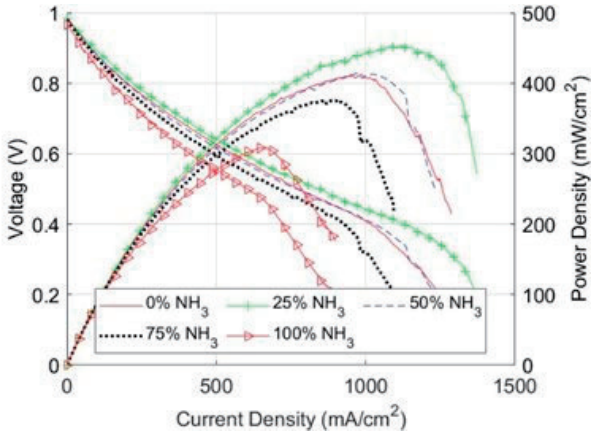


Figure 2: SOFC performance from pure hydrogen to pure ammonia, displayed in 25% increments.

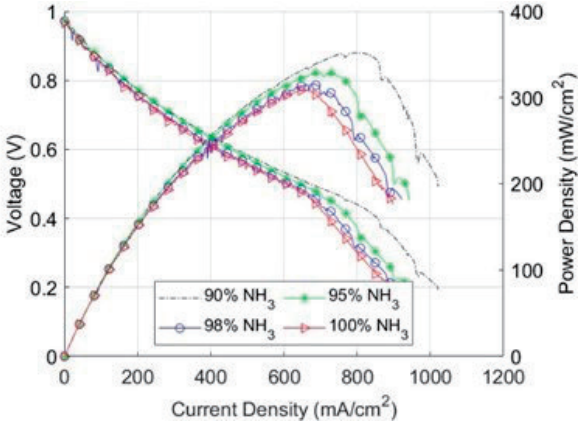


Figure 3: SOFC performance ammonia concentrations of 90% and higher.

The analysis of exhaust gases was most notable for the pure ammonia operation condition. As Table 2 shows, a pure ammonia condition resulted in a high amount of hydrogen which was reformed in the anode layer. This exhaust stream produces an ammonia/hydrogen ratio of 0.4229 while the optimal power generation occurred at an ammonia/hydrogen ratio of 0.333. Based on these results, a SOFC system could be designed with the first stack of SOFCs acting in both a reformation and power generation capacity, supplying syngas to the second SOFC stack at a near-optimal NH_3/H_2 mixture ratio.

Table 2: Exhaust component concentrations from pure ammonia supply condition as obtained from the MS using QGA Professional software.

Component	Concentration (%)
NH_3	24.499
H_2	57.810
NO	0.221
N_2	15.127
O_2	0.005
H_2O	2.338

4. Summaries and future plans

The data discussed here shows that all ratios of ammonia to hydrogen are capable of high levels of electricity generation. The OCV shows minimal change when switching from pure hydrogen to pure ammonia fuel. Optimal SOFC performance was found to occur at the 25% ammonia condition (NH3/H2 mixture ratio of 0.333). A SOFC system could be designed with direct-ammonia utilization for power generation, as well as syngas generation for the operation of other SOFC stacks at near-optimal NH3/H2 mixture ratios. Further work is necessary to better describe the entire range of mixture ratios at smaller intervals. Additionally, SOFCs will be operated on the mixture compositions which were estimated in the simulation approach. This will allow the group to determine the effectiveness of fuel additives, hydrogen gas or water vapor, in improving the SOFC performance. Electricity generation will be analyzed using a four-terminal DC technique. Mass spectroscopy will be used to analyze the exhaust products and confirm that there is minimal NOx group substance generation. This is especially important for the case utilizing water vapor, where oxygen is directly available to the broken-down ammonia. Scanning electron microscopy will be used to study the microstructure of SOFCs to ensure that the microstructure is not damaged through prolonged operation.

5. Research results

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

[1] C. Wilhelm, A. Willsey, J. Ahn: Investigation of NOx Generation and Ammonia Fuel Utilization in a Solid Oxide Fuel Cell, *ASME POWER Conference Proceedings*, (2024), POWER2024-138521.

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

[1] C. Wilhelm, K. Tamaoki, H. Nakamura, J. Ahn: Evaluation of Optimal Hydrogen-Ammonia Mixtures for Solid Oxide Fuel Cells, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-13, pp. 49-51.

[2] C. Wilhelm, J. Ahn: Investigation of the Effects of Long-Term Direct-Ammonia Operation on Solid Oxide Fuel Cells, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, (2024), ICFD-OS1-4.

[3] C. Wilhelm, K. Tamaoki, H. Nakamura, J. Ahn: Investigation of Solid Oxide Fuel Cells with Varying Hydrogen/Ammonia Fuel Mixtures, *Syracuse University ECS Research Day*, (2025).

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

2nd Place Poster Presentation ECS Research Day, “Investigation of Solid Oxide Fuel Cells with Varying Hydrogen/Ammonia Fuel Mixtures”, Cole Wilhelm, March 21, 2025, College of Engineering and Computer Science at Syracuse University.

(Press release)

Not applicable

Project code	J24I073
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

Sonic-boom Surrogate Model Integration in a Chemistry-climate Model

Hiroshi Yamashita*†, Bastian Kern*
Shigeru Obayashi**††, 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 important to understand atmospheric effects on sonic boom propagation for a supersonic aircraft operation. The SEIRA (Sonic-boom Evaluation In Realistic Atmospheres) project has been kicked-off in 2020. The aim of the SEIRA 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. We continuously developed a kriging model, to evaluate a model performance of the model, and to integrate it into a chemistry–climate model.

2. Details of program implement

Two types of supersonic aircraft, the pseudo-Concorde and the low sonic boom aircraft designed in the NASA's N+2 program, were used. Both 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). Both aircraft flew from John F. Kennedy airport (JFK) to London Heathrow airport (LHR) along the great circle at $M = 2.0$ at 15.3 km altitude (the pseudo-Concorde) and at $M = 1.8$ at 14.5 km altitude (the low-boom aircraft). 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. The near-field pressure waveform of the pseudo-Concorde was provided by courtesy of the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA); a sonic boom reflection factor was set to 2.0. The simulation period was set for March 2009 – February 2019.

The obtained sonic boom waveforms clearly change according to the atmospheric conditions, which results in differences in the perceived level PLdB. The ensemble mean PL of the pseudo-Concorde is 100 ± 0.46 PLdB, whereas 80.9 ± 2.10

PLdB for the low-boom aircraft. The mean PL of the low-boom aircraft is about 19 PLdB smaller than that of the pseudo-Concorde, and thus it retains the advantage of the low-boom aircraft design, i.e. low loudness. A seasonal trend in PLdB was analyzed for the ten years. Figure 1 show that the loudness increases in summer and decreases in winter for the pseudo-Concorde, whereas the seasonal trend becomes less clear for the low-boom aircraft.

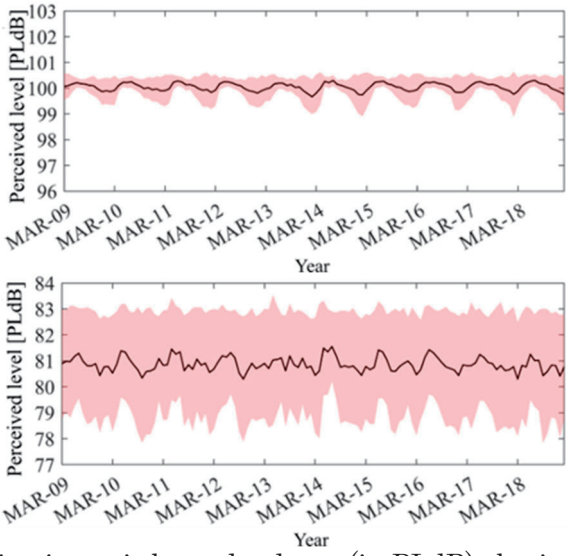


Figure 1 : Variation in sonic boom loudness (in PLdB) obtained from ten years simulations; (top) pseudo-Concorde and (bottom) low-boom aircraft.

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 by the Proper orthogonal decomposition, and predominant meteorological variables were found for surrogate modelling. A kriging method has been developed in the 2nd project year; it requires further development and validation. The outcome has been published in a scientific journal successfully (Iura et al. 2024); Yamashita et al. (2024) contributed to AFI-2024.

4. Summaries and future plans

The atmospheric effects of sonic boom loudness for the pseudo-Concorde and for the low-boom aircraft flying over the North Atlantic were analyzed for ten years by using EMAC/AirTraf. The atmospheric conditions on the flight track were calculated from the EMAC model. The ensemble mean PL of the pseudo-Concorde was 100 ± 0.46 PLdB, whereas 80.9 ± 2.10 PLdB for the low-boom aircraft. For the pseudo-Concorde, the PLdB values increase in summer; they decrease in winter. With predominant atmospheric variables for the deformation of sonic boom waveforms, a kriging model will be further developed, evaluated, and integrated in the EMAC model.

5. Research results

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

[1] R. Iura, T. Ukai, H. Yamashita, B. Kern, T. Misaka and S. Obayashi, “Impact of atmospheric variations on sonic boom loudness over 10 years of simulated flights,” *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 156, Issue 3, 1529–1542, https://doi.org/10.1121/10.0028375, (2024).

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

[2] H. Yamashita, B. Kern, T. Ukai, T. Misaka and S. Obayashi, "Characterizing Atmospheric Conditions for Sonic Boom Loudness," *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai (2024), CRF-73.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J24I075
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	3rd year

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

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

Conventional point-focus and line-focus solar concentrators, such as parabolic troughs or conic systems, are commonly used in solar energy applications. However, these systems typically require precise solar tracking mechanisms to follow the sun's movement throughout the day. This not only increases installation and operational costs but also demands regular maintenance. Additionally, their ability to concentrate solar rays is limited to direct solar irradiation, making them ineffective under diffuse light conditions. Due to their narrow acceptance angles, even minor deviations in geometry or misalignment can significantly reduce their optical efficiency. Furthermore, the high concentration ratios in such systems often result in local overheating, leading to hot spot formation on photovoltaic (PV) surfaces, which in turn decreases the open-circuit voltage and overall PV cell efficiency.

To address these challenges, this project proposes the development of a novel low-concentration, non-imaging solar concentrator with a wide acceptance angle. This design eliminates the need for a solar tracking system while ensuring more uniform solar flux distribution on the PV surface. The uniform illumination minimizes temperature gradients, thereby preventing hot spot formation and reducing thermal stress on PV cells. As a result, the system aims to enhance electrical performance and increase long-term reliability.

Moreover, the study explores the integration of heat transfer fluids to enhance thermal management within the concentrating photovoltaic thermal (CPVT) system. By employing various working fluids with distinct thermophysical properties, the system enhances thermal regulation across a wide range of operating conditions. These fluids contribute to improved heat absorption, storage, and dissipation, thereby stabilizing the temperature of the photovoltaic-thermal (PVT) module. To systematically explore the influence of design and operational parameters, multi-objective optimization methods are applied. This approach enables the identification of optimal configurations that simultaneously maximize thermal and electrical efficiencies, while ensuring economic feasibility and structural simplicity in the overall system design. In the end, the primary goal of this project is to introduce an innovative CPVT system that combines improved performance, lower cost, and practical integration potential for real-world solar energy applications

2. Details of program implement

In the project, numerical, experimental and optimization studies have been conducted to investigate CPVT system. Three types of non-imaging concentrators—compound parabolic concentrators (CPC), compound hyperbolic concentrators (CHC), and V-trough concentrators—were investigated for integration into concentrating photovoltaic thermal (CPVT) systems. The geometric configurations of the CPC, V-trough, and CHC reflectors are illustrated in Figure 1. The PV/T module utilized in the system is composed of multiple layers and components, including a glass cover, polycrystalline silicon (pc-Si) solar cells, ethylene-vinyl acetate (EVA) encapsulants, an anti-reflective coating (ARC), a secondary EVA layer, a Tedlar polyvinyl fluoride (PVF) backsheet, a copper absorber plate, and embedded copper tubes for fluid circulation. A ray tracing analysis was conducted using a custom-developed code, while additional numerical simulations were performed in ANSYS Fluent employing the finite volume method. The SIMPLE algorithm was used to couple the velocity and pressure fields. Convection–diffusion equations for momentum and energy were discretized using the second-order upwind scheme to enhance accuracy, whereas the pressure equation was discretized spatially using the PRESTO (Pressure Staggering Option) scheme. For all governing equations, the convergence criterion was set to 10−6. Within the air gap region, air properties were assumed to remain constant. Figure 2 shows schematic of PV/T module components used in the analysis

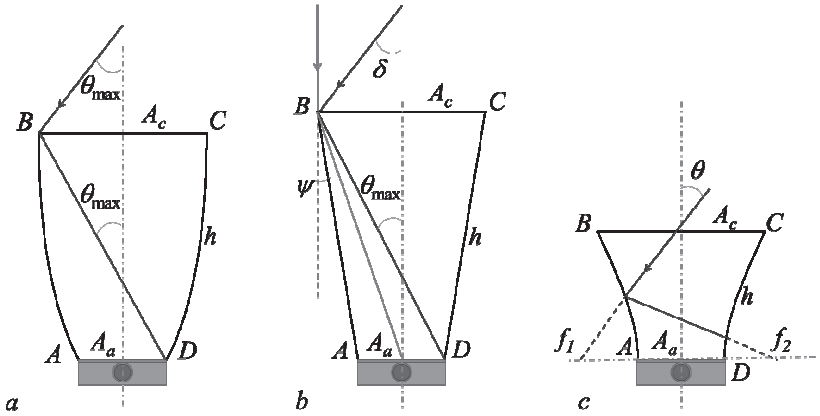


Figure 1: CPVT system configurations with non-imaging reflectors: (a) CPC, (b) V-trough, and (c) CHC.

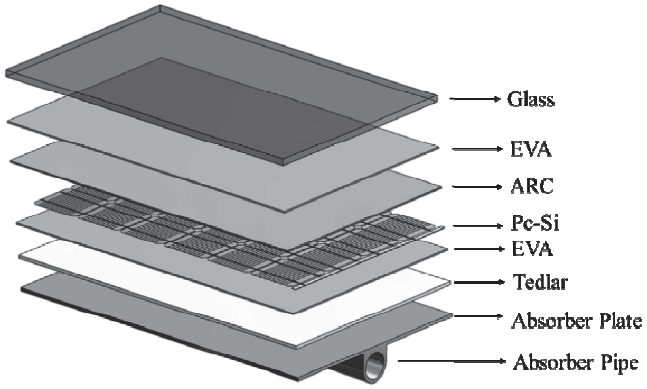


Figure 2: Schematic of PV/T module components used in the analysis

Unlike conventional single-variable optimization techniques, the combined use of Grey

Relational Analysis (GRA) and Response Surface Methodology (RSM) enables a more accurate and balanced multi-criteria optimization by simultaneously evaluating multiple performance indicators. Accordingly, this study aims to conduct a comprehensive investigation of the key parameters influencing the performance of non-imaging concentrators and to identify the optimal design conditions through the integrated application of GRA and RSM. The overall optimization workflow for the CPVT system—encompassing ray tracing, numerical analysis of the PV/T unit, and the subsequent application of GRA and RSM—is illustrated in Figure 3.

Figure 4 presents a comparative analysis of the thermal and electrical efficiencies of CPVT systems equipped with compound parabolic concentrators (CPC), compound hyperbolic concentrators (CHC), and V-trough reflectors, evaluated as functions of both truncation ratio and solar incidence angle. The performance evaluation was conducted across four different incidence angles (0°, 10°, 20°, and 30°) and four truncation ratios (1.00, 0.72, 0.55, and 0.42), reflecting variations in reflector size.

The results clearly demonstrate that thermal efficiency declines with increasing incidence angle due to enhanced optical losses caused by oblique solar irradiation. Among the three concentrator types, this efficiency reduction is most significant in the CHC configuration, where thermal efficiency falls from 64.9% to 30% as the incidence angle increases from 0° to 30° with the full reflector size. A similar trend is observed in the V-trough system, with efficiency dropping from 66.2% to 29.4%. In contrast, the CPC exhibits a more stable performance, with thermal efficiency decreasing from 65% to 52.6%, showcasing its superior light-capturing capability within its wider acceptance angle.

Truncation of the reflector, intended to reduce material usage and manufacturing cost, leads to modest reductions in thermal efficiency. Notably, at normal incidence (0°), CPC shows a slight increase in thermal efficiency from 65% to 65.61% as the truncation ratio is reduced from 1.00 to 0.42. This improvement is attributed to a lower concentration ratio, which results in a more moderate outlet fluid temperature and less thermal stress on the system. For V-trough and CHC systems, the efficiency drops slightly—from 66.2% to 64.78% and from 64.95% to 64.2%, respectively—over the same truncation range. These observations underscore the robustness of the CPC geometry under partial truncation, making it a favorable choice for balancing performance and material savings.

In contrast to thermal efficiency trends, electrical efficiency exhibits a gradual increase with rising incidence angle and decreasing reflector size. This behavior is primarily due to the reduced thermal load on the PV cells, which helps maintain lower operating temperatures and, consequently, improves voltage output. At 0° incidence and full reflector size, all systems show their lowest electrical efficiency—12.15% for CPC, 12.14% for V-trough, and 12.17% for CHC—owing to elevated PV cell temperatures. At 30° and with the most truncated configuration (0.42), electrical efficiency increases to 12.66% for CHC, 12.48% for V-trough, and 12.42% for CPC.

The geometry of each concentrator significantly influences both thermal dissipation and PV temperature regulation, thereby affecting the overall system efficiency. In particular, moderate truncation of CPCs offers a promising compromise, conserving materials while sustaining high performance by ensuring a stable thermal environment. To counteract potential losses in performance, especially under higher solar loads, the implementation of advanced thermal management strategies—such as nanofluid-based active cooling or passive thermal coatings—is recommended. These measures can

further enhance the CPVT system's reliability and efficiency. Eventually, the study highlights the critical role of geometrical configuration, truncation ratio, and thermal management in achieving an optimal balance between cost-effectiveness and energy output in large-scale CPVT applications.

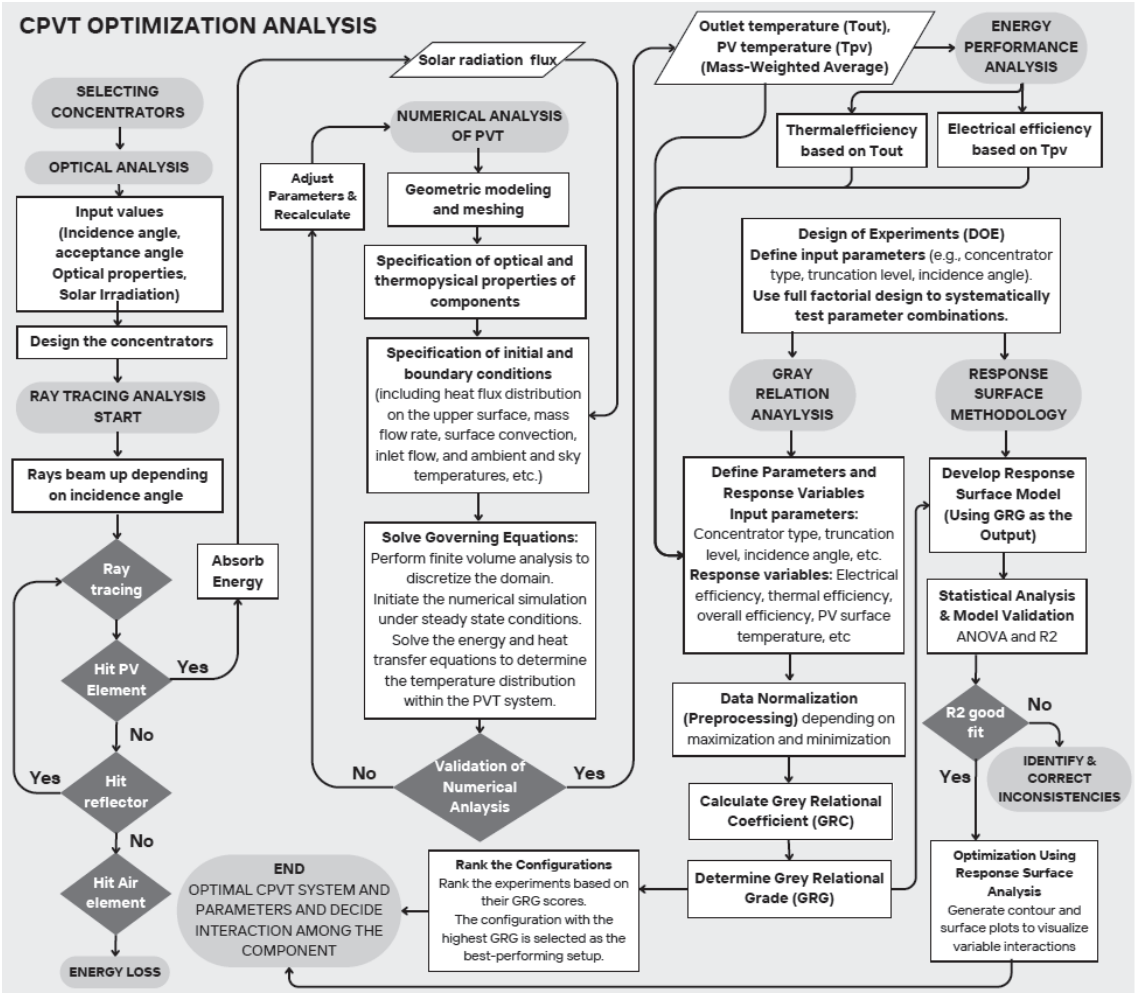


Figure 3: CPVT optimization flowchart: ray tracing, numerical analysis, GRA, and RSM.

Figure 5 presents the variation of Grey Relational Grade (GRG) values as functions of incidence angle and reflector size for different concentrator types, as obtained through Response Surface Methodology (RSM). In the context of Grey Relational Analysis (GRA), a higher GRG value signifies superior system performance.

Figure 5a illustrates the GRG variation for the CPVT system incorporating CPC reflectors. A consistent decline in GRG values is observed with both decreasing reflector size and increasing incidence angle. This trend is primarily attributed to increased optical losses at higher incidence angles due to multiple internal reflections.
In contrast, Figure 5b depicts the performance of CPVT systems using V-trough concentrators. These systems generally exhibit better GRG performance at smaller reflector sizes. While an increase in incidence angle still causes a reduction in GRG, the sensitivity of performance to angular variation is lower than that observed for CPC-based systems. The V-trough geometry, due to its relatively simple and direct reflective path, performs optimally at low incidence angles, where fewer reflections and

lower optical losses occur. As the incidence angle increases, reflection complexity rises, leading to diminished efficiency. Consequently, V-trough concentrators are best suited for applications with relatively stable solar angles, offering a favorable balance between performance and cost. Figure 5c shows the GRG trends for CPVT systems equipped with CHC reflectors. The GRG values in this configuration demonstrate greater stability against variations in reflector size. Performance remains relatively high at low incidence angles, supported by favorable characteristics such as reduced cost and improved power output per unit size.

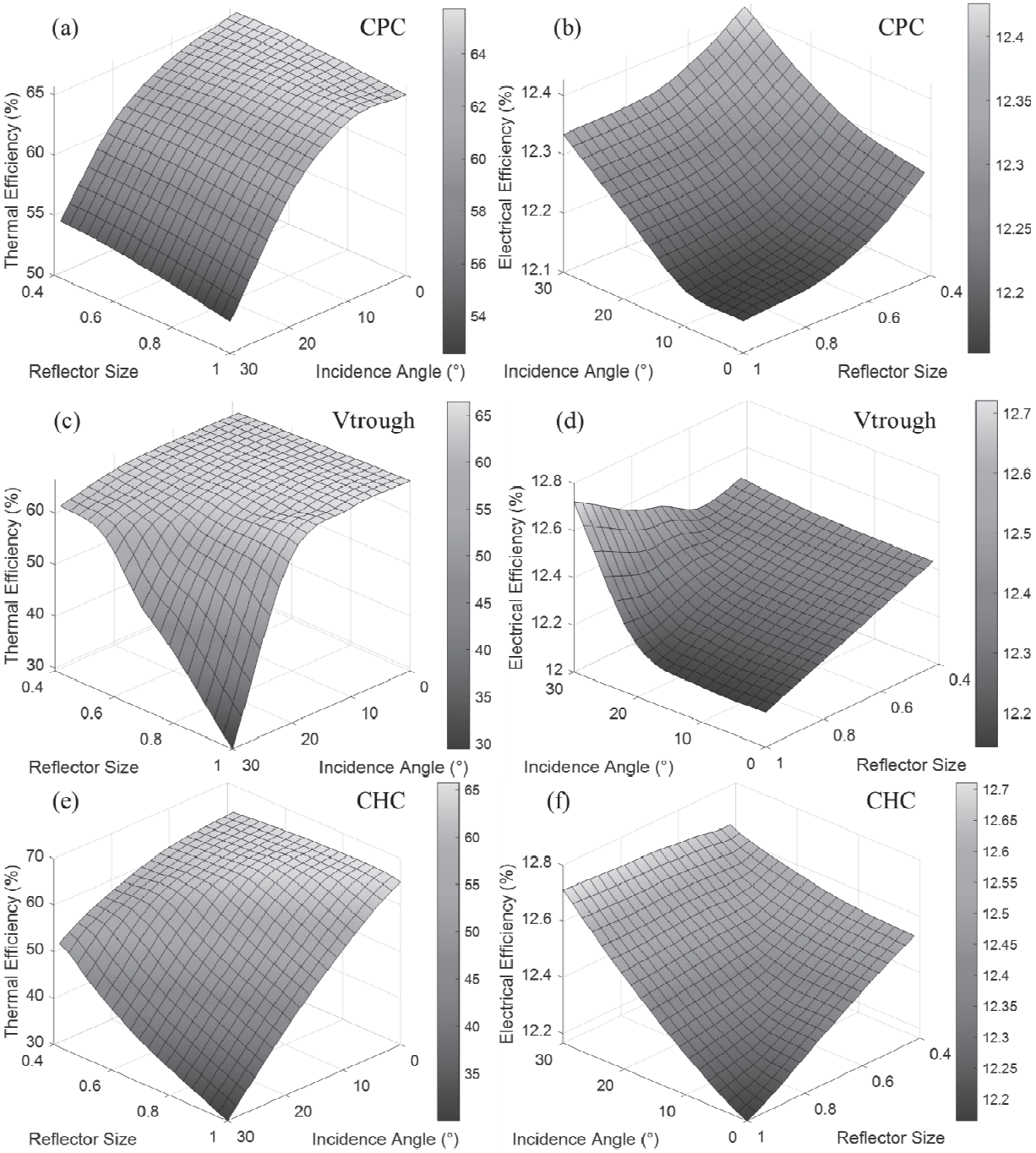


Figure 4: Thermal and electrical efficiencies as functions of truncation ratio and incidence angle for CPC (a, b), V-trough (c, d), and CHC (e, f) systems.

When comparing all three concentrator types, it becomes evident that larger reflector

sizes generally result in higher GRG values at lower incidence angles. However, a universal decline in GRG is observed as the incidence angle increases, emphasizing the importance of optimizing both geometric and operational parameters to ensure consistent performance in CPVT systems.

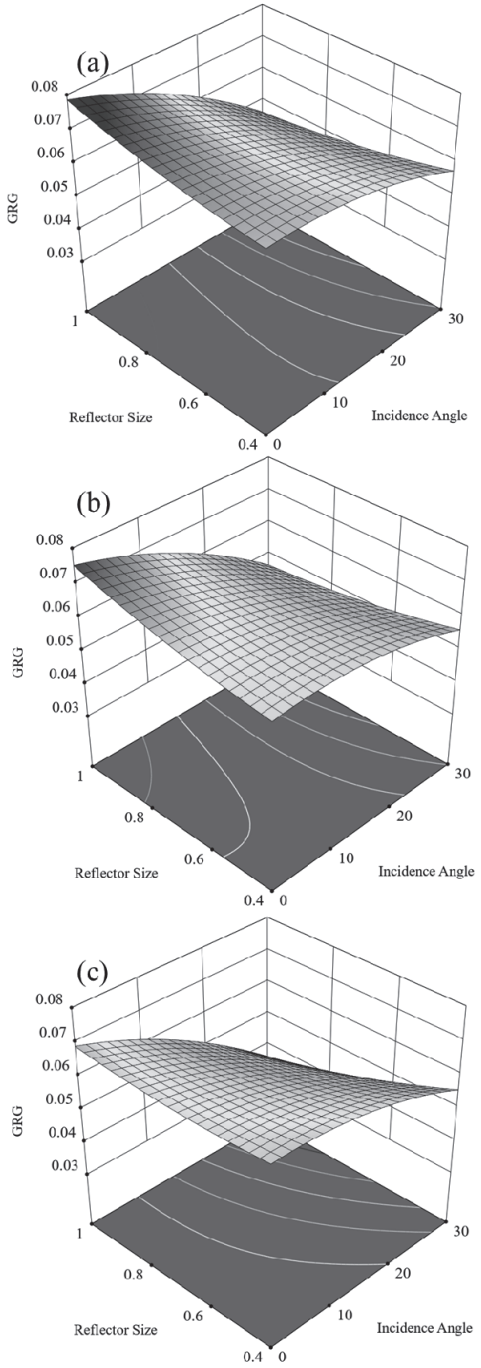


Figure 5: Effect of angle and size on GRG for different concentrator types (a) CPC (b) V-Trough (c) CHC

Further experimental research was carried out. PV modules were integrated into the

V-trough concentrator using a custom-designed frame fabricated with laser-cut precision. The V-trough was engineered with an acceptance angle of 21°, while a trough angle of 10° yielded a maximum acceptance angle of 41°. Under these conditions, the geometric concentration ratio was calculated as 1.94. The reflector height h was measured as 0.1407 meters. The receiving area of the photovoltaic module and the aperture area of the reflector were 0.0525 m² and 0.027 m², respectively. A schematic representation of the CPVT experimental module is provided in Figure 6. Three configurations were evaluated in this study: a high-reflective CPVT system, a diffuse-reflective CPVT system, and a conventional PVT system.

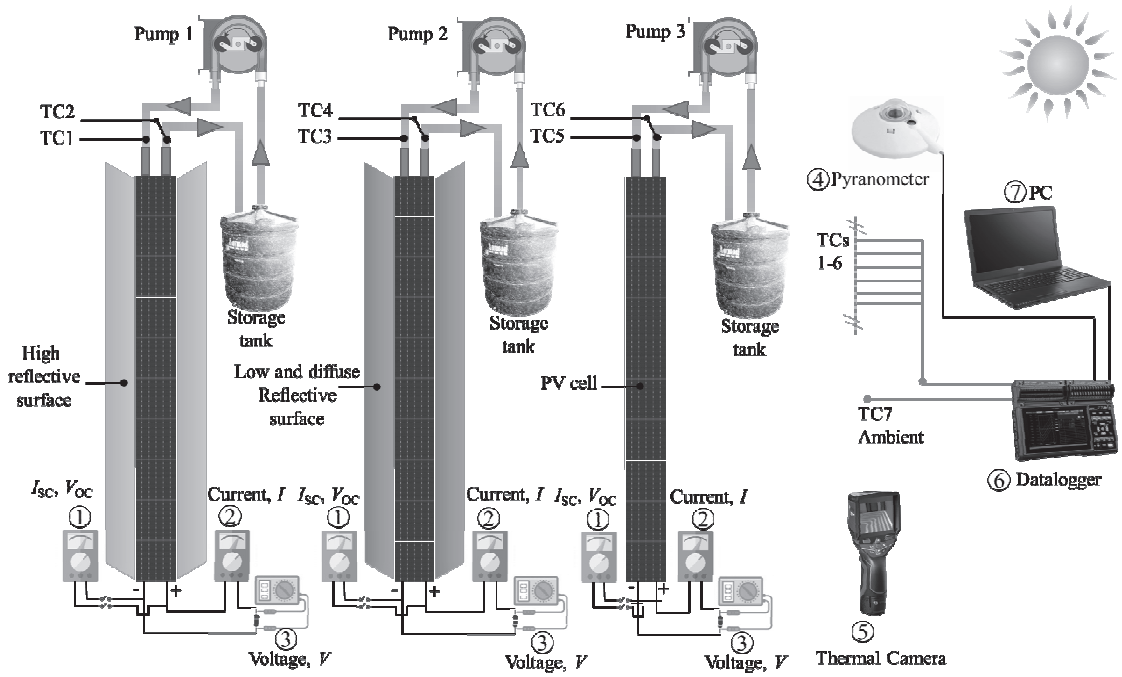


Figure 6: Schematic diagram of the experimental setup for high-reflective CPVT, diffuse-reflective CPVT, and PVT system

A higher mass flow rate of 300 mL/min was tested under partly cloudy to sunny conditions. Figure 7 presents the global, direct, and diffuse solar radiation (a), system temperatures (inlet, outlet, and ambient) (b), and thermal efficiency (c). Compared to the previous day's test at 100 mL/min, solar radiation was slightly higher in the morning due to clearer skies, though the average ambient temperature was lower at approximately 35 °C. The system's operating temperatures were lower overall, attributed to increased flow rate and milder ambient conditions. Afternoon temperatures remained relatively stable, and radiation patterns were similar across both days. The temperature difference between inlet and outlet decreased with the higher flow rate, reaching 0.27 °C (DR-CPVT) and 0.51 °C (HR-CPVT) at 14:00. On average, these differences were 0.37 °C and 0.53 °C, respectively, with maximum values of 0.59 °C and 0.74 °C. Thermal efficiency closely followed radiation fluctuations, making precise comparisons challenging. However, at 12:00, HR-CPVT achieved 27.9% efficiency, while DR-CPVT reached 18.3%. The average thermal efficiencies were 25.6% for HR-CPVT and 17.7% for DR-CPVT, with peak values of 34.6% and 27.47%. Overall, HR-CPVT demonstrated a performance improvement of approximately 7.95% over the DR system.

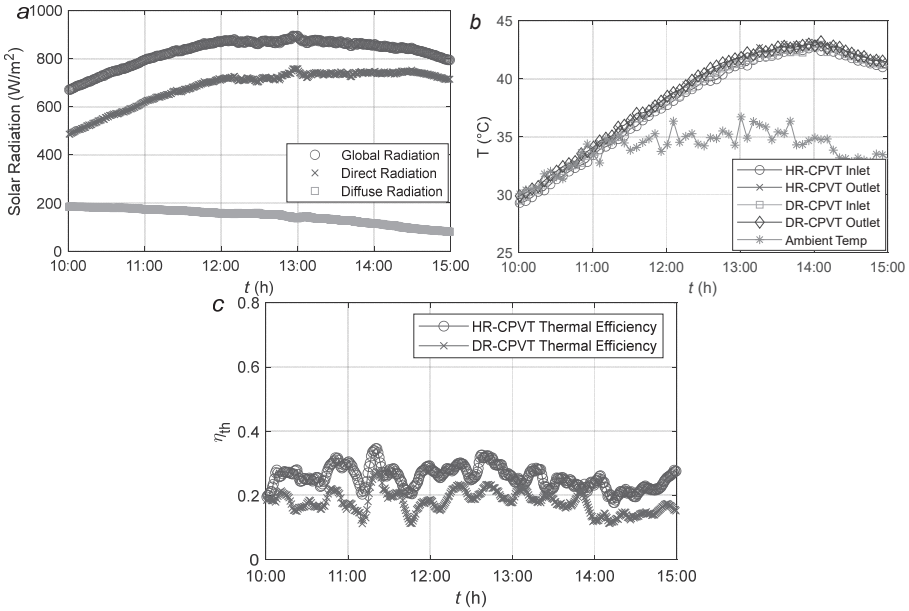


Figure 7: Solar radiation (a), system temperatures (b), and thermal efficiency (c) of HR-CPVT and DR-CPVT on a sunny, partly cloudy day.

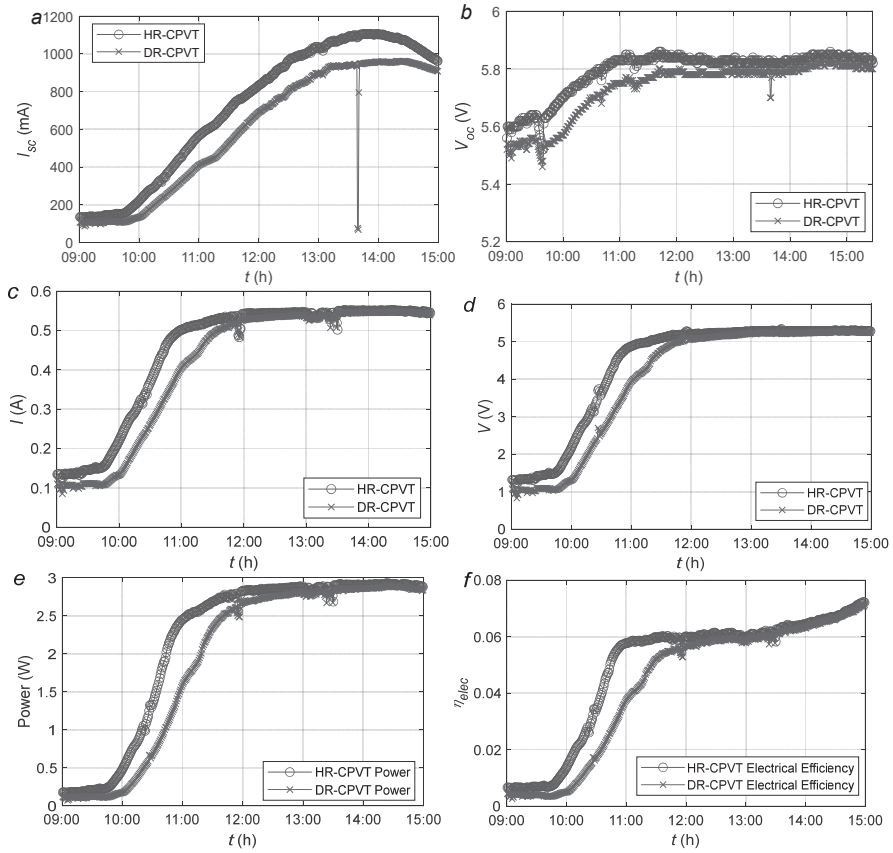


Figure 8: Electrical parameters of HR-CPVT and DR-CPVT on a sunny, partly cloudy day: short-circuit current (a), open-circuit voltage (b), current (c), voltage (d), power output (e), and electrical efficiency (f).

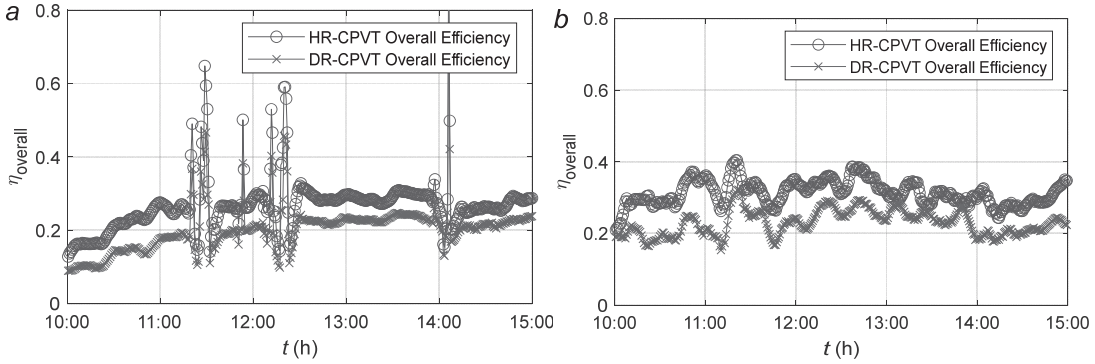


Figure 9: Overall efficiency of HR-CPVT and DR-CPVT systems at mass flow rates of 100 mL/min (a) and 300 mL/min (b).

Figure 8 presents the short-circuit current (Isc), open-circuit voltage (Voc), current (I), voltage (V), power output, and electrical efficiency of HR-CPVT and DR-CPVT systems on July 22 under partly cloudy, sunny conditions with a flow rate of 300 mL/min. The higher reflectivity in the HR-CPVT system led to greater solar irradiance and slightly increased Isc values, peaking at 1106 mA for HR-CPVT and 958 mA for DR-CPVT around 14:00—comparable to previous tests at 100 mL/min.

Voc values stabilized after 10:45 and remained nearly constant for both systems, reaching 5.86 V (HR) and 5.80 V (DR). Due to the temperature sensitivity of Voc, slight reductions were observed, likely around 0.04–0.05 V, mitigated by cooling effects. Current under load (I) was higher in HR-CPVT throughout the day, with values of 0.543 A (HR) and 0.527 A (DR) at 12:00, corresponding to a 2.9% difference. By 14:00, this narrowed to 0.9%. Voltage values showed a similar trend, with HR-CPVT maintaining a slight lead. Power output and electrical efficiency followed the trends of current and voltage. The average electrical efficiencies were 5.93% for HR-CPVT and 5.4% for DR-CPVT. Despite notable differences in reflectivity and system design, the electrical performance gap was modest, with HR-CPVT showing only a 0.53% advantage. The impact of increased mass flow rate was evident in the improved thermal and electrical efficiencies of both systems. For the HR-CPVT, average thermal efficiency rose from 20.2% to 25.6%, while the DR-CPVT improved from 14.5% to 17.7%. Electrical efficiencies also showed moderate gains, increasing from 5.62% to 5.93% for HR-CPVT and from 5.1% to 5.39% for DR-CPVT.

Figure 9 illustrates the overall efficiency at flow rates of 100 mL/min and 300 mL/min. At 100 mL/min, the average overall efficiencies were approximately 25.8% for HR-CPVT and 19.6% for DR-CPVT, with a maximum of 35.9% and 27.64%, respectively—yielding a 6.2% performance difference. When the flow rate was increased to 300 mL/min, overall efficiency improved to 31.59% for HR and 23% for DR, widening the performance gap to 8.49%. Peak overall efficiencies reached 40.4% (HR) and 32.3% (DR).The HR-CPVT system demonstrated a 6.1–8.5% overall efficiency advantage, primarily due to its stronger thermal performance gains (5.6–7.9%). In contrast, improvements in electrical efficiency were relatively modest, with an average increase of only 0.5%, narrowing to about 0.1% after 12:00.

V-trough CPVT systems with high-reflective (HR) and diffuse-reflective (DR) surfaces were experimentally evaluated under varying seasonal conditions and mass flow rates. Results showed that the DR-CPVT system performed comparably—or even slightly better—in electrical efficiency during autumn, due to balanced diffuse and direct solar

radiation. In summer, the HR-CPVT system outperformed the DR configuration thanks to higher solar input and more effective cooling. Increased flow rate improved overall system performance, especially for the HR system. The main advantage of HR-CPVT was observed in thermal efficiency, while differences in electrical efficiency remained minimal. Although HR-CPVT showed a slight edge in exergetic performance, the DR-CPVT system had a shorter payback period and more favorable investment metrics. Response Surface Methodology (RSM) analysis confirmed the reliability of the experimental results and demonstrated the model's predictive capability under varying conditions.

3. Achievements

A number of collaborative research activities have been carried out as part of the partnership between Abid Ustaoğlu, Bilal Kursuncu, and Professor Junnosuke Okajima at the Institute of Fluid Science, Tohoku University. Ustaoğlu and Kursuncu conducted a one-year research stay from January 31, 2024, to January 28, 2025, under the framework of a Collaborative Research Project. During this period, significant progress was made not only on ongoing investigations but also in laying the groundwork for future collaborative projects. Several studies have already been completed and disseminated through international platforms, including presentations at the 21st International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024) and the 24th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2024). As part of the project's scientific output, five journal manuscripts have been prepared. One of these was previously published in Applied Thermal Engineering in 2023. In 2024, two more papers have been accepted:

1. "Design and Performance Optimization of Non-Imaging Concentrating Photovoltaic Thermal Systems Using Grey Relational Analysis and Response Surface Methodology" by Ustaoglu, Kursuncu, Akgül, and Okajima;

2. "Experimental Performance Investigation of High Reflective and Diffuse Reflective Concentrating Photovoltaic/Thermal (CPVT) Systems Using Non-Imaging Concentrators from Energy, Exergy, and Economic Viewpoint" by Ustaoglu, Buyukpatpat, Kaya, Okajima, and Kursuncu.

Two additional manuscripts are currently under peer review. These focus on: (i) the use of nanofluids in CPVT systems, and (ii) experimental analyses of non-imaging CPVT systems designed based on the Earth's axial tilt angle.

This study successfully integrated experimental and optimization-based approaches to evaluate and enhance the performance of V-trough CPVT systems with high-reflective (HR) and diffuse-reflective (DR) concentrators. Experimentally, the HR-CPVT system exhibited superior thermal performance, with an increase in thermal efficiency of up to 7.9% and overall efficiency gains reaching 8.5% at higher mass flow rates. Although the improvement in electrical efficiency was limited (~0.5%), DR-CPVT achieved slightly better electrical performance under diffuse radiation in autumn and showed economic advantages with a shorter payback period and higher investment returns. On the optimization side, the combined use of Grey Relational Analysis (GRA) and Response Surface Methodology (RSM) enabled multi-criteria performance evaluation by considering incidence angle and reflector size. The results revealed that CPC reflectors were more robust under truncation, while GRG values generally declined with increasing incidence angle across all geometries. The RSM models demonstrated high predictive accuracy, validating the experimental findings and confirming that optimized

geometric and operational parameters can significantly improve CPVT system efficiency while balancing cost and performance in real-world applications.

4. Summaries and future plans

Over the past year, we have successfully conducted comprehensive numerical, experimental, and optimization studies on three different types of non-imaging concentrating photovoltaic thermal (CPVT) systems including compound parabolic (CPC), compound hyperbolic (CHC), and V-trough concentrators. In addition to evaluating conventional systems, we introduced nanofluids to enhance thermal conductivity and optimize heat extraction from PV cells. We used various truncation level for various nanofluids.

Experimental setups were developed with high-reflective and diffuse-reflective concentrator configurations. Performance evaluations under various seasonal conditions and mass flow rates revealed that HR-CPVT systems achieved up to 8.5% higher overall efficiency compared to DR-CPVT systems, primarily due to superior thermal performance. Electrical efficiency gains were modest, yet consistent. Optimization studies combining Grey Relational Analysis (GRA) and Response Surface Methodology (RSM) were successfully applied to identify the optimal geometrical and operating parameters. The models showed high predictive accuracy and validated the experimental results.

As a result of this project through 3 years, multiple research outputs were achieved. Three papers have been accepted in high-impact journals, one of which was published in Applied Thermal Engineering in 2023. In 2024, additional papers were accepted, focusing on CPVT design optimization and energy-exergy-economic analysis of reflective systems. Two more manuscripts—one on nanofluid integration in CPVTs and another on axial tilt–based non-imaging concentrator designs—are currently under peer review. Moreover, outcomes were presented at two major international conferences (ICRED2024 and AFI-2024), and five journal papers in Q1/Q2 journals are expected as the final output of the project.

Our future plans include expanding our experimental investigations with advanced nanofluids under different environmental and operating conditions. We also aim to explore hybrid designs integrating spectral filters and thermal storage. Multicriteria optimization will be extended to include methods such as ANOVA and Taguchi analysis to support robust design strategies for scalable CPVT applications.

5. Research results

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

[1] A. Ustaoglu, H. Buyukpatpat, H. Kaya, B. Kursuncu, M. O. Karaagac, J. Okajima. Experimental performance investigation of high reflective and diffuse reflective concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems using non-imaging concentrators from energy, exergy, and economic viewpoint, *Applied Thermal Engineering*, 263 (2025), 121028, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125355.

[2] A. Ustaoglu, B. Kursuncu, V. Akgul, J. Okajima. Design and performance optimization of non-imaging concentrating photovoltaic thermal systems using grey relational analysis and response surface methodology, *Applied Thermal Engineering*, 273 (2025), 126482, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126482.

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

[3] A. Ustaoglu, V. Akgul, B. Kursuncu, J. Okajima,: Numerical investigation of a truncated nanofluid-based non-imaging concentrating photovoltaic thermal (CPVT) system, Proceedings of Twenty-first International. *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-30, pp. 96-97.

[4] A. Ustaoglu, H. Buyukpatpat, B. Kursuncu, M. O. Karaagac, S., Kaltakkıran, J. Okajima: Electrical and thermal investigation of non-imaging concentrator photovoltaic/thermal systems, *Abstract Book of 10th International Conference on Renewable Energy and Development* ICRED2024, Bali, Indonesia, (2024), pp. IE24-608-A.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Best Presentation Award, “Electrical and thermal investigation of non-imaging concentrator photovoltaic/thermal systems”, Abid Ustaoglu, November 8, 2024, session chair and conference committee of 10th International Conference on Renewable Energy and Development (ICRED 2024).

(Press release) Not applicable.

課題番号	J24I076
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	3 年目

高速電離流を伴う宇宙航行システムの数値的研究
Numerical Study for Space Navigation System with High-speed Ionized Flow

高橋 聖幸*†, 松倉 真帆*, 鈴木 颯一郎*
伊藤 光毅*, 鈴木 宏征*, 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

生命や宇宙の起源の解明を目的とした深宇宙探査や, 火星など他天体の探索・移住ミッション実現に向け, 従来の化学推進よりも燃費が良く輸送ペイロードの大質量化が見込まれる電気推進システムが近年注目され, より性能の高い推進機確立を目指して研究開発が盛んに行われている. 宇宙航行用の推進システムについて, 現在ではイオンエンジンやホールスラスタなどの静電加速型電気推進システムが主流となっているが, これらのシステムではプラズマとの接触による電極や中和器の損耗が推進機寿命と直結しており, 今後の宇宙ミッションで要求される長寿命・大電力稼働の観点から不利であり, この問題を回避するため, 電極を有さない磁気ノズル型スラスタに注目が集まっている. 当該システムでは, 誘電体チューブ外部に高周波コイルを配置してヘリコン波をビートすることで高密度プラズマを生成し, 拡散磁場（磁気ノズル）を印加することでプラズマを排気して推力を生成する. 利点として, プラズマと接触する電極が存在しないため原理的に電極損耗問題が発生しないこと, 排気イオンは高温電子によって自発的に電気的中和が成されるため中和器の搭載が不要であることが挙げられる. 近年ではカスプ磁場を磁気ノズル型スラスタに適用することで 30% 程度の推進効率が達成されているが, 現在普及しているイオンエンジンやホールスラスタの推進効率は 50% を超えており, 実用化のためにはさらなる性能向上が必要である.

磁気ノズル型スラスタの改良案の一つとして, 時間変動を伴う磁気ノズルを利用した変動磁場印加型スラスタが新しく提案されている. 変動磁場の印加により周方向電流を誘起し, 径方向磁場との相互作用によって発生するローレンツ力をプラズマに作用させることで排気速度の増大を図る仕組みとなっており, 変動磁場型スラスタは電磁誘導加速を能動的に誘起可能であるため, 磁気ノズル型スラスタの性能改善に寄与出来ると予想される. 一方, その荷電粒子加速過程における物理現象は複雑さゆえ未だ明らかになっていない部分が多く, 数値シミュレーションによる調査が必要となる. 本研究ではこれまでに放電室内に限定した Particle-in-Cell with Monte Carlo collision (PIC-MCC) シミュレーションを行い, イオン加速に関して実験との定性的な一致を得た一方で, 境界条件の制約からプルームにおける物理過程を捉えることが出来ていない. 従って本研究では, 新たに開放境界条件を導入し, プルームを含めたイオン過程について調査する.

1.2 研究期間内の最終目標

本研究では，変動磁場印加型スラスタ放電室内及びプルーム中でのプラズマ輸送現象の解明を目的として，PIC-MCC シミュレーションを実施する．この際，推進機下流におけるプラズマ流動現象を捉えるために新たに開放境界条件を開発し，実装することで，プルームにおけるプラズマ流のダイナミクスも調査する．

2. 研究成果の内容

本研究では，変動磁場型スラスタのプラズマ輸送現象を再現するために，軸方向-半径方向を想定した 2 次元 Full PIC-MCC シミュレーションを行った．イオンと電子の運動方程式を Buneman-Boris 法を用いて数値積分して粒子軌道を求め，2 次元 Poisson 方程式を Mudpack ライブラリにより解く事で電場を算出した．粒子の位置情報から weighting 計算によって格子点上での電荷密度を求め，それを Poisson 方程式へとフィードバックすることで荷電粒子と場とをカップリングした．計算空間には，実験のプラズマ源と同サイズとなるように誘電体壁面を設置した．ここで誘電体表面でのプラズマシースを考慮するために帯電プロセスをモデル化している．超粒子を用いて電子とイオンを計算空間内に配置し，数値ノイズを低減するためイオンと電子の超粒子をそれぞれ 600 万個程度用いた．またデバイ長程度の現象を解像するために十分なセル数とした．それに加えて weighting 計算に用いる補完を 5 次とし，数値ノイズを低減させた．また，電磁誘導効果を低コストで模擬するために Faraday の電磁誘導則を利用する簡易的電磁誘導モジュールを PIC シミュレーションに組み込み，計算領域内の変動磁場および周方向誘起電場を適宜更新する．

開放境界条件を新たに設計し，本シミュレーションに導入した．一般的にヘリコンプラズマスラスタにおいては磁気ノズルに沿ってカレントフリー条件が成立しており，開放境界条件設計においてもこれが満たされる必要がある．また積分形の電荷保存則によれば，カレントフリーが満たされていること即ち，領域の電荷中性が満たされている事と同義となるため，後者を満たすように本研究にて開放境界条件を設計する．この際，電子とイオンとを比較すると，電子の方がその軽い質量から mobility が数桁大きく，境界に到達した全ての粒子を単純に消滅させて開放境界と見做した場合は電子のみが瞬時に消えて電荷中性条件，即ちカレントフリー条件が破綻するため，何らかの工夫が必要である．そこで本研究では，電子及びイオンの領域における数をモニタし，それらがバランスするように境界に到達した粒子を適切に計算空間内に反射させるというアプローチで開放境界を設計する．具体的な粒子反射条件としては，境界に到達した電子及びイオンの分布関数をモニタし，分布関数内に反射エネルギー閾値を設けて，流出する粒子の分布関数の積分値，即ち流出粒子数が電子とイオンとで同等となるよう反射エネルギー閾値をリアルタイムで動かすという手法を開発し，開放境界とした．この開放条件を用いて実際に PIC 計算を行ったところ，カレントフリー及び電荷中性条件が担保されている事が確かめられ，プルームを含めたプラズマ流計算が可能となった．

プルーム込みの PIC シミュレーションの結果，実験と定性的に一致する磁場垂直方向電場（Cross-field）の形成と，半径方向へのイオン静電加速が確認された．また上流位置における静電ポテンシャル・電子圧力の時間発展を調べたところ，実験と定性的に良く一致する結果が得られ，本シミュレーションの有効性が確認された(図 1)．また，イオンに先行して駆動された ExB ドリフト電子によって荷電分離領域が機軸-半径面内に形成されていることが数値計算より明らかになり，Cross-field を形成する特徴的なポテンシャル構造が荷電分極に由来する可能性を初めて示した．加えて従来スラスタの問題点として，プラズマのバックフローと誘電体壁面へのプラズマ損失が発生していることが PIC シミュレーションから判明し，これらの現象が推進剤利用効率や推力性能に悪影響を与えていると考えられた．この問題を解

決するため，プラズマ源内部に静磁場コイルを設置し，局所閉磁場を利用するコイル内蔵型スラスタを新しく提案した．これにより ExB ドリフト電子の駆動を局所閉磁場によって制御することで，投入電力が同量であるにも関わらずスラスタ内部のイオン粒子数が従来と比較して約 1.3 倍に向上した．また電子圧力推力，ローレンツ力による電磁推力がともに向上し，変動磁場 1 周期間での平均推力が約 1.5 倍に向上した．

加えて，プルームについてのダイナミクスも調べたところ，有限半径ラーモア効果によりポテンシャルウォールと呼ばれるポテンシャルの急峻な勾配が形成されることが分かった．変動磁場印加時は，有限半径ラーモア効果が卓越する領域が時間的に変化し，ポテンシャルウォールが時間変動することが世界で初めて明らかとなった．これにより，プラズマデタッチメントが促進される可能性がある．また変動磁場の周波数や空間分布等の制御により，プラズマデタッチメントの時空間ダイナミクスを能動的に制御可能であることが示された．

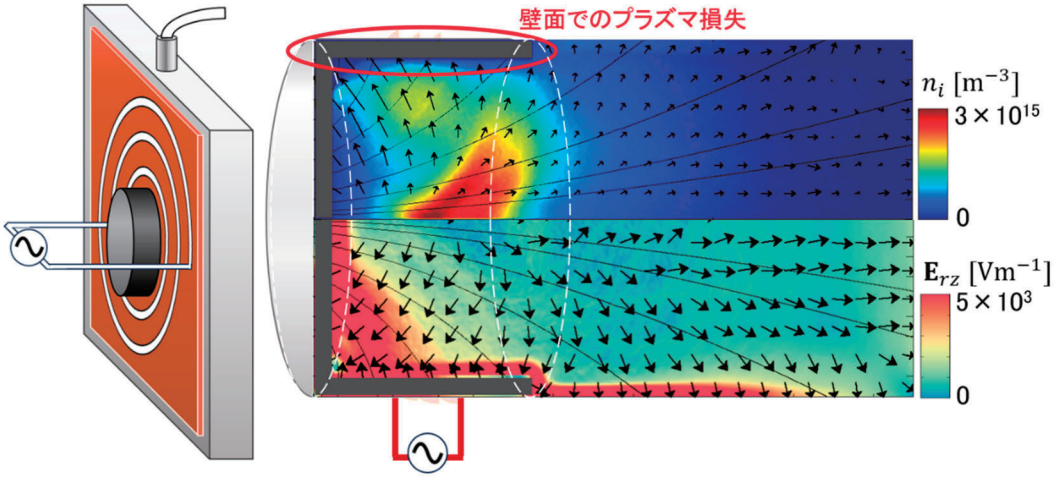


図 1：変動磁場印加型スラスタにおける，イオン密度 n_i，イオン流速ベクトル（上部矢印），r-z面内電場ベクトル $\mathbf{E}_{rz}$ の PIC シミュレーション結果．

3. 研究目標の達成状況

変動磁場印加型スラスタの定性的な再現計算に成功し，提案した電磁誘導モジュールの妥当性，Cross-field の形成原理，従来スラスタが抱えるバックフローおよび誘電体壁面でのプラズマ損失問題を明らかにした．また，ExB ドリフト電子がポテンシャル構造とイオン輸送について重要な役割を担っていることから，局所閉磁場を利用するコイル内蔵型スラスタを提案し，その有効性を PIC シミュレーションから明らかにした．加えてプルームのダイナミクウスを明らかとし，特にポテンシャルウォール構造が時間変動する事が世界で初めて示された．

4. まとめと今後の課題

スーパーコンピューターを用いた PIC シミュレーションにより，変動磁場印加型スラスタのプラズマ輸送現象が明らかになり，得られた知見を活用してコイル内蔵型スラスタを新しく提案した．今後は PIC シミュレーションにおける変動磁場モジュールの改良，提案スラスタの最適設計についての議論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] Masayuki Takahashi, Soichiro Suzuki, Hiroyuki Suzuki, Koki Ito, and Hiroki Nagai, "Numerical Simulation for High-speed and Low-temperature Plasma Flows in a Space Transport System," *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CFR-5, pp. 27-28.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J24I077
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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 デバイスは，目からの距離が非常に近く太陽光の下で使用されるため，高解像度かつ高輝度のディスプレイパネルが必要となる．これを実現するために，フルカラーLED を数 μm レベルで，かつ発光効率を落とさない加工方法を採用する必要がある．本共同研究では，中性粒子ビームによる欠陥制御技術を用いた高輝度マイクロ LED 加工技術の確立を目的とする．

2. 研究成果の内容

5μm 以下のマイクロ LED デバイスは，低電流密度動作，高解像度，原色全域での高輝度の可能性から，VR/AR アプリケーションの次世代ディスプレイ技術として注目が高まっている．しかし，低電流密度では発光効率が著しく低下するという大きな課題が残されている．これは主に，製造時にデバイス側壁に導入された欠陥による内部量子効率の低下が原因である．この問題に対処するため，超低欠陥技術である中性粒子ビーム（NBE）をマイクロ LED 加工に応用した．エッチング条件を最適化し，各材料系に特有のエッチング特性を解明することに焦点を当て，InGaN/GaN 青色および AlGaInP 赤色マイクロ LED を作製した．

青色マイクロ LED については，ヨウ化水素（HI）ガスと塩素（Cl_2）ガスを用いた NBE プロセスを比較した．HI とインジウムのエッチング副産物である InI_3は，対応する塩素系化合物である $InCl_3$よりも揮発性が高いため，より低欠陥な加工表面を形成できる可能性を示唆した．サファイア基板上に成長した InGaN/GaN 多重量子井戸（MQW）青色 LED ウェハを用いて，3.5 × 3.5 μm²から 20 × 20 μm²のサイズの青色マイクロ LED を製造した．電子ブロッキング層（AlGaN）を HI 単独でエッチングするのは困難であったため，最初の 180 nm は Cl_2 NBE を使用してエッチングを行った．続いて，HI NBE をエッチング速度 14.1 nm/分で 30 分間行い，図 1(a)に示すように合計エッチング深さは 603 nm となった．エッチングされた表面には InI_3の高い揮発性により残留物は確認されなかった．メサ側壁は表面に対して 103°の角度を示し，良好な異方性を示した．図 1(b)は，3.5×3.5μm²の青色マイクロ LED の外部量子効率（EQE）の電流密度依存性を示す．3 A/cm²の低電流密度で 8.5%のピーク EQE が達成され，0.01 A/cm²まで電流密度を下げてもはわずか 43%の低下となった．これらの結果は，HI NBE により，Cl_2 NBE を使用して処理されたものと同等の性能を持つ高効率の 5 μm 未満の青色 GaN マイクロ LED を製造できると同時に，側壁の損傷と表面粗さを低減できる可能性があることを示した．

一方，赤色マイクロ LED の場合，AlGaInP ベースの構造がより一般的に採用されている．

しかし，AlGaInP マイクロ LED の加工において，高 In 含有量層と GaP 層の両方を含む構造で，エッチング速度の違いにより GaP 層の過剰なサイドエッチングが生じるため，小チップサイズのマイクロ LED 加工が困難となる．この問題を解決するため，Cl_2およびCl_2/BCl_3 NBE を用いて GaP のエッチング特性を調査した．試料は，GaAs 基板上に 0.81μm の GaP キャップ層を備えた AlGaInP MQW 構造で構成され，エッチングは，ガス流量 50 sccm（Cl_2 NBE）および 42/8 sccm（Cl_2/BCl_3 NBE）の条件下で実施し，温度依存性を評価するためにステージ温度を-20°C，40°C，150°C とした．

図 2 は，断面 SEM 分析により，サイドエッチングに強い温度依存性があることが明らかになったことを示す．Cl_2/BCl_3 NBE は高温で特に高いサイドエッチング速度を示し，150°C では 457 nm/分に達した．これは，高温での塩素ラジカル濃度の増加と塩化リンの揮発性の向上に起因する．逆に，40°C 未満の温度ではサイドエッチングは大幅に抑制された．これらの結果は，AlGaInP 赤色マイクロ LED の場合，GaP 層のサイドエッチングを最小限に抑えるには，効率的な発光とデバイスの信頼性に不可欠な，より異方的なプロファイルを実現するために，少なくとも 40°C 未満の低温で加工することが必要であることを示唆している．

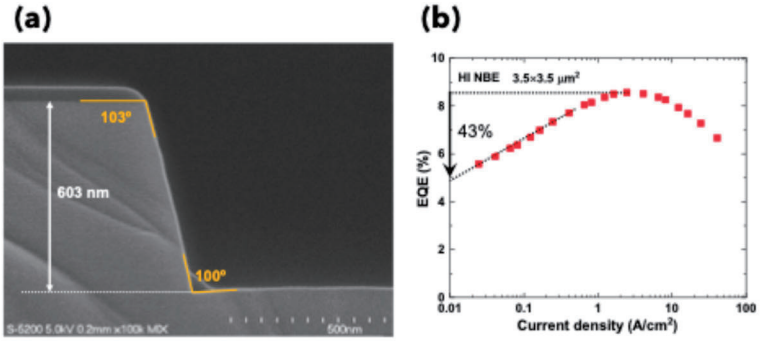


Figure 1. (a) Cross sectional SEM observation of a blue micro-LED MQW structure etched by HI NBE. (b) EQE as a function of current density of a 3.5 x 3.5 μm² blue micro-LED etched by HI NBE.

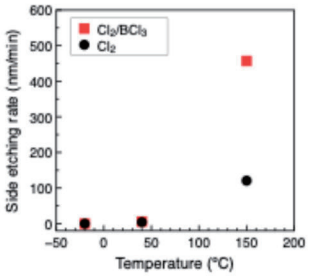


Figure 2. Temperature dependence of side etching rate at each stage temperature of AlGaInP.

3. 研究目標の達成状況

青色マイクロ LED 作製は成功した．本結果より，赤色マイクロ LED の加工特性の一端をを明らかとし，小チップサイズの赤色マイクロ LED の実現へと近づけた．

4. まとめと今後の課題

本研究は，中性粒子ビームエッチング（NBE）が，5μm 以下のマイクロ LED の製造において，低ダメージとエッチングプロファイルの精密制御を可能にする，非常に有望な手法であることを示せた．青色 InGaN/GaN マイクロ LED では，HI ベースの NBE は，ヨウ素系副生成物の揮発性の高さと側壁損傷の低減により，低電流密度で滑らかな表面と高い EQE を実現した．赤色 AlGaInP マイクロ LED では，GaP の温度依存性エッチング挙動を明らかにし，ステージ温度を 40℃未満に維持することでサイドエッチングが大幅に減少し，異方性が向上することを実証しました．これらの知見は，将来の VR/AR アプリケーション向けの高性能フルカラーマイクロ LED ディスプレイの実現に貢献できる．

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] Daisuke Ohori, Xuelun Wang, Seiji Samukawa: Etching Characteristics of Hydrogen Iodide Neutral Beam of InGaN and GaN for Micro-LED Fabrication, *The 7th International Workshop on UV Materials and Devices (IWUMD 2024)*, Taipei, Taiwan, Jun. 2-5, 2024, TB34.

[2] Daisuke Ohori, Xixi Zhao, Xuelun Wang, Tsau-Hua Hsieh, Seiji Samukawa: Sub-5-μm GaN blue micro-LED fabricated by hydrogen iodide neutral beam, *12th International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2024)*, (2024), P13.

[3] X. Wang, D. Ohori, S. Samukawa: High-efficiencly GaN Micro-LEDs Fabricated by Neutral Beam Etching for VR/AR Applications, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024)*, (2024), OS3-1.

[4] S. Samukawa: Atomic Layer Technology and Its Application for Advanced Heterogeneous Integrated Nano-device = Emerging Plasma Nanotechnology =, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024)*, (2024), OS3-2.

[5] 大堀 大介, 王 学論, 寒川 誠二, ヨウ化水素 (HI) 中性粒子ビームを用いた Sub-5-μm GaN 青色マイクロ LED 作製, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, (2025), 14p-K401-9.

[6] 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 のための GaP 加工特性, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, (2025), 17a-K309-6.

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	J24I078
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Investigation of Organophosphorus Flame Retardants: Enhancing Fire Safety in Materials through Advanced Experimental and Computational Techniques

Frederick Nii Ofei Bruce*, Ruining He*, Zhihan Zhu*, Keisuke Kanayama**
Hisashi Nakamura**††, Yang Li*†
*School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The proposed research investigates flame retardant properties of organophosphorus flame retardants, specifically Triethylphosphite (TEPI) and Trimethylphosphite (TMPI). By combining extensive theoretical formulations, experimental investigations, and advanced computational simulations, the project seeks to elucidate the flame retardancy mechanisms of these compounds. The collaboration between Northwestern Polytechnical University (NPU) and Tohoku University (TU), led by Yang Li and Hisashi Nakamura, respectively, enhances the project's depth and impact. This one-year project anticipates extensions and collaborative opportunities for further exploration.

2. Details of program implement

To synchronize the project's progress on both sides, we adopted the phases listed in Table 1.

Table 1: Project Outline

Phase	Task	Institution
I	IDT Validations with High-Pressure Shock Tube	NPU
II	Quantum Calculations and Kinetic Modeling	NPU
III	MFR Experiments and Simulations	TU

To complete the project's first phase, we used the High-Pressure Shock tube (HPST) as illustrated in Figure 1.

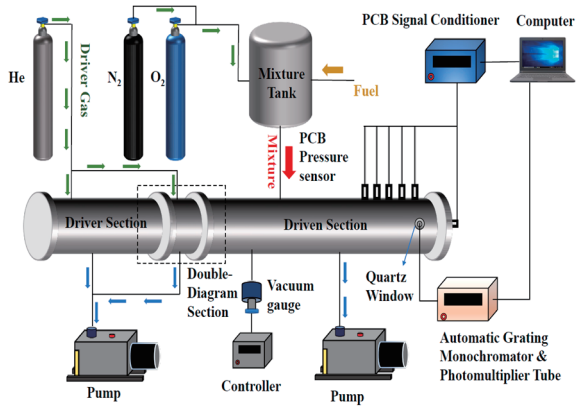


Figure 1: Schematic of High-Pressure Shock Tube

3. Achievements

This research project holds the potential to significantly advance our understanding of organophosphorus flame retardants and their applications in fire safety. We have the following achievements as per the expected results for the project: at least 2 fully validated kinetic models for the detailed understanding of the combustion behavior of organophosphorus flame retardants.

1. Our first achievement is concluding the IDT validation experiments of TMPI and TEPI at 5 and 10 bar.
2. We are also in the final phases of quantum calculations for TEPI, while those for TMPI have been concluded.
3. We are in the final phases of the kinetic models for TMPI and TEPI, and we aim to publish them soon.
4. The research team presented the project in oral and poster presentations at the 2024 ICFD symposium held in Sendai, Japan.

By the end of the study, we expect at least three publications between the collaborative partners of this project. The collaboration between Northwestern Polytechnical University and Tohoku University, coupled with the interdisciplinary approach encompassing theory, experimentation, and simulations, positions this project at the forefront of flame retardancy research. The proposed timeline, budget, and collaborative efforts lay the foundation for a successful and impactful investigation, with potential extensions and applications in subsequent years.

4. Summaries and future plans

After validating the IDT of TMPI and TEPI, we investigated the rate kinetics that govern TMPI and TEPI H-Atom abstractions and further analogies related to barrier heights. The theoretical framework encompasses methodologies for conducting conformer searches, exploring transition states, and performing energy calculations. Ongoing research is to explore other reaction pathways to develop a chemical kinetic model that would be experimentally validated for practical applications of TMPI and TEPI in chemical synthesis, combustion, flame retardant technologies, environmental processes, and pharmaceutical research.

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. (including international conference without peer review)

[1] Frederick Nii Ofei Bruce, Zhihan Zhu, Keisuke Kanayama, Hisashi Nakamura, Yang Li: An Experimental and Kinetic Modeling Study for Autoignition Times of TMPI and TEPI Flame Retardants, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-14, pp. 52-55.

[2] Frederick Nii Ofei Bruce, Ruining He, Zhihan Zhu, Keisuke Kanayama, Hisashi Nakamura, Yang Li: A Comprehensive Study of the Detailed Combustion Kinetic Mechanism of Organophosphorus Flame Retardants, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2025), OS2-19.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J24I079
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Development of Transparent Ultrasound Phantom Material: Sound Velocity Study

Muhammad Shiddiq Sayyid Hashuro*†, Makoto Ohta**††
Reynaldo Averill*, Eunike Kristianti*
*Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Bandung Institute of Technology
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The Objective 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

Prof. Ohta as IFS responsible member has provided us with a collaboration with Toyama University, in which we experimented with a method for estimating the speed of sound in our phantom tissue. The experiment is useful as a comparative study for evaluating the speed of sound in the modified material. The experiment was done on November 2024 at IFS. For the details of the experiment please refer to the journal section below.

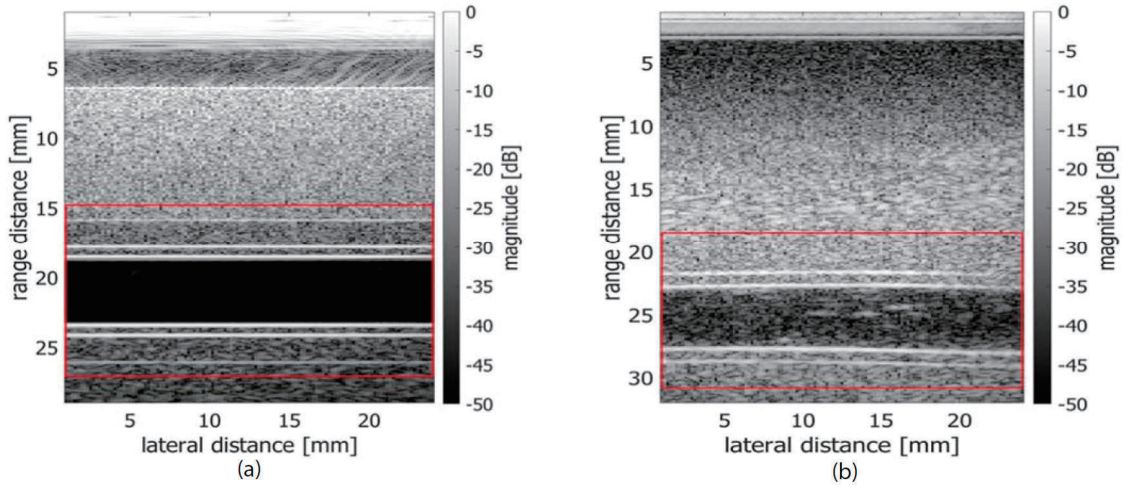


Figure 1: Ultrasound B-mode images of a model in the numerical simulation and a phantom in the experiments. A region surrounded by a red square corresponds to an ROI for estimation of an average SoS. [1]

We also held a simultaneous Ultrasound-PIV experiment to further test the aforementioned speed of sound estimation method (Coherence Factor method). The result of this experiment is planned to be presented later at IEEE IUS 2025

(https://2025.ieee-ius.org/).

Because of the lengthy duration needed, the main experiment about ultrasound phantom material modification was done at ITB Indonesia. We faced several challenges, especially regarding the availability of certain key materials.

3. Achievements

We found that the hypothesized result was correct, with limitation. Even though the addition of ethanol decreases the speed of sound, it also dries the gel more quickly in the room temperature. Thus, adding ethanol to the mixture until the desired speed of sound may render the resulting specimen suboptimal for room-temperature usages.

4. Summaries and future plans

We have done three major experiments on this research:

1. Phantom material modification with ethanol: the hypothesized result was correct within limitation
2. Coherence-factor based ultrasound speed of sound estimation: published on Japanese Journal of Applied Physics [1]
3. Ultrasound Coherence-factor – Particle Image Velocimetry (PIV) simultaneous flow measurement: is planned to be presented at IEEE IUS 2025 (https://2025.ieee-ius.org/).

In the future we are planning to look for alternative additives to replace or mix with ethanol as speed of sound lowering agent. Several candidates are acetic acid and acetone. The current results will be presented at ICFD 2025.

The results of this research will be integrated into larger research about Ultrasound-CT imaging fusion, the outline of which was presented at ICFD 2024.

5. Research results

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

[1] Iida M, Nagaoka R, Hashuro MS, Kaneko K, Hasegawa R, Omura M, Ohta M, Hasegawa H. Study on effects from motion on an estimation method of average speed of sound. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2025 Mar 18. DOI 10.35848/1347-4065/adc1d7

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

[2] E. Kristianti, I. Rostiana, N. R. Marali, M. F. Syukra, M. S. S. Hashuro, M. Ohta. Development of Transcranial Doppler-Computed Tomography Fusion Imaging System Based on Sensors, Artificial Intelligence, and Phantom. *Proceedings of the Twenty-fourth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2024), CRF-24, pp. 80-83.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J24I080
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	1 年目

数値シミュレーションを用いた那覇空港の滑走路上に生じる流れ場の解析
Numerical Investigation of the Flow Field on the Railway at Naha Airport

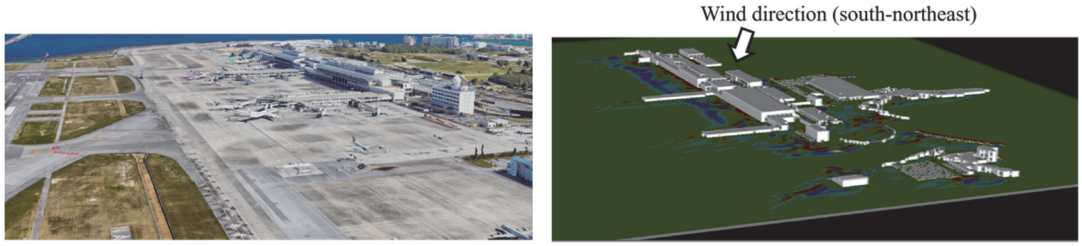
森澤 征一郎*†，儀間 南軌*，仲間 紗音*，焼野 藍子**††
*沖縄工業高等専門学校，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

沖縄県は日本南西端に位置し，海に囲まれた島々から成るため，航空機は非常に重要な移動手段である．那覇空港は県内外の航空交通の拠点空港であるとともに，東南アジアを中心とした地域に対する我が国の南玄関として重要な役割を果たしている．事実，コロナ禍を除き，那覇空港への航空機の離発着数も増加傾向にある．そして，第 2 滑走路が建設され年間発着容量が約 1.8 倍に拡大されるとともに，羽田に次ぐ 2 番目の高さを有する管制塔が配備され視認障害範囲を改善されるなど那覇空港の機能拡充も進めている．一方，沖縄県は台風やゲリラ豪雨が生じるなど気象変化が多い場所でもある．さらに，那覇空港の格納庫以外にも中心都市那覇市付近のため空港以外の建物も存在する．そのため，そこで乱れた風が滑走路に流れ込むと航空機の離発着に影響を与え，滑走路周辺の風環境予測を行うことは重要である．以上の背景のもと，本研究の目的は那覇空港周辺の建物が滑走路に及ぼす風環境を数値シミュレーションによって明らかにする．

2. 研究成果の内容

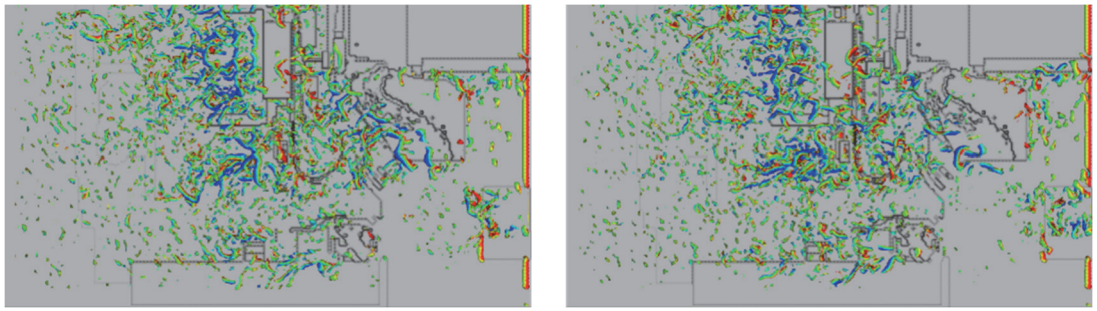
図 1 に那覇空港の様子を示す. この那覇空港には南北に伸びる滑走路があるとなっている．図 1(a)は那覇空港の建物の写真である．建物は 2 つのターミナルから構成されている．一つは旅客ターミナルで，もう一つは貨物ターミナルである．そして，駐機場から滑走路につながっている．一方，図 1(b)は数値シミュレーションに向けて計算機上でモデリングし，再現した空港を示す．数値シミュレーションの計算領域は 1.5 km 四方，高さ 1 km，計算分解能は 5 m とした．また，風環境については，初期条件の風向を南北東とし，風速は 4.1 m/s および 8.2 m/s とした．



(a) 実際の空港　　(b) 計算機上で再現した空港

図 1：那覇空港の様子

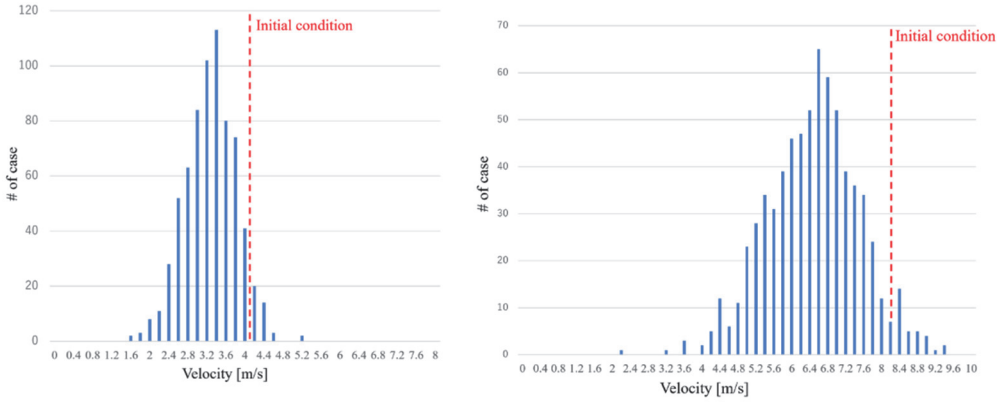
図 3 は空港上面から見た 4.1 m/s と 8.2 m/s の瞬時流れを Q 値の等値面と鉛直方向の速度の色で可視化した．この結果，流れが空港ビルに衝突していることを示唆しており，ビル後方に多くの渦が観察される．このパターンには速度の違いによる大きな差は見られないが，8.2 m/s のケースに比べて 4.1 m/s のケースでわずかに建物後流による移流が残っているように思われる．



(a) 4.1 m/s の場合　(b) 8.2 m/s の場合

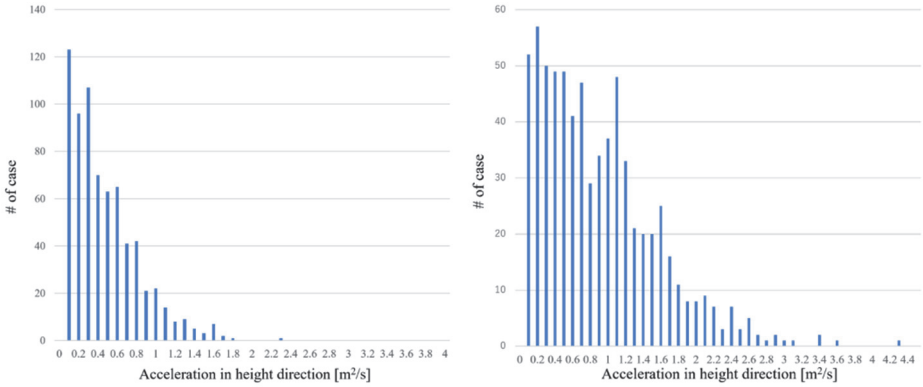
図 2：那覇空港上空から見た瞬間的な流れ場
（青：吹きおろし，赤：吹き上げ）

次に，滑走路 18L 付近での残る風環境について検討を行う．図 3 に滑走路 18L 付近で生じた風速の頻度を示す．図 3 において，4.1 m/s および 8.2 m/s の両ケースで同様に初期状態からの風速が減衰しているが，8.2 m/s のケースの方が 4.1 m/s のケースよりも若干減衰が長い結果を示した．加えて，急激な風の変化を調べるために，滑走路 18L 付近の滑走路での鉛直方向に対する風の加速頻度を図 4 に示す．図 4 において鉛直方向に生じる加速度の発生頻度は，4.1 m/s のケースにおいて低速側に集中している．一方，8.2 m/s のケースにおいても低速側に頻度が集中しているが，時折増加する異なる傾向が見られた．したがって，これらの結果は，風速の初期条件が速くなると風の散逸がより大きく，より不規則になることを示唆している．



(a) 4.1 m/s の場合　(b) 8.2 m/s の場合

図 3：滑走路 18L で残る風速の発生頻度



(a) 4.1 m/s の場合　　(b) 8.2 m/s の場合

図 4：滑走路 18L で残る鉛直方向に対する風の加速度の発生頻度

3. 研究目標の達成状況

本研究は．那覇空港周辺の建物によるの風環境を数値シミュレーションによって実施し，南北東から異なる風速（4.1 m/s および 8.2 m/s）を初期条件として那覇空港の建物に与えた際の滑走路 18L 付近での風環境の違いを示すことができた．［達成度:70%］

4. まとめと今後の課題

本研究では那覇空港周辺の建物が滑走路に及ぼす風環境に関する数値シミュレーションを実施した．現在は，滑走路上の移流・拡散について，滑走路近傍の建物から剥離する流れや，高低差による隙間からの気流によって生じる 3 次元的な流れを調査している．そして，今後は小型機や大型機の違いに対する風環境と後流乱流の関係を調べる必要もある．

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] 森澤征一郎：沖縄県を舞台とした新たな航空輸送実現に向けた提案とその紹介，衛星通信研究会（SAT），沖縄，2025 年 3 月 5 日～7 日．

[2] S. Morizawa, N. Gima, and A. Yakeno: Numerical investigation of the flow field on the railway at Naha Airport, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-59, pp. 165-167.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J24I081
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

Combined In situ & Ex situ, Multi-scale Stress Measurements in Crystalline Geothermal Reservoirs

Xiadong 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.

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.

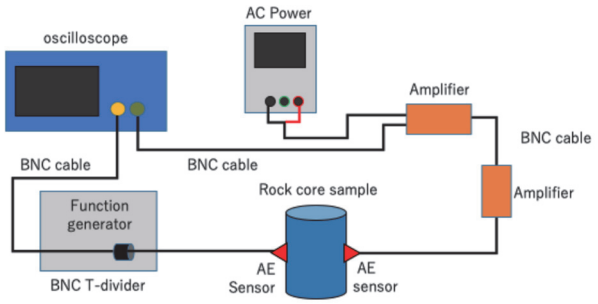


Figure 1: Measurement system for rock velocity

3. Achievements

Achievements level for expected results is moderate. We have completed the measurement and obtained the basic information as we planned.

4. Summaries and future plans

We carried out the measurement to obtain the necessary information of the material before the final compilation of the data to invert the stress state. Next, we will integrate all data and invert the stress state of the field. Then we will discuss the

validity of our stress inversion result considering other geological information.
In addition, we will summarize the results and publish the insights from this project to the standard journal in rock mechanics.

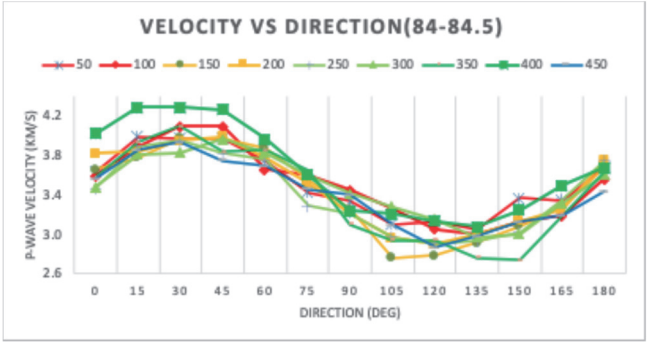


Figure 2： Circumferential variation of rock velocity on the core retrieved from 84-84.5 m depth

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-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-28, pp. 91-92.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

Project code	J24I082
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

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

Aiko Yakeno**†, Jens Fransson*††
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
*Department of Engineering mechanics, KTH Royal Institute of Technology
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Conventional Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equation models round up all turbulent flow components caused by transition into turbulent viscosity, which cannot evaluate the functions required for next-generation high-speed aircraft, such as high angle of attack attitude and laminarization (Figure 1). In this study, we will conduct fundamental research with the aim of acquiring knowledge that will contribute to proposing a new RANS model to predict flow physics more accurately.

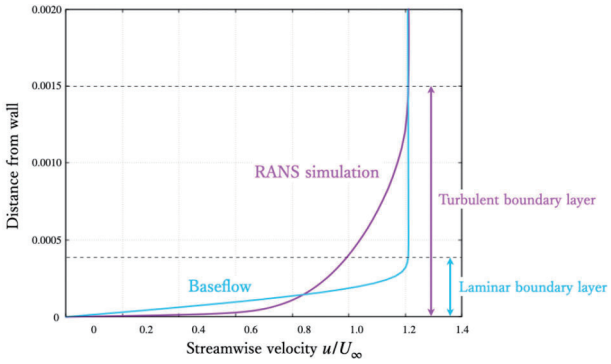


Fig. 1 Boundary layer distributions of laminar and turbulent boundary layer reproduced by DNS and RANS simulations, respectively (Mori *et al*. (2024) [1]).

2. Details of program implement

Basically, the transition start position in numerical simulations tends to be delayed in experiments. This is probably because the numerical simulation does not take into account disturbances that actually exist, such as surface roughness and atmospheric turbulence. In order to reproduce the transition in numerical simulations in conjunction with experiments and actual machine tests, it is necessary to input artificial disturbances that simulate the above-mentioned effects (this operation is also performed in experiments at the low-turbulence wind tunnels). In fact, the transition-start-position changes depending on the conditions of the artificial disturbance, so researches on transitions can generally only yield conditional conclusions.

The ability to conduct such fundamental research while recognizing these facts has benefited from the era of advances in numerical simulation technology. By clarifying how and to what extent disturbances affect transitions, we will elucidate how conventional RANS models are unable to capture transitions, and find ways to improve them.

Figure 2 Cylinders upstream to cause a bypass transition in our wind tunnel experiment (Suzuki, 2024 [2])

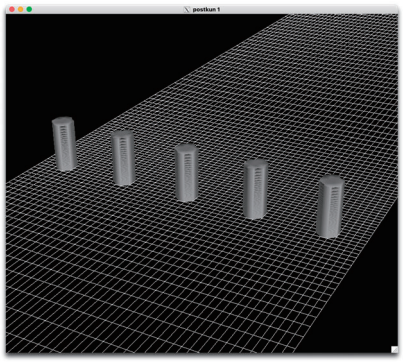


Figure 3 Reproduction of cylinders upstream in current direct numerical simulation.

3. Achievements

We are currently trying to reproduce a typical bypass transition over a flatplate by using direct numerical simulation, with small cylinders upstream.

Figure 2 shows the cylinders upstream to cause a bypass transition in our small wind tunnel experiment by Suzuki (2023) [1] and figure 3 shows those we are trying reproduce them in numerical simulation.

For the cylinder structure, we use volume penalization (VP) in orthogonal grid. We have previously used the VP method for Tollmien-Schlichting wave transition over a flatplate, and for details on the method, please refer to the paper by Hamada *et al.* (2023) [3].

4. Summaries and future plans

Since we have been unable to use the supercomputer at the Institute of Fluid Science from April to July, we have only obtained preliminary results. However, we have already confirmed that the VP method can be used to effectively reproduce the transition of a cylinder placed in the flow and the flow around it (Fig. 4), although the transition was delayed than that in the experiment, and the flow distribution downstream of the cylinder in the experiment (Fig. 5) was not reproduced completely.

In the future analysis, we will try to confirm how the Spalart-Allmaras (SA) model [4], which is a typical RANS turbulence model, fails and obtain guidelines for its improvement.

Figure 4 Contour surface of the instantaneous streamwise velocity, u, near the wall by the simulation.

References

[1] Y. Mori, A. Yakeno, S. Obayashi, *AIAA Aviation FORUM* (2024).
[2] S. Suzuki, *Master Thesis*, *Tohoku University* (2024).
[3] S. Hamada, A. Yakeno, S. Obayashi, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, (2023), 109230.
[4] P. R. Spalart and S. R. Allmaras. *La Recherche Aérospatiale*, (1994), 1:5-21.

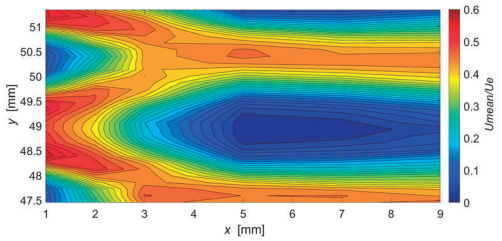


Fig. 5 Contour of time-averaged streamwise velocity by the wind tunnel experiment by Suzuki (2024).

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. Yakeno, J. Fransson: Transition physics and turbulence modeling to reproduce it, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-77, pp. 215-216.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

課題番号	J24I083
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	2 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．本年度の目的は，1）SMe-DLC を市販の粘着剤付 PI テープ上に成膜し，2）PI テープの変形に伴う SMe-DLC の状態変化と，3）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

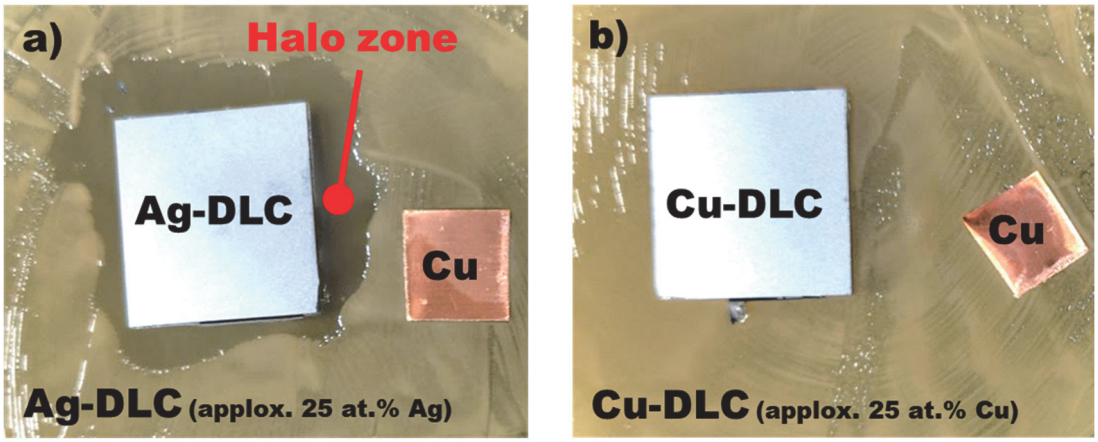


図 1：ハロー法による抗菌性定性評価

これまで報告してきた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市販の粘着剤付 PI テープ上に SMe 含有量 15－40 at.%の範囲の Ag-DLC および Cu-DLC を成膜し光学顕微鏡（OM）による観察を行った．その結果，SMe-DLC は PI

テープに対して良好な密着性を示し，PI テープの貼付・剥離による変形過程で SMe-DLC が微細な断片に割れたセグメント構造に変化するが，繰返し変形に対しての各セグメントは良好な密着性を示すことが確認できた．また，無潤滑下におけるシリコンゴム円筒との摩擦試験において SMe-DLC は摩擦係数 4～5 の高い値を示すが，人の手指で操作する箇所への貼付を考慮すると滑り止め効果が期待できることが確認できた．

JIS L 1902・ISO 20743 に準拠したハロー法による抗菌性定性評価の結果，PI テープ上の Ag-DLC は Cu-DLC よりも優れた長距離抗菌性を示ことが明らかになった(図 1 参照)．また，JIS Z2801・ISO 22196 に準拠した抗菌性の定量評価の結果，PI テープ上に成膜した SMe-DLC の抗菌性能が定量的に評価され，SMe 含有量と抗菌性能は比例する傾向があること，および，同程度の金属濃度であれば Ag-DLC の方か Cu-DLC よりも高い抗菌性能を示すことを定量的に確認し，SMe-DLC の抗菌性能はシリコンゴムによる摩擦試験後も維持されることを明らかにした．

3. 研究目標の達成状況

PI テープ上に成膜した 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した．

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 15－40 at.%の範囲の Ag-DLC および Cu-DLC を成膜し，PI テープの変形による状態変化と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，摩擦前後の抗菌性能変化を定性的・定量的に評価した．抗菌性評価の精度向上および摩擦履歴と抗菌性能の関係把握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] M. Goto, K. Shimabukuro, S. Takeda, H. Miki, K. Ito, T. Uchimoto: ANTIBACTERIAL EFFECT OF SOFT-METAL DLC NANOCOMPOSITE COATINGS FOR HIGHLY DURABLE ANTIBACTERIAL ADHESIVE TAPE, *Proc. 49th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, Biotribology – 2, Sept. 2-4, 2024, Lyon, France.

[2] Minoru Goto, Sho Takeda, Hiroyuki Miki , Kosuke Ito, Tetsuya 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-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-20, pp71-72.

[3] 後藤 実, 廣橋 航, 堀部 有希, 島袋 勝弥: 軟質金属 DLC ナノコンポジットによる高耐久フレキシブル抗菌テープの実現可能性，トライボロジー会議 2024 秋 名護〔’24.10.30-11.1〕予稿集 ダウンロード配布 B51.

[4] 廣橋航, 堀部有希, 島袋勝弥, 後藤実: 軟質金属含有 DLC による高耐久抗菌テープの研究，関西潤滑懇談会 9 月例会ポスター発表会，2024 年 9 月 6 日，明石工業高等専門学校 階段教室・情報メディアセンター．

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）なし

課題番号	J24I084
区分	一般公募共同研究
課題分野	航空・宇宙分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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*，大沼 健伸*
*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

大気突入カプセルは，国際宇宙ステーション（ISS）や小惑星から地上へのサンプル回収を目的とした輸送機である．このカプセルは，遷音速域から亜音速域にて動的に不安定となることが知られている．こうした振動はカプセルの着地・着水点の精度，およびパラシュート開傘に影響を及ぼすため，動的不安定性の解明はミッション成功の最重要項目の一つといえる．

カプセルの動的不安定性に関して国内外で数々の研究が行われてきた．そのうち，揚力型カプセルを対象とした研究では，スティングを用いた風洞試験が行われている．こうした試験では模型を機械的に支持して自由度の拘束をしていることから多自由度運動が可能な実機と定性的に一致しない振動となっている懸念がある．また，カプセルの動的風洞試験は，機体の後方流れの影響を受けるため，模型を支持するスティングは試験結果に影響を及ぼすおそれがある．

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．この磁力支持装置はワゴン車で手軽に移動可能な大きさであり，東北大学流体科学研究所の風洞に設置可能である．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．本応募研究の風洞模型は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．

本研究では，新たな動的磁力支持装置の開発と，装置を用いた動的風洞試験を実施した．風洞試験は東北大学流体科学研究所の小型低乱検定風洞にて実施した．風洞模型は，重心位置を中心軸からオフセットした揚力型大気突入カプセルの縮尺模型である．風洞試験で得られた自由振動のモーションキャプチャ画像から空力微係数を同定する．

2. 研究成果の内容

2-1 動的磁力支持装置

図１に本研究で開発した磁力支持装置の CAD 図を示す．気流方向は水平方向（x軸正方向）である．この装置の特徴は，風洞模型がy軸まわり回転（ピッチング），およびxz平面内並進が可能な点である．風洞模型に鉛直上向き（z軸方向）の浮上力を与えるため，装置に円柱型外部永久磁石を設置し，風洞模型には円盤型永久磁石を内蔵した．y軸方向は不安定であるため，左右に制御用空芯コイルを設置して模型のy方向位置をフィードバック制御する．

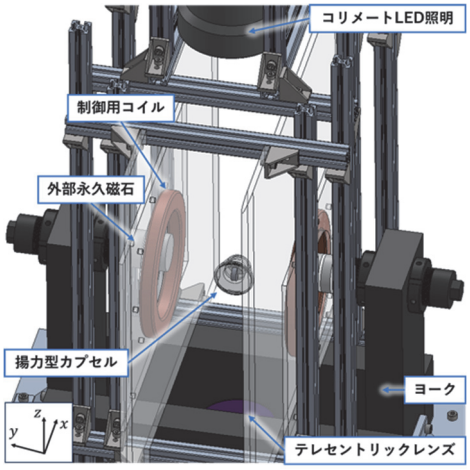


図 1：横型風洞用動的磁力支持装置

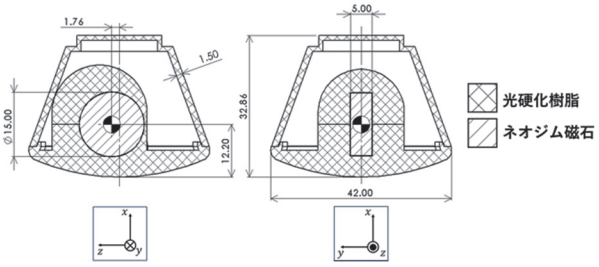


図 2：揚力型大気突入カプセル模型

2-2 揚力型カプセル模型

本研究にて使用した揚力型大気突入カプセル模型の図面を図 2 に示す．形状は HRV（H-II Transfer Vehicle-Return Vehicle）で，実機の 1/100 に縮尺したものを 3D プリンターにて製作した．重心位置は実機と同じ偏心率となるように設計した．気流方向（x方向）にノーズから 37%位置で，鉛直方向（z方向）はショルダー直径に対し中心軸より 4.2%の位置である．風洞試験において，重心位置は中心軸よりも上に位置するように浮上する．

2-3 動的風洞試験

前節に述べた設計に基づいて開発した横型風洞用動的磁力支持装置を用いて，自由運動型風洞試験を行った．本研究の風洞試験は，東北大学流体科学研究所の小型低乱検定風洞で実施した．図 3 に風洞試験中の磁力支持の様子を示す．無風の場合および気流流速 5~16 m/s で風洞試験を行った．風速を 1 m/s ごとに増加させ，十分に時間をとって気流流速が一定値に落ち着いてから計測を行った．試験時間は目標の気流流速になってから 900 秒間とした．

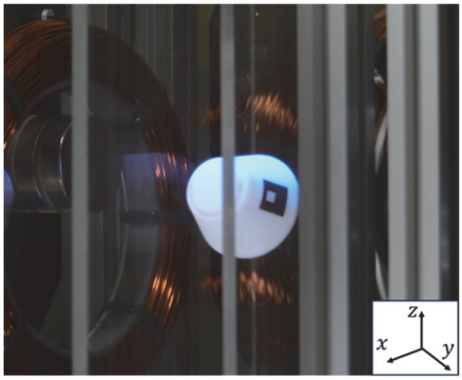


図 3：磁力支持された風洞模型

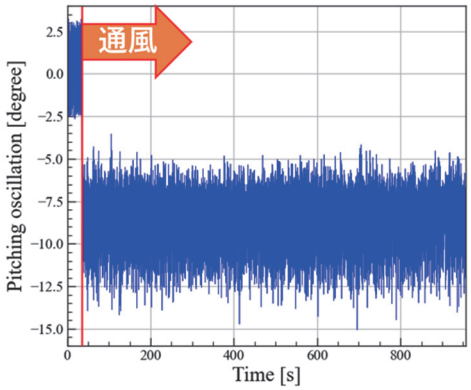


図 4：ピッチ角 θ の時間履歴（15[m/s]）

風洞試験結果の一例として気流流速 15 m/s の結果を図 4 に示す．縦軸はピッチ角 θ で，横軸はデータ取得開始からの時間である．回転振動は中立安定な挙動（リミットサイクル）となった．

気流流速を変化させたとき，ピッチ角 θ の振幅は概ね一定値で，気流流速にはほとんど依存しなかった．これは自明なことではなく，普遍性があることなのか，今回の実験条件に限定されたことなのか慎重に見極める必要がある．

2-4 モーメント傾斜の同定

動的風洞試験の結果から，モーメント傾斜$C_{M\alpha}$を同定した．計算には以下の式を用いた．

$$C_{M\alpha} = -\frac{(2\pi f_{\theta 1})^2 I - mg\delta_{og}}{q_\infty S d} \tag{1}$$

q_∞ [Pa]は風洞気流動圧，S [m²]は模型の基準面積，d [m]は模型の基準長さ，I [kg・m2]は慣性モーメント，δ_{og} [m]は模型重心と磁石中心の微小な誤差，$f_{\theta 1}$ [Hz]はピッチ回転卓越周波数を表す．表 1 に本研究で求まった値と，先行研究の結果を示す．本研究では，概ね先行研究と一致する結果を得た．

表１：モーメント傾斜$C_{M\alpha}$の比較

	$C_{M\alpha}$[1/rad]	標準偏差
本研究	-0.114	0.004
Ueno et al. 2024	-0.111	0.005
Fujii et al. 2016	-0.121	

3. 研究目標の達成状況

申請書記載事項「予想される成果」に記載したとおり，小振幅運動のモーションキャプチャから空力微係数の同定を達成した．通常の支持棒を使った風洞試験のような支持干渉がないので，より正確な値が得られたと判断している．その結果をまとめて国際シンポジウムICFD2024 および日本航空宇宙学会北部支部講演会で報告した．

2024 年度中に大振幅自由運動の予備的な風洞に挑戦する計画であったが，2024 年度の風洞試験ではピッチ角振動の振幅が概ね一定値であり，大振幅振動の予備試験ができなかった．得られたデータを詳細に検討し直して 2025 年度の風洞試験に備える予定である．

4. まとめと今後の課題

大気突入カプセルの動的不安定性の実験的解明を長期目標として，横型風洞用動的磁力支持装置を開発し，揚力型大気突入カプセルのスティングを用いない自由運動型風洞試験を実現した．この装置を用いた風洞試験を実施し，中立安定な挙動（リミットサイクル）のピッチ回転振動を観測した．その運動データをモーションキャップチャによって取得して，モーメント傾斜を同定した．得られた値は，先行研究と概ね一致する結果であった．今後は，現状よりも高気流流速下で実験できるような装置改良に取り組み，動的不安定現象の理解を深めるためのデータ取得を試みる計画である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] K. Ueno, T. Sato, Y. Takeda, R. Nagasaka, M. Kikuchi: Free-motion Wind Tunnel Testing Using a Three-degree-of-freedom magnetic suspension system, *Experiments in Fluids,* 65 (2024), 107 (14 pages), doi: 10.1007/s00348-024-03839-4

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] K. Onuma, K. Ueno, Y. Takeda, K. Asai, H. Nagai, T. Ikami, Y. Sasaki, M. Okawa: Free-motion Wind Tunnel Testing of a Lifting Atmospheric Entry Capsule, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), pp. 550-551.

[3]大沼健伸，上野和之，竹田裕貴，浅井圭介，吉清水秀鷹，黒澤尚暉，佐々木義仁，永井大樹: 横型風洞用動的磁力支持装置の開発と揚力型大気突入カプセルの自由運動型風洞試験，日本航空宇宙学会北部支部 2025 年講演会ならびに第６回再使用型宇宙輸送系シンポジウム，(2025), pp. 100-101.

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	J24I086
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	1 年目（発展）

ヒト中枢神経疾患モデル化三次元血液脳関門チップの開発
3D Human Blood-Brain Barrier in Brain Diseases on a Chip

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 研究センター薬動力学部門
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

中枢神経疾患の患者数が世界的に増加し，これら疾患に対する治療法開発のニーズが高まっている．脳には，血液脳関門（Blood-brain barrier, BBB）と呼ばれる「特殊な微小血管ネットワーク」が存在し，脳内の物質的環境を厳密に制御することで，高度な神経活動を支援する役割を担っている．これまでの病理研究によって，ほぼ全ての中枢神経疾患に BBB の機能破綻がみられることが示唆されており，BBB に着目した病態機序を研究することで，数多くの神経疾患の診断・治療につながる可能性がある．しかし，ヒト中枢神経疾患の病態を反映した BBB モデルはこれまでになく，研究が著しく停滞しているのが現状である．私たちはこれまでの本共同研究を通して，マイクロ流体デバイスを用いて BBB の輸送機能を有する脳微小血管網の再構築に挑戦してきた．本研究では，これまでに培ったノウハウを結集させ，ハイスループットアッセイを可能とする独自のマイクロ流体デバイスを用いた中枢疾患モデル化三次元 Human BBB in Brain Diseases on a Chip を開発し，中枢神経疾患に対する治療法開発のためのプラットフォームを構築することを目的とする．

2. 研究成果の内容

(1) ヒト pluripotent stem cells（hPSCs）から脳微小血管内皮細胞（Brain Microvascular Endothelial Cell, BMEC）および平滑筋細胞（Smooth Muscle-Like Cell, SMLC）への分化誘導とマイクロ流体デバイスへの導入（図 1）

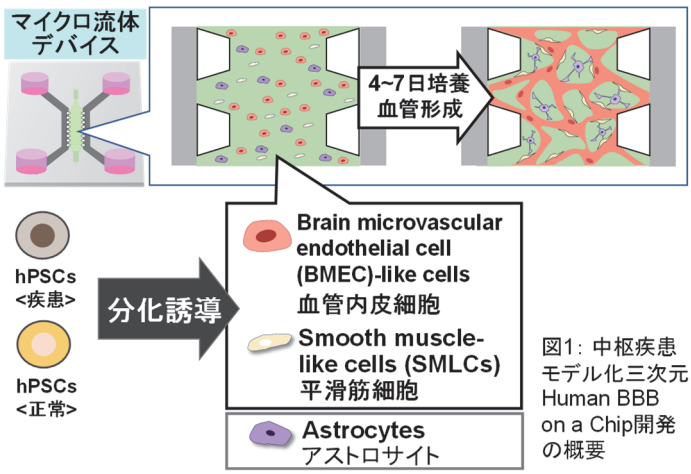


図1：中枢疾患モデル化三次元 Human BBB on a Chip開発の概要

西原らが開発した Extended endothelial cell culture method（EECM 法，*FASEB J* 34:16693-16715, 2020）を用いて，健常者および多発性硬化症患者由来の hPSCs を BMEC 様細胞（BMEC-like cells）および SMLCs へと分化誘導した．

BMEC 様細胞は, 初代培養ヒト脳微小血管内皮細胞の形態を示した. ヒト BMEC 様細胞, SMLCs 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，マイクロ流体デバイスのゲルチャネルに導入した．デバイスは 37℃で 4~5 日間インキュベートし，毎日培地を交換した．健常者および多発性硬化症由来の BMEC 様細胞と SMLC およびアストロサイトの混合培養を行ったところ，デバイスのゲルチャネル内に微小血管ネットワークが形成された.

(2) マイクロ流体デバイスに再構築した脳微小血管系の性能評価

微小血管系の灌流性は，メディウムチャネルを通してマウス全血および蛍光標識レクチンを導入することで評価した. マウス全血をマイクロ流体デバイスのメディウムチャネルに導入すると，血球はゲルチャネル内の微小血管ネットワーク内を通過した．血球は血管外漏出を示さず，血管内腔に保持されていた．蛍光標識レクチンは微小血管ネットワーク内で灌流可能であり，血管内壁はレクチンで標識されていた．これは脳微小血管がより緻密なグリコカリックス構造を持つという報告と一致した（*Sci Rep* 8:17523, 2018）．さらに免疫組織化学染色によって，タイトジャンクションタンパク質であるクローディン-5 と接着分子 VE カドヘリン（CD144）のタンパク質局在が血管様構造に沿って検出された．以上の結果から，マイクロ流体デバイス内で再構築された脳微小血管構造は，タイトジャンクション，接着分子および高度に発達したグリコカリックスという BBB の特性を有することが示唆された.

3. 研究目標の達成状況

本研究によって，疾患由来ヒト iPS 細胞を用いてマイクロ流体デバイス内に三次元ヒト脳微小血管網を構築する，という当初の研究目標が達成された．本モデルを構築したことによって，ヒト BBB の機能破綻に着目した病態機序の解析が可能となった．ヒト多発性硬化症をモデル化した灌流可能な三次元 BBB モデルはこれまでになく，ヒト BBB を標的とする中枢疾患研究や創薬研究のボトムネックが解消されることが期待される.

4. まとめと今後の課題

正常および多発性硬化症由来のヒト BMEC 様細胞および SMLCs そしてアストロサイトをマイクロ流体デバイス内で混合培養することによって，タイトジャンクションや緻密なグリコカリックスという BBB の特性を示す三次元ヒト微小血管網を再構築することができた．今後は開発した疾患由来 BBB モデルの性能を実証するため, 本モデルが多発性硬化症の病理学的特徴（BBB を介した白血球の遊走促進など）を反映するかを検証する必要がある．さらに本研究の成果を基にして，中枢神経疾患由来の hPSCs あるいは遺伝子変異を導入した hPSCs を用いて，疾患モデル化 BBB モデルの開発を加速させ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）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] M. Tachikawa, M. Inagaki, H. Sano, S. Mama, Y. Sakamaki, K. Funamoto, Placental extracellular vesicles: their unique characteristics of the blood-brain barrier transport, *International Federation of Placenta Association*, (2024)

[2] S. Mama, M. Inagaki, H. Nishihara, K. Matsuo, A. Hashimoto, K. Funamoto, M. Tachikawa: 3D Human Blood-Brain Barrier in Brain Diseases on a Chip, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2024)

[3] 立川正憲:『血液脳関門操薬』のストラテジー，薬物動態談話会第 28 回夏セミナー，(2024)
[4] 立川正憲: 脳クレアチン欠乏と小児神経発達 : プロドラッグを用いた脳クレアチン補充療法の基盤開発，第 78 回日本栄養・食糧学会大会，(2024)
[5] 立川正憲，稲垣舞: Decoding human blood-brain barrier transport system and Building 3D human blood-brain barrier in brain disease on a chip ヒト血液脳関門輸送システムの解明と脳疾患モデル化三次元ヒト血液脳関門チップの開発，第 65 回日本神経病理学会，(2024)

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	J24I087
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st 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	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	– 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

	hemodynamic 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
   - The expected result of this study is to validate the effectiveness of the current treatment for intracranial aneurysm using the hemodynamic and structural analysis before validated with the experimental activities.
   - The optimum level porosity of the coil for aneurysm embolization was identified and simulated in the simplified aneurysm.

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.

5. Research results

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

[1] Aisya Nursaffiya, Ryuhei Yamaguchi, Kahar Osman, Mohamad Ikhwan Kori, Mohd Rashdan Saad, Makoto Ohta & Nadia Shaira Shafii, "Hemodynamic Effect of Coiled Middle Cerebral Artery Aneurysm – A Preliminary Study", *2nd International Conference of Biomedical Engineering and Health Science 2024 (ICBMEHS2024).*

[2] Aisya Nursaffiya, Ryuhei Yamaguchi, Kahar Osman, Mohamad Ikhwan Kori, Mohd Rashdan Saad, Makoto Ohta & Nadia Shaira Shafii. Hemodynamic Effect of Coiled Middle Cerebral Artery Aneurysm – A Preliminary Study, *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences, - submitted in review, expect publish on September 2025.*

[3] Nadia Shaira Shafii, Ryuhei Yamaguchi, Kahar Osman, Mohamad Ikhwan Kori, Ahmad Zahran Md. Khudzari, Makoto Ohta, *Hemodynamic Effects of Various Coil Porosity for Simplified MCA Aneurysm Treatment,* Int. J. of Biomedical Engineering and Technology. – submitted Jan 2025

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

[4] Nadia Shaira Shafii, Ryuhei Yamaguchi, Kahar Osman, Mohamad Ikhwan Kori, Makoto Ohta, *Hemodynamic Effects On Aneurysm Endovascular Coil Porosity*, *Twenty-First International Conference On Flow Dynamics* 2024 (Icfd 2024), 2024, 684-686.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

- Not applicable

(Award)

- ***Best paper award*** "Hemodynamic Effect of Coiled Middle Cerebral Artery Aneurysm – A Preliminary Study", 2nd International Conference of Biomedical Engineering and Health Science 2024 (ICBMEHS2024), Aisya Nursaffiya, Ryuhei Yamaguchi, Kahar Osman, Mohamad Ikhwan Kori, Mohd Rashdan Saad, Makoto Ohta & Nadia Shaira Shafii

(Press release)

- Not applicable

課題番号	J24I089
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	2 年目

高圧環境における酸素富化火炎の計測技術の高度化に関する研究
Advancement of Measurement Technique for Oxygen Enriched Flame under High Pressure

早川 晃弘*†，中谷 辰爾**††
近藤 広海*,***，廣瀬 帆**
*東北大学流体科学研究所，**東京大学大学院工学系研究科
***東北大学大学院工学研究科
†所内対応教員，††所外対応研究者

1. 研究目的

高圧環境下における計測技術の高度化は，ロケット燃焼に代表されるような高圧環境下における燃焼現象解明の解明や数値シミュレーション技術の信頼性向上に向けて重要である．計測技術の高度化には，種々の手法によって計測を実施して，計測結果の確からしさを検証する事は重要である．本研究では，水蒸気からの２バンド近赤外線（Near-Infrared: NIR）を用いた温度計測手法を酸素富化 $CH_4/O_2/N_2$ 火炎に適用した．

2. 研究成果の内容

本研究は，東北大学流体科学研究所において開発した多孔校正バーナーを用いた．このバーナー上に，酸素富化率 55%の $CH_4/O_2/N_2$ 火炎を形成した．また実験は全て大気圧下に置いて実施した．このバーナーを用いることで酸素富化された火炎を定在させることが可能であり，NIR 領域におけるスペクトルを用いる温度計測手法が幅広い温度域に対して有用である事を示すことができる．

本研究ではまずフィラメントによる温度計測（Thin Filament Pyrometry: TFP）によって構成を行った後に２バンド NIR 温度計測を実施した．最終的に放射強度非と温度の関係を算出し，高温火炎の温度計測を実施した．

図１は２バンド NIR 温度計測によって調べた，TFP によって計測した温度と放射強度比の関係である．ここで得られた放射強度比と温度の関係に対し，パラメトリックな線形回帰でなく，ガウス過程を用いて回帰を行うことで，以降の温度分布を求める．

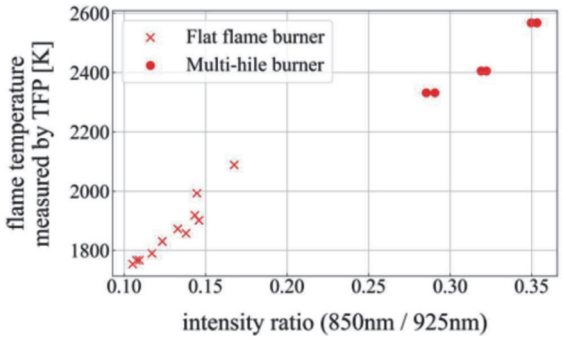


図１：火炎温度と輻射強度比の関係

多孔バーナーにおける温度計測を実施した．図２は多孔バーナー上の高温ガスに対し上記の回帰手法により得られた二次元温度分布である．ここで M1，M2 および M3 条件はそれぞれ当量比が 0.6，0.7 および 0.9 の条件である．図に示すように，バーナー下流にほぼ一様の既燃ガス領域が形成されていることが観察された．さらに，当量比が大きくなるにつれて火炎長が長くなる事も示された．

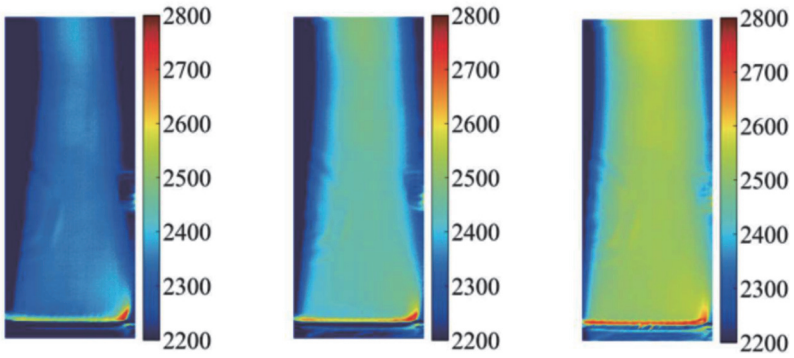


図２：M1（左），M2（中央）および M3（条件）における二次元温度分布[K]–

3. 研究目標の達成状況

TFP および NIR のスペクトル計測を組み合わせることによって多孔バーナー上に形成された酸素富化メタン／酸素／窒素火炎の火炎温度を計測することができた．本研究は本実験で形成したような既燃ガス温度が従来火炎より高温となる条件に対しても本計測手法の有効性を示すものであり，高温・高圧環境における計測技術の高度化という本共同研究の目標達成に資するものである．

4. まとめと今後の課題

ここに成果の概要を示す通り，酸素富化メタン／酸素／窒素火炎の温度計測に成功した．今後は本手法を高圧燃焼場に適用する事で，高圧環境下における火炎温度計測に対しても本手法が有効であるかどうか検討を行っていく．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

該当なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] K. Hirose, F. Ren, K. Omi, K. Nakayama, K. Uchida, S. Nakaya, H. Kondo, S. Hasegawa, T. Kudo, A. Hayakawa, M. Tsue: Thermometry of Oxygen Enriched Methane Flames using Near-infrared Emissions from Water Molecules, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-10, pp. 39-42.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

該当なし

課題番号	J24I090
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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・大気圏突入物体開発で使用される空力データは，地上実験設備で減速のない条件で計測される．一方で，移動物体は必ず減速し，かつ減速により抗力係数が変化することが知られているが，どの程度変化するのかの報告は出ていない．このため，地上実験が現実と合致していない．この減速が抗力係数に与える効果の評価が第 1 の目的である．抗力係数の計測には，自由飛行物体の高速度撮影を用いる．この実験手法では，計測精度が低いという問題がある．計測精度は撮影条件に依存するので，計測する現象に対して，最適な撮影条件を選ぶことで，計測装置の性能を最大限に生かした高精度計測が可能になる．この高精度な計測を可能にする条件の設定基準構築が第 2 の目的である．

2. 研究成果の内容

研究計画では，物体の寸法が減速挙動および抗力係数に与える影響を明らかにするため，直径の異なる複数の球体（小・中・大）を対象に，マッハ数 0.3〜1.0 の範囲で実験を実施することとしていた．このうち流体研では，大直径の球を計画しており，本年度ではマッハ数 2 条件を実施した．実験に先立ち，計測精度を予測するための解析ソフトウェアを構築し，このソフトを用いて高精度な計測が可能となる実験条件を選定した．また，ソフトウェアでは考慮されていない可視化光学系の調整ミスによる計測精度低下を防止するため，どの部品の調整が計測精度に対して特に重要であるかを系統的に調査した．これらの準備を経ているため流体研での計測は十分な精度を有している．

一方で，小直径の球については，マッハ数 0.3〜1.0 の全条件での実験をすでに完了しており，減速が抗力係数に与える影響が明確に観測された．ただし，その傾向は，減速が大きいほど抗力係数が大きくなる結果となった．これは，事前の理論予測と異なる結果を示しており，現在その原因を探るため，データの再確認と補足解析を進めている．

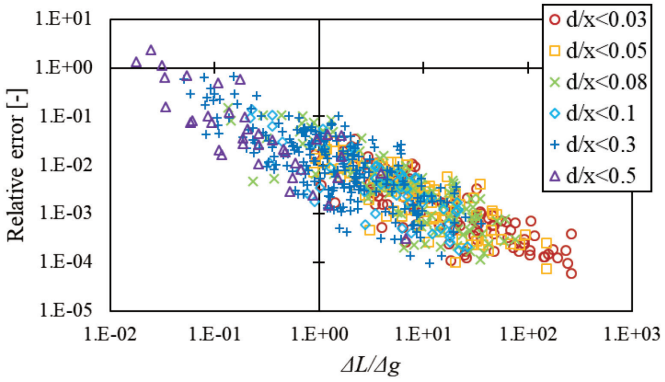


図 1：観測範囲内の減速 ΔL と読み取り誤差 Δg の比が計測誤差に与える効果

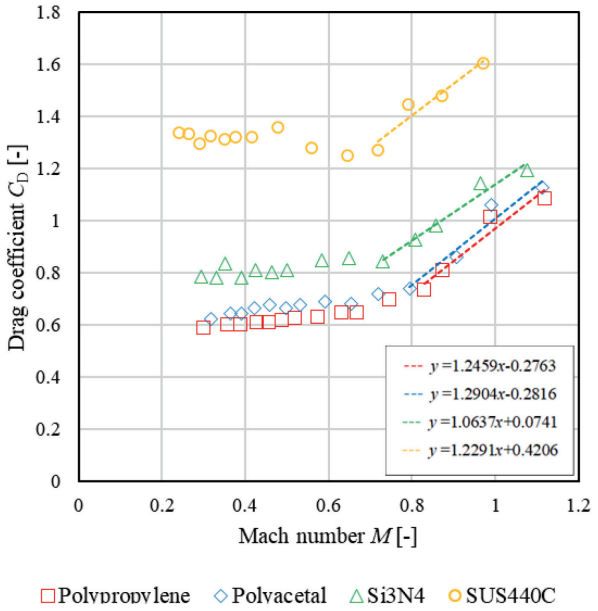


図 2：異なる密度の球での抗力係数の比較

3. 研究目標の達成状況

達成度：50%

研究目標の，抗力係数の誤差をなくす手法を確立すること，球の大きさを考慮した抗力係数を厳密に評価することのうち，誤差をなくす手法の確立は完了している．球の大きさを考慮した抗力係数の評価に関しては，データ数が少ないため未だ系統的な知見は得られていない．

4. まとめと今後の課題

流体研で得られた大直径球の結果と照合することで，寸法効果を定量的に評価し，抗力係数変動のメカニズムをより深く理解することを目指している．

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] T. Miyazaki, T. Kikuchi, K. Ohtani, A. Muramatsu: Precise Measurement of the Effect of Deceleration on the Drag Coefficient, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-70, pp. 196-197.

[2] 菊池崇将，山内惇己，佐々木蓮，工藤真尋，大谷清伸: 密度の異なる球状飛行体の抗力係数の計測，2024 年度衝撃波シンポジウム，仙台，1D4-3，(2024)

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**

なし

Project code	J24I091
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	2024.4 - 2025.3
Project status	2nd year

Fabrication of Nanofibrous Layer Covered Stents

Angéla Jedlovszky-Hajdú*†,Veronika Palos*,Sarolta Halmoczki*
Hanif Saifurrahman**, Constantinos Voniatis*, Makoto Ohta**††
*Institute of Biophysics and Radiation Biology, Semmelweis University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Cardiovascular disease (CVD) continues to represent the foremost global cause of mortality and morbidity, with ischemic heart disease constituting the foremost cause of hospital admissions. As a consequence, the refinement of interventional strategies to restore coronary blood flow remains a focus in biomedical innovation. Coronary stents have become indispensable in the treatment of atherosclerotic coronary artery disease (CAD). These expandable metal tubes offer a stable mechanical support to revascularized vessels, not only saving patients' lives but also improving life quality. From early-generation bare-metal stents to advanced drug-eluting stents platforms, research has continually aimed to optimize stent performance by addressing complications such as post-stenting restenosis and late thrombosis. A significant barrier to long-term success is the incomplete or absent re-endothelialization of the stent surface, which contributes to thrombus formation and inflammatory responses and finally re-stenosis. In response, emerging approaches focus on modifying the stent surface with bioactive, tissue-guiding materials that promote endothelial cell adhesion, migration, and proliferation.

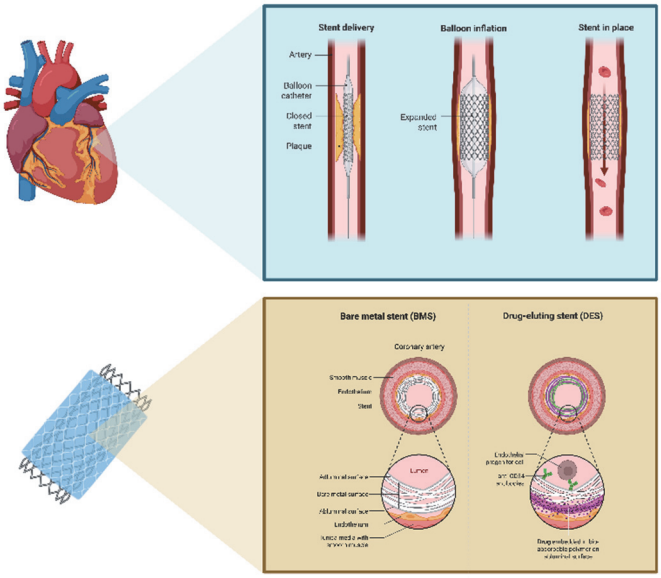


Figure 1. Application and coronary stent types

Among these, nanofibrous coatings have demonstrated significant potential by mimicking the architecture of the native extracellular matrix, thereby enhancing cellular responses and integration. This project aims to develop a next-generation nanofibrous coating for coronary stents using a hybrid polymer system based on polysuccinimide (PSI) and polycaprolactone (PCL). PSI, the anhydrous precursor of poly(aspartic acid), offers reactive succinimide rings suitable for functionalization and post-electrospinning modification, enabling the conjugation of drug or bioactive ligands. PCL, a well-established biodegradable polyester, contributes mechanical resilience and controlled degradation kinetics. We believe that a PSI/PCL composite system will result in a synergistic system by leveraging the structural strength of PCL with the chemical versatility and potential endothelial bioactivity of PSI. Ultimately, the end goal is a scaffold which can induce direct endothelial regeneration, reduce thrombogenicity, and limit neointimal hyperplasia. By coating the stent wires with this nanoengineered interface, the long-term patency and biocompatibility of coronary implants could substantially improve.

2. Details of program implement

The Hungarian research group brings substantial expertise in nanofibrous scaffold engineering, with a particular focus on electrospinning. Electrospinning is simple yet highly versatile and scalable technique for fabricating fibrous structures with diameters ranging from the micrometer to nanometer scale. Electrospinning's principal advantage lies in its capacity for setup modification, fabrication parameter adjustment and functionalisation possibilities. Given this adaptability, electrospinning has been exploited in several scientific fields, amongst them biomedical. The core components of the technique include a high-voltage power supply, a polymer solution-filled syringe, and a conductive collector. While seemingly simple the technique is inherently sensitive to the complex and dynamic relationship of the fabrication parameters such as solution properties (viscosity, conductivity, surface tension) and processing conditions (voltage, flow rate, distance, ambient environment). Therefore, a rigorous optimization is almost inevitable.

In the first phase of the current initiative, the Hungarian group will focus on the parameter optimization required to fabricate uniform, adherent nanofibrous coatings directly onto coronary stent wires. Particular attention will be given to blends of polysuccinimide (PSI) and polycaprolactone (PCL), two polymers previously investigated by the group. While both materials have demonstrated electrospinnability in conventional configurations, their behaviour in stent-mounted electrospinning setups—where curvature and surface energy heterogeneity may influence fiber deposition—requires systematic evaluation. Morphological control, mechanical robustness, and coating stability will be characterized using techniques such as SEM, tensile analysis, and adhesion testing to ensure the structural integrity of the nanofibrous layers during deployment and implantation.

To further enhance the performance of these coatings, the Hungarian group will explore two advanced polymer engineering strategies: Cross-linked PSI Hydrogels via Diaminobutane (PASP-DAP): The group will investigate the cross-linking of PSI with 1,4-diaminobutane to yield poly(aspartic acid)-Diaminobutane (PASP-DAP) hydrogels which exhibit extended dissolution profiles. This approach aims to enhance the mechanical durability and residence time of the nanofibrous layer on the stent surface, making it more suitable for prolonged vascular contact. The resulting hydrogel network is expected to resist rapid hydrolysis while still supporting endothelialization. Calcium-Modified PSI for Endothelial Enhancement: To improve endothelial cell adhesion and proliferation, calcium ions will be incorporated into the PSI matrix. Calcium has been shown to modulate integrin-

mediated adhesion and cytoskeletal organization, thereby promoting endothelialisation. The group hypothesizes that calcium coordination within the PSI backbone will provide favourable biochemical cues for rapid and stable endothelial coverage, a critical requirement for thromboresistance and long-term patency.

The Japanese research group has an extensive experience regarding in vivo modelling and examination of stents, grafts and other materials. Their technical knowledge and laboratory resources will allow for examination of theses materials under a constant flow of liquid examining both the cell viability, cell adhesion, and endothelial differentiation, and the applicability of the nanofiber covered stents
Ultimately, the formation of a continuous, functional endothelial monolayer on the stent surface is essential for preventing thrombus formation and reducing the risk of in-stent restenosis. This project, therefore, combines advanced materials engineering with translational biomedical goals to contribute meaningfully to the next generation of bioactive coronary implants.

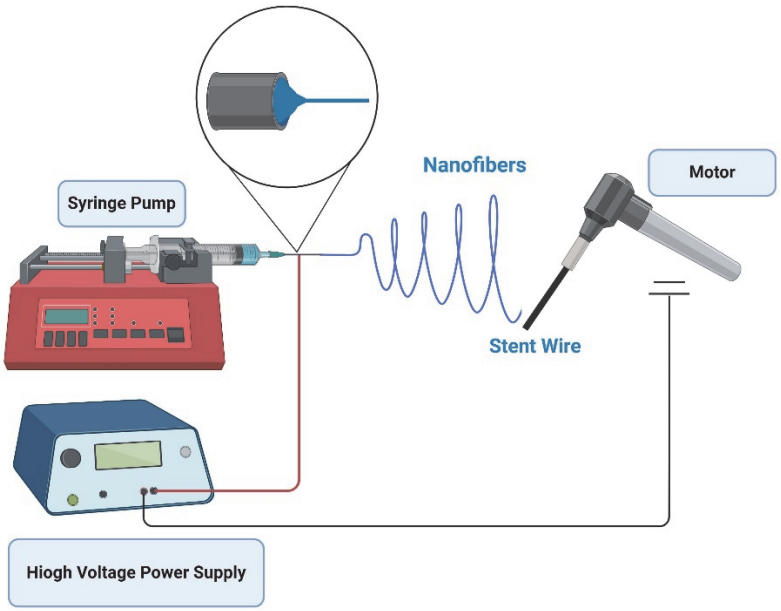


Figure 2. Modified electrospinning setup

3. Achievements

During the past year, we successfully covered stent wires with polysuccinimide and polycaprolactone. The biggest issue was the size of the wire and the optimisation of the covers thickness. As a first step, we replaced the static, flat collector with a motor that could continuously rotate the wire. After optimising the electrospinning parameters (Table 1.) scanning electron microscopy images were taken to assess the nanofibrous cover quality and nanofibre size (Figure 3). Overall, fibres had no quality issues with minimal aberrations. Average fibre sizes ranges were 550 ± 120 nm for the PSI and 560 ± 190 nm for the PCL.

Table 1. Electrospinning optimization

Polymer	Concentration (w/w %)	Voltage (kV)	Flow rate (ml/h)	Needle Size (G)	Needle-Collector Distance (mm)
PCL	12	15	1	18 G	150
PSI	22.5	14.5			

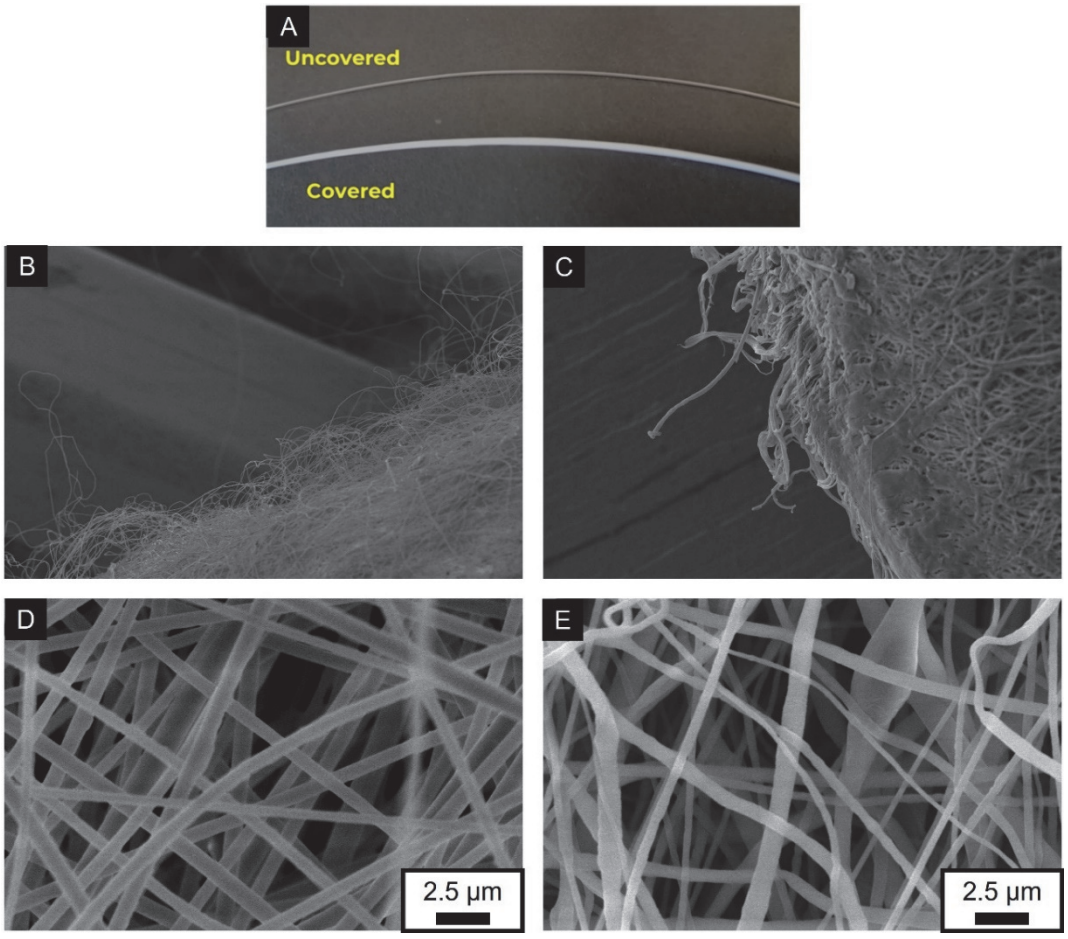


Figure 3. Uncovered and covered stent (A), PSI nanofibrous cover (B, D), Polycaprolactone nanofibrous cover (C, E)

After these preliminary studies, we continued with the pre and post electrospinning modification of the PSI nanofibers:

Pre-Electrospinning Modification – Calcium Ion Incorporation:
Prior to electrospinning, calcium chloride ($CaCl_2$) was added to the polymer solution to promote endothelial cell adhesion. The concentration and incubation time were optimized to ensure homogeneous dispersion without compromising fiber formation. The rationale was based on calcium's role in integrin-mediated cell attachment and ECM interaction facilitation.

Post-Electrospinning Modification – DAB Crosslinking:
Following electrospinning, the PSI nanofiber mats were subjected to post-treatment with 1,4-diaminobutane (DAB) to induce crosslinking via nucleophilic ring-opening of succinimide moieties. The crosslinking reaction was performed under mild aqueous conditions to ensure structural integrity and minimize cytotoxicity. This step aimed to improve mechanical stability, water resistance, and modulate the degradation rate of the fibers.

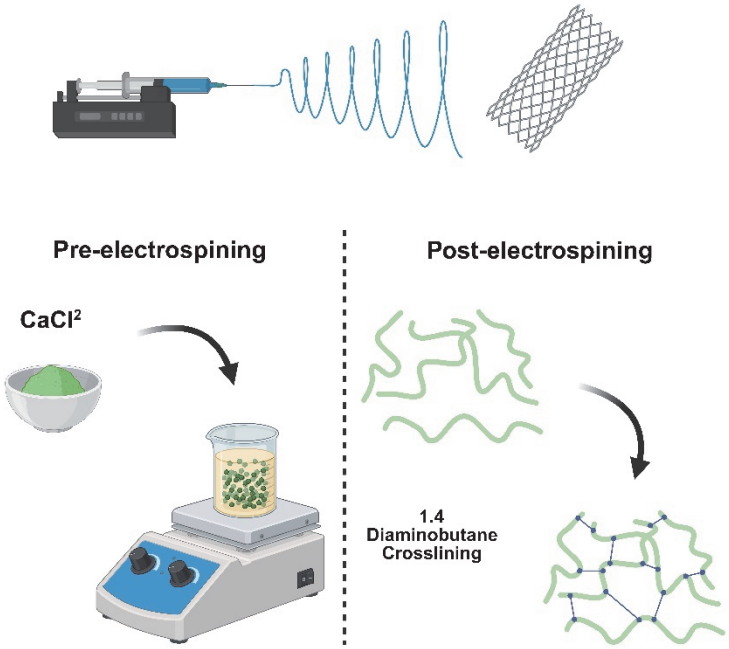


Figure 4. Pre- and Post-electrospinning modification of PSI Nanofibres

Preliminary Results and Observations:
Fiber Morphology: SEM analysis showed no significant bead formation post-modification. Slight fiber swelling was noted post-DAB treatment, indicative of successful crosslinking.

Chemical Characterization: FTIR spectra confirmed the introduction of amide linkages after DAB crosslinking, with the appearance of characteristic bands at ~1650 cm^{-1} and ~1540 cm^{-1}.

4. Summaries and future plans

The current project aims to fabricate nanofibrous covers for coronary stents. After one year, the participants have successfully produced different polymer based stent covers. While the process requires optimisation these results seem very promising.

Future plans include utilisation of Scanning electron Microscopy combined Energy Dispersive X-ray Spectroscopy as the addition of the CaCl was not visible on the ATR-FTIR. Furthermore, to more accurately model the endothelial interface and assess the hemocompatibility and cellular responses under physiologically relevant shear stress, we will perform **in vitro flow chamber experiments** using the modified PSI nanofiber stent-grafts.

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. Jedlovszky-Hajdu, V. Pálos, S. Halmóczki, C. Voniatis, H. Saifurrahman, M. Ohta: Composite Electrospun Scaffolds for Biomedical Applications, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, November 18-20, 2024, Sendai, OS9-1 (Invited).

[2] S. Halmóczki, V. Rizmajer, K. Osán, A. Jedlovszky-Hajdú, C. Voniatis, V. T. Pálos, M. Ohta, H. Saifurrahma: Development of Electrospun Nanocomposites, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, November 18-20, 2024, Sendai, OS9-3.

[3] V. Pálos , S. Halmóczki, C. Voniatis, H. Saifurrahman, M. Ohta, A. Jedlovszky-Hajdu: Polysuccinimide-Salt Electrospun Scaffold as a Potential Wound Dressing Material, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, November 18-20, 2024, Sendai, OS9-7.

[4] C. Voniatis, A. Jedlovszky-Haj: Fabrication of Composite Nanofibrous, Covers for Coronary Stents, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, November 18-20, 2024, Sendai, OS9-6.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J24I092
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	2 年目

バイオミメティックスを活用した流体と音波の透過性に大きな差異をつけた多孔質材料による効果的な流動抵抗・空力騒音低減技術の開発

On the Reduction of the Flow-induced Noise using Bio-inspired Porous Material with Low Acoustic Transmission Loss

寺島　修*†，永井 大樹**††
武田 尚恭*，小西 康郁**，伊神　翼**，小松﨑 俊彦***，草野 大勢*
*富山県立大学工学部，**東北大学流体科学研究所
***金沢大学理工学域フロンティア工学類
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

鳥類の羽根の性質を再現して表面性状や内部構造を設計した多孔質材を用いた，熱流体の流動抵抗および流動に起因して発生する振動騒音の低減技術を開発する．これまでも多孔質材を用いた同様の試みは世界各国で行われていたが，バイオミメティックスに基づくものはなかった．このため，例えば流動抵抗は低減できたとしても，振動騒音は増加するケースや，逆に，振動騒音は低下するが，流動抵抗は増加してしまうケースがほとんどで，両者の低減を両立できるものはなかった．これに対し本研究で提案する多孔質材は，内部構造と表面性状の改変により，鳥類・生物の特性と同様に多孔質材の流体の透過性と音波の透過性に大きな差異をもたせ，これにより，流動抵抗と振動騒音の両者を大幅に低減することを目指す．

2. 研究成果の内容

本年度は，90 度の曲げ部を有するダクトで発生するはく離再付着流れを制御対象とした．図 1 にダクトの寸法を示す．多孔質材料の設置位置は 90 度の曲げ部に配置した．また，このダクト内の流れの可視化と流体騒音測定を行った．

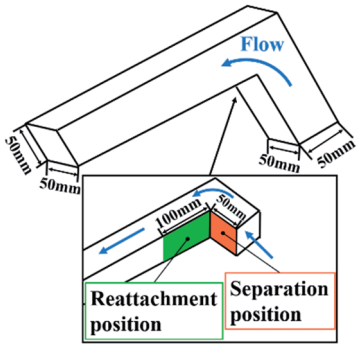


Figure 1: Schematic of the curve duct used in this study.

本研究では図 1 に示したダクトを風洞試験装置の吹き出し口に設置してダクト内に送風

した．ダクト出口中央の平均流速を静圧管と微差圧計(長野計器社，GC62)を用いて測定し，風洞試験装置の送風機をインバータ制御することで，所望の流速とした．流れの可視化では高速度カメラとオイルミスト発生器を使用した．高速度カメラはフローテックリサーチ社の NOVA S9-T09，レンズはニコン社の AF-S NIKKOR 50 mm f/1.8 を使用した．オイルミスト発生器(フローテックリサーチ社，FtrOMG)とコンプレッサ(モノタロウ社，MCP-250A)で発生させたオイルミストを風洞試験装置の吸気口から入れ，これを撮影して流れの可視化を行った．撮影時のフレームレートは 4000 fps とした．

流体騒音の測定は，図 1 の再付着位置で実施した．測定には Microflown Technologies 社のポータブル音源探査デバイス Voyager と粒子速度プローブを使用した. 粒子速度プローブに内蔵された音圧と音響粒子速度センサを用いて測定し，それらの積から音響インテンシティを算出した．測定方向は，再付着位置の壁面と垂直方向である．

本研究では，90 度ダクトに多孔質材料を設置し，多孔質材料によって発生するはく離再付着流れを対象として 2 章で示した測定を行い，多孔質材料の厚さや設置位置の影響を調べた．多孔質材料の厚さは 1 mm，3 mm，6 mm の 3 種類とした．設置位置は図 1 に示す，はく離位置+再付着位置，はく離位置のみ，再付着位置のみの 3 パターンとした．それぞれの条件で，多孔質材料あり，またはなしとして測定を行った．なお，多孔質材料の有無にかかわらず，ダクト幅は同一とした．

図 2 に，はく離位置+再付着位置に多孔質材の有無による可視化結果を示す．図 3 の左上に多孔質材無し，右上に多孔質材 1 mm，左下に多孔質材 3 mm，右下に多孔質材 6 mm の結果を示す．ダクト内の平均流速は 25 m/s である．図 2 より，剛体壁と比較して多孔質材料を壁面に設置することで，はく離泡およびはく離せん断層の渦スケールが小さくなることが明らかとなった．また，多孔質材料の厚さが増すほど，その効果が顕著になることが明らかとなった．紙面の都合上，図表の掲載は割愛するが，可視化時の多孔質材料の厚さや設置位置におけるインバータ周波数の変化および音響インテンシティの測定結果から，再付着部のみに多孔質材 1 mm を設置したときに，流体抵抗と騒音が最も低減することが明らかとなった. インバータ周波数を基に算出した電力は剛体壁の場合に比べて約 5 %低減した. また，音響インテンシティの測定結果から，0-2500 Hz の広帯域において騒音が約 3 dB 低減することが明らかとなった．以上の結果より，多孔質材 1 mm は他の厚さの多孔質材料を用いた場合に比べて，はく離泡およびはく離せん断層の渦スケールは大きいものの，はく離泡内の速度変動が低減したことで騒音の低減に寄与したと考えられる．また，平均はく離泡厚さの減少により，主流の断面積が増加し，流体抵抗の低減に寄与したと考えられる．

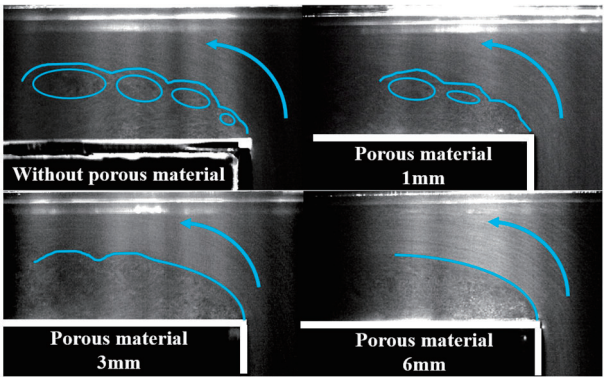


Figure 2: Flow visualization results for different porous material thicknesses.

3. 研究目標の達成状況

本研究の結果，流体と音波の透過性に大きな差異をつけた多孔質材料による効果的な流動抵抗・空力騒音低減技術の向けた知見の取得と有効性の確認ができたため，研究目標が大方達成できた.

4. まとめと今後の課題

今後は実用化や社会実装に向けた取り組みを進める.

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] Naoyuki Takeda, Taisei Kusano, Osamu Terashima, Hiroki Nagai, Yasufumi Konishi, Tsubasa Ikami, Toshihiko Komatsuzaki: A Study on the Flow Characteristics near the Surface of Highly Acoustically Transparent Porous Materials, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-7, pp. 31-32.

[2] 武田尚恭, 寺島修, 小西康郁, 伊神翼, 永井大樹, 小松﨑俊彦, 山田周歩: GX への貢献を目指したエナジーハーヴェスティングと流体抵抗低減技術の高度化・高付加価値化，日本機械学会 2024 年度年次大会，(2024)，C124.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（受賞）[1]富山第一銀行奨学財団賞 特別賞，富山第一銀行奨学財団，寺島修

[2]学生研究奨励賞，On the Energy Harvesting Technique Using a Fluttering PVDF Film with Flow-Induced Vibration，日本実験力学会，武田尚恭

[3]JSAE 自動車エンジニアレベル認定（振動・騒音・乗り心地/研究開発・教育），自動車技術会，寺島修

課題番号	J24I093
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 年目

超音速飛翔体表面の圧力場計測の高精度化を目指した新型 AA-PSP の基礎研究

Fundamental Research on a New AA-PSP for Enhancing the Accuracy of Pressure Field Measurements 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

超音速自由飛翔体上の圧力場計測を行う方法として，感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) 計測手法がある．PSP は非接触の光計測手法であり，計測時は物体に塗布されたうえで励起され発光し，その発光強度が周囲圧力の変化に伴い変化するという性質を用いて塗布面の圧力計測が可能となる．このような性質から，計測対象が自由飛翔するバリスティックレンジを用いた空力実験に対して PSP は非常に親和性が高く，例えば PSP を用いた超音速飛翔体上の圧力場計測がしばしば試みられている．しかしながら，バリスティックレンジ試験においては，飛翔体計測時の露光時間を長くとろうとする場合，飛翔体が進行方向に対して引き延ばされて撮影されるという問題があり，露光時間を極めて短時間 (超音速飛行時には数マイクロ秒以下) としなければならないため，高速度カメラ等での発光検出量は非常に微弱となる．それに伴い PSP 計測における信号雑音比も大幅に悪化するため，現状においては超音速飛翔体上の圧力場の定性的・定量的計測は未だ確立されていない技術課題となっている．

本研究では，そのような背景のもと，超音速自由飛翔体上の表面圧力場計測試験に用いられる陽極酸化皮膜型 PSP (AA-PSP) の発光特性を大幅に改善し，バリスティックレンジにおける PSP 計測手法の利用をより汎用的とするための基礎研究を行う. AA-PSP の発光特性をより計測に理想的な特性へと改良し，かつ発光強度を大幅に向上するため，AA-PSP の作成時における感圧色素の吸着プロセスを従来行われている方法から見直し，自動塗装装置を用いた高度にコントロールされたプロセスに置き換え, AA-PSP の特性をバリスティックレンジ計測において最適なものへと改良することを目指す.

2. 研究成果の内容

従来型の AA-PSP の色素吸着プロセスをディッピングから色素塗装手法に置き換えることで，新たな AA-PSP として色素塗装型 AA-PSP を確立した．色素塗装型 AA-PSP は，極めて短時間露光環境下においても衝撃波現象を鮮明に可視化することに成功し，サブマイクロ秒露光環境下における衝撃波の反射・回折・干渉現象の明瞭な可視化を実現した．従来型の AA-PSP では，衝撃波のような高速現象の可視化においては計測時に最低でも数マイクロ秒の露光を必要としており，本研究で開発した塗装型 AA-PSP は，極めて高速な現象に対して非常に有用な計測手法として用いることが出来ることを立証できた.

3. 研究目標の達成状況

本研究の成果を用い，飛翔体由来の衝撃波現象の鮮明な可視化に成功しており，本研究で目標とした新型 AA-PSP の開発，およびそれを用いることで期待された計測上の成果はおおむね達成できたと考える．

4. まとめと今後の課題

新たな計測手法として，新型の AA-PSP の開発に成功し，衝撃波現象に伴い生じる非定常圧力場のサブマイクロ秒露光計測を実現した．今後は更なる改良を加え，移動体の表面圧力場計測などに対する本技術の拡張を実施し，バリスティックレンジ試験における有用な計測手法として本 AA-PSP 技術を更に発展させることを目指す．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

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. Ohtani: Fundamental Research on a New AA-PSP for Enhancing the Accuracy of Pressure Field Measurements on the Surface of Supersonic Projectiles, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-68, pp. 191-192.

[2] H. Takata, Y. Kawamata, T. Kawashima, D.Numata: Basic Research on Dye-Painted AA-PSP Using Bathophenanthroline Ruthenium Chloride as the Pressure-Sensitive Dye, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), OS23-30.

[3] K. Yoneyama, Y. Kawamata, T. Kawashima, D.Numata: Effect of Anodized Aluminum Layer Thickness on the Characteristics of Sulfuric Acid Type Dye-Painted AA-PSP, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), OS23-31.

[4] T. Kawashima, D.Numata: Effect of Anodized Aluminum Layer Thickness on the Characteristics of Phosphoric Acid Type Dye-Painted AA-PSP, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), OS23-48.

[5] Y. Kawamata, D.Numata: Effect of Painting Parameters on the Characteristics of Dye-Painted AA-PSP Aimed at Visualizing Unsteady Shock Wave Phenomena, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2024), OS23-52.

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	J24I094
区分	一般公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	2 年目

スライディングメッシュ法による稼働エンジンと機体の統合解析
Integrated Analysis between Running Engine and Airframe Using Sliding Mesh Technique

千葉 一永*†，大林　茂**††
*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

航空機の各運用段階においてエンジンへの安定した吸気が必要だが，現実には機体形状や外的環境により流入条件が変動する．従来は，これを吸気口での擾乱として単純化して模擬してきたが，再現性に限界があった．また，従来の機体設計は作動中のエンジンを考慮せず，機体単体で解析されてきた．しかし，機体とエンジンの相互作用は航空機性能に大きく影響するため，両者を統合的に扱うことが望ましい．本研究では，作動中のエンジンを含む機体全体の統合数値解析を行い，実機に近い運用条件下での空力評価を可能にする．これにより，次世代エンジンの目標である高バイパス比・低騒音・高燃費性能に対応した最適な機体設計への貢献を目指す．

2. 研究成果の内容

本研究では，作動中のエンジンを統合した航空機の数値解析を実施し，その空力特性への影響を評価した．モデルは簡略化のためファンステータとエンジンコアを省略し，NASA Rotor 67 と Common Research Model を使用した．巡航時の 2 つの迎角条件で解析し，エンジン非搭載の流通ナセル構成や機体のみの構成と比較した．作動中のエンジンはナセル流量を減少させスピレージを増加させ，これが翼上下の圧力分布や衝撃波，排気ジェットに影響を及ぼした．エンジン挙動は流入条件に敏感であり，独立した従来の解析では精度に限界がある．したがって，本研究は機体とエンジンの相互作用を正確に捉える上で，統合解析の有用性を示すものであり，今後の設計にも有益な手法である．

3. 研究目標の達成状況

流速の大きく異なる外部流と内部流を安定して同時に解析することに成功し，機体とエンジンの相互作用を定量的に明らかにした．これにより，次期航空機設計のためのシステムが構築され，高バイパス比やショートナセルのような次期エンジンを考慮した航空機形態の設計が行えるようになった．さらに，オープンロータのような次期エンジン搭載機など本システムでしか成し得ない機体が設計できるようになり，環境適合性を劇的に向上させる機体の創出が期待される．

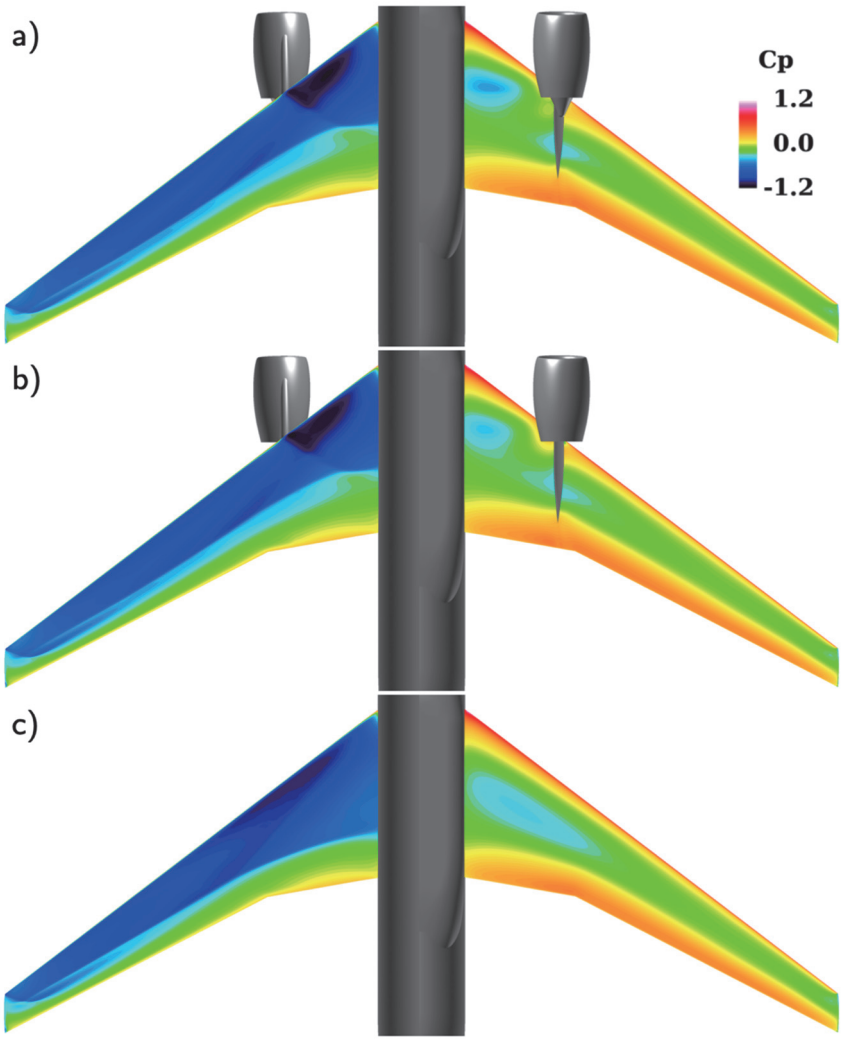


図 1：主翼上下面の圧力係数分布の比較．a) エンジン搭載形態，b) flow-through 形態，c) ナセルパイロン無し形態．

4. まとめと今後の課題

世界初で稼働エンジンと機体との統合解析を安定して実施し，相互作用を定量的に明らかにした．環境適合性を向上させる革新航空機形態への設計を行うマイルストーンとなる．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Mueller, J., Chiba, K., Oba, Y., Obayashi, S.: Aerodynamic Discrepancies of an Aircraft Considering the Running Engine, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-60, pp. 168-171.

[2] Mueller, J., Chiba, K., and Oba, Y.: Integrated Simulation of Airframe and Running Engine to Examine Their Aerodynamic Interaction Effects, *KSME-JSME Joint Symposium on Computational Mechanics & CAE 2024*, (2024). (invited)

[3] Mueller, J., Chiba, K., and Oba, Y.: Identification of Losses from Engine-Airframe Interaction for a Passenger Aircraft through Integrated Simulation, *The 9th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering; ECCOMAS Congress 2024*, Lisbon, Portugal, (2024).

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	J24I097
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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，高強度繊維の作成方法が多くの研究者によって研究されている．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，繊維長の異なる CNF 溶液の混合によるレオロジー変化の調査に加えて，それに先立ち，レオロジー特性の極めて異なる 2 流体混合時のレオロジー変化について調べた．レオロジー特性の大きく異なる 2 つの溶液として，CNF 分散液と粘弾性流体として知られる界面活性剤水溶液について，混合比を変えた時のレオロジー変化について計測を行った．加えて，粘弾性流体は管内乱流下の流れで大きな抵抗低減を発現することから CNF 添加による流動特性への影響も調査対象とした．粘弾性流体は流体の持つ粘性に加え，弾性の性質も併せ持つ流体で，ある種の界面活性剤水溶液は粘弾性を示すことが知られている．このような粘弾性流体では，内部にミセル構造と言われるマイクロ構造を構築することが知られており，先に記した流れの抵抗低減に寄与していると言われている．ここにファイバー状の CNF を添加することで，そのマイクロ構造が変化し，レオロジー特性や流動特性にも影響を与えるものと考えられる．

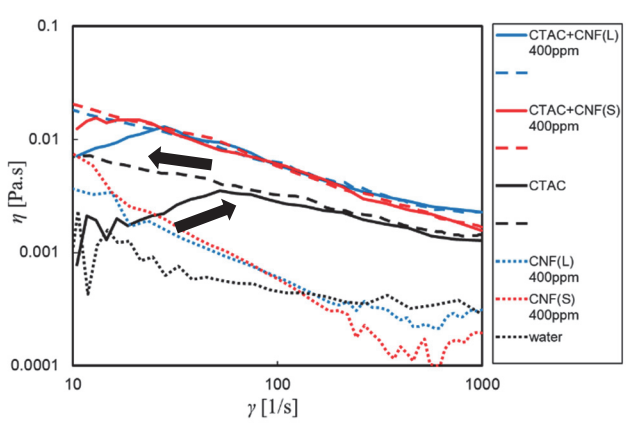


図 1：せん断粘度測定

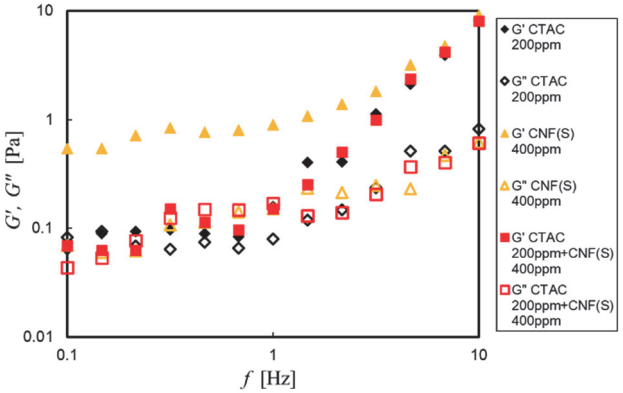


図 2：動的粘弾性

本研究では，レオロジー特性は Thermo Fisher Scientific 社製のレオメータ HAAKE MARS iQ Air により計測を行った．試験はコーンプレート（直径：35 mm，角度：2 °）を用い，せん断粘度測定によりせん断粘度η Pa·s，動的粘弾性測定により弾性的要素を示す貯蔵弾性率G'[Pa]と粘性的な要素を示す損失弾性率G'' Pa を測定した．一方，流動特性は，自作の管内流試験装置により測定を行った．この試験装置では，ポンプの機械せん断によるミセル構造の破壊を防ぐため，ポンプを用いずヘッド差により試験流体を内径 10 mm の試験円管へ流すことで流量を調整した．本報告では，レオロジー特性の結果を示す．

試験流体は，界面活性剤として塩化セチルトリメチルアンモニウム（以下，CTAC と記す）を用いた．対イオンとしてサリチル酸ナトリウムを CTAC 同質量比で水に溶解させることで界面活性剤水溶液を調製した．一方，CNF 分散液は，Sugino Machine Limited Co., Ltd. 社製の BiNFi-s cellulose を用い，極長繊維（繊維長：十数～数十 μm）と極短繊維（繊維長：1~数 μm）の CNF 溶液を用意した．本報告書では，CTAC の濃度を 200 ppm，CNF の濃度を 400 ppm とし，これらを混合した試験流体について結果を報告する．また，試験流体名は，例えば，CTAC 200 ppm に極短繊維の CNF を 400 ppm 添加した場合，「CTAC+CNF(S) 400ppm」という形で表記する．

図 1 にせん断粘度測定の結果を示す．横軸はせん断速度γ 1/s，縦軸はせん断粘度 η Pa·s である．図中の実線はせん断速度の増加過程，破線は減少過程，点線は CNF のみと水の結果で，せん断速度の減少過程のみを示している．CNF(S)，CNF(L)は，せん断速度の増加に伴いせん断粘度が減少しており擬塑性の挙動を示している．CTAC はせん断速度の増加に伴いせん断粘度が増加し，せん断速度 50 1/s 付近でせん断粘度が増加から減少に変化した．一方

で，せん断速度の減少過程ではせん断粘度が増加し続けており，ミセル構造が起因と考えられるレオロジー特性を捉えている．これらの混合物においては，せん断粘度に大きな増加が見られ，それぞれの単一溶液よりも大きなせん断粘度が捉えられた．また，CTAC と同様の傾向を示し，せん断速度増加に伴うせん断粘度増加がより低せん断領域に見られた．図 2 に動的粘弾性測定の結果を示す．横軸は振動周波数 fHz，縦軸は貯蔵弾性率 G'Pa と損失弾性率 G''Pa である．動的粘弾性においては，CNF(S)は，常に G'が G''より大きく，弾性的な性質を示す一方で CTAC 溶液では，一般的な粘弾性流体に見られる特徴的な挙動は示しておらず，より高濃度での検討が必要となる．一方で，これらの混合部は，CTAC とほとんど同じ傾向を示し，CNF の弾性的挙動は現れなかった．以上のような結果は，CNF の繊維の絡み合いと CTAC のミセル構造が相互で影響を及ぼしたものであり，今後，濃度を広範に振った実験による検証と，可視化等によりマイクロ構造の変化を調べる予定である．

3. 研究目標の達成状況

レオロジー特性の異なる 2 流体の混合時のレオロジー変化について調べることで，元の単一溶液が持つレオロジー特性がどのように影響し合うかを検討する足掛かりを得ることが出来た．

4. まとめと今後の課題

繊維長の異なる CNF 溶液の混合によるレオロジー変化に加え，それに先立ち，レオロジー特性の極めて異なる 2 流体の混合時のレオロジー変化について調べた．レオロジー特性の異なる 2 流体の混合により，特徴的なレオロジー変化が捉えることが出来た．また，流動特性についても粘弾性流体への CNF 添加により高せん断である高レイノルズ数域においてわずかながら抵抗低減効果が見られた．今後，より広範に濃度範囲を振ることでデータベース化し，2 流体の混合によるレオロジー特性の変化についてより詳細に検証を行う．加えて，繊維長分布の計測，マイクロ構造の可視化を行うことで，上記レオロジー特性とマイクロ構造の相互関係について評価を行う．

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] M. Motozawa, H. Takana, T. Chinju, Experimental Investigation on Relationship between Flow Dynamics and Micro-structure in Cellulose Nano-fiber Dispersion, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-42, pp. 125-126.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J24I098
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Analysis of Thermophysical Properties of Formic Acid as Phase-Change Material Based on Aluminum Fumarate as Metal-Organic Frameworks Using Molecular Dynamics Simulation as a Reviewing Approach

Muhammad Raditya Prakoso*, Nasruddin Yusuf Rodjali*†, 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 thermophysical behavior of stearic acid ($C_{18}H_{36}O_2$) as a phase change material (PCM) embedded within the MIL-101(Cr) metal-organic framework (MOF), with the primary objective of enhancing its thermal energy storage performance. Through molecular dynamics (MD) simulations employing RASPA software, we systematically analyze heat capacity variations across a temperature range of 300-343 K under varying pressure conditions. To further refine our predictive capabilities, we integrate artificial neural network (ANN) modeling with the simulation data.

2. Details of program implement

The research program has been initiated through the joint development of a comprehensive proposal detailing objectives, computational methodologies (combining RASPA-based molecular dynamics simulations with artificial neural network modeling), and validation protocols. Current work focuses on thermal property analysis of the stearic acid/MIL-101(Cr) composite system, with preliminary findings disseminated at the *21st International Conference on Flow Dynamics* (November 18–20, 2024; Sendai, Japan). To strengthen research capacity, graduate and undergraduate students are actively engaged in training for simulation techniques, machine learning applications, and data analysis. Key milestones include completing molecular dynamics simulations and ANN validation by 2025, targeting publications in high-impact journals and pursuing academic collaborations to advance phase change material applications.

3. Achievements

The expected result from this study is to achieve three significant research outcomes: (1) the optimization of metal-organic framework (MOF)-based phase change materials (PCMs) for enhanced thermal energy storage efficiency through precise molecular-level modifications, (2) the demonstration of a novel synergistic methodology combining molecular dynamics (MD) simulations with artificial neural network (ANN) modeling for advanced materials characterization and prediction, and (3) a substantive contribution to sustainable energy technologies via the development of high-performance, composite PCM systems. This multidisciplinary investigation at the intersection of computational chemistry and machine learning is

anticipated to advance fundamental understanding while providing practical solutions for next-generation thermal energy storage applications.

4. Summaries and future plans

This study explores the use of molecular dynamics (MD) simulation and artificial neural network (ANN) modeling as a combined framework to evaluate and predict the thermophysical behavior of phase change materials (PCMs) encapsulated within metal-organic frameworks (MOFs), specifically focusing on Stearic Acid within MIL-101 (Cr). The work addresses key challenges in the development of thermal energy storage systems, particularly the leakage issues associated with PCMs in their liquid phase. By employing MOFs as porous encapsulating structures, the study aims to enhance the material's stability and energy efficiency. Molecular dynamics simulations offer insights into molecular interactions and thermophysical trends at the atomic scale, while the ANN approach is introduced to streamline property prediction and reduce dependency on labor-intensive experimental methods.

The methodology is grounded in classical MD principles, where interatomic forces and energy potentials are modeled using empirical force fields. The study also highlights the use of RASPA software for evaluating structural parameters of MIL-101 (Cr), such as surface area, void fraction, and chemical potential—all critical to optimizing encapsulation behavior. The ANN model is designed to simulate nonlinear relationships between multiple thermophysical inputs and outputs, using layers of interconnected neurons and activation functions to approximate complex functions. This hybrid approach not only allows for efficient material screening but also provides a robust foundation for predictive material design in the context of thermal management and energy storage technologies.

A number of meaningful improvements and future directions can be envisioned to strengthen and expand the scope of this research. While the molecular dynamics and ANN modeling approaches provide powerful predictive tools, the incorporation of experimental validation remains essential. Techniques such as differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetric analysis (TGA), and Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface characterization could be employed to corroborate the simulated thermophysical properties and ensure practical relevance. Additionally, extending the study to explore a wider array of metal-organic frameworks and phase change materials would enable a comparative assessment of material performance, potentially identifying more efficient or application-specific combinations. Another critical avenue is the evaluation of long-term stability and thermal cycling behavior, as repeated phase transitions can impact structural integrity and energy storage capacity over time. Enhancing the thermal conductivity of the PCM-MOF composite is also a key challenge, and future work could investigate the effect of incorporating conductive additives such as graphene, carbon nanotubes, or metallic nanoparticles.

Furthermore, integrating multiscale modeling—linking molecular dynamics with continuum-scale simulations—would allow researchers to simulate and optimize material performance under more realistic, system-level operating conditions. It would also be beneficial to analyze dynamic adsorption behavior under fluctuating thermal and pressure environments, as this would better reflect the demands of real-world thermal energy storage systems. Finally, building upon the successful implementation of artificial neural networks, future studies could incorporate advanced optimization algorithms such as genetic programming or Bayesian inference to accelerate the discovery of optimal material configurations. Collectively, these enhancements would significantly improve both the predictive reliability and

the practical applicability of MOF-based PCM systems in thermal energy storage technologies.

This study presents a comprehensive analysis of the thermophysical behavior of Stearic Acid ($C_{18}H_{36}O_2$) when encapsulated in the metal-organic framework MIL-101 (Cr), utilizing molecular dynamics (MD) simulations alongside artificial neural network (ANN) modeling. The research is grounded in the increasing demand for efficient thermal energy storage systems, with phase change materials (PCMs) being a promising solution due to their ability to absorb and release large amounts of latent heat during phase transitions. However, practical limitations such as leakage during the liquid phase necessitate innovative approaches like encapsulation using porous materials such as MOFs. MIL-101 (Cr), selected for its high porosity and thermal stability, serves as the structural host in this simulation-based study.

The MD simulations, carried out using RASPA software, focus on understanding how key structural parameters of MIL-101 (Cr)—such as surface area, void fraction, and chemical potential—influence the encapsulated PCM's thermophysical properties. Simulation results reveal an average surface area of approximately 3124 m^2/g and a Widom-Rosenbluth factor indicating 82% void volume, suggesting strong capacity for PCM encapsulation. Additionally, the chemical potential data highlight MIL-101 (Cr)'s energetic favorability for absorbing guest molecules like Stearic Acid.

One of the key findings is that the heat capacity of the PCM-MOF composite increases with pressure but decreases with rising temperature, which is attributed to changes in molecular interactions and kinetic energy at higher thermal states. Lower temperatures improve the material's adsorption characteristics, enhancing its energy storage performance. The radial distribution function (RDF) analysis confirms a stable and ordered structure in the composite, which supports effective thermal regulation.

To complement the physical simulations, ANN models are employed to predict heat capacity and heat of adsorption across various conditions. These models exhibit excellent predictive performance, with very low Root Mean Square Error (RMSE)—0.0079% for heat of adsorption and 0.040% for heat capacity—underscoring their reliability in modeling complex thermophysical phenomena. This approach significantly reduces the dependence on resource-intensive experimental procedures and accelerates material design processes.

In conclusion, this study not only provides deep molecular-level insights into the behavior of MOF-encapsulated PCMs but also showcases the synergistic power of combining MD simulations with machine learning techniques for material characterization and optimization. The findings are pivotal for advancing the development of high-performance, thermally efficient, and structurally stable materials for thermal energy storage applications.

5. Research results

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

[1] Arison, F. S., Tokumasu, T., Sholahudin, Yatim, A. S., & Nasruddin, N. (2025). Multi-Objective Optimization of TAF Systems: Enhancing Air Cleanliness and Energy Efficiency in Surgical Environments. *Building and Environment*, 279, 112977. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112977

2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
Not applicable

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

Project code	J24I099
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Development of High-Precision Estimation Techniques for Aerodynamic Heating Using Functional Molecular Sensors

Bok Jik Lee*††, Hiroki Nagai**†
*Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Traditional aerodynamic heating measurements have primarily relied on thermocouples, which are intrusive devices embedded into the model surface. Their presence can disturb boundary layer development, potentially leading to measurement inaccuracies. Moreover, thermocouples provide point-wise data and are limited in number due to cost and geometric constraints. Functional molecular sensors offer a non-intrusive alternative that enables global, surface-resolved measurement of aerodynamic heating. These sensors do not require wiring or electrical components on the model surface, making them suitable for applications in complex and constrained geometries.

This project aims to develop a high-precision aerodynamic heating measurement technique using functional molecular sensors. The target application includes a flow environment with rapid variations in temperature and pressure under high-speed flow conditions. During this term of the project, a new formulation of the molecular sensor was developed, and its performance was evaluated and compared against existing formulations to assess improvements in sensitivity and applicability.

2. Details of program implement

To improve the precision of aerodynamic heating estimation, the following sensor performance criteria were identified as essential:

1) Fast response time
2) Higher emission intensity
3) Higher temperature-sensitivity
4) Low pressure-sensitivity

To address these requirements, dichlorotris (1,10-phenanthroline) ruthenium (II) hydrate, commonly called Ru(phen), was selected as the primary sensing compound due to its fast response characteristics, with a luminescence lifetime of less than 1 μs. Its performance was enhanced by adding micro-sized calcium silicate ($CaSiO_3$) and polyacrylic acid (PAA) to increase luminescence intensity and to suppress pressure dependency.

The optimal mixing ratio of these three components was determined through experimental studies at the Institute of Fluid Science, Tohoku University. Sensor performance was then characterized using a pressure and temperature calibration chamber located at the same facility, as shown in Fig. 1.

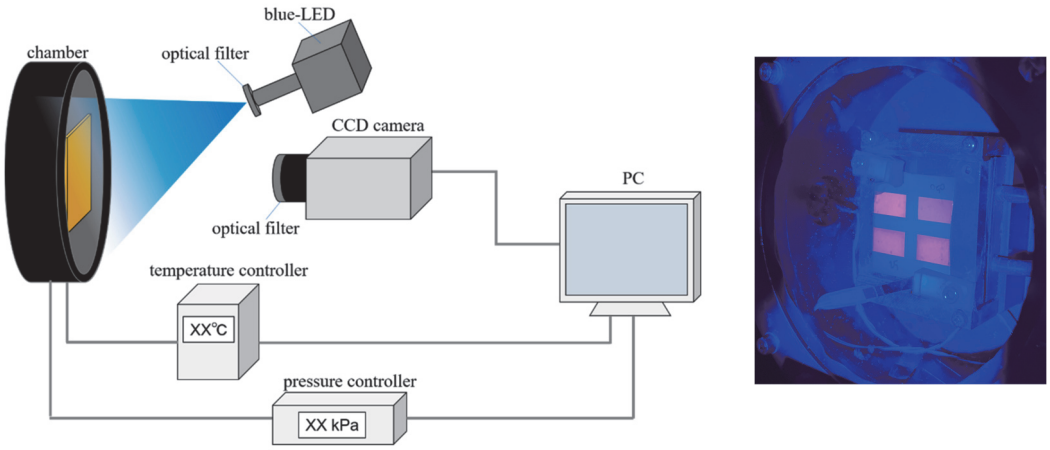
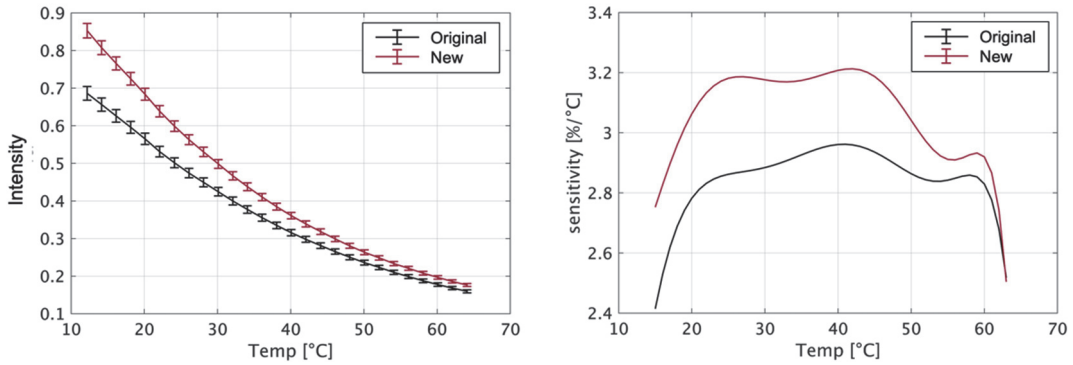


Figure 1 : Temperature calibration chamber used for performance characterization (left) and functional molecular sensor samples with varying mixing ratios (right).

3. Achievements

A new functional molecular sensor was developed by optimizing the mixing ratio of Ru(phen), PAA, and $CaSiO_3$. The sensor's performance was quantitatively evaluated and compared with the original formulation. As shown in Fig. 2, temperature calibration results indicate a 21 % increase in emission intensity at 20 °C, and an improvement in temperature sensitivity from 2.8 to 3.1 %/°C – representing an approximate 11 % enhancement. These improvements contribute to a higher signal-to-noise ratio, which is particularly important under high-speed flow conditions.



(a) (b)

Figure 2 : (a) Temperature–intensity relationship and (b) temperature sensitivity comparison between the original and newly developed sensor formulations.

A known limitation of functional molecular sensors for aerodynamic heating is their sensitivity to both temperature and pressure, with pressure sensitivity arising from oxygen-quenching effects. To reduce this pressure sensitivity, the newly developed sensor incorporates a dual protection mechanism for the sensing molecules, Ru(phen); $CaSiO_3$ encapsulates the Ru(phen) within its porous structure, while PAA forms a protective coating on the surface. This configuration effectively reduces pressure sensitivity. When comparing intensity measurement at 100 kPa and 500 kPa, the new formulation showed a 100% improvement in pressure dependency, as illustrated in Fig. 3.

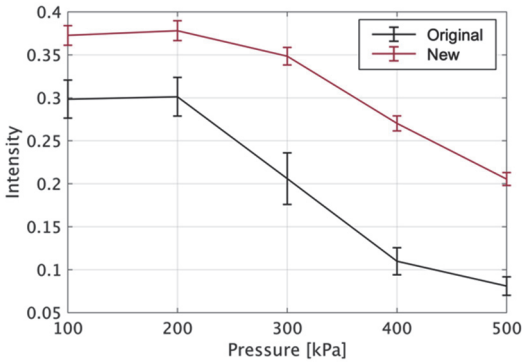


Figure 3：Comparison of pressure sensitivity between the original and newly developed formulations.

4. Summaries and future plans

During this term of the project, a high-precision aerodynamic heating measurement technique was developed using a functional molecular sensor based on Ru(phen). The focus was placed on optimizing the sensor composition and characterizing its performance under controlled conditions. Notable improvements were achieved in emission intensity, temperature sensitivity, and the reduction of pressure dependency, as summarized in Tab. 1.

Building on these results, future work will focus on applying the new sensor in high-speed wind tunnel experiments to perform aerodynamic heating measurements under realistic flow conditions. In parallel, efforts will be directed toward developing effective post-processing methods to further validate the sensor's precision and reliability in practical applications.

Table 1：Summary of performance improvements achieved with the new sensor formulation

Parameter (at 20 °C)	Original	New	Difference	Improvement [%]
Intensity	0.565	0.684	0.119	21 ↑
Sensitivity [%/°C]	2.8	3.1	0.3	11 ↑
Pressure ratio (I_{500kPa}/I_{100kPa}) [%]	0.275	0.551	0.276	100 ↓

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. Kim, M. Engin, H. Jungmu, T. Ikami, K. Takahashi, T. Ogawa, M. Furudate, B.J Lee and H. Nagai: Dynamic Instability Analysis of Free-Flying Objects in Transonic Regime Using Ballistic Range, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, (2024)

[2] M. Okawa, J. Kim, M. Engin, T. Ikami, and H. Nagai: Shock Wave Pressure and Heat Flux Evaluation by Simultaneous Measurement of Fast Response PSP and TSP, *2024 Domestic Symposium on Shock Waves*, (2025).

[3] J. Kim, M. Engin, M. Okawa, T. Ikami, and H. Nagai: Development of Fast Response Temperature Sensitive Paint, *2024 Domestic Symposium on Shock Waves*, (2025).

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

Project code	J24I100
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd 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, ††Non-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) for antibacterial applications.

2. Details of program implement

Unless otherwise specified, commercially available TEMPO-oxidized CNFs were used as received in this research. Small, zero valent, spherical AgNPs were synthesized on the CNF surface based on an environmentally benign method initially developed in Prof. Dichiara's laboratory. This method was successfully imported into Prof. Takana's laboratory following the successive visits of UW Prof. Dichiara to IFS and of TU MS student W. Hira to SEFS.

Various Ag@CNF aqueous suspensions were prepared at different Ag contents by adjusting the synthesis conditions. The resulting suspensions were then used to form macroscopic filament composites according to the field-assisted flow-focusing approach previously established in Prof. Takana's laboratory.

The rheological properties of the different Ag@CNF suspensions and the mechanical characteristics of as-produced filaments were examined at IFS, while the morphological and antioxidant properties of the filaments were assessed at UW based on the DPPH free radical scavenging method. The antioxidant assay was based on the measurement of the loss of DPPH color by the change of absorbance at 517 nm caused by the reaction of DPPH with the tested sample, as measured by a UV-vis spectrophotometer.

3. Achievements

The formation of zero-valent AgNPs on the CNF surface was ascertained by absorption and IR spectroscopy. Macroscopic CNF filament nanocomposites with Ag contents up to 6.0 wt% were successfully fabricated. Previous electron microscopy analysis revealed the excellent dispersion of AgNPs within the filaments without obvious aggregation (*Figure 1*). X-ray diffraction and energy dispersive spectroscopy results also indicated that the zero-valent AgNPs turned into AgCl caused by the gelation process in 1 M HCl during the filament self-assembly.

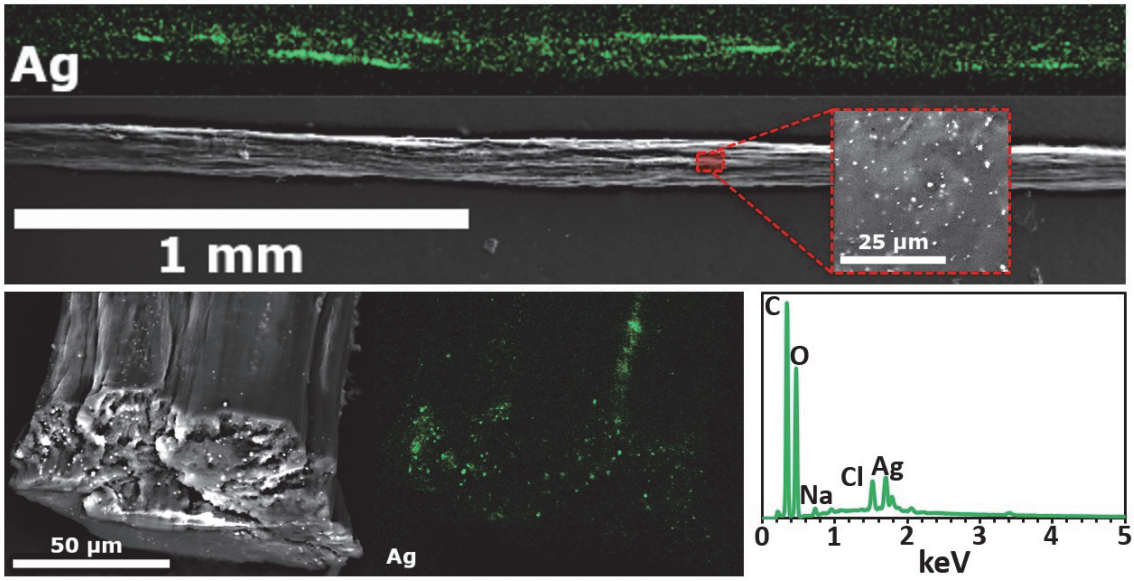


Figure 1. Representative SEM images and EDS mapping of the surface and cross-section of Ag@CNF filament nanocomposite.

Rheological analysis showed that higher Ag content reduced the apparent shear viscosity of the Ag@CNF aqueous suspensions. The reaction between Tollen reagent, *i.e.* silver ammonia solution, $Ag(NH_3)_2OH$, and TEMPO-oxidized CNFs resulted in the reduction of Ag+ to Ag0 and the oxidation of CNF aldehyde functions to carboxyls. The decrease in viscosity observed at higher Ag contents was attributed to higher interfibril repulsions induced by the increased quantity of deprotonated carboxyl groups in alkaline solutions. At higher Ag content, shear flow and elongation effects were promoted by the reduced viscosity while electrostatic alignment was enhanced by greater surface charges. These observations yielded Ag@CNF filaments with superior mechanical performance at elevated Ag contents (*Figure 2*). In particular, the simultaneous stiffening and strengthening of the filaments prepared under an externally applied electric field was quite commendable, allowing overhand knots to be tied without breaking (*Figure 3*). Finally, the presence of AgNPs drastically increased the filaments' free radical scavenging activity more than threefold compared to pure CNF materials without Ag.

4. Summaries and future plans

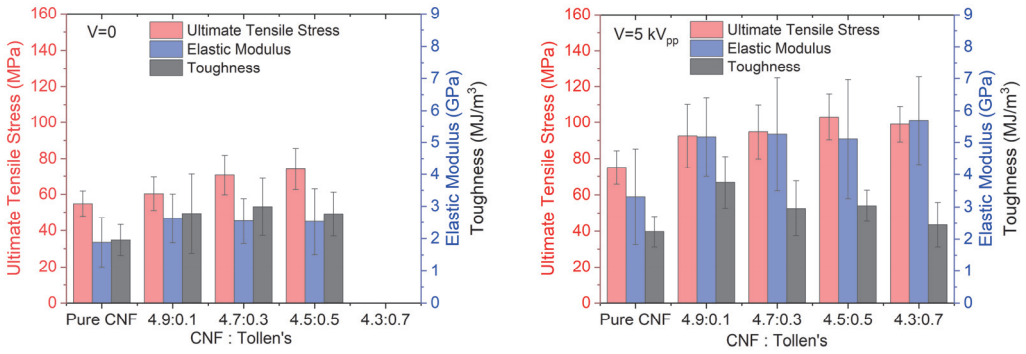


Figure 2. Mechanical characteristics of CNF filaments prepared at various Ag contents with and without applied electric field.

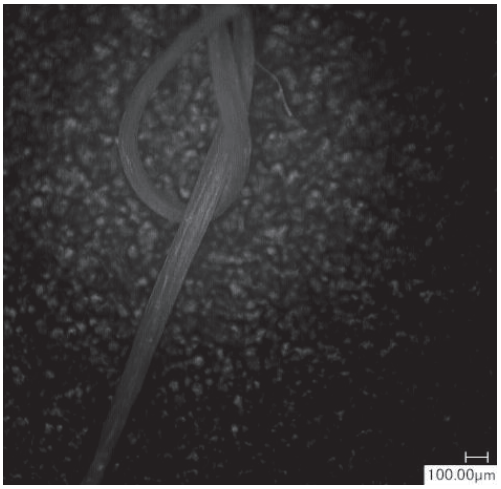


Figure 3. Optical microscope image of an overhand knot tied using an Ag@CNF filament nanocomposite.

Prior to summarizing the research outcomes in a high-impact peer-reviewed publication, future work includes the study of the evolution of the filaments' free radical scavenging activity as a function of Ag content, which we anticipate exhibiting a linear correlation.

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, W. Hira, H. Takana: Reagentless Synthesis of Macroscopic Nanocellulose Filaments Decorated with Ag Nanoparticles, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2024), OS5-12.

[2] 平　和佳菜，金子　泰，高奈秀匡，「電場印加型急絞り流路によるセルロース・銀ナノ粒子複合繊維創製」，日本機械学会 第 102 期 流体工学部門講演，長岡，(2024), OS08-2.

3) Patent, award, press release etc.

[3] 高奈秀匡，日本機械学会 第 102 期流体工学部門 フロンティア表彰

[4] 平　和佳奈，日本機械学会 第 102 期流体工学部門 優秀講演表彰

[5] 平　和佳奈，金子　泰，高奈秀匡，「電場印加型絞り流路を用いたセルロース・銀ナノ粒子複合繊維創製」，日本機械学会 流体工学部門 ニューズレター 2025 年 3 月号

課題番号	J24I101
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	1 年目

金属/酸化チタン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シリコン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/結晶シリコン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．

酸化チタンは，バンドギャップエネルギーがおよそ 3.3 eV と大きく，結晶シリコン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．これまで，酸化チタン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[1-3]，電極として用いる金属が酸化チタンと接触し，熱処理を課すことで酸化チタンの結晶シリコン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．酸化チタンの電子選択層としての応用を考えた場合，金属/酸化チタン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/酸化チタン界面における構造変化に着目する．酸化チタンの場合，接触する金属と熱処理条件に依存して酸化チタンの還元反応や酸化チタン/結晶シリコン界面への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，MD シミュレーション法を用いて金属と酸化チタン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] T. Mochizuki, K. Gotoh, A. Ohta, S. Ogura, Y. Kurokawa, S. Miyazaki, K. Fukutani, N. Usami, *Appl. Phys. Express,* **11**, (2018), 102301.

2. 研究成果の内容

2.1a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造へのアニール処理における酸化シリコン膜の形成とその電気的影響

本項目の共同研究における意義は，既に実験的に得られているアモルファス酸化チタン（a-TiO_2）

/結晶シリコン（c-Si）ヘテロ構造を再現する計算系を構築する点である．前年度での活動において，我々は a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造を適切に模擬する機械学習ポテンシャル（Machine Learning Potential: MLP）の作成を行った．2.1 項では，作成した MLP をもとに a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造への熱処理における構造変化とそれが及ぼす電気的影響への考察を行った．

図 1 に，（a）1000 K, 1 ns, カノニカルアンサンブル（NVT）で熱処理前, (b)熱処理後の a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造と，（c）熱処理前, 600 K, 800 K, 1000 K で熱処理後における Si-O 結合数を示す．ここで，熱処理シミュレーションには，前年度作成した MLP を用いており，シミュレーション対象のモデルは三次元での周期境界条件を用いた．図 1 （a），（b）より，熱処理により TiO_2/c-Si ヘテロ界面に酸化シリコン層が形成されていることが確認された．これは実際の実験結果と一致する[2-3]．この結果は，実際の実験結果とも整合しており[2-3]，シミュレーションの妥当性を支持するものである．さらに，図 1 （c）に示すように，熱処理前後で Si-O 結合数を比較したところ，熱処理温度の上昇に伴い Si-O 結合数が増加することが確認された．特に，1000 K での熱処理後には Si-O 結合数が 962 に達し，熱処理前の 32 に比べて大幅な増加が見られ，熱処理温度の上昇が Si-O 結合の形成を促進することが示された．これらの結果から，熱処理条件が Si-O 結合形成に重要であることが示唆された．

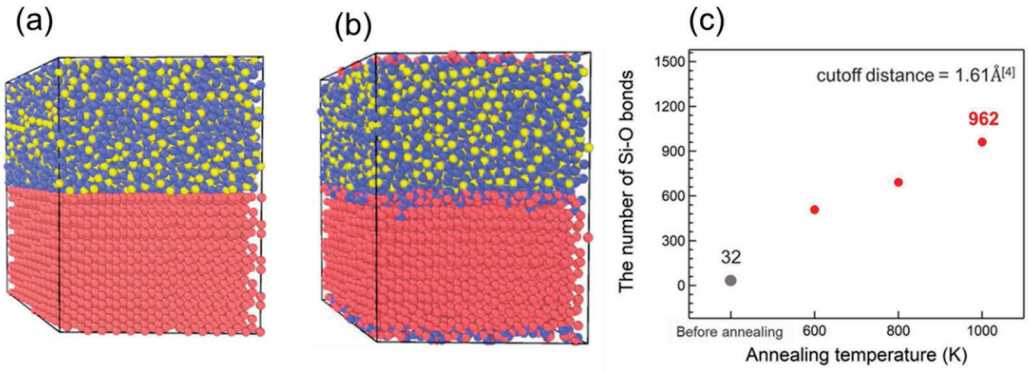


図 1 ：(a) 1000 K, 1 ns, NVT で熱処理前, (b) 熱処理後の a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造と，(c) 熱処理前, 600 K, 800 K, 1000 K で熱処理後における Si-O 結合数．熱処理シミュレーションには，前年度作成した MLP を用いた．結合半径の cutoff 半径は, 1.61 Å とした．

2.2 MLP を用いた a-TiO_2/c-Si, Ti/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．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．しかしながら, Al 成膜を考慮した MLP の作成は, Al, Ti, O, Si の四元素を考慮した力場作成となるため計算コストが非常に高く，現状では MLP の作成は難しい．一方で, Ti 成膜時にもパッシベーション性能が大幅に低下することが知られており，まずは Ti 成膜に着目することが妥当と考えた．既に TiO_2/c-Si 構造での Ti, O, Si の三元素を対象とした MLP は構築済みであるため，その力場を用いることで Ti 成膜時の影響を詳細に解析することが可能である．そこで 2.2 項では, Ti 成膜が Si-O 結合へ及ぼす影響を調査するために, a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造と Ti/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）Ti/a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造における 1000 K, 1 ns の熱処理後のモデル，（b）熱処理前後の Si-O 結合密度を示す．図 2 （b）から，熱処理後において a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造の Si-O 結合密度は約 80 nm^{-2}に達しており, Ti/a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造の約 60 nm^{-2}と比較して高い値を示している．これは，金属 Ti の成膜が界面における Si-O 結合の形成を抑制していることを示唆している.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，金属 Ti の存在が Si-O 結合の形成を抑制し，結果として界面パッシベーション性能を低下させている可能性がある．これらの結果から，金属 Ti 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，金属電極形成時の a-TiO_2/c-Si 界面制御がデバイス性能向上のために重要であることが示唆された．

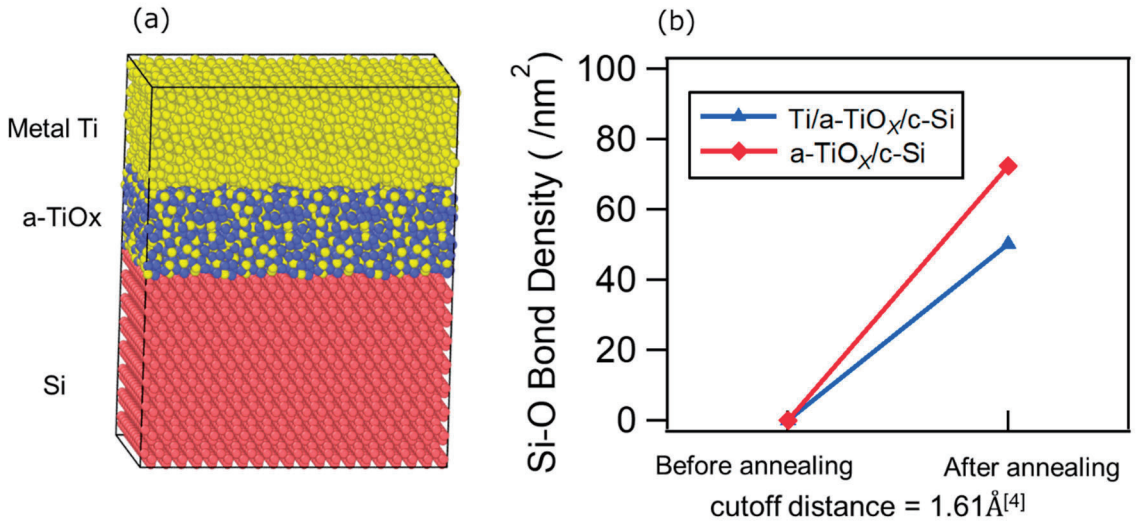


図２：（a）Ti/a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造モデルと，（b）1000 K, 1 ns の熱処理前後の Si-O 結合密度．

[4] T. A. Sidorov, Russ. J. *Inorg. Chem.*, **52**, 532–542 (2007).
[5] T. Matsui et al., *ACS Appl. Energy Mater.*, **5**, 12782 (2022).

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-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，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である．この場合において，現在は，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が終了した段階である．よって，全体の 50 %程度を達成したといえる．

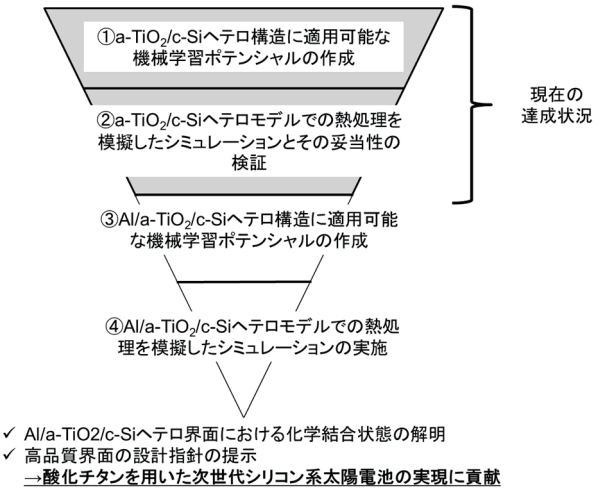


図３：本研究における進捗状況

4.　まとめと今後の課題

本研究では，a-TiO_2/c-Si および Ti/TiO_2/c-Si ヘテロ界面における熱処理時の構造変化と Si-O 結合状態について，MD シミュレーションを用いて詳細に解析した．その結果，a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造において熱処理により界面で Si-O 結合が形成されることが確認され，実験的な結果と一致する結果が得られた．一方で，Ti/a-TiO_2/c-Si ヘテロ構造では，金属 Ti 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た．これにより，酸

化チタンを用いた次世代シリコン系太陽電池における界面制御の重要性が明らかとなった.

今後の課題として, 金属 Ti 以外の他の金属電極との界面における Si-O 結合状態や界面特性への影響を解析し, 酸化チタンを用いた太陽電池の界面制御に向けた最適化指針を明確にしていく必要がある. また, より精度の高い MD シミュレーションを実現するために, MLP の改良や, 実験結果とのさらなる比較・検証を進めていくことが求められる. 本研究で得られた知見を基に, 酸化チタンを用いた高効率シリコン系太陽電池の開発に向けて, 引き続き研究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] S. Fukaya, Y. Michishita, N. Uene, K. Gotoh, T. Tokumasu, and N. Usami, “Numerical analysis of TiO_x/Si Heterostructure with Molecular Dynamics Simulation”, *35th International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, Numazu, Japan, November 10-15, 2024.

[2] Y. Michishita, S. Fukaya, N. Uene, K. Gotoh, T. Tokumasu and N. Usami, “Investigation of the Passivation Mechanism of TiO_x/Si Heterostructure by Molecular Dynamics Simulation”, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-16, pp. 60-61

[3] 道下悠登, 深谷昌平, 上根直也, 後藤和泰, 徳増崇, 宇佐美徳隆, “分子動力学シミュレーションによる TiO_x/Si ヘテロ構造のパッシベーション性能向上機構の解明”, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会, 東京理科大学野田キャンパス, 2025 年 3 月 14 日～17 日

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	J24I102
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Understanding the Role of Fluids in the Nucleation Process of the Noto, Japan, 2024, Mw 7.5 Earthquake

Cornelius Langenbruch*†, Yusuke Mukuhira**††, Keisuke Yoshida**, Masaoki Uno**
*Fachrichtung Geophysik, Freie Universität Berlin
Malteserstr. 74-100, Berlin, 12053, Germany
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
2-1-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8577, Japan
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

It is well known that fluid injection performed in the frame of energy technologies like hydraulic fracturing, wastewater disposal and geothermal reservoir stimulation can induce earthquakes. Analysis of these fluid induced earthquakes can be especially informative because the driving force, mostly injection of pressurized fluids through deep boreholes, is known and controllable. In this project, we transferred insights gained from analysis of human-induced earthquakes to advance physical understanding of the role of fluids in the nucleation process of the Noto Mw7.5 earthquake.

2. Details of program implement

Fluid injection performed in the frame of energy technologies like hydraulic fracturing, wastewater disposal and geothermal reservoir stimulation can induce earthquakes. Analysis of these fluid induced earthquakes can be especially informative because the driving force, mostly injection of pressurized fluids through deep boreholes, is known and controllable.

Injection sites represent natural laboratories where earthquake nucleation, rupturing and dynamics can be studied. This has led to physics-based and statistical methods to understand and forecast maximum magnitudes of induced earthquake, and the related seismic hazard and risk caused by fluid movement in the Earth's crust.

The role of fluids in the nucleation process of induced earthquakes is well-studied and understood. Pressure diffusion has been identified as one of the dominating processes leading to the occurrence of induced earthquakes and the maximum magnitude.

The Noto earthquake swarm preceding the 2024, Mw7.5 Noto earthquake is a natural analog to human-induced earthquakes caused by deep fluid injections. Ascending fluids likely are responsible for the triggering of the earthquakes swarm in the region that led to the damaging Mw6.4 in 2023 and the Mw7.5 earthquakes in 2024.

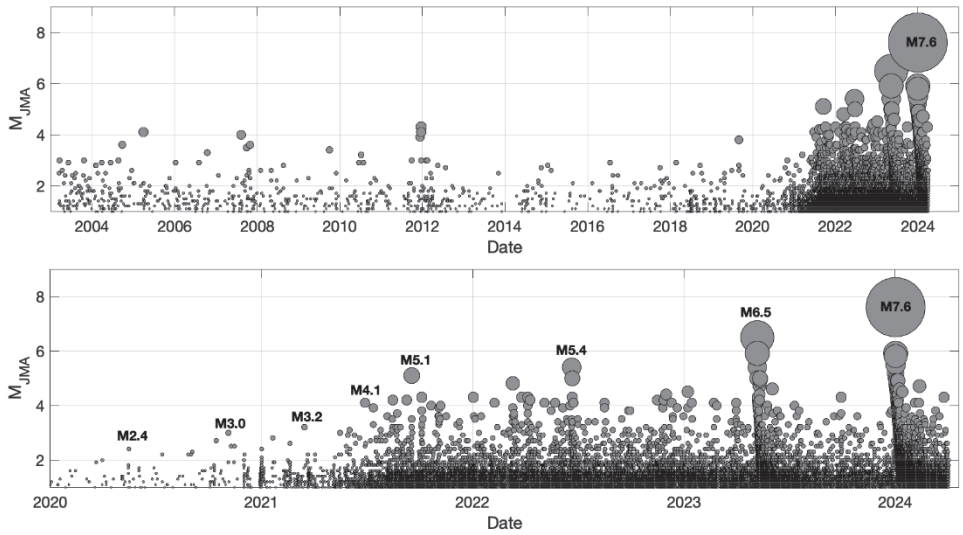


Figure 1: Temporal evolution of earthquake magnitudes in the Noto region. Top: Complete sequence including 31159 events of magnitude M=1 and larger. Bottom: Detailed view of the magnitudes in the main swarm phase preceding the M7.6 earthquake. Earthquake magnitudes are increasing with time in agreement with a recently published model for induced seismicity that relates the maximum magnitude to the size of the pressure perturbed part of a fault.

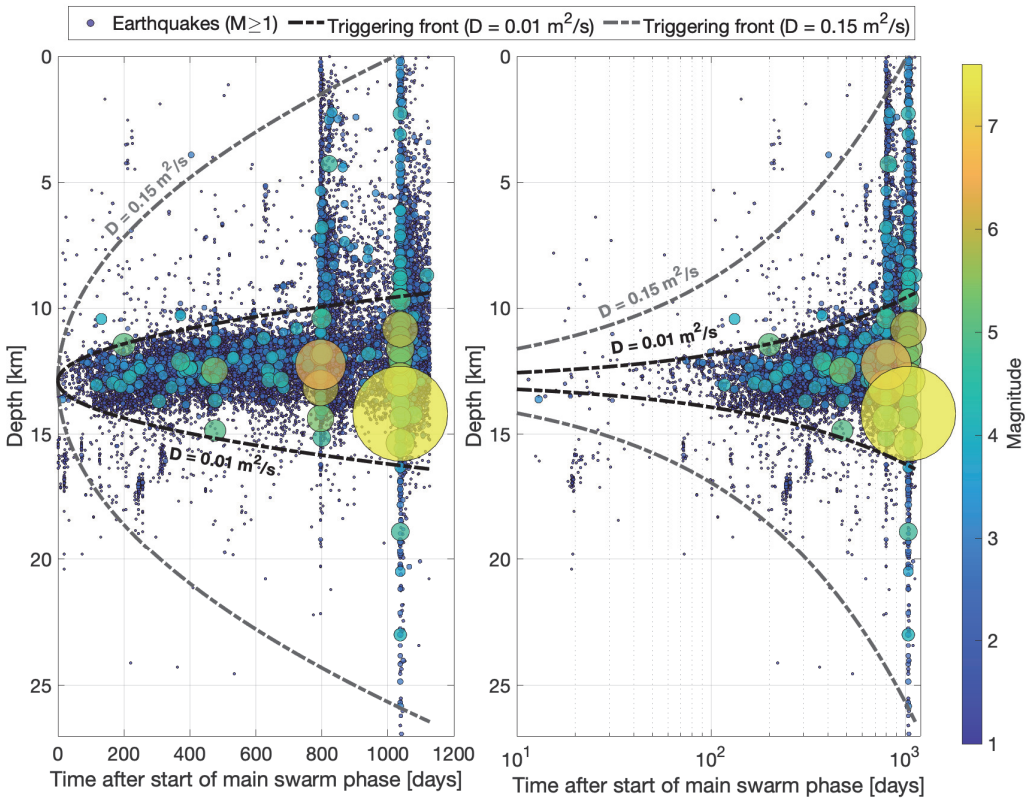


Figure 2: Depth-time plot of earthquakes in the Noto earthquake swarm. Color indicates time and size is scaled according to magnitude. The dashed lines show the triggering front with diffusivities of 0.01 m²/s and 0.15 m²/s. All larger magnitude events start in the domain characterized by D=0.01m²/s.

3. Achievements

We transferred insights gained from analysis of human-induced earthquakes to advance physical understanding of the role of fluids in the nucleation process of the Noto Mw7.5 earthquake. The results have been presented at the ICFD conference in Sendai, 2024 and a workshop on induced seismicity organized by Yusuke Mukuhira at the IFS in Sendai 2024. Cornelius Langenbruch visited the IFS (Yusuke Mukuhira) for one week in November 2024.

4. Summaries and future plans

The Noto earthquake swarm shows similarities to fluid induced earthquake sequences caused by injection of fluids through deep boreholes. In this project, we will transfer insights gained from analysis of human-induced earthquakes to advance physical understanding of the role of fluids in the nucleation process of the Noto Mw7.5 earthquake.

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] Cornelius Langenbruch, Felix Preuss, Yusuke Mukuhira, Keisuke Yoshida, Masaoki Uno, Understanding the Role of Fluids in the Nucleation Process of the Noto, Japan, 2024, Mw 7.5 Earthquake, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics (ICFD)*, (2024).

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

Project code	J24I103
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

Multi-scale Analysis of Oxygen Ion Conduction Property in Solid Oxide Electrolyte Membrane

Takashi Tokumasu*†, Jeongmin Ahn**††
Hiroki Nagashima***, Takumi Ijichi****
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University
***Faculty of Engineering, University of the Ryukuys
****Faculty of Engineering, Tohoku University
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this project is constructing a Solid Oxide Electrolyte Membrane (SOEM) which shows high oxygen ion conductivity. To achieve the purpose, we focus on nano-thin film membrane and nanocrystalline in the membrane. A multi-scale analysis combining quantum chemical calculations, molecular dynamics simulations, kinetic Monte Carlo simulations, and experimental data is performed to clarify the correlation between oxygen ion conductivity, grain size, and Grain Boundary (GB) structure in SOEM. Based on the clarified correlation between grain boundary structure and oxygen ion conduction properties, we suggest a new concept of SOEM which has high ion conductivity.

2. Details of program implement

Recent years, nano-thin film membrane and nanocrystalline have been attracted attention as approaches for enhancing the oxygen ion conductivity in SOEM. The effects of GBs increase relatively by thinning the membrane and introducing the nanocrystalline in the membrane. Since GBs and the conduction of oxygen ion are nano-scale in these membranes, using experimental technique is a challenging task to comprehend the phenomenon of oxygen ion conduction. Therefore, in this collaborative research, we will clarify the correlation between the conductivity of oxygen ion and GBs in the membranes by multi-scale analysis in which information of quantum chemical calculation, Molecular Dynamics (MD) simulation, kinetic Monte Carlo (kMC) simulation, and experimental data are combined.

In the experiment approach, multilayer ceramic composite (MCC) samples were prepared using lamination and typical solid oxide fuel cell (SOFC) techniques. Each sample is composed of a nickel oxide-yttria stabilized zirconia (NiO-YSZ) substrate, YSZ and samarium doped ceria (SDC) electrolyte layers, and lanthanum strontium cobalt ferrite-samarium doped ceria (LSCF-YSZ) cathode layer. The laminated sample is manufactured via tape casting and a hydraulic press is utilized to laminate the layers, and the cathode layer is sprayed. The standard SOFC is manufactured by dry pressing substrate and applying electrolyte layers with an ultrasonic spray coater. Scanning electron microscopy (SEM) imaging is utilized to identify issues in material interfaces and compare material properties, such as the GB size and structure and layer thickness, which can be related to oxygen ion conductivity. This study allows for a comparison of typical large-scale lamination manufacturing to small-batch manufacturing methods.

In the molecular simulation approach, we constructed a multi-scale molecular simulation model based on the kMC simulation by using the MD simulation and experimental data. By using the kMC method, the conduction phenomenon of oxygen ion can be analyzed on a larger scale than that of the MD method and on the scale close to the experimental analysis. In the kMC method, oxygen ion diffuses stochastically. The probability of diffusion is $\Gamma \fallingdotseq \Gamma_0 \exp(-E_d / k_B T)$, where Γ_0 is the diffusion frequency, E_d is the activation energy for the diffusion. Γ_0 and E_d were computed by MD method and quantum chemical calculation, respectively. Experimental data was applied for the validation of constructed model. By using the constructed model, the correlation between the conductivity of oxygen ion and GBs in the membrane will be analyzed from molecular scale point of view. Especially, the effect of structure and distribution of GBs in SOEM on the conductivity of oxygen ion will be investigated. Based on the obtained results, SOEM will be manufactured experimentally.

3. Achievements

In experiment approach, the SEM imaging of each MCC allows for analysis of the microstructure properties, shown in Figure. 1. The image shows a good connection between the porous substrate and YSZ electrolyte layer, as well as between the YSZ and SDC layers within the laminated sample. A few pores are visible within the SDC layer, but should not be enough to affect the oxygen ion transportation. Within the standard SOFC sample, there is also good interfacial connections between layers and the substrate maintains porosity. However, there are pores between the YSZ and SDC layers as well as within the YSZ layer, which could affect performance.

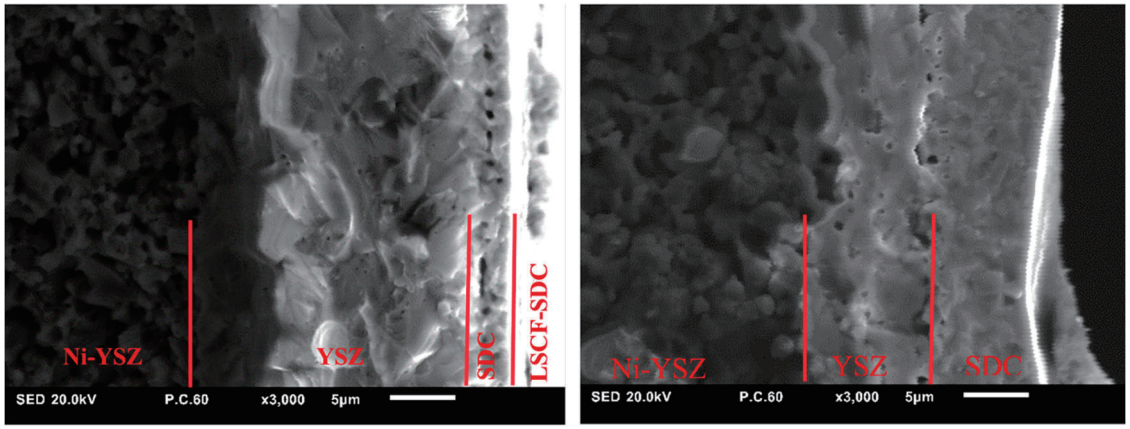


Figure 1: Cross sections of laminated MCC sample (left) and standard small-batch SOFC sample at 3000x magnification.

In molecular simulation approach, we constructed an original multi-scale simulation code. $SrSc_{0.1}Co_{0.9}O_{3-\delta}$ (SSC) was used as a single-phase model to compare the constructed method with the conventional MD method. The temperature dependence of diffusion coefficients was computed. Diffusion coefficient obtained by multiscale simulations based on kMC showed good agreement with the conventional MD simulations (Figure. 2).

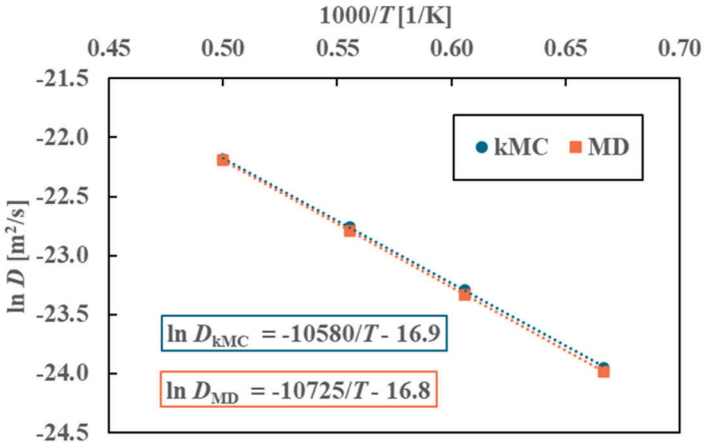


Figure 2: Comparison of diffusion coefficient. The equation in the figure is Arrhenius equation obtained by kMC and MD.

4. Summaries and future plans

In experiment approach, SEM imaging is utilized to analyze the properties of two MCC samples. The laminated MCC showed superior performance over the standard SOFC due to adhesion between electrolyte layers. Future work will be conducted to investigate properties of the laminated MCC, such as curvature behavior and oxygen permeation flux.

In the molecular simulation approach, We developed a method to perform kMC using parameters calculated by MD. As a result, the temperature dependence of the diffusion coefficients calculated with conventional MD and the developed kMC agreed well. In the future, the effect of GBs on oxygen ion conduction properties and its correlation will be analyzed using the constructed kMC code. Furthermore, the validity of the simulation results will be checked by comparison with experiments 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] Takumi Ijichi, Hiroki Nagashima, Takashi Tokumasu, Development of a Multiscale Simulation Method for Dual-Phase Solid Oxide Membrane Analysis, *Annual Meeting of the Japan Society of Fluid Mechanics*, September 25th to 27th, 2024, Sendai.

[2] Takumi Ijichi, Hiroki Nagashima, Cole Wilhelm, Aliza Willsey, Jeongmin Ahn, Takashi Tokumasu, Multi-scale Analysis of Oxygen Ion Conduction Property in Solid Oxide Electrolyte Membrane, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-37, pp. 113-115.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J24I104
Classification	General Collaborative Research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Feature Extraction for Better Prediction of Thermo-Physical Properties of Organic Materials Using Machine Algorithms

Hari Krishna Chilukoti*†, Gota Kikugawa **††
*Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Warangal
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Machine learning-based frameworks for high-throughput screening in material exploitation and optimization have gained significant attention. This data-driven approach to material development is known as materials informatics (MI). The advantage of MI lies in its ability to facilitate material discovery using big data, unlike the conventional trial-and-error method that relies on high-cost experiments. As a result, target materials can be discovered quickly. More recently, a new paradigm called physics-based machine learning (PBML) has emerged. Unlike conventional ML models, PBML incorporates not only data but also underlying physical laws or a chemical or physical interpretation of material properties, thereby improving model accuracy, particularly when small data sets are used. In this context, clarifying the physical mechanisms governing properties and extracting important features for a better understanding of the relationship between physics and data will accelerate the performance of PBML in materials discovery and property optimization.

2. Details of program implement

To predict the thermal conductivity of hybrid nanofluids using ML models, fourteen input parameters were encoded. These include the base fluid thermal conductivity, accentricity factor, densities of the first and second types of nanoparticles, sonication usage, presence of surfactants, types of base fluids and nanoparticles, mixing ratio of nanoparticles, volume fraction of nanoparticles, and temperature. These parameters collectively capture the characteristics of hybrid nanofluids. This encoded dataset was used for training and testing various ML algorithms. In this study, we employed a dataset comprising 896 data points, which were extracted from multiple research articles. Seventy percent of the data was allocated for training and validation, while thirty percent of the data was reserved for testing. The model was trained, and its hyperparameters were optimized using the training data, and its predictive performance was evaluated using the validation set. Finally, the trained models were assessed on the test data to verify their accuracy and reliability. Several statistical metrics were determined to assess model performance, including the coefficient of determination (R^2), average absolute percentage relative error (AAPRE%), absolute percentage relative error (APRE%), and root mean square error (RMSE).

3. Achievements

To assess the predictive capabilities of various machine learning algorithms in reproducing the experimental thermal conductivity of various hybrid nanofluids, we examined different ML algorithms: adaptive boosting (AD), random forest (RF),

decision tree (DT), support vector machine (SVM), and gradient boosting (GB). A total of 18 types of hybrid nanofluids were examined. Among these models, the gradient boosting ensemble model demonstrated superior performance in reproducing the thermal conductivity when compared to the other four models (Table 1). The GB model achieved an impressive %AAPRE value of 1.891%, R^2 of 0.993, a RMSE of 0.012, and an %APRE value of –0.307. Residual analysis further confirmed that the differences between predicted and actual values were nominal compared to the other models (Figure 1).

4. Summaries and future plans

We employed various machine learning algorithms to predict the thermal conductivity of different types of hybrid nanofluids under varying conditions (e.g., changes in temperature, volume fraction, and base fluid as well as nanoparticles) by considering a range of input features. As a next step, we will explore the importance of these features in influencing predictive performance of various algorithms. In addition, we will explore the optimization of target properties using Bayesian framework.

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
R^2	0.993	0.989	0.945	0.983	0.969
%AAPRE	1.891	2.372	5.535	3.01	5.491
RMSE	0.012	0.016	0.037	0.021	0.027
%APRE	–0.307	–0.275	–1.034	–0.137	–2.371

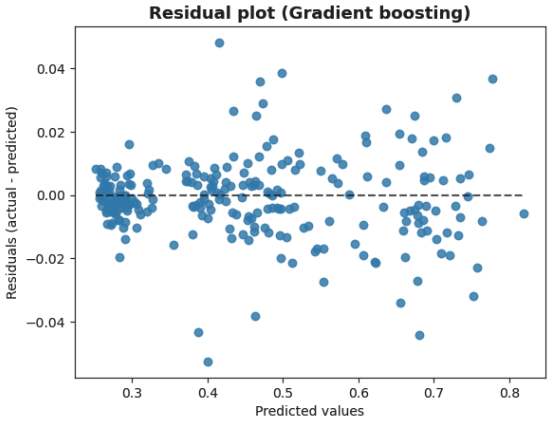


Figure 1: Residual versus predicted thermal conductivity of various hybrid nanofluids under different conditions using the gradient boosting model.

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)
Not applicable

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

Project code	J24I105
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	3rd year

Evaluation of the Dynamics of Natural Convection Thermal Boundary Layer under High Grashof Number Condition

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 spatially developing case, we have used $Pr = 0.71$ (up to $Ra = 6\times10^{11}$) and $Pr = 6$ (up to $Ra = 2\times10^{11}$) as the working fluid. Over 1 billion grid cells are required in order to resolve the Kolmogorov scales to provide unprecedented flow mechanics and detailed statistics, and the simulations are run for ~30 non-dimensional time to ensure a statistically steady flow state in which statistics can be extracted. Using a novel forcing fringe technique, we are able to successfully simulate the spatially developing flow with minimized out-flow boundary condition affect.

For the temporally developing case, we have used $Pr = 4$ and $Pr = 6$, with 2 billion grid cells. The simulations are run for ~30 non-dimensional time to obtain a sufficiently turbulent flow in the limit of high Rayleigh number.

To quantify the non-OB effects, we will conduct non-OB and OB cases for both setups (i.e., spatially developing and temporally developing).

Figure 1 shows the visualization of the temperature contours for the spatially

developing flow with Pr = 0.71. In (a) and (b) the near wall temperature contour clearly shows the development of the laminar—turbulent transition and a streaky turbulent flow.

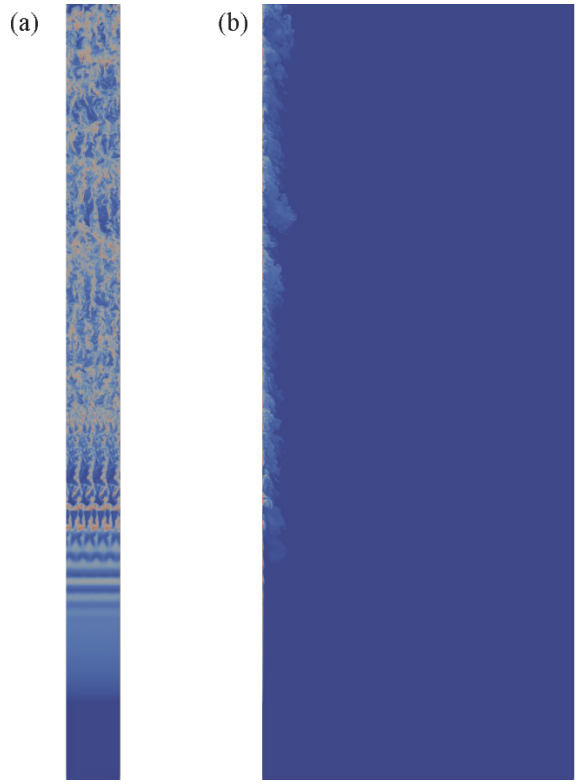


Figure 1: Temperature contours of the spatially developing natural convection boundary layer for Pr = 0.71 and Ra = 6×10^{11} from x = -82 to x = 7100 (a) the wall-parallel view at y = 12.42 and (b) the mid-span visualization.

3. Achievements

At this moment, the achievement level of this year could be evaluated at 90%. In 2024, this project resulted in two publications presented at an international conference, with two additional papers submitted to another international conference scheduled for 2025. Due to the significant computational demands of the project, major simulations for non-OB flows are still in progress. Future joint journal publications are anticipated based on the outcomes of these ongoing simulations.

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). By utilizing an innovative forcing fringe near the outlet to prevent reflection of the out-flow boundary condition, we are able to efficiently simulate the flow under spatial configurations. The statistics are validated against the spatially developing experiments in literature.

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.

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] Ke Junhao: *the 24th Australasian Fluid Mechanics Conference* (2024).

[2] Lu Jinshuyang: Comparisons of Turbulence Modelling for Vertical Natural Convection Boundary Layer, *the 24th Australasian Fluid Mechanics Conference* (2024).

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

Project code	J24I106
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Schlieren Imagery of Low Frequency AC Voltage EHD of 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 melting heat transfer enhancement in an organic PCM using Schlieren imagery. The main advantages of Schlieren velocimetry over PIV 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

In May 2023 preliminary testing was conducted on a new test-section that used stainless steel electrodes (as opposed to the previous copper electrodes) as well as a new heat transfer methodology. The previous year we had attempted to measure the signal of a PWM into a heater maintained at a constant BC, but this was too difficult to analyze. This year we used a PID controller implemented in LabView. The PID controller adjusts the output for the heater to maintain the setpoint, and then LabView records the output signal from the controller with respect to time. Other changes included the simultaneous measurement of applied voltage and current with the velocity field (experimental setup figure 1 and 2, flow visualization in figure 3).

In June the first formal experiments were conducted using the DSLR camera to visualize the flow. In July we switched to high-speed imagery. All experiments simultaneously measured heat transfer (through the PID controller), voltage and current (through an oscilloscope) and flow field through schlieren (using either the DSLR or HS camera). It should also be noted that the oscilloscope and HS camera were triggered together, so that the current, applied voltage, and flow velocity field could be correlated together in time.

Early results showed that the new electrodes did not show charge injection like the previous ones used in the collaboration in 2022. This shifted focus to investigating the behavior of the disassociation mechanism under an alternating electric field.

Simultaneous measurements of the flow visualization (Figure 3), current, and heat transfer (Figure 4) were taken for a variety of applied voltages and waveforms.

- 4kV, 6kV, 8kV DC
- 8kV 0.06Hz to 0.2Hz

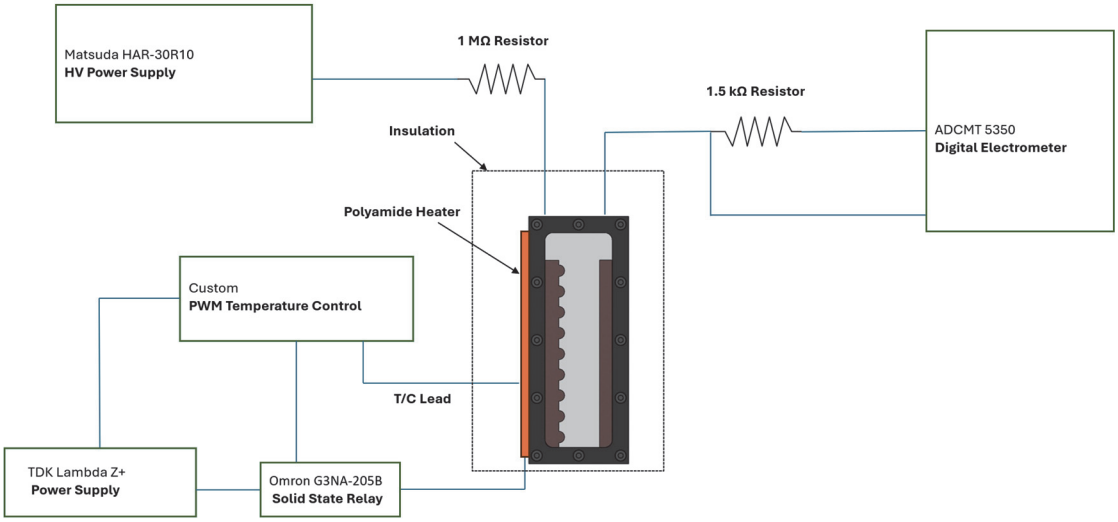


Figure 1: Experimental test facility schematic for simultaneous measurements of current vs voltage, heat transfer and flow visualization using Schlieren visualization.

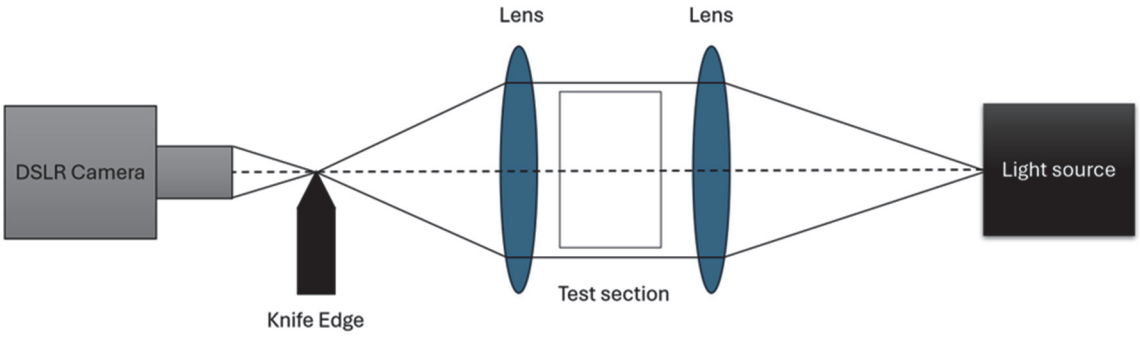


Figure 2: Schlieren visualization schematic

This year, we repeated the experiments of last summer in 5min intervals instead of 30min intervals. This allowed us to resolve the heat transfer, and fluid flow on a much finer resolution. Using a novel energy balance methodology, we were able to correspond each 5min recording with a specific melt fraction value.

We also repeated the experiments with different electrode materials (copper, stainless steel) to test if they had an effect on the charge injection threshold.

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.

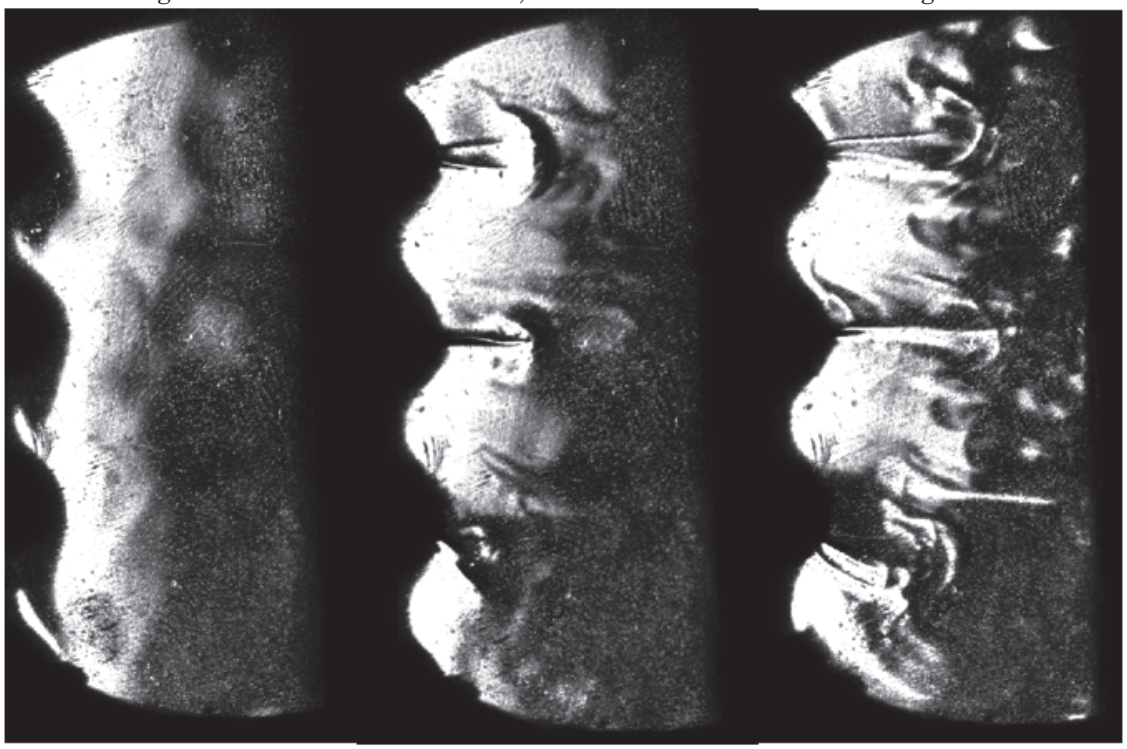


Figure 3: Schlieren visualization of jets for 0.06Hz- 8KV applied voltage left to right 0s, 1.2s, 2.1s.

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.

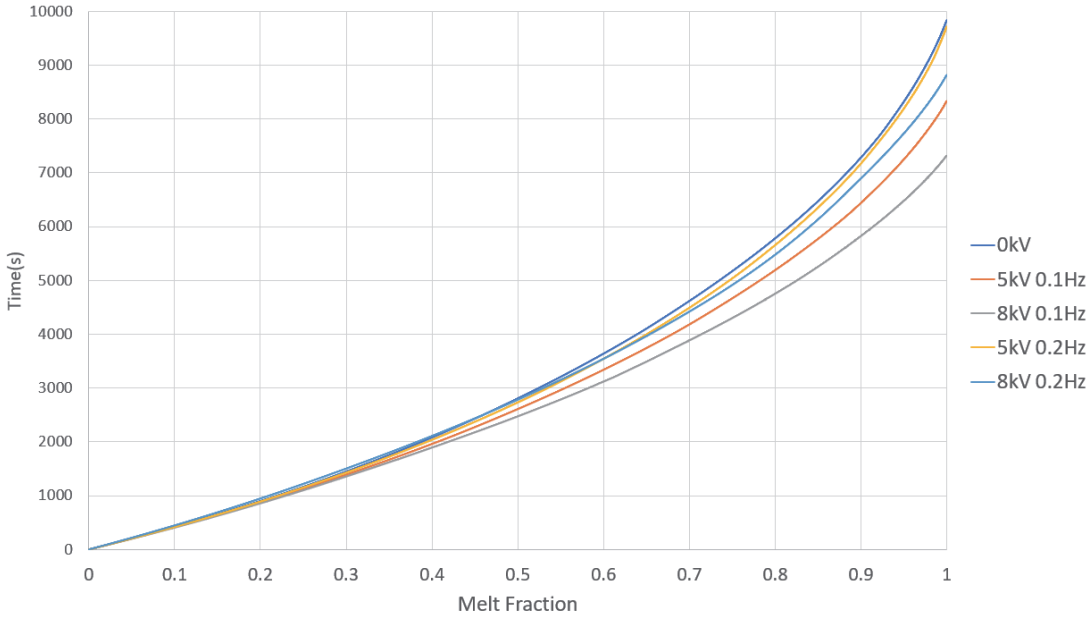


Figure 4: Time elapsed (s) vs Melt Fraction for different applied voltages.

4. Summaries and future plans

The findings from our first collaboration in 2022 and the 2023-2024 collaboration will be summarized in 2 journal papers to be submitted in 2025. The first will detail the Schlieren visualization methodology, and the second will investigate the physics of the dissociation mechanism EHD that was visualized in the 2023-2024 collaboration.

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)

Not applicable.

2) International and domestic conferences, meetings, oral presentation etc.

E. Chariandy, S. Liu, T. Sato, J. Cotton, "Schlieren velocimetry of Electrodynamic convection in a phase change material" *International Young Electrostatic Researcher Conference 2024.*

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	J24H001
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 年目

多様な拡散特性を持つ可燃性物質の「火炎・着火対応」の構築

Development of "Flame-Ignition Correspondence" for Combustible Mixtures with Various Diffusion Properties

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，**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

本課題は森井・丸田らにより考案された「火炎構造と着火の対応」理論に端を発する.同理論では Lewis 数が 1 の場合に 1 次元火炎構造の理論と 0 次元着火構造の理論が等価であることを示しており，autoignitive reaction wave の提唱などの発展がある.一方，Lewis 数が 1 でない場合は両者の等価性は非自明であり，これらの構造の対応を何らかの形で応用するならば，別途考察が必要となっている.そこで本課題では，任意の Lewis 数に対して着火の構造と整合性を持つように火炎構造を決定する方法論を構築し,「火炎・着火理論」の適用を大幅に拡張する事を試みる.

2. 研究成果の内容

森井氏，丸田研究室の博士課程学生の角田陽氏とともに，火炎構造の基本式を再考し(図 1)，Lewis 数が 1 でない場合の火炎構造を，力学系の分岐理論（応用数学の発展的道具の 1 つ) に基づいてシステマティックに導出する方法を構築した.従来の方法では未燃側の火炎構造の整合性が担保されない cold boundary difficulty と呼ばれる現象の扱いも必要となるが，本考察では既燃境界側から火炎構造の方程式を解いて，「未燃境界スレスレで止める」ことで，cold boundary difficulty に悩まされる事なく火炎構造を計算できる.他方，火炎構造を持つ解が着火を記述する解構造に接触すると，「正しい火炎構造」とは程遠い構造が「解」として出てきてしまう現象が観察された.

（具体的には，図 2 において既燃境界にあたる(θ , Y)=(1,0)から未燃側に向けて火炎構造を積分するとき， θ +Y = 1 の直線に解が近づくと，「火炎」がほぼプラトー状の構造を持ちながら，未燃境界に向かっていく.特に，正しい火炎帯厚さは計算できない.）

そこで，未燃境界のデータを「パラメータのある特殊な値」とみなすことで，火炎帯厚さ，燃焼速度固有値も全て未知変数として分岐理論の問題設定に当てはめ，さまざまな Lewis 数，活性化エネルギーにおける火炎構造の導出に成功した（図 2, 3）.

加えて，同時期に流体研に滞在していた Joel Daou 氏（University of Manchester）との意見交換により，University of Manchester で氏が企画する国際ワークショップへの誘いを受けた.同ワークショップでは，本課題の議論と，過去行った「(流体力学的に不安定な) 予混合火炎の弱非線型モデルにおける動態網羅」をまとめて「分岐理論」を主軸として講演した（国際学会[2]）.

3. 研究目標の達成状況

当初の目標の１つである「Lewis 数が１でない場合の火炎構造のシステマティックな導出」については，一定の回答を得られた．一方，これらの議論は cold boundary difficulty が知られた時より非常に多くの考察がある古典的な話である．本考察は着火構造との対応を主軸の１つとしているが，その点は議論の余地がまだ残されている．また，「正しい火炎構造」を同定するために「未燃境界スレスレ」を特定して火炎構造を同定しているが，この点も恣意性が残っている．よって，「求めた解の妥当性と解釈」はより強固な説明が必要である．

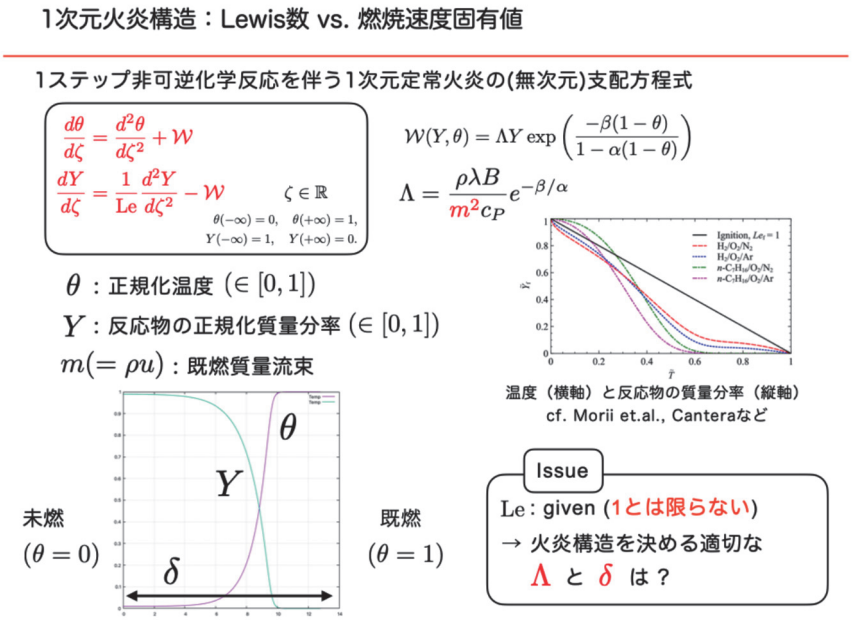
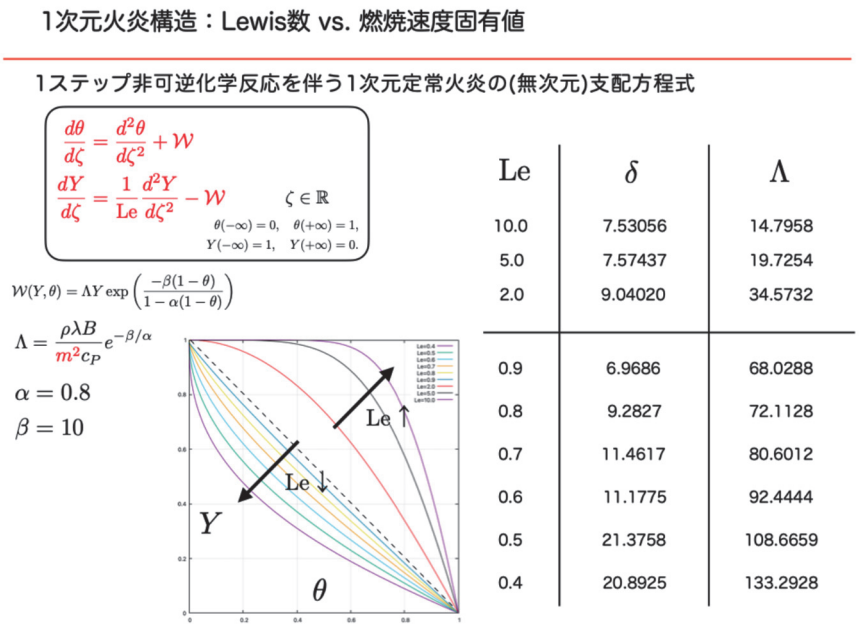


図１：１次元火炎構造のモデル，火炎帯厚さ，燃焼速度固有値を求める問題設定



Le	δ	Λ
10.0	7.53056	14.7958
5.0	7.57437	19.7254
2.0	9.04020	34.5732
0.9	6.9686	68.0288
0.8	9.2827	72.1128
0.7	11.4617	80.6012
0.6	11.1775	92.4444
0.5	21.3758	108.6659
0.4	20.8925	133.2928

図２：１次元火炎構造のモデル，Lewis 数をさまざまに変えた際の火炎帯厚さ，燃焼速度固有値

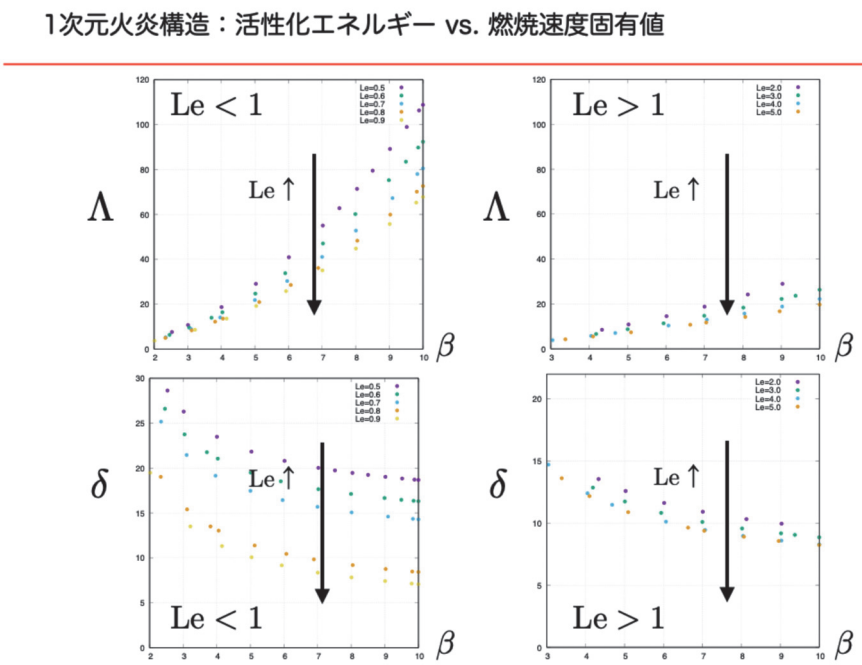


図 3：活性化エネルギーの関数としての燃焼速度固有値，火炎帯厚さ

4. まとめと今後の課題

本課題では「着火・火炎対応」に端を発して，様々な燃料特性に対する火炎構造のシステマティックな計算を考察した. 特徴量の抽出に恣意性が含まれているものの, それらしい構造の計算は（1 ステップ非可逆化学反応モデルの場合に）実現できた. 一方，その妥当性の説明に，cold boundary difficulty という古典的な困難の存在を改めて浮き彫り視するに過ぎない結果ともなった.

他方で, 先の考察は cold boundary difficulty を避ける事を念頭においており, difficulty が存在する事を暗に認めて議論を進めている. ところが現実の火炎にはこのような difficulty などそもそも存在せず，モデルの恣意性により生じたものと考える方が現実に照らし合わせれば自然である. 本考察は「未燃境界スレスレ」までのモデルの積分で真の火炎構造に近い特徴量を抽出できていると期待され，これにより「cold boundary difficulty がそもそも発生しない 1 次元火炎構造のモデル」の構築が新たな疑問として浮上する. 着火と火炎構造の対応は「火炎の基本構造の新たな基礎の構築」という解釈もでき，上記の新たな疑問の解決はそれを補う，あるいは燃焼の基礎を書き換える課題であると考えられる.

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] 松江 要,「火炎ダイナミクスと分岐理論（Flame Dynamics and Bifurcation Theory）」, 東北大学流体科学研究所セミナー，東北大学流体科学研究所，2024. 6.5

[2] Kaname Matsue, “On Studies of Flame Dynamics based on Bifurcation Theory”, *Conference on Combustion & Flame Instabilities in Confined Geometries*, University of Manchester (2024. 7.17 - 7.18)

[3] 松江 要, “分岐理論に基づく様々な『形』の追跡”, 第 38 期 CAMM フォーラム 第 2 回本例会, 2024. 11.1

[4] 松江 要, 「着火・火炎対応の分岐理論による新描像」, *Quantitative prediction of transition phenomena in combustion processes,* IMI 共同利用, 九州大学 IMI, 2024. 11.13

[5] Kaname Matsue,“On Studies of Flame Morphology based on Bifurcation Theory”, *The 21st International Conference on Flow Dynamics* (OS2), Sendai International Center, Sendai, Japan (2024. 11.18 - 11.20)

[6] Kaname Matsue,“Flame Dynamics based on Bifurcation Theory”, *Workshop "Mathematics for Innovation" on Ito Campus 2025*, IMI, Kyushu University, Japan, 2025. 1.9

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	J24H002
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 年目

3 自由度の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 Three-degree-of-Freedom Flapping

石出 忠輝*†，大林　茂**††
満永 基大***，泉　源*****
*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，**木更津高専電子制御工学科
†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，乱流解析手法として DES，乱流モデルは SST k-ω を使用している．巡行飛行状態を想定し，流入条件として，一様流速 U=10m/s，流出条件として，圧力一定のディレクレ条件を与えている．独立領域におけるその他の面は，速度と圧力の勾配 0 としたノイマン条件を与えている．また，羽ばたき振幅 20°，羽ばたき周波数 5Hz をとし，平均翼弦長を代表長さとするレイノルズ数 3.10×10^4 である．本解析では振り上げ，振り下ろし速度によって変化する相対迎角 α_{rel} が常に 10°になるようにフェザリング運動を与えている．比較対象として初期迎角を α_0=0°～30°まで変化させ，フラッピング運動のみでの解析も行った．

2.2 解析モデル及び格子生成

図 1 に解析モデルを示す．翼は，平均翼弦長 47,1mm，翼幅 180mm の楕円翼であり，胴体は長軸 120mm，短軸 30mm の楕円体である．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，重合格子を用いている．重合格子は，計算領域

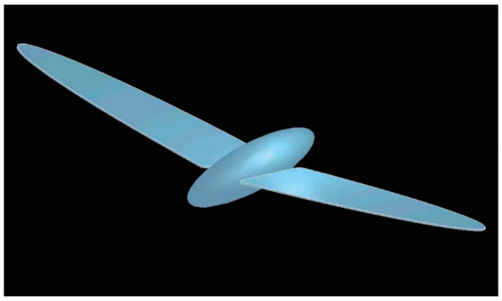


図 1：解析モデル

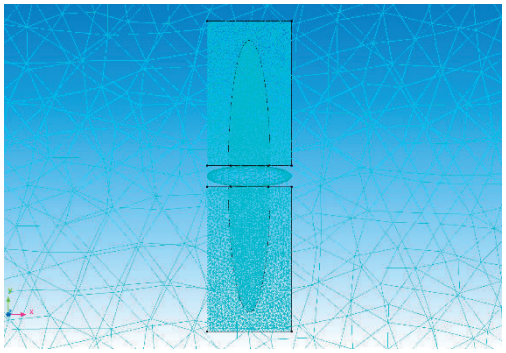


図 2：計算格子

空間内の主格子（独立領域）に物体まわりの補助格子（従属領域）を重ねて配置する事で数値解析を行う手法である．独立領域は $(x, y, z) = (2.8\text{m}, 1.9\text{m}, 3.8\text{m})$，従属領域は $(x,y,z)=(0.12\text{m}, 0.22\text{m}, 0.11\text{m})$としている．ここで，$x, y, z$ はそれぞれ翼弦方向，翼幅方向，高さ方向領域サイズを表している．従属領域内の翼面近傍の境界層内にはプリズム要素を 10 層配置しており，従属領域のみの総要素数は，約 62 万点となっている．また，独立領域の要素数は 1631 万点である．

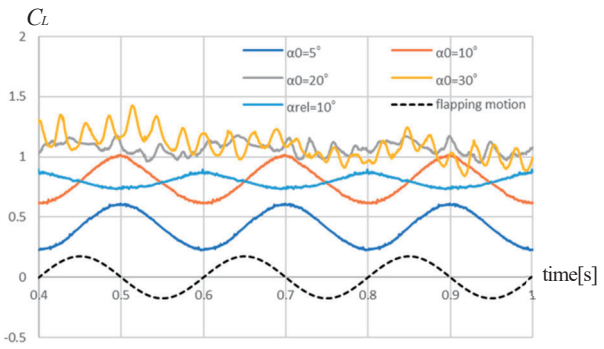


図 3：揚力係数時間履歴

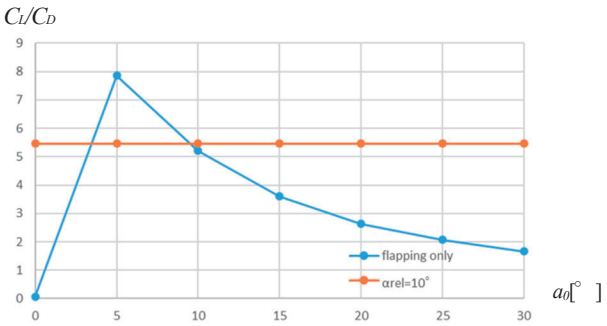


図 4：揚抗比

2.3 解析結果

図 3 に初期迎角 α_0 を 5°，10°，20°，30°として，フラッピング運動のみを与えた場合と，相対迎角 α_{rel} が常に 10°になるようにフェザリング運動を与えた場合の揚力係数時間履歴を示す．この図から α_0=5°，10°において，振り下ろし中間点で揚力係数が最大となり，振り上げ中間点で最小となっている事が分かる．一方で，α_0=20°，30°において羽ばたき運動一周期内全体で大きな揚力が得られている事が確認できる．これらの条件では翼上面に前縁剥離渦の発生がみられ，その負圧によって高い揚力を得たと考えられる．図 4 に時間平均した揚抗比曲線を示す．この図を見ると，フラッピング運動のみで α_0=5°の場合に最も高い揚抗比が得られるが，その他の条件ではフェザリング運動を付加した効果が確認できる．

3. 研究目標の達成状況

本公募共同研究を通して，フラッピング及びフェザリング運動を有する翼胴結合体まわりの数値解析結果より，フラッピング運動に対して適切な位相差を持つフェザリング運動が空力特性改善に有効である事が確認でき，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，羽ばたき運動を有する翼胴結合モデルの数値解析を通して，羽ばたき運動の空力特性に与える効果についてある程度の知見が得られたものと考えられる．今後は，羽ばたき周波数の影響及び離陸・着陸に適した羽ばたき運動パターンの解明を進めていきたい．

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] Motohiro MITSUNAGA, Tadateru ISHIDE, Hajime IZUMI, Haruka TAMAGAWA, Atsushi HARADA, Shigeru OBAYASHI : Numerical Analysis of the Flow around a Wing-body Combination Model with Three-degree-of-freedom Flapping, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-53, pp. 149-150.

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**なし．

課題番号	J24H003
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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**，大林　茂***††

*木更津工業高等専門学校 電子制御工学科，**木更津工業高等専門学校 機械工学科

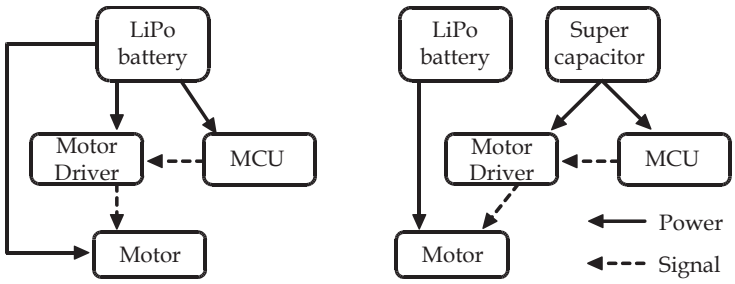
***東北大学流体科学研究所

†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

現在，本研究では全翼長 0.3 m・機体総重量 20 g 以下を目標とした「小型鳥型翼飛行機」の開発を木更津高専・機械工学科・流体研究室とともに進めており，筆者はその電源系統の設計を担当している．現時点での試作機は 18.5 g であり，バッテリー1 個による羽ばたき周波数 3 Hz または 5 Hz での平均連続動作時間はおよそ 2 分と限られている．

モーターおよびマイコン（MCU）には，それぞれ異なる動作特性に応じた電源供給が必要となるが，単純に電源を 2 系統化（バッテリーを追加）することは，機体の軽量制約を大きく逸脱してしまう．そこで本研究では，モーター用電源には高出力が可能なリチウムポリマーバッテリー（LiPo）を用い，MCU には瞬時的な電力供給が可能なスーパーキャパシタを採用することで，超軽量化と安定した動作の両立を図る電源系統の構築を目指している．



(a)これまでの電源系統　　(b)提案する電源系統

図 1：本研究における主な電源系統

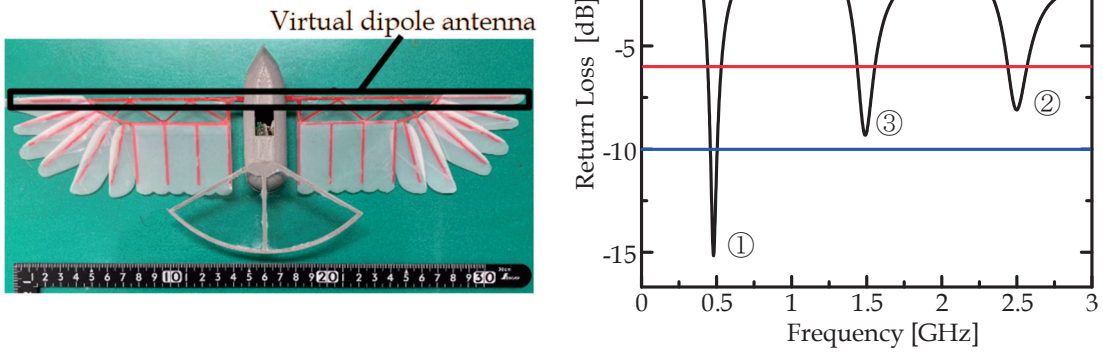
2. 研究成果の内容

本研究では，小型鳥型翼飛行機における MCU 専用電源として採用するスーパーキャパシタへの充電方式の確立を目指し，特に飛行中の充電に焦点を当てて検討をおこなった．飛行中の給電方法としては，非接触給電と環境電磁界の回収の 2 手法が考えられるが，非接触給電では瞬間的に必要な電圧の確保が困難であることから，本研究では環境中に存在する電磁波を利用した給電方式に注目した．

その実現に向けて，機体の翼部にダイポールアンテナを装荷し，飛行中に周囲の高周波電磁波を受信する構成を採用した．シミュレーションの結果，3 つの異なる周波数帯の電波を

受信できることを確認した（①地上デジタルテレビ放送帯，②Long Tern Evolution (LTE)帯，③Industrial, Scientific, and Medical (ISM)帯）．図 2(b)において，青線は電力損失 0.5 dB 以内，赤線は電力損失 1.0 dB 以内であることを示している．得られた高周波信号をスーパーキャパシタに蓄電するためには整流回路が必要となるが，ダイポールアンテナから得られる電圧は小さく，そのままでは使用に耐えないため，本研究では倍電圧整流方式を採用した．特に，図 3 に示す 5 段以上のチャージポンプ型整流回路（25 mV 以上@入力）を用いて，後段に昇圧回路と組み合わせることでMCU 動作に必要な電圧レベルへの変換が可能であることを確認した．

また，電源回路全体の軽量性・信頼性を損なわずに構成するため，部品の選定ついて複数の条件下で比較検討を重ねた．



(a) アンテナ装荷位置　　(b) アンテナ単体での特性

図 2：翼に内蔵するアンテナ：内蔵場所と特性

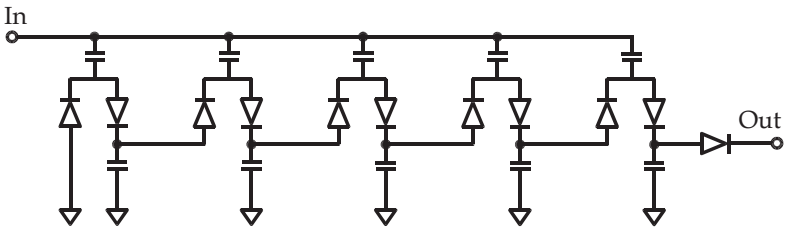


図 3：チャージポンプ型整流回路

3. 研究目標の達成状況

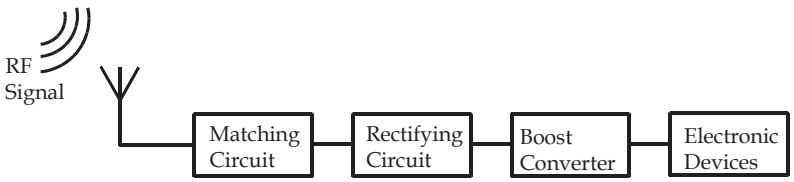


図 4：環境電磁界回収システムの概略

本研究では，小型鳥型翼飛行機の独立電源系構築（図 4）を目指し，5 つの段階的目標を設定した．1）電気二重層コンデンサの多段化と昇圧回路の関係の解明，2）翼を利用したアンテナ設計，3）その特性の数値解析，4）胴体部へのアンテナ実装による受電強化，5）風洞試験による実装検証である．1〜3 は計画通り達成し，倍電圧整流回路のみでは MCU 駆動に電圧が不足

し，昇圧回路が不可欠であることも新たに判明した．昇圧回路に適切な入力を得るためには 5 倍圧方式以上が適していると確認された．4 は評価の方針が立ち，5 は今後の課題である．

基礎設計の達成度としては，電源構成・受電手法・回路構成の主要要素が解析と検証により明らかになっており，目標の約 80%を満たしていると評価できる．一方，物理的な実装段階では，アンテナ装着や風洞試験など最終的な統合検証が未了であり，全体進捗としてはおおむね 60%に相当する．

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軽量かつ安定した独立電源系の構築を目指し，モーター用には LiPo 電池，MCU 用にはスーパーキャパシタを用いる二系統構成を提案した．飛行中の充電方式として，環境電磁界を利用した電力回収に着目し，翼にアンテナを内蔵する構造を設計・解析することで，3 つの周波数帯域での受信特性を確認した．さらに，倍電圧整流回路と昇圧回路の組合せにより，MCU 駆動に必要な電圧を確保するための設計指針も得られた．

一方で，アンテナの物理的な実装や風洞試験による統合検証は未着手であり，これらは今後の課題である．特に，機体完成後の実機評価を通じて，電力収集効率や MCU 動作の安定性を確認することが求められる．また，胴体部アンテナの有効性についても，数値解析をもとに実装可能性を検討する必要がある．今後は，これらの検証を通じて，設計の妥当性を実証し，実用性の高い軽量飛行体電源システムの構築を目指す．

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] Hajime Izumi, Tadateru Ishide, Shigeru Obayashi：Backup Power Supply using Flapping Wing Antennas, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-54. pp. 151-152

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	J24H004
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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**††，高野 了太***，新竹　純****†
*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
名古屋大学大学院情報学研究科，*電気通信大学
†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について，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．本研究で捉えようとする審美性とは，「かっこよさ」である．このかっこよさを定量的に示す研究は，人間が有する美感覚・意識の一側面を明らかにすることにつながる．これに加えて，今回の研究における特に航空機に対するかっこよさに対する認知の解明は，今後，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する潜在性を持つ．本研究では，航空機の刺激セットを用意し，それらに対する人々の反応の取得をインターネット調査（n=500）を通して実施した．

2. 研究成果の内容

インターネット調査を通して，図 1 のような複数の航空機が描写された刺激セット（合計 4 セットで，図 1 の例は刺激セット I）に対して，500 名（平均年齢 = 54.6 歳，min = 24, max = 69，男性 312 名，女性 188 名）からの反応を得た．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，彼らは，安全性評定を実行した（「*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*（安全には下線を付した）」に対する 5 件法反応［1. 全く安全でない –5. とても安全］）．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質問項目に対する回答を得たが，本報告書では紙面の都合上，その報告を避ける．回答を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（0.16.30）と jamovi（2.6.26）で実施

図 1：航空機の刺激セット I

した．刺激セットⅠに対する審美性並びに安全性反応の解析を実施した（図 1）．図 1c の相

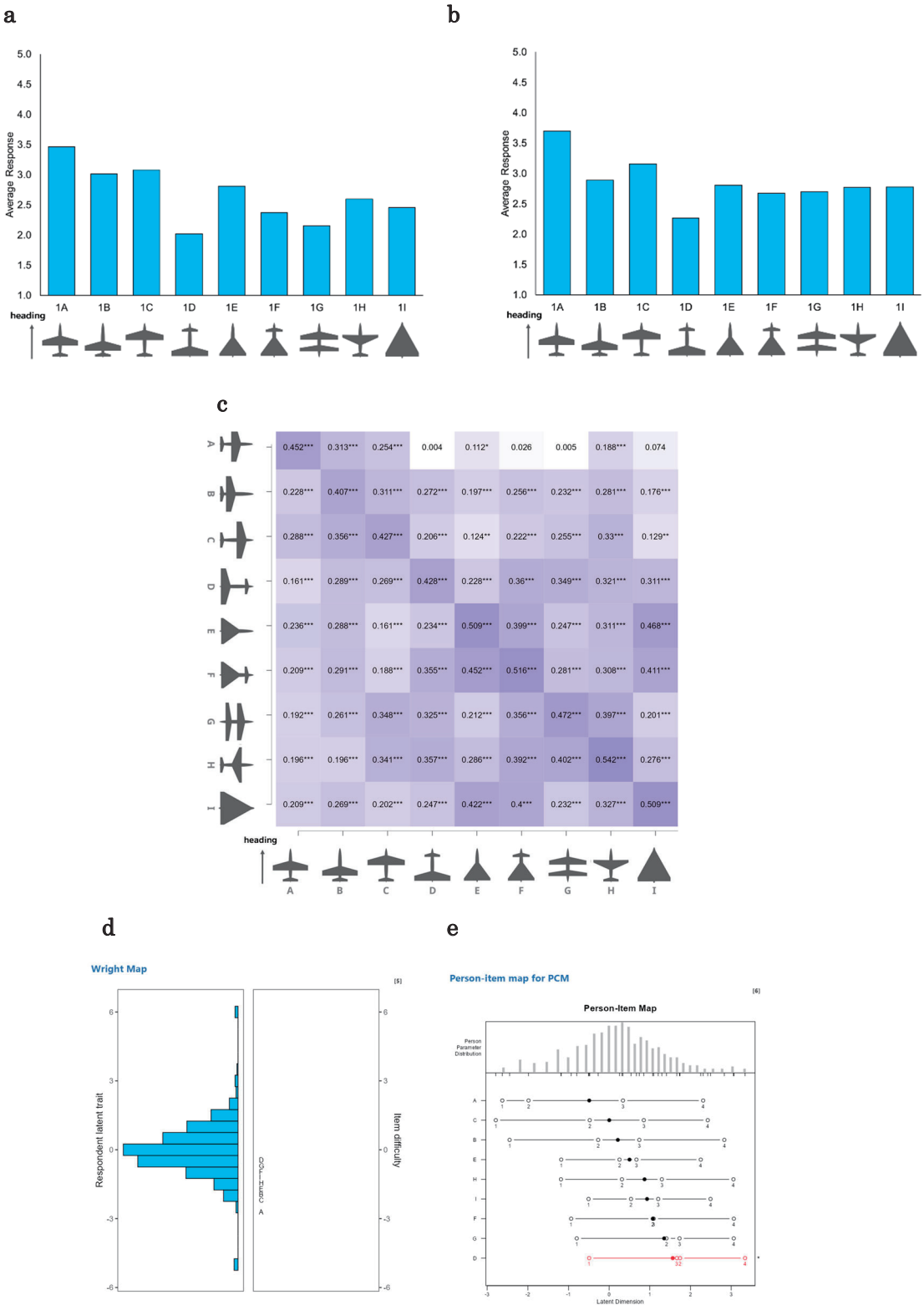


図 1：航空機の刺激セットⅠに対する心的反応の結果
（a：審美性の平均得点，b：安全性の平均得点，c：審美性と安全性の相関係数のヒートマップ［*** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$］，d：審美性に対する IRT 分析による Wright Map，e：審美性に対する IRT 分析による Person-Item map for PCM）

関分析の結果から，審美性評定と安全性評定とが関連することが示された．次いで，IRT（項目反応理論）に基づく分析で得た図 1d 並びに e の結果から（Person Reliability = 0.833, MADaQ3 = 0.169, $p < .001$），航空機の形状に応じて審美性評定が分かれ，航空機 A に対しての審美性評定が高く出る傾向にあり，航空機 D に対しての審美性評定が低く出る傾向にあるという示唆を得た．

3. 研究目標の達成状況

本研究では，「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し，解析した世界でも類をみない研究の一つである．さらに，本研究で実施した航空機に対する審美性としてのかっこよさに関する研究は，世界ではじめてのチャレンジである．研究初年次において調査をデザインし，萌芽的なデータを取得し，解析を実現できたことは，研究目標の達成状況としては十二分に満足いくものである．

現在，他の刺激セットに対する分析を実施している．併せて，刺激一つひとつに対する幾何学上の解析を行う予定にある．例えば，重心の位置，黄金比や白銀比の評価を実施していくことを計画している．これらを経て，刺激が有する物理量と心理的反応量との関連についての解明を進めていく．

4. まとめと今後の課題

本研究における航空機の審美性としてのかっこよさ並びに安全性に対する人の認知反応の取得・解析を通して，人々は航空機のかっこよさを評定可能であり，それが形状によって異なること，そして安全性に関しても評定可能であり，同じく形状によって評定が変わりえることを明らかにした．さらに，それらが関連することを示した．

今後の研究では，上記の通り，形状が持つ幾何学的な物理量を解析したのちに，それと今回の調査で得たデータとの関連の解析していく．加えて，一年目の成果を受けて，航空機の審美性並びに安全性に対する認知のメカニズムの解明に迫るために，仮説を構築しながら，新たな調査を計画，実施していく．

5. 研究成果

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] J. Shintake, M. N. Raza, R. Saito, Y. Abe: Multidimensional Evaluation of Aircraft Design: The Crossover Between Aesthetics and Performance/Safety, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-50, pp. 142-143.

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

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	J24R001
Classification	International Multiple Collaborative Research Project
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Numerical Simulation of the Effect of Viscosity on the Directional Movement of Droplets on the Bioinspired Micro/nanostructured Surfaces

Aike Qiao*†, Makoto Ohta****††
Shiliang Chen*, Hanbing Zhang*, Bao Guo*, Tianming Du*, Hongfang Song**
Wenyu Fu***, Hitomi Anzai****
*Faculty of Environment and Life, Beijing University of Technology, China
**School of Biomedical Engineering, Capital Medical University, China
***College of Robotics, Beijing Union University, China
****Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Tracheal stent is one of the primary treatment modalities for tracheal stenosis, which can quickly reconstruct the airway and relieve symptoms of dyspnea. However, the tracheal stent may hinder the function of mucociliary clearance, leading to mucus plugging. Therefore, it is an urgent clinical need to manufacture tracheal stent that does not impair the function of mucus transport.

The directional movement of droplet is common in nature, mainly due to the micro/nanostructure and wettability gradient of biological surfaces. Inspired by the directional movement of droplet, we propose a method to design micro/nanostructure on the inner surface of the tracheal stent to facilitate mucus transport.

However, the current research on directional movement of droplet mainly focuses on water, and little attention has been paid to the directional movement of viscous droplet. Therefore, the purpose of this study is to investigate the directional movement of viscous droplet on the surface of micro/nanostructures by finite element method, so as to guide the manufacture of tracheal stent with the function of mucus transport.

2. Details of program implement

The collaborators discussed and made the detailed research plan and the division based on this program. The research has been finished well up to now and the results have been published in the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2024). The details of the research are described as follows:

The directional movement of droplet is a kind of multiphase flow, and there are various numerical simulation methods for multiphase flow, such as phase field model, level-set, volume-of-fluid, etc. In this study, the phase-field model is used to simulate the directional movement of droplet, as the phase field model is usually a better choice for small-scale free surface and laminar flow that are extremely sensitive to surface tension.

The micro/nanostructure designed in this study was sawtooth array. Figure 1 shows the 2D model of the directional movement of droplet on the surface of sawtooth array. The droplet is located above the surface of the sawtooth array at the initial moment. The size of the model is 20 mm* 5 mm. The radius of the droplet is

1.061 mm. The parameters involved in the model include the width(W), height(H), spacing(S) and the contact angle(CA) of the sawtooth array. Surface roughness is one of the primary factors of wettability and directional movement of droplet. The roughness of sawtooth arrays with different structure parameters are different. In order to obtain the sawtooth array with better directional movement, different models were established to explore the influence of parameters on the directional movement of a droplet (Table 1).

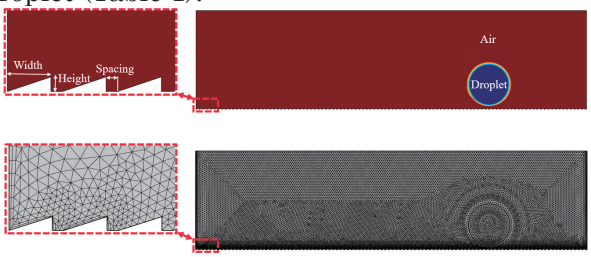


Fig. 1 2D model of the directional movement of droplet on the surface of sawtooth array

Table. 1 Levels of four parameters

Parameters	Level1	Level2	Level3	Level4	Level5
W/μm	150	200	250	300	350
H/μm	30	40	50	60	70
S/μm	0	10	20	30	40
CA/°	60	75	90	105	120

The density of the droplet is 1000 kg/cm^3, the viscosity is 0.001 Pa·s, and the surface tension is 0.072 N/m.

Mucus is a shear-thinning fluid, which is simplified as a Newtonian fluid in this study. When exploring the effect of viscosity on the directional movement of a droplet, the control group consists of droplet with a viscosity of 0.001 Pa·s, while the experimental group consists of droplet with viscosities of 0.005, 0.01, 0.05 and 0.01 Pa·s, respectively. The surface tension is 0.034 N/m.

The top side of the computational domain is an open boundary, left and right sides are normal walls, and the lower wall is wetted. The droplet falls freely under gravity at the initial moment.

3. Achievements

When the droplet gets into contact with the sawtooth array, the dynamic contact angle at both ends of the droplet changes, and asymmetric force at the three-phase contact line can lead to the directional movement of droplet toward the hypotenuse of sawtooth. The sawtooth array increases the surface roughness, making the hydrophilic surface more hydrophilic and the hydrophobic surface more hydrophobic. The total time (T) of droplet reaching the left boundary of the model is used to evaluate the directional movement of sawtooth array.

Figure 2 shows the influence of parameters on the directional movement of a droplet. T increases as the width of the sawtooth increases, because with the increase of the width of the sawtooth, the roughness of the sawtooth array decreases and the hydrophilicity decreases. The increase of the height of the sawtooth will lead to the increase of the roughness and the hydrophilicity of the sawtooth array. However, when the sawtooth height is 70 μm, the enhanced hydrophilicity makes

the droplet to excessively spread, resulting in an increase in droplet contraction time. When the sawtooth spacing is between 0 and 40 μm, T first increases and then decreases. When the contact angle of the sawtooth array is 90 °, the droplet remains immobile. Droplet on both hydrophilic and hydrophobic sawtooth array can be transported directionally, but there are differences in droplet morphology during their movement (Fig 3).

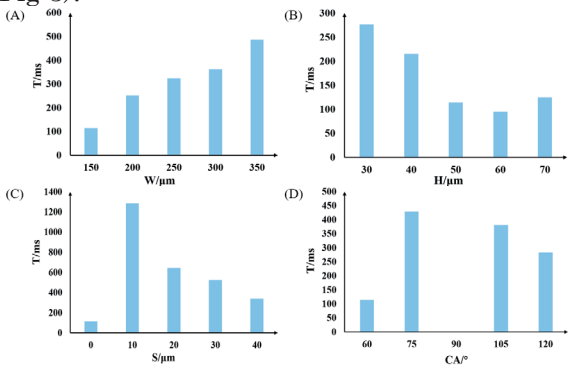


Fig. 2 Influence of the width(W), height(H), spacing(S) of the ratchet array and the contact angle(CA) on the directional movement of a droplet.

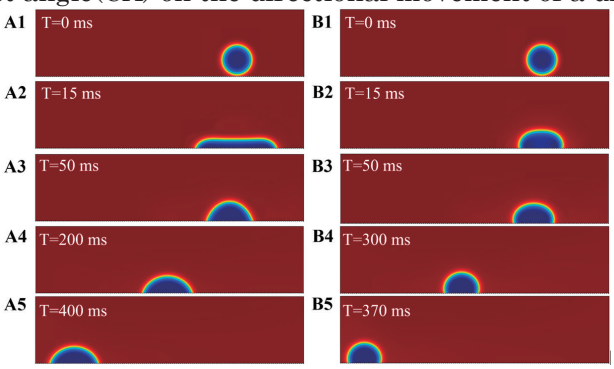


Fig. 3 Time sequential images showing the directional movement of a droplet on hydrophilic (A) and hydrophobic (B) sawtooth array.

Based on the parametric analysis, the sawtooth array with better directional movement was used to investigate the influence of viscosity on the directional movement of a droplet.

Viscous droplet can also be transported directionally on sawtooth array. Droplet with a viscosity of 0.001 Pa·s underwent spreading, contraction, and stable movement on the sawtooth array (Fig 4). However, no significant spreading was observed for droplet with a viscosity of 0.01 Pa·s. As the viscosity increases, T increases significantly (Fig 5). In addition, viscous droplets can also be transported directionally against gravity on a slope with an angle of 20 ° (Fig 6).

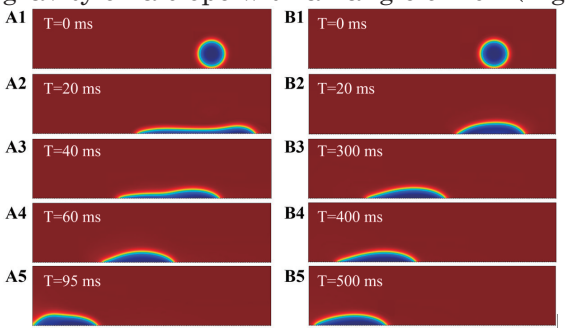


Fig. 4 Time sequential images showing the directional movement of droplet with a viscosity of 0.001 Pa·s (A) and droplet with a viscosity of 0.01 Pa·s (B).

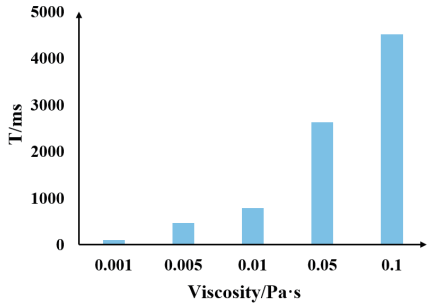


Fig. 5 Influence of viscosity on the directional movement of a droplet

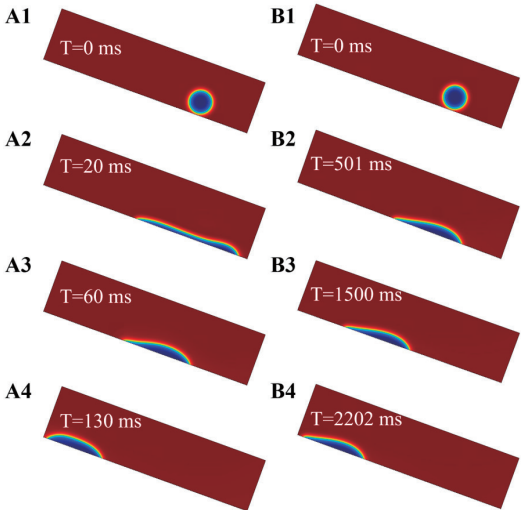


Fig. 6 Time sequential images showing the directional movement of droplet with a viscosity of 0.001 Pa·s (A) and droplet with a viscosity of 0.01 Pa·s (B) on a slope.

4. Summaries and future plans

The results indicate that the directional movement of droplet on the surface of sawtooth array can be effectively improved by adjusting the parameters of sawtooth array. Viscous droplet can also be transported directionally on the surface of sawtooth array. As the viscosity increases, the speed of droplet significantly decreases. This work might provide guidance for the manufacture of tracheal stent with the function of mucus transport.

This study explores the influence of the structural parameters of the sawtooth array on the directional transport of viscous droplets via finite element simulation. In future work, we will select the sawtooth array with the optimal directional transport function for mucus and conduct experiments to verify the reliability of the simulation.

5. Research results

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

[1] S. Chen, T. Du, H. Zhang, Y. Zhang, A. Qiao: Advances in Studies on Tracheal Stent Design Addressing the Related Complications, Mater. *Today Bio*, 29(2024), pp.101263, doi: 10.1016/j.mtbio.2024.101263.

[2] B. Guo, S. Chen, Y. Zhang, Y. Yang, H. Song, Y. Zhang, T. Du, A. Qiao: A Quantitative Study of the Effects of a Dual Layer Coating Drug-Eluting Stent on Safety and Efficacy, *J. Biomech.*, 176(2024), pp.112304, doi: 10.1016/j.jbiomech.2024.112304.

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

[3] S. Chen, H. Zhang, B. Guo, T. Du, A. Qiao, H. Song, W. Fu, H. Anzai, M. Ohta: Numerical Simulation of the Effect of Viscosity on the Directional Movement of Droplets on the Bioinspired Micro/nanostructured Surfaces, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2024), CRF-25, pp. 84-86.

[4] H. Zhang, Z. Qu, S. Chen, A. Qiao, Q. Hou, H. Song, W. Fu, H. Anzai, M. Ohta: Simulation of Thrombosis Induced by Various Degrees of Stent Malapposition, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2024), OS9-2.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J24R002
Classification	International multiple collaborative research Project
Subject area	Aerospace
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

Prediction and Optimisation of Axisymmetric Shock Reflection in Supersonic Aerospace Applications

Hideaki Ogawa*†, Taro Handa**††, Yoshitaka Higa**, Kiyonobu Ohtani***††
Masanobu Matsunaga*, Kohei Omiya*, Aoi Shibakita*, Chihiro Fujio*
Justin Kin Jun Hew****, Roderick Boswell****††, Yasumasa Watanabe*
Sannu Mölder*****††, Ben Shoesmith******, Rabi Tahir******, Evgeny Timofeev******††
V. Vijayakrishnan*******, Akash Marade*******, Thiruchengode Muruganandam*******††
*Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University
**Department of Advanced Science and Technology, Toyota Technological Institute
***Institute of Fluid Science, Tohoku University
****Plasma Power and Propulsion Laboratory, Australian National University
*****Department of Aerospace Engineering, Ryerson University
******Department of Mechanical Engineering, McGill University
*******Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology Madras
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Centreline shock reflection commonly takes place in axisymmetric flowfields of various aerospace applications including supersonic air intakes and nozzles. Mach reflection comprising an incident shock, a reflected shock and a Mach stem (disk) occurs at the centreline (Figure 1), because regular reflection is precluded by theory at the symmetry axis in the inviscid regime and at high Reynolds number in the viscous regime.

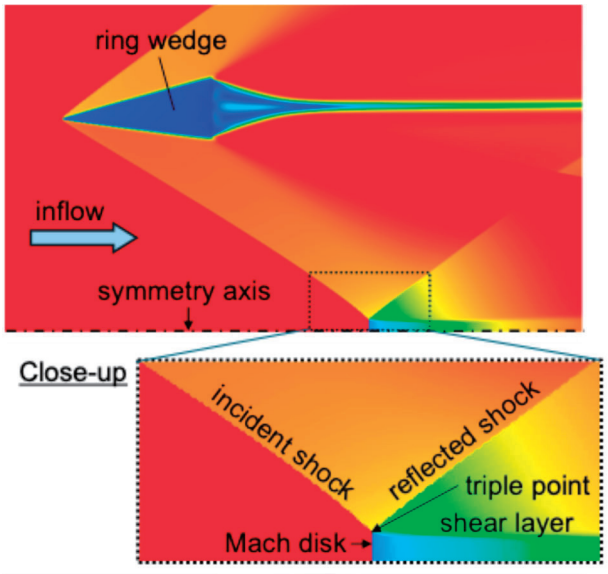


Figure 1: Shock system in ring wedge intake

The flow undergoes an abrupt change across the Mach disk, which may lead to intake unstart if it takes place in the intake. A Mach disk can also occur in the jets of under-expanded and over-expanded nozzles. Such undesirable events can exert adverse impact on the performance of the applications. On the other hand, it can also represent a potential benefit for applications that can take advantage of high pressure/temperature downstream of the Mach disk, which may be suitably used for fuel

ignition and flame holding in scramjet propulsion for instance, if designed and handled appropriately. The characteristics and behaviour of centreline shock reflection, however, are yet to be fully understood, in contrast with planar shock reflection, whose behaviour is well understood hence predictable.

This project aims to develop a methodology for accurate prediction and optimisation of centreline Mach reflection by formulating its behaviour and characteristics. Shock structures and centreline flow properties will be measured optically and via molecular tagging velocimetry in supersonic experimental facilities, in conjunction with computational simulation. The attributes for the incident shock and Mach stem will be used in analytical approaches based on various shock theories. The resultant methodology will be utilised in design optimisation and inverse design to be performed to maximise the performance and to achieve desirable flow conditions, respectively, in steady intake/nozzle flowfields as well as the unsteady characteristics including intake startability.

2. Details of program implement

This research project will develop a methodology for prediction and design of axisymmetric Mach reflection by overcoming limitations and challenges that hamper the investigation of centreline shock reflection including: (i) Mach reflection must occur at the focal point on the centreline where the incident shock impinges in the inviscid regime, as the occurrence of centreline regular reflection is prohibited by theory due to singularity at the symmetry axis; (ii) Such Mach reflection resembling regular reflection is characterised by a minuscule Mach stem (disk), which poses a significant challenge due to the limitations in mesh resolution in simulation and the difficulties in using optical apparatus and measuring the centreline flow properties in experiment in traditional approaches; (iii) The presence of flow viscosity can have manifold effects on the shock structure, responsible for boundary layer on wall surface and dispersion of shock reflection on the centreline; and (iv) The incident shock is characterised by considerable curvature in axisymmetric supersonic intakes and nozzles, rendering it difficult to apply the conventional three-shock theory at the triple point that assumes straight shock components.

The proposed research is planned in a multidirectional approach combining experiment, computation, theory and optimisation; (a) Experimental testing using supersonic ring models to be conducted in the IFS ballistic range for optical flow visualisation, in conjunction with supersonic wind tunnel experiment where the centreline flow properties will be measured using a state-of-the-art laser diagnostics technique; (b) High-resolution numerical simulation employing local adaptive mesh refinement to be performed to resolve the detailed shock structure at a minuscule level, in conjunction with viscous correction to allow for model design that takes the effects of boundary layer into account; (c) Theoretical analysis based on the curved shock theory and Guderley singularity along with the method of characteristics to be conducted to enable formulation of the Mach reflection configuration for given inflow conditions and intake/nozzle geometries; and (d) Design optimisation based on evolutionary algorithms in order to determine the intake/nozzle geometries that can achieve desired shock characteristics and/or performance.

More specifically, the approaches are described below:

(a) Experimental testing is to be conducted by utilising the ballistic range of the IFS Shock Wave Facilities. Shock structures are generated by ejecting ring wedge models supported by sabots at supersonic velocity ($M \simeq 2.45$) into a chamber filled with air. The flowfields surrounding the ring models are optically measured by means of schlieren photography using a high-speed camera. Supersonic wind tunnel experiments will also be conducted for intake rings and nozzles in over-/under-expanded conditions at various Reynolds numbers at $M = 2.5$. The flowfields will be examined by using state-of-the-art laser diagnostics, namely molecular tagging velocimetry to probe the centreline flow properties and the shock structure, along with high-speed schlieren photography and unsteady wall pressure measurement for the under-expanded nozzle to investigate flow behaviour including boundary layer separation (if applicable).

(b) High-resolution numerical simulation is to be performed to accurately resolve the flowfield in supersonic ring intakes and nozzles with particular focus on the centreline shock reflection by employing adaptive mesh refinement to the level of shock wave thickness in Euler and Navier-Stokes simulations. Viscous correction is applied to the Euler solutions to precisely determine the viscous intake/nozzle geometries to be used in experiment by accounting for the boundary layer displacement thickness, so that inviscid shock structures of interest can be reproduced even in the presence of viscous effects. The resultant flowfields will be further examined in comparison with high-fidelity flowfields to be obtained from DSMC (direct simulation Monte Carlo) if available.

(c) Theoretical approaches are employed to formulate the shock structure (shown in Figure 1) primarily by means of three-shock and curved shock theories (CST). The incident shock configuration is to be modelled in the light of Guderley's theory analogous to shock implosion. The flow properties in the vicinity of the triple point are calculated by solving the three-shock theory. The curved shock properties, i.e., pressure gradient, streamline curvature, and vorticity, are then obtained by solving the CST equations and the compatibility equations for the former two properties at the triple point, which will allow to assess the Mach stream with respect to the choking criterion at its throat.

(d) Design optimisation using evolutionary algorithms is performed to identify the intake/nozzle geometries that can produce desired shock characteristics and/or performance in the supersonic application. Geometric parameters such as the wall angles and curvatures or the vectors that define them are employed as the decision variables. Performance parameters such as pressure ratio and total pressure recovery as well as pressure/temperature distributions at the intake/nozzle exit, centreline or surface are considered as the objective functions to minimise or maximise. With regards unsteady characteristics, optimisation is performed with respect to parameters such as the startability index and the critical Mach number in light of the Kantrowitz criterion and the Chester-Chisnell-Whitham relation in conjunction with the quasi-one-dimensional flow

relations, respectively. Inverse design is performed by minimising the difference from the target performance values or centreline/exit flow distributions to be considered as the objective functions, employing the same decision variables as those for the design optimisation.

3. Achievements

1. *Experimental and numerical study on axisymmetric Mach reflection*

The flow phenomena in axisymmetric shock-wave reflection has been scrutinised in experimentally and computationally to elucidate the underlying mechanism of the "non-Rankine-Hugoniot zone" charaterised by higher pressure than the Rankine-Hugoniot value. In the computational approach, the Navier-Stokes equations have been numerically solved using an adaptive mesh refinement technique capable of capturing the shock waves with a very high spatial resolution. In the experimental approach, a flow with axisymmetric shock-wave reflection has been created by placing a ring wedge in a supersonic freestream at M_∞ = 2.5. The resulting shock system consisting of incident and reflected shock waves and a Mach disk has been visualised by a planar laser-induced fluorescence technique for the flow deflection angles of θ_w= 6.7° and 1.7°, at which regular reflection would occur in two-dimensional shock-wave reflection.

Flows with axisymmetric shock-wave reflection are produced by introducing a uniform supersonic flow into the ring wedge as shown in Figure 2. The upstream end of the ring wedge is placed 3.0 mm downstream from the exit of a circular supersonic nozzle. Ring wedge models with the inner flow deflection angle at the leading edge of θ_w = 1.7° and 6.7°, have been tested with the wedge length of L = 4.13 mm and 4.26 mm, respectively, while the ring dimeter being D = 12.0 mm in common.

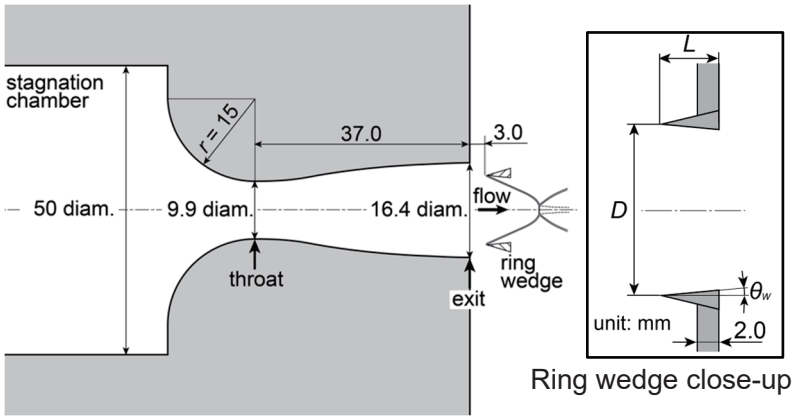


Figure 2: Nozzle and ring wedge geometry [1]

The contour of the supersonic nozzle is designed to produce a uniform freestream at M_∞ = 2.5 by optimisation using evolutionary algorithms. Using a molecular tagging velocimetry (MTV) technique, the velocity profile was measured at the location 3.0 mm downstream from the nozzle exit, where the nozzle diameter is 16.4 mm. This location corresponds to the upstream end of the ring wedge. In the velocity measurements, the pressure and temperature in the stagnation chamber were 100 kPa and 295 K, respectively, and the nozzle pressure ratio was controlled so that uniform flow can be supplied owing to an optimally expanded jet from the nozzle. The Reynolds number is calculated to be 1.23×10^5 based on the ring diameter (D = 12 mm) and the flow parameters in the freestream.

The steady flowfields caused by a ring wedge placed in a uniform supersonic flow at

M_∞ = 2.5 are calculated by using computational fluid dynamics (CFD) simulations. The Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations with density-weighted averaging (Favre averaging) are solved by utilising a density-based CFD solver ANSYS Fluent Ver. 2023 R1, with a slip wall assumed on the ring wedge surface to exclude the influence of boundary layer. The advection upstream splitting method (AUSM) is employed to calculate the flux vector with the second-order spatial accuracy in conjunction with an implicit algorithm for time stepping till the steady state is achieved with the energy and mass flow residuals falling below 10^{-5}.

The freestream at M_∞ = 2.5 is made with nitrogen treated as an ideal gas with a specific heat ratio of 1.4, with the total pressure and total temperature being 100 kPa and 296 K, respectively, corresponding to the flow conditions used in the experiment. The gas viscosity is calculated by using Sutherland's law. The thermal conductivity is calculated based on the viscosity, with the Prandtl number assumed to be 0.71.

The computational domain for the axisymmetric flowfield is shown schematically in Figure 3, which also displays the boundary conditions used in this study. The computational mesh initially comprises 59,413 structured grids (Figure 3) and are refined adaptively based on static temperature based on static pressure gradient over 7 levels to $\Delta x_{\min} \sim 10^{-7}$ m.

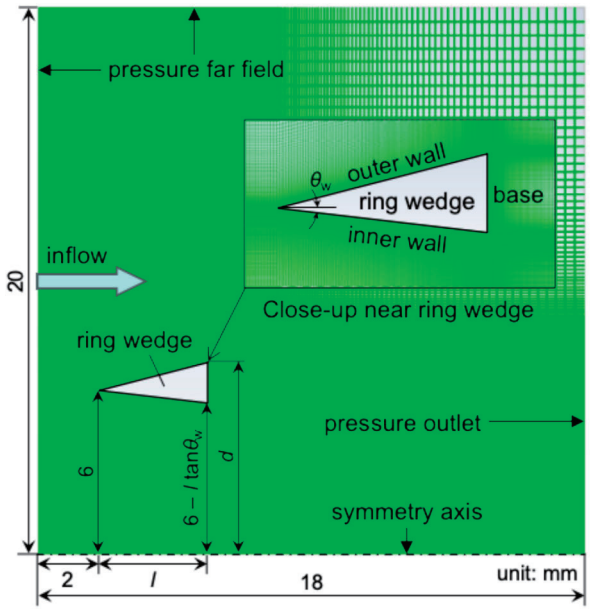
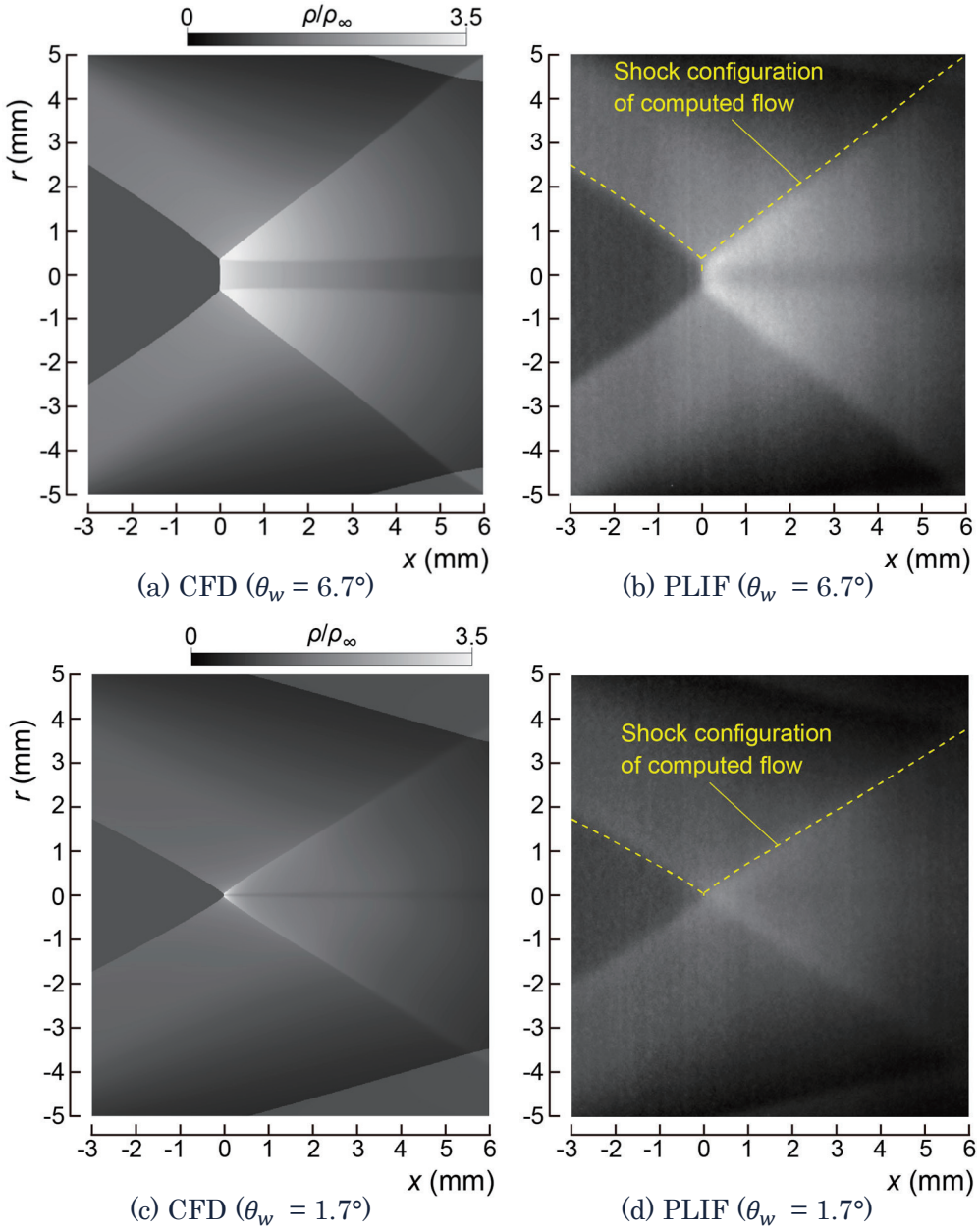


Figure 3: Computational domain and boundary conditions [1]

The shapes of the shock waves based on the computed density distributions from CFD simulations are compared with those in the PLIF images for θ_w = 6.7° and 1.7° in Figure 4, where the computed density is normalised by the freestream density and the origin of the streamwise coordinate x is placed at the reflection point. In the PLIF images, the white regions are high fluorescence intensity regions, which correspond to high density regions while the fluorescence intensity also depends on temperature. Regular reflection would occur at the centreline for these deflection angles if the flows were two-dimensional. However, Mach reflection with a Mach disk appears in both computed density distributions of Figure 4 (a) and (c), consistent with the theory of Rylov, who mathematically proved the impossibility of regular reflection at the axis of symmetry. The shape of the Mach disk for θ_w = 6.7° in the PLIF image (Figure 4 (b)) agrees with that in the computed flow (Figure 4 (a)), which is indicated by the yellow dashed line in Figure 4 (b). The shapes of the incident and reflected shock waves captured by PLIF in Figure 4 (b) and (d) also agree very well with those in the computed density distributions shown in Figure 4 (a) and (c). Concerning the results for θ_w = 1.7°, a Mach disk is indiscernible in the PLIF image (Figure 4 (d)), although Mach reflection would be expected to occur at the present viscosity level. The diameter of the Mach disk for θ_w = 1.7° in the computed flows is 64 μm, which is too small for the current PLIF

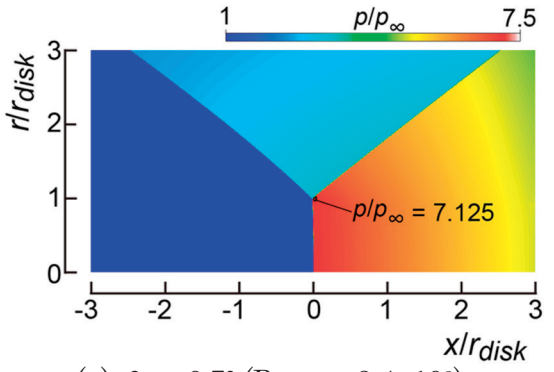
visualisation system to capture due to insufficient spatial resolution, whereas it is adequately large at 700 μm for $\theta_w = 6.7°$. The present numerical scheme has thus been validated by the close agreement between the computational and experimental shapes of the shock waves, allowing for detailed investigation of the flow characteristics in the vicinity of the Mach disk by using CFD simulations.



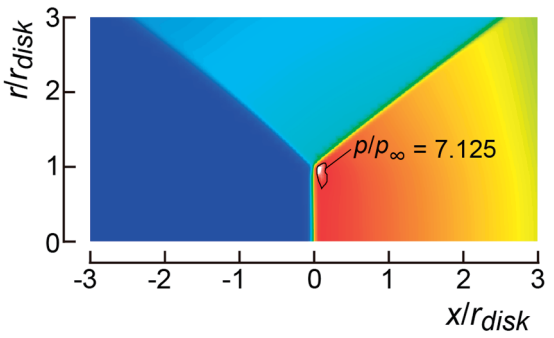
(a) CFD ($\theta_w = 6.7°$) (b) PLIF ($\theta_w = 6.7°$)

(c) CFD ($\theta_w = 1.7°$) (d) PLIF ($\theta_w = 1.7°$)

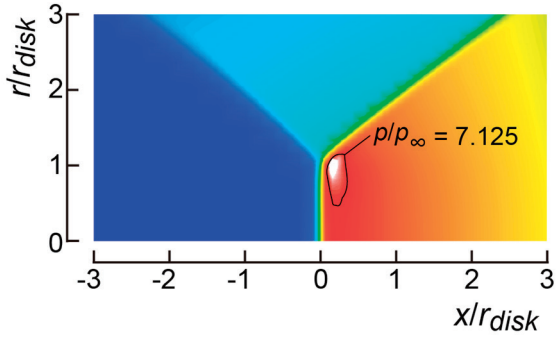
Figure 4: Comparison of density distributions [1]



(a) θ_w = 6.7° (Re_{disk} = 3.4×10³)

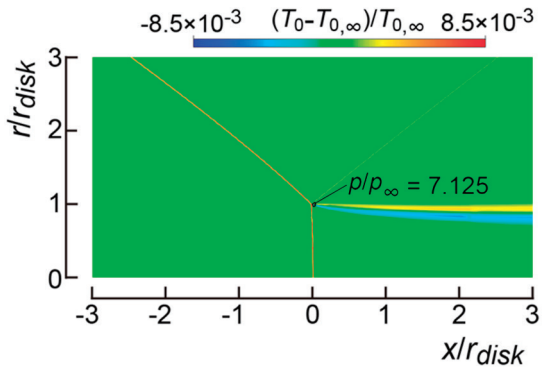


(b) θ_w = 1.7° (Re_{disk} = 3.1×10²)

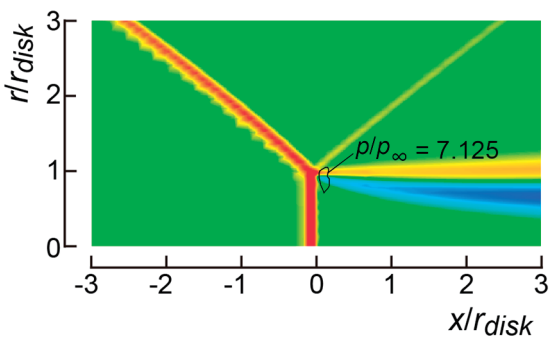


(c) θ_w = 1.0° (Re_{disk} = 1.8×10²)

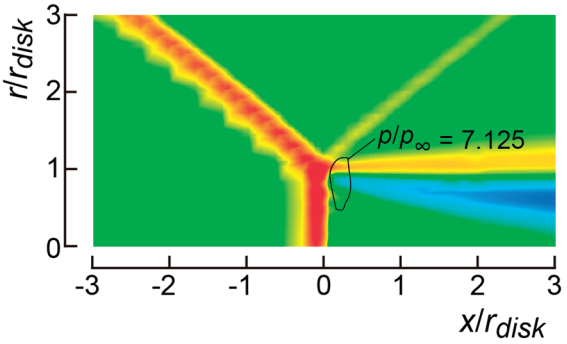
Figure 5: Pressure distribution at each deflection angle [1]



(a) θ_w = 6.7° (Re_{disk} = 3.4×10³)



(b) θ_w = 1.7° (Re_{disk} = 3.1×10²)

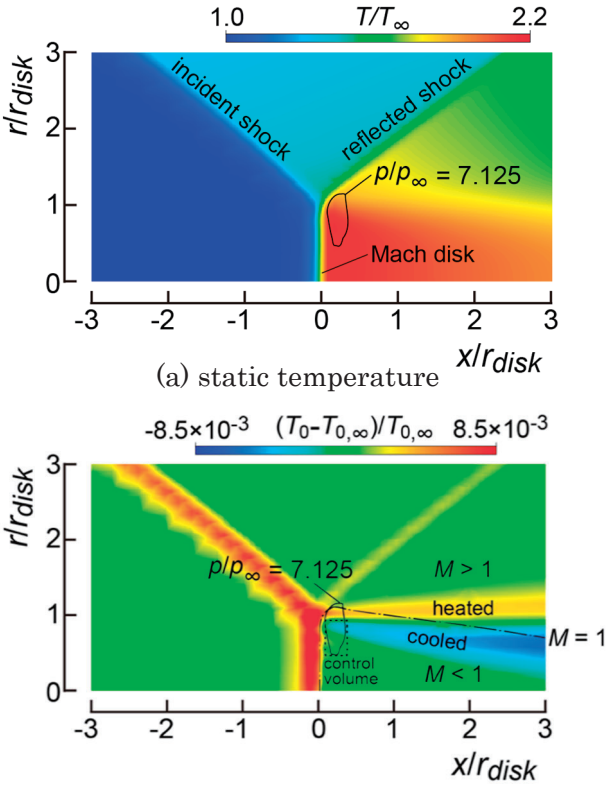


(c) θ_w = 1.0° (Re_{disk} = 1.8×10²)

Figure 6: Deviations of total temperature from freestream value [1]

A so-called "non-Rankine Hugoniot zone" characterised by higher pressure than the Rankine-Hugoniot value of p/p_∞ = 7.125 for M_∞ = 2.5 is observed in a very small region downstream of the triple point (indicated by black contour lines in Figure 5). This region has been found to become enlarged and extends toward the axis of symmetry (r = 0) as the Reynolds number Re_{disk} decreases with the deflection angle θ_w as seen in Figure 5 (Re_{disk} = 3.4×10³, 3.1×10², and 1.8×10² for θ_w = 6.7°, 1.7°, and 1.0°, respectively), where Re_{disk} is based on the Mach disk radius (0.35 mm, 0.032 mm, and 0.018 mm for θ_w = 6.7°, 1.7°, and 1.0°, respectively) and freestream parameters.

The mechanism responsible for the appearance of a non-Rankine-Hugoniot zone is explained schematically for the control volume indicated by a dotted box Figure 7 (b). When the Mach reflection occurs, the temperature of the flow that has passed through a single shock wave (Mach disk) is higher than that of the flow that has passed through two oblique shock waves, as shown in the temperature distribution for θ_w = 1.0° in Figure 7 (a), where the static temperature T is normalised by the freestream value T_∞. A large temperature gradient is generated across the two flows along their boundary, and it subsequently induces heat conduction from the higher temperature region behind the Mach disk to the lower temperature region behind the reflected oblique shock wave. This results in cooled and heated flows and consequently decreased and increased total temperature T_0 from the freestream value $T_{0,\infty}$ in the lower and upper parts of the boundary, respectively. This can be observed in the distribution of the deviation of the normalised total temperature from the freestream value $(T_0 - T_{0,\infty})/T_{0,\infty}$ in Figure 7 (b) for θ_w = 1.0°.



(a) static temperature

(b) total temperature deviation

Figure 7: Distributions of static temperature and deviation of total temperature from freestream value (θ_w = 1.0°) [1]

The fact that the high-pressure area enclosed by the contour of p/p_∞ = 7.125 in the vicinity of the triple point overlaps a pair of the cooling and heating flow regions has been explained in the light of Rayleigh flow with heat transfer, which prescribes the pressure gradient for a steady flow in the control volume where the heat dq is released per unit mass from the flow by the equation derived from the continuity, momentum, and energy conservation laws: $\frac{dp}{p} = -\left(\frac{\gamma M^2}{M^2-1}\right)\frac{dq}{h}$, where γ is the specific heat ratio and h is enthalpy per unit mass. The factor that drives the non-Rankine-Hugoniot zone to extend toward the axis of symmetry with decrease in Reynolds number is evinced in the distributions of the normalised total temperature $(T_0 - T_{0,\infty})/T_{0,\infty}$ in Figure 6. It is evident from this figure that the viscous layer containing the cooling and heating flows grows more rapidly for lower $\mathrm{Re}_{\mathrm{disk}}$, as indicated by rapid expansion of the region containing the cooling gas in the streamwise direction as the Reynolds number $\mathrm{Re}_{\mathrm{disk}}$ decreases. This allows the region containing the cooling flow to extend more extensively toward the axis of symmetry at lower Reynolds numbers hence increased viscosity levels. Consequently, the non-Rankine-Hugoniot zone with increased pressure and total enthalpy due to the cooling gas can reach the axis of symmetry behind the Mach disk at very small Reynolds numbers (details of this study can be found in Ref. [1]).

2. *Multi-objective design optimisation of axisymmetric ring intake*

A multi-objective design optimisation (MDO) study has been performed for the ring intake by means of evolutionary algorithms using predictions from surrogate models.

Figure 8 schematically shows the definitions of the geometric parameters for the ring with curvature used in axisymmetric CFD simulations in the MDO study. The ring leading-edge radius is r_0 = 0.006 m and the ring width is w = 0.0024 m. Concave curvature is ensured by imposing $\theta_2 \leq 90°$ on the trailing-edge angle.

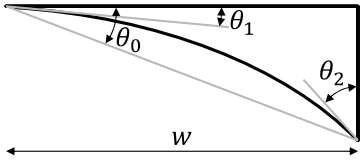


Figure 8: Ring geometry and parameters used in MDO

The static pressure and temperature considered for MDO are 5,850 Pa and 131.5 K, respectively, for a freestream Mach number of 2.5 in the prospect of experiment in a suction-type supersonic wind tunnel. The Reynolds number based on the leading-edge ring radius is 3.4×10^5. The air is assumed to be calorically perfect with a specific heat ratio of 1.4. The dynamic viscosity is calculated using Sutherland's law for standard air.

Viscous flowfields in ring intakes have been calculated by solving the Navier-Stokes equations using a density-based CFD solver ANSYS Fluent Ver. 2023 R1. The ring wall is treated as a slip surface to preclude the influence of the boundary layer generated in the ring. The advection upstream splitting method (AUSM) is employed to calculate the flux vector with second-order spatial accuracy. A CFD convergence threshold for the energy error residual is set at 10^{-4}. Adaptive mesh refinement (AMR) is applied to the domains inside the ring, based on the static pressure gradient over 4 levels with a minimum grid spacing over 7 levels with $\Delta x_{\min} \simeq 4\times10^{-7}$ m.

Two performance parameters based on the centreline properties are considered as the objective functions to be maximised in MDO. The first performance metric is the normalised maximum pressure, *i.e.*, $\bar{p}_{\max} \equiv p_{\max}/p_\infty$ and the second parameter is the extent of the high temperature region on the centreline defined as $\tau \equiv \int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_1}(T/T_\infty)d\bar{x}$, where $\bar{x}$ is the axial coordinate normalised by the leading-edge ring radius and $[\bar{x}_0 \quad \bar{x}_1]$ denotes the zone where the static temperature becomes higher than freestream as a result of centreline shock reflection (prior to the impingement of the secondary shock wave from the trailing-edge of the ring).

A population-based evolutionary algorithm, namely the elitist nondominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), has been employed for MDO to simultaneously maximise the two objective functions (*i.e.*, $\bar{p}_{\max}$ and τ) for the two decision variables (*i.e.*, leading-edge angle θ_1 and contraction ratio CR). A geometric requirement $\theta_2 \leq 90°$ is imposed as a constraint function, where the ring trailing-edge angle θ_2 is determined by trigonometric relations of the other geometric parameters. A population comprising 100 individuals has evolved over 100 generations by using the predictions from the surrogate models. A simulated binary crossover and polynomial mutation are used as recombination operators at probabilities of 1.0 and 0.1 with distribution indices of 10 and 20, respectively.

A database has been constructed by performing axisymmetric CFD simulations for 144 (= 12 × 12) sample points uniformly distributed in the two-dimensional design space defined by the decision variables within the ranges $0.3° \leq \theta_1 \leq 1.4°$ and $1.004 \leq \mathrm{CR} \leq 1.02$, focussing on the ranges where mode transition between Mach and regular reflections were observed on the centreline in a preliminary study. Surrogate models have then been built to predict the performance parameters (namely $\bar{p}_{\max}$ and τ) for given design parameters (namely θ_1 and CR) by training meta-models including response surface models, radial basis functions, Kriging approximation and multi-layer perceptron based on the CFD database. Radial basis functions have been adopted in this study, with prediction errors of 2.9% and 4.9% for $\bar{p}_{\max}$ and τ, respectively, being minimum among all models.

Figure 9 displays the results obtained from the MDO after 100 generations. Green dots denote feasible solutions, whereas red crosses signify infeasible solutions that do not satisfy the geometric constraint on θ_2, based on surrogate predictions. Green dots with circles indicate the values of the data points in the CFD database. The individuals denoted by square markers represent the non-dominated solutions, which constitute a Pareto optimal front indicative of a trade-off characteristic between $\bar{p}_{\max}$ and τ.

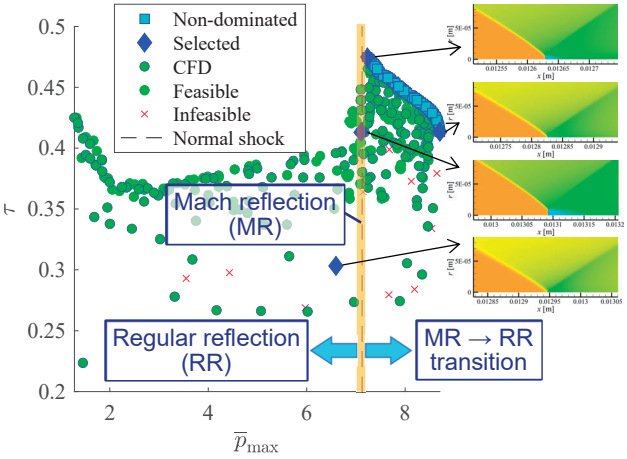
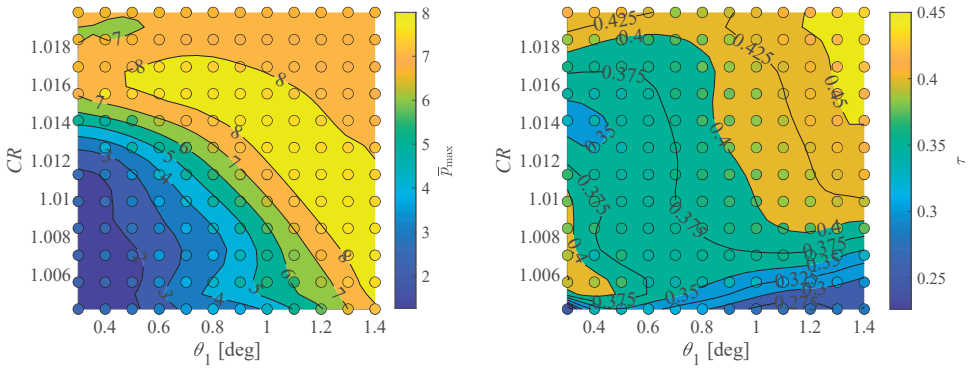


Figure 9: Results and Pareto front from axisymmetric ring MDO [3]

The vertical dashed line is indicative of the $\bar{p}_{\max}$ value from the normal shock theory, and the individuals on this line are thus characterised by Mach reflection. Regular reflection (RR) has occurred for the individuals on the left-hand side, as indicated by lower $\bar{p}_{\max}$ values. Those on the right-hand side of the vertical dashed line correspond to transition from MR to RR. It is evident that the non-dominated solutions (denoted by square markers) are characterised by high $\bar{p}_{\max}$ and τ levels, as a result of steepening of the incident shock wave toward the centreline.



(a) maximum pressure (b) high-temperature extent

Figure 10: Variations of performance parameters [3]

The contour plots in Figure 10 show the variations of the performance parameters (namely $\bar{p}_{\max}$ and τ) with respect to the design parameters (namely θ_1 and CR), based on surrogate predictions, while the colour inside the circle markers indicate the values from CFD. Figure 10 (a) indicates that the maximum pressure increases with the leading-edge angle and the contraction ratio of the ring. $\bar{p}_{\max}$ peaks when MR→RR transition occurs at certain combinations of θ_1 and CR values, as also observed in Figure 9. The high-temperature extent τ rises as θ_1 and CR increase, too, except at low CR values, where it decays slightly with θ_1 (Figure 10 (b)). It marks the peak value at the largest θ_1 and CR values, as result of combined effects of high temperature and extended length of the hot zone (details of this study can be found in Ref. [3]).

3. *Investigation of three-dimensional shock structure in free-flying ring intake*

The influence of inflow inclination on the shock structure and the characteristics of the centreline shock reflection in a free-flying ring intake have been investigated by performing three-dimensional computational simulation using a Navier-Stokes solver with adaptive mesh refinement for viscous flowfields, in comparison with the results from the experiment using the ballistic range at the Institute of Fluid Science, Tohoku University, where the optical imaging signifies that the ring flew with pitch and yaw angles (Figure 11).

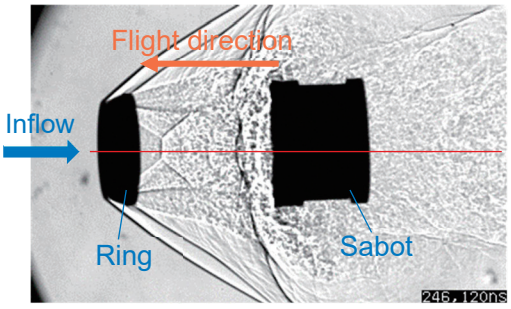


Figure 11: Shadowgraph image of supersonic free flight in ballistic range (M = 2.45)

The geometry of the ring model used in the free-flight experiment is depicted schematically in Figure 12. Also considered is the geometry used in multi-objective design optimisation (MDO) shown in Figure 8. Table 2 shows the three representative cases θ that have been selected from the MDO results.

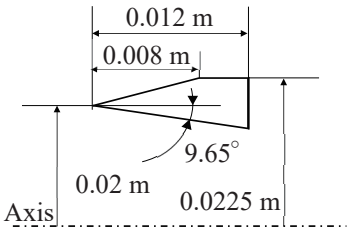


Figure 12: Ring geometry for ballistic range experiment

A density-based solver ANSYS Fluent Ver. 2023 R1 is used for the numerical simulation. Steady flowfields have been obtained by solving the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) using the second-order spatial accuracy advection upstream splitting method (AUSM). For the viscous model, laminar flow is assumed in MDO, whereas the SST $k-\omega$ model is used for the ballistic range experiment case. The air is assumed to be a calorically perfect gas with a specific heat ratio of 1.4, and viscosity is calculated by the Sutherland law.

Table 2: Representative cases (from MDO)

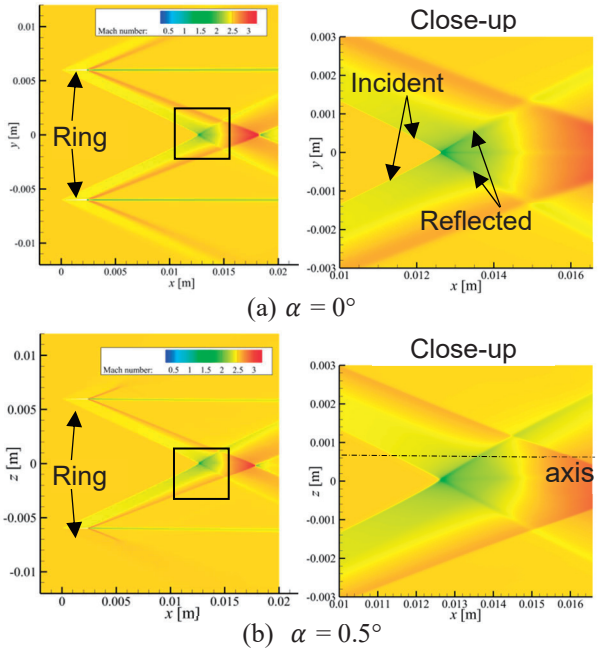
Case	Pitch angle α	Yaw angle β
2-1	0°	0°
2-2	0°	6.16°
2-3	2.99°	6.16°

Table 1: Ring attitudes (ballistic range experiment)

Case	θ	CR
1	1.33339°	1.00938
2	1.36696°	1.01218
3	1.39993°	1.01984

The free flight Mach number in the ballistic experiment is 2.45, with a static pressure of 50,000 Pa and a static temperature of 290 K. The Reynolds number based on the leading-edge ring radius is 1.13×10^6. The ring inclination angles (α) of 0° and 0.5° are considered for the MDO case. Table 1 shows the attitudes of the ring considered in the CFD for the ballistic range experiment. Two-dimensional axisymmetric CFD simulation has been conducted for the case of $\alpha = 0°$, and 3D simulation has been performed for the $\alpha = 0.5°$ case. The ring wall is assumed to be adiabatic and slip surface. The mesh is composed of a structured grid generated by Gmsh and refined adaptively over 4 levels based on the static pressure gradient, resulting in minimum grid size $\Delta x_{\min}$ of ~1×10^{-5}m for 3D simulations.

Figure 13 displays the Mach number distributions on the centre planes for Case 3. Figure 13 (a), obtained from 2D axisymmetric simulations ($\alpha = 0°$) and mirrored on the $y = 0$ axis, shows that regular reflection consisting of incident and reflected shock waves has occurred on the axis. Figure 13 (b) is obtained from the 3D CFD simulation with inflow at an incidence angle of $\alpha = 0.5°$. It is indicative of an asymmetric flowfield, with a shock reflection occurring off the axis, though there is no significant difference compared to the case in Figure 13 (a).

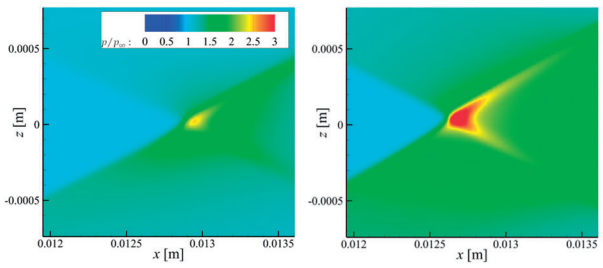


(a) $\alpha = 0°$

(b) $\alpha = 0.5°$

Figure 13: Mach distributions for Case 3 (MDO) [4]

Figure 14 compares the static pressure distributions for Cases 1 and 3 with $\alpha = 0.5°$, focussing on the reflection region on the centre plane. In the region behind the shock reflection, the peak pressure is the highest and the high-pressure area with the static pressure being approximately 2.5 times greater than the freestream static pressure is the largest in Case 3. This is attributed to be the change in the shape of the shock system and hence shock reflection when the inflow is angled, though Case 1 has been selected as the solution with the highest peak pressure amongst all solutions from the MDO results at $\alpha = 0.5°$. Regular reflection on the verge of transition from and to Mach reflection is characterised by an acute pressure rise, comparable to that across two strong oblique shocks which result from steepening of the incident shock wave toward the symmetry axis as well as the reflected shock with a steep angle near the centreline. However, the inclination of inflow may have prevented the strong oblique shocks from forming at the axis, resulting in reduced pressure increase in some cases.

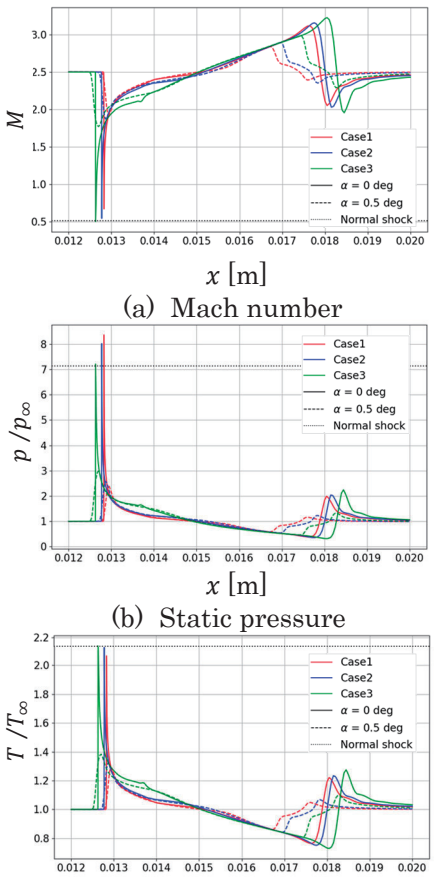


(a) Case 1 (b) Case 3

Figure 14: Static pressure distributions near shock reflection region at $\alpha = 0.5°$ (MDO) [4]

Figure 16 compares the Mach number, static pressure, and static temperature distributions on the centreline of the ring geometry. The solid lines in (b) indicate that, for the case of α = 0°, static pressure behind the shock reflection is greater than that behind the theoretical normal shock and the shock reflection occurs in the transitional state from Mach to regular reflection. On the other hand, dashed lines in show that the Mach number remain above 1 and the static pressure and temperature peaks do not reach the values from the normal shock theory for the case of α = 0.5°. The same trends for static temperature and the differing trends for static pressure in the three cases with and without inflow signify that the static pressure peak is more sensitive to the pitching angle than the temperature peak.

Figure 15 shows Mach number distributions on the centre planes of Cases 2-1, 2-2 and 2-3. In Figure 15 (a), an axisymmetric Mach reflection occurs with a Mach disk on the axis. Figure 15 (b) indicates that the Mach reflection is skewed by the pitching angle of the inflow with smaller Mach disk and subsonic region. The top and side views of Case 2-3 are displayed in Figure 15 (c). Figure 15 (b) and the top view of Figure 15 (c) indicate that the coupling of pitch and yaw angles does not affect the shock structure in the lateral direction. On the other hand, the side view of Figure 15 (c) shows that the shock structure in the vertical direction is deformed by inflow inclination (details of this study can be found in Ref. [4]).

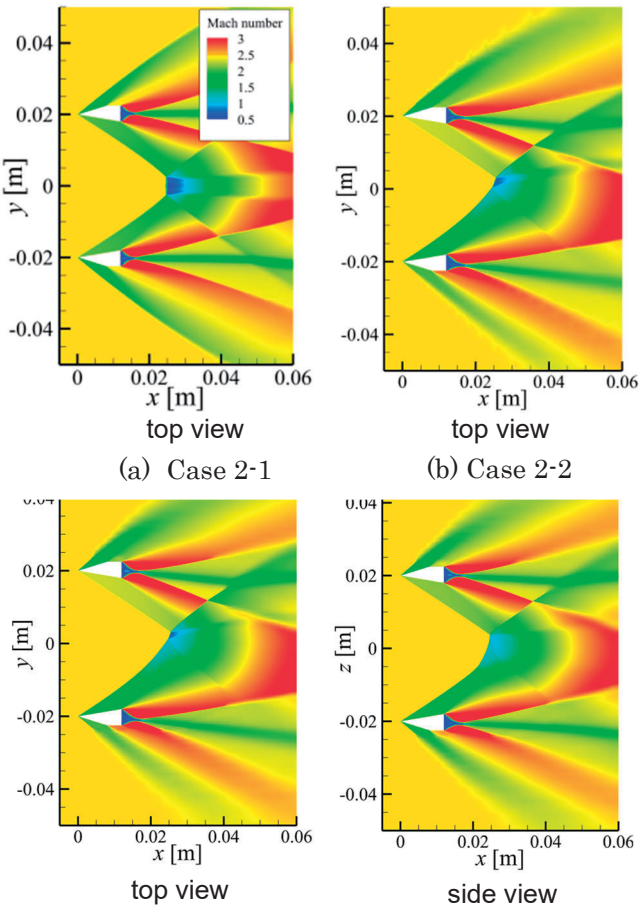


(a) Mach number

(b) Static pressure

(c) Static temperature

Figure 16: Centreline property distributions (MDO) [4]



(a) Case 2-1

(b) Case 2-2

(c) Case 2-3

Figure 15: Mach number distributions on centre planes (ballistic range experiment) [4]

4. Summaries and future plans

Experimental and computational studies have been conducted to elucidate the mechanism by which the non-Rankine-Hugoniot zone appears in the flow with axisymmetric shock-wave reflection. The shapes of the incident and reflected shock waves and the Mach disk in the computed flows have been compared with those in the PLIF images from experiment for validation. The computational results have revealed that some amount of heat is conducted from the region behind the Mach disk to that behind the reflected shock wave, *i.e.*, cooling occurs in the subsonic flow behind the Mach disk as per the Rayleigh flow mechanism. This mechanism has been found to account for the appearance of the non-Rankine-Hugoniot zone where pressure and total enthalpy are higher than the values from the Rankine-Hugoniot relation behind the Mach disk.

A multi-objective design optimisation study has been performed for the ring intake by means of evolutionary algorithms using predictions from surrogate models. The maximum centreline pressure has been found to mark its peak when the transition from Mach to regular reflection occurs at specific combinations of the ring leading-edge angle and the contraction ratio. The high-temperature extent downstream of the shock reflection has been found to increases with the leading-edge angle and the contraction ratio. Consequently, all non-dominated solutions for optimum compression have been found to lie in the transition zone.

The effects of inclination of the inflow into the ring intake on the shock structure have been investigated by performing three-dimensional computational simulations using a Navier-Stokes solver with adaptive mesh refinement for viscous flowfields. The flowfields with inclined inflow into the three ring geometries selected from the optimisation results for the maximum peak pressure and high-temperature extent on the axis have indicated differences in the shock structure and the peak pressure trend from those without inflow inclination. Further, the flowfields in the ring intake used in the ballistic range experiment have been examined. Considerable inflow inclination in the pitch and yaw directions has skewed the Mach reflection and reduced the subsonic region behind the Mach disk.

The future plans include (a) in-depth analysis using higher-resolution three-dimensional CFD results and (b) application the curved shock theory to axisymmetric and three-dimensional shock systems. This will enable further understanding and fast prediction of shock components and their effects on the centreline flow properties, conducing to analytical modelling of the incident shock wave and accurate prediction of the mode transition of centreline shock reflection. The results from these studies will be verified by supersonic wind tunnel experiment.

5. Research results

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

[1] Higa, Y., Matsunaga, M., Ogawa, H., Ohtani, K., Handa, T. : Study on non-Rankine-Hugoniot zone in axisymmetric supersonic flow, *Physics of Fluids*, in press.

[2] Hew, J. K. J., Ogawa, H., Boswell, R. W. : Centerline shock reflection for supersonic internal flows in the non-Rankine-Hugoniot zone: Overexpanded supersonic microjets, *Physics of Fluids*, Vol. 36, No. 9, (2024), 091709 (8 pages), doi: https://doi.org/10.1063/5.0231037.

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

[3] Ogawa, H., Omiya, K., Shibakita, A., Fujio, C., Ohtani, K., Mölder, S., Timofeev, E., Shoesmith, B., Tahir, R., Handa, T., Watanabe, Y., Hew, J. K. J., Boswell, R. W., Boswell, R. W., Muruganandam, T., Vijayakrishnan V., Marade, A. : Prediction and optimisation of axisymmetric internal shock and flow structure, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2024), CRF-74, pp. 205-208.

[4] Omiya, K., Shibakita, A., Ogawa, H., Ohtani, K. : Numerical Investigation of Three-Dimensional Shock Structure in Free-Flying Ring Intake Flowfield, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2024), GS1-8.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J24R003
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	3 年目

機能性材料の合成における量子・分子論的考察
Theoretical Simulation on Growth of Functioning Materials

金子　智*†, 徳増　崇**††,　吉村 昌弘***,　SARDAR Cripasindhu***
SAHOO Sumanta***,　YU Ruei-Sung****,　安原 重雄*****,　遠藤 民生*****
CAN Musa******,　IONITA Mariana*******
*地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所
**東北大学流体科学研究所,　***台湾国立成功大学
****台湾亜細亜大学,　*****株式会社ジャパン・アドバンスト・ケミカルズ
******イスタンブール大学,　*******University Politehnica of Bucharest
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

シリコンの 100 倍の移動度や鉄鋼の 200 倍の強度を示すグラフェンは様々な応用かが期待されている. その薄膜化には触媒かが必要であり, 高い成膜温度も必要である. これまでに, グラフェンをはじめとして, 機能性材料のエピタキシャル成長を実験的に確認している. 本研究では, 各種機能性材料の成長過程について, 理論的な考察を行い, 広く公知することで, 材料合成に関する指標となることを目的とする.

2. 研究成果の内容

これまで, 各種基板上の酸化物やグラフェン等の機能性材料の合成について, 吸着エネルギーを評価することで結晶成長の方向や成長面の平坦性について予測した. 基板表面に機能性材料クラスターを置いたスーパーセル(図 1)での吸着エネルギーに注目することで, 分子動力学的考察により成長を予測してきた. 酸化マグネシウム(MgO)においては, 図 2 に示す 2 通りの成長に対して, cubic on cubic 成長が優位な事を予測している. シリコン基板と実際にレーザー蒸着方による成膜実験を行い, X 線回折測定などを通して, MgO が cubic on cubic 成長していることを確認した.

これまで東北大学流体研究所のスパコンを用いて計算を行ってきたが, 分子動力学的シミュレーションは計算コストが高いことが問題である. 構造最適化やバ

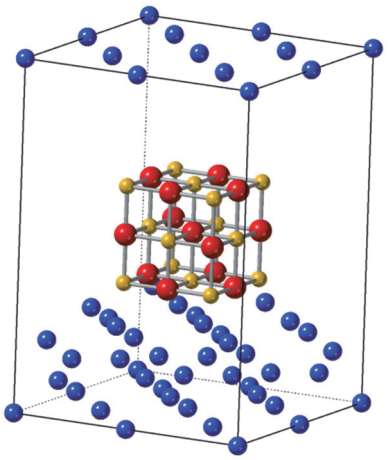


図 1　基板表面に機能性材料クラスターを置いたスパーセルの例

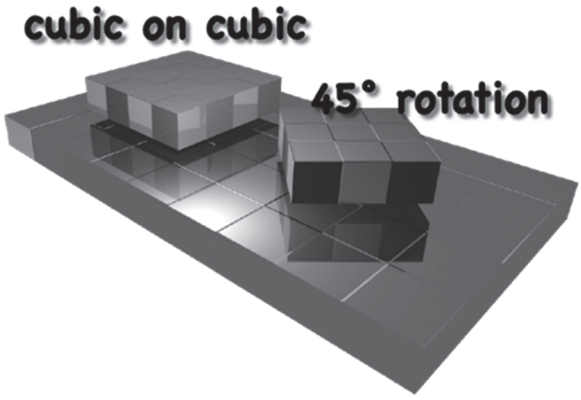


図２ シリコン基板上で MgO 結晶成長．基板面でのクラスターの成長には図に示す cubic on cubic 成長と基板面に対して 45 度回転した 45° rotation 成長が想定される．

ンドギャプ計算には高い精度が必要であるが，材料合成時における結晶成長の予測にはエネルギーの絶対値ではなく，エネルギーの差が比較できれば十分である．そこで，シミュレーションの収束条件を緩い条件にすることで大幅な計算時間の短縮を行った．吸着エネルギーの絶対値には誤差が含まれるが，十分に比較ができる値になるように収束条件を決めることで計算の最適化を図った．

MgO のシリコン基板上での成長について，トータルエネルギーに対する収束条件を構造最適化で用いた 10^{-6}Ha から 10^{-2}Ha にした簡易法での成長方向の予測の結果を図３に示した．計算時間の大幅な減少にも関わらず，cubic on cubic 成長していることが分かった．

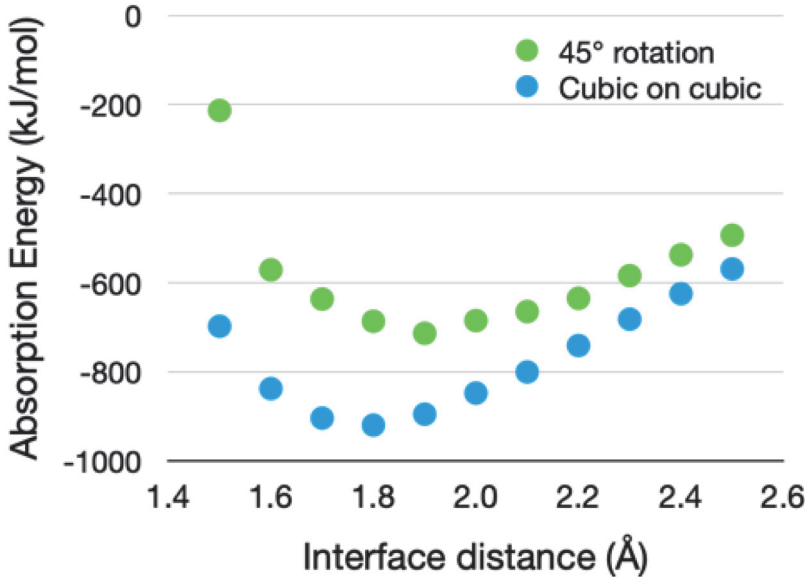


図３ シリコン基板上で MgO クラスターの吸着エネルギー．全エネルギー計算の収束条件を緩くしても，吸着エネルギーによる安定性の評価は変わらずに，cubic on cubic 成長することを予測している．

3. 研究目標の達成状況

これまで酸化物成長のための指標となっていた Schlom らの論文は熱平衡状態での安定性しか考慮していなかった．本研究で提案した吸着エネルギーの評価により，結晶成長の方向を予測することが可能だと明らかになった．さらに，計算コスト削減のため，収束条件の見直しを行ったが，成長予測は同じ結果を示すものとなった．

4. まとめと今後の課題

吸着エネルギーに着目することで結晶の成長方向や，機能性材料成長のための基板のスクリーニングが可能と分かったが，各種基板上と材料クラスターの様々な組み合わせでの計算には膨大な計算コストが必要となってくる．本研究では計算コスト削減のため簡易的手法を提案している．これまで計算してきた MgO 以外の機能性酸化物について，本手法を用いることで，効率的に研究を進めていきたい．

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] Satoru Kaneko, Takashi Tokumasu, Manabu Yasui, Masahito Kurouchi, Daishi Shiojiri, ShigeoYasuhara, Sumanta Kumar Sahoo, Musa Mutlu Can, Ruei SungYu, Kripasindhu Sardar, MasahiroYoshimura, Masaki Azuma, Akifumi Matsuda, MamoruYoshimoto: Crystal orientation of epitaxial film deposited on silicon surface, *Scientific Reports,* 14 (2024) 10891, doi.org/10.1038/s41598-024-61564-8.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Satoru Kaneko, Masahito Kurouchi, Manabu Yasui, Daishi Shiojiri, Masahiko Mitsuhashi, Masahiro Yoshimura, Ruei-Sung Yu, Shigeo Yasuhara, Musa Mutlu Can, Sumanta Kumar Sahoo, Ionita Mariana, Kripasindhu Sardar, Takashi Tokumasu: Evaluation of Stability of Magnesium Oxide Deposited on Silicon Surface, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information 2024*, Sendai, (2024), CRF-17, pp. 62-64.

[3] Satoru Kaneko, Takashi Tokumasu, Manabu Yasui, Masahito Kurouchi, Daishi Shiojiri, Chihiro Kato, Satomi Tanaka, Masahiro Yoshimura, Shigeo Yasuhara, Musa Can, Ruei-Sung Yu, Sumanta Kumar Sahoo, Kripasindhu Sardar, Mariana Ionita, Akifumi Matsuda: Super flat graphene growth on candidate substrate selected by molecular dynamics ~ theoretical and experimental ~, *Materials Research Society* - Boston, 1 - 6 (3) Dec., 2024, Hynes Convention Center, Boston, U.S.A.

[4] Satoru Kaneko, Masahito Kurouchi, Daishi Shiojiri, Manabu Yasui, Masahiko Mitsuhashi, Ruei Sung Yu, Shigeo Yasuhara, Musa Multu Can, Sumanta Kumar Sahoo, Mariana lonita, Kripasindhu Sadar, Takashi Tokumasu, Akifumi Matsuda: Stability of Magnesium Oxide on Silicon Substrate ~Theoretical and Experimental~, *International Symposium of Plasma 2025 (ISPlasma2025)*, 3 - 7 Mar. 2025, Chubu University, Kasugai, Aichi.

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	J24R004
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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*
*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.

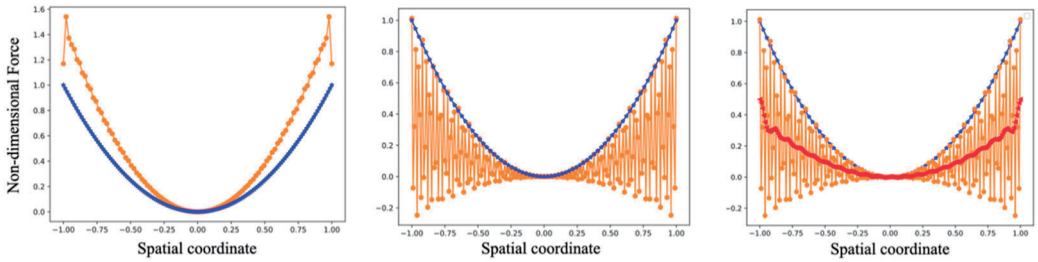
2. 研究成果の内容

2.1 仕事保存性を満足する安定な荷重変換法

まず項目 1 に関連して，離散的な仕事を保存しつつ，構造モデル側での振動を低減する手法を検討した．図 1 に，空間 1 次元に簡単化したモデルにおける空力荷重変換手法の検討結果を示す．図 1 (a)は，空力モデル点数 N_{Flu} を 150，構造モデル点数 N_{Str} を 100 とした場合の，空力モデルから構造モデルへの空力荷重変換結果である．青色を空力モデル側の空力荷重と仮定（２次多項式でモデル化）し，これを RBF 補間に基づく変換行列 H によって構造モデル上の荷重へと変換した結果がオレンジ色のプロットとなる．この際, RBF 補間は変位の変換アルゴリズムとして用いられるため，構造モデル上と空力モデル上で仕事（変位と荷重の積）が離散的に保存するためには，変位変換行列 H の転置（H^T）によって荷重を変換する必要がある．現状では，荷重変換行列として H^T を空力モデル側の空力荷重に作用させ，構造モデル側の空力荷重を得ることが一般的である．その際，図 1(a)のように，空力モデルの格子点数が構造モデルの格子点数よりも多い場合には, 比較的綺麗に荷重が変換されることがわかる．一方で，図 1(b)のように，構造モデルの格子点数が空力モデルの格子点数を上回る場合，高周波の振動が生じてしまう．このことは，一般的に構造モデルに対して空力モデルの方が高精細なメッシュを用いる場合には空力荷重の変換は概ね問題なく行える一方で，逆の場合は非常に振動的な荷重分布となってしまうことを示唆している．

導入時にも述べた通り, たとえ空力モデルの格子点数が全体的に構造モデルの格子点数よりも多かったとしても，航空機主翼では前桁とストリンガーの交差部など，構造モデル側の格子幅が局所的に空力モデルよりも小さくなることが頻繁に生じる．そのため，実際の主翼空力構造連成解析においては，翼の前縁部などで構造モデル側に強い集中荷重が発生することがあり，構造モデル側を高精細化していくと，上記の状況はさらに悪化することが予想される．また，空力解析においても FR 法に代表される非構造高次精度手法では，セル形状を高次形状関数で表現することから, 空力格子セルは従来の差分法などより大きくなる傾向にある．そのため，ここで説明した荷重の振動現象は，空力構造連成解析の適用時に課題となると考えられる．

今年度の研究によって理解が大きく進んだ点としては，変位の変換行列は RBF 補間によるため，空力モデルと構造モデルの格子点数の違いに対して比較的ロバストな補間が実現される一方で，荷重の変換は上記の変換行列の転置を用いることからその限りではないということが挙げられる．特に，変換行列の転置に対する安定性解析は過去研究では行われてこなかったことがわかり，今年度はまず，空間フィルターによって振動を安定化させる手法を検討した．図 1(c)のように，赤線はフィルター後の構造モデル側の空力荷重であり，ある程度振動を抑えられていることがわかる．発表前のため詳細を述べないが，検討した手法のポイントは，空力モデル側と構造モデル側で仕事が離散的に保存するよう構築していることである．この部分で大きなアイデアを導入できたため，次年度以降はさらに具体的な実装や多様な問題での検証を進めたい．なお，本項目に関連する成果として，荷重変換において従来法を適用した複合材航空機主翼の設計問題の例を報告している（研究成果 2-6）.

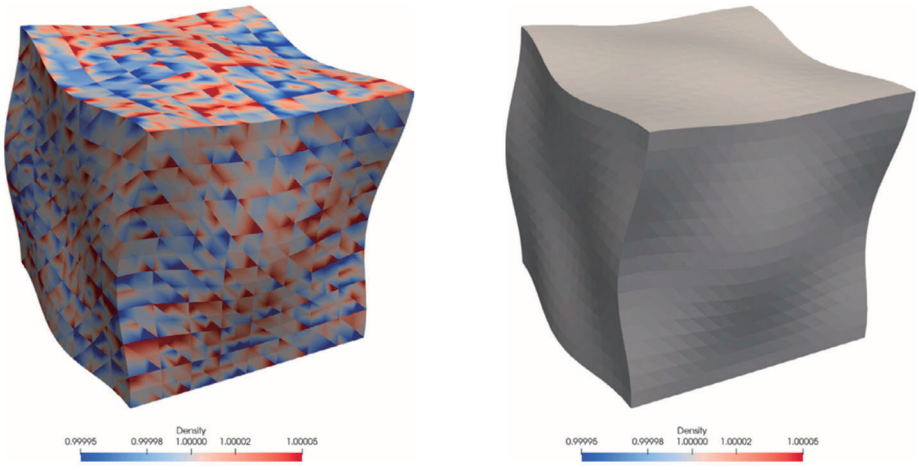


(a) N_{Flu}=150, N_{str}=100　(b) N_{Flu}=75, N_{str}=200　(c) N_{Flu}=75, N_{str}=200

図 1：流体モデルから構造モデルへの荷重変換（青色：流体モデルの空力荷重，オレンジ色：従来法による構造モデルの空力荷重，赤色：提案手法による構造モデルの空力荷重）

2.2 PyFR における保存型メトリクスの実装方法再検討

項目 2 として, PyFR に実装されている保存型メトリクスの実装方法の再検討を行った．本項目は時間的に変形せず，移動するだけの格子であればセル体積は変化しないことから，一様流保存を意識せずに簡単化された表式でメトリクスを評価して良いことを踏まえたものである．これに関連して，2024 年 6-7 月にかけて所外対応研究者である Texas A&M 大学の Witherden 助教が東北大に滞在し，議論を行った．また，同時期に Inha 大学の Park 助教の研究グループから大学院生（修士学生）が特別研究生として流体研に滞在し，Witherden 助教も交えた議論を行った．これらを踏まえ，研究成果 1 の論文において曲線座標系における保存型メトリクスの実装が簡単に紹介されている．



(a) Cross-product metric as used in PyFR v0.1.0.　(b) Conservative metric as used in PyFR v2.0.3.

図 2：保存型メトリクスの効果（[研究成果 1]Witherden *et al.,* PyFR v2.0.3: Towards industrial adoption of scale-resolving simulations, Computer Physics Communications 311 (2025) 109567 の Fig. 7 から引用）

2.3 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の進捗を報告する. これまでに，データ駆動型の静的空力弾性解析として，空力モデルと構造モデルの力の差（残差力）に着目した貪欲法に基づく連成方向並列化手法を提案していたが，同手法には 2 つの問題点があった．1 つは，有限要素法に基づく構造解析結果を直接的に平衡状態予測に反映できない点，もう 1 つは平衡状態となる変形形状を予測する際に高次モードと低次のモードの干渉を考慮できない点がある．今年度はこれらを解決するために，残差変位を最小化し，複数の変形モードの干渉を予測可能な最適化手法を取り入れた新たな完全分離解

法の検討を行った．図 3 には，新たに提案した残差変位型の完全分離解法のアルゴリズムと初期検討結果を示す．従来の力に基づく残差力最小化の分離解法と異なり，空力モデルと構造モデルの変位差を最小化するアルゴリズムを導入している．そのため，構造解析においては有限要素法など非線形解析も導入可能であり，既存の分離反復型のメリットを最大限活かした並列化手法となっている．また変形形状を定めるモード係数の同定に際し，新たにベイズ最適化を導入したことで低次から高次モードを逐次的にではなく同時に同定できるようになった．これにより高次モード形状の適用時にも反復計算が不要となり，平衡状態の変形形状の予測精度を確認しつつ必要に応じて追加解析を行う形へと改善された．以上の成果は学会発表（研究成果 7,12）を行い，現在関連論文を執筆中である．

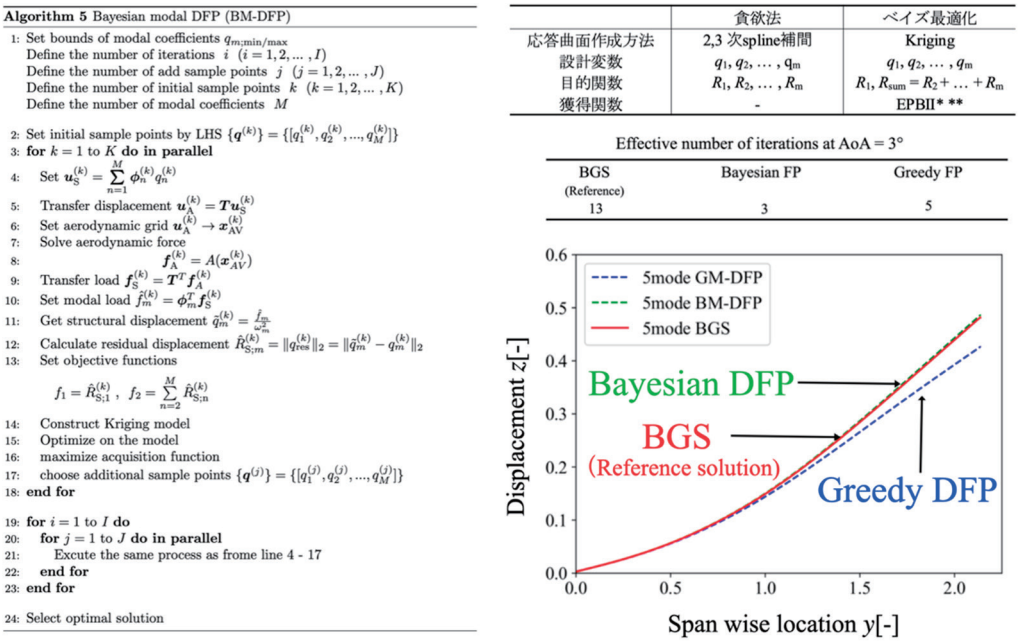


図 3：残差変位型の完全分離解法の提案

2.4 ICFD での OS 企画と所外対応研究者の IHI 訪問

本研究課題を中核として，2024 年 11 月 18-20 日に開催された ICFD（International Conference on Fluid Dynamics）において OS7: Advances in Simulation Techniques for the Computational Aerosciences を企画した（開催日：11 月 19 日）．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（16 件）が行われた．そのうち 1 件はオーストラリアのメルボルン大学から Richard Sandberg 教授に基調講演を依頼したものであり，航空機エンジンのタービン流れに関する先進的な CFD 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 Witherden 助教と Park 助教に現地参加してもらい，また Vermeire 准教授のグループにはオンラインで参加してもらった．また，ICFD 終了後に Witherden 助教と Sandberg 教授と共に IHI（東京都立川市）を訪問（11 月 21 日）し，実際の航空機エンジン開発における CFD の活用などに関して今後の研究開発に役立つ議論を行うことができた．

3. 研究目標の達成状況

昨年度の取り組みにより，最初の課題として設定した項目１の荷重変換アルゴリズムに関して大きな進展があった．まだ発表前の段階ではあるが，これまで本質的に問題解決に取り組んだ過去研究が見られない項目であり，実現すれば大きなインパクトがあると予想される．特に航空機主翼の設計において，関連する課題で共同研究を進めてきた航空重工側からも同現象の解決を望まれており，優先的に取り組んでいきたいと考えている．また項目２に関しては，スライディングメッシュの実現に向けて不可欠な移動格子の実装に関し，GPU を意識したメトリクス評価の高効率化の検討で進捗があった．同成果は国際学術誌として公刊されており，目標達成に向けて着実に準備が進んでいる．また，項目３は付加的な実施内容として設定していたが，高忠実な静的空力弾性解析の基盤手法として新たに残差変位型の完全分離解法を提案できた．具体的な問題への適用はこれからだが，本手法を連成解析の基盤として採用できる可能性が出てきたため，目標達成に向けて進捗していると考えている．

4. まとめと今後の課題

今年度は，仕事保存性を満足する安定な荷重変換法の研究と，高次精度圧縮性流体ソルバー PyFR の移動格子手法に関する検討，データ駆動型空力構造連成解析手法の研究において進捗があった．まず，RBF 補間を用いた仕事保存性を満たす荷重変換法において，変位変換行列の転置を利用する荷重変換では，空力と構造モデルの格子密度の差異により高周波振動が生じる課題を確認し，空間フィルターの導入によりその安定化を図った．この成果は実機モデルへの適用における実効性向上に寄与する．次に，PyFR における保存型メトリクスの実装方法について，曲線座標系における表式簡略化の妥当性を再評価し，外部研究者との連携を通じて実装改善の方向性を得た．さらに，静的空力弾性解析に向けた完全分離解法の高度化では，従来の残差力最小化手法の課題を克服するべく，残差変位最小化とベイズ最適化を組み合わせた新手法を開発し，高精度かつ非線形構造解析にも対応可能な並列計算手法として整備した．今後は，これらの手法を複雑な実機構造や多様な解析条件下で検証し，空力構造連成解析の信頼性と汎用性のさらなる向上を目指す．

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] F. D. Witherden, P. E. Vincent, W. Trojak, Y. Abe, A. Akbarzadeh, S. Akkurt, M. Alhawwary, L. Caros, T. Dzanic, G. Giangaspero, A. S. Iyer, A. Jameson, M. Koch, N. Loppi, S. Mishra, R. Modi, G. Sáez-Mischlich, J. S. Park, B. C. Vermeire, L. Wang: PyFR v2.0.3: Towards industrial adoption of scale-resolving simulations, *Comput. Phys. Commnu.,* 311 (2025), 109567 (14 pages), doi: 10.1016/j.cpc.2025.109567.

[2] Y. Liu, S. Date, T. Nagashima, T. Okabe, Y. Abe: Effects of aeroelastic coupling accuracy and geometrical nonlinearity on performances of optimized composite wings, *Aerospace Science and Technology* 158 (2025), 109926 (15 pages), doi: 10.1016/j.ast.2024.109926.

[3] （解説記事）阿部 圭晃: 航空機の設計と流れ，日本流体力学会会誌 ながれ, 43 (2024), pp. 9-15.

[4] （査読つき国際会議) Y. Abe, K. Shirasu, S. Date, T. Okabe, S. Obayashi: Toward Integrated Aircraft Design with Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic (CFRTP), *Advanced Computational Methods and Design for Greener Aviation / Computational Methods in Applied Sciences*, 59 (2024), pp.229-239.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[5] Y. Nakai, Y. Abe, K. Ryuzono, Y. Kawagoe, T. Okabe: Multi-scale Modeling Method for Structural Design of CFRP Aircraft, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2024), OS7-7.

[6] Y. Liu, K. Nakamura, S. Date, T. Nagashima, Y. Abe: Geometrically Nonlinear Analysis and Structural Sizing of Composite Aircraft Wings, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2024), OS7-10.

[7] C. Lee, T. Yamazaki, F. D. Witherden, Y. Kawano, Y. Abe: Data-Driven Fluid-Structure Interaction Analysis for Vortex-Induced Vibration, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2024), OS7-11.

[8] R. Kano, Y. Abe, K. Ryuzono, T. Okabe: Multi-Objective Optimization for Aircraft Wing Shapes Using Advanced Composite Materials, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2024), OS7-14.

[9] K. Nakamura , Y. Abe, K. Shimoyama, S. Obayashi: Uncertainty Quantification of Aerostructural Properties on Composite Wing Design, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2024), OS7-15.

[10] Rashmikant, Y. Abe: Drag Polar Prediction of an Aircraft Using Inviscid and Various Viscous Models, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2024), OS7-16.

[11] 狩野 良輔, 阿部 圭晃, 下山 幸治, 龍薗 一樹, 岡部 朋永: 先進複合材料を適用した航空機主翼形状の最適化手法の検討, 第 62 回飛行機シンポジウム, 福井 (2024).

[12] 谷津 優希, 阿部 圭晃, 岡部 朋永: 完全分離解法による航空機主翼の静的空力弾性解析, 日本航空宇宙学会北部支部２０２５年講演会, 仙台 (2025).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）該当なし

（受賞）

・学生優秀講演賞，先進複合材料を適用した航空機主翼形状の最適化手法の検討，第 62 回飛行機シンポジウム，狩野 良輔，2024. 10. 16，日本航空宇宙学会

・優秀学生講演賞，完全分離解法による航空機主翼の静的空力弾性解析，日本航空宇宙学会北部支部２０２５年講演会，谷津 優希，2025. 3. 10，日本航空宇宙学会

（マスコミ発表）

・プレスリリース：航空機主翼の空気抵抗と構造重量の両方を低減する設計手法を開発 ―様々な次世代型航空機設計への展開に期待― (2025. 1. 22)，東北大学

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	J24Ly01
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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*，
Elie Bretin**, Camille Carvalho**， Roland Denis**，
Simon Masnou**， 中山 まどか***，田崎 創平****，内一 哲哉*****,****** ††
*茨城高専，**Camille Jordan 研究所(INSA, Lyon)，***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. 研究目的

曲面(=膜)上に現れる Turing Pattern (TP)の向きの異方性は化学物質拡散の異方性に依存するとされているが，この拡散異方性は「膜弾性の力学的異方性から来る」という参考文献[1]で示した申請者ら独自の視点を，3 次元空間$\mathbf{R}^3$内の膜を対象とすることでさらに深める．方法としては，TP と膜の複合系(図 1)に対して Finsler 幾何モデルの方法を適用し，Monte Carlo 法等の数値的な手法を用いる．特に，外力を加えて一方向に引き伸ばしたときに TP の向きがどのように決まるかを詳しく調べる．更に，膜弾性の自由エネルギーからエントロピーの計算が可能になることから，そのエントロピーが膜の内部構造変化(=構成要素であるポリマーの向きの変化)に依存して変化することを手掛かりに，「エントロピーが極大になる内部状態」を明らかにする．このことから，実際の膜が外力を受けて変形したときに現れる非平衡な状態からどのようにエントロピー極大の平衡状態に移行するか，という「構造緩和現象」に関する知見が得られることを示す．

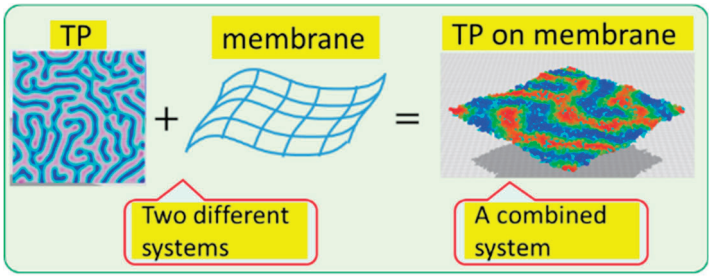


図 1：TP 系と膜モデルの複合系

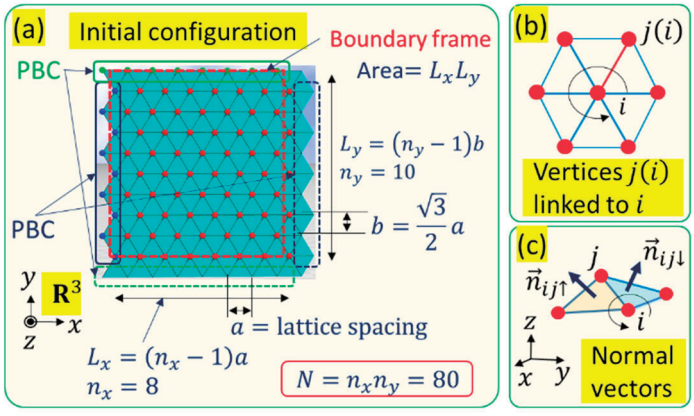


図 2： 計算に用いる格子(初期状態)

2. 研究成果の内容

図 2 には，計算に用いる格子を示す．格子の構造が分かるように頂点数 N は N=80 としている．実際の

計算ではサイズの大きなN=2900の格子を用いている．

小さなスケールの細胞膜や動物の皮膚などの大きなものまで，膜は，ポリマーと呼ばれる高分子が絡み合ってできていると考えられている（参考文献[2]）．これを単純にモデル化したものが図１の３角形格子で，このモデル化したものはポリマーネットワークと呼ばれることがある．

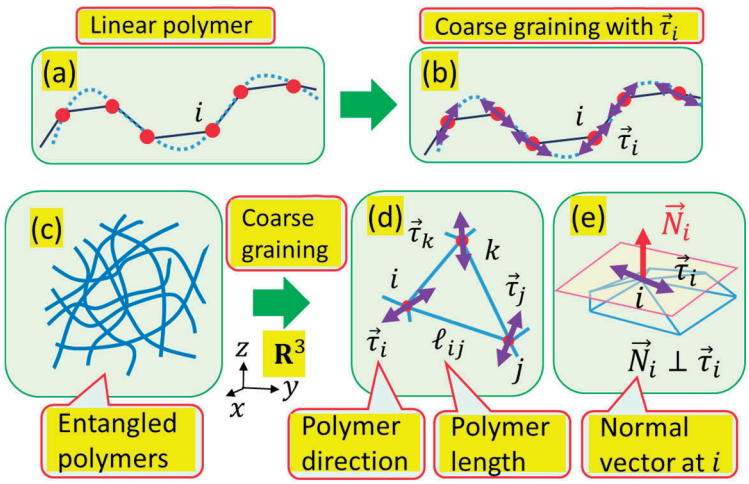


図３：粗視化ポリマーモデルにおける新しい内部自由度 $\vec{\tau}$：(a),(b) １次元，(c),(d),(e) ２次元

このポリマーネットワークは，もともとは１次元のポリマーのモデルである線形ポリマーモデル（図３(a)）を２次元に拡張したものと考えられる．線形ポリマーはモノマー（図３(a)の赤い点）が鎖状につながったものである．本研究では，モノマーの位置（外部自由度）に，新しい内部自由度としてポリマーの方向を加える（図３(b)の矢印）．線形ポリマーモデルの場合と同じように，２次元のポリマーネットワークモデルでも内部自由度を導入する（図３(c),(d)）．内部自由度の方向は膜の接平面に平行とする（図３(e)）．

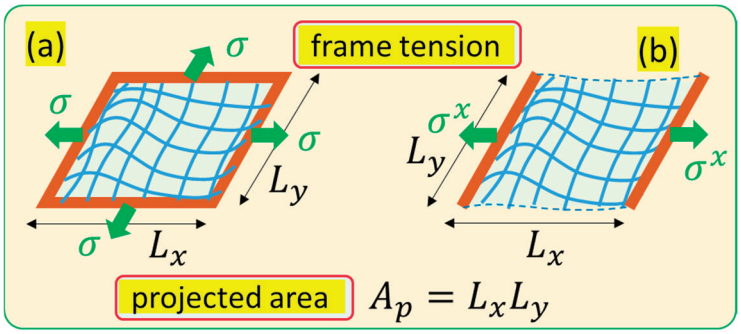


図４：膜の(a)等方的，(b) １軸的伸長とその張力の模式図

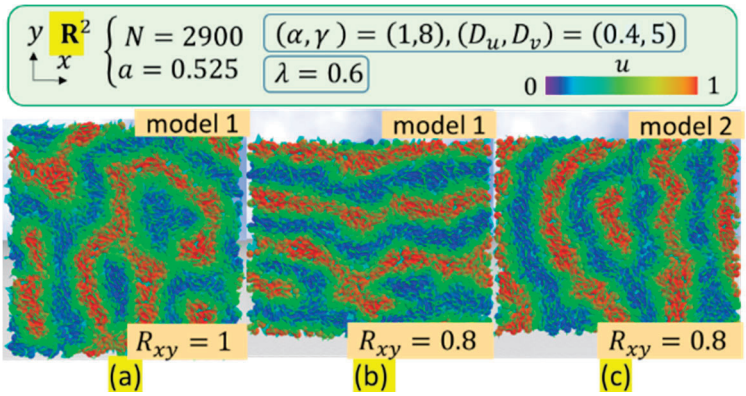


図５：平面$\mathbf{R}^2$上の伸長なしと伸長ありの膜に現れるTPのスナップショット

以上のように構成された２次元のポリマーネットワークを図４(a)のように等方的に引き伸ばせば，その張力σが計算できる．更に，図４(b)のように一方向に引き伸ばせば，その方向依存の張力σ^xも計算できる．特に，このσ^xによって膜に異方的な変形を与えた場合に，膜の内部構造がどのように変化するか，それによってどのようにTPの異方性が発現するかを調べる．

図５(a)−(c)は，本研究で提案する新しい内部自由を持った膜モデルが，２次元の平面$\mathbf{R}^2$上にある場合に，参考文献[1]と同じ結果を導くかどうかを確認したものである．結果は参考文献[1]と同

じであることが分かる．このことは，本研究のモデルは，曲面に適用できるものであり，更に，参考文献[1]のモデルの拡張になっていることを示している．

図6は3次元空間$\mathbf{R}^3$内の膜をx方向とy方向に引き伸ばしたときのTPを引き伸ばさない場合を含めて示している．(a)−(c)はmodel 1，(d)−(f)はmodel 2の結果である．Model 1,2の違いは，相互作用に強さを決める「単位Finsler長」の違いによる．Model 1では膜を引き伸ばすとその方向にTPが平衡になり，model 2では垂直になる．これらの結果は図5に示した2次元の膜の場合と同じである．

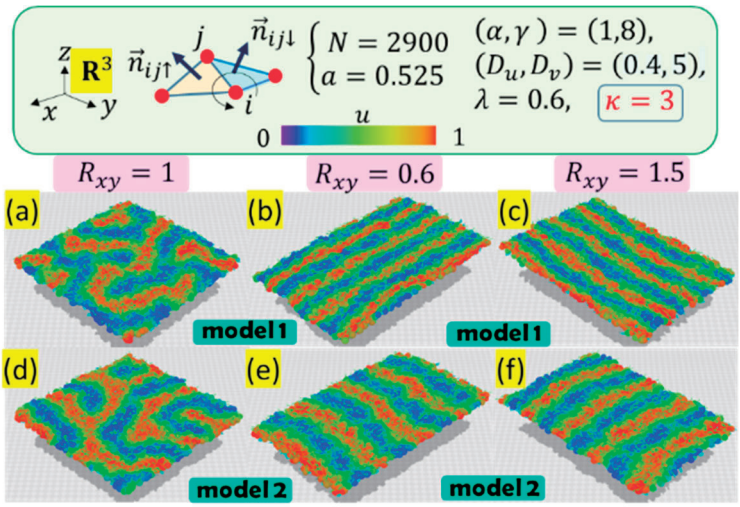


図6：$\mathbf{R}^3$内の伸長なしと伸長ありの膜に現れるTPのスナップショット．$\mathbf{R}^2$上でも同じであるがモデルの違いで向きが異なる．

3. 研究目標の達成状況

図7には$\mathbf{R}^2$上にある膜を引き伸ばした場合$(R < 1)$と圧縮した場合$(R > 1)$における，膜弾性エネルギーに関する示強変数部分$\Gamma_\mu^G, (\mu = x, y)$と示量変数部分$h_1^\mu, \Gamma_\mu^G h_1^\mu, (\mu = x, y)$を，TPのスナップショットとともに示す．Model 1とmodel 2ではTP方向が，引張りの方向に対して異なる応答になるが，弾性エネルギーの示強変数Γ_μ^G，示量変数$h_1^\mu, \Gamma_\mu^G h_1^\mu$は同じ応答性を示す．どちらも，膜の引張りおよび圧縮変形により，エネルギーの方向局在が起こる．特に，図7(b),(h)に示すように，引き伸ばした場合$(R < 1)$には，y軸方向からx軸方向へのエネルギーの方向移動が見られる．「移動」というのは，一方が減って他方が増えるということである．このエネルギー方向局在と方向移動は，$\mathbf{R}^3$内の膜においてもほぼ同様にみられる．このようなエネルギーの方向移動は，TP系の拡散エネルギーにおいても見られる．

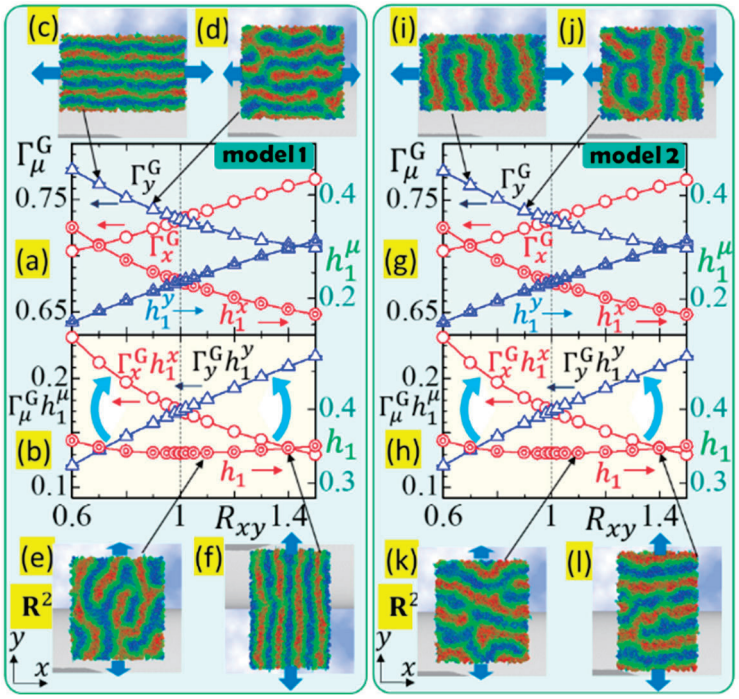


図7：$\mathbf{R}^2$上の膜モデルで得られた膜弾性エネルギーの方向依存性とスナップショット．示強変数部分$\Gamma_\mu^G, (\mu = x, y)$と示量変数部分$h_1^\mu, \Gamma_\mu^G h_1^\mu, (\mu = x, y)$に方向移動が見られる．

以上のことから，TPの異方性は，ポリマーの方向という膜の内部状態が外部の刺激によって変化し，この変化によってもたらされた膜の力学的異方性に起因するものであることが分かる．

ミクロな内部状態の方向依存性がマクロな力学的性質の方向依存性として現れる典型的な例がTPの方向依存性と考えられる．

図8(a)には，$\mathbf{R}^2$上の膜におけるエントロピー密度s(=単位面積当たりのエントロピー)とλの関係をプロットする．λはポリマーの向きが隣どおしどのくらいそろいやすいかを表わすパラメータで，λが大きいと向きがそろい易くなり小さいと隣どおし無関係になる．$\lambda = 0.6$でsは極大になっている．sが極大になる点というのは，膜の内部状態の安定点を意味する．即ち，実際の膜では，外力で変形して放置すると，内部状態はその状態に向かって変化していく(=構造緩和現象)ということである．図からはこの極大点はRの値によらないことも分かる．即ち，膜を引き伸ばしても圧縮しても極大点は変わらない．

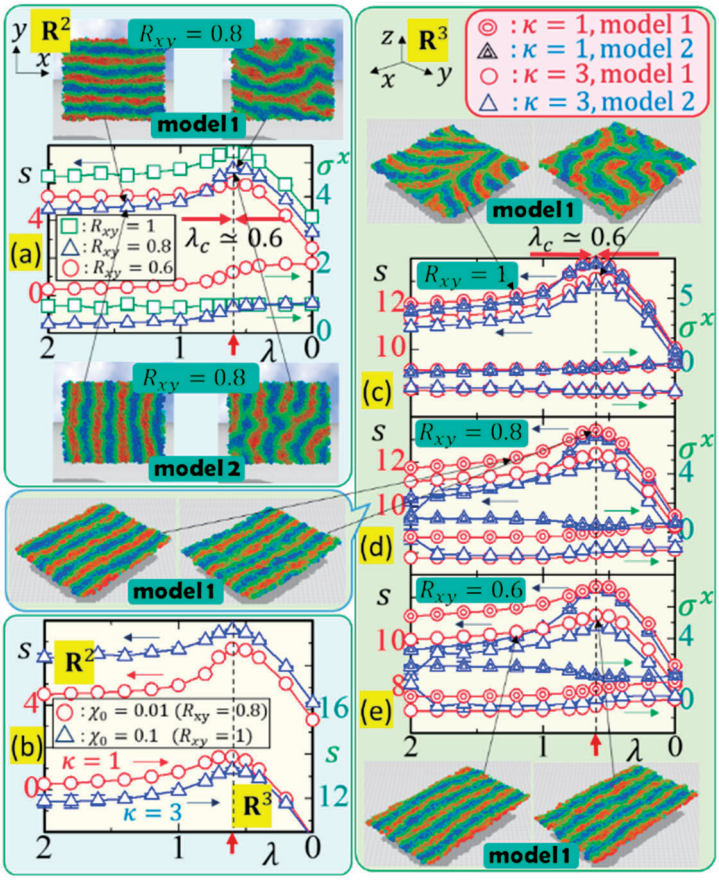


図8：エントロピー密度s のλ 依存性とスナップショット．sが極大となるλ は様々な条件に無関係であることは，構造緩和現象に関連する結果であると考えられる．

図8(b)からは，sの極大点は，$\mathbf{R}^2$上の膜と$\mathbf{R}^3$内の膜のχ_0(=異方的相互作用の強さ)にもよらないことがわかる．更に，図8(c)，(d)，(e)からは，$\mathbf{R}^3$内の膜のmodel 1,2にも，曲げ剛性の大きさκにもよらないことが分かる．

4. まとめと今後の課題

本研究では，参考文献[1]で扱われている$\mathbf{R}^2$上の膜モデル化の方法を$\mathbf{R}^3$内の膜に適用するため，内部自由度としてポリマーの向きを，ポリマーの位置という外部自由度に対して新たに付け加えた．この新たに導入した内部自由度が外的な刺激によって変化することで，Turing Pattern (TP)の異方性が発現することを明らかにした．更に，この時に外力によって内部構造変化に費やされた力学的な自由エネルギーからエントロピーを計算することで，そのエントロピーが極大となる状態があることが分かった．その極大点における内部状態は，様々な条件にはあまり依存しないことも分かった．このことは，そのエントロピー極大点の内部状態が，膜の内部状態の変化という構造緩和現象の終着点であることを示唆している．

本研究では，膜という柔らかい物質を対象としたが，TPは貝殻など硬い物質にも現れる．このような硬い物質は，本研究で扱った格子を用いてもモデル化できる．ただし，その格子の頂点の位置は，固いという条件から，固定しなければならない．この場合には，外力の応答である張力σ^xをどうやって計算するかが問題になる．σ^xは柔らかい物質において原子分子の揺動の効果として計算できる物理量だからである．更に，内部状態を表わす変数も，柔らかい場合のポリマーの向きから，例えば「歪方向」のように変える必要がある．今後の課題は，このような硬い物質

においてσ^xの計算方法を確立することによって，柔らかい物質の場合と同じ TP の発生機構が硬い物質でも見られるかどうかを明らかにすることである．

更に，この硬い物資でもエントロピーの極大点があることが初期的な計算から分かっている．そこで，内部状態としてその応力の初期状態を，そのエントロピー極大となる状態から離れたところに置いて，そのあと，内部状態変数を時間依存の数値的手法(Langevin 法など)で更新する．そうすると，その内部状態がエントロピー極大点に戻る様子がシミュレートできる．これは，非平衡な応力緩和現象のシミュレーションになる．今後はこのような応力緩和現象にも取り組む．

参考文献

[1] 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.

[2] D. Nelson, The Statistical Mechanics of Membranes and Interfaces, in Statistical Mechanics of Membranes and Surfaces, ed. D. Nelson, T. Piran and S. Weinberg, World Scientific, Singapore, 2nd edn, 2004, p. 1.

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, 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

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Elie Bretin, Camille Carvalho, Roland Denis, Fumitake Kato, Hiroshi Koibuchi, Simon Masnou, Madoka Nakayama, Sohei Tasaki and Tetsuya Uchimoto, Coarse-grained Lattice Simulations for Turing Patterns on Membranes, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, November 18 - 20, 2024, Sendai, Miyagi, Japan, ICFD2024 proceedings, OS25: IFS Lyon Center Collaborative Research Forum, pp.1458-1461, (2024).

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	J24Ly02
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 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

SiC では，酸化物系焼結助剤である酸化アルミニウム（Al_2O_3）および酸化イットリウム（Y_2O_3 の添加量を調整することで，イットリウム・アルミニウム・ガーネット（$Y_3Al_5O_{12}$）液相の形成が誘導され，SiC の相対密度を約 93〜97%の範囲で制御可能であることが報告されている[10]．また，Zhang ら[11]は，混合物中の Al_2O_3 と Y_2O_3 のモル比が 3:2 のときに最も高い密度を達成できることを示している．本研究では，焼結助剤として Al_2O_3 と Y_2O_3 の比率を変化させた SiC スラリーを調製し，直接インク書き込み法（DIW）を用いて密度勾配構造を有する SiC の造形を行った．得られた密度勾配 SiC の曲げ特性については，3 点曲げ試験により評価した．

2. 研究成果の内容

原料として，β-SiC 粉末（粒径 0.6 μm）を用意した．焼結助剤として，Al_2O_3 粉末（粒径 0.3 μm）および Y_2O_3 粉末（粒径 0.4 μm）を用いた．SiC，Al_2O_3，Y_2O_3 の各粉末を混合し，SiC 粉末と焼結助剤の重量比は 90:10 に固定しつつ，Al_2O_3 と Y_2O_3 粉末の混合比を変化させることで，最終焼結体の密度を制御した． 試料は Al_2O_3 含有量に基づいて命名した．たとえば，粉末混合比が SiC：Al_2O_3：Y_2O_3=90:1.25:8.75（重量比）の場合，試料名は A125 とした．最終的に，A0（10 wt% Y_2O_3，Al_2O_3 なし），A125，A242，A250，A175，A375，A500，A750，A1000（10 wt% Al_2O_3，Y_2O_3 なし）の混合粉末を調製した． 分散剤として，ポリカルボン酸系水溶液（Celuna D-305 および Y-181，中京油脂株式会社）を使用した．また，スラリーのレオロジー特性を調整するために，セルロースナノファイバー（CNF）スラリー（固形分 2 wt%，BiNFi-s IMa-10002，スギノマシン株式会社）を用いた．水と CNF スラリーは重量比 60 : 40 で混合し，溶媒を調製した．スラリーの固形分濃度は 35 vol%に設定した．

図 1 に DIW プロセスを示す．出発スラリーは 30 mL のシリンジに充填し，直径 0.84〜1.60 mm のノズルから 50〜200 kPa の圧力で押し出すことにより，グリーン体を形成

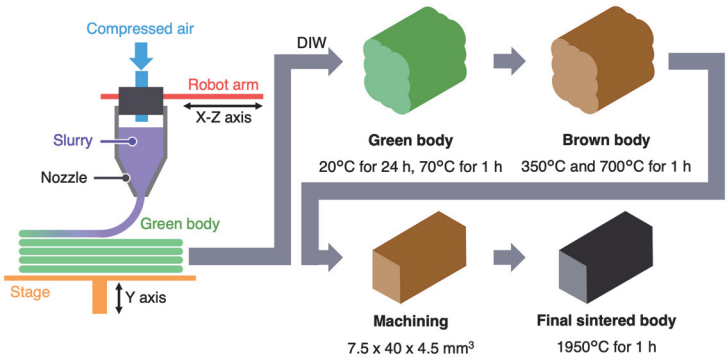


図 1：DIW プロセス

した．形成後のグリーン体は，まず 20℃で 24 時間乾燥させ，その後空気炉中にて 70℃で追加乾燥を行った． 得られたグリーン体から分散剤および CNF 由来の炭素成分を除去するとともに，結合水の除去を目的として，真空中で 350℃で 1 時間，続いて 700℃で 1 時間の熱処理を施し，褐色体を得た．加熱速度は 50℃/分とした． 褐色体は研磨紙により表面を研磨し，幅 7.5 mm，長さ 40 mm，厚さ 4.5 mm の棒状試験片へ加工した．得られた試験片は，アルゴン雰囲気中，1950℃で 1 時間，昇温速度 30℃/分にて焼結を行い，最終焼結体を得た．

図 2 に SiC の曲げ特性を示す．曲げ弾性率は，相対密度に関連した傾向を示した．曲げ強度についても同様の傾向を示したが，試料間で大きくばらつきがあり，値に大きな変動が見られた．曲げ強度は，試料内部の亀裂やボイドといった微細構造上の欠陥の影響を大きく受けることが知られており，SiC 中に存在するボイドが，曲げ強度の安定的な評価を妨げたと考えられる．

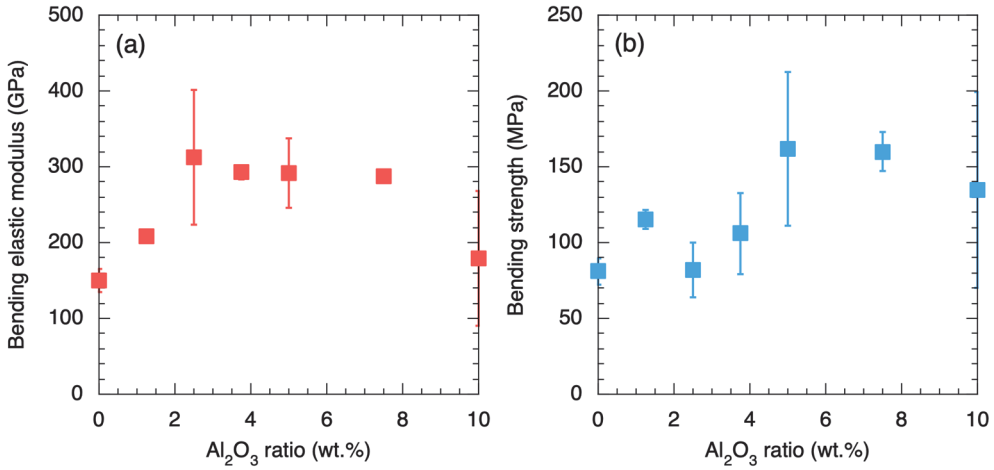


図 2：SiC の(a)曲げ弾性率，(b)曲げ強度

3. 研究目標の達成状況

研究目標の達成状況は 40%である．

4. まとめと今後の課題

本研究を通じて，SiC，Al_2O_3，Y_2O_3 の各粉末を混合したスラリーの DIW 条件が確立した．そして，異なる密度の SiC の作製およびその曲げ特性の把握に成功した．今後は，必要な部分のみを緻密化し，力学特性が要求されない部分は低密度化して軽量化する構造を設計する．そして，設計した SiC 材料の全体の力学特性, 局所圧縮強度と圧縮破壊挙動を統計的に理解する. 最後に，本研究から得られる成果を TOP10%国際ジャーナルへ投稿する予定である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] H. Kurita, T. Kudo, T. Kanno, Z. Wang, T. Uchimoto, H. Noto, L. Gremillard, S. Cottrino, F. Narita: Bending strength increase of silicon carbide by density gradient structure design by direct ink writing, 投稿準備中

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] H. Kurita, T. Kudo, T. Kanno, Z. Wang, F. Narita: Bending Strength of Density Gradient Designed Silicon Carbide Plate by the Direct Ink Writing, *Prodeedings of ICFD2024*, pp.1474.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J24Ly03
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

Epoxy Polymer For Ammonia Storage Solution

Nicolas Mary*†, Tetsuya Uchimoto**††, Sebastien Livi***, Manuel Kuhni****
*MATEIS Lab, INSA Lyon
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
***IMP Lab, INSA Lyon
**** CETHIL, INSA Lyon
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The storage of new energy vectors opens new challenges regarding material compatibilities. One of them is their chemical reactivity with storage frame materials. In France, H_2 was designed as the next energy solution, while NH_3 was selected in Japan. Both chemically interact with the material, and new solutions that prevent infrastructure degradation must be evaluated.

Today, four storage designs exist. Some of them are based on a metallic frame, whereas the others are reinforced polymer. The former are suitable for heavy storage conditions, while the latter are more dedicated to mobility.

This project focuses on a heavy storage solution based on a metal frame for high-pressure storage. Because these tanks are often used in aerial conditions or buried, degradation mechanisms must be identified, controlled, and monitored to ensure the safety of the installations.

Since 2017, the partners have been working on new solutions to solve corrosion and chemical degradation of metal tanks. During the first projects, polymer materials were selected as liners to prevent corrosion. Because of their application versatility, epoxy resins were selected as a promising candidate. Because of REACH, diamine hardener must be replaced by a safer chemical. At IMP Lab, they developed new chemistry based on Ionic Liquid. Their excellent properties were confirmed by exposure tests in salty water solutions. These results gave confidence in their use as an external liner to prevent the tank from external degradation.

The last project (J23Ly13) discussed the chemical compatibility of epoxy resin in an aqueous ammonia environment. Results pointed out different performances regarding polymer chemistry, while the epoxy ionic liquid remained the best performer.

The last study opens new doors for understanding the epoxy reactivity in this aggressive environment. Our previous results have also highlighted that in-situ characterization must be implemented. If capacitive measurements can be implemented at the lab scale, other NDT methods must be evaluated for onsite application.

Therefore, the project shifts into this way with the Ultrasound methods evaluation as the sensor of the polymer degradation.

2. Details of program implement

IMP Lab provided thin epoxy films with different chemical compositions (similar to those used in J19Ly02, J20Ly02. Initial characterizations (wettability test, DMA) were performed to confirm the homogeneity of properties with the previous materials.

The ultrasound tests were developed in collaboration with GREMAN lab at INSA CVL

(Blois City, France). This project was also supported by an OPENINSA2024 grant.
Ultrasonic measurements were carried out using water as a reference medium and pairs of transducers with a central frequency of 50 MHz to evaluate US parameters and their variation with immersion. Since these experiments are part of a feasibility study, immersions were done in 0.01M NaCl solution. The velocity and attenuation of the ultrasonic signal were measured to assess the changes in the polymer's physical and chemical properties. The US waves were transmitted through the polymer samples, and the time taken for the signal to travel through the sample was measured to determine the velocity. The attenuation of the signal was also measured to evaluate the energy loss dueto absorption and scattering. The central frequency of 50 MHz was chosen as it provides a good balance between resolution and penetration depth, making it suitable for measuring the properties of thin samples. US measurements were completed by mass measurements as set up in project J19Ly02.

Figure 1 shows the mass evolutions of the coupons with the immersion time (aging). Classical water uptake behavior is observed following the diffusion Fick law.
Figure 2 and Figure 3 shows the US velocity and attenation in the same conditions. One could note that the initial velocities differ. This variability in material thicknesses has also an effect on velocity measurement sensibility. The thinner the polymer, the shorter the ultrasonic wave path will be. Thus, in the 2 mm thick samples, the US velocity does not evolve significantly while the signal attenuation remains constant. The evolution of the acoustic parameters (speed and attenuation) is slow and it didn't be observed on the time scale for fine samples (1mm). Maybe the absorption of water kinetic may be so fast in our test conditions. Real-time, continuous acoustic measurements during the first few days of hydrolytic aging could validate our hypothesis.
The decrease in the acoustic parameters is observed for the large sample. The water diffusion in this sample would not be completed. On the contrary, 4 mm thick samples show a significant decrease of about 1 m/s/$\sqrt{}$h and an attenuation reduction.

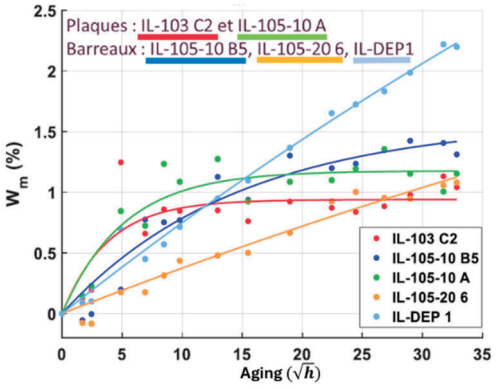


Figure 1. Relative mass variation vs aging time of the four polymers immersed in 0.1M NaCl solution.

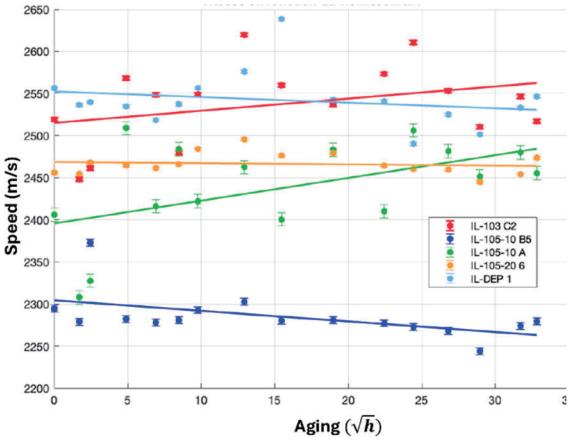


Figure 2. US speed vs aging time.

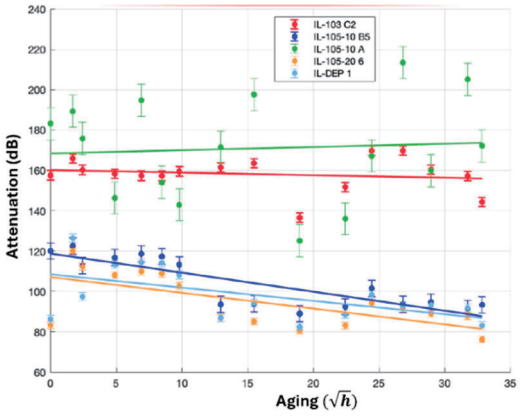


Figure 3. US attenuation vs aging time.

3. Achievements

These results confirm that the chemistry of the epoxy ionic liquid should be investigated since each polymer has its water uptake behavior.
US tests point out that the water uptake could be monitored. However, the evolution of the acoustic parameters (speed and attenuation) is slow and it didn't observed on the time scale for fine samples (1mm). Maybe the absorption of water kinetic may be so fast in our conditions test. Real-time, continuous acoustic measurements during the first few days of hydrolytic aging could validate our hypothesis.
Also, a decrease in the acoustic parameters is observed for the large sample. The water diffusion in this sample would not be completed.

4. Summaries and future plans

The successive projects have demonstrated the real potential of these new epoxy resin as a liner to protect metal against corrosion and aggressive chemicals.
The next step has been launched with the submission of an ANR proposal, which reached the 2nd round of selection. This proposal merge ELyTMaX-IFS, MATEIS, IMP and GREMAN labs to go further on the potential of these materials and evaluate their performance in real environments (H_2 and NH_3)

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. Boucaud-Gauchet, J. Caritey, G. Jusserand, T. Devaux, S. Livi, F. Vander Meulen, T. Uchimoto, N. Mary. Ultrasound study of hydrolytic ageing polymer. *ICFD*, Sendai Japan, Nov.18-20 2024

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

Project code	J24Ly04
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Vascular Integration in Three-Dimensional Organoid-on-Chip Platform

Nicolas Aznar*†, Kenichi Funamoto**††
Satoshi Aratake**, Naoto Kawahara**, Laetitia Gerossier*, Minh Hoang Bui*
*University Claude Bernard Lyon 1
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Although some cancers are effectively treated through the standard strategy of surgery, radiation, and/or chemotherapy, some patients have a recurrence of their cancer. Despite decades of research, we are still unable to predict which cancers will be efficiently treated and which are likely to spread, thus there is an urgent need to find new or better treatment alternatives for cancers. Developing more robust and relevant *in vitro* models is crucial to better recapitulate pathologies and improve the predictive power of preclinical studies. This project aims to develop an advanced organoid-on-chip platform to investigate the intricate interplay between organoids, different cell types, and vascularization processes within a physiologically relevant microenvironment. The study will focus on enhancing our understanding of the dynamic interactions between organoids and vascular networks, with potential applications in cancer modeling and drug screening.

2. Details of program implement

Organoid Culture: Establish robust protocols for the culture of three-dimensional (3D) spheroids and organoids representative of specific organ systems, ensuring cellular diversity and functionality. Utilize patient-derived organoids for cancer applications (Figure 1).
Endothelial Cell Incorporation: Integrate endothelial cells into the culture to mimic the *in vivo* vascularization process. Optimize conditions for the co-culture of organoids and endothelial cells to promote vascular network formation and maturation (Figure 2).
Organoid-on-Chip Development: Design and fabrication of a microfluidic organoid-on-chip device that allows for precise control over the microenvironment, including nutrient supply, oxygenation, and waste removal. Implement microscale features to simulate physiological conditions and facilitate real-time monitoring (Figure 3).

3. Achievements

- Optimization of spheroid from cell line and patient-derived organoid cultures from fresh tumors.
- Optimization of endothelial and cancer cells co-culture.
- We designed and developed an innovative 3D cell culture chip integrating a fluidic system for enhanced functionality.

4. Summaries and future plans

This project focuses on developing advanced 3D organoid culture systems to better mimic native tissue architecture and function. Robust protocols are established for cultivating organoids and spheroids that preserve cellular diversity and physiological relevance, including the use of patient-derived organoids for cancer modeling. To enhance realism, endothelial cells are incorporated into the organoid cultures to support *in vitro* vascularization, allowing the formation of perfusable vascular networks. Additionally, a microfluidic organoid-on-chip platform is developed to precisely control the organoid microenvironment, enabling real-time monitoring and simulation of *in vivo*-like conditions such as oxygenation, nutrient flow, and waste elimination.

The next phase of the project will explore the dynamics of vascularization within organoids. Using high-resolution, time-lapse imaging, we will analyze vessel sprouting, morphology (including branching patterns and diameters), and perfusion rates to understand how organoid-intrinsic factors influence vascular development. We will also conduct functional assays to validate the physiological relevance of the vascularized organoids. These include perfusion tests, analysis of nutrient and drug diffusion, and evaluation of responses to chemical or mechanical stimuli. Integrated microsensors in the organoid-on-chip system will monitor key parameters such as oxygen levels, pH, and metabolite concentrations, offering a powerful platform to study tissue physiology and therapeutic response in real time.

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] M. Roinard, S. Aratake, K. Funamoto, N. Aznar, J.-P. Rieu, Investigation of a predictive therapeutic response under controlled oxygen condition in cancer patient-derived organoids, *Proceedings of the 21st International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024)*, (2024), 964-965.

[2] S. Aratake, M. Roinard, Z. Su, 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 21st International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024)*, (2024), 1481-1482.

[3] J.-P. Rieu, K. Funamoto, N. Aznar, Monitoring eukaryotic cell functions under various hypoxic conditions with microfluidic based oxygenators, *Abstract book of ELyT Workshop 2024*, (2024), 42.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

(Grant)

ShapeMed programme University Lyon 1 (2024-2025): 150,000€

Sakura PHC French-Japan program (2025-2026): 12,000€ for French lab / 12,000€ for Japanese lab

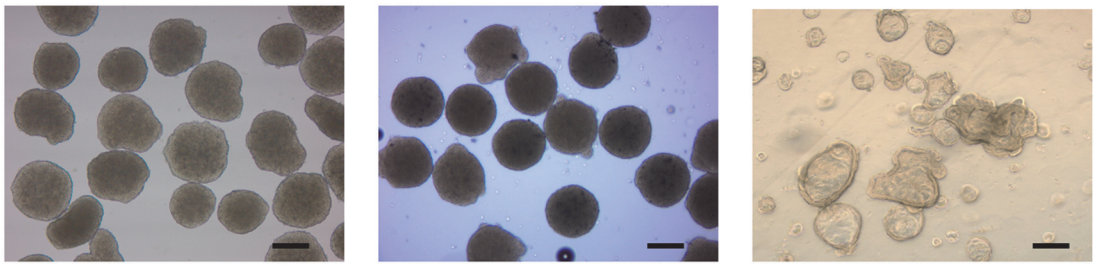


Figure 1: **Culture optimization of spheroid from cell line and patient-derived organoid (PDO) from fresh tumors.** HCT116 and HT29 colorectal cancer cell lines were cultivated for 3 days in liquid condition using the hanging drop technic to generate spheroids. Fresh colorectal tumors were dissociated and cultivated in Matrigel to generate tumor organoids. Scale bar represents 200 µm.

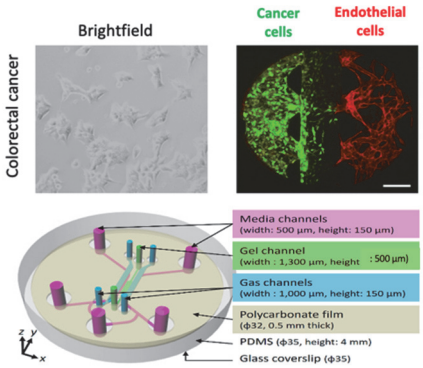


Figure 2: Optimization of co-culture conditions for cancer and endothelial cells. Top left: HCT116 colorectal cancer cells cultured in 2D within the newly designed microfluidic chip. Top right: Co-culture of MDA-MB-231 cells (green) with HUVEC endothelial cells (red) within a chip environment. Bottom: Schematic representation of the custom-developed chip that will be used for co-culture experiments.

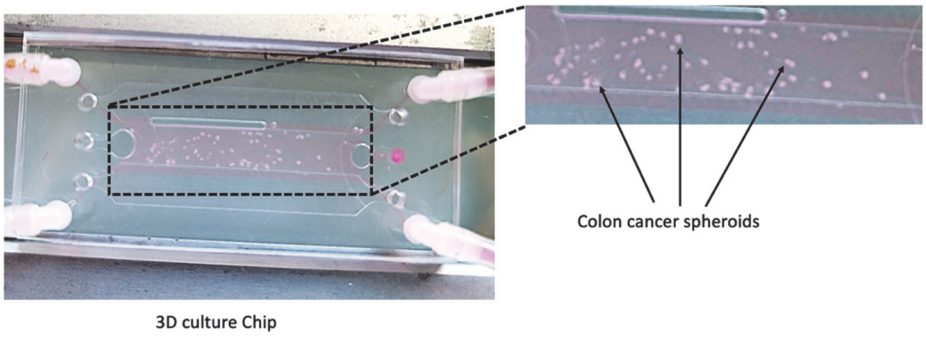


Figure 3: Organoid-on-chip platform for the cultivation and imaging of spheroids and organoids. Left: Initial test showing HCT116 spheroids cultured within the organoid-on-chip device. Right: Close-up view of the microfluidic compartment housing the spheroids, highlighting their spatial organization and confinement within the chip.

Project code	J24Ly05
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Health, Welfare and Medical Care
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	3nd 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
**Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology
***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 PDMS-based oxygenator devices for cells based on a control of oxygen (O_2) permeation trough PDMS. It is well known that cells sense O_2 tension and change their behaviors. 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, just be stimulated (or inhibited) by changing the overall O_2 level (aerokinesis). But a prolonged stay at low O_2 (hypoxia) generates as well a genetic response 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, and we showed that *Dd* amoebae are responding 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 a microfluidic device capable of simultaneously controlling multiple O_2 concentrations to clarify long term adaptation to various O_2 levels (proliferation, adhesion and long-term migration). Our current purpose is to mimic various physio-pathological contexts: (1) the response of the solitary amoebae *Acanthamoeba castellani* (*Ac*) in O_2 gradients mimics the response to hypoxia of immune cells, (2) the migration under hypoxia of cancer cells (MDA-MB231 breast cancer cell line) mimics tumor escape.

2. Details of program implement

During year 2022 and early 2023, we performed experiments with various *Dictyostelium* mutants or 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 devices. Meantime, 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 behaviors. An article on the role of oxidative stress and some metabolic functions on the aerotaxis of *Dictyostelium* 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 double-layer device of S.

Hirose. Preliminary results were presented by N. Ghazi at ICFD 2023.

During year 2024, N. Ghazi finished these experiments as well as their modeling. He clarified the role of cell density in *Ac* aerotaxis. He defended his PhD on Dec. 19th, 2024, in Lyon and started in early 2025 to write papers.

Meantime, N. Kawahara continued at IFS the development of new PDMS-based oxygenator devices for cells discussed and pre-tested earlier in Lyon during short stays (S. Hirose, S. Yanagita, K. Funamoto). In the so-called "four-chamber device" (Figure left) the O_2 concentration C solubilized in the culture medium is controlled by the gas permeation through the porous PDMS and the external gas atmosphere which is carefully controlled using stage-top chambers and gas blenders. To validate the O_2 level calibration, J.P. Rieu visited Japan twice in 2024 during summer and at ICFD 2024 to bring O_2 sensing films prepared in Lyon.

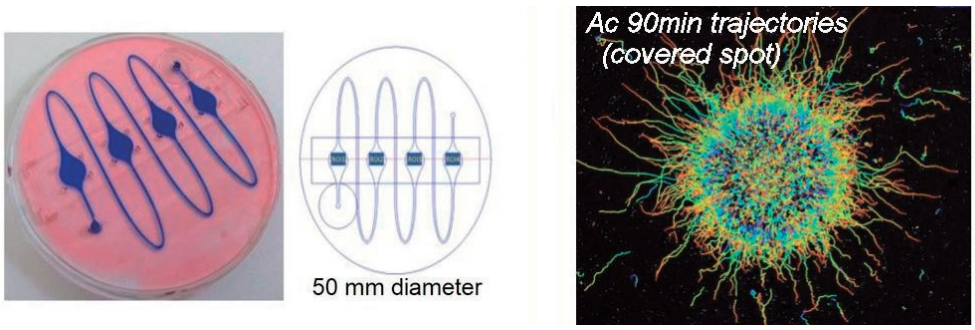


Figure 1: Left: new PDMS-based four-chamber device where O_2 level is controlled by gas permeation through the porous PDMS. The pink color is due to the O_2-sensing film at the bottom of the device. Right: 90-min trajectories of *Ac* cells submitted to a self-generated O_2 gradient by covering the spot with a coverglass.

3. Achievements

The achievements by our collaborative research are summarized as follows.

- We characterized the O_2 concentration C in the four-chamber device with multiphysics software COMSOL simulations and with the O_2-sensing films developed during the former project between the two laboratories (Cochet-Escartin et al. 2021). The O_2 level can divided by two every consecutive chamber based on the permeation principle explained above. An analytical formula was derived for C as a function of PDMS thickness, flow rate, channel dimensions. This formula was successfully verified using COMSOL.
- The first application of this four-chamber device was the migration and proliferation of MDA-MB231 breast cancer cells. We observed that the proliferation becomes more active around 5% O_2 concentration and that cancer cells exhibited straight-line migration along the flow direction in hypoxic areas, suggesting they sense surrounding O_2 levels and adapt their movement accordingly.
- We have shown that *Ac* cells migrate toward an O_2-rich regions under the 0-2% O_2 only (aerotaxis) as previously observed for *Dd* cells. However, contrary to *Dd*, *Ac* exhibits very straight (persistent) trajectories and easily collide with others at high cell densities, hence we observe a very interesting cell density dependence of basic random motility but as well of aerotaxis in confined spots (Figure right) or in microfluidic devices. Results will be published soon in interdisciplinary journals.

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 need to repeat and finish the calibration of O_2 level in each chamber depending on geometrical variation on the device. We need to perform proliferation experiments in the four chambers with *Dd* and other cancer cells. For cancer cells, we plan to quantify vinculin expression and localization for analyzing O_2 concentration-dependent dynamic changes from the perspective of protein expression.

A significant time will be devoted to the publication of the aerotactic experiments with *Ac* cells.

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] 船本 健一, 廣瀬 理美, N. Ghazi, J.-P. Rieu, 細胞性粘菌の走気性の観察とモデル化, 日本応用数理学会 2024 年度年会, (2024), D1-4-1.

[2] N. Ghazi, M. Demircigil, S. Hirose, A. Chauviat, V. Calvez, K. Funamoto, C. Anjard, J.-P. Rieu, Monitoring Eukaryotic Cell Functions under Various Hypoxic Conditions with Microfluidic Based Oxygenators. *Proceedings of the 21st International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024)*, (2024), pp. 1479-1480.

[3] N. Ghazi, M. Demircigil, S. Hirose, A. Chauviat, V. Calvez, K. Funamoto, C. Anjard, J.-P. Rieu, Hypoxia Triggers Collective Aerotactic Spreading of Eukaryotic Cells, *GDR AQV 2024*, (2024).

[4] N. Kawahara, S. Yanagita, S. Aratake, S. Hirose, N. Ghazi, J.-P. Rieu, K. Funamoto, Development of Four-Chamber Microfluidic Device for Generating Different Oxygen Conditions, *Proceedings of the 21st International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024)*, (2024), pp. 745-746.

[5] N. Kawahara, S. Yanagita, S. Aratake, S. Hirose, J.-P. Rieu, N. Ghazi, K. Funamoto, Observation of Cancer Cells Using Four-Chamber Microfluidic Device with Different Oxygen Concentrations, *Abstracts of the 18th International Conference on Biomedical Engineering (ICBME 2024)*, (2024), p. 368.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

Project code	J24Ly06
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

Numerical Study on Electrical Drift and Diffusion of Ions in Polymer Strips

Joel Courbon*†, Hidemasa Takana**††
*Mateis laboratory INSA Lyon
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Adapt Fortran so-called EDL code developed at IFS for ion migration in ionic liquid capacitors to higher voltage, slower kinetics and lower ion concentrations. Match quantitatively the kinetics of quick anion and slow cation through the polymer strip thickness (about 100 μm) under DC voltage below 1000 V. Interface with mechanical model of bending developed at INSA.

2. Details of program implement

As expected, a paper on the new modelling approach [1] was written and published with the other persons involved in the Tempura project (notably JY Cavaillé, ElytMax Lyon Center senior scientist, principal person in charge of Comsol modeling, and G. Coativy, managing the chemical, electrical and material science skills of the 3 labs involved at INSA).

The initial modelling strategy was to use the EDL code for ion diffusion and drift, then interface with Comsol mechanical code for bending. However, a module of Comsol dedicated to electromagnetic was increasingly used for an integrated and quick all-Comsol approach.

The EDL code still is useful to test hypotheses and back up Comsol computation results, some of which are sometimes difficult to understand. For instance, from October 2024 we tested with the EDL code the hypothesis of a coefficient of diffusion that decreases when the ion concentration increases, in order to account for the formation of a thick ion layer at each interface (as observed experimentally by Coativy *et. al.* on the anode side at least). The concept was then adopted for Comsol computations as well, bringing fair agreement between experiments and a model with a limited set of parameters.

However, it remains heuristic, i.e. we miss the physical phenomena that lead to the decrease. This could be attributed to that there is a repulsive force that arises from the segregated ions, not on an electrostatic basis but rather mechanical (elastic repulsion from a “swollen” zone where the free volume left between the polymer network and the segregated ions is scarce). This approach has been initiated by the Kornyshev team at Imperial College London (e.g. A. Lee, R. Colby, Soft Matter, 2013, 9, 3767) on single-charge-carrier electroactuation and I am convinced that we need to adapt it to our case.

So far, we did not test voltage drop and voltage reversal cases, but they will be performed in the future since they are important to test the predicting capability of the integrated model.

3. Achievements

The announced paper was published [1] and the integrated Comsol model now operates.

4. Summaries and future plans

A final paper on the modelling of polyurethane bending will soon be finalized and submitted.
Funding from French National Research Agency on polymer actuators filled with ionic liquids was requested by G. Coativy on behalf of a research team involving us. Approval pending.
An Insa grant for a joint PhD between Tohoku University and Insa was awarded to the research theme for the Sept. 2025 – August 2028 period. Hopefully a highly skilled candidate will be hired.
The outputs of the J24Ly06 project being incorporated into a wider cooperative program, it is suggested to close it.

5. Research results

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

[1] A. Blain, V. Perrin, L. Seveyrat, F. Dalmas, S. Livi, J. Courbon, G. Diguet, H. Takana, J.-Y. Cavaillé, G. Coativy: *Polymer*, 312 (2024), 127601, doi: 10.1016/j.polymer.2024.127601.

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

[2] J. Courbon, H. Takana, G. Coativy, J.-Y. Cavaillé, Parametric Study of Ion Flow Through Polymer Strip Submitted to a High Voltage, *21st International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, (2024), OS25-9, pp.1472-1473.

[3] D. Djoumoi, L. Seveyrat , V. Perrin, F. Dalmas, S. Livi, J. Courbon, H. Takana, J.-Y. Cavaillé, G. Coativy,Investigation of Electric Field Induced Bending of Doped Epoxy-amine Elastomers with Ionic Liquids, *21st International Conference on Fluid Dynamics*, (2024), OS25-8, pp. 1469-1471.

[4] H. Takana, J.Courbon, L. Seveyrat, V. Perrin, D. Djoumoi, S. Livi, F. Dalmas, G. Sebald, J-Y Cavaillé, Ion-doped polymer actuators：experiments and modeling, *Elyt workshop*, Lyon & Annecy (France),(2025).

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J24Ly07
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

Experimental Study of New Model Electroactive Materials (TEmPuRA)

G. Coativy[1†], V. Perrin[1], L. Seveyrat[1], F. Dalmas[2], S. Livi[3], H. Takana[4,5††], JY Cavaillé[5,6]

[1]LGEF, INSA Lyon, [2]MATEIS, INSA Lyon, [3]IMP, INSA, [4]Institute of Fluid Science, Tohoku University, [5]Lyon Center Lyon, [6]ELyTMaX IRL, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective of the project is to study the effect of the presence of ions on the electro-actuation of dielectric elastomers. These ions may be 1) unintentionally present in polymeric materials (impurities) or 2) incorporated in a controlled manner (doped materials). In this project, we first worked on industrial polyurethane which contains ionic impurities. Our results suggest that under electric field positive and negative ionic impurities drift towards the electrodes with different kinetics. Their accumulation near the electrodes is responsible for the complex bending kinetics of the polyurethane which takes place over 15 hours and with an amplitude enhanced by the presence of NaCl salt. Then we synthesized polymer doped with controlled amount of ionic liquids and study their structure, physical properties, and electro-mechanical behavior to improve our understanding of the role of charge carriers in the electro-actuation of dielectric elastomers. We also studied the impact of the electro-mechanical history of the sample on its response to the electric field.

2. Details of program implement

We have investigated the electro-mechanical behavior of samples doped with various amount of ionic liquids electro-mechanically. Besides, we also studied the impact of the electromechanical history on the response of the material. We found that after removing the electric field applied to our samples, a remanent deformation is observed. A structural study was carried out before and after the application of the electric field to determine the reason. Finally, we also used different ionic liquids with the same matrix and studied them experimentally (dielectric spectroscopy, bending under constant electric field…)

3. Achievements

Our work showed that the addition of only 0.1%wt of ionic liquid is sufficient to cause bending to occur, and that the amplitude and current density increase when the ionic liquid concentration increases. These results where summarized in our recent articles published in the journal “Polymer”. The data collected was also used to obtain the ion diffusion coefficient experimentally that can be used in our simulations. We have succeeded in determining the origin of the residual deformation observed even after removal of the applied electric field on our samples. As shown by the structural study, the residual deformation is associated with the presence of an anion-rich layer near the positive electrode. The role of cations needs to be determined, as they were not observed due to a lack of chemical contrast.

4. Summaries and future plans

A first work dedicated on the study of the impact of the amount of ionic liquid used to dope the epoxy-amin matrix has been achieved and published. The residual deformation observed in our samples after removing the applied electric field has to be more deeply investigated as it can be used potentially to make actuators which consume less energy and also because our preliminary results show that the ionic rich layer can lead to a stiffening of the material. Finally, 2 types of polymer networks doped with different ionic liquids have been prepared 1) with two labile ions 2) with the cation attached to the polymer backbone and the anion free to move. Their physico-chemical properties and their structure have to be investigated deeply. The reproducibility of their electro-actuation has to evaluate before having conclusions on the impact of the mobility of cations on electro-actuation.

5. Research results

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

[1] A. Blain, V. Perrin, L. Seveyrat, F. Dalmas, S. Livi, J. Courbon, G. Diguet, H. Takana, J.-Y. Cavaillé, G. Coativy, Effect of ionic liquid on soft epoxy-amine electroactuators, *Polymer (Guildf)*. 312 (2024) 127601.https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127601.

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

[2] D. Djoumoi, L. Seveyrat , V. Perrin, F. Dalmas, S. Livi, J. Courbon, H. Takana, J.-Y. Cavaillé, G. Coativy,Investigation of Electric Field Induced Bending of Doped Epoxy-amine Elastomers with Ionic Liquids, *ICFD 2024*, Sendai, (2024), OS25-8.

[3] H. Takana, J.Courbon, L. Seveyrat, V. Perrin, D. Djoumoi, S. Livi, F. Dalmas, G. Sebald, J-Y Cavaillé, Ion-doped polymer actuators：experiments and modeling, *Elytworkshop*, Lyon&Annecy (France),(2025).

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J24Ly08
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	3 年目

統合型混相エネルギーシステムに関する連成解析的アプローチ
Coupled Analysis Approach to Integrated Multiphase Energy Systems

石本　淳*†，Thomas Elguedj**††，松浦 一雄***，桑名 一徳****，
中村 裕二*****，松岡 常吉*****
*東北大学流体科学研究所，**INSA de Lyon LaMCOS，***愛媛大学工学部
****山形大学工学部，*****豊橋技術科学大学工学部
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

水素は，低炭素社会を実現するための重要なエネルギーキャリアと位置付けられている．しかし，水素はそのままではエネルギー密度が従来の化石燃料に比べて非常に小さく，実用化のためには高密度な状態での貯蔵および輸送が不可欠である．そのため，高圧で充填された水素を取り扱う設備，特に水素ステーションや高圧水素タンクについては，安全性を十分に考慮した設計が必要となる．

具体的には，水素の引火限界濃度や脆化現象，繰り返し応力による材料劣化などの影響を考慮することが求められる．これらの課題を踏まえ，本研究では高圧水素容器が破壊された際に発生する水素ガスの漏えい現象に着目し，材料の構造解析と流体解析を同時に取り扱う連成解析手法の開発を目的とする．また，高圧容器の隔壁がき裂破壊した際に発生する水素漏えい拡散現象を，より詳細に解析できる計算手法を確立し，これを通じて安全性の高い水素設備設計に貢献することを目指している．

2. 研究成果の内容

本研究においては，き裂伝播に伴う水素漏えい現象を二段階に分けて解析を実施した．第一段階では，高圧容器内におけるき裂の発生および伝播に関する材料側の解析を行い，第二段階では，き裂伝播後に隔壁から漏えいする水素の流体挙動を解析した．本年度は特に，粒子法の一種である Peridynamics モデルを用いて得られたき裂形状データを基に，漏えいする水素の混相流体解析を行った．

その結果，漏えい開始時にはき裂形状に沿って水素が直進的に外部へ流出する様子が確認されたが，時間の経過とともに水素が主流に対して垂直方向へと拡散していく様子が見られた．この挙動は，水素の持つ高い拡散性と，高圧から常圧大気へと急速に膨張する過程によるものと考えられる．漏えい現象の流速分布や拡散状況については，時間変化を含めて詳細な解析が進められた．

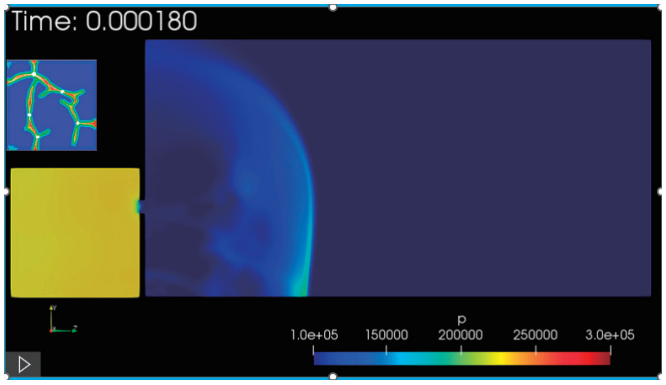


図 1　高圧容器のき裂伝ぱを伴う漏えい水素の圧力分布 に関する時間発展計算結果

3. 研究目標の達成状況

本研究の達成度は概ね 90%に達しており，当初計画した解析手法の大部分が確立された．高圧水素タンクのき裂伝播現象を解析するために必要な連続体力学理論および線形破壊力学理論の基礎を固め，これらを基にした材料き裂伝播解析を Peridynamics モデルにより実施した．さらに，3 分間の高速充填条件を想定した連成解析システムの開発に成功し，70MPa の高圧水素が漏えいする過程を流体ー材料連成コンピューティングにより再現することが可能となった．この結果，漏えい水素の濃度分布を精度良く予測できる解析環境が整ったと評価している．

4. まとめと今後の課題

本年度の研究においては，Peridynamics モデルを用いた材料のき裂伝播現象に関する数値解析手法を構築することができた．これにより，高圧水素タンクにおけるき裂発生から漏えい開始までの過程を一定の精度で再現できるようになった．今後の課題としては，漏えい現象そのものをより詳細に解析するために，Euler 型の流体ー構造連成解析モデル（FSI モデル）を構築し，き裂伝播と水素漏えいが同時に進行する状況を一体的にシミュレーションすることが挙げられる．

また，今回得られた水素の拡散挙動については，水蒸気など他の気体と比較することにより，拡散特性の相違を明らかにする必要があることが判明した．特に，高圧ガスが漏えいする際の急速膨張や拡散挙動について，気体の種類ごとの影響を体系的に整理することが，今後の安全設計指針の高度化に資するものと期待される．今後はこれらの課題に取り組み，安全性の高い水素利用社会の実現に向けた基盤技術の確立を目指す．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Opalski Marcin, Czajkowski Cezary, Blasiak Przemyslaw, Nowak Andrzej Ireneusz, Ishimoto Jun, Pietrowicz Slawomir, Comprehensive numerical modeling analysis and experimental validation of a multi-turn pulsating heat pipe, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 159 (2024) 107990-107990, https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107990

[2] Jun Ishimoto, Supercomputing of Liquid Ammonia Atomization Characteristics in a Swirl Injector Nozzle, *Proceedings of ICLASS 2024, 16th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, June 23-27, 2024, Shanghai, China.

[3] Jun Ishimoto, Supercomputing of Cryogenic Fine Solid Nitrogen Particle Production Using Laval Nozzle for Physical Photo Resist Removal-Cleaning Technology, *Proceedings of the 29th*

International Cryogenic Engineering Conference, International Cryogenic Materials Conference 2024, July 22-26, 2024, Geneva, Switzerland.

2) **国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等**

[4] 石本 淳，混相流体ー構造連成解析による相変化を伴う弾性流体潤滑現象の解明，日本混相流学会 混相流シンポジウム 2024, , 富山大学五福キャンパス，富山市，2024 年 9 月 5 日（招待講演）

[5] Jun Ishimoto. Multiphase Flow Approach for Biological Thermodynamics and Carbon-Neutral Energy Sciences, *Twenty-first International Conference on Flow Dynamics, OS8: Advanced Physical Stimuliand Biological Responses*, Nov. 19, 2024. Sendai International Center, Sendai, Miyagi, Japan (Invited)

[6] Jun Ishimoto. Computational study of liquid ammonia atomization and spray characteristics in an injector nozzle, *International workshop on science and technology supporting energy conversion towards carbon neutrality*, July 2nd to 5th, 2024, University of Orleans, France

[7] 印宮 惇，石本 淳，液体アンモニアの相変化・拡散現象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 2024，富山大学五福キャンパス，富山市，2024 年 9 月 5 日．

[8] 金田太樹，石本 淳，クロスフロー型マイクロ水車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 2024，富山大学五福キャンパス，富山市，2024 年 9 月 5 日．

[9] 大島逸平，川原田光典，石本 淳，加熱する 2 次元ノズル壁面近傍における気泡生成の可視化，日本混相流学会 混相流シンポジウム 2024，富山大学五福キャンパス，富山市，2024 年 9 月 5 日．

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**

[1] **受賞名**：ASME Journal of Tribology 2023 Best Paper Award
受賞日時：2024 年 8 月 15 日
受賞対象論文：
Narumi, Y., Ishimoto, J., Kanayama, D., Kuribara, H., and Nakano, Y. (November 4, 2022). "Computational Fluid–Structure Interaction Analysis of Piston Pin Multiphase Elastohydrodynamic Lubrication With Unsteady Flow Channel Variation." ASME. J. Tribol. February 2023; 145(2): 021603. https://doi.org/10.1115/1.4055407.

[2] **受賞名**：2023 年度 日本混相流学会賞 論文賞
受賞日時・場所：2024 年 9 月 5 日，富山大学五福キャンパス
受賞題目：混相流体ー構造連成解析による相変化を伴う弾性流体潤滑現象の解明
受賞対象論文：
Narumi, Y., Ishimoto, J., Kanayama, D., Kuribara, H., and Nakano, Y. (November 4, 2022). "Computational Fluid–Structure Interaction Analysis of Piston Pin Multiphase Elastohydrodynamic Lubrication With Unsteady Flow Channel Variation." ASME. J. Tribol. February 2023; 145(2): 021603. https://doi.org/10.1115/1.4055407.

課題番号	J24Ly09
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	2 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

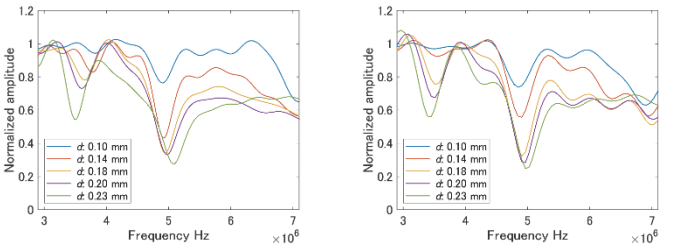
中本 裕之*†, 藤井 滉太郎*
内一 哲哉**††, Philippe Guy***
*神戸大学大学院システム情報学研究科, **東北大学流体科学研究所
***Laboratory of Vibration and Acoustics, INSA-Lyon
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

原子力発電所をはじめとする発電プラントにおいて高温，高圧の流体が流れる配管は，プラントシステムの重要な構成要素である．流体との機械的かつ化学的作用により配管内面には腐食が生じ，その進行により配管の破断リスクが高まる．このため特に配管の減肉と亀裂の検出に関して，これまで多くの研究がなされてきた．さらに，流体力学による配管減肉のシミュレーションも実施されてきた．これらの成果は互いに補完するものであり，さらに両者を高度化した融合，すなわち，配管内面の減肉の詳細な形状をモニタリングし，その結果により精緻なシミュレーションを実施することによって，破断リスク推定の高精度化が期待できる．本研究では，配管内面の減肉の詳細な形状のモニタリングを目指して，腐食により生じた配管内側の粗面で反射した超音波の周波数スペクトルにもとづいた粗面の形状推定方法の確立を目的とする．

2. 研究成果の内容

本研究では前年度より 1 つの面に矩形の繰り返しのきずを加工した試験体を計測している．試験体はきずのピッチや深さの異なる 27 種類であり，すべての試験体のサイズは縦×横が 40×40 mm，厚さが 20 mm である．今年度はその試験体内の超音波伝搬を Finite-Difference Time-Domain (FDTD)法を用いて計算した．計算は Graphics Processing Unit 上で実施した．実験で入射している超音波と同じ中心周波数のパルス波を，シミュレーションできずのない面から入射し，きずのある面で反射してプローブ位置まで伝搬した信号をデータとして保存した．反射信号を高速フーリエ変換によって振幅スペクトルに変換し，きずのない面で反射した信号の振幅スペクトルで正規化した．結果の一例を図 1 に示す．図 1 では実験の結果もシミュレーションの結果も 3.5 と 5.0 MHz で正規化した振幅が落ち込んでおり，落ち込みの大きさがきずの深さ (図 1 では d で表記) に影響している．この落ち込みはきずによって遅れて戻った超音波が原因であることが実験の結果より明らかとなっており，今回のシミュレーションにおいてその現象が再現できることを確認した．

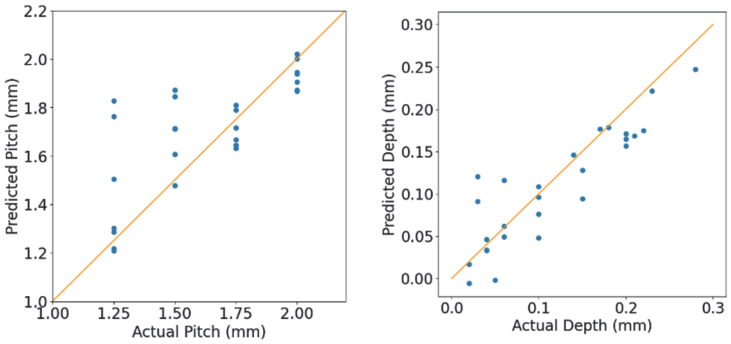


(a) 実験結果　　(b) シミュレーション結果

図 1：反射信号の振幅スペクトル

次にシミュレーションによってきずのピッチと深さをそれぞれ 1.00-2.05 mm, 0.01-0.29 mm の範囲で変化させた場合の 224 通りの反射信号の振幅スペクトルを算出した．この 2-8 MHz の周波数範囲を 48 等分した場合の 49 の振幅スペクトルを入力として受け付ける Deep Neural Network (DNN)を構成した．中間層のニューロン数は 128 と 64 の全結合とし，出力層は 2 つのニューロンでそれぞれピッチと深さを出力するよう，DNN をきずがない場合も含む 225 のシミュレーションデータで学習させた．実験データの振幅スペクトルを入力してピッチと深さを予測した結果を図 2 に示す．

ピッチの二乗平均平方根誤差は 0.21 mm であり，深さは 0.04 mm であった．きずが 0.1 mm 以下の浅い場合，きず深さの予測精度が悪くばらつきが大きいが，これは振幅スペクトルへの変化が小さいためと考えられる．しかしながら，ピッチと深さの両者ともに正の相関が得られており一定の予測の可能性が示唆された．



(a) ピッチ　　(b) 深さ

図 2：きずのピッチと深さの予測結果

3. 研究目標の達成状況

本研究では繰り返しの粗面が超音波の振幅スペクトルを変化させる現象をシミュレーションで再現した．また，DNN を用いてきずのパラメータを予測した．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

超音波反射波の信号を再現するシミュレーションを行い，粗面の形状パラメータであるきずのピッチと深さを予測した．今後は予測精度を高める条件を検討し，シミュレーションを用いて超音波の反射面での振る舞いを詳しく解析する．

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] H. Nakamoto, K. Fujii, P. Guy and T. Uchimoto: Effect of Periodic Rough Surface on Ultrasonic Pulse-echo Signal, *Proceedings of 2024 IEEE SENSORS*, Kobe (2024), pp. 1-4, doi: 10.1109/SENSORS60989.2024.10784767.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] K. Fujii, *H. Nakamoto*, P. Guy, T. Uchimoto: Analysis of Frequency Spectrum of Ultrasonic Pulse-Echo Wave Reflected on Periodic Rough Surface, *Proceedings of Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2024), pp. 1462-1464.

[3] 藤井滉太郎, 中本裕之, Philippe Guy, 内一哲哉: 超音波シミュレーションを用いた周期的粗面の形状推定, 第 25 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 (2024), pp. 2392-2393.

[4] 藤井滉太郎, 中本裕之, Philippe GUY, 内一哲哉: 周期的な粗面で反射した超音波の周波数スペクトルに対するエッジ波の影響, 第 68 回システム制御情報学会研究発表講演会 (2024), pp. 1081-1082.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J24Ly10
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	3 年目

回転二重円筒/円すい間に発生するテイラー渦の非線形分岐挙動と動的モード分解
Nonlinear Bifurcation and Dynamic Mode decomposition for Taylor Vortex in Gap between Rotating Two Cylinders/Cones

足立 高弘*†，谷田　開*，秋永 加奈*
Valery Botton**，小宮 敦樹***††
*秋田大学理工学研究科，**Lyon INSA
***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

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

本研究では，流れの解析にスペクトル・エレメント法を用いる．各要素内の速度と圧力に関 する関数の近似には，ガウス・ルジャンドル・ロバット点を通るラグランジュ多項式で近似する．それらを用いた弱形式にガラーキン法を用いて各要素の代数方程式を得る．このときガラーキン法における積分にはガウス・ルジャンドル・ロバット積分を用いる．

はじめに，Γ=3.75，η=0.5，Re=130 における流れの解析を行う．先行研究で，このパラメータにおいて，非定常解が発生するとされている．実際にスペクトル・エレメント法によって時間発展を調査する．断面中心における速度 u_r と時刻 t との関係を Fig.1 に示す．図からわかるように，速度 u_r はある周期で振動していることが確認できる．Fig.1 に示した速度 u_r の振動について，グラフの接線の傾きが 0 になる点に注目して平均的な角振動数を求めれば， ωs= 0.1280 となる．次に，振動の 1 周期分の平均値を求め，瞬時値から引くことでゆらぎを求める．その時の流れについて，商用可視化ソフト microAVS を用いて可視化した結果を Fig.2 に示す．これは, 速度の絶対値の 10%スカラー値をマッピングしたものである．1 4⁄T$_0$(T$_0$ は 1 周期)のとき，$r-z$ 断面に 4 つの角が貫通しているのに対して，2⁄4 T$_0$ のときは，6 つの角が貫通している．これが周期的な揺らぎの原因であると推測される．この流れについて，DMD および線形安定性解析を行う．

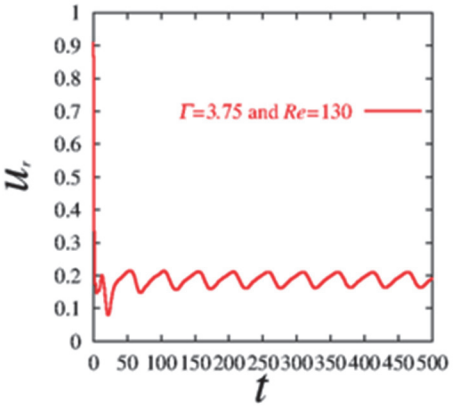


Fig.1 Time evolution for spectral element calculation

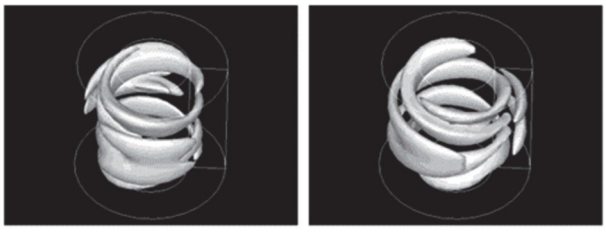


Fig.2 3D mapping (Micro AVS)

まず，特異値分解(SVD)を実施した結果を Fig. 3 に示す． 500 ステップのスナップショットデータを用意して取り上げるモード数を 20 として計算を実施する．縦軸を対数表示しているため，特異値の分布は連続的に見えるが，第 1 モードと第 5 モードの特異値を比較すると 10^{-5} 程度の絶対値の違いがある．その後固有値計算を実施し，DMD モード(固有値と固有関数の組)を求める．そして，それらの組を用いて，ある初期値から時間発展させた縮約モデルを構築する．この際，モデルは DMD モードと各モードに対応した振幅(重み)の総和で構成され，フロベニウスノルムが最も小さくなる組み合わせを貪欲法を用いて調査する．Fig. 4 は，振幅について，その絶対値が大きい順に並べた図である．この振幅が大きな DMD モードから幾つかを取り出し貪欲法を適用した結果を Fig.5 に示す．Fig.5 は，フルベニウスノルムと，その計算に用いたモード数との関係を示す．すなわち，Fig.5 において例えば N=5 の場合には，フロベニウスノルムを計算する際に 5 個のモードを用いていることを示す．5 個のモードの探索法

は貪欲法によるが，本研究ではその結果は Fig.4 で示される振幅の大きなモードから順番に選択する場合と一致した．また，選択の順番は線形安定性解析の結果との比較から，第一モードが定常モードであり，第二モード以降は振動の基本モードおよびその高調波モードの順番に並んでいることが明らかとなった．

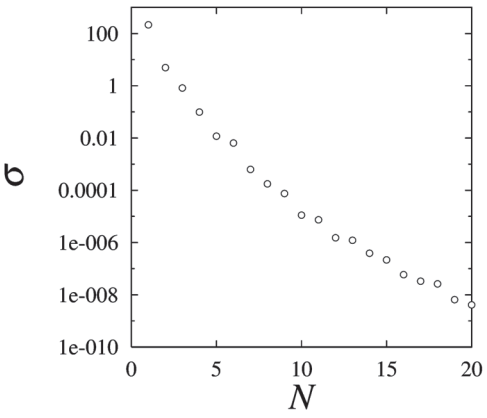


Fig. 3 SVD vs. number of Rank.

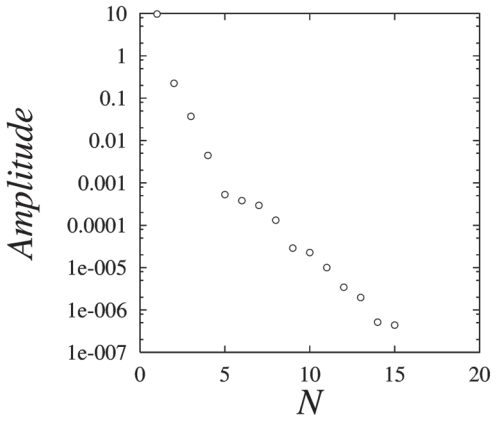


Fig.4 Amplitude of DMD vs. mode Number

3. 研究目標の達成状況

数値シミュレーションで得られた結果に関して，線形安定性解析で得られた最大不安定モードの(固有値・固有ベクトル)と，動的モード分解で得られた(固有値・固有ベクトル)との関連を明らかにしたいとの成果予想を立てていた．線形安定性および動的モード解析ともに固有値と固有ベクトルを導出し，各モードの素性を明かにすることができた．

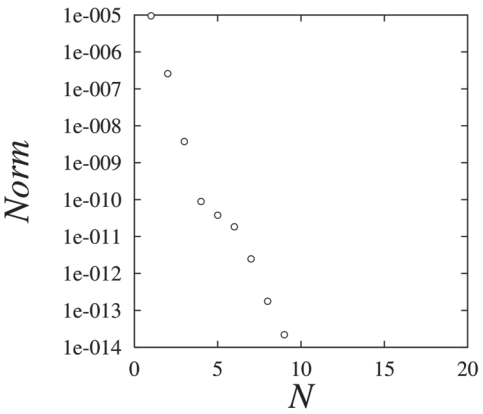


Fig. 5 Frobenius norm

4. まとめと今後の課題

今回の研究では，数値シミュレーションで得られた解を用いて DMD 解析を実施した． シミュレーションの解は，ノイズの影響がなく，今回の場合にはその特性良く知られたものを用いたため線形安定性と DMD の結果がよく一致した．今後は可視化画像や計測データなどノイズを含み特性が未知の状況を DMD と用いて明らかにしていきたい．

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] H. Yata, K. Akinaga, A. Komiya, and T. Adachi: Identification of Dominant Modes of Flow between Rotating Conical Cones by Linear Stability and DMD Analyses, *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2024).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等） なし

Project code	J24Ly11
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	3rd year

Active Control of Protein Mass Transfer by Membranes with Various Pore Patterns

Atsuki Komiya*†, Sébastien Livi**††
Juan F. Torres***, Ruiyao Zhu*, ****
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**IMP, INSA Lyon, Université de Lyon
***Australian National University
****Department of Mechanical Engineering, Tohoku University
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

This study focuses on the mass transfer control of protein, and quantitative evaluation of mass transport phenomenon by changing the pore size and patterning of membrane. To achieve an ideal crystal growth process under gravitational conditions, the authors are considering locally active control of mass flux of protein by using a functional membrane. The transient field of lysozyme in hindered diffusion is carefully visualized by changing the condition such as microchannel and pore size by using optical interferometer in this study. The capability and technique for active control of protein mass transfer are also discussed in this study.

2. Details of program implement

This study focuses on the hindered yet controlled mass transfer phenomenon by using several types of macro-pore membranes. In this 3rd year, we focused on the investigation of protein hindered diffusion through membranes with different pore sizes and explore the influence of neighboring concentration and wall surface characteristics on the diffusion behavior. By examining thro distinct proteins (BSA, Lysozyme and Pepsin), we aim to gain insights into their differential diffusion patterns and the different factor in influencing protein diffusion.

Figure 1 shows the results obtained for the three proteins in this study. It was found that both BSA and Lysozyme show same tendency of pore size dependency, however the Pepsin shows different trend. This result might include accidental errors during the experiment, so more precise measurement should be required in future. Evaluating this tendency roughly, the pore size is getting smaller, the transport phenomenon gets smaller in the small range of pore size (which is shown as REGION 1 in Fig.1). This will be caused by the effect of wall roughness of the pores. In case of small pore size, the ratio of wall surface to the unit volume of inside pore increases and molecule diffusion will be affected by the roughness of pore inner wall. The surface irregularities on the rough sidewalls hindered the movement of protein molecules, further impeding their diffusion through the membrane. This supposed effect is confirmed and pronounced in membranes with smaller pore sizes, where the increased sidewall area would create substantial obstacles for protein molecules to navigate. On the contrary, the pore size membrane is larger, the mass penetration is smaller if the pore diameter is larger than 100 μm (which is shown as REGION 2 in Fig.1). A monotonous decline in the penetrated mass rate was obtained. This indicates that membranes with larger pore sizes impose a higher hindering to protein diffusion.

The concentration fields between neighboring pores play a crucial role in hindering protein diffusion. The interference of these concentration fields leads to an increasing diffusion rate and mass transfer of proteins after passing through the membranes. In case of small pores size, the interference between neighboring pores would be expected to occur more frequently, thus increasing the amount of penetrated mass.

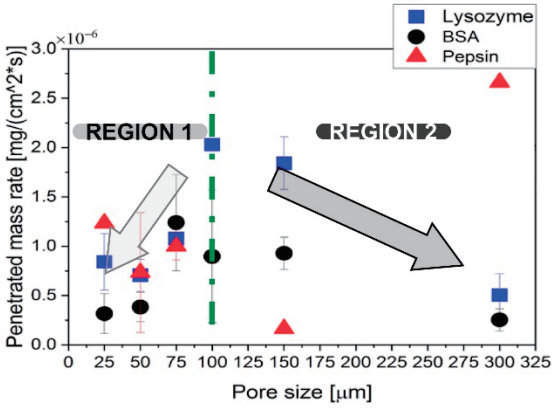


Figure 1: Dependencies of penetrated mass rate on pore size and types of proteins.

3. Achievements

We could continuously perform the experiment of protein diffusion control. The achievement level of this year could be evaluated at 90%. We have one invited lecture and one general presentation at international and national conferences. Through this collaborative research, the dependencies of molecular structure and macro-pore patterning are evaluated. Now we're preparing for the publishment of our findings.

4. Summaries and future plans

This study investigated protein diffusion control through the membranes with macro-pores and identified three key factors: 1) the effect of macro-pore size and theie locations on hindered diffusion process, 2.) two significant factors should be considered for diffusion control, 3) the pH value may play a role in the differential protein diffusion. The findings contribute to understanding protein diffusion mechanisms and membrane transport, also have implications for suppressing natural convection during protein crystal preparation and improving membrane-based 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] A. Komiya: Precise measurement of rapid and tiny heat and mass transport phenomena using high-speed phase-shifting interferometry, *Xi'an Jiaotong-Tohoku Joint Conference*, Xi'an, (2024), Invited.

[2] A. Komiya, J.F. Torres R. Zhu, S. Livi: Active yet precise control of protein mass transfer by membranes, *Proceedings of the 21st International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024)*, Sendai, (2024), pp.1467-1468, OS25-7.

3) Patent, award, press release etc.
(Patent) Not applicable
(Award) Not applicable
(Press release) Not applicable

Project code	J24Ly12
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd 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, ††Non-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 collaboration research, we have been developing experimental equipment for the precise visualization of thermal and concentration boundary layers. To achieve this point, we are applying a specially designed optical interferometer and specially designed ultrasound-inducer. In this year, we focused on the precise control of protein mass transfer by using pored membrane and local induced flow shown in Fig.1. Visualization experiments using a phase-shifting interferometer are performed, and prior to the study, the effect of pore size and membrane structure was evaluated. Several types of separated membranes were used. As opposed to free diffusion, the membrane pores are hindering the diffusion process. From the concentration profile, the penetrated mass rate in the water side of the membrane has been evaluated. The results show that the size of the pore as well as the size of the molecules are affecting the mass rate. To enhance mass transfer, the application of an ultrasound induced flow has been performed. In order to generate a flow in the 10 mm cell, an actuator called SAW (Surface Acoustic Wave) device has been used as shown in Fig.2. The resonant frequencies were either 30.3 MHz or 65.8 MHz. The waves are propagating at the surface of the solid substrate until it reaches the interface between air and water where the acoustic energy is transmitted to the fluid with a given angle. The attenuation of the acoustic field is then creating momentum, a flow usually called acoustic streaming.

Prior to showing the control of mass rate inside the diffusion cell, the acoustic streaming flow has been characterized in a bigger volume using PIV visualization. As shown in Fig. 2, the typical flow is a jet with a fixed angle with respect to the free surface. For moderate values of voltage on the SAW device, several cm/s of maximum velocity is reached around 10 mm from the location of the source. The jet is then

radially spreading while the velocity of its axis is decreasing.

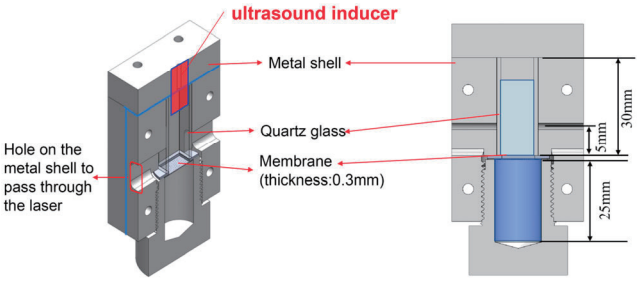


Figure 1: Schematics of diffusion cell installing membrane and ultrasound inducer

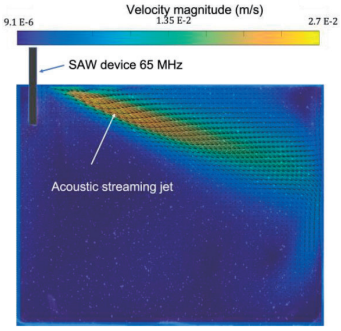


Figure 2: PIV result of ultrasound-induced flow

3. Achievements

At this moment, the achievement level of this year could be evaluated at 80%. One of the members of this collaborative research gave invited and keynote talks in international conferences, and we could start the visualization experiment of protein mass diffusion applying small ultrasound-induced flow. The double-degree student will perform the experiments, and the possibility of mass flux will be discussed.

4. Summaries and future plans

This study focused on the experimental evaluation of hindered diffusion process of protein. The results of experimental work show that the ultrasound-induced flow can generate a local weak flow and the diffusion field can be controlled by convective and diffusive mass transfer process. For future work, the authors will control the local flow and evaluate the hindered diffusion process.

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. Komiya: Precise measurement of rapid and tiny heat and mass transport phenomena using high-speed phase-shifting interferometry, *Xi'an Jiaotong-Tohoku Joint Conference*, Xi'an, (2024), Invited.

[2] A. Komiya, R. Zhu, V. Botton, S. Miralles: Enhancement of Protein Mass Transfer using Ultrasound Induced Flow and Macro-pore Membrane, *Proceedings of the 21st International Conference on Flow Dynamics (ICFD2024)*, Sendai, (2024), pp.1465-1466, OS25-6.

[3] A. Komiya: Resonance-driven Heat Transfer Enhancement in a Natural Convection, *The Third Pacific Rim Thermal Engineering Conference*, Honolulu, (2024), Keynote.

[4] 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) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

Project code	J24Ly13
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Carbon Diffusion in Iron Assisted by an Electric Field

Patrice Chantrenne*†, Takashi Tokumasu**††
*Université de Lyon, France
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In the metallurgical field, thermal treatment methods using Joule heating have gathered attention because they have the potential to avoid CO_2 gases emissions during processing, especially when performed by sustainable energy sources. When an electric current is applied to Fe-C alloys during these treatments, carbon atoms exhibit two kinds of behavior, thermal diffusion and electromigration. These behaviors interact with each other and then influence phase transformation phenomena. Therefore, it is important to analyze the mechanism of these phenomena in order to develop Fe-C alloys with desirable microstructures. So, the final purpose of this project is to elucidate the relation between the above-mentioned two phenomena and phase transformation phenomena. Specifically, this project focuses on the electric field dependence of the drift velocity of carbon atoms and its underlying mechanism, using molecular dynamics simulations.

2. Details of program implement

From our previous project, it was revealed that the drift velocity of carbon under an electric field—calculated from their average displacement—does not follow the Nernst-Einstein relation. The drift velocity increases nonlinearly. However, the underlying mechanism has not yet been elucidated. Therefore, in this project, the mechanism was elucidated using simulation methods. Molecular dynamics simulations (MD) were used as the primary simulation methodology. The embedded atom method (EAM) potential was used to model the interactions between iron atoms and between iron and carbon atoms. An additional repulsive potential was used for carbon-carbon interaction to avoid the aggregation of carbon atoms. As a result, eight carbon atoms were introduced randomly into the system. If the crystal structure changes, the energy barrier for carbon diffusion also changes, which in turn affects the drift velocity. Therefore, the radius distribution function (RDF) between carbon and iron was calculated to investigate the possibility of structural changes in the iron crystal surrounding carbon atoms under an electric field.

Next, to elucidate the mechanism behind the change in drift velocity, we developed an analytical model and then compared its predictions with MD simulation results obtained from the average displacement. The analytical model was based on Maxwell distribution function for the atom velocity due to thermal agitation. As of now, discrepancies exist between the predictions of the model and the MD simulation results under an electric field. Therefore, this analytical model is being refined to better match the simulation results.

3. Achievements

From the RDF results, it was found that the iron crystal structure does not change

with increasing electric field intensity (Fig. 1). This indicates that the structure change is not the reason why the drift velocity of carbon does not follow the Nernst-Einstein relation.

The analytical model was able to reproduce the characteristics of nonlinear increase in the drift velocity of carbon atoms. However, significant discrepancies remain between the results of analytical models and the MD results obtained from the slope of carbon displacement. Therefore, there is room for improving the analytical model. To clarify the reason why the drift velocity of carbon deviates from the Nernst-Einstein relation, the improved analytical model should be compared with the MD results.

4. Summaries and future plans

The change in the iron crystal structure was analyzed in order to clarify why the drift velocity, calculated from the slope of carbon displacement, does not follow the Nernst-Einstein relation. As a result, it was found that no structural change occurred, as the RDF remained unchanged with increasing electric field intensity (Fig. 1). To further investigate the reason, an analytical model based on Maxwell distribution function of the C velocity was developed and then compared with MD results obtained from the slope of the displacement. This model successfully reproduced the characteristic nonlinear increase in drift velocity. However, discrepancies remain between the analytical model and the MD results, therefore improvement of the model is necessary. As a future plan, the reason why the drift velocity deviates from the Nernst-Einstein relation will be reexamined after the model has been improved.

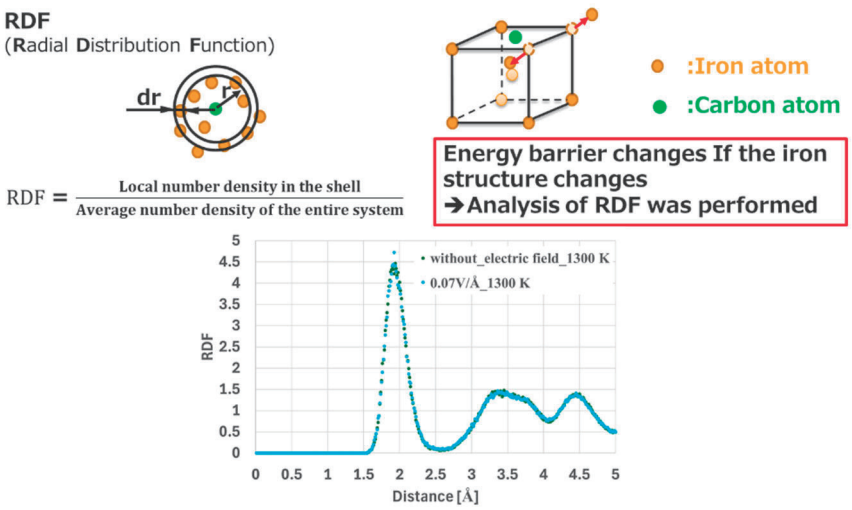


Fig. 1 The iron crystal structure during the simulation

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] Ryuta Onozuka, Patrice Chantrenne, Takashi Tokumasu: Analysis of the Drift Velocity Variation of Carbon in Steel under Electric Field, *Proc.21th ICFD*, (2024).

[2] Ryuta Onozuka, Patrice Chantrenne, Takashi Tokumasu: Molecular Analysis on Electric Field and Temperature Dependence of Electromigration in Fe-C Alloys, *Extended Abstracts of The Third Pacific Rim Thermal Engineering Conference*, (2024).

3) Patent, award, press release etc. 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	2024.10 ~2025.3
継続年数	1 年目

エネルギー有効利用における成熟技術間の橋渡し技術連成に関する研究集会の開催
Research Meeting on the Coupling of Developed Technologies in the Effective Use of Energy

小宮 敦樹*†，Chengwang Lei**††
*東北大学流体科学研究所，**The University of Sydney
†申請者，††海外コーディネータ

1. 研究目的

本プログラムでは，世界規模で直面しているエネルギー問題を熱の観点から捉え，既存技術を熱の時空間シフトの切り口から整理し，スマートグリッドの概念を踏襲した熱マネージメント技術に関する学際的な国際ワークショップの日本開催を目的とする．世界主要各国が個々に抱えるエネルギー問題を相互補完的かつ相乗効果的に解決するために，日本ーオーストラリア両国がハブとなるエネルギーに関する広範な国際研究ネットワークを若手研究者を中心に構築し，単独的研究では解決に困難なエネルギー問題を「統合流動科学」を学術的基盤とした研究コミュニティにより柔軟に解決していく．

2. 研究成果の内容

開催概要：

本ワークショップは，日本ーオーストラリア間での熱マネージメント技術に関する国際共同研究強化を目的に開催された．当初は二国間における単独的研究では解決に困難をきたすエネルギー問題に柔軟に対応すべく国際研究ネットワークを構築し，熱を時空間にシフトするという観点から整理した熱マネージメント技術確立を目的として研究集会を開催することにあったが，「エネルギー変換」や「水質浄化・脱塩化」といった共通研究キーワードが南アフリカ共和国の研究活動にも認められたことから，研究ネットワークのさらなる拡大を目的に，三か国間のワークショップとして開催した．

ワークショップでは，まずオープニングとして，プログラム代表者より本ワークショップの趣旨説明を行い，その後，統合流動科学国際研究教育センター長より IFS-GCORE についての紹介をいただいた．続いて 3 セッションに分かれて研究紹介が行われた．セッションでは三か国の若手を含む研究者・学生より 10 件の研究紹介が行われ，参加者による活発な議論が行われた．特に，オーストラリアで積極的に展開されている太陽熱の利用と海水脱塩化に関する研究においては，南アフリカ共和国の研究者にとって，非常に有用な知見であったようである．合わせて，日本での自然エネルギーの利用においては，オーストラリアのそれと比較して，規模の違いからそのままの利用は難しく，今後橋渡し技術について議論していく必要があることが確認された．ワークショップ終了時には，参加者全員で記念撮影を行った．

参加者による全体集合写真

開催日：
2024 年 11 月 21 日（木）10:00-16:30

開催規模：
23 名の参加，10 件の研究発表

3. 研究目標の達成状況

本プログラムで予定をしていた日ー豪間でのワークショップは計画通り開催され，併せて南アフリカ共和国のエネルギー関係の研究者にも参加いただいたことから，研究目標は十分に達成できたと言える．特に，当初予定していた日本ーオーストラリア間での再生可能エネルギーに関する基礎技術連成とそれに付随する諸問題の情報共有に加えて，南アフリカ共和国におけるエネルギー問題，特に水質浄化におけるエネルギー利用に関する情報も日本およびオーストラリアの研究者間に情報共有され，本プログラムで目的としていた「エネルギー有効利用における成熟技術間の橋渡し技術連成」が，三カ国間ではあるが十分に達成されたと判断できる．

4. まとめと今後の課題

本プログラムでは，日本ーオーストラリア間での熱マネージメント技術に関する国際共同研究強化を目的に日本でワークショップを開催し，各国におけるエネルギー利用に関する研究の情報共有を行った．若手研究者や学生による研究発表が行われ，グローバルな視点で解決していくべきエネルギー有効利用における問題点の共有化を図った．

今後の課題としては，今回共有化した問題点を各国のエネルギー事情に照らし合わせ，どのようなアプローチにより他国の技術が有効的に自国内で利用可能かを判断する必要がある．このために引き続き情報共有を図り，若手研究者を中心としたローカル研究コミュニティの形成を行っていく．

5. 交流成果

1) 学術的価値

上述の通り，本プログラムではオーストラリアの研究機関を含んだ三カ国間でのワークショップを開催し，「エネルギー変換」や「水質浄化・脱塩化」といったエネルギーの有効利用に関する研究発表および討論を行い，国際レベルでのエネルギーに関する諸問題を共有化した．参加した研究発表者は若手研究者からシニアまで幅広く，これまでに解決した研究課題とこれから行うべき研究の融合が図られ，目的に掲げたように，単独研究では解決に困難なエネルギー問題を，統合流動科学の視点に立脚した研究観点から解決していく準備が整ったことは，学術的に高い価値であると言える．

2) 卓越研究大学 KPI を踏まえた将来発展可能性

卓越研究大学の目標 I-A 重点 KPI として，若手研究者の Top10%論文数の増加および Top10%論文割合の増加が挙げられているが，今回のワークショップには多くの本学若手研究者および大学院生が参加し，各国のエネルギー問題を把握できたと認識している．このことから今後，若手研究者の論文数の増加が期待できるとともに，博士課程学生の修了時までの国際経験割合（海外留学）の増加も期待できる．

3) その他特筆すべき成果

本ワークショップで議論した内容を基軸として，最先端の研究開発につながるネットワークを構築する 2025 年度 Top のための ASPIRE の申請準備を行った．

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	2024.10 ~2025.3
継続年数	1 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 B. Dichiara**††
猪狩 涼*，Dylan Edmundson**，金子 泰*
*東北大学流体科学研究所
**College of Environmental and Forest Sciences, 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．簡単な構造にもかかわらず，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，これにより，従来よりも高出力化が得られることを実証した．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，電極構造，CNT 含有率などの影響を明らかにし，高性能化を実現している．しかしながら，その発電メカニズムについては十分に解明されておらず，更なる高性能化・実用化の上で大きな妨げとなっている．

本研究では，本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

① CNT 複合紙を用いた浸透流マイクロ発電の実証：

ワシントン大学を訪問し，先方で開発された CNT 複合紙に 30 μL の純水，塩酸溶液等を滴下することにより，0.25 V 程度の電圧が生じることから，TEPG 効果が得られることを確認した．様々な CNT 含有量のパルプに対して実験を行い，数値モデル検証のためのデータを蓄積した．さらに数値シミュレーションにおいて必要となる溶液の浸透速度については，装置上面にカメラを設置し，界面位置の時間変化から算出した．

② イオン輸送シミュレーションによる発電機構解明：

TEPG における発電機構解明に向け，対流・拡散近似を用いた非定常一次元シミュレーションモデルを構築した．さらに，図 1 に示す TEPG の等価回路を構築し，イオン輸送シミュレーションと組み合わせることで，発電機の出力特性を評価することに成功した．本等価回路は，CNT 複合紙の湿潤および乾燥領域から成り，それらが直列で接続されているものとする．湿潤領域においては，TEPG 効果により生じる起電力と溶液内の抵抗，湿潤時の

CNT・パルプの合成抵抗から構成されるものとし，乾燥領域においては，乾燥時の CNT・パルプの合成抵抗のみから成るものとした．

図 2 に純水を滴下した際の開放電圧の経時変化を実験値と比較して示す．実験，数値シミュレーションともに滴下直後に開放電圧が生じ，400 秒に渡って一定の電圧が得られている．シミュレーションでの開放電圧の定常値は実験値の約 30%にとどまっているが，これは，パルプからのプロトン脱離を考慮していないためであり，これを考慮することにより，実験値とほぼ同程度の開放電圧が得られることが示された．

図 3 に純水滴下から 5 秒後における，(a)イオン流束および H_3O^+濃度分布，(b)電位および導電率分布をそれぞれ示す．なお，図中の一点鎖線は界面位置を示している．界面近傍において H_3O^+の乾燥領域への拡散フラックスが支配的となり，界面近傍においては正の空間電荷が形成される．界面近傍での溶液内の導電率の低下と空間電荷により，起電力が生じることが明らかとなり，本発電メカニズムの解明につながった．

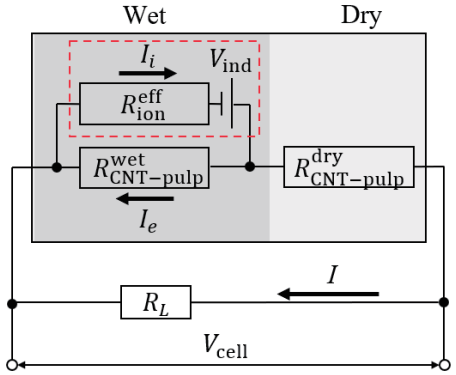


図 1：TEPG の等価回路モデル

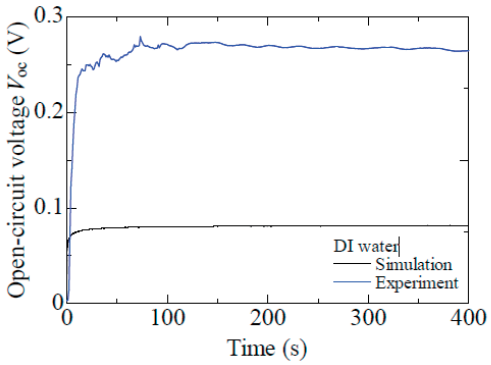


図 2：開放電圧の経時変化

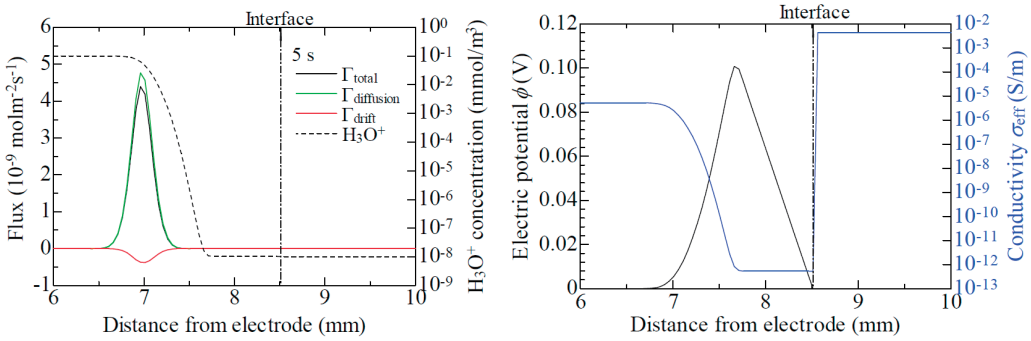


図 3：純水滴下から 5 秒後における TEPG 内の
(a)イオン流束および H_3O^+濃度分布，(b)電位および導電率分布

3. 研究目標の達成状況

本研究により，ワシントン大学との共同研究が促進し，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）に対する数値シミュレーションモデルが構築された．新たに TEPG の等価回路モデルを提案し，数値シミュレーションと組み合わせることにより，TEPG の発電メカニズムの解明に成功し，本手法により，TEPG の発電特性を評価することが可能となった．以上の成果より，本研究目標は概ね達成されたと言える．

4. まとめと今後の課題

本共同研究プログラムにより，ワシントン大学との盤石な協力体制を構築することができた．本研究により得られた研究成果は論文としてまとめ，国際誌に投稿済みである．今後は，CNT 含有量に対する発電特性を明らかにするとともに，最適条件を示すことで TEPG の更なる高性能化を目指す．さらに，複合紙における CNT の不均一性が発電性能に与える影響を明らかにすることで実用に資する知見を創出する．

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] 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.

[2] 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.

[3] 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）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.

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	2024.10 ~2025.3
継続年数	1 年目

偏光比を考慮した SLIPI による液体アンモニア噴霧液滴径計測
Measurement of Droplet Diameter of Liquid Ammonia Spray using Polarization Ratio with SLIPI

早川 晃弘*†，Christine Mounaïm-Rousselle**††
Yi-Rong Chen*，本田 恵人*，
Camille Hespel**，Utkarsha Sonawane**
*東北大学流体科学研究所，**University of Orléans
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

アンモニアは水素エネルギーキャリアとしてのみならずカーボンフリー燃料としての利用が期待されている．アンモニアは通常ボンベ内に液相で貯蔵されている．そのため，燃焼器に燃料であるアンモニアを液体状態で直接供給することができれば，特に大型燃焼器において懸念される大規模な蒸発装置を必要としないことから，コスト面のみならず，燃焼器の応答性向上の点から優れている．液体燃料を直接供給する場合，液体燃料の微粒化過程が燃焼特性に影響を及ぼす．特に液体アンモニアは，噴射過程における急激な圧力低下のため減圧沸騰が生じ，これが微粒化過程に大きく影響する．このような液体アンモニアの微粒化過程を評価する際に，アンモニア噴霧形状および液滴径分布の計測は重要となる．これまで流体科学研究所においては，SLIPI（Structured Laser Illumination Planar Imaging）法によって多重散乱を抑制した上で液体アンモニア噴霧構造の計測を行ってきた[1]．近年，Stiti らは SLIPI 法を発展させ，レーザー光の偏光比に基づいて，液滴粒径の定量化が可能である事を示した[2]．そこで本研究では，レーザー光の偏光比を用いる事による液滴粒径計測手法を液体アンモニア噴霧に対して適用する事により，液体アンモニア噴霧構造の理解を深める事を目的とする．

2. 研究成果の内容

本研究は，オルレアン大学に設置されている容積が 4.2 L のステンレス製定容燃焼容器内に取り付けられているインジェクタから噴射される液体アンモニアを対象とした．図 1 は本研究における光学系の模式図である．

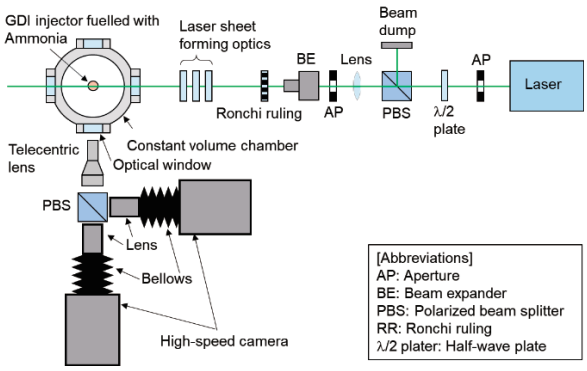


図 1　SLIPI-Polarization ratio technique developed at University of Orléans.

直径が 70 mm の観測窓を通して噴霧が観察可能である．実験においては，ヘリウムを用いてアンモニアの圧力を上昇させ，噴射圧力 75 bar において液体状態で噴射した．噴射期間は 1000 μs であり，EFS 8427 インジェクターパワードライバーを用いて厳密に制御した．SLIPI 法で用いるレーザー光源として 532 nm のパルスレーザー光を用いた．図 1 に示す光学系を通してシート光を形成した．また所定の幅と厚みを有する縞状のレーザー光が形成された．このような縞構造はロンキールーリングを用いて形成した．レーザー光は燃料インジェクタの中心を通るように調整した．また変更の方向を制御するために，λ/2 波長板を設置した．本研究では，間欠噴霧を観察することを目的とするため，2 台の高速度カメラ(Phantom V1611)を用いて液体アンモニアからの散乱光を撮影した．散乱光のうち２方向成分（S-pol および P-pol）を検出するために，2 台の高速度カメラを図 1 にように互いに直交して配置した．カメラの前には偏光ビームスプリッタ(PBS)を設置した．偏光比はそれぞれのカメラで撮影される各液滴からの信号強度により得られる．本研究で用いた偏光比法は蛍光色素などを加えることなく液滴分布が計測できるため，大変有用である[2]．元画像が十分に良いコントラストを有する縞状構造となってはいないものの，図 2 に示すように S-pol と P-pol の画像に対して後処理を行った．本研究で行った実験においては，縞状の成分の情報のみを抽出する事が出来なかった．そのため，コントラストが一層明確な縞状のレーザーシートを用いた実験を行う事が出来るように，光学系を見直す必要がある．

3. 研究目標の達成状況

上述のように，本研究においては十分なコントラストを有するレーザーシート光を形成する事が出来なかったため，液滴分布の取得が困難であった．しかしながら実験方法は確立されているため，今後は DOE（Diffractive Optical Element）などを用いる事によってレーザーシートの縞状構造の品質向上を実現する事で目的を達成できるものと考えられる．

4. まとめと今後の課題

本共同研究により，偏光比を利用する SLIPI 法を用いて液体アンモニア噴霧の液滴径分布を算出するための手法を確立する事ができた．引き続き液滴分布の計測に向けて光学系の改善などを継続して実施する．

5. 研究成果

1) **学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）**
NA

2) **国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等**
NA

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**
（特許）NA
（受賞）NA
（マスコミ発表）NA

参考文献

[1] H. Yamashita, A. Hayakawa, K. Oku, S. Colson, G. Reibel, Y.-R. Chen, K.D.K.A. Somarathne, E.C. Okafor, T. Tsujimura, S. Ito, M. Uchida, T. Kudo, H. Kobayashi, Fuel 371 (2024) 131833.

[2] M. Stiti, S. Garcia, C. Lempereur, P. Doublet, E. Kristensson, E. Berrocal, Opt. Lett. 48 (2023) 4065-4068.

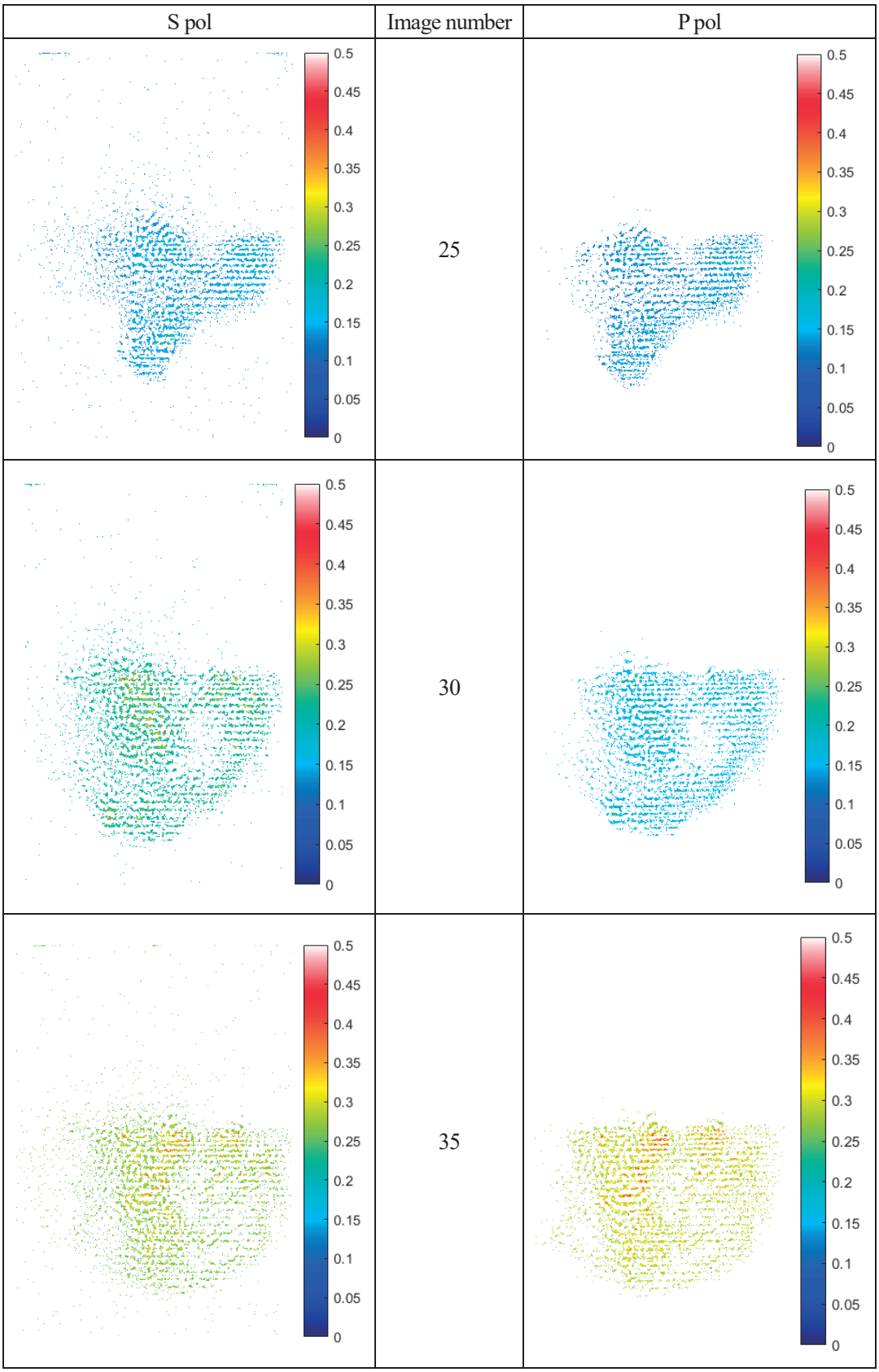


図 2　Post-processed images of ammonia spray under atmospheric temperature and pressure ambient conditions.

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	2024.10 ~2025.3
継続年数	1 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 liquid ammonia spray will be examined using the multiphase Lagrangian–Euler approach, considering chemical reactions in the NH_3 gas phase.

2. Contents of Research Results

Figure 1 shows the numerical calculation results for the atomization and spray flow characteristics of LNH_3 (Liquid Ammonia). It can be seen that a swirl flow of LNH_3 is formed inside the nozzle, and that the formation of a conical liquid film and the growth of liquid film instability are promoted immediately after the jet emerges from the aperture, causing the breakup and atomization of the LNH_3. Furthermore, it can be seen that the evaporation and diffusion of the sprayed droplets of LNH_3 are promoted downstream. 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 is also found that thepressure boundary conditions (pressureInletOutletVelocity) improve jet stability. The Hertz-Knudsen model provides consistent evaporation patterns matching physical expectations.

Focus on the internal nozzle flow chracterestics, the liquid-to-vapor phase change of LNH_3 due to flash boiling occurs at the nozzle throat section. 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 the effects of diffusion and the suppression of heat exchange between the liquid droplets and the surrounding gas phase.

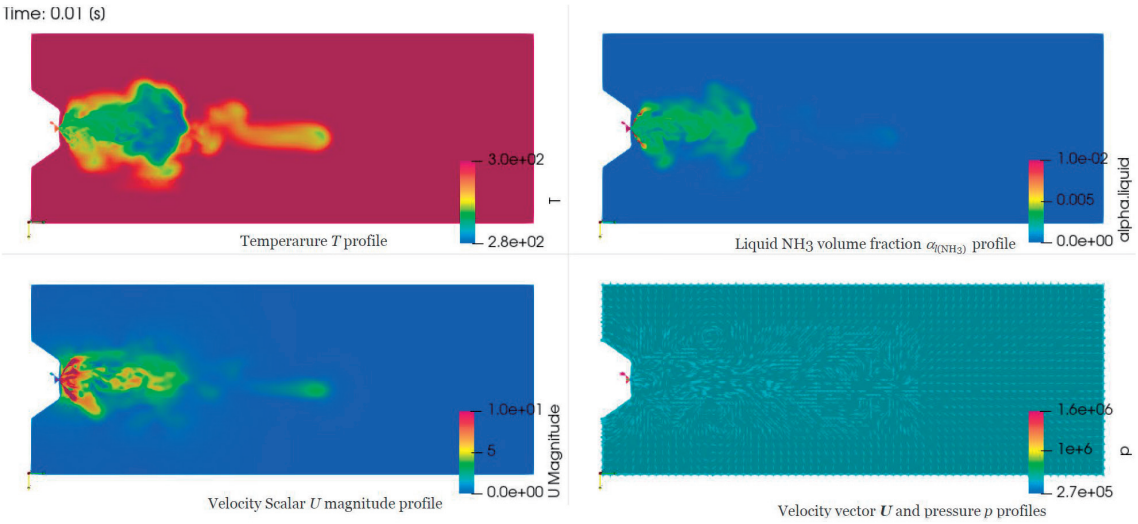


Figure 1 Instantaneous atomization and spray flow characteristics of LNH_3

3. Progress toward research objectives

This study aimed to develop a numerical framework for analyzing the time histories of flash-boiling characteristics during the primary breakup of liquid ammonia, with particular emphasis on clarifying the temperature depression associated with the liquid-to-vapor phase change during atomization. Through the present numerical investigations, the essential features of flash boiling in the primary breakup regime were successfully captured, and the temporal evolution of temperature reduction during phase transition was quantitatively reproduced in a physically consistent manner. While certain fine-scale aspects of droplet fragmentation and localized phase-change dynamics remain to be further refined, the core objectives of the proposed computational approach were largely fulfilled. Overall, the outcomes of this study demonstrate that approximately 80% of the originally defined research goals were achieved, thereby validating the effectiveness of the numerical methodology and establishing a solid foundation for subsequent model enhancement and extended parametric 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. As a next step, these numerical results will be systematically compared with the corresponding atomization characteristics of conventional gasoline fuel to clarify the distinctive features of liquid ammonia sprays.

Furthermore, a detailed computational thermodynamic study will be conducted to quantitatively assess the influence of flash boiling on atomization behavior. 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 results

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

[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, Momtana, 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

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

[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 Rotaiting 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	2024.10 ~2026.3
継続年数	1 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**††，丸田　薫*
*東北大学流体科学研究所，**National University of Singapore
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

カーボンフリー燃料として，アンモニア（NH_3）は脱炭素化において注目されている．しかし，その固有の燃焼特性（遅い層流燃焼速度，低い反応性）が主要な課題である．自動車エンジンでの利用を目的とした研究も進められている．火花点火式エンジンにアンモニアを使用する際，特にアンモニアと水素との混合を用いた研究が進められている．自動車エンジンの開発にはノッキングの理解が重要だが，NH_3/H_2 を用いた火花点火エンジンでは十分に理解されていない．そこで本研究ではシンガポールで実施されている国家プロジェクト HYCOMBS（流体研も参画）で共同研究を行っているオルレアン大学の Christine Mounaïm-Rousselle 教授と共に研究を進めることとした．

最近，定容容器実験と 1 次元・2 次元 DNS [1-4]の組み合わせにより，着火および火炎伝播ダイナミクス，そして一次基準燃料（PRF）に対するエンドガス自着火に関する補完的な知見が得られている．このような枠組みは，カーボンフリー燃料としてのアンモニアの実用性評価に有用であると考えた．そこで，本研究では以下のアプローチを実施した：単気筒 SI エンジンを 90 vol.% NH_3 / 10 vol.% H_2 の理論混合比混合気で運転し，2 つのエンジン回転数（1000 及び 2500 rpm）で実験を実施した．ノッキングの発生と強度は，異なる点火時期を設定することで変化させた．未燃ガスの圧力及び温度履歴は，Stagni et al. 2023 [6]の機構を用いた 0 次元 2 ゾーンモデル（ANSYS Chemkin PRO）から抽出した．1 次元 DNS アプローチは，火花点火から反応波を追跡することでノッキングの進展を解明した[1,2,4].

2. 研究成果の内容

実験を，Orleans 大学の 0.5 L 単気筒 PSA-DW10 ディーゼルエンジンにより実施した．本研究では，ディーゼルインジェクターを NGK J 型スパークプラグ（コイル持続時間 2 ms）に置き換えたものを使用し，理論混合比 90% NH_3/10% H_2/空気混合気で運転できるようにした[5]．エンジンは圧縮比 16.4:1，フラットトップピストンを持つ．エンジン回転数は電動モーターを用いて 1000, 1500, 2000 または 2500 rpm と設定した. 空気流量は Brooks 社製の質量流量計で調整されている．液体アンモニア（Air Liquide 社, 純度 99.96%）は水素と混合される前に気化して実験を実施した．気体 NH_3 及び H_2 の流量は，高純度水素（99.99%，Air Liquide 社）とともに，Brooks 社製熱式質量流量制御器（精度±1%）で制御されている．吸気，排気，筒内圧力は，100 サイクルにわたり 0.1 クランク角度（CAD）分解能で記録した．生の圧力信号 P に対して，移動平均を適用して平滑化した圧力 $\tilde{P}$ を得た．フィルタウィンドウの要素数は Fp/Fs として定義され，ここで Fp は筒内の固有共振周波数（16.7 kHz）を，Fs はサンプリング周波数である．発熱速度（HRR）は，燃

焼期間中に比熱比を 1.29 と仮定して計算した．壁面熱伝達は Hohenberg の相関式[7]を用いてモデル化した．燃焼質量割合（BMF）の変化は，累積 *HRR* を総投入エネルギーで正規化することで得た．計算された BMF から，ANSYS-Chemkin Pro を用い，0 次元 2 ゾーンモデル（2ZM）を用いて温度・圧力を計算した．ノッキング強度 KPP は，測定された筒内圧力信号 P と，フィルタ処理した信号（$\tilde{P}$）との間のピーク間差として，式(1)のように定義した．

$$KPP = max(P - \tilde{P}) - min(P - \tilde{P}) \quad (1)$$

平均ノッキング強度 KPP_{avg} は，100 エンジンサイクルにわたる KPP 値の平均として決定した．ノッキングの発生は，*KPP* が予め定義された閾値 KPP_{limit} を超えた場合に判定される．

1 次元直接数値計算を，東北大学の自社開発コード COGNAC [1, 2]を用いて実施した．対称性より，4 cm の長さに対応する領域の半分のみを計算した．境界条件は断熱壁として設定し，右端は対称境界として扱った．より詳細な説明は Moriyama et al. 2025 [4]に記載がある．計算には，化学反応機構として Stagni ら[6]のものを用いた．初期条件は 900 K，65 atm とし，左境界から 2.5 mm の位置にある直径 1 mm，最大温度 1200 K のホットスポットを設定することで点火を模擬した．

実験により得られた結果を図 1 に，計算により得られた結果を図 2 に示す．これらは，2ZM と DNS の間の全体的な良好な一致を示している．ノッキング発生時の圧力は両シミュレーションで非常に類似している．さらに，1 次元 DNS における圧力振動は，ノッキング発生直後の 2ZM 最大圧力とほぼ同じレベルで生じる．同様に，1 次元 DNS における温度変化は 2ZM の温度変化と密接に一致し，同等のピーク値に達する．実験及び両シミュレーション手法からのノッキング発生時の未燃ガス条件を表 1 にまとめた．図 3 は，Hurault et al. [5]により提案された 3 つのゾーンに分割された未燃ガス中の主要化学種の変化を示している．NH_3/H_2 燃料のノッキング進行は同様に初期化段階，ノッキング前段階，ノッキング段階に分類される．2 つの異なるシミュレーションアプローチ間の非常に良好な一致は，アンモニア/水素ノッキングを予測する 1 次元 DNS アプローチの堅牢性を実証している．

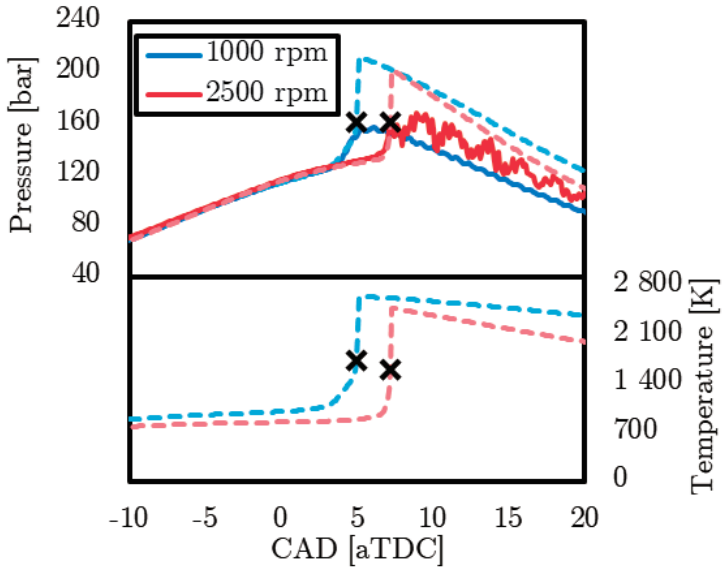


図 1. 実験により得られたエンジンシリンダ内の圧力変化履歴と，後処理により推定された温度の変化履歴．マーカーはノッキングの発生を示す．

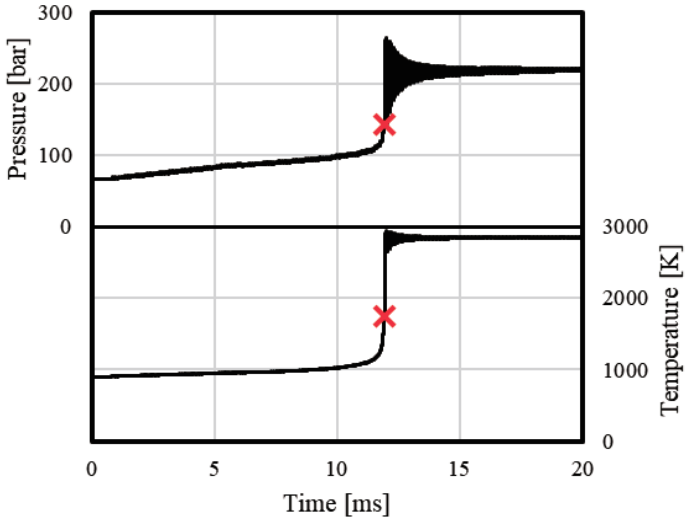


図 2. 直接数値計算により得られた，温度，圧力履歴．マーカーはノッキング発生を示す．

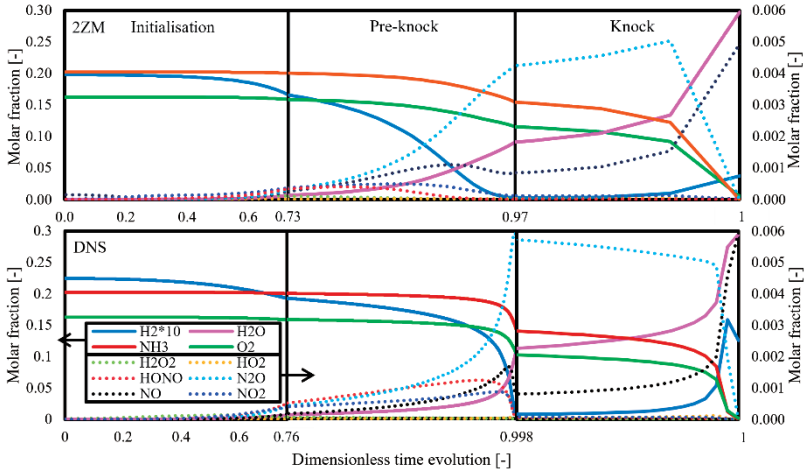


図 3. 実験と直接数値計算により得られた化学種のモル分率の時間履歴．

表 1：ノック時における未燃部の圧力・温度比較

		CAD	P [bar]	*Tu* [K]
1000 rpm	Exp	5.35	156	/
	2ZM	5	162	1745
2500 rpm	Exp	7.35	158	/
	2ZM	7.2	161	1604
1D DNS		/	140	1753

参考文献

[1] Y. Morii, A. K. Dubey, H. Nakamura, K. Maruta, *Combust. Flame*, 223, (2021), 330–336.

[2] Y. Morii, A. Tsunoda, A. K. Dubey, K. Maruta, *Phys. Fluids,* 35 (8), (2023), 083604.

[3] Y. Yasutake, K. Misono, Y. Suzuki, T. Naiki, M. Watanabe, H. Moriyama, Y. Morii, A. Tsunoda, K. Maruta, *SAE Technical Paper*, 2025-01–0391, (2025).

[4] H. Moriyama, Y. Morii, A. Tsunoda, Y. Yasutake, K. Misono, Y. Suzuki, T. Naiki, M. Watanabe, K. Maruta, *SAE Technical Paper,* 2025-01–0392, (2025).

[5] F. Hurault, P. Bréquigny, F. Foucher, C. Mounaïm-Rousselle, *Proc. Combust. Inst*., 41, (2025), 105901.

[6] A. Stagni, S. Arunthanayothin, M. Dehue, O. Herbinet, F. Battin-Leclerc, P. Bréquigny, C. Mounaïm-Rousselle, T. Faravelli, *Chem. Eng. J.*, 471, (2023), 142544.

[7] G. Hohenberg, *SAE Technical Paper*, 790825, (1979).

3. 研究目標の達成状況

本研究により，実験と直接数値計算の比較がおこなわれ，その良好な一致が示された．展望として，理論モデルの適用可能性をさらに探っていく．また，異なる条件における比較も予定する．

4. まとめと今後の課題

本研究は，実験測定，2 ゾーンシミュレーション，及び 1 次元 DNS を組み合わせて，理論混合比 90%NH_3/10%H_2/空気混合気を用いた火花点火式エンジンにおけるノッキング現象を調査した．0 次元 2 ゾーンモデルはノッキング発生を正確に再現する一方，1 次元 DNS は局所的な自着火事象の空間的・時間的変化を捉え，ノッキング現象のより詳細な情報を提供した．両シミュレーションアプローチは，ノッキング発生時の圧力と温度において実験値との良好な一致を示し，モデリング枠組みの堅牢性を確認した．さらに，ノッキングの進展過程におけるモル変化は，両手法でほぼ同一である．本研究は，カーボンフリー燃料であるアンモニア燃料を用いたノッキング現象の理解において，低次元モデリングと DNS の有効性を実証した．これらの結果は，持続可能な発電・輸送のためのより清浄な水素支援アンモニア燃焼システムの開発を支援する．今後も HYCOMBS をベースにシンガポール国立大学（NUS）の Haugwei Zhang 教授やケンブリッジ大学の Epaminondas Mastorakos 教授とも連携し，アンモニアの実用エンジンに資する研究を進める予定である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Florian Hurault, Toshihiro Fukaya, Akira Tsunoda, Hinata Moriyama, Fabrice Foucher, Christine Mounaïm-Rousselle, Youhi Morii, Kaoru Maruta, 1D DNS Investigation of Knock Behavior in Ammonia–Hydrogen Spark-Ignition Engines, *Proceedings of the Combustion Institute,* **UNDER PEER REVIEW**

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Florian HURAULT, Fabrice FOUCHER, Pierre BREQUIGNY, Christine MOUNAÏM-ROUSSELLE, Hinata MORIYAMA, Toshihiro FUKAYA, Youhi MORII, Kaoru MARUTA: Knocking Processes in NH3/H2 Engine, *International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2025).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）（マスコミ発表）

特になし

2. 研究成果報告書
＜リーダーシップ共同研究＞

課題番号	J24L004
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2024.4 ~2025.3
継続年数	1 年目

ナノ構造体の組成が抗菌・殺菌性へ及ぼす影響評価

Antibacterial and Bactericidal Properties Dependent with Surface Component of Nanopillars

伊藤　健*†，大堀 大介**††
*関西大学システム理工学部，**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

透明なセミの翅には比較的規則的なナノレベルの突起物が存在している．私達は，このナノレベルの突起物を「ナノスパイク」と呼び，ナノスパイクの作製法とその機能について研究を実施してきた．2012 年にナノスパイクには殺菌・抗菌作用があるということが発見された．殺菌とは文字通り，細菌を死滅させる効果を言い，抗菌とは菌の増殖を防ぐ効果を言う．ここでは，殺菌作用により菌が死滅することで抗菌作用も示すため，殺菌・抗菌作用と併記している．このメカニズムは，ナノスパイクに付着した細菌の膜が引き延ばされることで膜が破れ，生命活動を維持できなくなるため菌が死滅すると推測されている．つまり，物理的な作用によって引き起こされる殺菌作用と考えられているが，メカニズムの詳細は明らかになっていない．しかしながら，これまでの化学的抗菌剤とは全く異なる原理であるから，化学的抗菌剤に対する耐性を持つ細菌への殺菌・抗菌効果も期待できる．そのため，様々な研究者から人工的なナノスパイクの作製法とその殺菌・抗菌性の報告がなされている．

私達のグループではこれまでに，Si および樹脂のナノ構造体を作製し（図 1），その殺菌・抗菌性を評価してきた．これまでの研究は主に，構造体の寸法が殺菌・抗菌性に与える影響を評価してきたが，構造体の物理化学特性，つまり，濡れ性，導電性，硬さ，化学組成などが与える影響については研究されてこなかった．そこで本研究では，ナノ構造の形状を同一にしたときに，その表面に様々な特性を持つごく薄い膜をコーティングすることで物理化学的性質を変化させ，それによる殺菌・抗菌効果を評価することで，材料が物理的殺菌・抗菌性に与える影響を把握し，人工材の開発に役立てることを目的とする．

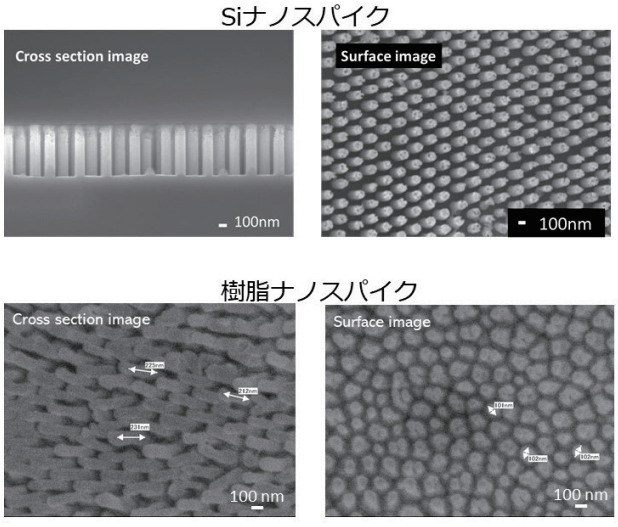


図 1　関西大学で作製したナノスパイク（上：シリコン，下：樹脂）

2. 研究成果の内容

東北大学流体科学研究所で所有する原子レベルの薄膜を付与できる ALD（原子層堆積）を用いて，樹脂ナノ構造体の表面に約 10 nm の HfO_2 膜を形成させ，その加工により形状に変化を与えないか，その加工による物性の変化や抗菌効果の評価を行った．

図 2 に加工後の電子顕微鏡(SEM)像(左)，原子間力顕微鏡(AFM)像（中央）及び AFM による弾性率マッピング像（右）を示す．図 2 左，中央から薄膜は構造に対して追随性よく堆積しており，ナノ構造の形状が維持されていることがわかる．また，AFM 像から，元来ナノ構造体の直径が 100 nm であったの対し，計測された値は 120 nm であったことから，直径が 20 nm 増加したことが確認できた．これは，成膜時の厚みと完全に一致したことを意味する．さらに，弾性率の測定結果から，ナノ構造体のヤング率は 10.5 GPa であり，元の値である 0.6 GPa の 15 倍以上になったことが明らかとなった．

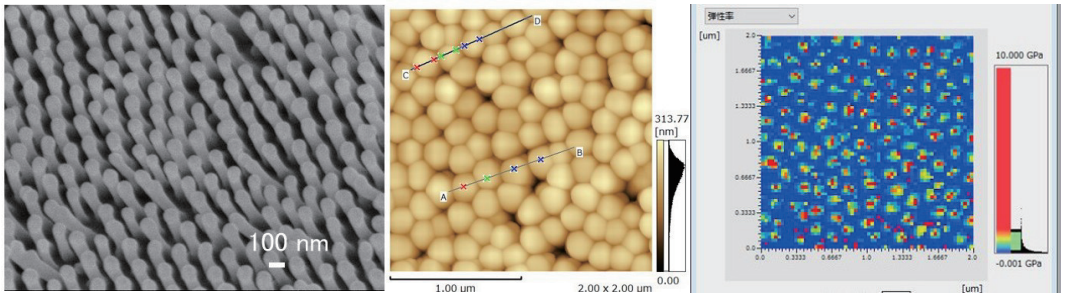


図 2：原子レベルの HfO_2 薄膜が付与されたナノ構造体の電子顕微鏡(SEM)像（左），
原子間力顕微鏡(AFM)像（中央），および弾性率マッピング像（右）

次に，このサンプルを用いて JIS Z2801 を参考にした大腸菌に対する抗菌試験を実施した．大腸菌接種時の濃度は OD600=0.1 とし，24 時間静置した後に大腸菌を回収し，その生菌数をカウントした．また，比較のために無加工（フラット）な材料表面での生菌数もカウントした．生菌率は 24 時間静置後の生菌数を滴下後の生菌数で除し，100 を掛けた数値である．

その結果，ナノ構造の無いフラットな表面での生菌率の平均値(N=3)が 1.28 %であったのに対して ALD 処理を行ったナノ構造体の生菌率の平均値(N=3)は 0.0669%となった．つまり，HfO_2 膜の付与により生菌率は約 1/20 に低下したため，抗菌性が発現したと考えられる．この結果は，弾性率の向上のため，もしくは表面が親水的に変化したためなど様々な要因が考えられ，さらなる実験が必要と言える．

3. 研究目標の達成状況

ナノ構造の形状を変化させず，かつ表面の物性，物理化学的性質を変化させるために ALD を用いるという本研究の提案はかねがね達成できた．

4. まとめと今後の課題

これまでの申請者の研究から，弾性率の向上が抗菌性を高めることがわかっている．しかし，今回の共同研究から弾性率が大きく向上したにも関わらず，生菌率が 1/20 程度に留まっていることから，さらなる抗菌性向上のためには弾性率以外に何がキーファクターになるかを見極める必要がある．

5. 研究成果

なし

課題番号	J24L026
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	3 年目

応力降下量と，観測に基づくせん断応力の直接比較
Direct Comparison Between Stress Drop and Resolved Shear Stress

椋平 祐輔*†，吉光 奈奈**††
*東北大学流体科学研究所
**京都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

スイスのバーゼル能動的地熱開発（EGS）では，坑内計測による地殻応力の測定とボアホール微小地震観測が行われている．直接計測により推定された地震発生時のせん断応力と，地震波形から推定した応力降下の比較は通常困難であるが，バーゼルにおける観測データを使えば両者の比較・検討が可能となり，注入誘発地震のジオメカニカルパラメータとせん断応力の関係を明らかにすることができる．解析ではまず微小地震記録のスペクトルと理論スペクトルを比較することで地震発生前後の応力降下量と震源パラメタを推定し，次にこの値を直接計測されたせん断応力と比較する．

2. 研究成果の内容

S 波到達時から 1.024 秒を切りだしてスペクトルを計算し，積分により変位スペクトルを得た．解析に利用した周波数帯は 1-200 Hz である．Brune (1970)の震源モデルを用いて観測から得られた変位スペクトルに対して理論スペクトルをフィッティングし，スペクトル形状を規定する 2 つの震源パラメタを推定し，得られた値から応力降下量を求めた．さらに別途推定してあるジオメカニカルパラメータとの比較を行った．

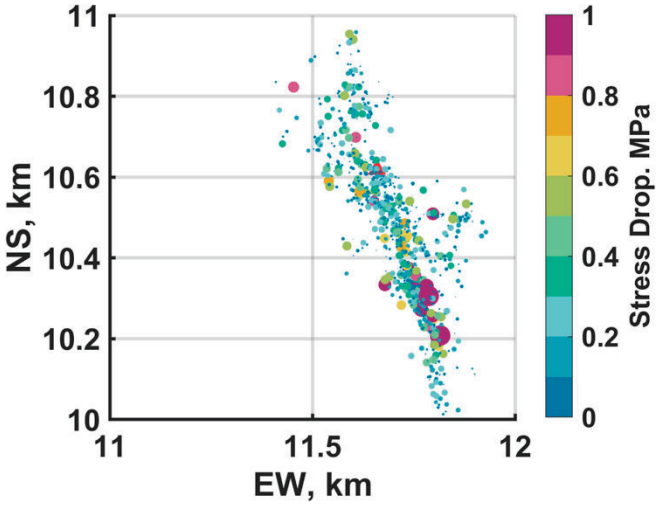


図 1：各微小地震地震に対して推定した応力降下量の空間分布

3. 研究目標の達成状況

最終年度は目標とする直接計測データとの比較を実施できて，論文公表に向けた方針を議論するところまで進めた．現在は論文執筆中であり，研究はほぼ計画通りの進展を見せており，期待通りの成果を達成できた．

4. まとめと今後の課題

応力降下量の推定値は，ほとんどが 0.5 MPa 以下であった．本研究では推定を安定させるためにコーダと呼ばれる波形の後続部分を用いて推定をおこなったが，直達波を用いて同様の推定をおこなった Mukuhira et al. (2013)でも同様の結果が得られており，矛盾はない．注水圧との比較をおこなったところ，注水圧が高くなるとともに，応力降下量の大きさも大きくなっている様子が見られた．一般的に高い応力降下量のイベントは，断層で強い固着がおこっている場合に観察される．注水サイトにおいて発生した高い応力降下量のイベントは，強い注水圧で岩盤が割れたことを示唆する．得られた応力降下量と，ボアホールから得られた値を用いたせん断応力はゆるい相関を見せた．いっぽう，有効法線応力と応力降下量には逆相関の関係が見られた．有効法線応力は法線応力から間隙流体圧を差し引いたものであることから，間隙流体圧と応力降下量に相関があるといえる．したがって，注水圧と応力降下量の関係がここでも示唆された．

これは，地震学の分野において初めて応力降下量の物理的解釈を実測データを元に示したこととなり，新たな知見を提供できた．

今後はこの，知見をさらに検証すべく，他のフィールドで得られた微小地震の解析，AE 解析を伴った室内岩石実験を実施していく．

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] 吉光奈奈, 椋平祐輔, 浅沼宏: Basel 地熱地帯における誘発地震の地震パラメタ推定, (2024) 地震研究所共同利用研究集会（2024-W-08)「大気・海洋・固体地球の波形解剖学 : 新たな海陸高密度観測に基づく高分解能イメージングと震源過程解析」 2024 年 12 月 23 日

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	J24L036
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	2 年目

ファインバブル燃料の微粒化と燃焼特性
Atomization and Combustion Characteristics of Fine Bubble Fuel

中武 靖仁*†，早川 晃弘**††
谷野 忠和*，小幡 順平***
*久留米工業高等専門学校機械工学科，**東北大学流体科学研究所
***久留米工業高等専門学校専攻科生
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

ファインバブルを混入した燃料をディーゼル機関やガスタービン機関などの内燃機関で噴霧燃焼させると燃費の低減が確認されている．ディーゼル機関のシリンダ内圧力変化から熱発生率の向上と燃焼時間の短縮も確認されている．これらの現象の要因の 1 つとして，噴霧された燃料の微粒化が挙げられるが，詳細については不明な点が多く残されている．そこで，本共同研究によりファインバブル混入燃料の微粒化特性について明らかにすることを目的とする．

2. 研究成果の内容

ファインバブルの発生装置は様々なタイプのものがあるが，共同研究 1 年目は，実験セットアップの制限から，供試燃料としてエタノールを用い，ファインバブル発生器はエジェクタ式を使用した．エジェクタ式とは，ノズル内部のエジェクタ効果によって形成された負圧領域に空気が吸い込まれ, 下流の流路で気泡が細かく砕かれファインバブルが生成される. 共同研究 2 年目は，エタノールに対してより微細な気泡が発生可能な加圧溶解式を採用した．エジェクタ式と加圧溶解式の主な違いは，発生装置内の循環ポンプ出口部で空気を自吸させる方式がエジェクタ式で，ポンプ入口部で自吸させる方式が加圧溶解式である．

図 1 は，Phase Doppler Panicle Analyzer（PDPA）を用いた液滴径測定のための実験装置の概略図である．燃料タンクから供給された燃料は，加圧溶解式ファインバブル発生装置でファインバブルと混合される．ファインバブル発生装置は循環ポンプと混合分級槽を有し，連続的にファインバブル燃料（FBF）を生成する．混合分級槽に取り付けられたレベルスイッチは ，3 方電磁弁に接続されており，レベルスイッチが作動すると内部循環ラインに切り替わる．燃料供給ポンプ（Prominent, gamma/ XL）が加圧し，コリオリ流量計（Bronkhorst, mini CORI FLOW M14）を介して FBF をノズルからチャンバーに噴霧する．チャンバーには直径 65mm の視野を持つ 4 つの石英ガラス窓があり, 高速バックライトイメージングや PDPA など様々な光学測定が可能である．チャンバー上部から供給される掃気によりスプレーの舞い上がりを防止する．窓の側壁から供給される空気は，窓の汚染を防ぐことができる．スプレーノズルにはホロコーンノズル（デラバン社製，WDA シリーズ）を使用．このノズルはオイルバーナー用の圧力旋回噴霧器である．燃料はノズルから垂直下向きに連続噴射される．

本実験では，コントロール燃料（CF：エタノール）とファインバブル燃料（FBF：ファインバブル入りエタノール）の噴霧形状ならびに粒径分布を測定するため，高速バックライトイメージ

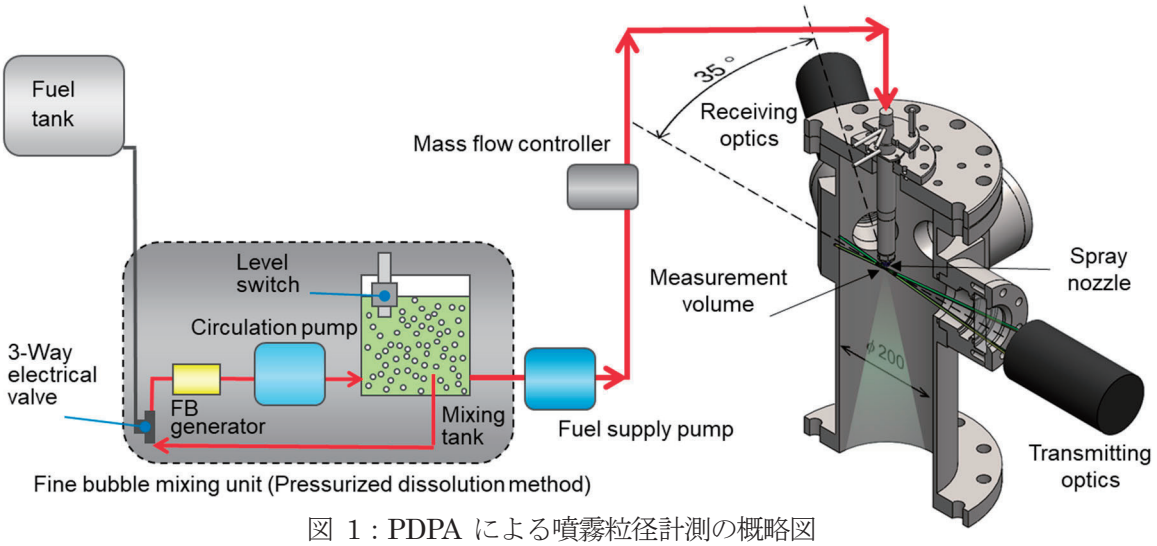


図 1：PDPA による噴霧粒径計測の概略図

ングによって取得された画像を，MATLAB を用いて画像処理や解析を行い様々な雰囲気圧力条件下での，ファインバブル混入による噴霧形状ならびに粒径分布に及ぼす影響を調べた．高速バックライトイメージングにはハイスピードカメラと LED パネルライトを使用した． PDPA を使用し液滴径を調べ，より詳細の噴霧特性について調べた．

3. 研究目標の達成状況

ファインバブルを混入したエタノールの噴霧・微粒化特性について，非燃焼条件における噴霧された液滴の微粒化促進，ならびに噴霧角減少が明らかとなった．

4. まとめと今後の課題

本研究では，燃料としてエタノールを用いた非燃焼時において，高速バックライトイメージングによる噴霧形状の計測，PDPA による液滴径の計測を行い，ファインバブルの混入が噴霧特性に及ぼす影響を調べた．その結果，FBF の噴霧角は CF に比べて小さくなる．また，FBF の噴霧は CF に比べ，雰囲気圧力の影響を大きく受ける．さらに，FBF の噴霧は CF の噴霧に比べて，一次微粒化を促進することが明らかとなった．

今後の課題としては，今回の実験は実験装置の制約で内燃機関の燃料ではなかったが，様々な内燃機関用燃料を用いて，FBF と CF の対照実験を行い，より詳細な実験結果を得て，FBF の噴霧の微粒化のメカニズムの解明を行う必要がある．

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**

なし

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	J24L037
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	3 年目

次世代液化燃料の噴射過程に関する研究
Study on the Injection Process of Next-Generation Liquified 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

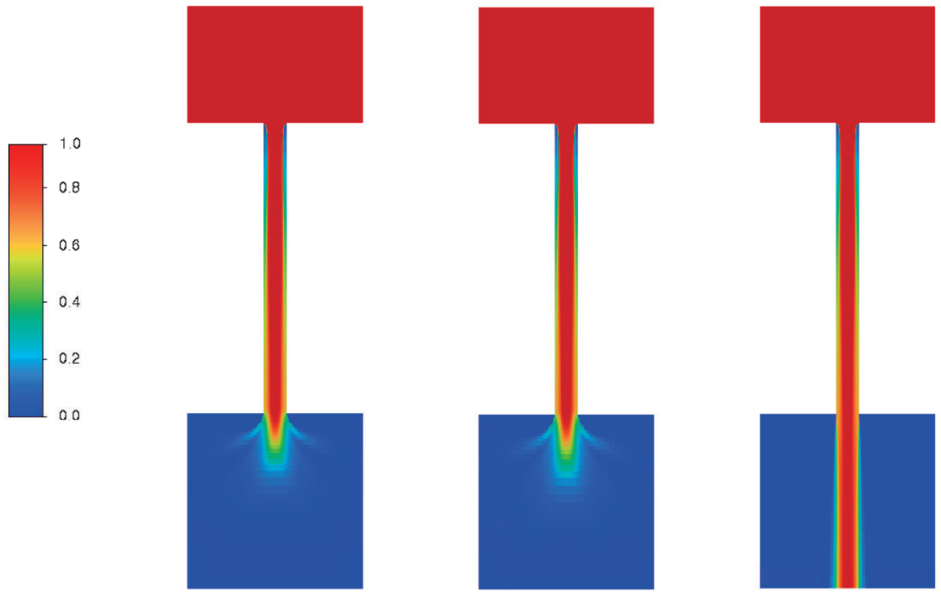
1. 研究目的

低炭素社会の実現にむけて，燃料アンモニアや各種合成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にも活用することが可能である．アンモニアの液化特性はプロパンやブタンなどを主成分とする 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初期の噴霧形成に強く影響を及ぼすものと考えられる．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噴霧形成過程の可視化・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，液化特性が近くアンモニアを用いるエンジンのベースとなりうる LPG エンジンのインジェクタおよび燃料噴射系をモデル化し，内部流動の数値解析を行う．それによりアンモニアの噴射過程における相変化の影響を把握し，将来的には，噴射量や噴射周期等の作動条件を変化させ，初期の噴霧形成モデル構築につなげる．

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，既存の数値解析モデルを用いて計算を行った．

アンモニア噴射に関するデータが文献から得られなかったことから，急激な相変化作用により気泡生成現象が確認された n-pentane を用いた実験と同条件の噴射圧 0.5MPa，液体温度 56℃において噴射過程の数値実験を行った．なお，キャビテーションモデルには Schnerr-Sauer モデルを用いて計算を行った．Schnerr-Sauer モデルで設定可能な気泡核生成数は，10^{13} が標準的に用いられるが，相変化が促進されすぎて計算が不安定化するため 10^{9} とした．相変化の閾値となる飽和蒸気圧は物性値データベースの値から内挿した 188，825 Pa を用いた．図 2 に噴射圧を 0.5 MPa とし，雰囲気圧力が大気圧，120 kPa，190 kPa の 3 条件における液相体積率を示す．左端のカラーバーのとおり，赤色は液相のみ，青色が気相のみの領域である．いずれの結果でもノズル入口付近から出口まで壁面にキャビテーショ



(a)P_amb=101.3kPa　(b) P_amb=120kPa　(c) P_amb=190kPa

図 1：2 次元ノズルにおける液相体積率の計算結果（n-pentane）

ンによる気相領域が存在し，ノズル部分では雰囲気圧力の影響は確認できなかった．

本数値解析では気泡核生成数を小さくしているにもかかわらず，大気圧条件でさえキャビテーションが縮流部から出口部にかけて続いた．比較に用いた同等条件の実験結果では，ノズル出口近傍で気泡が生成し始めており，その点を数値解析では再現できていない．そのため，ノズル内部の相変化について今後さらに検討する必要がある．なお噴孔出口直下の液相の挙動については，雰囲気圧力が 101.3 kPa および 120 kPa において短い距離でほぼ気相に変化し，190 kPa では液相の状態が続いている．この違いは上記の実験結果と定性的には一致している．

これらの結果が得られたものの，さらなる検討に必要な同様の相変化を生じやすい条件での実験結果が記載された文献が得られていない．また，この点を国内学会にて問題提起したものの，特段の反論は得られなかった．前述の通り，ノズル内部の相変化は検討の余地が多分にあり，n-pentane やアンモニアのように飽和蒸気圧が著しく高い物性をもつ液化ガスを用いる場合，従来のキャビテーションモデルでの対応が難しく，ノズル内部で相変化が起きやすい燃料の噴射制御のためのキャビテーションモデルの検討が不可欠である．そこで，本研究において検証用のデータを得るため，ノズル壁面の熱の影響を再現可能な装置を検討し，まずは水を用いた試験装置の構築を行った．

図 2 に加熱壁面を有する 2 次元ノズルの拡大図と装置のセットアップを示す．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 2 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．

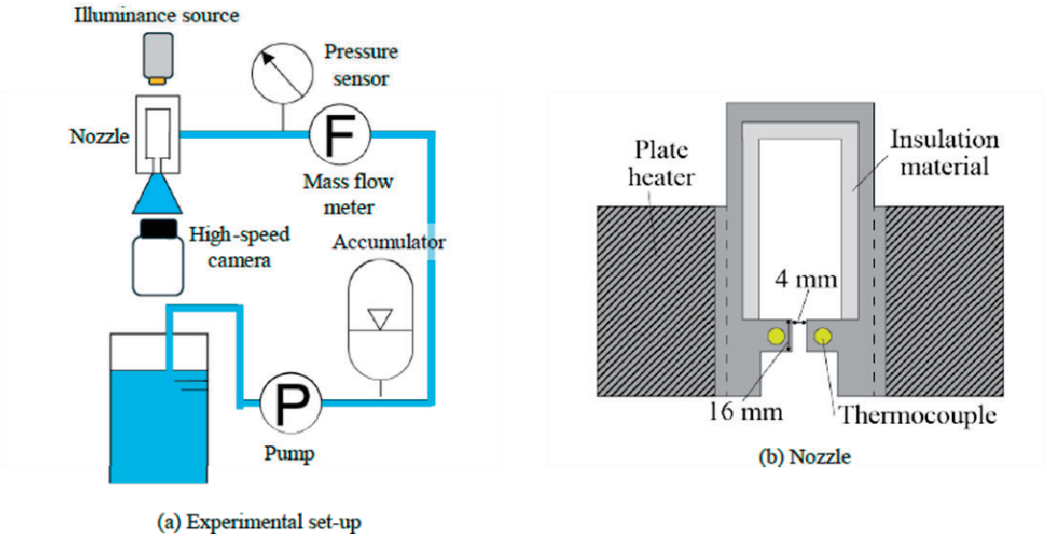


図 2：加熱壁面を有する 2 次元ノズルのコンセプト

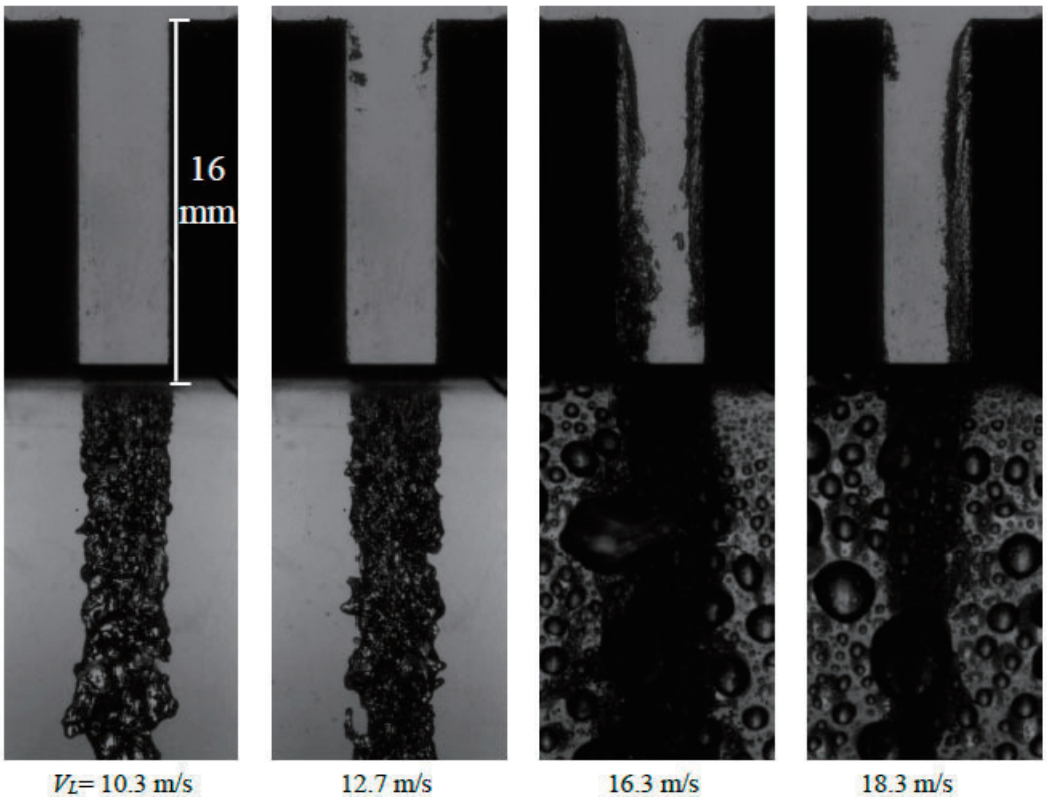


図 3：2 次元ノズルにおける非加熱時のキャビテーション形状

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 3 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．つまり，キャビテーション気泡が確認できない状態から，キ

ャビテーション初生，成長，さらには Super Cavitation，Hydraulic Flip に至るまでを確認できた．本実験で得られたキャビテーションの形成状態を示す様態図と，同ノズル形状を用いた先行研究の結果とを比較すると，同等の流速条件で各様態が一致していた．したがって，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．

縮流部では，水流と壁面の間で熱交換が行われる．したがって，ヒータの温度 T_P と縮流部壁面温度 T_w は比例関係にない．そこで，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．

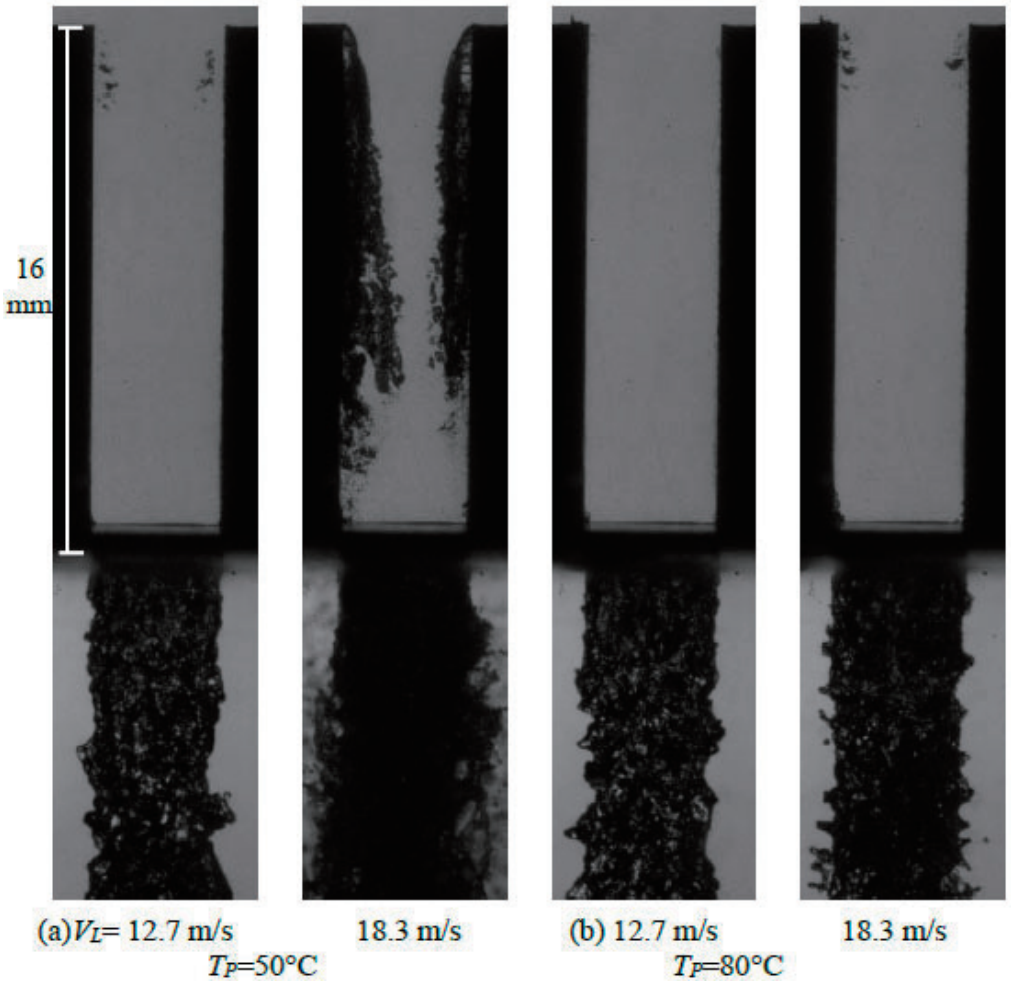


図 4：2 次元ノズルにおける加熱時のキャビテーション形状

V_L=12.7 m/s のとき，T_P=50 °C ではキャビテーションは薄く写っており，希薄な状態にある．時系列画像で確認すると明滅する非定常性を示した．さらに T_P を上昇させるとキャビテーションは消失した． V_L=18.3 m/s のとき， T_P=50°C ではキャビテーションは Super

Cavitation 状態にある．しかし，T_P=80°C まで上昇させると，キャビテーションは初生状態となった．非加熱時は Hydraulic Flip する条件であることから，T_Pの上昇により，高流速条件でもキャビテーションが抑制される効果が確認された．

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．最終的な成果となるエンジンの運転条件に対する噴霧形成の予測モデルにむけて，モデル作成に不可欠な検証データを得るための加熱影響を考慮した実験が可能な装置を立ち上げ実験を行った．実験を通じて得られた検証データを用いて既存モデルの知見を踏襲してモデル化を行う予定であったところ，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．そのためこの現象を説明するメカニズムについて仮説を立てて検討を進めている状況である．

当初直近の研究目標とした噴射時の相変化の影響について実験装置を新たに構築して検討を進められたことから，直近分については達成と言える．また，将来分として初期噴霧形成モデルの構築をあげている．現時点では未達であるものの，この点については実験結果から示唆された従来とは異なるメカニズムの検討とモデル化を進めており，将来的には改良モデルの開発につながるものと考える．

4. まとめと今後の課題

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，噴孔出口直下の液相挙動は定性的に再現できていた一方で，ノズル出口での気泡生成状況に大きな差異が確認できた．従来のキャビテーションモデルをそのまま用いてノズル内部の相変化を予測することは難しいことが確認された．アンモニアなど相変化のおきやすい燃料においては，ノズル内部の相変化を適切に予測できることが特に重要であるため，壁面からの熱の影響などを考慮した改良モデルを検討する必要がある．しかしながら，さらなる検討に必要な同様の相変化を生じやすい条件での実験結果が記載された文献が得られていない．そこで，本研究において検証用のデータを得るため，ノズル壁面の熱の影響を再現可能な実験装置を新たに構築し可視化を行った．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ことがあるというこれまでとは大きく異なる知見が得られた．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て検討を進めている状況である．

今後は，検討した仮説を裏付けるための実験をさらに実施するなどし，特に今回の現象が発生する条件について検討する．まず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．本来現象としてはキャビテーションモデルと同じであるため，現象の理解を進めることで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, 石本淳: 加熱する 2 次元ノズル壁面近傍における気泡生成の可視化, 混相流シンポジウム 2024 講演論文集, 富山, (2024), pp. 1.

[2] 大島逸平, 川原田光典: 壁面加熱が 2 次元ノズル内キャビテーション現象に及ぼす影響, 微粒化シンポジウム 2024 講演論文集, 広島, (2024), pp. 1-4.

[3] N. Kawaharada and I. Oshima: Study on the Injection Process of Next-Generation Liquefied Fuels, *Proceedings of the Twenty-Fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-39, pp. 1-2.

[4] 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）

なし

課題番号	J24L069
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	2024.4 ~ 2025.3
継続年数	3 年目

固体表面ナノバブルの三相界線における力学的バランスに関する分子動力学的解析
Molecular Dynamics Study of Mechanical Balance at Three-Phase Interface of Nano-Bubble on Solid Surface

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，沸騰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，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，三相界線での力学的バランスは Young の式により各相間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

昨年度は，分子動力学（Molecular Dynamics: MD）法を用いて，凹みがある壁面上のナノバブルの三相界線における力学的バランスの変化についての解析を中心に行った．計算系は擬似的な二次元系とした上で，壁面の濡れ性は中性とし，ガス分子のモル分率は 3.0 %に設定した．壁面の凹みの形状については，凹み深さを 4，8，12，凹み幅を 20，25，30 の計 9 パターンとした．この壁面上に発生したナノバブルには，凹みに収まるものと収まらないものが確認された．まず凹みに収まらないナノバブルについては，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 の式で用いた各相間の表面張力は，計算領域を微小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，凹みに収まらないナノバブルは三相界線がピニングされず，凹みの断面積が大きくなるほど見かけの接触角と Young の式から算出した接触角の差が大きくなることが確認された．これは凹み断面積が大きいほど形成されるナノバブルの半径は小さくなり，Young-Laplace の式より算出される表面張力が小さくなるためであると考えられる．断面積が変化することにより，ガス分子の局所的な集積が半径に影響を及ぼす可能性が示唆された．凹みにナノバブルが収まる場合，表面張力を用いて力学的バランスの釣り合いを確認した．その結果，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

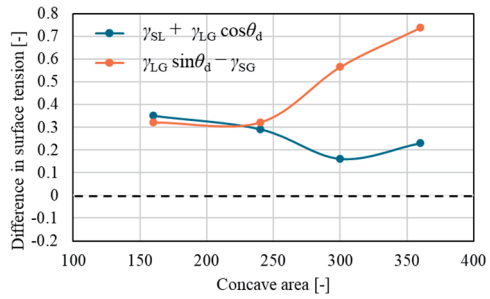


図 1 : 水平，垂直成分の表面張力(γ_{SL}, γ_{SG})と γ_{LG} から算出される成分($\gamma_{LG}\cos\theta_d$, $\gamma_{LG}\sin\theta_d$)の差. この表面張力の差がピニング力であると考えられる.

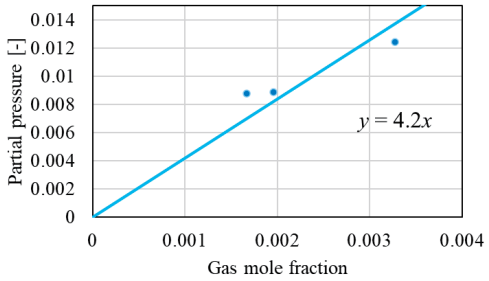


図 2 : 気液二相系のシミュレーション結果から算出した液相領域のガスモル分率と気相領域の分圧の関係. 点が MD の計算の結果で，直線が MD 結果にフィッティングした結果である. この直線の傾きよりヘンリー定数は 4.2 と算出した.

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（図 1）.

また，本研究の不凝縮ガス濃度が過飽和である可能性が示唆されたため，気液二相系の計算を行った. 計算系はこれまで使用していた計算系から固体分子を除き，計算系上下に真空領域を設けたものとした. その結果，気相領域と液相領域の分圧が等しくなり，平衡状態となることを確認した. ヘンリーの法則に基づいてヘンリー定数を算出すると，4.2 であった（図 2）. この結果は，液相中における不凝縮ガスの溶解挙動が一定の傾向を持つ可能性を示唆している.

3. 研究目標の達成状況

昨年度の結果より，固体壁面の凹み断面積の大きさによって三相界線における力学的バランスが変化し，固液界面ナノバブルの形状と安定性が変化することが分かった. また，気液二相系のシミュレーションから，適正なガスの飽和度を確認した. これらの知見は，固液界面ナノバブルの制御指針を得るという本研究の目的を達成する上で重要であり，本研究の当初の目的を達成しつつあると認識している.

4. まとめと今後の課題

昨年度の研究結果より，固体壁面の凹み断面積が変化することでナノバブルの形状が変化することが分かった. ナノバブルの形状について，凹みに収まるナノバブルと凹みから出るナノバブルが確認された. 今後はこれらのナノバブルの形状により力学的バランスがどのように変化するかを調べ，ナノバブルが固液界面上で安定的に存在する要因を探り，固液界面ナノバブルを制御するための知見を得る.

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] Y. Jonosono, S. Tsuda, T. Tokumasu, and H. Nagashima: Molecular Dynamics Study of the Microscopic Mechanical Balance at the Three-Phase Contact Line of Interfacial Nanobubble, *Langmuir*, 40, 16 (2024), 8440–8449, doi: 10.1021/acs.langmuir.3c04027

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 城ノ園優佑，津田伸一，永島浩樹，徳増崇：凹み表面における固液界面ナノバブルの形状と安定性の分子動力学的解析，日本流体力学会　年会 2024，仙台，(2024)　1M1008-12-03.

[3] H. Nagashima, Y. Jonosono, S. Tsuda, T. Tokumasu: Molecular Dynamics Study of Interfacial Nano-Bubble, The Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2024), CRF-38, pp. 116-117.
[4] 城ノ園優佑，津田伸一，永島浩樹，徳増崇：凹み壁面上の固液界面ナノバブルの形状と安定性の分子動力学的解析，日本機械学会　東北支部　第 60 期総会・講演会，仙台，(2024), 1D3.

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	J24L074
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	3 年目

機能性流体を用いた地下開発高効率化に向けた基礎物性測定 その 3
Measurements of Fundamental Physical Properties of Functional Fluids for Efficient Subsurface Developments Ⅲ

澤山 和貴*†，椋平 祐輔**††
*京都大学理学研究科，**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

地熱資源をはじめとした地下流体資源開発において，目に見えない地下の流れをいかにコントロールするかが課題となっている．機能性流体はせん断速度によってその粘性が変わるため，この特性をうまく活用できれば，地下の複雑な流れを意図的に開通/閉鎖させて効率的に資源開発を行うことができるかもしれない．本研究では，機能性流体の振る舞いを実験および理論的検討により地球物理的観測値とリンクさせ，実際に地下に注入した際の挙動予測につなげることを最終目標とする．機能性流体は，せん断過程で粉末粒子の充填率が変化することでその特性が変わることが知られている．岩石物理学のモデルに基づけば，弾性波速度（地震波速度）は物質の空隙率に依存する．ここでいう空隙率は機能性流体における粒子の充填率に相当するため，せん断過程で変化する充填率（＝粘性の変化）は地震波速度で検知可能であることが予想される．本研究では，貯留層を模擬した試料中に機能性流体を流し，その充填率の変化に対して，弾性波速度を実験的に測定する手法を開発する．まずは 1 本の流路に対して簡単なテストを行い，得られた実験結果を弾性波速度に関する理論モデルを用いて妥当性を検証する．

2. 研究成果の内容

円形の流路を有する流路モデルを 3D プリンタで設計し，申請者の研究室で，機能性流体流動時の弾性波測定を実施した．

本実験ではパルス透過法を採用し，構築したシステムでは，パルスの入力トリガをファンクションジェネレータで発生させ，透過波形をプリアンプ（NF9913）で増幅したのち，オシロスコープで記録した．初動の到達走時と送受信トランスデューサ間の距離に基づいて，P 波速度を算出することができる．送受信器には富士セラミックス製のトランスデューサを用いた．入力パルスは振幅 10 V の正弦波形に設定し，測定周波数は 1,5 MHz を用いた．なお S/N 比を改善するため，透過波形は 128 回以上スタックして解析に使用している．この条件で，流路モデルの中が①空気，②水，③粘性標準流体で満たされているときの 3 パターンで弾性波を計測し，P 速度を計算し，基礎データとした．さらに機能性流体を，ピストン付き圧力容器から流路モデルに様々な流量で圧入した．機能性流体は流量に応じて生じるずり速度に応じて，その粘度を変化させる．それによって弾性波速度も変化することが予想され，それを本計測で検出することを目指す．

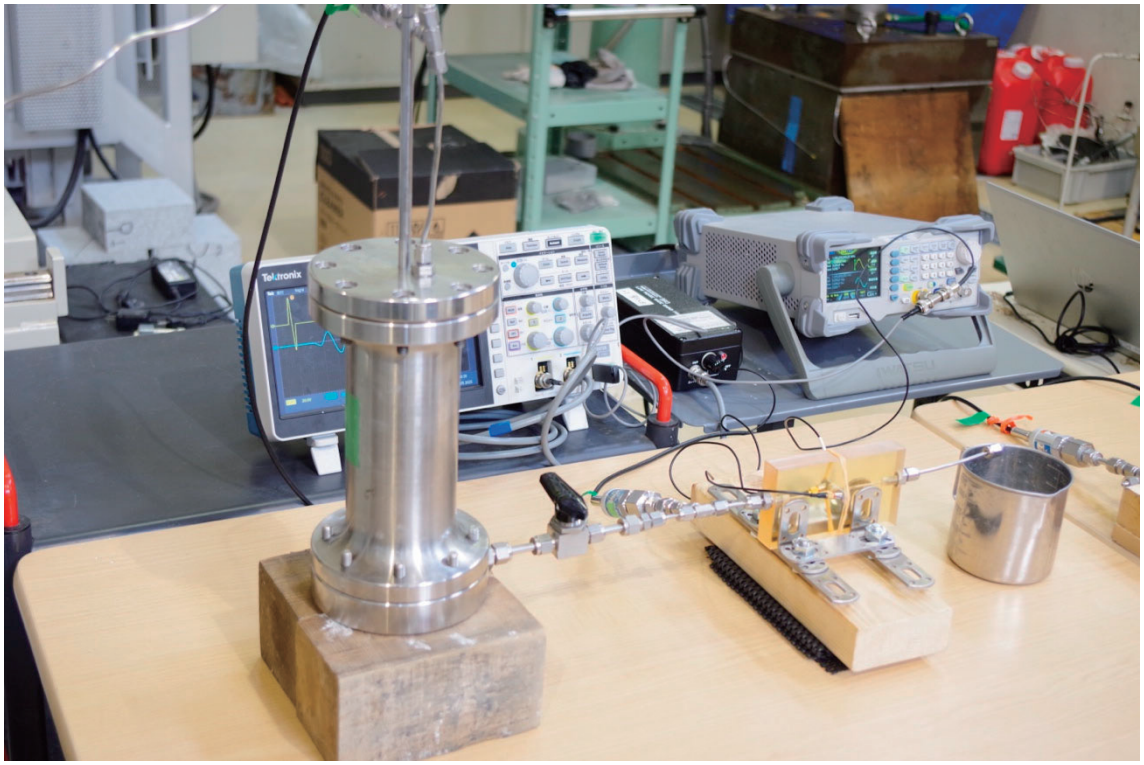


図 1：流動実験時の弾性波計測の様子

3. 研究目標の達成状況

現在，計測結果のデータは信号処理等を使って解析中であるが，実験中の簡単な解析から機能性流体の粘度変化が，弾性波で捉えれていたことはほぼ明らかである．よって，根本的な研究目標は達成できた．

4. まとめと今後の課題

今後は計測データの解析を進め，理論モデルとの整合を検討し，実際のフィールドでの計測が可能か検討していく．同時に成果公表も今年度中に行う．

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

なし

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	J24L085
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year

Experiment and Molecular Dynamics Simulation for Plasma-Dependent Interface

Siwei Liu*†, Kosuke Tachibana**††
Tomoki Nakajima*, Takehiko Sato*
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Institute of Fluid Dynamics, ETH Zurich
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The plasma–liquid interface plays a pivotal role in governing the chemical reactions involved in dehalogenation processes. This is due to its influence on reactive species generation, transport phenomena, and energy transfer mechanisms at the boundary. Accordingly, the present study aims to elucidate the plasma-dependent interfacial dynamics by integrating insights from both experimental investigations and molecular dynamics (MD) simulations. Through this combined approach, we seek to uncover the fundamental mechanisms that control interfacial reactivity and to bridge the gap between macroscopic observations and atomistic-level interactions.

2. Details of program implement

In this study, we present experimental results visualizing plasma formation at the gas–liquid interface, alongside the development of a preliminary molecular dynamics (MD) model to investigate plasma-induced interfacial effects. Figure 1 illustrates the schematic of the experimental setup used for plasma generation and optical visualization. A tungsten needle electrode, connected to a pulsed power supply, served as the plasma source. The applied voltage could be varied within ±30 kV, enabling the generation of pulsed currents with adjustable durations. Voltage and current waveforms were captured using an oscilloscope (LeCroy WS 510), in combination with a high-voltage probe (LeCroy, PPE 20 kV) and a current coil (Bergoz, FCT-016-1.25 WB). A delay generator (Stanford Research Systems, DG535) was employed to precisely synchronize the triggering process.

To complement the experimental observations, an MD simulation was conducted to gain atomistic insights into the interfacial behavior under plasma exposure. The MD method numerically solves the equations of motion for individual molecules, thereby allowing for the detailed prediction of atomic trajectories and interactions—capabilities beyond the resolution of conventional fluid dynamics methods. Figure 2 outlines the simulation framework adopted in this study. A model system of dimensions 36 Å × 36 Å × 150 Å was constructed, comprising a water slab with a clearly defined gas–liquid interface. The system was first energy-minimized, then sequentially heated and equilibrated. Following equilibration, a single Ar^+ ion was introduced just above the interface, directed toward the liquid phase with

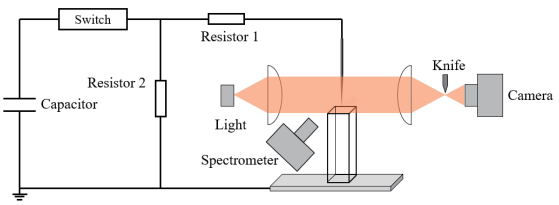


Figure 1 Experimental platform for plasma generation and visualization.

an initial velocity along the z-axis to simulate a collision event. To ensure statistical reliability, this simulation was repeated 100 times, each for a duration of 100 picoseconds. The kinetic energy of the incoming Ar^+ ions was set to 1 eV, 10 eV, or 100 eV, allowing us to explore the energy-dependent dynamics of ion–surface interactions.

3. Achievements

Repetitive plasma discharges were applied to the gas–liquid interface to investigate the dynamic interaction between plasma and liquid phases. The evolution of plasma structures and flow disturbances near the interface was captured using Schlieren imaging, which enabled the visualization of density gradients induced by the plasma. Notably, localized charge accumulation was observed at the interface, suggesting the presence of electric field-driven interfacial phenomena, such as ion migration and surface polarization. An MD simulation model was developed to explore the interaction between Ar^+ ions and the gas–liquid interface at the atomic scale. The simulation allowed for detailed analysis of the ion's trajectory, energy transfer, and the resulting structural response of the interfacial water molecules.

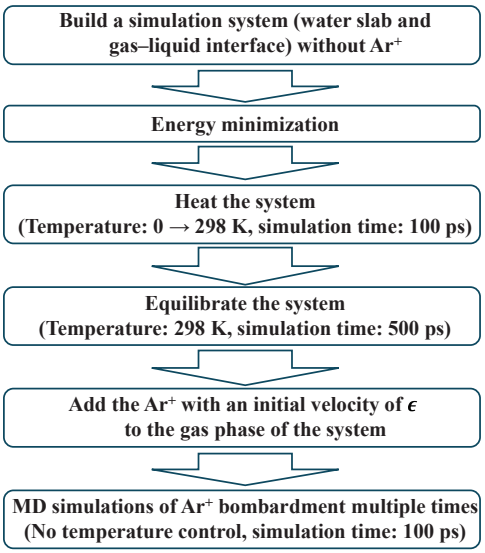


Figure 2 Principles of the MD simulation.

4. Summaries and future plans

In this work, the experimental results of the visualization of plasma at the gas-liquid interface were presented. Also, a preliminary molecular dynamics model was constructed to study the impact of plasma on the interface. In the next period, we will continue this topic and develop the MD model to interpret the movement of the charge into the buck liquid.

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] K. Tachibana, Siwei Liu, S. Uchida, T. Nakajima, T. Sato. Experiment and Molecular Dynamics Simulation for Plasma-Dependent Interface. *Proceedings of the 24th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2024), CRF-41, pp.123-124.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

Project code	J24L088
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	1st year (progressing)

Comparison of Different Numerical Solvers for Intravascular Treatment Simulation

Narendra Kurnia Putra*†, Petrus Diyos Widhi Prasetya*, Farhan Zaki Rahmani*
Makoto Ohta**, Hitomi Anzai**††
*Faculty of Industrial Technology, Institut Teknologi Bandung
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Computational simulations have been extensively employed to enhance the understanding of the mechanical behavior and natural progression of intravascular diseases, as well as their treatments. However, the accuracy of simulation results is often highly dependent on the assumptions and simplifications applied to the models. Additionally, variations in solver methodologies and differences between commercially licensed and open-source software can significantly influence the outcomes. This research project aims to investigate the impact of solver selection on the simulation of intravascular diseases and their treatments. It focuses on comparing the performance of an in-house open-source solver, based on a spring-mass analogy, with that of a commercially available licensed software package when applied to similar problems.

2. Details of program implement

In this study, open-source software was employed to conduct virtual stenting simulations and Computational Fluid Dynamics (CFD) analyses as an alternative to commercially licensed solutions. While open-source platforms offer increased flexibility and reduced costs, challenges related to standardization and reliability remain. Accordingly, this research also focuses on comparing the simulation outcomes of open-source and licensed software to evaluate their accuracy and validity. Verification and validation are essential to establish the credibility of open-source tools for assessing aneurysm therapy effectiveness and to support their broader adoption within the global research community.

Specifically, OpenFOAM, as an open-source solver, and ANSYS Fluent, as a licensed commercial software, were used to simulate blood flow following the deployment of a flow diverter at an aneurysmal site. The CTscan generated aneurysm blood vessel geometry have been obtained from the aneurysm geometry repository, Emory University, USA. Flow diverter geometry was created and deployed by an in-house open-source software based on spring-mass-damper analogy. The deployed stent geometries was exported as STL files and used as geometry on the CFD simulation. The CFD simulation results were then compared to assessing the consistency and reliability between the open-source and licensed software approaches. .

3. Achievements

From the comparison of both CFD software, the evaluation towards value of wall shear stress (WSS) and flow pattern between two cases have been obtained. The flow pattern of the flow diverted aneurysm has been acquired as shown in the Figure 1 for OpenFoam (a) and ANSYS Fluent (b) respectively.

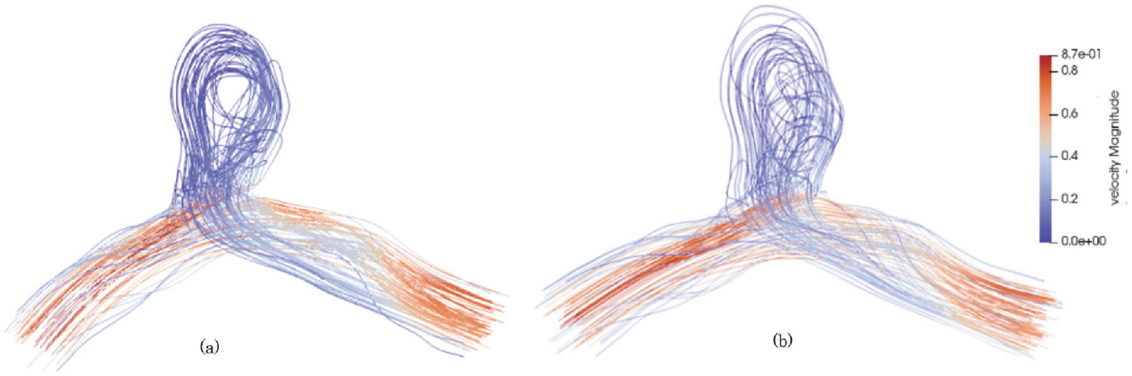


Figure 1: Comparison of intravascular flow pattern on the aneurysmal blood vessel as the results of different CFD softwares: (a) OpenFoam and (b) ANSYS Fluent.

These simulations have been carried out with a similar standard of boundary conditions, mesh dependency, and computational setup. Small differences can be observed from the comparison in the Figure 1. Furthermore, the comparison on the flow parameter of WSS shows that average WSS on the aneurysm dome obtained as big as 0.287 Pa and 0.295 Pa from OpenFoam and ANSYS Fluent respectively. These numbers give only 2% difference on the average WSS estimated from both software.

4. Summaries and future plans

These results show that the utilization of different software has no significant difference in predicting the CFD results. As long as the computational setup and boundary conditions have been set properly, including mesh dependency, Open-source software can be utilized as an alternative solution for predicting and analyzing intravascular blood flow on the blood vessel with aneurysm. Further comparison, which includes more parameters and variables of flow dynamics need to be carried as the follow-up of this research.

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] Petrus Diyos Widhi Prasetya, Suprijanto, Tuwuh S. Wibowo, Makoto Ohta, Hitomi Anzai, Narendra Kurnia Putra. (2024) "Microfluidic Liquid Dispenser: Effects of Boundary Condition on Single Droplet Formation", *The 21st International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2024)*, Sendai, Japan.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J24L095
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2024 - March 2025
Project status	2nd year

Tensity 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 planned to visit Sendai in November 2024, but was not able to do so because of responsibilities as Department Chair. (As a result no funds were spent.) Despite this, 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 understanding these numerical issues to obtain a formulation that works in more general physical situations.

A subsequent extension will be to use this algorithm to obtain steady equilibrium solutions for hollow vortices in the presence of surface tension. Recent work has shown analogies between hollow vortices (vortex sheets with a velocity jump at the boundary) and propagating bubbles with surface tension, exploiting results in complex analysis. The special results found do not extend in an obvious manner to the case with both circulation and surface tension, and the first step in that direction will be to obtain

numerical solutions using the NK algorithm. A subsequent goal will be understanding whether the system possess bifurcations to states with lower symmetry.

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 constrains as Department Chair, the applicant was not able to visit Sendai in 2024. We are currently investigating whether a visit will be possible in September 2025 in conjunction with the 50th anniversary meeting of the Japanese Society of Fluid Mechanics in Osaka. 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	J24L096
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	2024.4 ~2025.3
継続年数	3 年目

微細流路内部の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 Phenomena Through Droplets in Nanochannels

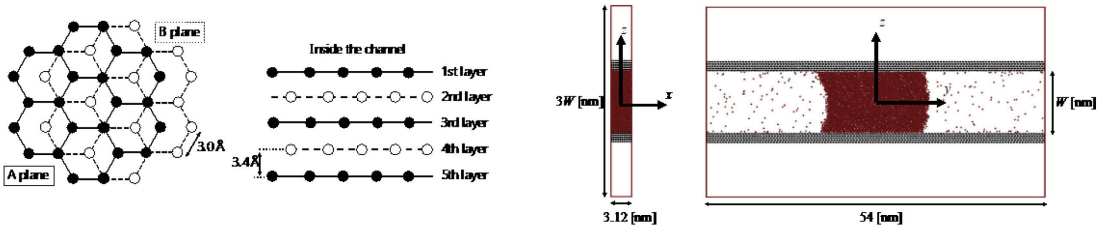
福島 啓悟*†，徳増　崇**††
*福井大学学術研究院，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

気液界面や固液界面を持つような不均一な系では，界面の存在が液体運動に大きな影響を与えることが知られており，流路幅が微細な空間においてもその影響が大きいことが知られている．特に，物質の 3 相（液体，気体，固体など）が接触し相互作用する領域である接触線領域では，相の性質が正確に定義できず，相と相が接触している面との間の力の影響を受ける．接触線の挙動は，濡れ，液滴形成，毛細管現象など，さまざまな物理現象において重要である．また，インクジェット印刷，コーティング，沸騰伝熱など，さまざまな工学的な応用においても，接触線のダイナミクスを理解することは非常に重要である．

このような物理的に不均一な系を解析する手法として，応力や熱流束の空間分布から特定の領域の値を取り出す手法が有効である．本研究では，応力分布に注目し接触線近傍に生じる力の流路幅依存性を評価した．

2. 研究成果の内容



(a)　　(b)

Fig.1 Simulation system in this study. (a) the geometry of solid walls (b) a snapshot of the simulation system.

Fig.1 に示す計算系を用いて，接触線に働く摩擦力の流路幅及び固体壁面間相互作用依存性を明らかにする．流路幅を 5nm-10nm の 1nm ずつ変化させ，相互作用パラメータを 2×10^{-22} J，3×10^{-22} J，4×10^{-22} J，5×10^{-22} J，6×10^{-22} J，7×10^{-22} J，8×10^{-22} J の 7 つとする．固体壁面を-10m/s で運動させ，液滴のマクロな運動量をゼロとなるように制御することで液滴が一定の速度で運動している状況を再現した．また，応力テンソルは以下の式を用いて計算した．

$$\tau_{\alpha\beta}(\mathbf{r},t)=\sum_i \frac{1}{m_i}\left(p_{i\alpha}(t)\times p_{i\beta}(t)\right)\delta(\mathbf{q}_i(t)-\mathbf{r})$$

$$+\frac{1}{2}\sum_{i\neq j}\left[\left(q_{i\beta}(t)-q_{j\beta}(t)\right)\times f_{ij\alpha}(t)\right]\int_0^1 \delta[\lambda\mathbf{q}_i(t)+(1-\lambda)\mathbf{q}_j(t)-\mathbf{r}]d\lambda$$

ここで，$p_{i\alpha}$は原子 i の運動量の α 成分，$q_{i\alpha}$は原子 i の座標の α 成分，$f_{ij\alpha}$は i-j 間に生じる力の α 成分，$q_{ij\alpha}$は原子 i から原子 j に向かうベクトルの α 成分を表す．

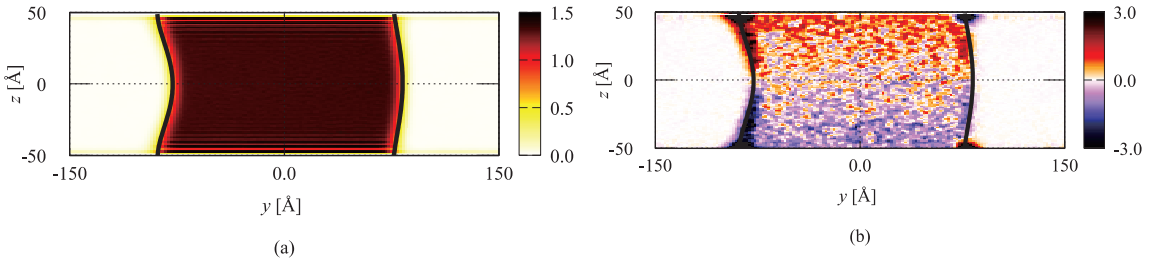


Fig.2 The yz-plane distribution of shear stress and density in the case of $W = 100$ Å and $\varepsilon = 8.0 \times 10^{-22}$ J. Black lines show the interface defined using the liquid density: (a) liquid density; (b) shear stress

Fig.2 に相互作用パラメータが 8×10^{-22} J の場合の yz 平面における，液体密度および剪断応力分布を表す．x 軸方向には平均を取っている．図中の黒の太線は，各 z 軸方向の気液界面の点を z に関する 4 次多項式で近似した気液界面を表している．本計算では，液滴が 10m/s の速度で運動しているので，Fig.2(a)に示されるように液滴の接触角は左右で異なっている．また，Fig.2(b)では，接触線近傍に大きな剪断応力が生じていることがわかる．

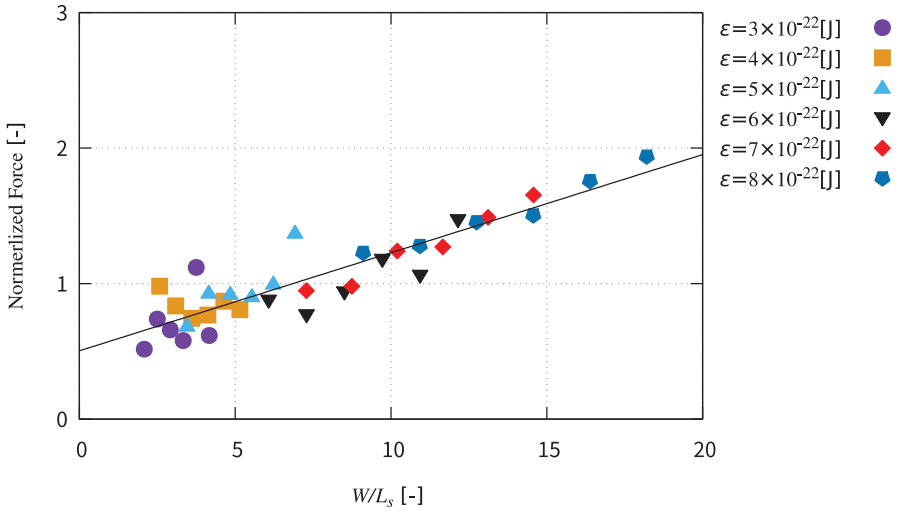


Fig.3 Channel size dependence of the normalized force on the contact line region

Fig.3 に接触線近傍に生じている力を積分した結果を示す．L_sは滑り長さを表している．接触線に働く力を液滴中心領域に生じる力で叙して規格化した結果を表している．これにより，接触線近傍に働く力の流路幅依存性を明らかになり，流路幅と滑り長さの比が小さい場合，表面張力による力が液体運動に与える影響が小さいことが明らかになった．

3. 研究目標の達成状況

本年度は，これまで得られた応力分布を使った解析に関する研究成果をまとめ論文を執筆，投稿した．また，Lennard-Jones potential だけでなく他のポテンシャル関数への適応を考えて解析手法を拡張した．

4. まとめと今後の課題

空間分布を用いた液体運動の解析手法を確立し，応力分布を用いた解析を行いその結果をまとめた．今後は，熱流束への拡張および Coulomb potential を持つ系への拡張を行う．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Akinori Fukushima, Shinya Oyagi, and Takashi Tokumasu: Molecular dynamics simulation of channel-size dependence of the force around a liquid-vapor-solid contact line region, *Phys. Rev. E*, accepted.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Akinori Fukushima, and Takashi Tokumasu: Analysis of Heat and Momentum Transport Characteristics Through Droplets Inside Nano-order Channels, *Proceedings of the Twenty-fourth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2024), CRF-36, pp. 111-112.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

索　引

足立 高弘　396
阿部 圭晃　15, 84, 334, 362
安西　眸　444
伊神　翼　47, 135
石出 忠輝　329
石本　淳　55, 391, 415
泉　源　331
伊藤　健　425
伊藤 靖仁　110
井上 雄介　49
上野 和之　260
鵜飼 孝博　61
宇佐美 徳隆　303
内田　諭　79
内一 哲哉　33, 258, 371, 376, 378, 394
鵜殿 治彦　19
遠藤 和彦　73, 176
大島 逸平　431
大谷 清伸　17, 26, 39, 53, 61, 137, 217, 272, 284, 344
太田　信　70, 139, 197, 248, 267, 275, 339
太田 匡則　188
大塚 啓介　15
大塚　光　45, 47
大野 武雄　176
大林　茂　41, 57, 101, 107, 167, 202, 224, 286, 329, 331
大堀 大介　19, 161, 178, 243, 425
大山　聖　81
岡島 淳之介　29, 49, 113, 227
小原　拓　21
郭　玉婷　21
加藤 文武　371
金崎 雅博　135
金澤 誠司　126
金子　智　359
川原田 光典　431
神田 雄貴　130
菊川 豪太　164, 313
菊池 崇将　272
北川 一敬　17
久保 正樹　213
栗田 大樹　376
後藤　実　258
江目 宏樹　29
小林 宏充　153
小宮 敦樹　213, 315, 396, 399, 401, 407
佐々木 大輔　101, 104
佐藤 岳彦　79, 116, 126, 128, 171, 318
寒川 誠二　243
澤山 和貴　440
下栗 大右　87
新竹　純　334
高奈 秀匡　142, 153, 206, 209, 289, 300, 387, 389, 409
高橋 聖幸　239
竹内　希　206
立川 正憲　264
立山 耕平　53
千葉 一永　286
常松 佳恵　26
寺島　修　281
徳増　崇　292, 303, 310, 359, 403, 437, 448
永井 大樹　45, 104, 188, 194, 239, 260, 281, 296
永島 浩樹　437
中武 靖仁　429
中村　寿　65, 75, 87, 220, 246
中本 裕之　394
中谷 辰爾　270
中山 雄行　119
沼田 大樹　284
野々村　拓　57, 84
長谷川 裕晃　167
服部 裕司　110, 119, 185, 191, 446
早川 晃弘　270, 412, 429
林　寧生　178
平田 勝哉　55
福島 啓悟　448
福山 敦彦　161
舩津 賢人　137
船本 健一　67, 123, 264, 381, 384
槙原 幹十朗　39
松江　要　325
松田　佑　194
馬渕 拓哉　145
丸田　薫　159
水書 稔治　217
宮内　優　123
椋平 祐輔　253, 307, 427, 440
本澤 政明　289
森井 雄飛　325, 419
森澤 征一郎　202, 250
森田 行則　73
焼野 藍子　81, 151, 182, 250, 255
山下　博　224
吉川　穣　142
吉木 宏之　171
吉光 奈奈　427

Abid Ustaoglu 227
Adrian Sescu 191
Aike Qiao 339
Angéla Jedlovszky-Hajdú 275
Anthony B. Dichiara 300
Anthony Dichiara 409
Bok Jik Lee 296
Chenguang Lai 41
Chengwang Lei 407
Christine Mounaïm-Rousselle 412
Cornelius Langenbruch 307
Eugenia Corvera Poiré 67
Fayza Yulia 145
Freddie D. Witherden 362
Gildas Coativy 389
Hao Zhao 65
Hari Krishna Chilukoti 313
Hideaki Ogawa 344
Huangwei Zhang 419
Ivan Delbende 185
James Cotton 318
Jean-Paul Rieu 384
Jens Fransson 255
Jeongmin Ahn 220, 310
Joel Courbon 387
Kosuke Tachibana 442
Lavi Rizki Zuhal 182
Mingzi Zhang 70
Mohamed Farhat 128
Muhamed Albadawi 197
Muhammad Shiddiq Sayyid Hashuro 248
Nadia Shaira Binti Shafii 267
Narendra Kurnia Putra 444
Nasruddin Yusuf Rodjali 292
Nicholas Williamson 315
Nicolas Aznar 381
Nicolas Mary 378
Olivier Mathieu 75
Outi Supponen 133
Patrice Chantrenne 403
Peter Stephan 113
Pramudita Satria Palar 107
Richard Sandberg 151
Samuel L. Manzello 159
Sébastien Livi 399
Shabbir Ahmad 209
Shejuan Xie 33
Siwei Liu 133, 442
Sławomir Pietrowicz 415
Stefan Llewellyn Smith 446
Thomas Elguedj 391
Valéry Botton 401
Xiaodong Ma 253
Yang Li 246
Yinbo Zhao 164
Yingxue Hu 130
Yujie Li 139
Yun-Chien Cheng 116

東北大学流体科学研究所
2024 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

2025 年 10 月発行

編集・発行： 東北大学流体科学研究所　所長　丸田　薫

〒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