



東北大學

# 令和5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 2023  
Joint Usage / Research Center  
"Fluid Science Global Research and Education Hub"

東北大學  
流体科学研究所  
Institute of Fluid Science  
Tohoku University



Institute of Fluid Science  
Tohoku University

## 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。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、平成 28 年度および令和 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。

本報告書は令和 5 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、109 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、主な発表論文の別刷等を収録している。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。

令和 6 年 9 月

東北大学流体科学研究所長  
丸田 薫



# 目 次

1. 令和 5 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	
<令和 5 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>	
J23I001 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	17
江目 宏樹（山形大学）、岡島 淳之介（東北大学）	
J23I002 柔軟弹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	21
北川 一敬（愛知工業大学）、大谷 清伸（東北大学）	
J23I004 Study on Micro-scale Evaporation for Heat Transfer Enhancement	23
岡島 淳之介（東北大学）、Peter Stephan（Technical University of Darmstadt）	
J23I005 スペースデブリ除去テザー衛星のための超高速衝突実験	25
槙原 幹十朗（東北大学工学研究科）、大谷 清伸（東北大学）	
J23I006 三次元トランジスタにおける Volumeless Multi-Vt 形成に関する研究	27
間部 謙三（産業技術総合研究所）、遠藤 和彦（東北大学）	
J23I007 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	30
内田 諭（東京都立大学）、佐藤 岳彦（東北大学）	
J23I008 Characterization of Particulate Morphology Generated from Lithium-Ion Battery (LiB) Combustion Processes	32
Samuel L. Manzello（Reax Engineering）、丸田 薫（東北大学）	
J23I009 Fabrication of Nanofibrous Layer Covered Stents	34
Angéla Jedlovszky-Hajdú（Semmelweis University）、太田 信（東北大学）	
J23I010 管楽器の流体音響解析	39
高橋 公也（九州工業大学）、服部 裕司（東北大学）	
J23I011 金属 / 酸化チタン界面構造の分子動力学解析	45
後藤 和泰（新潟大学）、徳増 崇（東北大学）	
J23I012 低速尾翼バフェットの理論・解析モデルの構築	48
大塚 啓介（東北大学工学研究科）、阿部 圭晃（東北大学）	
J23I013 超柔軟膜翼の構造空力連成モデリング理論の構築と実験実証	50
大塚 啓介（東北大学工学研究科）、永井 大樹（東北大学）	
J23I015 火星飛行機におけるプロペラ後流・主翼干渉流れの解明	52
北村 圭一（横浜国立大学）、永井 大樹（東北大学）	
J23I019 Effect of Charge Distribution on the Plasma-Induced Fine Bubble Dynamics	55
Siwei Liu（東北大学）、Outi Supponen（ETH）	
J23I020 非普遍的な乱流場における乱流エネルギー・スカラ輸送機構に関する基礎研究	57
伊藤 靖仁（名古屋大学）、服部 裕司（東北大学）	

J23I021	Molecular Simulation of CO <sub>2</sub> Permeation through Microalgae Lipid Membrane	60
	馬渢 拓哉 (東北大学)、Fayza Yulia (Pertamina University)	
J23I022	高速電離流を伴う宇宙航行システムの数値的研究	66
	高橋 聖幸 (東北大学工学研究科)、永井 大樹 (東北大学)	
J23I024	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	69
	鵜飼 孝博 (大阪工業大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J23I025	Experimental and Kinetics Modeling Study of Tri-Methyl-Phosphate (TMP) Combustion: Toward P-Containing Fire Suppressants for Lithium-Ion Battery Electrolytes	74
	Olivier Mathieu (Texas A&M University)、中村 寿 (東北大学)	
J23I026	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	77
	寺島 修 (富山県立大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J23I029	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	80
	Abid Ustaoglu (Bartin University)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J23I030	Hemodynamic Management of Patients with Coronary Artery Stenosis Before and After Stent Implantation	87
	Xiaorui Song (Shandong First Medical University & Shandong Academy of Medical Sciences)、太田 信 (東北大学)	
J23I033	高低温・高湿環境下における人体熱反応の把握による生体温熱モデルの高度化	89
	古川 琢磨 (八戸工業高等専門学校)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J23I034	Density and Surface Tension Effects on Vortex Dynamics	92
	Stefan Llewellyn Smith (University of California)、服部 裕司 (東北大学)	
J23I035	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	94
	竹内 希 (東京工業大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J23I036	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	99
	中村 寿 (東北大学)、下栗 大右 (広島大学)	
J23I038	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	102
	服部 裕司 (東北大学)、Ivan Delbende (Sorbonne University)	
J23I039	脳血管画像に基づく流れ場推定手法の開発	105
	杉山 慎一郎 (東北大学病院)、安西 眴 (東北大学)	
J23I041	複雑流動場に対する圧縮センシング技術の構築	108
	松田 佑 (早稲田大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J23I043	Explainable Machine Learning for Enhancing Multi-objective Aerodynamic Design Optimization	111
	Pramudita Satria Palar (Bandung Institute of Technology)、大林 茂 (東北大学)	
J23I044	乱流渦における渦流と渦線バンドル束のトポロジーの相互作用による3次元渦構造の自己組織化に関する解析	114
	中山 雄行 (愛知工業大学)、服部 裕司 (東北大学)	
J23I045	高圧酸素富化火炎の計測に向けた測定技術の高度化	118
	早川 晃弘 (東北大学)、中谷 辰爾 (東京大学)	
J23I046	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	121
	久保 正樹 (東北大学工学研究科)、小宮 敦樹 (東北大学)	
J23I047	Design and Optimization of Multidirectional Wings of the Aero-train under the Effect of Static Aeroelasticity	127
	Chenguang Lai (Chongqing University of Technology)、大林 茂 (東北大学)	

J23I049	胎盤から脳への情報伝達を模倣した“Maternal Brain-on-a-chip”の開発	131
	稻垣 舞 (徳島大学)、船本 健一 (東北大学)	
J23I050	Study of Shock Wave-Particles Interaction	134
	Kazuya Tajiri (Michigan Technological University)、焼野 藍子 (東北大学)	
J23I054	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	138
	後藤 実 (宇部工業高等専門学校)、武田 翔 (東北大学)	
J23I055	Fundamental Characteristics of Ammonia/Water Vapor/Hydrocarbon Premixed Laminar Flames	140
	早川 晃弘 (東北大学)、Ekenechukwu C. Okafor (九州大学)	
J23I056	カーボンナノチューブ分散樹脂基複合材料の導電性メカニズムの解明	143
	中山 昇 (信州大学)、武田 翔 (東北大学)	
J23I057	Hybridization of Nanocellulose with Silver Nanoparticles for the Fabrication of Antibacterial Filament Composites by a Field-assisted Flow Focusing Method	146
	高奈 秀匡 (東北大学)、Anthony B. Dichiara (University of Washington)	
J23I058	Transient Structural Analysis of the Interaction of Stiffness and Compliance between Aorta and Carotid Arteries by Performing Numerical Simulations	150
	Yujie Li (Torrens University)、太田 信 (東北大学)	
J23I059	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	153
	森澤 征一郎 (沖縄工業高等専門学校)、大林 茂 (東北大学)	
J23I060	Explore the Shaping Effects of Arteriovenous Fistula on Haemodynamics in Patients Receiving Haemodialysis	156
	Mingzi Zhang (Macquarie University)、太田 信 (東北大学)	
J23I061	Upscaling Flow in Geothermal Fractured System Using Digital Rock Physics and Machine-Learning	159
	Julien Maes (Heriot-Watt University)、鈴木 杏奈 (東北大学)	
J23I062	Simulation and Optimization of Stent Geometry Design based on Numerical Simulation	164
	Narendra Kurnia Putra (Institut Teknologi Bandung)、安西 眇 (東北大学)	
J23I063	自由飛行している次世代再突入カプセル圧力分布計測技術の開発	167
	永井 大樹 (東北大学)、Hirotaka Sakaue (University of Notre Dame)	
J23I064	超高速応答型感圧塗料の開発とその応用	170
	永井 大樹 (東北大学)、高橋 俊 (宇宙航空研究開発機構)	
J23I065	極低温ループヒートパイプ内部の気液二相熱流動現象の包括的理	173
	小田切 公秀 (宇宙航空研究開発機構)、永井 大樹 (東北大学)	
J23I066	高速飛しょう体周りの流れ場の高感度定量可視化計測法の確立	177
	水書 稔治 (東海大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J23I070	Sonic-boom Surrogate Model Integration in a Chemistry-climate Model	180
	Hiroshi Yamashita (German Aerospace Center)、大林 茂 (東北大学)	
J23I071	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	182
	永島 浩樹 (琉球大学)、徳増 崇 (東北大学)	
J23I072	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	184
	福山 敦彦 (宮崎大学)、大堀 大介 (東北大学)	
J23I073	遷音速 / 超音速境界層の層流制御技術の開発	186
	服部 裕司 (東北大学)、Adrian Sescu (Mississippi State University)	
J23I074	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	189
	太田 匠則 (千葉大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J23I076	Evaluation of Heat and Mass Transfer near the Gas-liquid Interface during the Phase Change of Volatile Organic Compounds	192
	神田 雄貴 (東北大学)、Yingxue Hu (Xi'an Jiaotong University)	

J23I077	自由飛翔体周囲流れ場と表面圧力場の同時計測に向けた基礎研究	195
	沼田 大樹 (東海大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J23I078	Product Gas Characteristics of Ammonia/hydrogen Fuel at High Pressure Conditions	197
	早川 晃弘 (東北大学)、Agustin Valera-Medina (Cardiff University)	
J23I080	Multi-scale Analysis of Oxygen Ion Conduction Property in Solid Oxide Electrolyte Membrane	199
	徳増 崇 (東北大学)、Jeongmin Ahn (Syracuse University)	
J23I081	Pathobiology-Hemodynamics Interaction in Aneurysms Genesis, Growth and Rupture	202
	Muhamed Albadawi (Alexandria University)、太田 信 (東北大学)	
J23I082	Evaluation of Wall Thinning with Thick Insulator Based on Pulsed Eddy Current Testing Method using Novel Signal Processing Way	208
	Shejuan Xie (Xi'an Jiaotong University)、内一 哲哉 (東北大学)	
J23I084	Evaluation of the Dynamics of Natural Convection Thermal Boundary Layer under High Grashof Number Condition	213
	小宮 敦樹 (東北大学)、Nicholas Williamson (The University of Sydney)	
J23I085	Generation of Charged Cavitation Bubbles and the Characteristics	216
	佐藤 岳彦 (東北大学)、Mohamed Farhat (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL))	
J23I086	高速超微小液滴の生成と液滴特性	218
	佐藤 岳彦 (東北大学)、金澤 誠司 (大分大学)	
J23I087	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)	
J23I088	Combination of Atmospheric Pressure Plasma with Mist Generated by Condensation of Water Vapor in Pressurized Air	224
	Yun-Chien Cheng (National Yang Ming Chiao Tung University)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J23I089	Thermophoretic Separation of Electrolytes for Desalination	227
	Juan Felipe Torres (Australian National University)、小宮 敦樹 (東北大学)	
J23I091	An Integrated Study of Quantum Chemistry and Molecular Simulation for Reactive Polymer Materials	230
	Yinbo Zhao (Tongji University)、菊川 豪太 (東北大学)	
<令和 5 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>		
J23H001	非定常マランゴニ対流の制御のための低次元モデル構築	235
	工藤 正樹 (東京都立産業技術高等専門学校)、大林 茂 (東北大学)	
J23H002	鳥の飛行を規範とした革新的飛行体の開発	241
	石出 忠輝 (木更津工業高等専門学校)、大林 茂 (東北大学)	
<令和 5 年度東北大学流体科学研究所国際連携公募共同研究採択課題>		
J23R001	Experiment on Mechanical Integrity Evaluation of Degradable Zinc Wire under Tensile Load in Flowing Medium	247
	Aike Qiao (Beijing University of Technology)、太田 信 (東北大学)	
J23R002	機能性材料の合成における量子・分子論的考察	250
	金子 智 (神奈川県立産業技術総合研究所)、徳増 崇 (東北大学)	
J23R003	Prediction and Optimisation of Axisymmetric Shock Reflection in Supersonic Aerospace Applications	253
	Hideaki Ogawa (九州大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
<令和 5 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>		
J23Ly01	Active Control of Protein Mass Transfer by Membranes with Various Pore Patterns	265
	小宮 敦樹 (東北大学)、Sébastien Livi (IMP, INSA Lyon, Université de Lyon)	

J23Ly02	超音波反射にもとづく配管内面の腐食の形状推定	267
	中本 裕之 (神戸大学)、内一 哲哉 (東北大学)	
J23Ly03	Investigation of a Predictive Therapeutic Response under Controlled Oxygen Condition in Cancer Patient-derived Organoids	270
	Nicolas Aznar (University Claude Bernard Lyon 1)、船本 健一 (東北大学)	
J23Ly04	Experimental Study of New Model Electroactive Materials (TEmPuRA)	274
	Gildas Coatify (LGEF, INSA Lyon)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J23Ly05	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	277
	足立 高弘 (秋田大学)、小宮 敦樹 (東北大学)	
J23Ly06	Monitoring Eukaryotic Cell Functions under Various Hypoxic Conditions with Microfluidic Differential Oxygenators	280
	Jean-Paul Rieu (Claude Bernard University Lyon 1)、船本 健一 (東北大学)	
J23Ly07	ナノドットに閉じ込められたスキルミオンのフィンスラー幾何モデルによる研究: 応力下での安定性と形態変化	283
	加藤 文武 (茨城工業高等専門学校)、内一 哲哉 (東北大学)	
J23Ly08	Numerical Study on Electrical Drift and Diffusion of Ions in Polymer Strips	287
	Joël Courbon (INSA Lyon)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J23Ly09	Mass Transfer Enhancement and Control by using Ultrasound Induced Flow	290
	小宮 敦樹 (東北大学)、Valéry Botton (LMFA, INSA Lyon, Université de Lyon)	
J23Ly10	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	292
	石本 淳 (東北大学)、Thomas Elguedj (INSA Lyon, LaMCOS Lab)	
J23Ly11	Multiscale Simulation of Carbon Electromigration in Iron	294
	徳増 崇 (東北大学)、Patrice Chantrenne (Université de Lyon)	
J23Ly12	Recipe of Polymer Coating by Cold Spray	296
	Bernard Chrystelle (東北大学学際科学フロンティア研究所)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J23Ly13	Epoxy Polymer for Ammonia Storage Solutions	301
	Nicolas Mary (MATEIS Lab, INSA Lyon)、内一 哲哉 (東北大学)	
J23Ly14	Clarification of Flow Structures Related to Jet Noise Generation using Mode Analysis and High-precision Jet Flow Simulation	305
	焼野 藍子 (東北大学)、Christophe Bogey (Ecole Centrale de Lyon)	
<令和5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>		
J23L003	応力降下量と、観測に基づくせん断応力の直接比較	309
	椋平 祐輔 (東北大学)、吉光 奈奈 (京都大学)	
J23L014	飛行しながら回転する中空円筒の実験と数値解析	311
	平田 勝哉 (同志社大学)、石本 淳 (東北大学)	
J23L016	Tensile Effect by Wall Shear Stress around Stagnation Point and Flow Instability by Wall Elasticity in Full-Scale Patient-Specific Aneurysm Model	313
	田中 学 (千葉大学)、太田 信 (東北大学)	
J23L017	リブレット加工による粘性抵抗低減メカニズムの解明	315
	大山 聖 (宇宙航空研究開発機構)、焼野 藍子 (東北大学)	
J23L018	回転同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の高性能化に向けた研究	317
	小林 宏充 (慶應義塾大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J23L023	次世代液化燃料の噴射過程に関する研究	321
	川原田 光典 (交通安全環境研究所)、大島 逸平 (東北大学)	
J23L027	直交格子による超音速／極超音速下における熱流束予測	325
	佐々木 大輔 (大阪公立大学)、大林 茂 (東北大学)	

J23L028 火星飛行機実現に向けた柔軟膜翼の数値的・実験的研究	328
佐々木 大輔 (大阪公立大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J23L032 ロータ配置の対称性に着目したマルチロータ機の地面効果の解明	331
大塚 光 (金沢大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J23L037 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	333
長谷川 裕晃 (宇都宮大学)、大林 茂 (東北大学)	
J23L040 実効粘度の非接触測定に向けた慣性移動を伴う懸濁液流れの数値的・実験的研究	337
川口 美沙 (東京農工大学)、船本 健一 (東北大学)	
J23L042 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2	339
澤山 和貴 (京都大学)、椋平 祐輔 (東北大学)	
J23L048 フайнバブル燃料の微粒化と燃焼特性	342
中武 靖仁 (久留米工業高等専門学校)、早川 晃弘 (東北大学)	
J23L051 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	346
千葉 一永 (電気通信大学)、大林 茂 (東北大学)	
J23L052 3D スキャンとプリントによる物理的き裂モデル	349
Michael Kröhn (GRS gGmbH)、鈴木 杏奈 (東北大学)	
J23L053 数値流体力学解析と細胞実験による血管疾患の機序解明	353
宮内 優 (宮崎大学)、船本 健一 (東北大学)	
J23L067 プラズマを用いたサスティナブルアンモニア製造法の開発	358
白石 優也 (山口大学)、徳増 崇 (東北大学)	
J23L068 機械学習が加速させる地下流体エネルギーに係る破壊現象の理解	361
椋平 祐輔 (東北大学)、直井 誠 (京都大学)	
J23L069 High Speed Schlieren Velocimetry of EHD Enhanced Phase Change Thermal Storage	363
James Cotton (McMaster University)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J23L075 分子動力学法を用いた界面ナノバブルの応力解析	368
堀 琢磨 (東京農工大学)、菊川 豪太 (東北大学)	
J23L079 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	370
福島 啓悟 (福井大学)、徳増 崇 (東北大学)	
J23L083 火星探査航空機の空力と動特性に対するプロペラ後流の影響調査	372
金崎 雅博 (東京都立大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J23L090 Data Analysis of Thermo-Physical Properties of Organic Materials Using Machine Learning Algorithms	378
Hari Krishna Chilukoti (National Institute of Technology, Warangal)、菊川 豪太 (東北大学)	

## 1. 令和 5 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平成 25 年度をもって終了した。

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、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。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、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。

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令和元年度に新設された。

令和 5 年度公募共同研究は、令和 5 年 4 月 1 日から令和 6 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、令和 4 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。

令和 5 年 11 月に公募共同研究成果報告会、同月には、運営委員会、共同研究委員会が開催された。

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

令和5年11月6日～8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-2023において開催した。本報告会では82件（一般・国際連携・萌芽区分67件、リヨンセンター公募共同研究15件）のポスターセッション（写真1）とショートプレゼンテーション（写真2）が行われ、125人の出席者があった。その他、同時開催されたICFD2023にて、29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：ポスターセッションの様子



写真2：ショートプレゼンテーションの様子

## 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

	令和4年度	令和5年度
登録済みデータ総数	442	442
流体科学データベースへのアクセス件数	3,657	4,383

#### 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

令和5年11月に、令和4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

		令和4年度	令和5年度
申請数（件）		87	90
採択数（件）		64*	67
国内・国際	国内	38	33
	国際	26	34
分野別件数 (国内/国際)	環境・エネルギー	22 (11/11)	21 (8/13)
	ナノ・マイクロ	2 (1/1)	4 (2/2)
	健康・福祉・医療	10 (5/5)	15 (8/7)
	宇宙・航空	14 (11/3)	13 (10/3)
	基盤流体科学	15 (9/6)	14 (5/9)
	その他	1 (1/0)	0 (-/-)
	採択率（%）	74	74
申請金額（千円）：a		28,136	29,624
採択金額（千円）：b		15,930	15,453
平均充足率（金額）（%）：b/a		57	55
平均採択金額（千円）		249	243

\*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。

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	令和4年度	令和5年度
申請数（件数）	3	3
採択数（件数）	3	3
採択率（%）	100	100
申請金額（千円）：a	4,800	5,880
採択金額（千円）：b	2,223	3,129
平均充足率（金額）（%）：b/a	46	53
平均採択金額（千円）	741	1,043

萌芽公募共同研究	令和4年度	令和5年度
申請数（件数）	7	2
採択数（件数）	7	2
採択率（%）	100	100
申請金額（千円）：a	1,292	341
採択金額（千円）：b	1,008	242
平均充足率（金額）（%）：b/a	78	71
平均採択金額（千円）	144	121

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

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

表4：リヨンセンター公募共同研究の申請・採択状況

リヨンセンター公募共同研究	令和4年度	令和5年度
申請数（件数）	20	14
採択数（件数）	20	14
採択率（%）	100	100
申請金額（千円）：a	11,030	7,580
採択金額（千円）：b	8,950	6,480
平均充足率（金額）（%）：b/a	81	85
平均採択金額（千円）	448	463

※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：リーダーシップ共同研究の実施状況

		令和4年度	令和5年度
実施数（件）		21	23
国内・国際	国内	18	20
	国際	3	3
分野別件数 (国内/国際)	環境・エネルギー	12* (11/1)	10 (8/2)
	ナノ・マイクロ	1 (1/0)	1 (1/0)
	健康・福祉・医療	1** (1/0)	2 (2/0)
	宇宙・航空	4 (3/1)	4 (4/0)
	基盤流体科学	3 (2/1)	6 (5/1)
	その他	0	0
	申請金額（千円）：a	7,152	7,970
	採択金額（千円）：b	1,775	2,017
	平均充足率（金額）（%）：b/a	25	25
	平均採択金額（千円）	85	88

\*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 6 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。

表 6 : 研究者の受け入れ状況

	令和 4 年度	令和 5 年度
国内	798 (307)	927 (379)
国外	858 (307)	1,460 (610)
合計	1,656 (614)	2,387 (989)

( ) の数字は大学院生の人数で内数

※令和 4 年度は、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。

## 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 7 に示す。

表 7 : 研究費の内訳

	令和 4 年度	令和 5 年度
物件費（千円）	11,414	7,984
旅費（千円）	15,200	17,637
合計（千円）	26,614	25,621

## 1.6 研究成果の発表件数

研究成果の発表件数を表 8 に示す。これらの成果の内、主要な論文の別刷り等が、本報告書の後半に掲載されている。

表 8 : 研究成果の発表件数

	令和 4 年度	令和 5 年度
学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）	56	51
国際会議、国内会議、研究会、口頭発表等	231	237
その他（特許・受賞・マスコミ発表等）	23	37
合計（件）	310	325

### 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 9 から表 15 に記載する。

表 9：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 10：一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
	国際	20	28	30	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) (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) (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) (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) (14/8)
	基盤	5 (4/1)	12 (7/5)	13 (8/5)	15 (10/5)	16 (12/4)	18 (12/6) (16/7)
	採択率 (%)	100	98	100	100	99	98
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 11：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 12：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 13：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 14：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 15：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 16 から表 23 に記載する。

表 16：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 17：一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	77*	70	82	84	78	
国内・国際	国内	44	44	38	44	41	35
	国際	25	33	32	38	43	43
分野別件数 (国内/国際)	環境・エネルギー	27 (17/10)	44 (23/21)	29 (12/17)	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)	6 (5/1)	8 (4/4)	4 (2/2)	3 (1/2)	5 (2/3)
	健康・福祉・医療	10 (6/4)	5 (3/2)	6 (3/3)	7 (4/3)	11 (3/8)	10 (5/5)
	基盤流体科学	23 (17/6)	22 (13/9)	27 (19/8)	24 (15/9)	31 (18/13)	27 (12/15)
採択率 (%)	70	69	73	79	78	80	
申請金額 (千円) : a	30,396	30,546	43,460	41,819	36,923	35,185	
採択金額 (千円) : b	16,819	17,065	19,847	22,409	21,733	20,452	
平均充足率 (金額) (%) : b/a	55	56	45	54	59	58	
平均採択金額 (千円)	244	243	244	273	259	262	

\* 年度途中に 1 件取り下げあり

表 18：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)	4
採択数 (件)	4
採択率 (%)	100
申請金額 (千円) : a	4,480
採択金額 (千円) : b	2,759
充足率 (金額) (%) : b/a	62
一件あたりの採択金額 (千円)	690

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

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

※採択額には、20%のインセンティブが含まれる。

表 19：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 20：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	20	24	16	17	17
	国際	13	8	7	3	5	0
分野別件数 (国内/国際)	環境・エネルギー	7 (5/2)	14 (10/4)	14 (13/1)	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)	5 (5/0)	4 (4/0)	2 (2/0)	1 (1/0)	1 (1/0)
	基盤流体科学	13 (7/6)	9 (5/4)	13 (7/6)	6 (4/2)	7 (5/2)	8 (8/0)
	申請金額 (千円) : a	11,825	12,217	9,186	6,600	9,038	5,588
採択金額 (千円) : b		2,894	2,905	2,508	1,847	2,327	1,490
平均充足率 (金額) (%) : b/a		24	24	27	27	26	27
平均採択金額 (千円)		103	94	89	97	106	88

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

※リーダーシップ共同研究は、所長リーダーシップ経費により実施している。

表 21：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 22：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 23：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	J23I001
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1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\*

林 崇雅\*, 中野 淳規\*, 小泉 佑輔\*, 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と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まれた熱がどのように拡散していくの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明らかにし、有用な熱中症対策の確立に貢献する。

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で、過剰な熱曝露に対する防護壁としてのミストの可能性について評価する。実験セには、フーリエ変換赤外分光法(FTIR)などを取り入れ、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た。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

ミスト層の遮蔽性能を測定するため、図1に示すような実験装置を構築し、FTIRを用いてミスト層の透過スペクトルに及ぼす水滴サイズの影響を分析した。実験は2–8 μmの波長範囲で行った。ミストノズルは、測定光路に対して垂直な距離  $h = 5, 10, 15$  cmに配置し、光源と検出器間の対応する距離は  $L = 20, 24, 32$  cmとした。ノズルAは公称粒径5 μmの2流体ノズル(Atomax, BN90)を使用し、ノズルBは公称粒径11 μmの2流体ノズル(Spraying Systems, Quick Fogger)を使用した。測定中は、コンプレッサー(DP-120C, Vacutronics)の圧力を0.5 MPaに安定させ、ポンプ(NPG-500E, 日本精密科学)を作動させ、流量を50 ml/minに設定した。ミスト流量が安定した時点で、FTIR(FTIR-200, 日本分光)を用いてミスト層の透過スペクトルを測定した。

図2はノズルから噴霧されたミスト層を示しており、同じ条件で噴霧されたにもかかわらず、噴霧角度と噴霧量が異なることがわかる。粒子画像流速測定(PIV)分析により、各ノズルから噴出する水滴の平均粒子速度を測定した。ノズルAの平均粒子速度は16 m/s、ノズルBの平均粒子速度は3.5 m/sであった。この情報をもとに、単位時間あたりの噴霧量と水滴の体積分率を以下のように算出した：ノズルAではそれぞれ  $3.05 \times 10^8 \text{ cm}^3$  と  $2.73 \times 10^{-7}$  %、ノズルBではそれぞれ  $2.81 \times 10^7 \text{ cm}^3$  と  $2.97 \times 10^{-6}$  %であった。

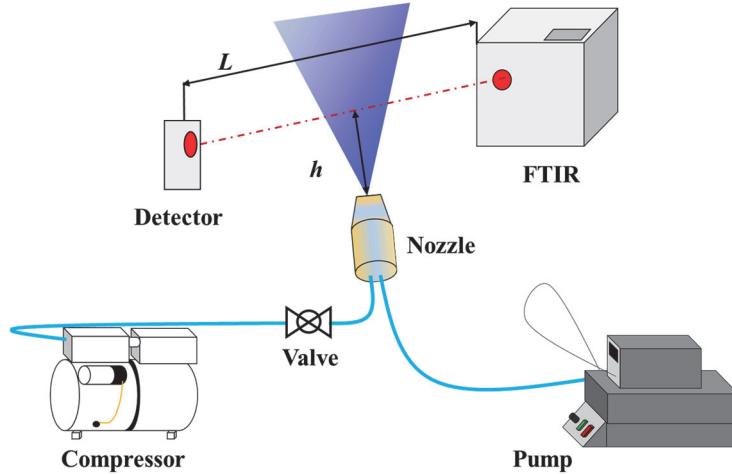


図 1：実験装置の概略図



図 2：各ノズルから噴霧されたミスト層の写真

また、本研究で使用した FTIR からの出射光の直径が 32 mm であることを考慮し、各条件下でのミスト層の光路体積を表 1 に示す。

表 1：各ノズルのミスト層の光路体積

	$h = 5 \text{ cm}$	$h = 10 \text{ cm}$	$h = 15 \text{ cm}$
Nozzle A	$14.41 \text{ cm}^3$	$40.62 \text{ cm}^3$	$70.95 \text{ cm}^3$
Nozzle B	$70.97 \text{ cm}^3$	$144.4 \text{ cm}^3$	$217.4 \text{ cm}^3$

測定結果を図 3 に示す。ノズル A の透過率は、一般に噴霧距離が長くなるにつれて低下していることがわかる。この現象は、噴霧位置がノズルから遠ざかるにつれてミスト層厚さが大きくなり、それに伴って光路体積が増加するためと考えられる。注目すべきは、ノズルから放出される水滴の粒度分布に起因すると思われる顕著な乱れが、すべての波長にわたって観察されることである。水滴の粒径は一様ではなく、その結果、ミスト層内の粒径分布は多分散になっている。したがって、今後の研究では、水粒子の多分散性に関する、より包括的な調査が必要である。

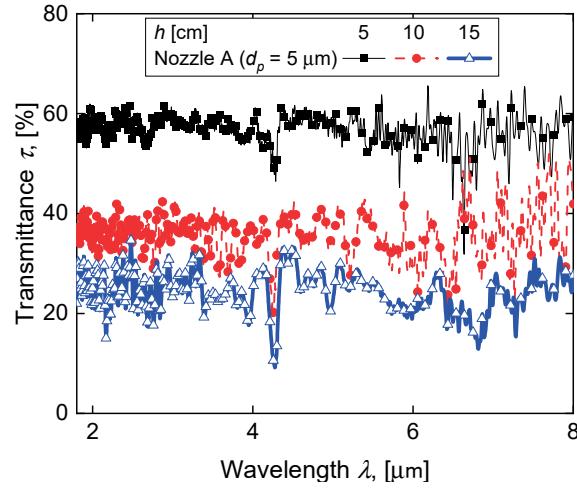


図3：ノズル位置の違いによるノズルAからのミスト層の分光透過率

図4は、表1に示した光路体積がほぼ同じになるようにミストノズルを配置した条件下での各ミストの透過率を比較したものである。ノズルAから噴霧されたミストは体積率が小さいが、水の使用量が少ないにもかかわらず、透過率はノズルBとほぼ同等である。このことから、液滴径5 μmのミストは、液滴径11 μmのミストに比べて輻射を遮蔽する効果が大きいことがわかる。

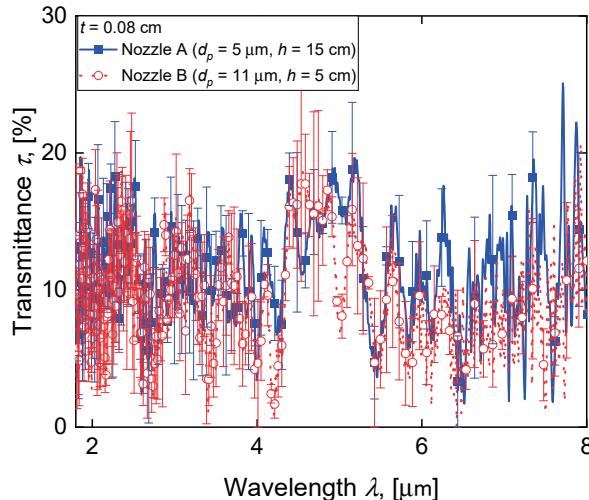


図4：同じ光路容積における異なるノズルからのミスト層の透過率の比較

### 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関し、スペクトル学的知見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ついて重要な知見を提供するものである。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、熱中症予防の分野における今後の研究開発の指針となるものである。

### 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の調査を行った。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関する知見を得た。

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。

## 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. Gonomi, M. Jono, K. Suzuki, S. Moriya, J. Okajima, T. Kogawa: Spectral Shielding Evaluation of Mist for Heat Stroke Prevention against Thermal Radiation from the Ground Surface, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-28, pp. 89-90.

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23I002
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1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, ††所内対応職員

## 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、衝撃波管を用いてフォーム及びゴムと衝撃波との非定常干渉特性の調査を行っている。円形、四角、楔等の各種形状の柔軟弾性体を用いて、超音速環境下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実験とCFD計算の両面から調べ、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。射出方法は火薬銃式および高圧ガス銃式の2通りである。図1は弾道飛行装置を示す。図2は射出試験体の模式図を示す。実験では安定した飛行条件導出のため主に球形状およびアスペクト比1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り、ガス銃式弾道飛行装置で使用した弾性体の材質はブタジエンゴムである。図3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4は試験体と離脱衝撃波の模式図を示す。 $\delta$ は飛行方向における離脱衝撃波と試験体との間の距離、 $\theta$ は離脱衝撃波の角度、 $r$ は試験体の曲率半径となる。図3より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、 $M = 1.80 \pm 0.05$ となる。弾性体は飛行に伴い変形し、 $t = 1514.3\mu s$ での形状は、直径は11.1mm(+11%)、全長は8.7mm(-23%)、曲率半径は8.7mm(+74%)である。衝撃波角度 $\theta$ は94.0°であり、離脱衝撃波距離 $\delta$ は3.45mmである。また、 $t = 1846.3\mu s$ での形状は、直径は9.5mm(-5.0%)、全長は8.9mm(-21%)、曲率半径は7.0mm(+40%)である。衝撃波角度 $\theta$ は93.4°であり、離脱衝撃波距離 $\delta$ は3.51mmである。また、飛行中の剛体の前方にも離脱衝撃波が形成され、衝撃波角度は54.4±2.8°であり、離脱衝撃波距離 $\delta$ は1.50±0.03mm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ー、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。

図5はガス銃式弾道飛行装置を用いた光学可視化結果を示す。図5より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、 $M = 1.38 \pm 0.02$ である。試験体は飛行に伴

い変形し,  $t = 2976.0\mu\text{s}$ での形状は, 縦幅 31.1mm(+0.32%), 横幅 27.0mm(-13%)である. 衝撃波角度  $\theta$  は  $138.9^\circ$  であり, 離脱衝撃波距離  $\delta$  は  $14.95\text{mm}$  である. また,  $t = 3376.0\mu\text{s}$ での形状は, 縦幅 28.4mm(-8.4%), 横幅 31.2mm(+0.65%)である. 衝撃波角度  $\theta$  は  $117.5^\circ$  であり, 離脱衝撃波距離  $\delta$  は  $14.42\text{mm}$  である.

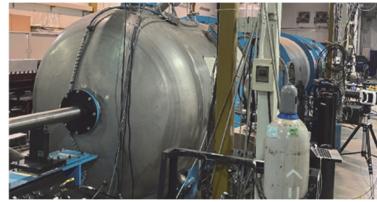


図 1 : 弹道飛行装置

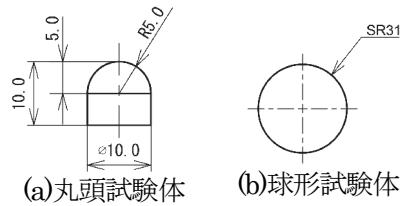


図 2 : 試験体模式図

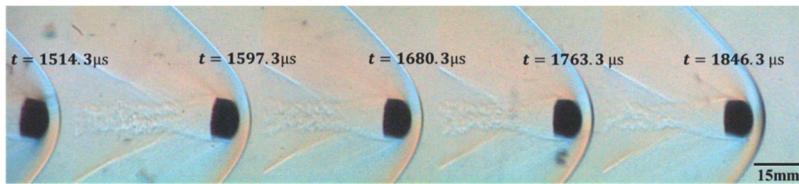


図 3 : 丸頭弾性体に発生する離脱衝撃波の可視化

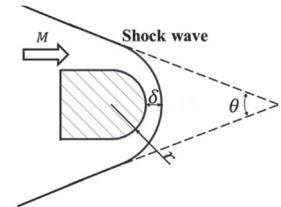


図 4 : 試験体と衝撃波の模式図

### 3. 研究目標の達成状況

本研究の目標は, 弹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ミュレーショ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, 衝撃波角度が増減する現象が確認できた.

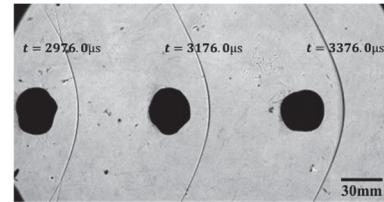


図 5 : 球状弾性体に発生する離脱衝撃波の可視化

### 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, 数値解析を用いて衝撃波背後のエネルギー, 静圧, 周囲の温度, 密度勾配などを検証する必要がある.

### 5. 研究成果

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] K. Kitagawa, H. Ueda, N. Makita, K. Ohtani, N. Sato, Y. Konishi: Attenuation Effect of Shock Environment in Supersonic Flow using the Soft Body, *The 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information (AFT-2023) IFS Collaborative Research Forum*, Sendai, (2023), #CRF-50.
- [2] 牧田直樹, 北川一敬, 佐藤暢也, 大谷清伸, 小川俊広, 上田颯: 超音速自由飛行時の軟弾性体の挙動について, 2023 年度衝撃波シンポジウム, 北九州, (2023), #P-13.
- 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	J23I004
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Study on Micro-scale Evaporation for Heat Transfer Enhancement

Junnosuke Okajima\*†, Henrik Sontheimer\*\*  
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 the 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. Mr. Sontheimer in TU Darmstadt stayed at IFS in three weeks. We developed a new numerical model to simulate the interface deformation and its evaporation by OpenFOAM, as shown in Fig. 1(a). This numerical model can evaluate the local evaporative mass flux on the structured surface. We found that the interface motion was affected by the capillary force induced by the local structure, as shown in Fig. 1(b), and the strong evaporation was generated from the thin film formed at the top surface of the structure.

In addition, we conducted a numerical simulation on single bubble nucleate boiling. We focused on the condition of the microlayer formation and compared the experimental data taken in TU Darmstadt. It is known that the dielectric fluid FC-72, which has low viscosity and low surface tension, hardly forms a microlayer during boiling. In our numerical simulation, we successfully captured the microlayer of FC-72 liquid by using a fine computational grid. The formation condition of the microlayer was dependent on the temperature of the heat transfer surface and the expansion velocity of the interface.

### 3. Achievements

The obtained results contribute to modeling macroscopic wetting behavior and heat transfer on the micro-structured surface and the design strategy to enhance the evaporative heat transfer for high-heat-flux cooling.

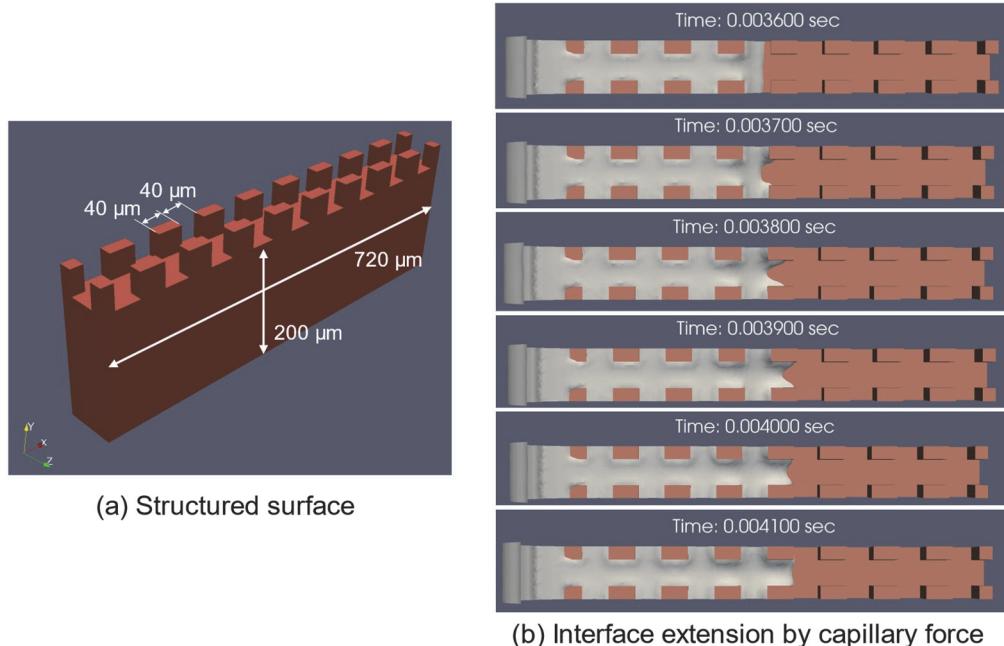


Figure 1: Numerical model and calculation results

#### 4. Summaries and future plans

This year, we started a new collaboration on the simulation of interface extension on micro-structured surfaces. Additionally, the microlayer formation of nucleate boiling of FC-72 was also investigated. As a next step, we will develop the numerical model of the thermal device, such as a heat pipe or 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] J. Okajima, H. Sontheimer, and P. Stephan, Study on Micro-scale Evaporation for Heat Transfer Enhancement, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRE-30, pp. 93-94.
  - [2] H. Ishibashi, K. Ota, P. Stephan, J. Okajima, Numerical Simulation of Bubble Shape and Heat Transfer During Nucleate Pool Boiling of FC-72, *Proceedings of the 20th International Conference on Flow Dynamics*, (2023), pp. 1268-1270.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

課題番号	J23I005
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2023.4~2024.3
継続年数	3年目

## スペースデブリ除去テザー衛星のための超高速衝突実験

Hyper-velocity Collision Experiment for Tether Satellites to Remove Space Debris

槙原 幹十朗\*†, 大谷 清伸\*\*††

森本 大介\*, 高橋 輝\*

\*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

スペースデブリ除去を目的とするテザー衛星のデブリ衝突防護に関する超高速衝突実験を行う。テザー衛星のミッション成功確率を向上させる中空円筒テザー (HCT) 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 HCT の特性を明らかにして、高い性能を実証することである。従来構造のテザーに比べテザーの防御性能を向上できるという特長がある。デブリと衝突しても破断しにくいので、デブリ環境を悪化させない利点がある。実験によりデブリ衝突位置と HCT の形状変化との関係性を明らかにして有用性を示す。研究目的の2つ目は、衝突破壊力学の学術観点からロバストな多重積層テザーの構造形態研究も進めることである。これまで殆ど研究されてこなかったテザーの変形部分の耐デブリ特性を実験により明らかにする。

### 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 a), b)に示す様に、上部から吊り下げたテザーをチャンバー内に設置する。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。図 2 に実験パラメータの定義を示す。スタンドオフ比  $k$  とは、HCT中心を0とした、プロジェクタイル衝突点までの距離とHCT半径との比であり、0, 0.4 の2通りで実験した。衝突角  $\theta$  とは、保持具とプロジェクタイル飛来方向とのなす角であり、0, 45° の2通りで実験した。HCTの断面形状を把握するために、ステンレス製の評価用針金を図 1 c)に示す2か所に設置した。衝突実験後に評価用針金を取り外し、評価用針金のフレーム重心を通る、最短の線分  $L_1$ 、最長の線分  $L_2$  を計測した。 $L_1, L_2$  から、HCTの扁平度  $f \equiv (L_2 - L_1)/L_0$  を求めた。なお、 $L_0$  は基準長さであり、十字型保持具により形成される正方形の一辺の長さ 106 mm とした。

同様の十字型保持具条件 (保持具無し, 保持具あり ( $\theta = 0^\circ$ ), 保持具あり ( $\theta = 45^\circ$ )) において、スタンドオフ比の違いによる影響を比較した。扁平度は各保持具条件においてすべて  $k = 0.4$  の場合の方が  $k = 0$  の場合よりも低い値を示した。 $k = 0$  の場合プロジェクタイルとテザーの衝突面は垂直衝突するのに対し、 $k = 0.4$  の場合斜めに衝突するため、掠める様に衝突し、形状変化が少なかったと考えられる。次に十字型保持具なしの場合とありの場合を比較した。扁平度は  $\theta = 0^\circ, 45^\circ$  どちらの場合においても、保持具を付加した場合の方が付加しない場合よりも有意に低い値を示した。つまり、十字型保持具を付加することで、テザーの形状保持性能が向上したと示された。

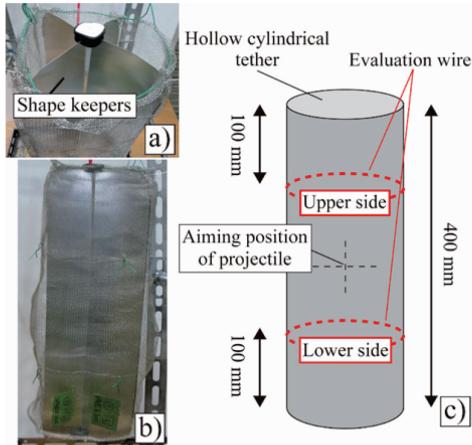


図1 十字型保持具を付加した中空円筒ターゲット

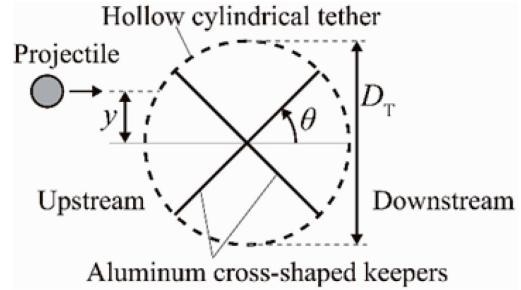


図2 実験パラメータ

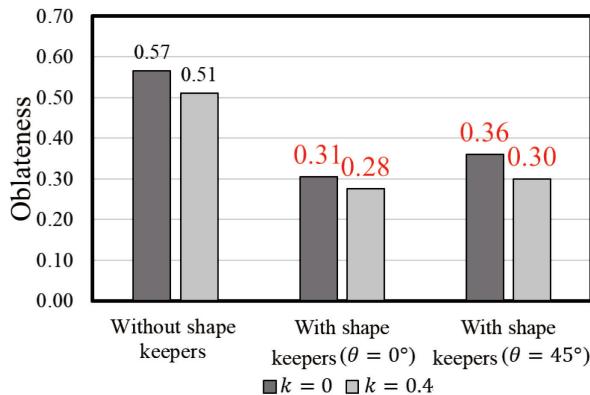


図3 衝突後の HCT の扁平度  $f$

### 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、十字型保持具の有無、衝突角度及びスタンドオフ比を変化させたデブリ衝突実験を実施した。十字型保持具の有無に顕著な形状変化の差が認められたので、十字型保持具の有用性を示した。形状保持具の材質が損傷の大きさに及ぼす影響を多角的に評価していく。

### 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] D. Morimoto, H. Takahashi, Y. Sugiyama, K. Otsuka, K. Ohtani, and K. Makihara: Evaluation of Shape-Keeping Performance for Tether Cross-Shaped Keepers by Hypervelocity Impact, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-49, pp. 136-138.
- [2] 高橋輝, 森本大介, 杉山善洋, 大塚啓介, 槙原幹十朗, 「部分熱硬化型インフレータブル構造物のデブリ防護性能評価」, 日本機械学会東北支部第59期秋季講演会, 弘前, (2023).
- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）  
高橋輝, 森本大介, 杉山善洋, 大塚啓介, 槙原幹十朗, 独創研究学生賞, 日本機械学会, 「部分熱硬化型インフレータブル構造物のデブリ防護性能評価（日本機械学会東北支部第59期秋季講演会）」, 2023年9月30日受賞.

課題番号	J23I006
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目

**三次元トランジスタにおける Volumeless Multi-Vth 形成に関する研究**  
**A Study on the formation of Volumeless Multi-Vth in 3D Transistors**

間部 謙三\*†, 森田 行則\*††, 遠藤 和彦\*\*††

\*産業技術総合研究所, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

三次元トランジスタの課題である閾値電圧 (Vth) の多値化 (Multi-Vth) を従来の仕事関制御用金属 (Work Function Metal:WFM) の膜厚制御以外 (WFM の体積増加を伴わない: Volumeless) で実現するための新規方法を探索する。

## 2. 研究成果の内容

産総研内で準備した試料に対して流体研所有の各種プラズマ装置で酸化を実施。その後、物理分析を実施することにより、実効仕事関数制御に最適な酸化方法を探索した。

まず、4インチ Si 基板上に、Ti/Al 積層構造を産総研の電子ビーム真空蒸着装置にて成膜した。表 1 は、電子ビーム真空蒸着装置にて成膜した TiAl 膜を XPS 装置で測定して得られた TiAl 組成・膜厚である。今回、蒸着時設定ターゲット Al/ (Al+Ti) 比を 0.33~0.67 としたが、蒸着膜の実測組成はほぼ狙い通りであった。また、成膜膜厚も若干厚めだが狙い通りといえる。ただし、設定膜厚 6nm (条件 1~3) の場合、膜中酸

表 1 電子ビーム蒸着した TiAl 組成・膜厚評価結果

	組成						膜厚 [nm]	
	設定		実測					
	Ti:Al比	Al/(Al+Ti)	Ti [at%]	Al [at%]	O [at%]	Al/(Al+Ti)	設定	実測
条件1	Ti:Al=1:0.5	0.33	25.0	12.0	63.0	0.32	6	7.2
条件2	Ti:Al=1:1	0.5	21.4	16.3	62.3	0.43	6	8.7
条件3	Ti:Al=0.5:1	0.67	12.9	28.1	59.0	0.68	6	8.7
条件4	Ti:Al=1:1	0.5	21.0	18.0	60.9	0.46	12	

素量が多い傾向が認められた ([O]~60at%)。

設定厚膜を 12nm として蒸着時設定 Al/ (Al+Ti) 比=1 の TiAl を成膜し、XPS にて膜中組成の深さプロファイルを取得した (図 1)。その結果、酸素濃度は表面から 4nm

までは深くなるにつれ減少し、それ以降飽和する傾向が確認された（飽和値 30~40at%）。そこで、流体研所有の各種プラズマ装置で酸化を実施するにあたっては、酸化前に TiAl を表面から 4nm まで除去して表 2 の条件にてプラズマ酸化を実施した。図 2 は、蒸着時設定 Al/ (Al+Ti) 比=1 の TiAl を表 2 の条件にてプラズマ酸化を実施した場合の表面組成のプラズマ照射時間依存性である（組成は XPS にて測定）。図 2 よりプラズマ酸化なしでは約 30%だった酸素組成が、プラズマ照射時間 30 秒以上で 60~70%に増加し、その後一定であることが確認された。

本研究の基本コンセプトについて、2023 年 11 月 6~8 日に行われた Twentieth International Conference on Flow Dynamics にて発表した。

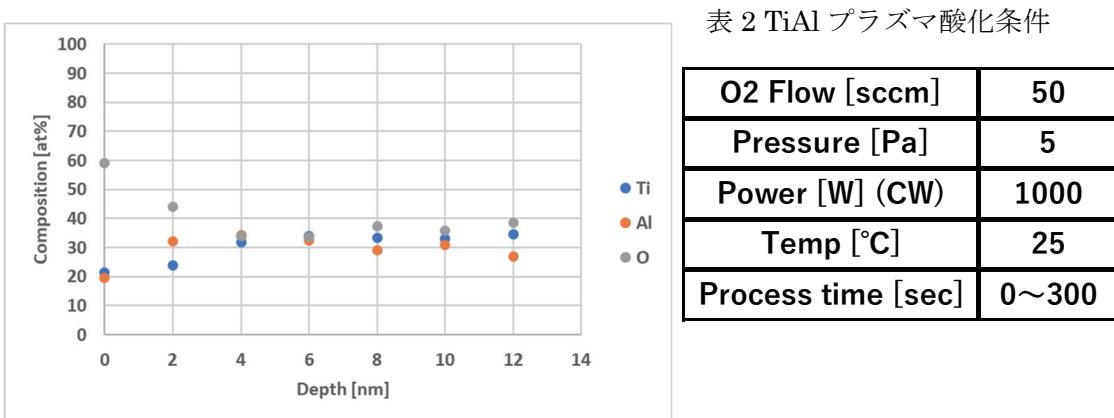


図 1 TiAl 膜中組成の深さプロファイル

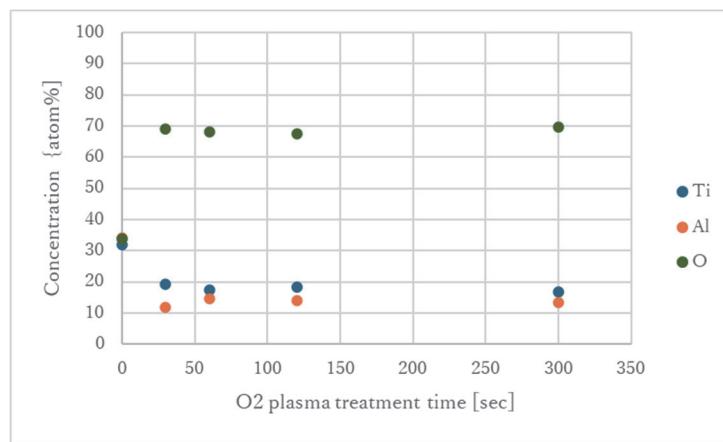


図 2 TiAl 組成のプラズマ照射時間依存性

### 3. 研究目標の達成状況

三次元トランジスタの課題である Multi-Vth を仕事関数制御金属 WFM の体積増加を伴わず Volumeless で実現するための新規方法の提示を目指したが、本年度はその第一歩として n 型 WFM である TiAl の成膜環境立ち上げと TiAl に対するプラズマ酸化

プロセス条件検討を実施した。

#### 4. まとめと今後の課題

高誘電率ゲート絶縁膜上メタルゲートの実効仕事関数制御の検討に向け、n型メタルゲート材料TiAlの成膜を電子ビーム蒸着で行った。XPSで分析した結果TiAl組成は電子ビーム蒸着時の積層シーケンスで制御可能であることが確認された。また、上記TiAlをプラズマ酸化したところ約30秒の処理で酸素量が飽和していることが確認された。今後、プラズマ処理による実効仕事関数への影響など確認する。

#### 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. Manabe; Suppression of Charges in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Gate Dielectric and Improvement of MOSFET Performance by Plasma Nitridation, *Proceedings of the Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), pp.417-418.

##### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23I007
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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帶電や膜電位変動を直接的に生じさせる重要な因子である. 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, 膜帶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

流体近似計算および等価回路解析を組み合わせた数値モデルを発展させ, 大気圧 He プラズマによる径方向細胞組織への電気的影響を精査した. 本解析から, 駆動周波数および照射半径に対して, 電圧・電流密度の空間分布変化を定量的に示すことができた.

また, プラズマ由来の誘起重畳電界下における細胞膜のラジカル透過過程を古典分子動力学法により模擬した. 細胞近傍の水層厚さを調整することで界面におけるイオンの電気二重層とバルク層の形成を適切に模擬した(図1).

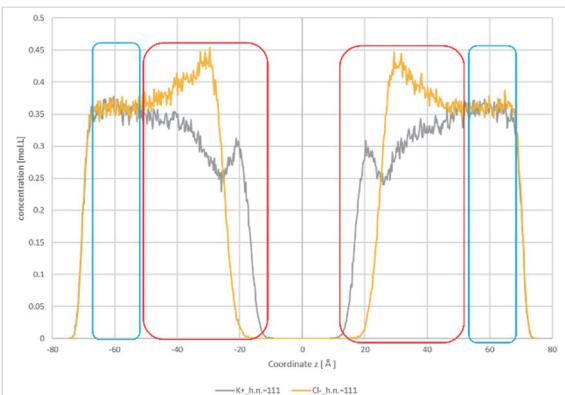


図1: 細胞膜近傍における電気二重層とバルク層の形成

### 3. 研究目標の達成状況

今回の研究において、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発展させ径方向のパラメータ解析も可能となった。また、重畠電界に対する分子的解析もより精緻かつ定量的に計算できたことから、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ェア（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。

### 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発展的モデル開発および高速並列計算による長時間の膜挙動解析が実施され、生体組織および細胞膜への重畠電界モデルが精緻化した。今後、多種の活性種や複合膜組成についても検証し、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）

[1] Yuta Iwata, Kosuke Takami, Ippei Yagi, Kosuke Tachibana, Akinori Oda, Takehiko Sato and Satoshi Uchida, "Permeation characteristics of hydrogen peroxide through biological membranes by applying electric field," *The XXXVth International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG XXXV)*, Egmond aan Zee, Netherlands (2023), P3-43, p. 260.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] K. Tachibana, K. Takami, R. Ninomiya, I. Yagi, A. Oda, S. Uchida, "Effects of Superimposed Electric Field on Structure and Permeability of Biological Membrane Investigated by Molecular Dynamics Simulation," *Proceedings of 20th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS8-13, pp. 626-627.

[3] Ryo Ninomiya, Kosuke Takami, Ippei Yagi, Satoshi Uchida, Kosuke Tachibana, Akinori Oda, Takehiko Sato, "Permeation characteristics of long-lifetime reactive oxygen species through biological membranes under superimposed electric field generated by the irradiation of cold atmospheric pressure plasma", *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-32, pp. 99-100.

[4] 立花 孝介, 高見 幸亮, 二宮 諒, 八木 一平, 小田 昭紀, 内田 諭, 「大気圧低温プラズマ由来の電界が細胞膜の構造および活性種の膜透過性に与える影響に関する分子動力学シミュレーション」, 第33回日本MRS年次大会, 神奈川 (2023年), I-I16-003.

#### 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	J23I008
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

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

Samuel L Manzello\*†, Sayaka Suzuki\*\*

Kaoru Maruta\*\*\*††

\*Reax Engineering, USA

\*\*Tokyo Institute of Technology, 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, Tokyo Institute of Technology, 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 (lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC), 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.

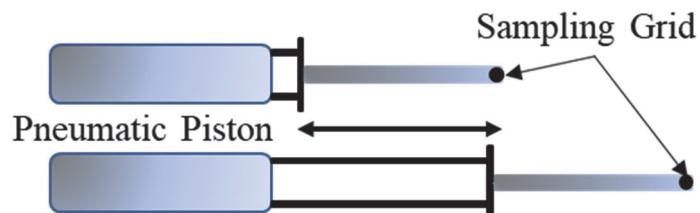


Figure 1: Schematic of thermophoretic sampling system developed for this study.

### 3. Achievements

In the first year of this project, the thermophoretic sampling probe was designed and completed (Fig. 1). The probe consisted of a pneumatic piston and the control system affords the sampling time to be varied. This probe has been verified to be effective in collection of particulate samples from engineered building materials. Due to large range of LiB cells available and overall high cost, the project will purchase some LiB cells in the second year. The use of radiant panel will be used to induce thermal runaway in the LiB cells. The radiant panel system has also been designed and will be constructed in year 2. The research team presented the project at the 2023 ICFD symposium held in Sendai, Japan. In addition, the proposer was invited to be a speaker and panelist at the 7<sup>th</sup> International Sooting Flame Workshop, a prestigious workshop held in partnership with the International Combustion Symposium. It is the first time the ISF will discuss how to address particulates from large outdoor fires. Finally, the proposer was also proposed and elected to a new three-year term as convenor of ISO TC92/WG14, now ending in 2026.

### 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. ISO TC92/Task Group (TG) 03 (Large Outdoor Fires and the Built Environment) was formed to advise ISO TC92 (Fire Safety) on a path forward for the topic Large Outdoor Fires and the Built Environment. As a result of ISOTC92/TG03 activities, including a workshop at the ISO TC92 Plenary meetings on October 2018, and a subsequent special section of papers from this workshop in the journal *Fire Technology*, the task group proposed the formation of a new working group (WG) under TC92. This new working group (WG), entitled ISO TC92/WG14 (Large Outdoor Fires and the Built Environment) has been formally approved by global ballot. The proposer is the convenor of ISO TC92/WG14, by global ballot. The first globally approved task of ISO TC92/WG14 was the publication of ISO TR/24188:2022 *Large Outdoor Fires and the Built Environment –Global Overview of Different Approaches to Standardization*. The second globally approved task of ISO TC92/WG14 was ISO 6021:2024 *Firebrand Generator*.

### 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.L. Manzello, S. Suzuki, and K. Maruta, Characterization of Particulate Morphology from Lithium-Ion Battery Combustion Processes, ICFD 2023, Sendai, Japan, 2023.
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent) Not applicable  
(Award) Not applicable  
(Press release) Not applicable  
(International Standards) Elected as convenor of ISO TC92/WG14 for new three year term.

Project code	J23I009
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Fabrication of nanofibrous layer covered stents

Angéla Jedlovszky-Hajdú\*†, Makoto Ohta\*\*††, Constantinos Voniatis\*  
Hanif Saifurrahman\*\*, Pálós Veronika Teréz\*\*

\*Institute of Biophysics and Radiation Biology, Semmelweis University

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

In the past decade, cardiovascular disease has been the highest cause of morbidity and mortality worldwide. Amongst other cardiovascular disorders, ischaemia in other words, insufficiency of blood flow has been consistent cause of hospitalisation and has been regarded as one of the “culture diseases of the 21st century. In today's rapidly advancing medical field, the development of novel implantable devices plays a crucial role in improving patient outcomes and quality of life. One such device is the coronary stent. Coronary stents are small mesh-like tubes that are implanted in narrowed or blocked coronary arteries to help restore blood flow and prevent heart attacks (Figure 1). Over the years, various advancements have been made in coronary stent design and fabrication to enhance their efficacy and long-term performance. One of the major challenges associated with coronary stents is minimizing complications such thrombosis and restenosis. To address this challenge, researchers have turned their attention towards the fabrication of covers for coronary stents. The objective of this project is to fabricate a nanofibrous coating layer for a coronary stent. The nanofibrous layer aims to direct tissue regeneration towards an endothelial cell lining. By layering the stent wire with an endothelial lining, the risk of clot, thrombosis and stent restenosis will decrease. To achieve this goal nanofibrous matrices fabricated from Polysuccinimide (anhydrous form of polyaspartic acid), polycaprolactone and poly(vinyl alcohol) will be investigated.

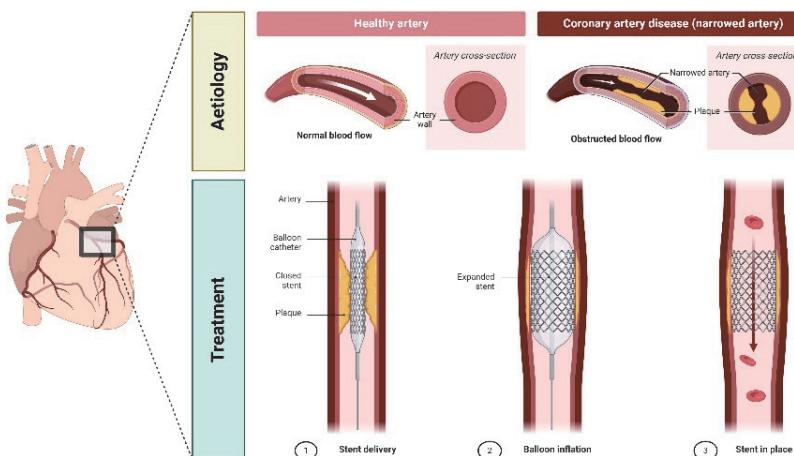


Figure 1. Arterial Coronary stenosis: Aetiology and Treatment

## 2. Details of program implement

The Hungarian research group has abundant experience with nanofibrous mesh fabrication and the field of electrospinning. Electrospinning is versatile technique which can be utilised to produce fibres measuring from micrometres to nanometres. Its most well-known advantage is versatility and its ability for countless modification. In this regard, the technique is suitable to fabricate nanofibrous layers over stent wires. The technique requires simple component including a polymer solution filled syringe, a high voltage power supply and a power collector. However, due to the number of fabrication parameters and their dynamic relationship, the process requires optimisation. The group has previously worked with the above mentioned three polymers nevertheless electrospinning on a stent wire will definitely require optimisation. Thus, in the first phase of this project the Hungarian group will focus on the parameter optimisation, and fabrication of 3 different stent cover layers from polysuccinimide, polycaprolactone and poly(vinyl alcohol). This of course will inquire physio-chemical characterisation and even mechanical evaluation as the layer should be robust and retain its adherence to the stent wire. In the second phase of the project, cell toxicity, cell adherence and cell differentiation will be investigated by both Hungarian and Japanese groups. Probably the most crucial part of the project. Although the Hungarian group has investigated cell toxicity of the respective polymers, a metal stent can be regarded as an addition variable in the equation. While such metals are even currently used in the clinics, the polymer-stent interaction is yet to be investigated. Furthermore, cell adhesion to stent and differentiation are also an essential examination step. This is because the objective is the development of a continuous endothelial layer on the stented vessel. Such a layer will surely inhibit blood clot formation. The Japanese group has done several analyses on cell-stent interactions before; thus, they would be responsible for this part of the research. Given that coated stents have different properties from the stents they have evaluated before, optimization of the evaluation equipment would be required. Following that, they would proceed with the evaluation of cell adhesion and cell differentiation.

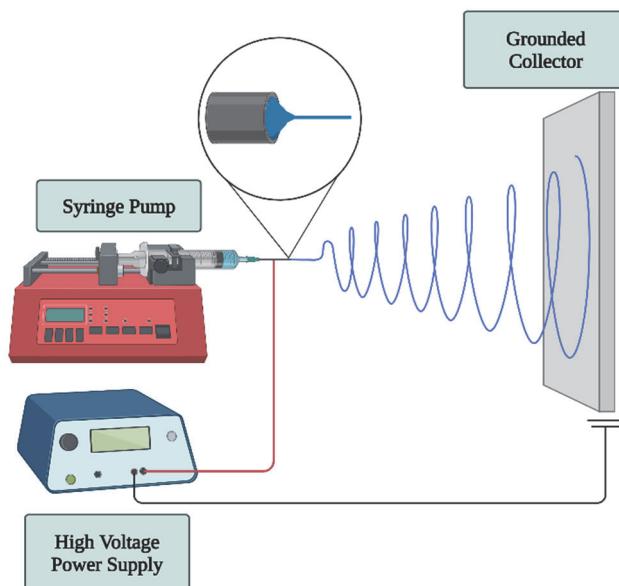


Figure 2. Classic electrospinning setup

### 3. Achievements

During the past year, we successfully covered stent wires with three different polymers namely polysuccinimide, polycaprolactone and poly(vinyl alcohol). 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.

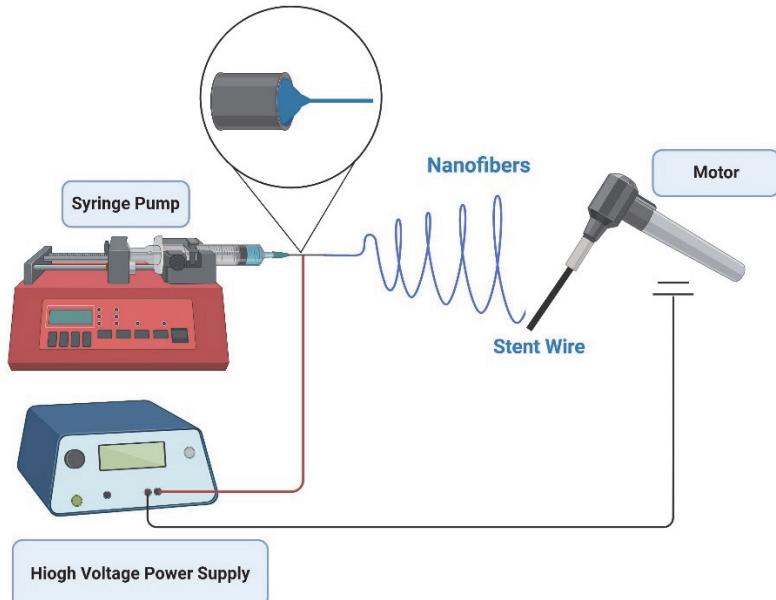


Figure 3. Modified electrospinning setup

With this technique, the stent wires were successfully covered. As seen in the figure below, the wire becomes white as it is being covered. The thickness of the stent also increases with each passing minute.

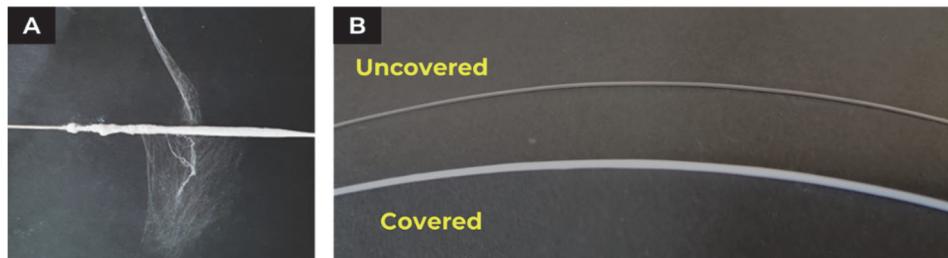


Figure 4. Result of the modified electrospinning technique

Furthermore, the nanofibrous layer is well visible on the microscopic layer as seen using with the scanning electron microscopy. The calculated fibre diameters were similar to the diameters documented in our previous works. Therefore, the stent wire as a collector has no significant effect on fibre diameter. In addition, fibre size can be modified in the future as required by changing the flow rate, polymer concentration etc.

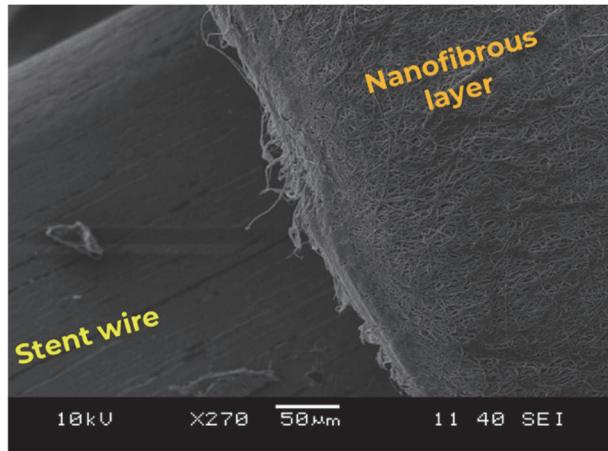


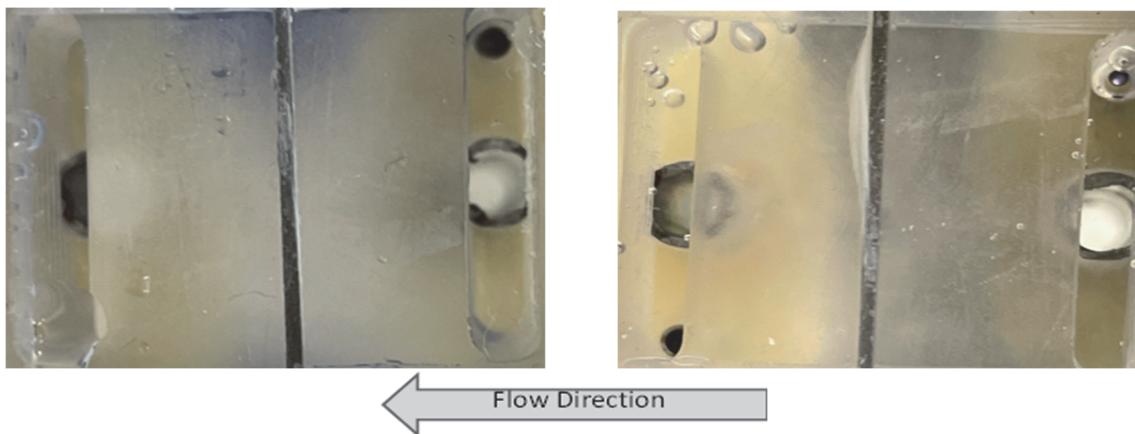
Figure 5. Scanning electron microscopy of the stent cover

Table 1. Electrospinning optimisation

Polymer solution concentration	Electrospinning rate	Electrospinning duration	Theoretical cover mass (g)
25 w/w %	1 ml/hour	1	0.004
		3	0.013
		5	0.021
		10	0.042

Following the completion of stent coverage, the collaboration proceeded to the next phase where the Japanese group evaluated the compatibility of the coated stents with the current design of flow chamber. When the Japanese group performed the test, they found that detachment seemed to occur. This detachment, however did not progress. Then, by assessing the mass changes on the coated stents before and after 24-hour flow exposure, it was found that the mass does not decrease, indicating that while some parts of the coating do detach, some parts that do not detach still keep the detached part intact with the whole coating. Supported by the fact that the detached part is the one on the top part of the stent, they deduced that the high value of shear stress at the top part causes the detachment, and further modification of the chamber is needed to avoid this high value, and effectively the detachment itself. As the current shear stress is far above the physiologically relevant one, decreasing it won't affect the overall project. In addition, the Hungarian group started investigating additional tactics to enhance the polymer-stent attachment.

Figure 6. Detachment of the stent coating after flow exposure.



#### 4. Summaries and future plans

The current project aims to fabricate nanofibrous covers for coronary stents. After one year, the participants have successfully produced three different polymer-based stent covers. While the process requires optimisation these results seem very promising. Once a proper design has been established, this collaboration will move on to the final phase where the cell adhesion, differentiation, and toxicity will be analysed. In parallel additional strategies will be examined including polymer cross-linking and polymer-composites.

#### 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] Constantinos Voniatis, Angela Jedlovszky-Hajdu, "Developing Nanofibrous Coatings For Cardiovascular Stent Wires", *20th International Conference on Flow Dynamics*, November 6 - 8, 2023, Sendai, Japan.
- 3) Patent, award, press release etc.

Best Presentation Award for Young Researcher Awarded to: Hanif Saifurrahman  
20th International Conference on Flow Dynamics

Best Presentation Award for Young Researcher Awarded to: Constantinos Voniatis  
20th International Conference on Flow Dynamics

課題番号	J23I010
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2年目

## 管楽器の流体音響解析 Aeroacoustic Simulation on Wind Instruments

高橋 公也\*†, 中原 雄樹\*, 小林 泰三\*\*, 服部 裕司\*\*\*††

\*九州工業大学情報工学府, \*\*九州大学情報基盤研究開発センター

\*\*\*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

低マッハ数における流体音(空力音)の発音メカニズムは、航空機騒音等の高マッハ数の場合に比べ、これまでにあまり注目されてこなかった。低マッハ数での流体音の発生は、境界条件に強く依存すると考えられる。例えば、エオルス音とエッジトーンでは発生源となる流体の振る舞いは大きく異なり、発生する音波の性質もそれらに強く依存する。本研究では、共鳴器を持つ管楽器や音響機器の流体音の発音機構に注目する。共鳴器内に発生する強い共鳴音場は、音源となる流体に作用し、両者が同期することで安定した発振が起きる。したがって、管楽器の発音機構の解明には、流体と音の相互作用を再現可能な高精度の解析計算が必要になる。そのためには、厳密計算が可能な圧縮性 DNS による解析が必要不可欠であり、圧縮流体の DNS について豊富な知識を持つ服部教授との共同研究が必要である。

本研究では、2次元ではあるが圧縮性 DNS を用い、以下の2項目の課題を行うことを目標とする：1)オーボエのリードバルブにおける発音機構の解明、2)ホルンのマウスピースの軸対象モデルを用いた擬似3次元解析。音楽音響の分野では、LES, LBM および人工粘性を取り込んだ DNS を用いた管楽器の解析は行われているが、流体音の発生機構の解明に必要な精度は得られていない。本研究では2次元ではあるが圧縮性 DNS を用いた管楽器の厳密な解析を行う、この点に本研究の意義がある。さらに、楽器とは異なるが、共鳴管を持つ音響機器への応用として、3)小型熱音響エンジンの解析、を行い熱による音波の発生メカニズムについて検討す。

### 2. 研究成果の内容

#### 1) オーボエのリードバルブにおける発音機構の解明

ダブルリード楽器であるオーボエのリードの解析を行った。図1左に、オーボエリードに口腔を取り付けたモデルを示す。図1右に示すように、オーボエリードの開閉を再現するために、リードの先端部分を周期的に開閉する様にした。図2に、リードを固定し正弦関数的な流速で駆動したときと、リードを正弦関数的に振動させ一様流を口腔左端から加えたときのリード外部における圧力振動(左図)とフーリエスペクトル(右図)を示す。どちらの場合も、駆動周波数は 880Hz である。圧力振動を見ると、流速駆動したモデルでは正弦波的な振動をしているのに対し、リードを振動させたモデルでは正弦波的な振動でなく倍音成分を含んだ振動になっている。フーリエスペクトルを見ると、流速駆動した場合は倍音成分が少ないが、リードを振動させた場合には明確な倍音成分が見られる。特に、2倍音の強度は基音の

強度とほぼ同じである。したがって、オーボエ演奏音における豊富な倍音成分は、リード振動が作り出していると推察される。しかし、結果は示さないが、流速を変化させても波形やフーリエスペクトルに大きな変化が見られなかった。現実の楽器では、流速を早くすると倍音成分が増える傾向が見られる。これは、流速の変化に応じてリードの変動も変化するためと考えられる。これを確かめるためには、流体とリード振動の連成解析が必要であるが、現時点ではその準備が出来ていない。

そこで、リード振動をより現実的なものに変えて、波形の変化と倍音の増加を調べる。図3にその結果を示す。左上の図の赤い線は圧力振動を、灰色の点線はリード振動を示している。この場合のリード振動は台形型であり、観測点までの音波の伝搬時間を考慮して位相をシフトしてある。圧力波形は正弦振動を加えた時よりも複雑になり、高次倍音が含まれていると推察される。右上の図は、実験で得られたオーボエリードの振動関数を加えた時の結果である。圧力振動の波形は複雑であるが、振幅が小さく不安定である。この理由については、以下で考察する。下図は、両者のフーリエスペクトルである。どちらの場合も、正弦振動を加えた場合よりも高次の倍音成分が増えている。したがって、リード振動が複雑になると、倍音成分が増えることがわかる。現実の楽器でも、流速が増加するとともにリード振動が変化し、それに伴い倍音成分が多い音波が作られると考えられる。ただし、今回は管体の無いリードのみの解析を行なったため、共鳴管体からのフィードバックがない。リードの振動だけを現実の振動に合わせても、それに適合する共鳴場を作り出す管体が無いために、発生する音波の振幅が小さく不安定になったと考えられる。図4の左と右に、台形型と現実のリード振動の場合のリード内の流速分布を示す。台形型の場合には、リードの右半分で流速が小さくなっているが、これは音波に変化したためである。一方、現実のリード振動の場合は、リード全体で複雑な流速分布になり、音波への変換がうまくいっていない。この結果は、上記の推測を裏付けるものである。

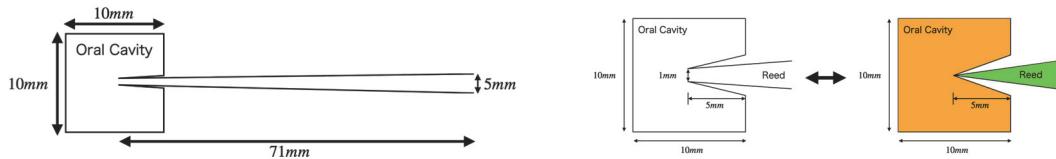


図1：オーボエリードのモデル 左：リードと口腔、右：リード先端部の振動の再現

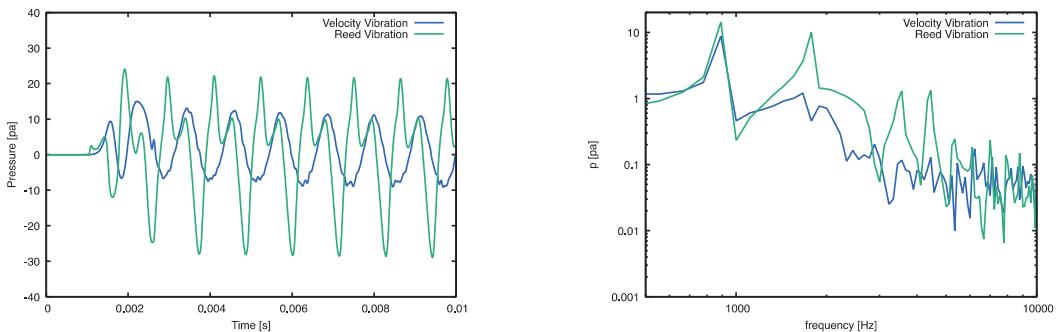


図2：リード外部における圧力変動とフーリエスペクトル；青：流速駆動モデル 緑：リード振動モデル 左：圧力変動 右：フーリエスペクトル

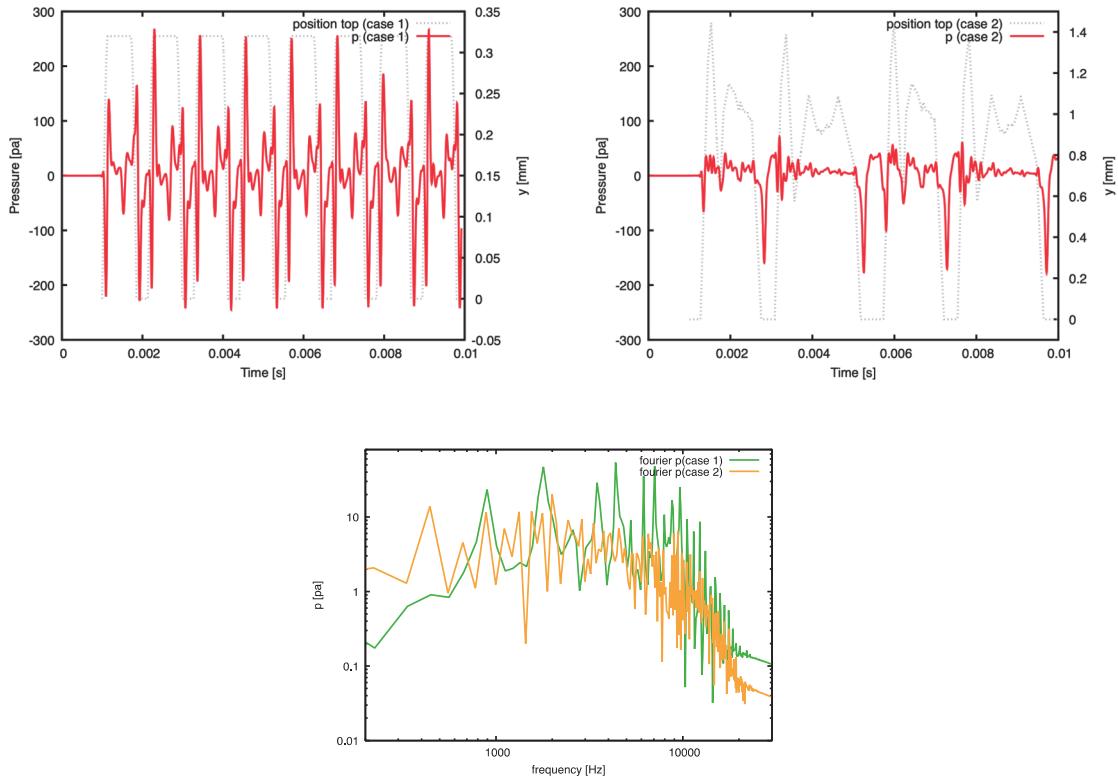


図3：現実に近いリード振動を加えた時の圧力変動とフーリエスペクトル 左上：方形型のリード振動を加えた場合(灰色の点線はリード振動) 右上：現実のリード振動を加えた場合 下：フーリエスペクトル； 緑：方形型 オレンジ：現実のリード振動

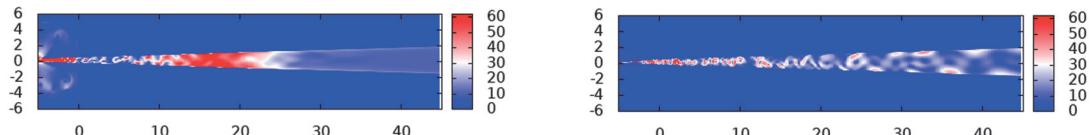


図4：リード内の流速分布 左：方形型 右：現実のリード振動

## 2) ホルンのマウスピースの軸対象モデルを用いた擬似3次元解析

この課題は、以下の理由により実施されなかった。本プロジェクトとは別のプロジェクトで、LESを用いた解析ではあるが、音響機器の軸対象モデルと3次元モデルの数値計算と実験結果との比較を行った結果、軸対象モデルは倍音等の再現性において不十分であることが判明し、そのために今年度における実施を見送った。軸周りに1/4(90度)カットしたモデルでは、比較的実験に近い結果が得られたので、今後、この方向で研究を進める方が計算コストの面でも適切と考えられる。

## 3) 小型熱音響エンジンの解析

本研究では、最も簡単な熱音響機関である試験管型熱音響機器に注目し、圧縮性LESを用いて3次元モデルの解析を行った。図5左に3次元モデルの断面図とスタック部分の拡大図を示す。断面図の左側の長さ150mmのパイプが試験管に当たり、右側の空間部分が外部領域である。スタックの左側を高熱部(800°C)、右側を常温部分(300°C)とした。図5右は、スタック部分の断面図である。スタックは55本の細管から構成され、各細管の断面積は $1.2 \times 1.2 \text{mm}^2$ である。図6左にスタック中央における圧力振動を、右にそのフーリエスペクトル

を示す。共鳴管の振動数の理論値 580Hz に近い約 600Hz の圧力振動が見られ、スタック部分で発生した音波が試験管の共振周波数で振動している。しかし、時間が経つにつれてノイズ成分が増加し、定常的な共振周波数の発振が起きるかは定かでない。このモデルのスタックの細管の幅は 1.2mm であり熱境界層約 0.1mm と比べるとかなり広く、熱交換が十分に行われていない可能性がある。また、モデルの最小メッシュは 0.1mm であり境界層を十分に再現しているとは言えない。そのため、音波の発生過程を精査し、ノイズ発生の理由を知る為には、より精密な解析が必要である。

そこで、図 7 に示すスタックの細管のみのモデル(単管モデル)の解析を行った。このモデルでは、熱交換率を上げるために細管の幅を 0.5mm とし、熱境界層を正確に再現する為に最小メッシュサイズを 0.01mm とした。さらに、定常状態に近い状態を再現するために、高温熱源と常温熱源の間のスタックの壁の温度を線形的に変化させた。最初に、無限長管を再現する為に、モデルの左端を無反射条件に設定した。図 8 左にスタック中央における圧力振動を、右にそのフーリエスペクトルを示す。明確な圧力振動が現れ、この計算時間では減衰して行くが、減衰率が徐々に小さくなり定常振動に近づいているように見える。このときの発振周波数は約 110Hz で、これがスタック本来の固有周波数であると考えられる。図には示さないが、スタックの幅を広くすると周波数は低下する。次に、図 9 に示す様に、単管モデルに外部領域を取り付けたモデルの解析を行った。図 10 左にスタック中央における圧力振動を、右にそのフーリエスペクトルを示す。管の共鳴周波数に近い、約 520Hz の振動が観測されるが、全体的に雑音成分が多い。スタックで発生した音波は管の共鳴周波数に引き込まれるが、スタック本来の固有周波数 110Hz よりも 5 倍程度高い。そのため、引き込みが不完全でノイズが発生したと推測される。したがって、スタックの構造や温度の与え方および管長等のパラメーターを調整し、管の共鳴周波数とスタック本来の固有周波数が合った条件での解析を行うことが望まれる。

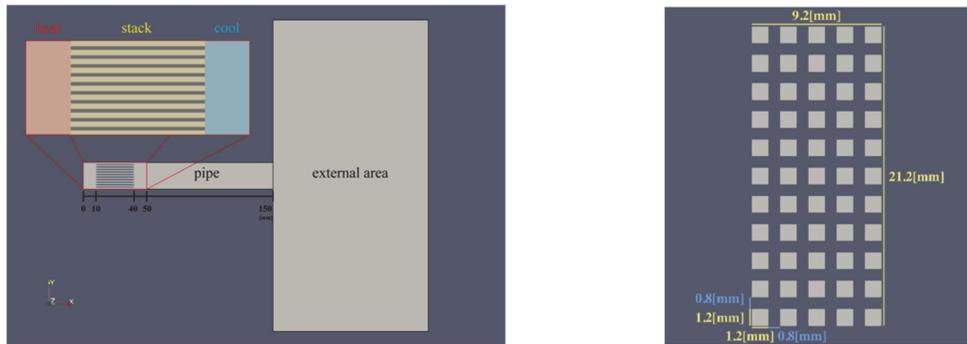


図 5 : 試験管型熱音響機器のモデル 左 : 全体図 右 : スタック部分の断面

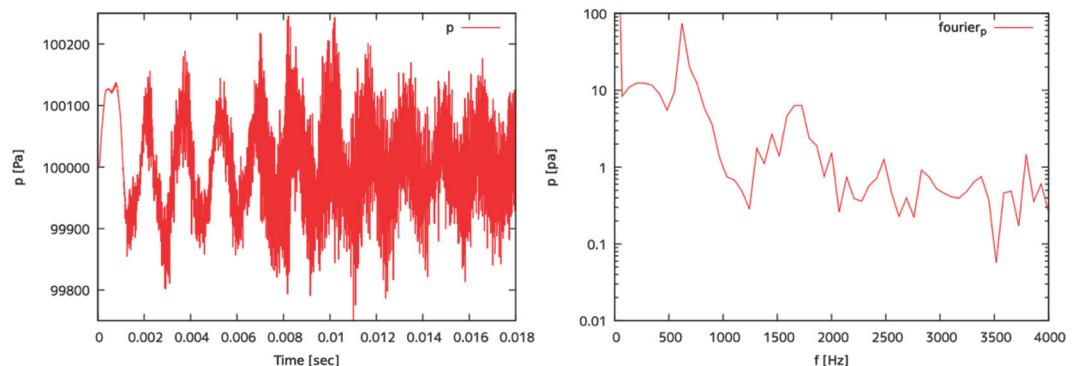


図 6 : 試験管型モデルのスタック中央の圧力変動 左 : 圧力変動 右 : フーリエスペクトル



図7：単管モデル 断面： $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$

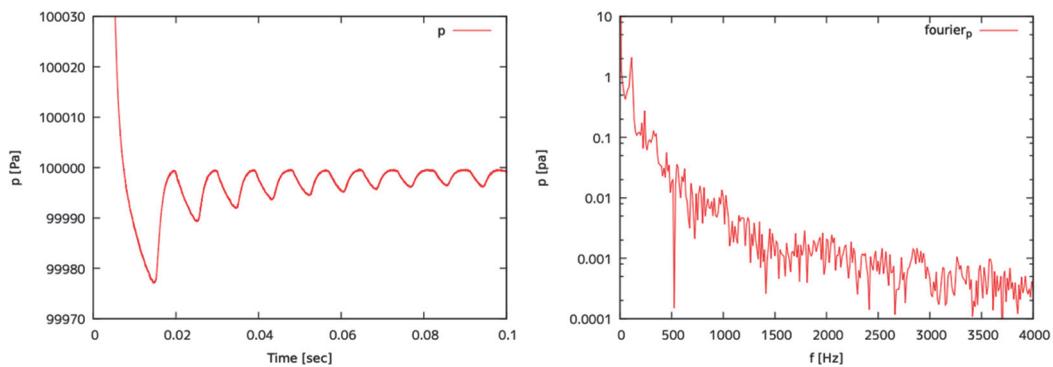


図8：単管モデルのスタック中央の圧力変動 左：圧力変動 右：フーリエスペクトル



図9：単管+外部領域モデル

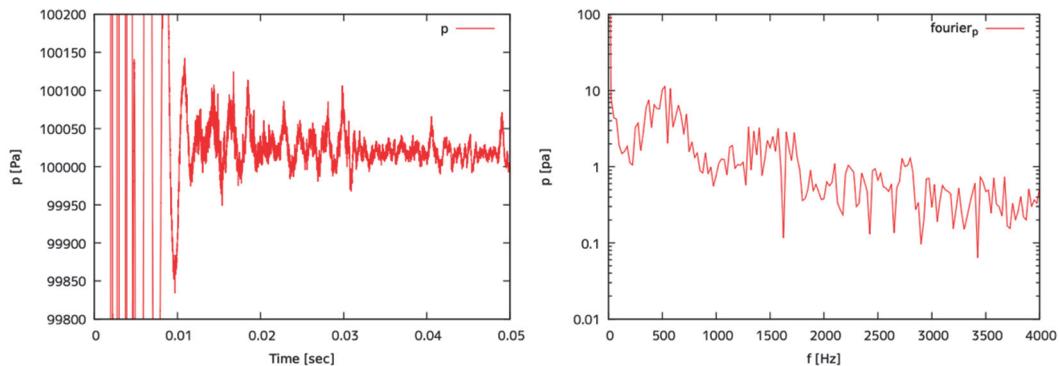


図10：単管+外部領域モデルの圧力変動 左：圧力変動 右：フーリエスペクトル

### 3. 研究目標の達成状況

各課題の達成状況は以下の通りである。課題1) オーボエのリードバルブにおける発音機構の解明では、目標であった現実のリード振動を模擬した解析を行うことができ、その成果の一部を ICFD2023 で発表した[1]。課題2) ホルンのマウスピースの軸対象モデルを用いた擬似3次元解析では、音響機器のモデルではあるが、軸対象モデルの再現性について検討し、軸対象モデルが3次元の現象を再現するには不十分であり、最低でも1/4カットモデルが必要である。

要であることがわかった。そのため、軸対象モデルによる解析は行なっていない。課題3) 小型熱音響エンジンの解析では、圧縮性LESを用いて試験管型熱音響機器の発進状態をほぼ再現したといえる。特に、単管モデルを用いた解析では、スタック部分の音波の発生過程をかなり精密に再現できている。ただし、目標としていた圧縮性DNSを用いた2次元モデルの解析までは進まなかった。この成果の一部をICFD2023で発表した[2]。各課題の進捗状況を総合すると、当初目標を70%程度達成したと考えられる。

#### 4. まとめと今後の課題

まとめと今後の課題は以下の通りである。オーボエのダブルリードの解析では、リードの複雑な振動がオーボエの演奏音に含まれる豊かな倍音を作り出すことを明らかにしたが、より現実的な解析を進めるためには、管体を取り付けたモデルの解析や弾性体としてのリード振動と圧縮性流体の連成解析を行うことが今後の課題である。ホルンのマウスピースの解析では、最低でも1/4カットモデルの解析を行うことが今後の課題である。小型熱音響機器の解析では、発振状態をほぼ再現することに成功したが、ノイズがかなり発生した。モデルのパラメーターを調整し、管の共鳴周波数とスタック本来の固有周波数が合った条件での解析を行い、ノイズ成分の少ない発振状態を再現することが今後の目標である。また、より精密な解析には、圧縮性DNSを用いた2次元モデルの解析が必要である。

#### 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] Yuki Nakahara, Rei Sumita, Ryoya Tabata, Sho Iwagami, Takeshi Nanri, Taizo Kobayashi, Yuji Hattori, Kin'ya Takahashi: Numerical Study on Sound Generation Process of an Oboe Reeds with DNS, *Proceedings of Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, (2023), OS16-3, pp.1006-1008.

[2] Yo Tashima, Taijiro Ohno, Takeshi Nanri, Taizo Kobayashi, Yuji Hattori, Kin'ya Takahashi: Numerical Study on Fundamental Process of a Thermoacoustic Engine, *Proceedings of Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, (2023), OS16-4, pp.1009-1011.

##### 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	J23I011
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
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 Metal/Titanium Oxide Interface Structure

後藤 和泰\*†, 徳増 崇\*\*††

深谷 昌平\*\*\*, 上根 直也\*\*, 井上 和暉\*\*\*, 宇佐美 徳隆\*\*\*

\*新潟大学工学部, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*名古屋大学工学部

†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（MD）計算を用いて金属/非晶質酸化チタン/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。非晶質酸化チタンは、バンドギャップエネルギーがおよそ 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、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してきた。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。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、分子動力学（MD）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。

## 2. 研究成果の内容

本研究では、MD 計算を用いて金属/非晶質酸化チタン/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を目指す。MD 計算を行うためには、原子間の相互作用を記述する適切な力場が必要である。しかしながら、現状では目的の系を適切に記述する力場は存在しない。そのため、まずははじめに非晶質酸化チタン/バルク結晶シリコンの力場モデルの構築を目指した。ここで、目的の系を記述する力場の作成は非常に計算の負荷がかかるため、（1）バルクの結晶シリコン（c-Si）モデル、（2）非晶質酸化チタン（a-TiO<sub>2</sub>）モデル、（3）a-TiO<sub>2</sub>/c-Si スラブモデルの力場を行い、その後それを統合するという形で目的の力場作成に取り組んだ。

図 1 に、（a）作成したバルクの c-Si モデルの力場を用いて c-Si を 500 K で熱処理した前後

における動径分布関数を示す。青色塗りつぶしの三角のマーカー（▲）は本研究で作成した力場を用いたMD計算で得られたc-Si, 白抜きの丸（○）のマーカーはc-Siの経験的力場（tersoffモデル）を用いて得られた動径分布関数である。図1(b)は、作成したa-TiO<sub>2</sub>モデルの力場を用いてTiO<sub>2</sub>を2500 Kで加熱後, 500 Kで急冷した後における動径分布関数を示す。ここで、青色塗りつぶしの三角のマーカー（▲）は本研究で作成した力場を用いたMD計算で得られたa-TiO<sub>2</sub>の動径分布関数、白抜きの丸（○）のマーカーは実験より得られたa-TiO<sub>2</sub>の動径分布関数であり、緑色の実線（—）と赤色の破線（---）は、それぞれa-TiO<sub>2</sub>とルチル構造のTiO<sub>2</sub>（r-TiO<sub>2</sub>）経験的力場（Matsui-Akaogiモデル）を用いて得られた動径分布関数である。図1(a)より、MD計算で得られたc-Siの動径分布関数は、各結合のピーク位置、立ち上がり位置が経験的力場のものとよく一致している。図1(b)では、a-TiO<sub>2</sub>における各結合のピーク位置において、作成したモデルでは二峰性のピークを持っている。一方、報告されているa-TiO<sub>2</sub>における各結合のピークでは、そのような二峰性のピークは見られない。この違いは、文献値で使用している力場が経験的ポテンシャルであることに対して本研究で作成した力場が機械学習力場であることに起因していると考えられる。しかしながら、各信号の立ち上がり位置は両者で比較的よく一致しており、さらに二つのピークの凹部が文献値の単峰性のピーク位置と大まかに一致することから、非晶質酸化チタンの系として非常に近いことが考えられる。

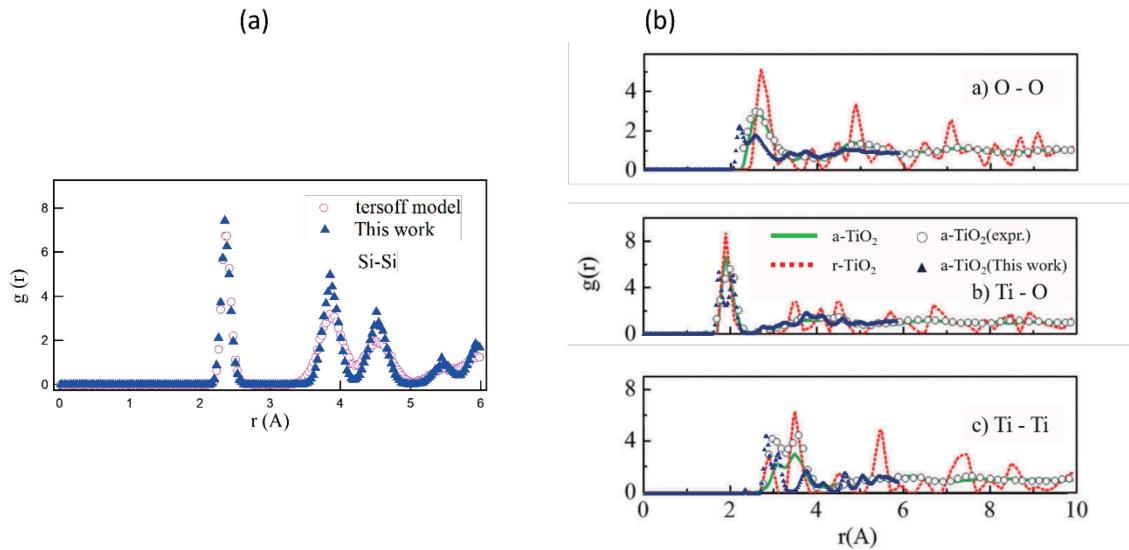


図1：(a) 作成したバルクのc-Siモデルの力場を用いてc-Siを500 Kで熱処理した前後における動径分布関数である。青色塗りつぶしの三角のマーカー（▲）は本研究で作成した力場を用いたMD計算で得られたc-Si, 白抜きの丸（○）のマーカーはc-Siの経験的力場（tersoffモデル）を用いて得られた動径分布関数である。(b) 作成したa-TiO<sub>2</sub>モデルの力場を用いてTiO<sub>2</sub>を2500 Kで加熱後, 500 Kで急冷した後における動径分布関数。ここで、青色塗りつぶしの三角のマーカー（▲）は本研究で作成した力場を用いたMD計算で得られたa-TiO<sub>2</sub>の動径分布関数、白抜きの丸（○）のマーカーは実験から得られたa-TiO<sub>2</sub>の動径分布関数であり、緑色の実線（—）と赤色の破線（---）は、それぞれa-TiO<sub>2</sub>とルチル構造のTiO<sub>2</sub>（r-TiO<sub>2</sub>）経験的力場（Matsui-Akaogiモデル）を用いて得られた動径分布関数である。

### 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、大きく三つのステップがある：①a-TiO<sub>2</sub>/c-Siモデルの力場の作成、②a-TiO<sub>2</sub>/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、③Al/a-TiO<sub>2</sub>/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、①ではc-Si, a-TiO<sub>2</sub>, a-TiO<sub>2</sub>/c-

Si それぞれのモデルにおいて力場を作る必要がある。現在は、①のうち、c-Si と a-TiO<sub>2</sub> においての力場の作成が終了した段階である。よって、全体の 22%程度を達成したといえる。

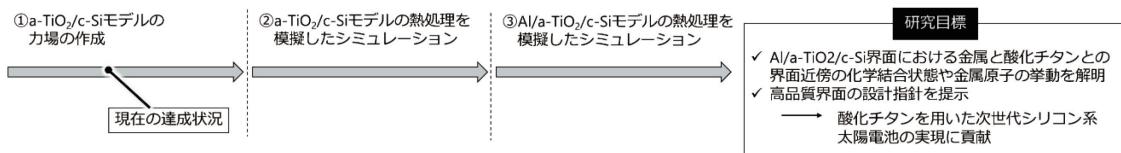


図2：本研究の達成される成果とその進捗状況

#### 4. まとめと今後の課題

現在の段階で、結晶シリコン、酸化チタンを適切に記述する力場の作成を行った。その結果、結晶シリコンでは精度よい力場が作成でき、酸化チタンでは文献値とは異なる力場が作成された。後者で発生した文献値との違いは、使用している力場が経験的ポテンシャルか本研究で作成した力場が機械学習力場であるかによるものと考えられるが、今後詳細に調査を行う。

今後の課題も同様に、力場の作成である。MD シミュレーションは使用する力場で想定される条件以外においては適切な物理を表現することが出来ないため、力場の作成が本研究において最も根幹で重要な部分であり、研究の完成度を大きく左右するステップといつても過言ではないため、丁寧に進めていきたいと考えている。

#### 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

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	J23I012
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1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\*, 渡辺 聰史\*, 山崎 智基\*\*

\*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弹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弹性問題に対しては、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弹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

初年度となる 2023 年度は一足飛びに実際の翼形状を対象とした研究を行うことはせず、単純形状を対象にした基礎研究を行った。具体的には、実際の主翼の代わりに、複雑ではあっても規則性をもった後流場を発生させる円柱を用いた。尾翼には平板を用いた。

#### ① 主翼（円柱）の高忠実度 CFD 解析

高忠実度の CFD ソルバを用いて、円柱の後流場の 2 次元解析を行った。

#### ② 尾翼（平板）の空力弹性解析

研究代表者がこれまで構築してきた非線形有限要素法 Absolute Nodal Coordinate Formulation (ANCF) と非定常空力計算法 Unsteady Vortex Lattice Method (UVLM) に基づく中忠実度の空力弹性解析ソルバを用いて尾翼をモデル化できる環境を整えた [業績 1]。

#### ③ 低速バフェット風洞実験

提案する解析法の実証を行うための実験環境を東北大学・流体科学研究所の低乱熱伝達風洞に構築できるようにした。図 1 はその実験装置を示す。低速バフェット振動の原因となる後流場を発生させる円柱模型の後方に尾翼を模擬した平板翼模型を設置した。翼模型の振動をレーザ変位

計で計測した。模型は厚さ 1 mm, 1.5 mm, 2 mm の 3 種類を用意した。図 2 は流速に対する模型の振動振幅の平均値 RMS を示す。基本的に流速が大きくなるほど、振幅も大きくなるが、円柱の後流渦（カルマン渦）の放出振動数と平板翼の固有振動数が一致した時にピークが見られた。

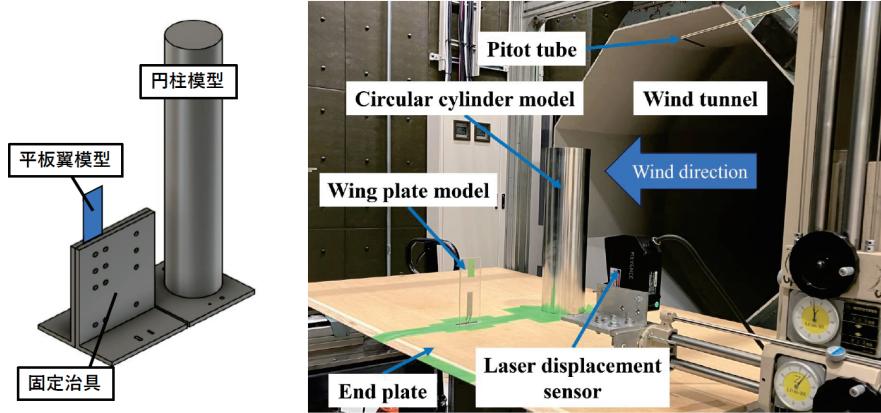


図 1 低速バフェットの風洞実験装置

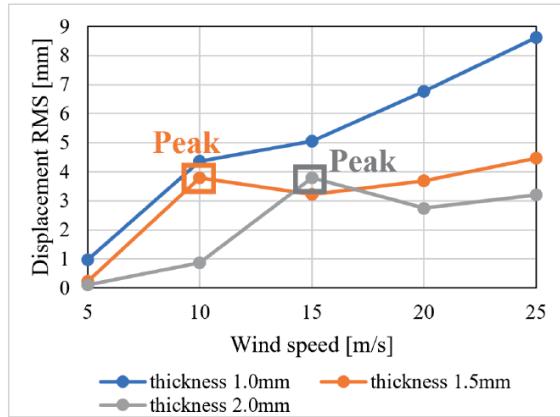


図 2 流速と振動振幅の関係

### 3. 研究目標の達成状況

研究目標達成に必要な要素技術を確立することができたので、共同研究全体の目標達成状況としては初年度で 30%といえる。

### 4. まとめと今後の課題

研究目標達成に必要な要素技術を確立することができた。今後の課題はこれら要素技術を統合していくことである。

### 5. 研究成果

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Otsuka, K., Yamazaki, T., Haga, Y., and Abe, Y., “Simulation Framework for Wake-Induced Aeroelastic Phenomena,” *Proceedings of the 20th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS7-10. 【口頭】
- 3) その他（受賞）  
Best Presentation Award for Young Researcher, Otsuka, K., Yamazaki, T., Haga, Y., and Abe, Y., “Simulation Framework for Wake-Induced Aeroelastic Phenomena,” *20th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023).

課題番号	J23I013
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	3年目

## 超柔軟膜翼の構造空力連成モデリング理論の構築と実験実証

### Aeroelastic Model of Very Flexible Membrane Wings: Theory and Experiment

大塚 啓介\*†, 永井 大樹\*\*††

Rafael PALACIOS\*\*\*, Chi Wing CHENG\*\*\*, Yinan WANG\*\*\*\*

槇原 幹十朗\*, Shuonan DONG\*, 向川 大成\*

伊神 翼\*\*, 倉橋 晴香\*\*

藤田 昂志\*\*\*\*\*, 安嶋 市悟\*\*\*\*\*

\*東北大学工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*Imperial College London, \*\*\*\*University of Liverpool, \*\*\*\*\*金沢工業大学

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

航空機を用いることでローバーでは到達不可能な火星領域を探査することが期待されている。空気密度が地球の 1/100 である火星では、コウモリの翼のような薄くて柔軟な膜状の翼（以下、膜翼）が良好な空力性能を示すことが分かっている。膜翼に容易に発生するスパン方向・コード方向の双方を含んだ3次元大変形を適切に利用すれば、さらなる空力特性の向上が見込めるため、構造空力連成解析による設計が重要となる。しかし、従来の構造モデリング理論で3次元大変形を扱うには、複雑な回転座標変換が必要となり、慣性項・剛性項に強い非線形性が発生し、計算コストが膨大となる。さらに、翼面上の空力作用点の算出をも困難にする。そこで本研究の目的を「回転座標を一切使わない柔軟膜翼の構造空力連成モデリング理論の構築」と「風洞実験によるモデルの解析性能の実証」とする。

## 2. 研究成果の内容

2023 年度の本課題 3 年目で、下記の成果が得られた。

### ① 膜翼解析モデルの理論構築

これまでに構築してきた回転座標ではなくベクトルを用いる膜翼の非線形構造モデリング理論[業績 1]に対して、翼制御を可能とする圧電素子（電気を加えると制御力を発生し、逆に変形すると発電する材料）を組み込んだ。

### ② 風洞実験による解析の妥当性実証

解析結果を東北大学・流体科学研究所の低乱熱伝達風洞での実験結果と比較した。図 1 は風洞実験装置を示す。膜翼を模擬した非常に薄い PET (polyethylene terephthalate) 材料の実験模型を、流れを極力乱さないように NACA0012 翼型に加工した治具を用いて固定した。その模型に圧電素子を貼付した。模型の中央でのたわみ変位と圧電素子の電圧を計測した。図 2, 図 3 はフラッタ振動発生時の変位と電圧に関する解析と実験の比較を示す。両者は振幅に関してはおよそ一致したが、振動数に関しては解析が実験よりも低かった。流体摩擦効果を解析で無視していることが原因だと考えられる。

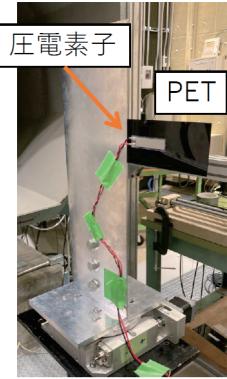


図 1 実験模型

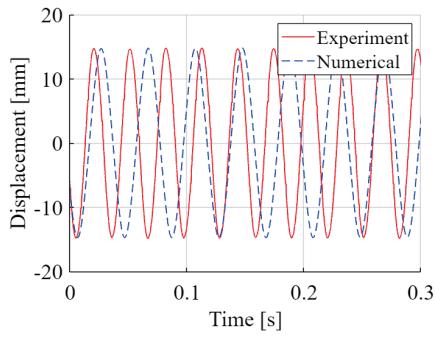


図 2 翼中央での変位

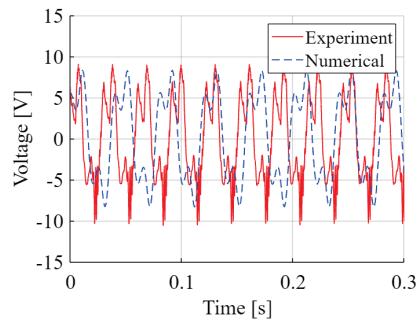


図 3 壓電素子の電圧

### ③ 提案モデルの展開膜翼への発展

火星飛行機は折り目が主流方向と非平行な折畳展開膜翼の搭載が期待されている。本年度は主流方向と非平行な折り目を扱えるように解析モデルを発展させた。初期検討として空気力を無視した構造解析において、国際共同研究者 Prof. Palacios と Chi Wing Cheng が開発した空力弾性解析コード SHARPy と提案モデルを比較した。図 4 は解析対象である斜めの折り目を持った柔軟物体を示す。図 5 はこの物体が紙面垂直方向の重力で自由落下した場合の自由端の座標を示す。折り目が斜めになっているため Y 座標は非ゼロとなる。SHARPy と提案モデルは良く一致した。

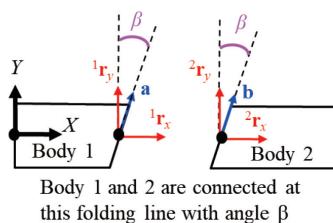


図 4 折り目を持つ柔軟体

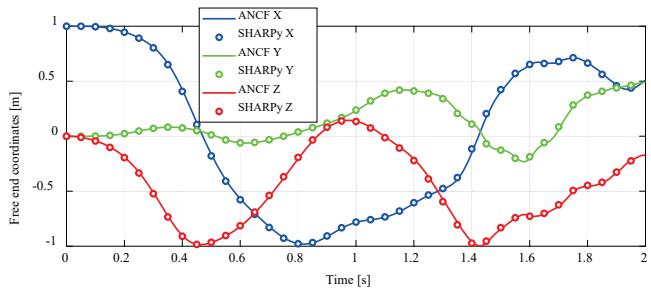


図 5 自由端の座標

## 3. 研究目標の達成状況

「モデリング理論構築」と「風洞実験によるモデル解析性能の実証」ができたため、研究目標は達成したといえる。

## 4. まとめと今後の課題

今年度は提案手法の妥当性を風洞実験で検証できた。この成果を迅速に査読付き論文として公表することが今後の課題となる。

## 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] Otsuka, K., Dong, S., Fujita, K., Nagai, H., Makihara, K., “Aeroelastic Simulation Framework for Membrane Wings,” *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-58, pp. 162-163. 【ポスター】

3) その他 なし

課題番号	J23I015
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	3年目

## 火星飛行機におけるプロペラ後流・主翼干渉流れの解明

Propeller-Slipstream/Main-Wing Aerodynamic Interaction for Mars Airplane

北村 圭一\*†, 永井 大樹\*\*††

古澤 善克\*, 坂爪 嫁哉\*

伊神 翼\*\*, 大川 真生\*\*

藤田 昂志\*\*\*

\*横浜国立大学, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*金沢工業大学

†申請者, ††所内対応教員

### 1. 研究目的

JAXA および国内の大学の研究者を中心として火星探査用のプロペラ飛行機, ヘリコプタの開発が進められている。しかし①火星の大気環境は低レイノルズ数であるため境界層剥離が起こりやすい事, また②プロペラと飛行機主翼の空力干渉はプロペラ後流の三次元構造を伴う事, などからこの流れの詳細は明らかでなく, また実験のみによる理解は難しい。数値流体力学(CFD)によるアプローチも, このように回転翼を対象とした場合には技術的なハードルが高かった。しかし近年, 国内では JAXA 開発の「rFlow3D」を中心とした回転翼流体解析ソルバの利用が研究者間で拡がり, 計算機能力の向上も手伝って, 回転翼の CFD が急速に現実的となりつつある(国外でも eVTOL 機への関心の高まりから, 例えば AIAA の国際会議にて回転翼の計算例が大幅に増えている)。

そこで本研究では, 火星環境におけるプロペラ後流/主翼空力干渉流れの理解を目的として, 「rFlow3D」でこの空力解析を行い, さらに実験と比較することで最大揚抗比を向上させるプロペラ配置などの検討も行う。また必要に応じて, 取得した実験結果に基づいた新たな流体計算手法を構築し, これを利用する。

### 2. 研究成果の内容

本研究課題では, これまで火星飛行機のプロペラ周りの流れについて, 風洞実験で用いられるサブスケール模型と実機スケール模型の流れ場を比較することで, 火星大気中の実飛行で生じるプロペラ周りの空気の圧縮性の影響を調査してきた。本年度においては, そのプロペラ周りの圧縮性の影響がその後流中に置かれた固定翼の空力特性へ与える影響を詳細に調査するために, 風洞スケールと実機スケールのプロペラおよび固定翼周りの非定常数値流体解析を行った。プロペラには APC Propellers 6x4E を用いた。どちらのスケールでもプロペラ進行率は  $J = 0.8$ , レイノルズ数は  $Re = 30,000$  (固定翼のコード長基準) で一定とし, 迎角は  $4^\circ$ とした。この時のプロペラ翼端マッハ数は風洞スケールでは  $M_{tip} = 0.10$ , 実機スケールでは  $M_{tip} = 0.52$  である。

図 1 はプロペラ後流(固定翼無し)の瞬時の圧力係数分布および主流方向速度分布を示している。サブスケールではプロペラから強い圧力波が生じていることが圧力係数分布より確認でき, また主流方向速度の乱れが大きくなっていることが速度分布からわかる一方で, 実機スケールで

はそれらが弱まっている。これは実機スケールでは圧縮性の影響によりブレード上の剥離剪断層が安定化していることに起因していると考えられる。図2はプロペラ後流中に置かれた固定翼に働く揚力係数のプロペラ1周中の時間履歴である。サブスケールではプロペラ後流の乱れが大きくなることで、固定翼の揚力係数にも高周波の振動が生じており、実機スケールではその振動が消失していることがわかる。

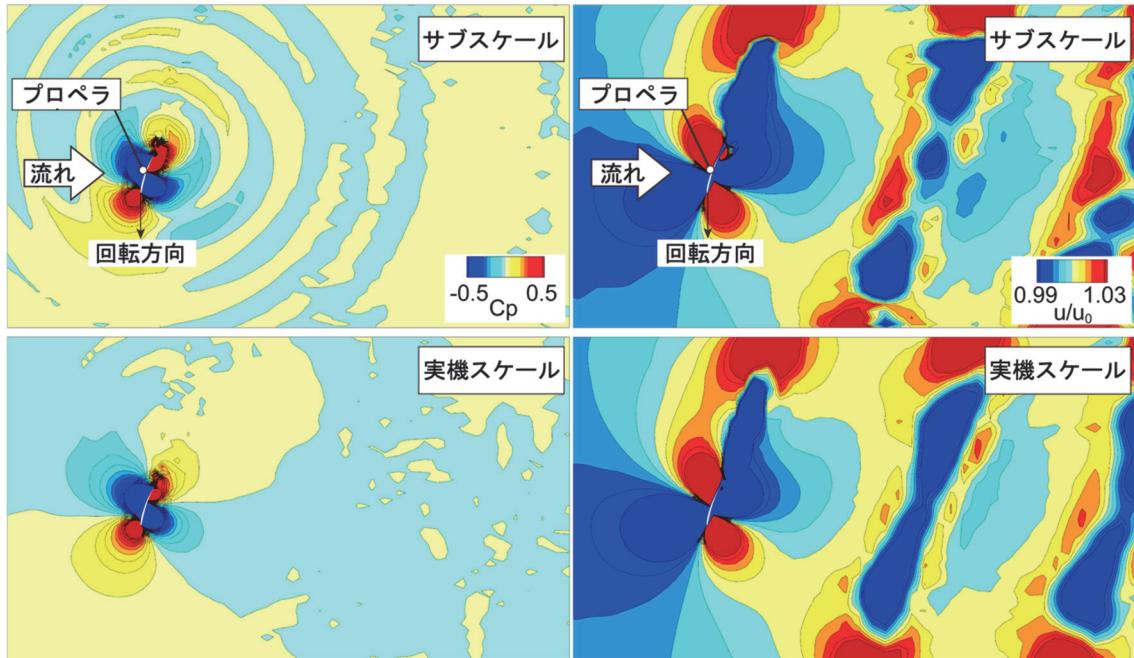


図1：プロペラ後流の瞬時の圧力係数分布および主流方向速度分布

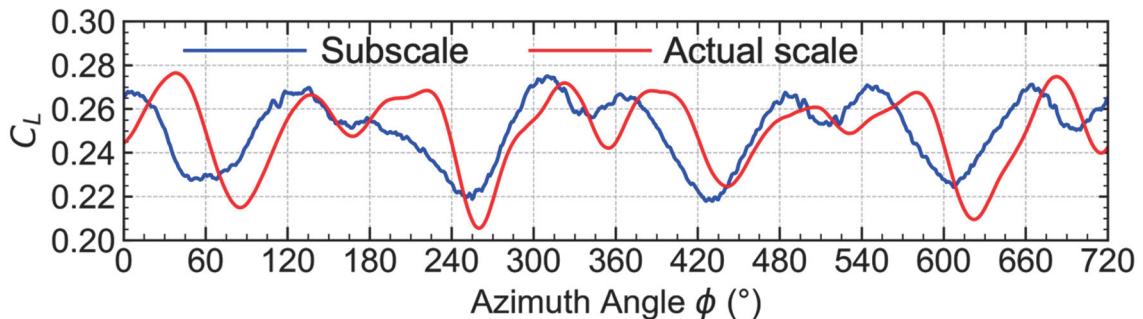


図2：プロペラ後流中に置かれた固定翼に働く揚力係数のプロペラ1周中の時間履歴

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、昨年度明らかにしたプロペラ周りに生じる空気の圧縮性の影響をより詳細に掘り下ろした上で、プロペラ後流中に置かれた固定翼周りの流れ場を明らかにすることができ、概ね期待通りに研究が進展した。

### 4. まとめと今後の課題

本研究課題では、火星飛行機の実飛行で生じるプロペラ周りの圧縮性の影響およびそれが後流中に置かれた固定翼の空力特性に与える影響を、非定常流体解析を行うことで調査した。その結果、実機スケールのプロペラでは空気の圧縮性の影響により周囲流れ場の振動も弱まり、また後流中に置かれた固定翼に生じる揚力係数の高周波の振動も弱まることを明らかにした。プロペ

ラ進行率でのそれらの影響の変化を調査することは今後の課題である。

## 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] Furusawa, Y., Kitamura, K., Ikami, T., Nagai, H., and Oyama, A.: Numerical Study on Aerodynamic Characteristics of Wing within Propeller Slipstream at Low-Reynolds-Number, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space*, Vol. 67, No. 1, (2024), pp. 12–22.
- [2] Furusawa, Y., Kitamura, K., Ikami, T., and Nagai, H.: Numerical Study on Unsteady Flow Field Structure over Wing within Propeller Slipstream at Low-Reynolds-Number, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*. (accepted)

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] Furusawa, Y., Kitamura, K., Ikami, T., Okawa, M., and Nagai, H.: Propeller Scale Effect on Fixed Wing within Propeller Slipstream at Low Reynolds Number, *The 34th International Symposium on Space Technology and Science*, Kurume, (2023).
- [4] Furusawa, Y., Kitamura, K., Ikami, T., Okawa, M., and Nagai, H., “Compressibility Effects around Propeller on Propeller-Wing Aerodynamic Interaction for Mars Airplane,” *20th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023).
- [5] 坂爪竣哉, 北村圭一, 西村練, 伊神翼, 永井大樹「同軸反転ロータの低 Re 数空力振動の数値解析」, 第 61 回飛行機シンポジウム, 北九州市, (2023).

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）Japanese Rocket Society Award, Propeller Scale Effect on Fixed Wing within Propeller Slipstream at Low Reynolds Number, Yoshikatsu Furusawa, 2023. 6. 14, The ISTS Committee.

（マスコミ発表）なし

Project code	J23I019
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

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

Siwei Liu\*†, Outi Supponen\*\*††

Tomoki Nakajima\*, Takehiko Sato\*, Kaito Nitto\*\*\*, Sayaka Kamata\*\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Institute of Fluid Dynamics, ETH Zurich

\*\*\*Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The plasma-induced fine bubble exhibits similarity with the cavitation bubble. However, our previous research found that the plasma-induced fine bubbles have unique behaviors due to the specific properties of the plasma, such as abnormal polarity effect, and by-product enhancement. Therefore, the objectives of this project are the experimental visualization and numerical calculation for the bubble dynamics, focusing on the effect of charge provided by plasma flow.

### 2. Details of program implement

Research on bubble dynamics has been widely explored theoretically, numerically, and experimentally for decades, aiming at modifying the bubble dynamics thereby regulating the desired products. Fig. 1 shows the experimental platform for bubble generation and visualization. When a pulsed laser is focused in the water, plasma is initially generated in water and causes the ionization of the molecules, inducing an explosive bubble that expands against the ambient water.

During the expansion, temperature and pressure inside the bubble decrease and the pressure eventually becomes smaller than the ambient pressure at the maximum bubble volume. Then the shrinkage of the bubble was driven by the pressure difference. At the collapse stage, the pressure and temperature increase dramatically, and a variety of chemical reactions can be induced. These stages may periodically repeat for several cycles due to different liquid properties and environmental conditions.

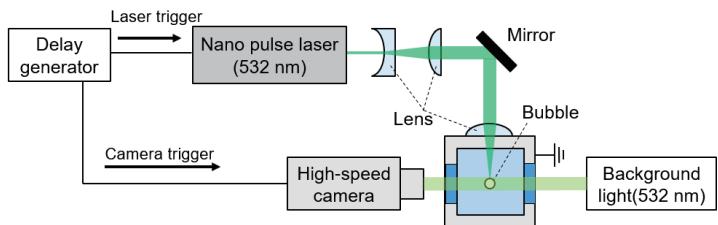


Fig. 1 Platform for bubble generation and visualization.

In this study, we succeed in generating a single spherical bubble by elegantly aligning the optical systems for laser focusing. The laser beam was focused on the center of the water contained by a convex lens. A shadowgraph high-speed imaging system was constructed to experimentally explore the effect of charge distribution on the bubble dynamics based on the high-speed visualization system. Then, the optical images were processed to identify the bubble boundary as shown in Fig.2. It was confirmed that the relationship between the equivalent radius of the bubble  $r$  and the time  $t$  follows the theoretical prediction from Rayleigh-Plesset equation.

### 3. Achievements

The bubbles can be reproducibly generated with a stable radius in the constructed platform. A numerical calculation model considering the charge effect was proposed. These preparations can be useful for further research and analysis of the charge effect. Based on the results, a paper was published in Applied Physics Letters.

### 4. Summaries and future plans

It was found that discharges inside the bubble can be used for identifying chemical reactions. In the next period, we will continue this topic and dig into the new concept of the plasma-induced fine bubble and involved chemical reactions.

### 5. Research results

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

- [1] S. Liu, K. Nitto, O. Supponen, S. Kamata, T. Nakajima, M. Farhat, T. Sato: Plasma-based identification of gases in a laser-induced cavitation bubble, *Applied Physics Letters*, Vol. 123, No. 9, (2023), pp. 094102. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0164732>
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [2] S. Liu, O. Supponen, T. Nakajima, T. Sato: Effect of charge distribution on the plasma-induced fine bubble dynamics, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-66, pp. 183-184.
  - [3] S. Liu, K. Iwasawa, A. Nakayama, T. Nakajima, T. Sato: Observation of laser-induced optical breakdown and its application in biomedicine, *Proceedings of Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS8-15, pp. 632-633.
  - [4] S. Liu, K. Nitto, O. Supponen, S. Kamata, T. Nakajima, M. Farhat, T. Sato: Plasma Discharge Inside a Laser-Induced Cavitation Bubble, *Proceedings of 16th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials*, Nagoya, (2024), pp. 07aB02O.

#### 3) Patent, award, press release etc.

##### (Patent)

Not applicable

##### (Award)

Best Presentation Award, “Plasma Discharge Inside a Laser-Induced Cavitation Bubble”, S. Liu, K. Nitto, O. Supponen, S. Kamata, T. Nakajima, M. Farhat, T. Sato, March 7, 2024, ISPlasma2024 committee.

##### (Press release)

Not applicable

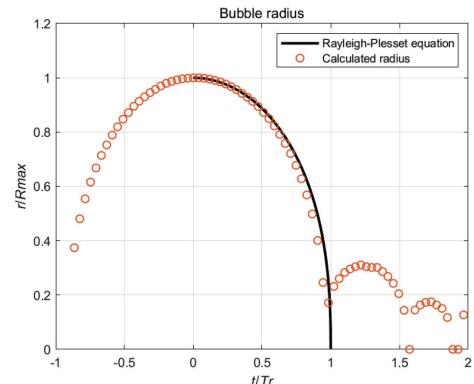


Fig. 2 Calculated bubble radius from the experimental results and the theoretical result derived from Rayleigh-Plesset equation.

課題番号	J23I020
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	3年目

**非普遍的な乱流場における乱流エネルギー・スカラ輸送機構に関する基礎研究**  
**Fundamental Studies on Turbulent Energy/scalar Transport in Non-universal Turbulences**

伊藤 靖仁\*†, 長田 孝二\*\*, 渡邊 智昭\*

Yi Zhou\*\*\*, Muyang Wang\*, 服部 裕司\*\*\*\*††

\*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法則が適用できない非普遍的な乱流場に関する研究が盛んにおこなわれている. 本研究グループでは昨年度まで「乱流・非乱流共存流動場における流動構造とエネルギー・スカラ輸送機構」というテーマで研究を行ってきた. その結果, そのような流れ場では通常の乱流が有する普遍的性質を有さない乱流の存在を明らかにしてきた. しかし統計解析は行われたものの, その物理現象的解釈やスカラ輸送機構の詳細までは解明されていない. そこで本研究では, 格子乱流場や自由せん断乱流場, 圧縮性流体に対する数値シミュレーションを行い基礎特性を取得するとともにその特徴構造を見出すことを目的とする. また減衰乱流における平衡性やエネルギーとスカラの相似性にも着目し, 普遍的性質が見られる完全乱流との相違を明らかにする. これにより乱流力学の深化および既存の乱流モデリングの修正および発展を目指す.

## 2. 研究成果の内容

本稿では, 乱流混合層における研究結果について述べる. 計算領域の大きさは主流方向, 鉛直方向, スパン方向にそれぞれ $7L \times L \times 0.8L$ であり, 格子点数は $5600 \times 800 \times 640$ とした. 上層側初期流速は下層側初期流速の2倍とした. 初期断面平均流速と鉛直方向長さに基づくレイノルズ数は12000とした. 図1に(a)瞬間流速と(b)瞬間圧力のカラーコンターマップを示す. 下流に進むにつれて混合層が発達していること, 上流部では特に圧力場で組織的な構造が見られるが, 下流に進むにしたがって乱流化し, よりランダムで微細な構造が現れることが確認される.

異なる渦スケール間における乱流エネルギーの輸送機構を明らかにするために, いわゆるKHMH式を解析した. 主流方向位置が $x/L = 2$ および $x/L = 5$ におけるその結果を示す. なお図中の横軸は二点間の距離 $r$ である. 非線形輸送項 $\Pi$ に着目すると, 上流では逆カスケードが起きているのに対して下流ではその傾向が見られない. これは格子乱流場ではみられなかった現象である一方, 後流流れである Poltela et al[1]では同様の傾向が見られた. このことから, 平均船団を伴う場合には, 流れ場を問わず発達遷移領域においては逆カスケード現象が見られると言えることが明らかになった.

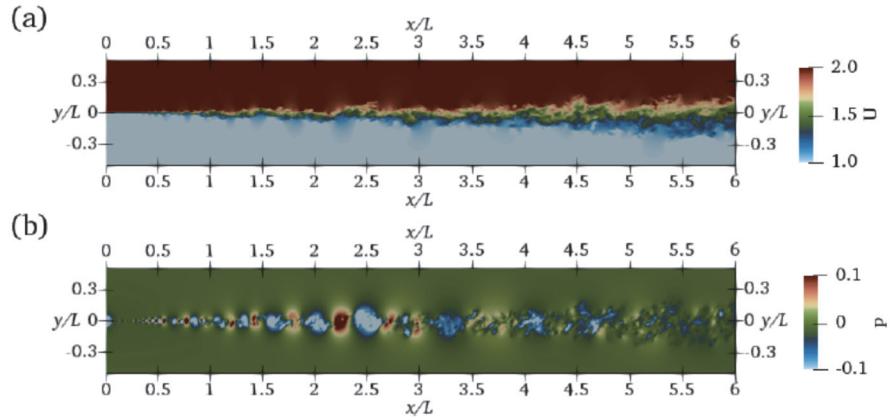


図1. (a)瞬間流速と(b)瞬間圧力のカラーコンターマップ

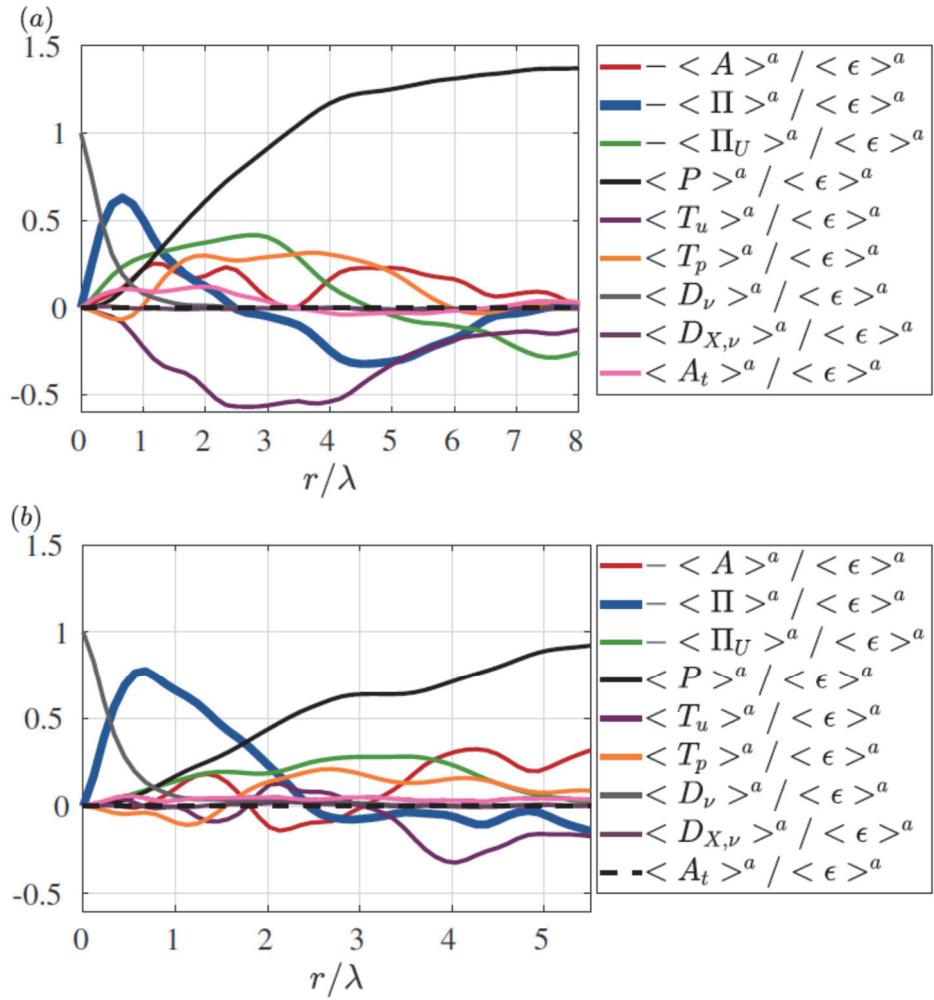


図2. KHMH式の各項の寄与. (a)  $x/L=2$ ; (b)  $x/L=5$ .

[1] F Alves Portela, G Papadakis, and JC Vassili-cos. The role of coherent structures and inhomogeneity in near-field interscale turbulent energy transfers. *J. Fluid Mech.*, 896:A16, 2020.

### 3. 研究目標の達成状況

プロジェクトの3年目である本年度は、せん断乱流場や後流流れなど速度こう配を伴う流れ場における乱流エネルギーの輸送機構を明らかにするとともに、格子乱流場に代表される平均速度こう配を伴わない場との相違を明らかにした。結果は *Physics of Fluids* や *Phys. Rev. Fluids* といった雑誌に掲載された。このことから研究目標はおおむね達成できたと考えている。

### 4. まとめと今後の課題

本研究から、非普遍的な統計的性質を有する様々な流れ場の基礎特性の解明を行うことができた。残された課題としては、そのような流れ場における乱流モデルの高精度化があげられる。今後も本課題に取り組むことにより、乱流研究の深化および工学応用に取り組む所存である。

### 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] Muyang Wang, Takuya Yurikusa, Koji Iwano, Yasuhiko Sakai, Yasumasa Ito, Yi Zhou, Yuji Hattori, Scale-by-scale analysis of interscale scalar transfer in grid turbulence with mean scalar gradient, *Phys. Fluids* 35, 045153 (2023), <https://doi.org/10.1063/5.0145314>
- [2] Zhou Yi, Nagata Koji, Ito Yasumasa, Sakai Yasuhiko, Hattori Yuji, Appearance of the  $-5/3$  scaling law in spatially intermittent flows with strong vortex shedding, *Physics of Fluids* 35, 045116 (2023), <https://doi.org/10.1063/5.0141076>
- [3] Weijun Yin, Shancong Tao, Koji Nagata, Yasumasa Ito, Yasuhiko Sakai, Yi Zhou, Spatial distribution of coherent structures in a self-similar axisymmetric turbulent wake, *Phys. Rev. Fluids* 8, 084603 (2023), <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.8.084603>

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [4] Muyang Wang, Takumi Okawa, Koji Iwano, Yasuhiko Sakai, Yasumasa Ito, Inter-scale Transfer of Energy in Turbulent Mixing Layer, *The 20<sup>th</sup> International Conference on Fluid Dynamics* (2023).
- [5] Wang Muyang, Yurikusa Takuya, Iwano Koji, Sakai Yasuhiko, Ito Yasumasa, Transfer Mechanism of a Passive Scalar in Grid Turbulence with Mean Scalar Gradient, *Proc. of the Interdisciplinary Turbulence initiative X*, 4 pages, 2023
- [6] Yi Zhou, Yasumasa Ito, Koji Nagata, Tomoaki Watanabe, Koji Iwano, Yasuhiko Sakai, Yuji Hattori, On the self-similarity behavior of coherent structures in a fully-developed axisymmetric turbulent wake, *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-67, pp.185-187

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J23I021
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Molecular Simulation of CO<sub>2</sub> Permeation through Microalgae Lipid Membrane

Fayza Yulia\*†, Takuya Mabuchi\*\*††

Fakhri Putra Nasution\*\*\*, Nasruddin\*\*\*

\*Faculty of Industrial Technology, Pertamina University

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\*Faculty of Engineering, University of Indonesia

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The research aims to employ molecular dynamic (MD) simulation methods to visually represent the permeation process of Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) molecules across microalgae's lipid membranes. This approach allows for a detailed exploration of the interaction dynamics between CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> Permeation

It can provide a detailed temporal evolution of interactions between CO<sub>2</sub> molecules and lipid membranes. By tracking the trajectory of CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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 properties evaluated include density, free energy profile, and structural changes in area of DPPC (Dipalmitoylphosphatidylcholine) lipids. RDF analysis is also carried out to examine the distribution of molecules around a reference CO<sub>2</sub> molecule, which provides insights into the local molecular environment and interaction potentials, and finally, transport properties which include permeability and diffusion coefficient are also analyzed.

### 2. Details of program implement

Research collaboration related to Molecular Simulation of CO<sub>2</sub> 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 2023, 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 6-8, 2023. 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<sub>2</sub> permeation through DPPC lipid membranes, 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<sub>2</sub>. This involves CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> molecules begin to permeate through the DPPC bilayers within the first nanosecond. By the 30 ns, most CO<sub>2</sub> molecules have successfully entered the bilayer, indicating significant permeation. Total numbers of CO<sub>2</sub> molecules which had been penetrated in the lipid membrane are observed every 1 ns as presented in Figure 2.

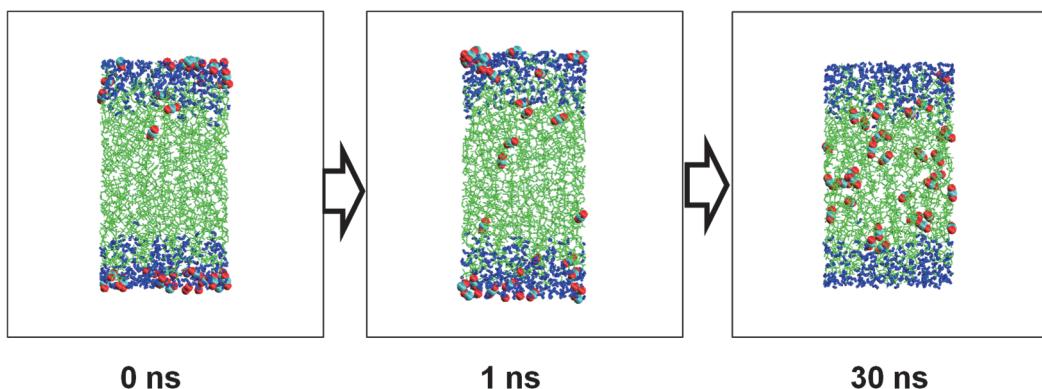


Figure 1: Visualization of CO<sub>2</sub> Permeation in DPPC Lipid Membrane

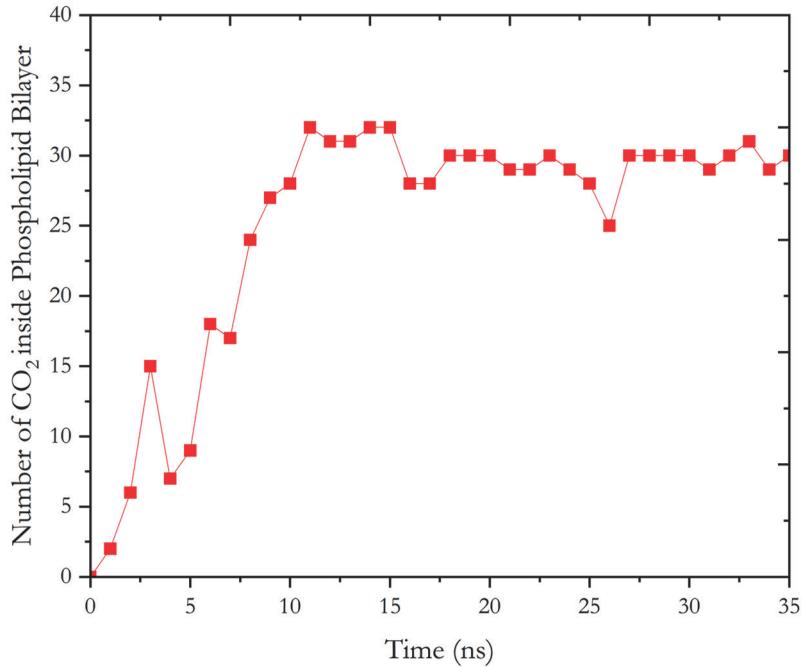


Figure 2: CO<sub>2</sub> Molecules in DPPC Lipid Membrane

The structural changes in lipid membranes are monitored through the calculation of Area per Lipid (APL), which is determined by dividing the size of the simulation box by half the number of lipids along the z-axis. The obtained APL value is 0.65 nm as presented in Figure 3. This value shows a strong agreement with the previous study, which focused on the study of microalgae lipid membranes [1]. The consistency between this study suggests that the APL value of 0.65 nm is a reliable measure of the structural changes in lipid membranes, providing valuable insights into the properties and behavior of these membranes.

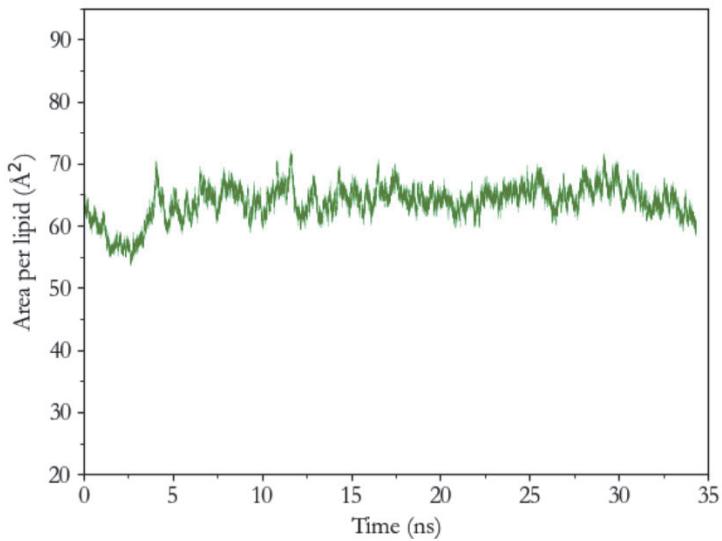


Figure 3: Calculated Area per Lipid Membrane

In our study, we analyze the density of CO<sub>2</sub> gas within the DPPC lipid membrane, a key aspect of understanding how CO<sub>2</sub> interacts with and is absorbed by the

membrane. This analysis is visually represented in Figure 4, which depicts the gas density profile along the  $z$ -axis of our simulation box. This profile is crucial for assessing the mass accumulation of  $\text{CO}_2$  on the membrane over time. Initial measurements taken at 3 ns reveal that  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ 's position relative to the membrane, suggesting effective permeation and absorption processes occurring over the duration of the simulation.

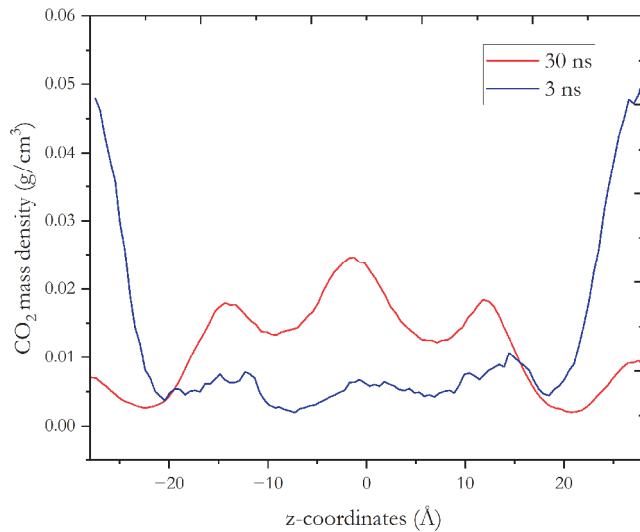


Figure 4:  $\text{CO}_2$  Mass Density in DPPC Lipid Membrane

Free Energy profile is calculated from density profile using 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  $\text{CO}_2$  density at specific  $z$ -coordinates, and  $\rho(z_0)$  is the minimum  $\text{CO}_2$  density in the system as depicted in Figure 5. This figure reveals that the average free energy of  $\text{CO}_2$  outside the bilayer (between 20-30 Å) is approximately 3 kJ/mol. As  $\text{CO}_2$  enters the bilayer, there is a notable drop in free energy down to -3 kJ/mol. This significant decrease indicates the presence of a free energy barrier, which  $\text{CO}_2$  molecules must overcome to successfully permeate the bilayer. The location of this barrier correlates with the region occupied by the lipid headgroups. These headgroups are characterized by their strong charges and are densely packed with water molecules, creating a challenging barrier for  $\text{CO}_2$  molecules attempting to cross the bilayer. This understanding of the free energy landscape helps elucidate the molecular dynamics and energetic requirements involved in the permeation process.

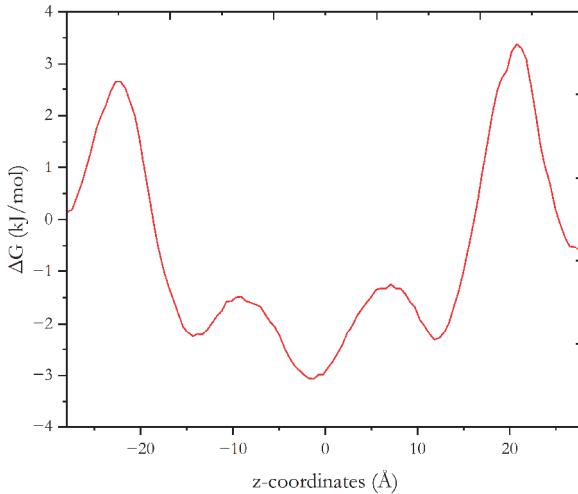


Figure 5: Free Energy Profile of CO<sub>2</sub> Molecules in DPPC Lipid Bilayer

We calculated the diffusion coefficient of CO<sub>2</sub> molecules using Mean Squared Displacement (MSD) analysis as described in Table 1. This method quantifies how far CO<sub>2</sub> molecules travel in the membrane over time, providing insights into their mobility. This value offers a measure of the rate at which CO<sub>2</sub> molecules diffuse through the membrane, which is critical for understanding their permeation dynamics. For comparative context, a previous study examining CO<sub>2</sub> molecule permeation into microalgae reported a slightly higher diffusion coefficient of  $1.83 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ . This slight discrepancy could be attributed to differences in the biological and physical properties of the membranes studied, as well as the experimental conditions under which the diffusion was measured. Such comparisons are vital for validating our results and understanding the variability of CO<sub>2</sub> diffusion across different biological systems.

Table 1: Free Energy Profile of CO<sub>2</sub> Molecules in DPPC Lipid Bilayer

Properties	Values
D	$1.68 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$
D <sub>z</sub>	$1.11 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$
D <sub>xy</sub>	$2.06 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$
P	0.54

To deepen our understanding of how CO<sub>2</sub> gas molecules interact with different components of the DPPC lipid membrane, we conducted radial distribution function (RDF) calculations. These calculations are crucial for analyzing the probability of finding a CO<sub>2</sub> molecule at a certain distance from various groups within the membrane, such as the carbon chains of the phosphate group, hydrocarbon chains, nitrogen, and water molecules. Our findings indicate that at shorter distances, specifically between 2-3 Å, CO<sub>2</sub> molecules predominantly adsorb onto water molecules. As the distance increases to around 3 Å, a significant diffusion of CO<sub>2</sub> molecules into the hydrocarbon region is observed, with an increasing concentration of CO<sub>2</sub> molecules persisting up to a distance of 14 Å. This pattern suggests a higher affinity of CO<sub>2</sub> for the hydrocarbon chains within this range. Additionally, CO<sub>2</sub> penetration into the phospholipid bilayer region starts at approximately 4 Å and

continues to increase up to 14 Å. This gradual increase highlights the dynamic interaction of CO<sub>2</sub> with the membrane, providing detailed insights into the molecular mechanisms of CO<sub>2</sub> permeation and its spatial distribution within different regions of the lipid membrane.

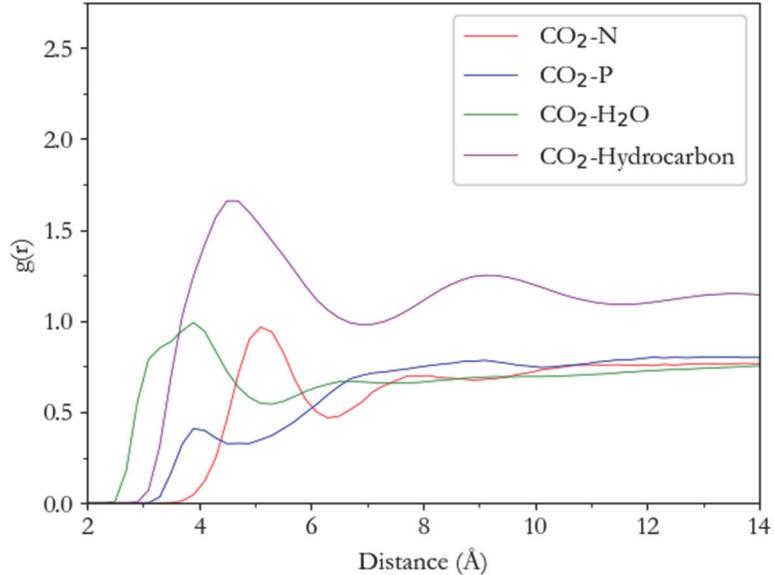


Figure 6: Radial Distribution Function of CO<sub>2</sub> Gas Molecules in DPPC Lipid Membrane

#### 4. Summaries and future plans

For the future directions of our research on CO<sub>2</sub> permeation dynamics, we plan to refine our modeling techniques to yield more precise and biologically relevant results. One major advancement will be to model the cell membranes of microalgae as composites of various lipids. This approach stems from physical and chemical analyses of different microalgae species, which suggest that their membranes are complex mixtures of lipid types, each potentially influencing CO<sub>2</sub> transport in unique ways. By incorporating a diverse range of lipid components into our simulations, we aim to replicate the natural environments of these membranes more accurately and thus provide deeper insights into the CO<sub>2</sub> permeation process. Further, we want to analyze the CO<sub>2</sub> permeation process in gas mixture and the effect of salinity in the environment.

Additionally, we aim to innovate our research by examining the effects of light intensity on CO<sub>2</sub> diffusion across these membranes. Light, a critical factor in the metabolic processes of microalgae, likely impacts how CO<sub>2</sub> is absorbed and processed. However, the challenge here lies in the limitations of current molecular dynamics techniques, which are not well-suited to model the effects of light. To address this, we plan to explore other computational methods, such as Density Functional Theory (DFT), which may offer the capability to simulate light interactions more effectively.

#### 5. Research results

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

課題番号	J23I022
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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\*†, 鈴木 鳩一郎\*

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ー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と考えられる。この問題を回避するため、電極を有さない次世代無電極電気推進システム、磁気ノズル型スラスターに注目が集まっている。磁気ノズル型スラスターでは外部に高周波コイルを有する絶縁体チューブで高密度プラズマを生成し、拡散磁場（磁気ノズル）を印加することで推力を生成する。本システムの利点として、高速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等が挙げられる。近年ではカスプ磁場を磁気ノズル型スラスターに適用することで 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ーの推進効率は 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ー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ーが新しく提案されている。本システムでは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。一般に電磁加速は静電加速と比較して大推力・高比推力を達成できると考えられており、変動磁場型スラスター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ーの改良に革新を起こし得ると予想される。しかし変動磁場型の推進性能はまだ発展途上であり、その物理現象も複雑さゆえ未だ明らかになっていない部分が多い。従来の研究では下流に注目した実験的アプローチが主であったが、推進性能向上のためには物理現象のより詳細な理解が必須であり、数値計算的アプローチが有効と考えられる。しかしながら、変動磁場型スラスターについて数値計算を適用した事例は多くないのが実情である。

## 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のプラズマ輸送現象の解明を目的として、電子とイオンの運動論的振る舞いを記述することができる Particle-in-Cell (PIC) シミュレーションを実施する。ここで従来の PIC シミュレーションでは電磁誘導効果を導入できなかったため、Faraday の電磁誘導則を用いた簡易的電磁誘導モジュールを新しく提案し、従来の PIC シミュレーションに組み込んだ。計算の結果を実験と比較することで本提案モジュールの妥当性を検証する。また変動磁場効果をより推力に寄与させうる磁場形状を新しく提案し、モデルを用いた推力推定よりその有効性を議論する。

## 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 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 Mupack ライブライアリにより解くことで電場を算出した。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。計算領域は  $15 \times 4.5 \text{ cm}^2$  とし、実験のプラズマ源と同サイズとなるように誘電体表面を設置した。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帶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セル数を  $512 \times 128$  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。

PIC シミュレーションの結果、図 1 に示されるような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。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シミュレーションから明らかになり、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表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たと考えられた。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。提案スラスタのコンセプトは、従来バックプレートに向いていた Cross-field 方向の向きを、局所閉磁場を印加することでプラズマ源中心部を向くように修正し、壁面でのプラズマ損失を低減させる点にある。その有効性を調査するため、先の再現計算と同様に提案スラスタについても PIC シミュレーションを実施した。計算の結果、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プラズマ源内部のイオン粒子数が従来スラスタと比較して約 1.3 倍に向上した。また、モデルを用いた推力推定より電子圧力推力、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。以上の計算で示されたコイル内蔵型スラスタの有効性を実験で確認すべく、コイル内蔵型スラスタを実際に試作し東京大学の真空装置を利用して動作実験を実施した。内蔵コイルへの投入電流が計算と比較して 1/50 程度であったため計算のような大幅なプラズマ輸送の変化は確認されなかったが、内蔵

コイルコーティング用セラミックの耐久性能や、内蔵コイル磁場付近のイオン流速増加などについて興味深い結果が得られた。

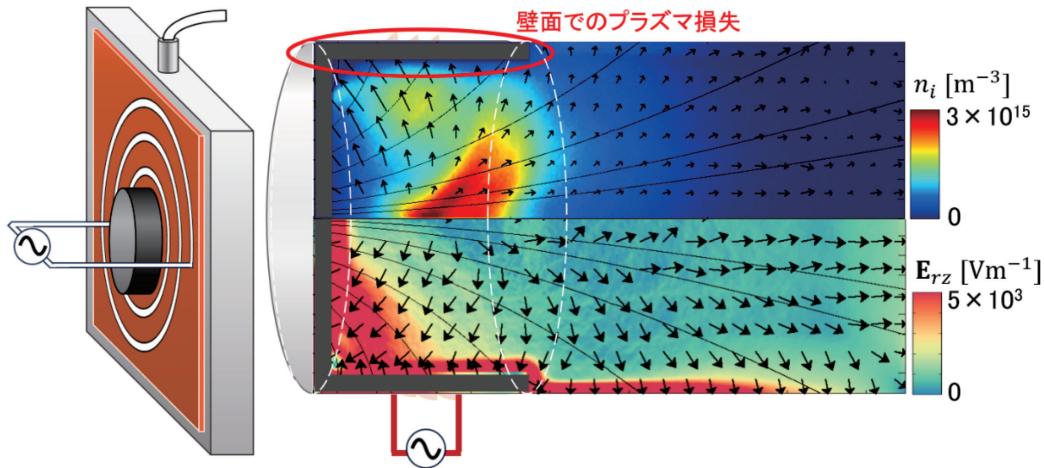


図1：変動磁場印加型スラスターにおける、イオン密度  $n_i$ 、イオン流速ベクトル（上部矢印）、 $r\text{-}z$ 面内電場ベクトル  $\mathbf{E}_{rz}$  の PIC シミュレーション結果。

### 3. 研究目標の達成状況

変動磁場印加型スラスター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、従来スラスター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ーを提案し、その有効性を PIC シミュレーションから明らかにした。加えて提案スラスターの試作および動作実験の段階まで到達したことからも、当初の研究目標は十分に達成できたと言える。

### 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ー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ーを新しく提案した。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、提案スラスターの最適設計、変動磁場印加時のプラズマデタッチメント現象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, "High-speed Plasma Flow Simulation on Spacecraft and Propulsion Systems," Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai (2023), CFR-38, pp.113-114.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23I024
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1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 (APPLACOUST 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。

## 2. 研究成果の内容

本研究では、数値解析および実験によって「立ち上がり時間の長い圧力波形」に及ぼす乱流効果を調査した。実験的調査では、東北大学流体科学研究所所有の弾道飛行装置（火薬銃モード）を用いて、飛行模型をマッハ数 1.4 で飛行させた。そして、この飛行模型から発生する「立ち上がり時間の長い圧力波形」を乱流場に通過させ、乱流干渉を受けた圧力波面の計測を行った。飛行模型は、"立ち上がり時間の長さ" が異なる Model A と Model E を 2 回ずつ飛行させた。図 1 に飛行模型の形状を示す。統計値を取得するため、1 回の模型射出に対して 8ヶ所で圧力変換機を用いて圧力波形計測を行った。そのため、20 mm 間隔で並べた 4 本の内径 4.6 mm の円管ノズルを用いて、圧力波と乱流場の干渉領域を広くした。圧力波は、ノズルの先端から軸線上に 110 mm の位置で衝撃波伝播方向に乱流強度  $V_{rms} = 9.8 \text{ m/s}$  の乱流場を発生させた。一方、数値的調査では、CFD 解析を用いて、マッハ数 1.4 で飛行する飛行モデルから発生する近傍場圧力波形を算出した。その際、実験的調査で用いた立ち上がり時間が異なる飛行モデル (Models A and E) を使用した。これらの圧力波形を、長距離音響伝搬ツールを用いて、実験条件と同じ距離伝搬させた。乱流運動エネルギー :  $K = 92.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 乱流のエネルギー散逸率 :  $\varepsilon = 2.2 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , ピーク波数 :  $k_e = 22.3 \text{ m}^{-1}$ , 最大波数 :  $k_d = 5.0 \times$

$10^4 \text{ m}^{-1}$  および最小波数 :  $k_l = 2.0 \times 10^2 \text{ m}^{-1}$  を用いて、衝撃波伝播方向に幅  $W = 50 \sim 250 \text{ mm}$  の一様等方性乱流を数値的に模擬し、圧力波を乱流場中に伝播させた。

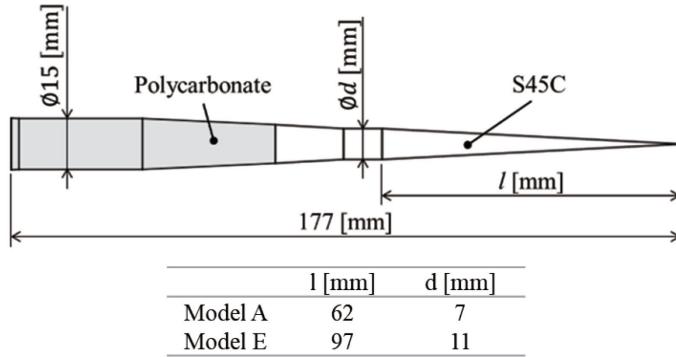


図 1：飛行模型

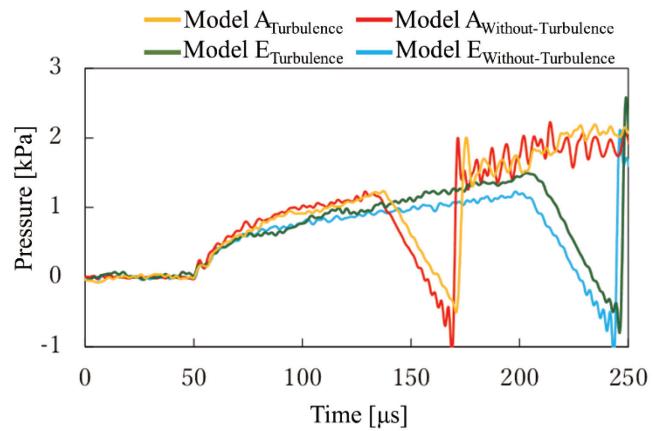


図 2：実験で計測した圧力波形

表 1：立ち上がり時間と最大過剰圧の標準偏差（実験結果）

飛行モデル	最大過剰圧 [-]	立ち上がり時間 [-]
Model A	0.089	0.054
Model E	0.023	0.015

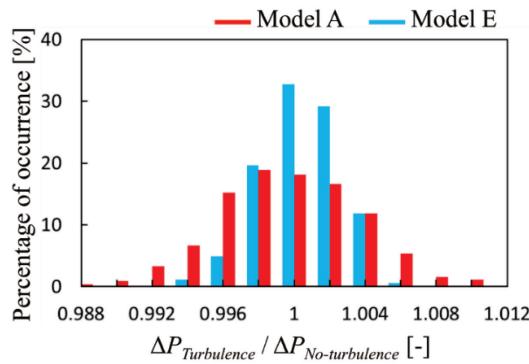


図 3：最大過剰圧のヒストグラム（数値解析結果）

実験で計測した飛行モデル Models A and E の代表的な圧力波形を図 2 に示す. Model A および Model B 共に乱流干渉により, 最大過剰圧が若干上昇しているが, 波形自体に大きな歪みは生じていない. 一方, 統計値である 16 回計測した圧力波形の立ち上がり時間と最大過剰圧の標準偏差を評価した結果(表 1), Model A が Model B よりも標準偏差が大きくなつた. 図 3 に数値解析による最大過剰圧のヒストグラムを示す. 数値解析においても実験と同様に乱流干渉によって Model A の最大過剰圧が広く分布している. つまり, 「立ち上がり時間の短い圧力波形」は乱流効果を受けやすいことが分かつた. この結果は, 先行研究 (APPL ACOUST 114, pp.179-190, 2016) と一致している.

「立ち上がり時間の長い圧力波形」では, 乱流場を通過する際の乱流干渉時間が短くなり, 乱流干渉が不十分の可能性がある. そこで, 「立ち上がり時間の長い圧力波形」が乱流干渉の影響を十分受けていることを確かめるため, 数値解析を用いて乱流干渉による圧力波形の変形と乱流干渉幅  $W$  の関係を調べた (図 4). ここで, 図中における縦軸の底部が圧力計測位置である. 乱流干渉幅  $W = 50 \sim 250 \text{ mm}$  の全てで, 圧力計測位置における最大過剰圧の標準偏差が約 1.7 Pa となつた. また, 最も干渉距離が短い  $W = 50 \text{ mm}$  においても乱流干渉直後に標準偏差が大きくなり, 乱流干渉の影響を受けている. Model A および Model E の立ち上がり時間は,  $\Delta t \approx 50 \mu\text{s}$  の時間差が生じる (図 2). そのため, このモデル間での伝搬距離の差は,  $\Delta W = \Delta t \times \text{音速} \approx 17 \text{ mm}$  となる.  $W = 50$  と  $70 \text{ mm}$  における乱流干渉効果は, ほとんど同じであるため, 実験において設定した乱流干渉距離である 20 mm では, 乱流干渉の影響を同等に受けていると推測できる.

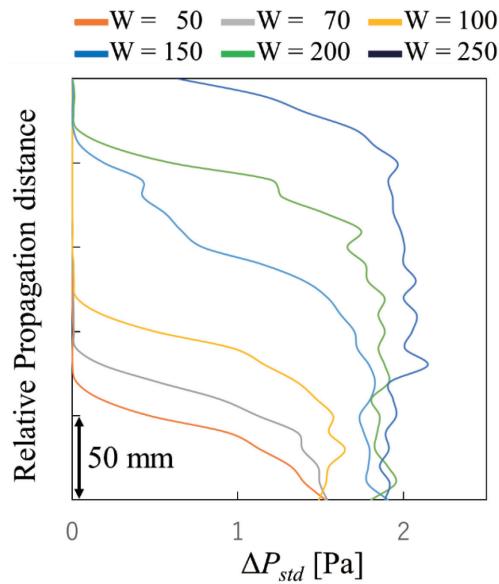


図 4 : 伝播過程の最大過剰圧の標準偏差

乱流干渉による圧力波の波面の変化のメカニズム解明のため, 乱流場を伝搬中の圧力波面の歪みを調査した. “立ち上がり時間”が短い Model A の伝搬距離  $W = 150 \text{ mm}$  の条件における波面の様子を図 5 に示す. 縦軸は, “乱流干渉無し” の圧力値の差分 ( $P - P_{w/o}$ ) を示すため, 圧力増減が生じる箇所に乱流干渉の影響が現れる. 乱流場干渉し始めた際の波面では(図 5 (a)), 横方向 (図中の Span 方向) に周期的な圧力変動が現れるものの, 時間方向 (図中の Time 方向) に急激な圧力変化が生じない. その後, 圧力波が伝搬するにつれて (図 5 (b) - (c)), 時間方向にも圧力変動が生じる. 伝搬距離が 150 mm となつた際には, 時空間方向にランダムに圧力変動が現れる. 一方, “立ち上がり時間” の長い Model E では (図 6), 乱流場

との干渉が始まる時点において（図 6 (a)），圧力変化が Model A より僅かに小さい。また，150 mm 伝搬した後は（図 6 (b)），Model A の圧力変動と比べて変動値も小さい。このように圧力波面の歪みにおいても，“立ち上がり時間”が長い圧力波形が乱流効果を受けにくいくことが分かる。

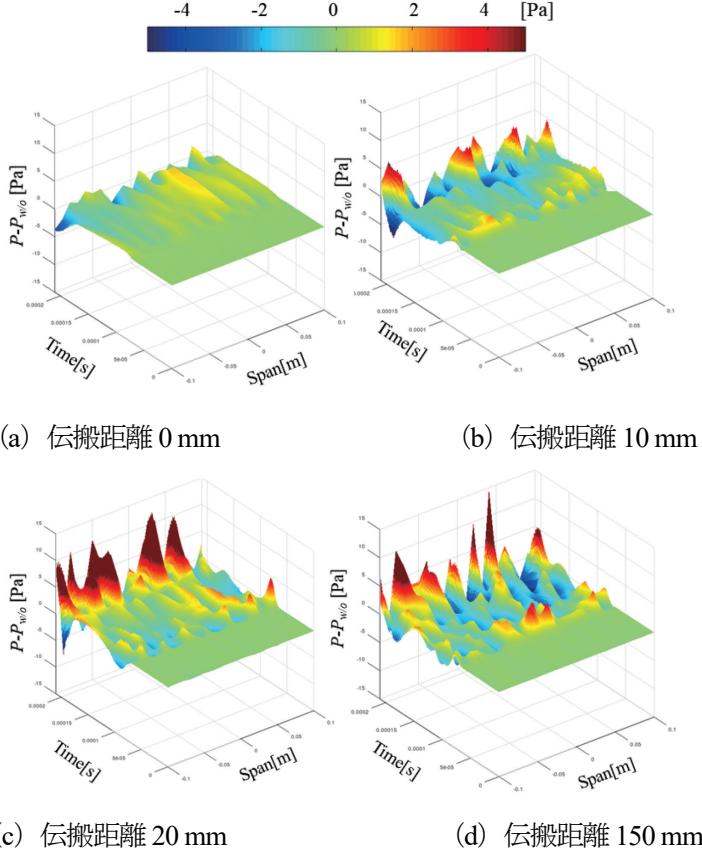


図 5：伝搬過程における“立ち上がり時間”的短い Model A の圧力変動

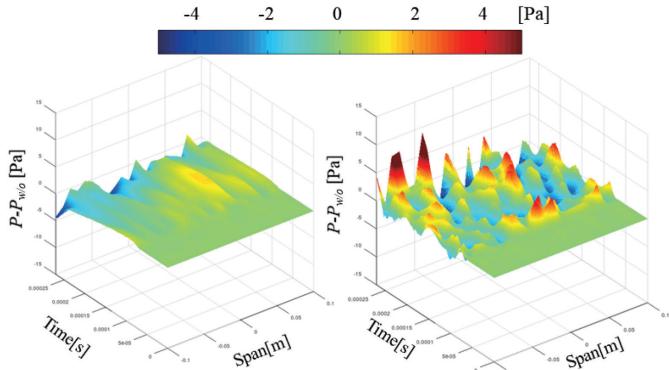


図 6：伝搬過程における“立ち上がり時間”的長い Model E の圧力変動

### 3. 研究目標の達成状況

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”の長さスケールに着目し、乱流場の伝播過程の波形の歪みを調査した。その結果、“立ち上がり時間”が長いと乱流効果を受けにくくなることが分かった。しかしながら、本研究の目的である、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には更なる調査が必要である。

### 4. まとめと今後の課題

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ため、「立ち上がり時間の長い圧力波形」の異なる“立ち上がり時間”的圧力波形に対して、実験および数値解析を用いて、乱流干渉の効果を調査した。その結果、“立ち上がり時間”が長い圧力波形は、“立ち上がり時間”的短い圧力波形よりも最大過剰圧の変動が小さかった。つまり、

「立ち上がり時間の長い圧力波形」は、乱流干渉による影響を受けにくいことが明らかとなつた。また、乱流干渉時における圧力波の歪みを調査した結果においても、“立ち上がり時間”が長い圧力波形は時空間方向に比較的大きな圧力変動が現れた。本研究による数値解析では、一様等方性乱流を模擬しているが、実験の乱流場と異なるため、今後、実験と同じ乱流場を数値的に模擬し、信頼性を確保して詳細な波形の歪みを数値解析で調査する。また、乱流場の長さスケールを変更させて、数値・実験的に“立ち上がり時間”に及ぼす影響を調査する。

### 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] Y. Arakawa, T. Ukai, K. Ohtani: The experimental and numerical investigations of pressure rise-Time effects in shock-turbulence interaction, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-48, pp.134-135.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J23I025
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

**Experimental and Kinetics Modeling Study of Tri-Methyl-Phosphate (TMP)  
Combustion: Toward P-Containing Fire Suppressants for Lithium-Ion Battery  
Electrolytes**

Olivier Mathieu\*†, Claire M. Grégoire\*, Hishashi Nakamura\*\*††

\*J Mike Walker '66 Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

## 1. Purpose of the project

The purpose of the project was to produce experimental data and develop and validate a detailed kinetics model for tri-methyl-phosphate. This molecule is one of the simplest P-containing molecules on a structural point of view, facilitating the work on the model end, and P-containing molecules are candidate fire suppressants for lithium-ion batteries. This type of work is necessary to improve the safety of devices and vehicles powered by lithium-ion batteries.

## 2. Details of program implement

New experimental CO measurements were collected for TMP pyrolysis and oxidation for the first time using a shock tube at Texas A&M University. Representative CO time histories are visible in Fig. 1 at for the pyrolysis case, with the CO profiles increasing rapidly until a plateau is reached for the high-temperature cases, while the rate of CO formation is much slower at lower temperatures. Numerical predictions were performed using the detailed chemical kinetics mechanism from Glaude et al. (P.A. Glaude, C. Melius, W.J. Pitz, and C.K. Westbrook, Proc. Combust. Inst., 29, (2002), 2469-2476.) showing the overall poor agreement of the model with the data, justifying this work.

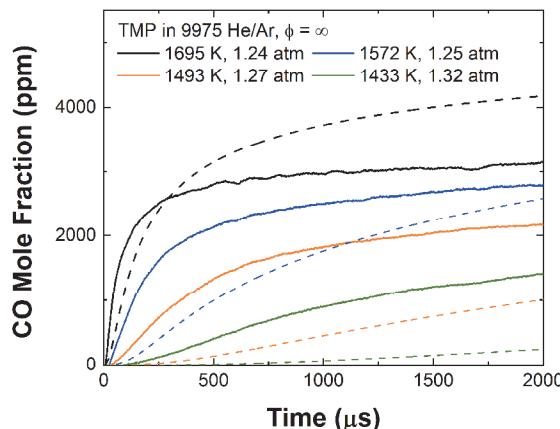


Fig. 1 Representative CO time-history profiles for the pyrolysis of TMP in 0.9975 He/Ar. Dashed lines represent the numerical predictions using the Glaude et al.

Data were also obtained in presence of oxygen with equivalence ratios ( $\phi$ ) of 0.5 and 1.0.

Some representative profiles at  $\phi = 0.5$  and their model comparisons are visible in Fig. 2, showing the very large discrepancy between the model and the data.

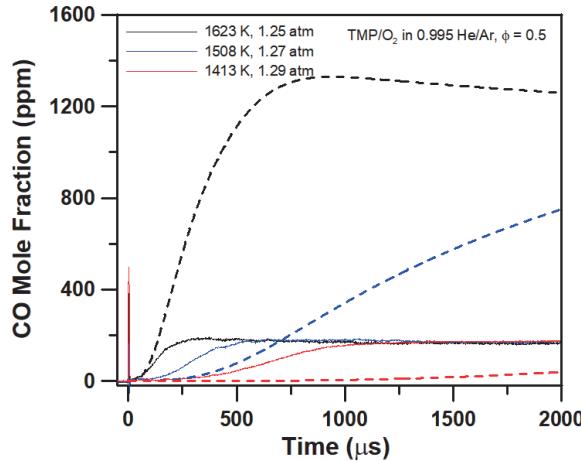


Fig. 2 Representative CO time-history profiles for the oxidation of TMP in 0.995 He/Ar. Dashed lines represent the numerical predictions using the Glaude et al. mechanism.

A micro flow reactor with a controlled temperature profile (MFR) at Tohoku University was also used and results for the pyrolysis of TMP are visible in Fig. 3 for methane and CO. As can be seen, for this case, the model seems to predict the data relatively well. However, it is worth mentioning that the equilibrium for these two species is not reached before about 1400 K according to the model and reaches 15000 ppm for methane and about 25000 ppm for CO.

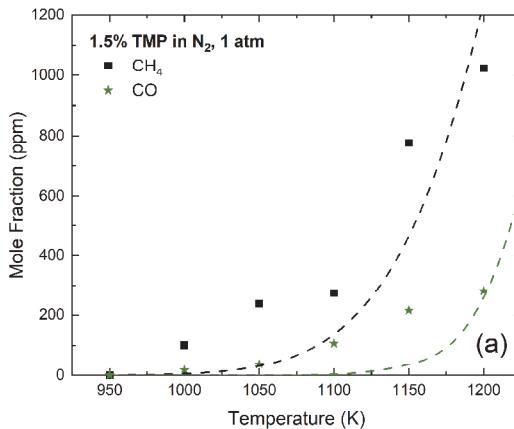


Fig. 3 Measured absorption of CH<sub>4</sub> and CO during TMP pyrolysis at atmospheric condition using a FTIR diagnostic. Dashed lines represent the numerical predictions using the Glaude et al. mechanism.

### 3. Achievements

The experimental measurements planned in the project proposal have been performed. The preliminary ab initio calculations showed new, unexplored reaction pathways. A paper was prepared and presented during the 20<sup>th</sup> ICFD.

#### 4. Summaries and future plans

To summarize, the experimental measurements initially planned for this project have been performed. These measurements exhibited flaws in an initial detailed kinetics model from the literature and work has been performed to update this model, including ab initio calculations. However, the model is not finalized yet and the next step will focus on improving the model using the new data obtained during the course of this project. The ultimate goal will consist in writing and publishing a paper using these results and the updated model.

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
[1] C.M. Grégoire, E.L. Petersen, O. Mathieu, K. Kanayama, H. Nakamura, K. Maruta: Shock-Tube CO Measurements during the Combustion of Ethylene Carbonate, a Battery Electrolyte Component. *29th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, (2023), #036.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)  
[2] C. Grégoire, R. Matsumoto, K. Kanayama, T. Tezuka, M. Izumi, H. Nakamura, K. Maruta, E. L. Petersen, O. Mathieu: Experimental and Kinetics Modeling Study of Tri-Methyl-Phosphate Pyrolysis: Toward P-Containing Fire Suppressants for Lithium-Ion Battery Electrolytes. *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-5, pp.28-31.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

課題番号	J23I026
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目

## バイオミメティ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\*\*††

重 昂輝\*, 武田 尚恭\*, 小西 康郁\*\*, 伊神 翼\*\*, 小松崎 俊彦\*\*\*

\*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。これまでに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

本年度は多孔質材の作製と多孔質材の表面に形成される境界層の特性の調査を行った。調査は乱流噴流により形成される境界層を対象として行い、熱線流速計による流速の計測やPIV計測により境界層について調べた。風洞の吹出口に図1に示すようにアルミニウムまたは多孔質材料の平板を設置した。そして、平板上に形成される境界層を計測して平板の違いによる境界層流れの違いについて調べた。平板の大きさは流れ方向に500 mm、幅方向に300 mmとした。計測における原点は吹出口の中央とし、流れ方向をx、壁面に垂直方向をyとした。また、吹出口の流速はピト一管により計測して2.3 m/sに設定した。

本研究では平板の違いによる平板上の流体の流動特性の差異を調べるため、以下に示す形で熱線流速計を用いてアルミニウムや多孔質材料の平板の表面近傍の速度を計測した。

熱線流速計は定温度型のもので、センサ部となる熱線を一定の温度に保つためのCTA回路、熱線、熱線とCTA回路を接続するケーブルとサポートで構成される。本研究では3.6Ωの抵抗の直径5 μmのタングステン線を熱線として使用した。この熱線は2本のプロングの間に設けられており、このプロングが取り付けられている碍子がサポートに取り付けられている。サポートはハイトゲージのスクリーブに取り付けられており、ハイトゲージによりサポートの位置、すなわち、熱線の位置を変えることができる。

流速を計測する流れ方向位置はx = 15, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225,

250 mm の 11箇所, 高さ方向位置は  $y = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0$  mm の 7箇所とした. これらの位置に熱線を移動させ, その時の CTA 回路の出力電圧を計測し, 計測した電圧を予め取得した校正式により流速に換算して各位置の流速を求めた. 電圧の計測はデータロガー(Keyence 社, NR-X100)を用いて行った. サンプリング周期は 200  $\mu$ s, サンプリング数を 100,000 (20 秒)とした. 取得した電圧から流速に変換する校正式は 3 次または 6 次のものを用いた. 電圧から流速に変換した後, 流速の時間平均値, および, 流速の時間変動強度(乱流強度)を求めた.

図 2 に  $x = 15$  mm におけるアルミニウム, 厚さ 3 mm の多孔質材料の平板, 厚さ 6 mm の多孔質材料の平板の表面の平均流速の計測結果, 図 3 に  $x = 200$  mm におけるアルミニウム, 厚さ 3 mm の多孔質材料の平板, 厚さ 6 mm の多孔質材料の平板の表面の平均流速の計測結果を示す. また, 図 4 に  $y = 1.0$  mm におけるアルミニウムおよび厚さ 6 mm の多孔質材料の平板の表面の乱流強度の計測結果を示す.

各図より, 平板の種類により吹出口からの境界層の発達過程(流速分布の変化)に違いがあることがわかる. また, 平板が多孔質材料の場合は境界層の発達が遅いことがわかる. この効果は多孔質材料の厚さが厚い場合に顕著となり, 図 4 に示した厚さ 6 mm のものは上流側と下流側の速度分布の差異が小さくなつた. このような結果となった原因として, 多孔質材料の平板の表面近傍では変動圧力の透過が可能である点が挙げられる. アルミニウムの平板の場合, 平板は剛体として扱われ, 平板垂直方向の変動速度は存在できず, その運動エネルギーは変動圧力として平板上に発生して消失する. 一方, 多孔質材料の平板の表面では, 変動圧力が透過するため, 必ずしも平板垂直方向の変動速度は 0 とはならない. この結果, 平板の表面近傍での乱れエネルギーの輸送が可能となり, 境界層の発達過程が変化したものと考えられる.

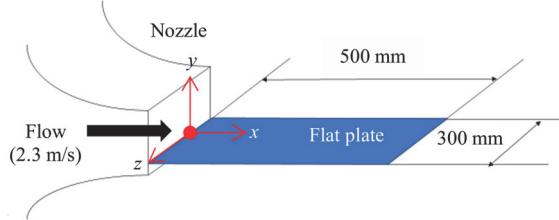


Figure 1: Perspective view of the nozzle exit and the flat plate of the wind tunnel.

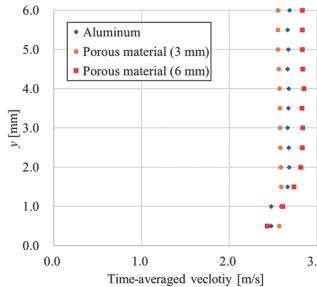


Figure 2: Cross-streamwise profiles of the time-averaged velocity profiles on a flat plate at  $x = 15$  mm.

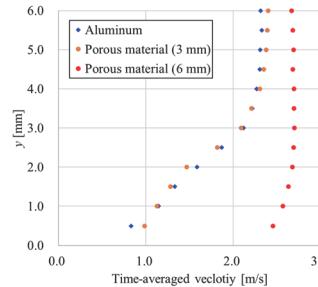


Figure 3: Cross-streamwise profiles of the time-averaged velocity profiles on a flat plate at  $x = 200$  mm.

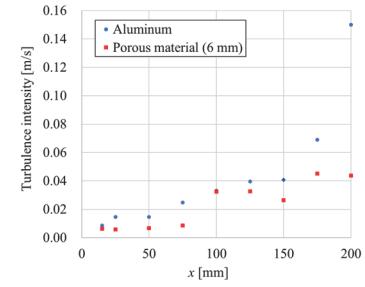


Figure 4: Streamwise profiles of the turbulent intensity at  $y = 1.0$  mm.

### 3. 研究目標の達成状況

本研究で提案している多孔質材を用いることで、電気自動車用の空調機で騒音低減を達成できているため、予想される成果を実現しつつある。

### 4. まとめと今後の課題

3に記載の通り、一定の成果は得ることができ、実用化の見込みを得ることができた。今後はより実装可能な技術とするため、設計手法の確立や騒音低減原理の詳細解明を図る。

### 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. Shige, O. Terashima, A. Inasawa, T. Komatsuzaki, Y. Sakai, T. Kusano: On the reduction of the flow-induced noise using porous material plates with high acoustic transmissibility, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 568 (2024), Paper No. 117967.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117967>
- [2] 寺島修: バイオミメティクスを活用した機械振動騒音低減技術の開発, 月刊 技術士, Vol. 2024, No. 1 (2024), pp. 14-17.
- [3] N. Takeda, K. Shige, O. Terashima, T. Ikami, H. Nagai, Y. Konishi, T. Komatsuzaki: On the energy harvesting technique using a fluttering PVDF film with flow-induced vibration, *Advanced Experimental Mechanics*, Vol. 8, (2023), pp. 25-31.  
[https://doi.org/10.11395/aem.8.0\\_25](https://doi.org/10.11395/aem.8.0_25)
- [4] K. Shige and O. Terashima: On the Reduction of the Hvac Noise Using Active and Passive Noise Control Technologies, *ASME IMECE 2023* (2023), Paper No. V001T01A003.  
<https://doi.org/10.1115/IMECE2023-112362>

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [5] N. Takeda, K. Shige, O. Terashima, Y. Konishi, T. Ikami, H. Nagai, T. Komatsuzaki: On the Reduction of the Flow-induced Noise Using Bio-inspired Porous Material with Low Acoustic Transmission Loss, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-44, pp. 126-127.
- [6] 武田 尚恭, 重 昂輝, 林 和樹, 寺島 修, 永井 大樹, 小西 康郁, 伊神 翼, 小松崎 俊彦: 発電用薄膜の振動と後流の可視化による発電効率向上手法の検討, 日本実験力学会 2023 年度年次講演会, (2023), C305

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（受賞）大学院研究奨励賞、電動車内 HVAC システムから発生する広帯域騒音の受動・能動騒音制御手法の研究、重 昂輝、2024. 3. 8、自動車技術会。

ASME Noise Control and Acoustics Division Student Paper Competition 3<sup>rd</sup> Grade,  
On the Reduction of the HVAC Noise Using Active and Passive Noise Control Technologies, Koki SHIGE, 2023.10.30, ASME.

（マスコミ発表）富山新聞、空調設備の吹き出し、騒音軽減、効率化 富山県立大研究グループが新技術、2023.8.25.

Project code	J23I029
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	2nd 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

Many researchers are interested in concentrating photovoltaic thermal (CPVT) systems because of their relatively higher energy performance. High temperatures significantly reduce PV cell electrical efficiency. Cooling water circulation underneath photovoltaic cells lowers the temperature and utilizes thermal energy. Consequently, a CPVT system can increase total energy efficiency by producing thermal and electric power. The cooling water's thermophysical characteristics significantly influence the system's thermal performance. An increased thermal conductivity enhances the working fluid's heat transfer rate. By using the nanofluids, CPVTs' electrical and thermal efficiency has increased. However, not much research has been done on CPVTs using non-imaging concentrators.

It has been thought that cooling fluid circulation and copper pipe coils under photovoltaics might help lower the temperature of the cells. The total efficiency of PVT systems is comparatively higher than that of a PV system. Furthermore, spectral mismatch lowers PVs' electrical performance. A PV generally reacts to the visible and near-infrared portions of the sun spectrum. The remaining solar energy raises the temperature of the cell. Using an optical filter is one way to address spectral mismatch. While the filter may absorb thermal radiation, it may transfer beneficial radiation to PV. Extensive research has been conducted on spectral beam splitting in PVT systems. However, the CPVT system with a non-imaging focus offers a fresh perspective on the research. Some investigation areas remain intact and require more investigation. Some new non-imaging concentrators, such as compound hyperbolic, are in the literature. In this year of the project, a preliminary investigation was conducted to see the effect of the optical filter fluid and its cover on performance. The fluid was contacting and flowing through the PV surface. Moreover, various types of non-imaging concentrator photovoltaic thermal systems with nanofluids have been investigated regarding thermal and electrical performance. Compound parabolic concentrators (CPC), V-trough, and CHC concentrators have been considered for the evaluation.

By using a unique design for a non-imaging solar concentrator, this research aims to increase electrical efficiency and power output by providing more uniform sunlight on PV cells to prevent hot spot development and overheating. Additionally, research aims to investigate how the different working fluids' phase change heat transfer

mechanisms affect the CPVT system's electrical and thermal performance. This project's primary goal is to provide a unique, low-cost design for a solar concentrating photovoltaic thermal (CPVT) system with enhanced electrical and thermal performance.

## 2. Details of program implement

In order to lower the temperature of the photovoltaic system and make better use of the thermal energy, nanofluids were taken into consideration for the concentrating photovoltaic thermal system during the second year of the cooperation. As a preliminary investigation of CPVT, a water optical filter was also taken into consideration in a PVT system.

In the concentrating photovoltaic thermal systems (CPVT), compound parabolic concentrators (CPC), compound hyperbolic concentrators (CHC), and V-trough concentrators were taken into consideration. The CPC, V-trough, and CHC reflector geometries of the CPVT are seen in Figure 1. Glass, poly-crystalline silicon cells (pc-Si), ethylene-vinyl acetate (EVA), anti-reflective coating (ARC), another EVA layer, Tedlar polyvinyl fluoride (Tedlar) layer, copper plate, and copper tube are the components of a PV/T module.

There are 5000 vectors created from the incident solar energy. The energy rate of the PV, which was separated into 360 components, was ascertained by the ray tracing analysis. A definition for incoming solar radiation was  $1000 \text{ W/m}^2$ . Diffuse radiation was not taken into account. The concentration ratio 1.94 was believed to be the same for all concentrators. The ANSYS-Fluent was used to do the numerical analysis. By using the finite volume approach, the governing equations and the ANSYS-Fluent code are solved with the assignment of the starting and boundary conditions. The concentration ratio of 1.94 was assumed to be the same for all concentrators.

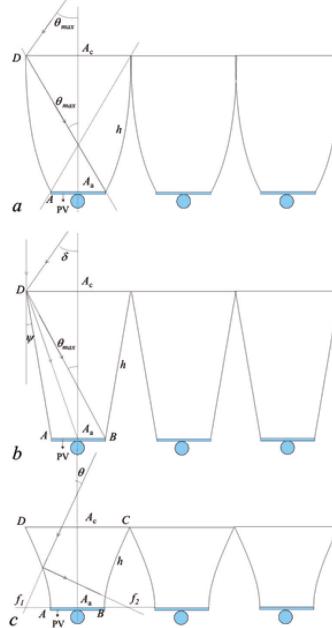


Fig. 1 Concentrating photovoltaic thermal systems with CPC (a), V-trough (b) and CHC (c) reflectors.

Figure 2 illustrates overall efficiencies for various fluids in the case of the CPC-PVT system.  $\text{SiC-H}_2\text{O}$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  nanofluids were considered for the evaluation. The nanofluids' 1, 2, and 3 % mass fraction were considered.  $\text{SiC-H}_2\text{O}$  nanofluid shows preferable performance compared to base fluid and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ .  $\text{SiC 3\%wt-H}_2\text{O}$  provided about 3.85% larger overall efficiency than  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{3\%wt-H}_2\text{O}$ .  $\text{SiC 1\%wt-H}_2\text{O}$  has a 2.78% larger overall efficiency compared to  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{3\%wt-H}_2\text{O}$ . Figure 3 depicts overall efficiencies for CPC, V-trough and CHC-PVTs. CPC and V-trough-PVTs show similar efficiencies until the incidence angle of  $20^\circ$ . After the incidence angle of  $20^\circ$ , the efficiency of the V-trough significantly reduced while the the reduction in the CPC case is much smoother. In the case of CHC-PVT, the overall efficiency gradually decreases while the incidence angle gets larger. On the other hand, CHC-PVT provides better power generation per reflector area.

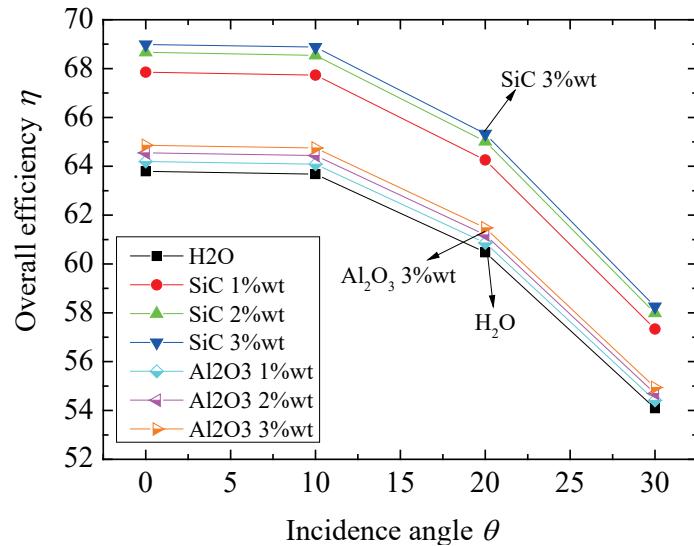


Fig. 2 Overall efficiencies for various fluids in the case of CPC-PVT system

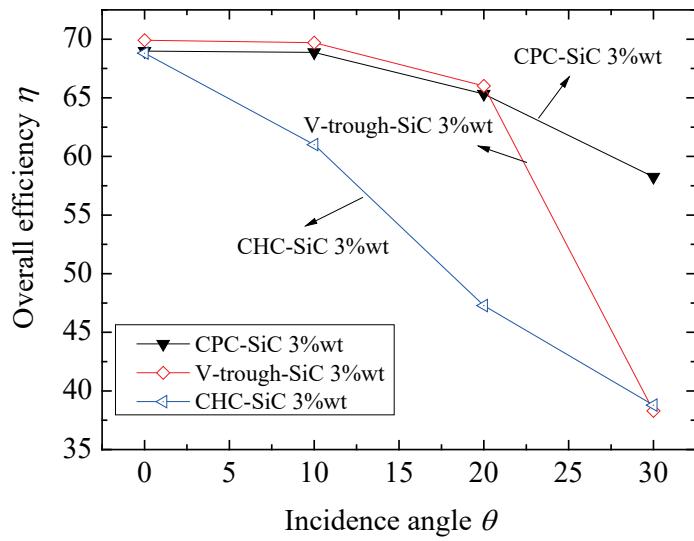


Fig. 3 Overall efficiencies for CPC, V-trough and CHC-PVTs

Further experimental research was carried out using an optical filter on a PVT system. On July 25, 2023, under a clear sky, an experiment was carried out on the rooftop of the Bartın University office building, which is situated on Turkey's western Black Sea (41.6°N, 32.34°E). Fig. 4 displays a picture of the experimental setup.

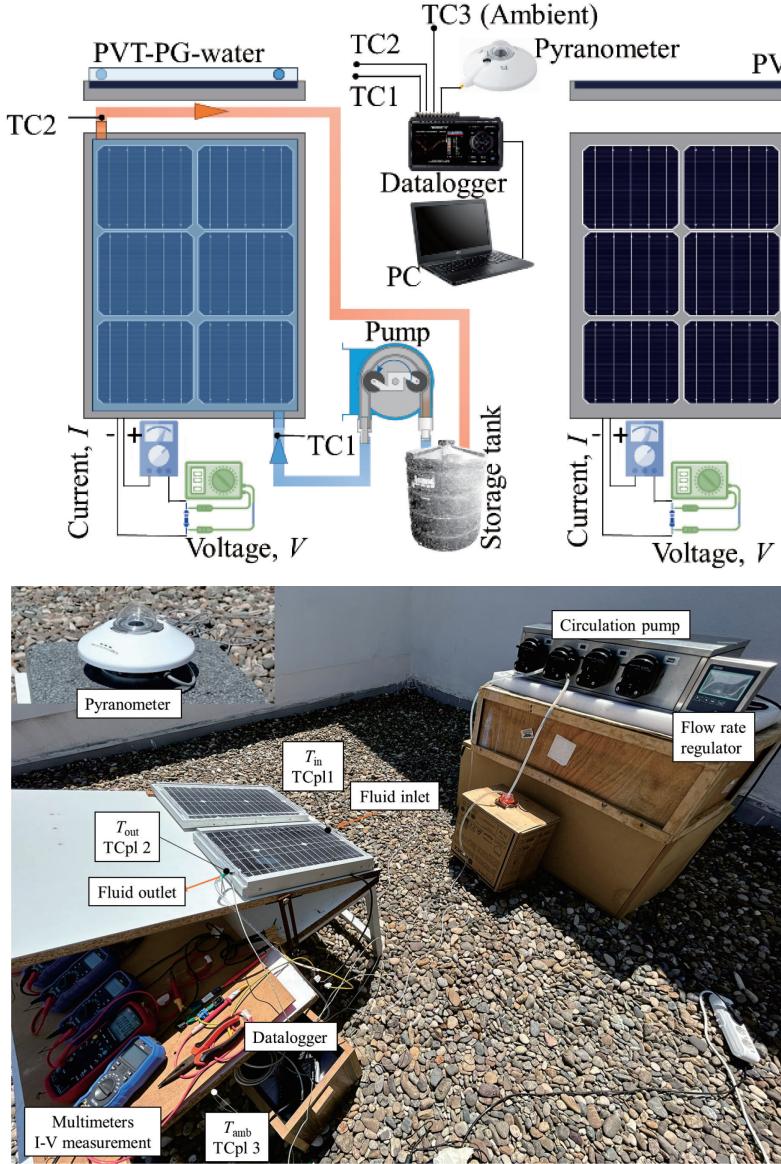


Fig. 4 Schematic view of the experimental setup of spectral splitting photovoltaic thermal system and photo of the experiment.

Figure 5 illustrates the systems' current, voltage, and power generation values. The most extensive current, voltage, and power generation values were observed in PVT-FG-water as the circulating fluid temperature was comparatively low (below 34 °C). While increasing the ambient temperature and water temperature in the storage tank with the water circuit, the PV temperature increases. Therefore, some reduction was observed in the PVT-FG-water system compared to PV. Moreover, glass and water filters reduces the transmitting radiation. The water circulation provides an average advancement of 2.4%, even with lower transmission. PV has an average electric efficiency of 13.65%, while PVT-glazing water provides 13.98% average electric

efficiency. PVT has higher I-V values. PVT achieves 2.4% larger power generation (electricity). PV has 9.64 W of electricity, while the PVT has 9.87 W of electricity and 56.75 W of thermal power. Average overall efficiency of PVT-glazing water reached 88.45%

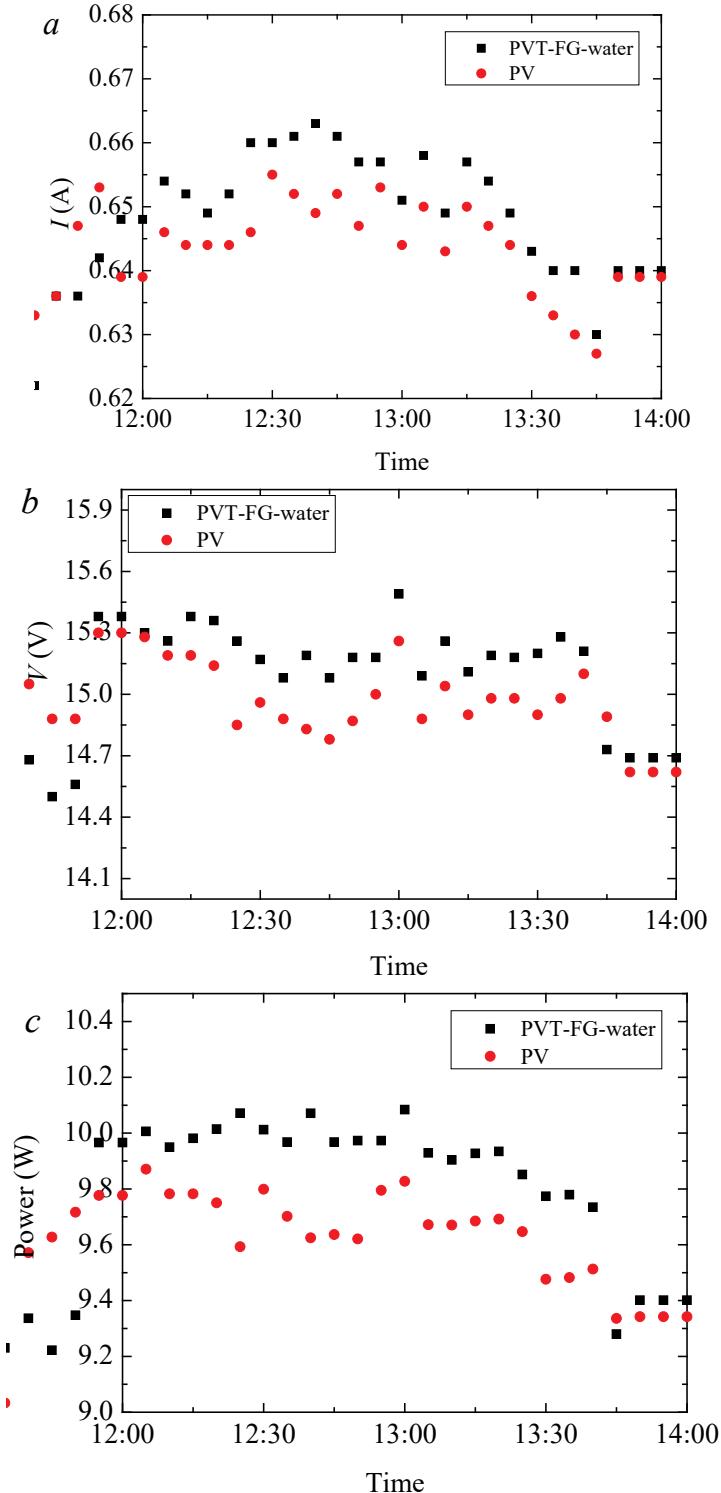


Fig. 5 Current (a), voltage (b) and power generation (c) of PVT system with optical filter, PV system with plexiglass and standalone PV system.

### 3. Achievements

The collaborators discussed and made a detailed research plan. Abid Ustaoglu and Bilal Kursuncu stayed at the Institute of Fluid Science, Tohoku University, for two weeks (01-15.11.2023) to conduct research with Junnosuke Okajima within the scope of the Collaborative Research Project. Moreover, future studies and new project ideas were discussed. Some of the research has been finished, and the results have been published in the 20th International Conference on Flow Dynamics ICFD2023 and the 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information 2023 (AFI-2023). We have prepared 5 Journal papers. One paper was accepted in the Journal of Applied Thermal Engineering. The following paper is under review: "Ustaoglu, A., Kursuncu, B., Akgul, V., Okajima, J., Optimization of a concentrating photovoltaic thermal system (CPVT) by considering design and operating parameters using grey relation analysis and response surface methodology, Under review. Renewable Energy". We are about to submit the following paper "Ustaoglu, A., Buyukpatpat, H., Kaya, H., Okajima, J., Kursuncu, B., Experimental investigation of Thermal and Electrical performance of concentrating photovoltaic/ thermal system (CPVT) using non-imaging reflector." The other two papers are being prepared for the nanofluids used in the CPVT system and Spectral Beam Splitting Photovoltaic Thermal System.

Achievements for the expected results are as follows. SiC-H<sub>2</sub>O nanofluid shows preferable performance compared to base fluid and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O. SiC 3%wt-H<sub>2</sub>O provided about 3.85% larger overall efficiency than Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>3%wt-H<sub>2</sub>O. SiC 1%wt-H<sub>2</sub>O has a 2.78% larger overall efficiency compared to Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>3%wt-H<sub>2</sub>O. CPC and V-trough-PVTs show similar efficiencies until the incidence angle of 20°. CHC-PVT provides better power generation per reflector area. SiC -H<sub>2</sub>O is a promising nanofluid due to its high performance, even for a small fraction of nanoparticles. V-trough-CPC with SiC-H<sub>2</sub>O has the largest overall efficiency until 20°. CHC provides a preferable performance with economic design.

A spectral beam-splitting photovoltaic thermal system was investigated as a preliminary study of a CPVT with an optical filter. PV has 13.65% electric eff. and PVT-glazing water provides 13.98%. PVT-glazing water achieves 2.4% larger electric power generation. PV has 9.64 W electric, PVT has 9.87 W electric and 56.75 W thermal power. Average overall efficiency of PVT-glazing water reached 88.45%. The advantage of optical filter may appear for higher solar radiation. It will be considered for CPVT systems.

### 4. Summaries and future plans

We have carried out numerical and optimization analyses of three different types of concentrating photovoltaic thermal systems for various nanofluids and used water as an optical filter for a preliminary study of spectral beam splitting filter for CPVT system to cool down the PV cell temperature and utilize from the thermal energy.

In 3rd year of the study, the numerical and experimental investigations of concentrating photovoltaic thermal systems using nanofluids in the CPC, CHC, and V-trough concentrators are planned. Multicriteria optimization analyses will be carried out, including ANOVA, Taguchi, and grey relation analysis. It is aimed at publishing five journal papers in high-quarter journals (Q1, Q2) with the results of two years of the project. The systems will be experimentally investigated for various operating conditions. The nanofluids will be used to improve the heat transfer rate for higher thermal energy utilization and electrical performance improvement. Numerical and experimental performance analyses will be carried out to investigate the effect of the nanofluids.

## 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
[1] A. Ustaoglu, V. Akgul, J. Okajima. Performance investigation of truncated low concentrating photovoltaic-thermal systems with V-trough, compound hyperbolic and compound parabolic concentrators, *Applied Thermal Engineering*, 232 (2023), 121028, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121028.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)  
[2] A. Ustaoglu, V. Akgul, J. Okajima, B. Kursuncu: Effect of nanofluid on the thermal and electrical performances of a non-imaging concentrating photovoltaic thermal (CPVT) system. *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-29, pp. 91-92.  
[3] A. Ustaoglu, S.B. Sungur, H. Buyukpatpat, J. Okajima: Performance Investigation of Spectral Beam Splitting Photovoltaic Thermal System, *Proceedings of Twentieth International Conference on Flow Dynamics ICFD2023*, Sendai, (2023), pp. 90-91.
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent) Not applicable.  
(Award) Not applicable.  
(Press release) Not applicable.

Project code	J23I030
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical cares
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Hemodynamic Management of Patients with Coronary Artery Stenosis Before and After Stent Implantation

Xiaorui Song\*†, Xuezhen Wang\*, Na Li\*, Shigang Wang\*, Chunyu Zhu\*\*  
Hitomi Anzai\*\*\*, \*\*\*\* Makoto Ohta\*\*\*, \*\*\*\*††

\*School of Radiology, Shandong First Medical University & Shandong Academy of Medical Sciences, China

\*\*Department of Medical Imaging, The Second Affiliated Hospital of Shandong First Medical University, China

\*\*\*Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University, Japan

\*\*\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

- (1). Promote the Sino-Japan bilateral communication on the study of biomechanics on cardiovascular diseases.
- (2). Jointly investigate the hemodynamic changes after coronary artery surgery, and study the simulation method of dynamic mechanical modeling and simulation of stenosis vessels and stents.
- (3). Then, obtain the risk assessment of myocardial ischemia after coronary artery surgery.

### 2. Details of program implement

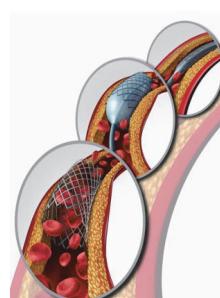
IFS Collaborative Research Forum (AFI-2023), November 6 - 7, 2023, Sendai, Japan,  
CRF-36.

Oral report presentation: Prof. Ohta

CRF-36

IFS Collaborative Research Forum (AFI-2023)

### Background



APS, WSS, ESS,  
OSI, RRT, FFR

- Ischemic heart disease is the first leading causes of death globally, accounting for approximately 16% (or 8.9 million deaths) of total deaths.
- Coronary stent implantation is only mechanically propped up the vessel.
- Combining the hydrodynamic parameters related to computational fluid dynamics (CFD).

Poster:

CRF-36	IFS Collaborative Research Forum (AFI-2023)
J23I030	

**Hemodynamic Management of Patients with Coronary Artery Stenosis Before and After Stent Implantation**

Xiaorui Song, Xuezhen Wang, Na Li, Shigang Wang (Shandong First Medical University, China),  
Chunyu Zhu (The Second Affiliated Hospital of Shandong First Medical University, China),  
Hitomi Anzai, Makoto Ohta (Tohoku University, Japan)

### 3. Achievements

- (1). Obtain the simulation method of dynamic hemodynamics of stenosis vessels and stents before and after coronary surgery.
- (2). Obtain follow-up data after coronary artery surgery and discuss the risk assessment of myocardial ischemia after surgery.
- (3). Discuss the practical value of CFD simulation in postoperative evaluation.
- (4). 1-2 research papers, including journal papers and conference presentations.

### 4. Summaries and future plans

Coronary fluid dynamics parameters have been supported in analyzing mechanical stress in coronary artery plaques. The correlation and possibility of applying computational fluid dynamics and structural dynamics to analyze the relationship between biomechanics and function of coronary artery stenosis have been narrowed down.

The combination of invasive and non-invasive imaging (which can identify plaque anatomical features) and computational fluid dynamics (hemodynamic / biomechanical features) can indicate the tendency of plaques to trigger cardiovascular events.

This will help improve the risk management of coronary artery stenosis in clinical practice.

### 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] Xiaorui Song, Xuezhen Wang, Na Li, Shigang Wang, Chunyu Zhu, Hitomi Anzai, and Makoto Ohta: Hemodynamic Management of Patients with Coronary Artery Stenosis Before and After Stent Implantation, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-36.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

課題番号	J23I033
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目（発展）

高低温・高湿環境下における人体熱反応の把握による生体温熱モデルの高度化  
 Improvement of the Thermoregulation Model by Understanding the Thermal Response of the Human Body in High/Low Temperature and High Humidity Environments

古川 琢磨\*†, 西館 来夢\*, 岡島 淳之介\*\*††  
 \*八戸工業高等専門学校, \*\*東北大学流体科学研究所  
 †申請者, ††所内対応教員

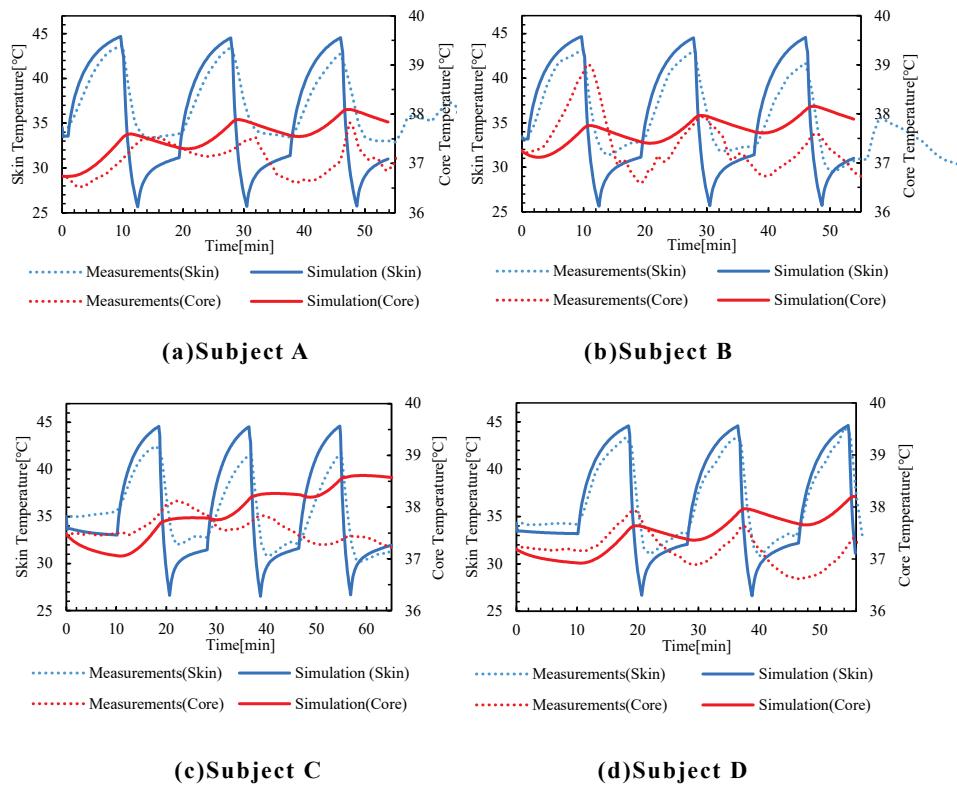
## 1. 研究目的

近年サウナ入浴が健康促進の観点から脚光を浴びている。一般的なサウナ入浴は高温のサウナ室と低温の水風呂の温冷交代浴から成り立つ。人体周辺の急激な温度変化はヒートショック事故の危険性に直結するため、事故防止のためには安全な入浴時間、入浴条件、環境の提案が必須である。これら情報の提言には、サウナ繰り返し入浴中の人体熱反応を予測するモデルの開発が不可欠である。しかしながら、これまで提案してきた生体温熱モデルは常温環境の実験データをベースにしたモデルであり、極高温、低温環境の熱反応を予測するモデルは開発されていない。そこで本研究では、極限環境にも適応可能な生体温熱モデルの開発を目的とする。本目的を達成するために、サウナ繰り返し入浴中の実地試験でのデータ取得を行い、同時に生体温熱モデルとのデータ同化解析からサウナのような極限環境にも適応可能な生体温熱モデルのパラメータ抽出を行う。抽出したパラメータから、生体温熱モデルの適用可能な温度範囲を広げ、より広範に使用できるモデルの開発を目指す。

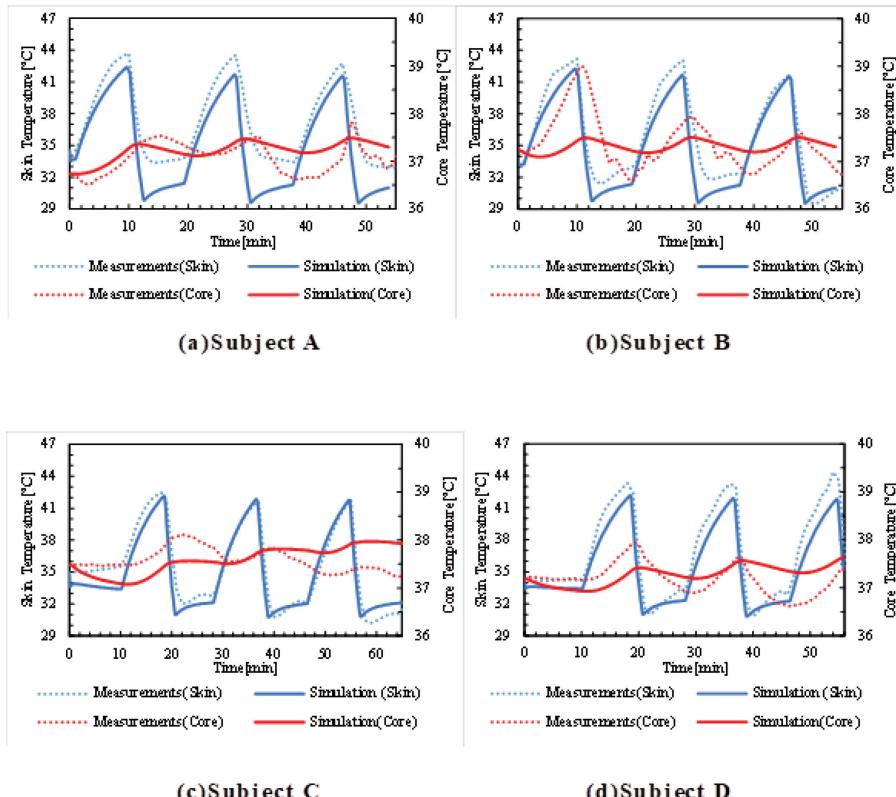
## 2. 研究成果の内容

本研究では、サウナ温冷交替入浴中の人体深部、皮膚温度を計測し、その人体熱反応が Fiala モデルに予測可能かを議論した。比較結果から、Fiala モデルの予測精度とその予測精度を向上させる非フーリエ効果の適用可能性について議論した。サウナ温冷交替入浴の実施試験では 4 名の被験者の人体熱反応を測定した。

図 1 に FIALA モデルによる体温予測結果を示す。皮膚温度の上昇傾向は実測データと同等な変化をしている。解析による皮膚温度変化も実測データと同様にサウナ浴、水風呂の切り替え時にピークが現れていることが分かる。水風呂時の皮膚温度も実測値と近い値となっており、皮膚が空気のみではなく、水に接している場合でも良好な結果が得られることが確認できた。しかし、深部温度は実測データよりも大きい値となり、誤差が見られる。また被験者 B, C で見られたような長期的な周期的深部温度の低下は補足することができなかった。非フーリエ効果を適用した FIALA モデルの体温予測結果を図 2 に示す。皮膚温度変化は実測データと同等で最高温度をとるタイミングもよく一致している。深部温度変化も通常の FIALA モデルよりも実測データに近くなかった。被験者 B・C で見られる長周期的な深部温度の低下を捉えられている。非フーリエ効果による熱緩和項が深部温度の上昇を抑え、このような結果が得られたと考えられる。



**Fig. 1 Comparison of with Fiala model**



**Fig. 2 Comparison of with non-Fourier Fiala model**

### 3. 研究目標の達成状況

本研究期間では、高温、低温の熱環境を移動するサウナ温冷交替入浴にも適応可能な生体温熱モデルを開発することができた。開発したモデルは生体温熱モデルのデータ同化の先駆けとなるモデルであり、本研究目標は概ね達成できたといえる。

### 4. まとめと今後の課題

今後は多数の被験者でのデータ同化検証を行い、開発したモデルの妥当性について検討する予定である。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[1] H. Ishibashi, R. Tomabechi, K. Nishidate, N. Osaka, T. Shimoura, S. Yamada, J. Okajima, T. Kogawa, “Evaluation of radiative absorption effect to estimate mean radiant temperature in environments with high water vapor concentration such as in a sauna”, *Building and Environment*, vol. 243, pp. 110684, 2023.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] T. Kogawa, K. Nishidate, Y. Shimazaki, J. Okajima, “Feasibility of Multi node Thermoregulation Model for Repeated Bathing of Sauna”, *Proceeding of the 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-27, pp. 86-88.

[3] 西館来夢, 石橋輝, 下村友貴, 島崎康弘, 岡島淳之介, 古川琢磨, “サウナ繰り返し入浴のような急峻な温度変化に適用可能な生体温熱モデルの検討”, 第60日本伝熱シンポジウム, 福岡, 5月, 2023.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

##### （受賞）

1. 第3回日本サウナ学会学術大賞, “サウナ温冷交替入浴中の人體深部・皮膚温度が予測可能な生体温熱モデルの開発”, 西館来夢, 古川琢磨, 2023年11月1日, 日本サウナ学会  
(マスコミ発表)

1. マイナビニュース, サウナーのヒートショックを防げ! NTT 東日本と八戸高専がメカニズム解明に向けて共同研究, 2023年12月25日

2. 読売新聞, サウナ効用化学で探る, 2023年12月18日

3. 東奥日報, 西館さん, 古川准教授栄誉, 2023年12月17日

4. NHK おはよう日本, サウナを安全に楽しむために「ヒートショック」を防ぐ研究, 2023年12月11日

5. デイリー東北, ヒートショック予防 八高専・西館さん, サウナ学会学術大賞, 2023年12月8日

6. デイリー東北, 「ととのう」への研究心, 発展, 2023年6月19日

Project code	J23I034
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Density and Surface Tension Effects on Vortex Dynamics

Stefan Llewellyn Smith\*†, Yuji Hattori\*\*††

\*Department of Mechanical and Aerospace Engineering and Scripps Institution of  
Oceanography, University of California, San Diego

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The dynamics of singular flow structures provides insight into fundamental processes in engineering applications such as aerodynamics and in geophysics, planetary science and oceanography. Such reduced models can enable predictions in extreme parameter regimes. Point sources/sinks, vortex sheets, and vortex patches are singular flow configurations at points, along curves and within domains, respectively. We will investigate their dynamics and equilibrium configurations in the presence of density differences and surface tension.

### 2. Details of program implement

The applicant visited Sendai in from 27 November–1 December 2023. He also attended the ICFD2023 meeting from 6–8 November 2023, virtually. The PI and Prof. Hattori were co-convenors of session OS16: Vortex Motion. Work by the PI and his colleague Vikas Krishnamurthy was presented by Prof. Krishnamurthy in OS16-11 *Steady Translation of a Weakly Compressible Hollow Vortex Pair*.

### 3. Achievements

The effect of density differences on flow past sinks and sources. The Rankine ovoid is a well-known solution, but its extension to non-constant density has not been obtained. We have obtained numerical solutions for the two-fluid case, in which there is a recirculating region in which fluid is pumped in and out via a source and sink. A Newton–Kantorovich (NK) method, coupled to the alternating quadrature rule, leads to spectrally accurate solutions.

Presently surface tension is being added to the formulation, which requires taking curvature changes into account in the NK iteration. The next step is to include buoyancy. This is simple to include in the dynamical boundary condition (Bernoulli equation), but the nature of basic states needs to be considered carefully. There is the possibility that no basic states exist, or more likely that a specific class of basic states in equilibrium needs to be posited.

In parallel, during the visit to Sendai, the application and Prof. Hattori examined another paper purporting to look at the current vortex sheets. This is another example of a superficially promising approach that is not dynamically consistent. It appears that a detailed pedagogical exposition is needed to make this point once and for all, and a manuscript is being prepared.

Both those projects have led to reductions of the full fluid equations of motion to integrodifferential systems in the first case and to an asymptotic expansion with leading order describing motion in sheets and in the bulk. We are continuing to investigate the behavior of solutions.

#### 4. Summaries and future plans

The applicant intends to visit Sendai in Autumn 2024 for a week to continue the project. It is not clear whether the visit will correspond to ICFD2024 because of administrative responsibilities at UCSD. If not, he will attend ICFD2024 virtually. 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	J23I035
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目 (発展)

**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\*\*††

\*東京工業大学工学院, \*\*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、超音波キャビテーションによる微小気泡雲・高速液流の有機溶媒・硫酸混合溶液中への導入により、高導電率溶液中のプラズマ安定生成と炭素ナノ材料のスルホン化を同時に実現する。

## 2. 研究成果の内容

図1に実験装置構成を示す。ホモジナイザ（超音波分散機）（SMT Corp., UH-50）のプローブを接地側電極とすることで、超音波キャビテーションにより、電極間に微小気泡と液流を導入することができる。高電圧側電極にはタンクステン電極（直径 2.4 mm）を用い、接地側電極との距離は可変とした。炭素材料の原料となる溶液にはキシレン、もしくはキシレン・硫酸混合溶液を用いた。液中プラズマ発生用電源（栗田製作所, MPP04-A4-200）によって、両極性パルス電圧をリアクタの電極間に印加して液中プラズマを発生させた。電極間に発生する気泡やプラズマの様子を、高速度カメラ（ナックイメージテクノロジー, MEMRECAM ACS-1 M60）を用いて観測した。

先行研究においてホモジナイザの出力を変化させた際、発光スペクトルや発光強度が大きく異なる2種類のプラズマが観測され（図2）、また、プラズマにより合成される炭素材料の比表面積や形状が変化することが確認されている（昨年度までの共同研究の成果）[1]。プラズマ状態が材料特性に与える影響を定量評価するため、目的とする発光状態のプラズマを長時間安定に維持できる条件の探索を行った。その結果、オレンジ色の強い発光を伴うプラズマは、ホモジナイザ出力が低く、印加電圧が高く、電極間距離が小さいときに発生しやすく、

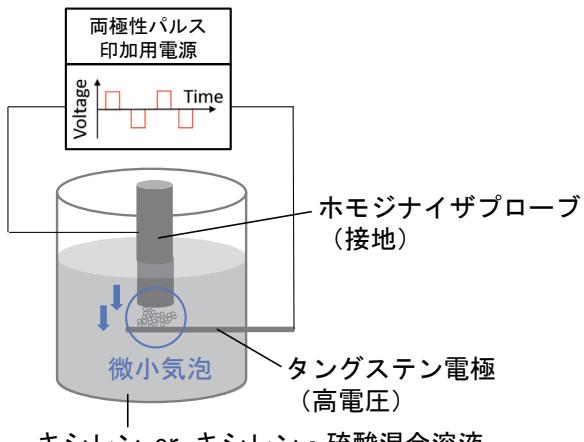


図1：実験装置構成

一方で、青白い微弱な発光を伴うプラズマは、ホモジナイザ出力が高く、印加電圧が低く、電極間距離が大きいときに発生しやすくなることが分かった。キシレン中においては、電源の設定値を振幅 5 kV、周波数 80 kHz、パルス幅 500 ns とした場合、電極間距離 1 mm では図 2(a)のようなオレンジ色のプラズマが、電極間距離 3 mm では図 2(b)のような青白いプラズマが定常的に発生することが確認できたため、それぞれの条件で炭素材料を合成して、合成速度や材料特性の評価を行った。

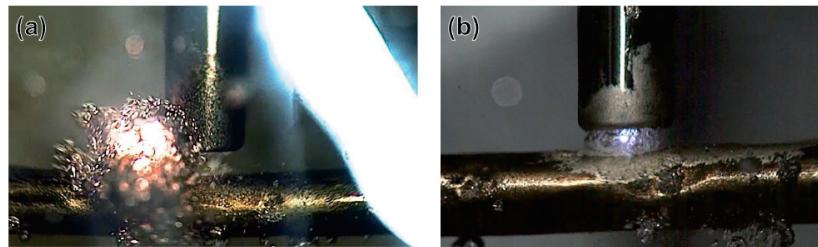


図 2 : プラズマの様子, (a) ホモジナイザ低出力時, (b) ホモジナイザ高出力時

オレンジ色のプラズマでは 30 分間のプラズマ処理を、青白いプラズマでは 10 時間のプラズマ処理を行った。合成された炭素材料は、アスピレータと  $0.45 \mu\text{m}$  孔のメンブレンフィルタを用いて濾過を行い、恒温器を用いて  $80^\circ\text{C}$  で 5 時間以上乾燥させた。乾燥した炭素材料はメノウ乳鉢ですりつぶして粉末にし、電子天秤で質量を計測した。オレンジ色および青白いプラズマでの炭素材料合成速度は、それぞれ  $564 \text{ mg/h}$  と  $0.56 \text{ mg/h}$  となり、1000 倍近い差となった。青白いプラズマ処理時はホモジナイザ出力が大きく、電極間に高速の液流が発生しているため、プラズマの連続的な生成を補助するキシレン気泡や荷電粒子が電極外に輸送されやすく放電確率が低いことと、また、気泡の電極間滞在時間が短く、炭素材料合成の原料となるラジカル類の大部分が合成反応が起こる前に輸送されてしまうことが要因であると考えられる。

オレンジ色のプラズマで合成された炭素材料の FE-TEM 観察画像を図 3 に示す。図 3(a)に示すように、得られた炭素材料の大部分は、直径  $20\text{--}40 \text{ nm}$  程度の球状の一次粒子が集合したものであった。図 3(b)は球状の一次粒子を拡大して観察したものであり、オニオン構造のような層構造を持つことが確認された。炭素材料の一次粒子の形成について、(a) 五角形の炭素核の形成、(b) 正の曲率を持って成長、(c) 螺旋状に成長して一次粒子の核を形成、(d) グラファイトフレークが層を形成しながら球状に成長、というプロセスを Kang らが提唱している[2]。図 3 に示す一次粒子も、同様のプロセスをたどって形成されたと考えられる。

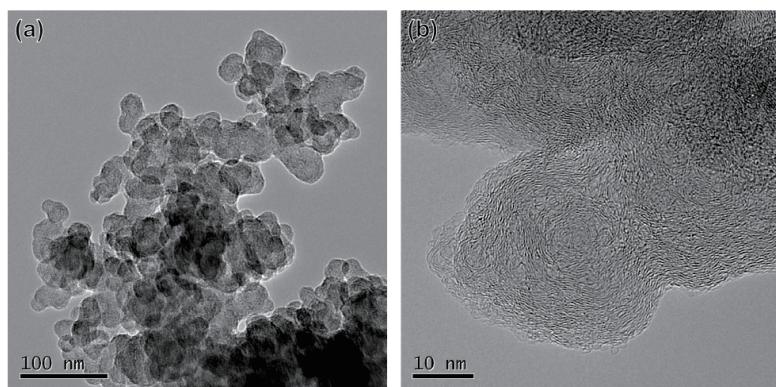


図 3 : オレンジ色のプラズマで合成された炭素材料の FE-TEM 観察画像

青白いプラズマで合成された炭素材料の FE-TEM 観察画像を図 4 に示す。図 4(a)に示すように、得られた炭素材料の大部分は、直径 20~40 nm 程度の一次粒子であったが、図 3(a)のように球状ではなく、角張った形状であった。図 4(b)は一次粒子を拡大して観察したものであり、図 3(b)とは違って無秩序な構造であることが確認された。上述の一次粒子合成プロセスにおいて、炭素材料を合成するラジカルが低密度であるためにグラファイトフレークが小さく、このような一次粒子が合成されたのではないかと考えている。

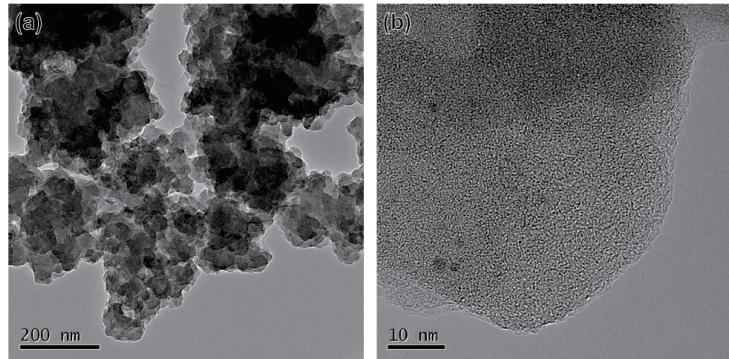


図 4：青白いプラズマで合成された炭素材料の FE-TEM 観察画像

合成された炭素材料の比表面積を、窒素ガスを用いたガス吸着法により測定した。オレンジ色と青白いプラズマで合成された炭素材料の比表面積はそれぞれ  $237 \text{ m}^2/\text{g}$  と  $314 \text{ m}^2/\text{g}$  であった。また、それぞれの炭素材料の酸素還元反応触媒としての性能を評価したところ、オレンジ色のプラズマで合成された炭素材料の方が高い触媒性能を示した。ホモジナイザ出力が大きいときの方が大きな比表面積が得られているが、前年度までに行なったホモジナイザ出力が中程度の合成条件では、球状の一次粒子からなる炭素材料が  $58.5 \text{ mg}/\text{h}$  の速度で得られ、その比表面積は  $403 \text{ m}^2/\text{g}$  であり、触媒性能も今回得られた炭素材料よりも高かった[1]。青白いプラズマで合成された炭素材料の触媒性能が低い主な理由は、結晶性が低く、低導電率であるためと考えられる。よって、青白いプラズマが定常に生成される条件は、ホモジナイザ出力が過剰で、炭素材料の合成速度や結晶性の観点で望ましくないと言える。炭素材料の合成速度や比表面積、構造には、キャビテーション発生に伴って電極間に発生する液流の流速が大きな影響を及ぼしているため、今後、ホモジナイザ出力などにより流速をさらに細かく制御して、その影響を調査する必要がある。

キシレン 90 mL に硫酸 10 mL を混合した溶液中で、ホモジナイザによりキャビテーションを発生させ、電極間に両極性パルス電圧を印加したところ、電極間でプラズマの生成に成功し、炭素材料が合成された。得られた材料を元素分析したところ、今までに試行したプラズマ生成条件では、炭素材料表面に残留したと思われる硫黄成分しか観測できていない。また、比表面積は  $132 \text{ m}^2/\text{g}$  程度と、キシレン中よりも小さくなつた。また、酸素還元反応触媒としての性能を評価したところ、昨年度までの成果や、今年度にキシレン中で得られた炭素材料の触媒性能よりも低かった。硫酸の混合比やプラズマ生成条件を変化させて、炭素材料へのスルホン基修飾が可能か、また、比表面積の増大が可能かを今後検討していく。

- [1] 今泉颯太, 竹内希, 高奈秀匡, O.L. Li: ホモジナイザで気泡導入した液中プラズマによる炭素材料合成, 静電気学会誌, 46・4 (2022), pp. 156-161, doi: 10.34342/iesj.2022.46.4.156.
- [2] Z.C. Kang, Z.L. Wang: Mixed-valent Oxide-catalytic Carbonization for Synthesis of

Monodispersed Nano Sized Carbon Spheres”, Philos. Mag. B, Vol. 73, No. 6, (1996)  
pp. 905-929.

### 3. 研究目標の達成状況

先行研究で得られていた炭素材料の比表面積が約  $400 \text{ m}^2/\text{g}$  であったのに対し, 反応場の最適化による,  $1,000 \text{ m}^2/\text{g}$  以上の比表面積達成を目標とした. ホモジナイザ出力が高いときに観測される青白いプラズマのみを選択的に生成することで, 比表面積の増大が図れると期待したが, 実際には先行研究で得られた比表面積よりも小さくなつた. 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伴つて電極間に発生する液流の流速が大きな影響を及ぼしていると考えられるため, ホモジナイザ出力などによって流速をさらに細かく制御して, 最適条件を見いだす必要がある.

また, キシレン・硫酸混合溶液中でプラズマを生成することで, スルホン基が修飾された炭素材料が合成できると期待した. プラズマの生成には成功したが, 元素分析ではスルホン基の修飾が確認できておらず, 硫酸混合比を変化させての検討が必要である.

### 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触媒合成に関する研究を行つた. 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. 先行研究で観測されていた 2 種のプラズマ状態を選択的に生成・維持できる条件を見いだしたが, 比表面積を大きく向上できると考えていた青白いプラズマ状態は, 合成速度が極めて遅く, また, 比表面積も先行研究より小さくなつた. 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流速を細かく制御して, 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た. キャビテーションを併用することで, 高導電率の混合溶液中でもプラズマを安定生成できたが, 合成された炭素材料は比表面積が小さく, また, スルホン基の修飾が確認できなかつた. 今後, 硫酸の混合比やプラズマ生成条件を変化させて, スルホン化炭素の合成と, 比表面積の増大を目指す. これらの達成により, 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て, 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し, また同時に, 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を理解していく.

### 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] 原川僚太郎, 竹内希, 高奈秀匡, リーオイルン: 酸素還元反応に向けた炭素触媒合成のための超音波キャビテーションプラズマの特性評価, 日本機械学会 2023 年度年次大会, (2023), S052-04.
- [2] R. Harakawa, N. Takeuchi, H. Takana, O.L. Li: Characterization of Ultrasonic Cavitation Plasma to Synthesize Carbon Catalysts for Oxygen Reduction Reaction, *Proceedings of The 76th Annual Gaseous Electronics Conference*, Ann Arbor, Michigan, USA (2023), HT3.00002.
- [3] R. Harakawa, N. Takeuchi, H. Takana, O.L. Li: Application of Cavitation to Plasma

Process for Synthesis of Carbon Catalysts for Oxygen Reduction Reaction, *Proceedings of the Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS5-10, pp. 484-485.

[4] R. Harakawa, N. Takeuchi, H. Takana, O.L. Li: Implementation of Software Library for Flow Analysis, *Proceedings of the 3rd Material Research Meeting and the 24th International Union of Materials Research Societies International Conference in Asia*, Kyoto, (2023), G1-O502-03.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）  
なし

課題番号	J23I036
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1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\*, 飯島 啓伍\*,\*\*\*, 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

航空分野の脱炭素化は重要な社会課題の一つである。また高速輸送に対する要求の高まりから、超音速旅客機 (SST) に対する関心が高まっている。これらの要求に対して、本研究では燃焼時に二酸化炭素を排出しないアンモニアを燃料とした超音速旅客機を提案する。アンモニアは燃焼条件が適切でない場合、窒素酸化物や未燃アンモニアが排出される可能性があるなど、従来の炭化水素燃料とは燃焼特性が大きく異なる。

本年度の共同研究では、特に燃焼器内の滞在時間が燃焼器からの排出ガス特性に及ぼす影響について数値的に検討を行う。

## 2. 研究成果の内容

本研究では CHEMKIN-PRO[1]を用いて、PSR (Perfectly Stirred Reactor) と PFR (Plug Flow Reactor) を組み合わせ、図1に示す反応器ネットワークモデルを用いて検討を行った。反応モデルには Nakamura らによって開発された詳細反応機構を用いた[2, 3]。Zone 1 には CHEMKIN-PRO の Laminar Burning Speed Calculation Model によって求めた、予混合気の温度と圧力がそれぞれ 840 K, 11 bar のアンモニア／空気予混合気の燃焼ガスが流入する。Zone 2 に二次空気を導入することで、低 NOx・低 NH<sub>3</sub>排出燃焼法である Rich-Lean 二段燃焼コンセプト[4]を考慮している。また Zone 1 および Zone 2 における滞在時間  $t_1$  および  $t_2$  はそれぞれ  $t_1 = 2.001 \text{ ms}$ ,  $t_2 = 0.497 \text{ ms}$  は代表的な SST 巡行条件等によって定めたものであり、詳細は既報で述べている[5]。

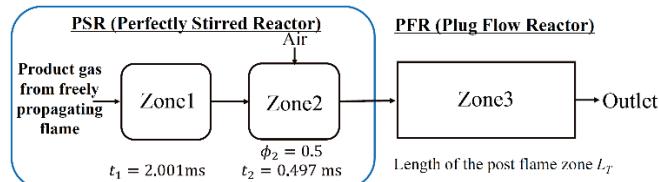


図1 反応器ネットワークモデルの模式図

本研究では、PFR の長さ  $L_T$  を変化させることによって、Zone 3 における滞在時間  $t_3$  を変化させ、それが排出ガス特性に及ぼす影響を検討した。本研究では  $L_T = 0 \text{ cm}$  から  $24 \text{ cm}$  ま

で変化させた。図2はPFRの長さ  $L_T$ に対する滞在時間  $t_3$ の変化を表したものである。

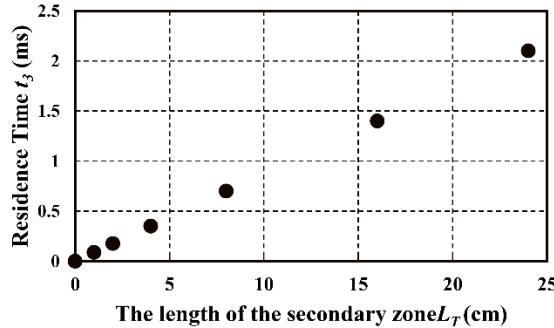


図2  $L_T$ に対するZone 3の滞在時間  $t_3$ の変化

図3は  $L_T$ の長さを変化させたときの NO, NO<sub>2</sub> および N<sub>2</sub>O の変化を表した図である。図のように NO および NO<sub>2</sub> は滞在時間の影響が小さい事が明らかとなった。

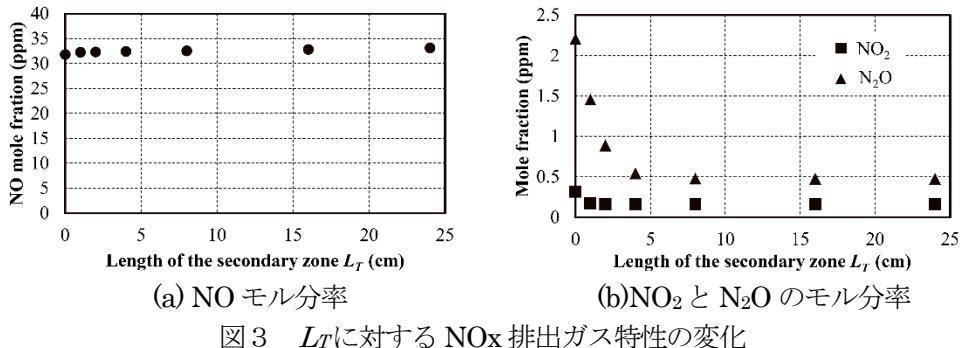


図3  $L_T$ に対するNOx排出ガス特性の変化

### 3. 研究目標の達成状況

アンモニアを燃料とする超音速旅客機におけるNOx生成特性について新たな知見を得た。

### 4. まとめと今後の課題

本年度は、アンモニアを燃料とする超音速旅客機のNOx生成特性をネットワークモデルによって概算した。評価に際して、Zone 1に流入するガス組成決定や滞在時間がアンモニア燃料に対して最適ではない可能性が考えられる。来年度以降はこれらの点に着目して検討を継続する。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

該当なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] H. Kosada, A. Hayakawa, H. Nakamura, D. Shimokuri, Y. Fujimoto, S. Obayashi: Effects of Residence Time on NOx Emission of an Ammonia Fueled Supersonic Transportation, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-6, pp. 32-34.

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] CHEMKIN-PRO, Ansys Inc.
- [2] H. Nakamura, M. Shindo, Effects of radiation heat loss on laminar premixed ammonia/air flames, Proceedings of the Combustion Institute, 37 (2019) 1741-1748.
- [3] <https://www.ifs.tohoku.ac.jp/enerdyn/jp/result/mechanism.html>
- [4] K.D.K.A. Somanathne, S. Hatakeyama, A. Hayakawa, H. Kobayashi, Numerical study of a low emission gas turbine like combustor for turbulent ammonia/air premixed swirl flames with a secondary air injection at high pressure, International Journal of Hydrogen Energy, 42 (2017) 27388-27399.
- [5] 小佐田一, 東北大学修士論文

課題番号	J23I038
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2年目

## 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. 研究目的

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、後流にあるロータの疲労を予測する上で、風車ロータ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. 研究成果の内容

Helical vortices form around rotating blades of helicopter rotors, ship propellers and many other engineering applications. The dynamical properties of the helical vortices should be understood in detail since they affect the flow and the performance of the devices. The helical vortices are subjected not only to long-wave instability but also to short-wave instabilities (the elliptic instability and the curvature instability).

We study nonlinear dynamics of helical vortices destabilized by the short-wave instabilities. How the core of a helical vortex becomes turbulent is of particular interest. There are three possible scenarios: (i) the disturbance energy saturates when the vortex core grows due to viscous diffusion so that the instability condition is lost (viscous saturation); (ii) the disturbance energy saturates due to weakly nonlinear effects (weakly nonlinear saturation); and (iii) the disturbance keeps growing until the vortex core becomes turbulent (turbulent transition). Direct numerical simulation of a helical vortex

disturbed by an elliptic instability has been performed. Figure 1a shows the viscous saturation for  $Re_\Gamma = 5000$  and the turbulent transition for  $Re_\Gamma = 15700$ ; small-scale vortical structures develop after the transition (figure 1b). Which of the scenarios occurs depends on the parameters characterizing the base helical vortex and the instability mode. In order to predict which scenario occurs, we evaluate the saturation amplitudes for the viscous saturation and the weakly nonlinear saturation, while a critical amplitude for transition is estimated for the turbulent transition. The scenario of the smallest amplitude is expected to occur. Preliminary results show that the above criterion gives reasonably accurate prediction.

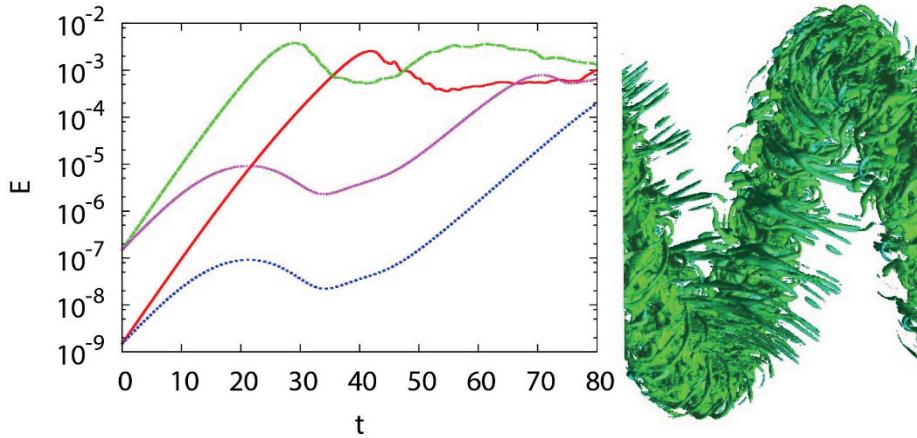


Figure 1 : (a) Disturbance energy as a function of time for  $Re_\Gamma = 5000$ ; 15700 and  $A_0 = 10^{-4}, 10^{-3}$ . (b) Iso-surface of magnitude of vorticity after turbulent transition.

### 3. 研究目標の達成状況

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。

本年度は短波長不安定性による乱流遷移過程を捉え、乱流遷移の条件を明らかにすることができた。これは上記目標の達成に向けて大きな成果である。

### 4. まとめと今後の課題

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む。風車ロータ後流の流れ構造は、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ロータ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. 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] Yuji Hattori, Nonlinear Dynamics of Helical Vortex Disturbed by Long-Wave Instability, IASM-BIRS Workshop on Vortex Dynamics: the Crossroads of Mathematics, *Physics and Applications* (2023), オンライン (招待講演).
- [2] Yuji Hattori, Akihiro Hirano, Ivan Delbende, Maurice Rossi, Nonlinear Evolution of Helical Vortex Disturbed by Long-Wave Instability, *76th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics*, (2023), Washington DC, USA.
- [3] Yuji Hattori, Ivan Delbende, Maurice Rossi, Turbulent transition of helical vortices, *European Turbulence Conference (ETC18)*, (2023), Valencia, Spain.
- [4] Yuji Hattori, Ivan Delbende, Maurice Rossi, Study of Turbulent Transition and Statistical Properties of Turbulence of Destabilized Helical Vortex, *23rd International Symposium on Advanced Fluid Information* (2023), 仙台, 日本.
- [5] Ivan Delbende, Yuji Hattori, Maurice Rossi, Yonghui Xu, Linear Short-Wave Instability in Helical Vortices, *20th International Conference on Flow Dynamics*, (2023), 仙台, 日本.
- [6] Aditya Sai Pranith Ayapilla, Yuji Hattori, Quasi-steady state of hub vortex under multi-polar strain caused by three satellite vortices, *76th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics*, (2023), Washington DC, USA.
- [7] Aditya Sai Pranith Ayapilla, Yuji Hattori, Quasi-Steady State of a Hub Vortex Under Multi-Polar Strain Induced by Satellite Vortices, *20th International Conference on Flow Dynamics*, (2023), 仙台, 日本.

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等） なし

課題番号	J23I039
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2年目

**脳血管画像に基づく流れ場推定手法の開発**  
**Approximation of 3D Flow Fields based on Cerebral Angiography**

杉山 慎一郎\*†, 安西 眠\*\*††

\*東北大学病院脳神経外科, \*\*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

世界保健機関 (WHO) の報告によると, 2019 年の全世界の死因第 1 位は, 虚血性心疾患や脳卒中等の血管疾患で, 全体の約 27 % を占めている. それにともない, 血流が疾患発症に与える影響を明らかにするために, 計算流体力学 (CFD) を用い血行動態を取得する研究が広く行われてきた. しかしながら血流 CFD 解析には, 血管撮像, 血管領域抽出, 3D モデル再構築, 計算格子分割, 境界条件設定, 反復計算や可視化処理等の膨大な時間と労力が必要であり, 疾患解明のために必要な疫学的規模の研究にはいまだ至っていない. そこで申請者は深層学習 (DL) 技術を血流解析に応用し, 即時に血流情報を取得するための血流推定 DL ネットワークの開発を行ってきた. 一般的に DL はデータ集約的なアプローチであり, より高い予測精度と頑健性を達成するためには大規模なデータセットを構築する必要がある. したがって, 申請者は日常診療において収集された脳動脈瘤疾患者 50 例の 3 次元血管造影画像に対し, CFD によりその流れ場を算出し, 所内担当者がそれらの CFD を Grand Truth として血流推定 DL ネットワークの学習を行った (図 1).

本年度は, 安定して高速に学習データとなる CFD 結果を取得するための CFD-DL 連成技術の開発を行ったので, 報告する.

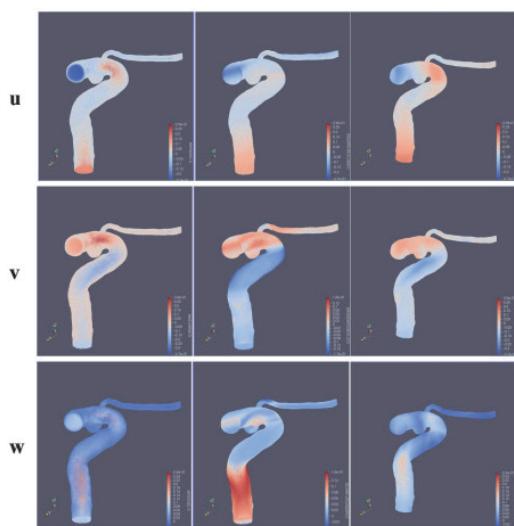


図 1 : 血流推定ネットワークによる速度場推定結果 (左 : 正解データ, 中 : 2021 年に発表したネットワークを用いた推定, 右 : 本研究で改良したネットワークを用いた推定)

## 2. 研究成果の内容

CFD 解析において、適切な初期流れ場を設定することは反復計算の安定化と収束性向上につながることから、本研究では任意の血管形状に対し DL で推定した流れ場を CFD の初期流れ場としてインプリンティングすることを試みた。学習データ群に無い新しい形状を想定し、統計形状モデリング手法を用いて 5 人の患者の平均形状を算出した。Ansys ICEM-CFD で解析格子を生成した後、格子のノード点を点群データに変換し DL ネットワークに入力することで速度・圧力場を推定した。推定された速度・圧力場を初期流れ場として設定し、Ansys CFX で定常解析を行った。

既存手法である CFD のみを行った場合、DL 推定流れ場をインプリンティングした後に CFD を行った場合について、それぞれ収束 (RMS =  $1.0 \times 10^{-5}$ ) に要する反復計算回数を算出し、収束後の流れ場を比較した。その結果、DL 推定初期流れ場を用いた CFD では通常の CFD と比較し反復計算回数が少なくなったことが明らかとなった（図 2）。また計算開始時における残差が小さくなる傾向も見られたことから、より安定して収束が得られる可能性が示唆された。

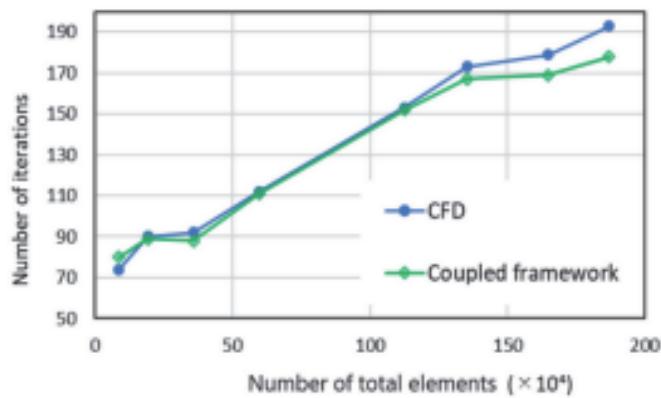


図 2：収束に要する反復計算回数

## 3. 研究目標の達成状況

DL 技術を用いることで、これまで数十分を要した CFD の反復計算時間が 1 秒以下に短縮された。したがって、血流推定 DL ネットワークにより CFD 解析と比較して革新的に高速な血流取得技術が開発できた。しかしながら、これまで大動脈用に開発した血流推定 DL ネットワークより階層が深いネットワークにする必要があり、一層の精度向上に向けて学習データの増強が求められると考えられる。そのため本年度の結果より、DL の応用による CFD 解析の速度向上と安定化が示されたが、CFD に至るまでのプリプロセッシングは未だ自動化されておらず、一連の過程を自動化する必要性が示唆される。

## 4. まとめと今後の課題

申請者らは DL 技術を用いて即時に血流情報を取得する血流推定 DL ネットワークを開発した。本年度の研究成果より、DL 推定初期流れ場を用いることで CFD の反復計算時間を短縮し安定性も向上することが示された。しかしそれ多様で大規模な学習データ構築に向けて、プリプロセッシングの自動化が必要とされる。

## 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] H. Anzai, K. Shibata, G. Li, H. Wang, K. Yanagisawa, S. Sugiyama: Development of a Flow Field Estimation Method based on Cerebrovascular Images: Stabilization and Speedup of CFD Data Acquisition for Training Datasets, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-26, pp. 84-85.

### 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	J23I041
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1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\*†, 窪田 航陽\*, 井上 智輝\*, 都木 誠\*

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。本研究では、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、位相平均データを作成することを目的とした。計測データから位相平均データを生成する方法としては、別途参照信号を計測し位相情報を得ることで、各位相幅の画像を集めて平均化する手法が知られている。本研究では、参照信号を必要としない手法を提案することで、既に得られている計測データにも適用可能とすることを目指した。

## 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されている小型低乱風洞において角柱後方に生じるカルマン渦の PSP 計測実験を行ったデータを用いた。PSP 計測データにはカメラ撮影に起因するショットノイズに加え、カルマン渦のゆらぎが含まれている。このような計測データから位相平均データを生成する。提案手法では、まず計測データ間の相関係数を計算する。これによって時間軸に対して相関値が周期的に変化する。ゆらぎ等が含まれるデータはこの周期変化から外れるために、これらを除いて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ことができる。また位相平均することでショットノイズの影響を大きく低減することができる。図 1 にこのようにして得られる位相平均データ例を示す。図から角柱の両端から交互に渦が発生するカルマン渦を捉えていることが確認できる。

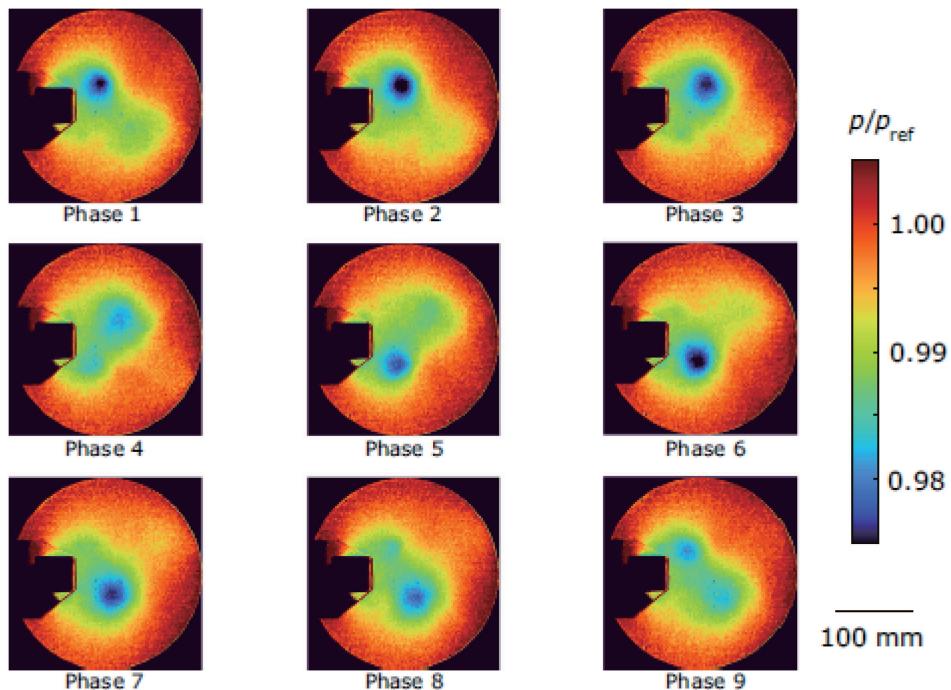


図1：位相平均データの例（文献[1]のFig. 5を転載）

### 3. 研究目標の達成状況

圧縮センシングに向けて計測データの低次元化を実施した。具体的にはゆらぎや計測ノイズが多く含まれるデータから位相平均データを生成することに成功した。こうして得られた位相平均データを固有直交分解（Proper Orthogonal Decomposition; POD）することによってゆらぎ等の含まれない POD モードを得ることができる。また他のアプローチとして Multivariate Singular Spectrum Analysis (MSSA) による低次元化にも取り組んだ。

### 4. まとめと今後の課題

計測データの低次元化には、POD 分解や動的モード分解 (Dynamic Mode Decomposition; DMD) により得られる POD モードや DMD モードのうち上位のモードのみを扱う方法が頻繁に利用される。しかしうらぎが大きい場合は上位モードにもこれらの影響が大きく含まれることが多いため、本研究では位相平均することでこの問題を低減する方法を提案した。今後は位相平均データを基に分解方法の検討を進める。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[1] T. Inoue, K. Kubota, T. Ikami, Y. Egami, H. Nagai, T. Kashikawa, K. Kimura, Y. Matsuda: Clustering method for time-series images using quantum-inspired digital annealer technology, *Comms. Eng.* 3 (2024), Article number 10, doi: 10.1038/s44172-023-00158-0.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] M. Takagi, K. Kubota, R. Shigehara, T. Ikami, Y. Egami, H. Nagai, Y. Matsuda: Proposal of Noise Reduction Method for PSP Data Using Multivariate Singular Spectrum Analysis, *Proceedings of the Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS18-7, pp. 1091-1092.

[3] K. Kubota, T. Inoue, T. Ikami, Y. Egami, H. Nagai, T. Kashikawa, K. Kimura, Y. Matsuda: Application of Post-Processing Method Using Digital Annealer to PSP Measurement Data, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-43, pp. 124-125.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（マスコミ発表）

早稲田大学、東北大学、愛知工業大学、プレスリリース：量子インスピアード技術を用いた大量データのクラスタリング手法の開発, 2024. 1. 11.

科学新聞、大量データのグループ分け 量子インスピアード技術を利用, 2024. 2. 2.

Project code	J23I043
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Explainable Machine Learning for Enhancing Multi-objective Aerodynamic Design Optimization

Pramudita Satria Palar\*†, Shigeru Obayashi\*\*††

\*Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Bandung Institute of Technology

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Multi-objective Design Exploration (MODE) is a design framework that aims to extract design insight and knowledge from a set of optimal designs in a multi-objective sense. Although data mining techniques are useful for MODE, they do not fully reveal the complexity of the relationship between design variables and objective functions. The proposed research aims to develop a new design framework based on explainable machine learning (XML) to uncover important design insights and enhance understanding of the aerodynamic optimization problem. The XML techniques will then be applied to multi-objective aerodynamic design problem. In particular, the XML technique deployed and modified is the Shapley Additive Explanations (SHAP). This project has produced one journal paper published in Structural and Multidisciplinary Optimization (Springer), one conference paper in AIAA SciTech 2024, and an open-source code of the implementation of the developed method.

### 2. Details of program implement

The surrogate model plays a crucial role in modern design optimization. Exploring multi-objective design space is crucial for deriving insights that help engineers, yet most surrogate models are black boxes, complicating interpretation. This study uses SHAP to create an explainable surrogate model framework for better understanding relationships between objectives and design variables in aerodynamic design problem. We applied the framework to multi-objective aerodynamic design problems and compared it with active subspaces and Sobol indices. Techniques to extract design insights from SHAP values include the SHAP summary plot, the SHAP correlation matrix, and SHAP dependence plots. Two aerodynamic design cases, inviscid and viscous transonic airfoil designs, illustrate the potential of explainable surrogate models. SHAP proved more effective than active subspaces and Sobol indices in revealing the impact of design variables on objectives. The results suggest that SHAP, active subspaces, and Sobol indices can complement each other for a comprehensive exploration of multi-objective design relationships. Fig. 1 shows an example of the application of the proposed method on bi-objective inviscid transonic airfoil design.

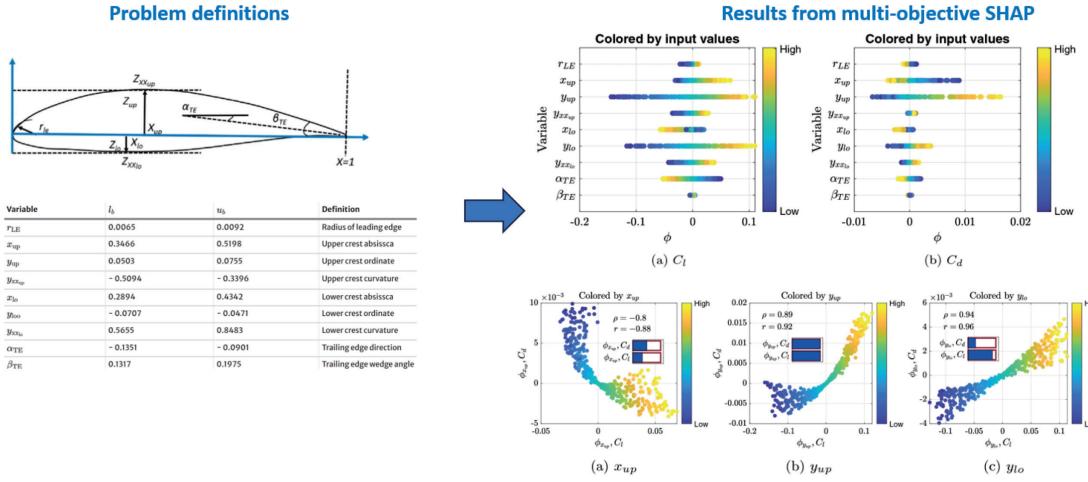


Figure 1: An illustration of the application of SHAP for multi-objective design exploration applied to inviscid transonic airfoil design.

### 3. Achievements

The project has successfully developed the multi-objective SHAP method that can be used for various multi-objective design problem, not limited to aerodynamics. The result has been successfully published in Structural and Multidisciplinary Optimization. To support the open-source movement, we have published the code in GitHub to increase reproducibility; Also, other researchers can readily use the code to support their research.

### 4. Summaries and future plans

The study investigates SHAP's effectiveness for interpreting surrogate models in multi-objective design exploration. It aims to evaluate how SHAP can uncover valuable insights from the design optimization space, offering utility to practitioners and designers. SHAP is paired with Gaussian Process Regression (GPR) or Polynomial Chaos Kriging (PC-Kriging), among other models, demonstrating its model-agnostic nature. This paper discusses various ways SHAP can visualize and quantify relationships between design inputs and outputs, including SHAP correlation values and the SHAP correlation matrix. Compared to other techniques like Sobol indices and Active Subspaces Method (ASM), SHAP provides more straightforward interpretation and can break down the impact of individual input variables on multiple outputs. The study concludes that SHAP, ASM, and Sobol indices can complement each other for comprehensive design exploration. Future research could explore SHAP-based optimization, uncertainty estimation with bootstrapping, and SHAP's capability for trade-off analysis in constrained or complex multi-objective problems.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] P. S. Palar, Y. B. Dwianto, L. R. Zuhal, J. Morlier, K. Shimoyama, and S. Obayashi: Multi-objective design space exploration using explainable surrogate models, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 67 (2024), pp. 1-24., doi:<https://doi.org/10.1007/s00158-024-03769-z>

- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)  
[2] P. S. Palar, K. Shimoyama, and S. Obayashi: Polynomial-based Shapley Additive Explanations for Design Exploration in Turbomachinery, *AIAA SCITECH 2024 Forum*, (2024), pp. 1226.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

課題番号	J23I044
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
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トポロジーの相互作用による3次元渦構造の自己組織化に関する解析

An analysis of Self-organization of Three Dimensional 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(渦度ベクトルの流れ)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 (Nakayama and Hattori, ICFD2022(AFI2022), ICFD2021(AFI2021))。乱流渦の3次元速度構造は未解明であるが、渦伸長を通して渦流が作用する渦線バンドルのトポロジーが逆に渦流の構造に影響していることが考えられ、この究明が渦の3次元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DNS(Direct Numerical Simulation)において乱流渦中の渦流、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、渦領域に沿った渦流(swirility)の変化に応じて渦線バンドル束が渦領域中で旋回し、このときに渦線バンドル束の旋回の方向と強さに応じて軸流が発生することを渦線バンドル束・渦流の可視化と渦線バンドル束の旋回平面上の周方向成分と軸流の JPDF (結合確率密度関数) により確認した。ここで、swirility は、ある平面上のベクトル場の周方向成分

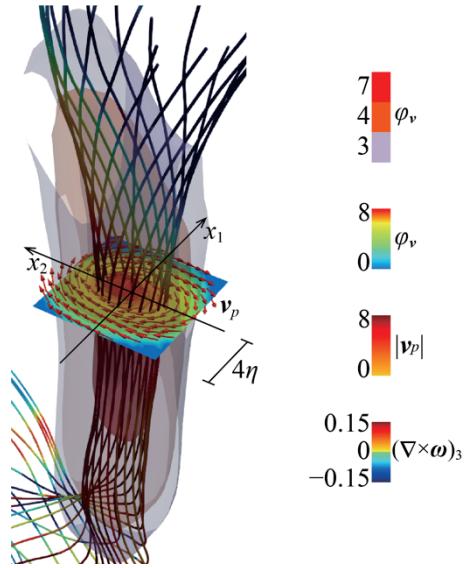


図 1：一様等方性乱流における速度場の swirlity  $\varphi_v$  にて同定した一つ渦領域( $\varphi_v = 3, 4, 7$  の 3 次元コンター)及び旋回平面( $\varphi_v$  の 2 次元コンター), また旋回平面上の渦流  $v_p$ , 並びに本渦領域中を通る渦線バンドル束を旋回平面上の渦度ベクトルのローテーション( $(\nabla \times \omega)_3$ )のコンターで示す. 渦度ベクトルは図中の下方を向いており, 旋回平面では渦線バンドル束は時計回りに旋回しながら進み, この旋回により上向きの軸流が発生している(速度場のベクトルは旋回平面より上の方向を向いている). ( $\eta$ : コルモゴロフ長さ)

に関する全周の同一方向性と強さを定めるトポロジカル物理量である(Nakayama, Phys. Rev. Fluids, 2017). また, 軸流は, 圧力勾配による力に逆らう方向に発生し, 渦線バンドル束の旋回とその強さに応じて定められる. 速度勾配テンソルに関するローカルトポロジーにおいて, 本トポロジーが渦流であったときの旋回平面に基づく正規直交基底で定義される渦空間座標系によると, 旋回平面に垂直な流れである軸流の本平面上の勾配は 0 であり, 軸流の渦中心周りの分布は二次形式的に広がることを明らかにした.

擬スペクトル法の DNS による一様等方性乱流の渦において, swirlity を用いて渦領域を同定し, 渦中心等の基準点におけるローカルトポロジーの旋回平面から渦空間座標系を定義して旋回平面上の渦流分布と特性を評価する. また, 渦中心の周囲を起点として渦線バンドル束を追跡し, またそのトポロジカル特性を解析する. 図 1 に一つの渦領域と本領域中を通る渦線バンドル束, また旋回平面と本平面上の速度場(渦流場)  $v_p$  を示す. 渦線バンドル束の旋回は, 渦伸長による渦度ベクトルを回転させる作用によって生じるが, 旋回平面上の渦度ベクトルの半径方向成分が全周で吸込み・湧出しのトポロジーである点を中心として渦伸長作用を表すと, 渦度ベクトルが一様に旋回する様な作用を受けていることが確認できる. この様な点は, 全周の一様な吸込み・湧出し流れを特定するトポロジカル物理量 sourcity により同定できる. そこで, 図 1 では, 渦の中心領域において, 渦度ベクトルの半径方向成分が全周で吸込みのトポロジーを有する点にて渦空間座標系  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )を定義している. また,  $\eta$  はコルモゴロフ長さである. 渦領域と旋回平面は, 速度場の swirlity  $\varphi_v$  のコンターにて表し, 本平面上の渦流の速度ベクトルの第 3 成分が軸流成分に相当する. 図 1 における旋回平面上の渦流  $v_p$  は本平面に対して上側を向いており, 上向きの軸流  $v_3$  が発生していることが確認できる. 一方, 非圧縮性流体において,  $v_3$  と渦度ベクトル  $\omega$  の間には,  $\omega$  のローテーションの第 3 成分  $(\nabla \times \omega)_3$  が  $v_3$  のラプラシアンの符号を反転したものに等しい, という性質

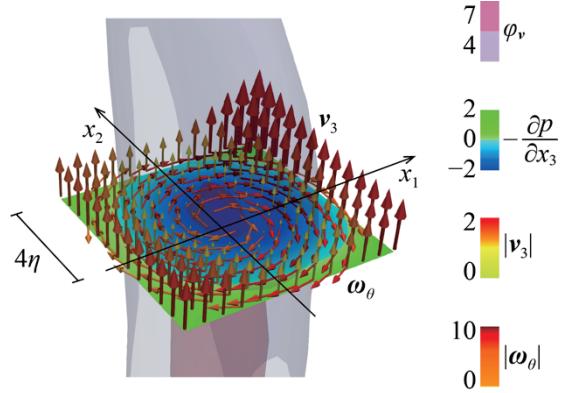


図 2: 図 1 における旋回平面上の圧力勾配のセンター、また本平面上の渦度ベクトルの周方向成分  $\omega_\theta$ 、並びに渦流の軸流方向ベクトル  $v_3$ 。圧力勾配は下向きに作用するにも関わらず、時計回りに旋回する  $\omega_\theta$  により上向きの軸流が発生している。

がある。図 1 の渦線バンドル束は、旋回平面上で時計回りに旋回しながら図の上から下側に向かって進んでいる。渦線バンドル束の旋回は、渦領域に沿った渦流のトポロジーや swirliness の変化に応じて生じると考えられるが、この渦線バンドル束の旋回が逆に軸流の発生や方向を定めていると考えられる。

また、図 1 によると、旋回の強い領域、即ち  $\phi_v$  の高い領域は旋回平面の下側に位置するため、圧力勾配は下向きに作用していると推察されるが、軸流は上向きに発生するという興味深い現象が確認できる。ここで、この旋回平面上の圧力勾配  $-\partial p / \partial x_3$  のセンターと本平面上の渦度ベクトル場・渦線バンドル束の周方向成分のベクトル  $\omega_\theta$ 、並びに軸流の分布を図 2 に示す。本図によると、下向きに圧力勾配が作用する一方で上向きの  $v_3$  が発生していることが確認できる。しかし、 $v_3$  は渦中心では発生しておらず、渦中心から離れるに従って大きくなっている。これは、圧力勾配は渦中心で強いこと、逆に渦線バンドル束の  $\omega_\theta$  も渦中心から離れるに従って大きくなることが考えられる。また、渦空間座標系とローカルトポロジーの特性の関係から、軸流の勾配は渦中心で 0 であることが理論的に導かれる。これらから、渦線バンドル束が旋回するとき、その方向と強さに応じて渦線バンドル束が軸流が発生し、その分布は二次形式的な特性を有していると考えられる。

また、渦線バンドル束は、渦流との相互作用を有し、渦流のトポロジーの変化に応じて旋回する等の特性を有していることから、常に渦領域中の渦中心を通る或いは渦中心の方向を示すか、という点については困難な場合も存在すると考えられる。従って、渦軸の定義については、渦流のトポロジーに依らず常に渦中心を通過する曲線のベクトルについて検討することが統一的な渦軸定義に繋がると考えられる。

### 3. 研究目標の達成状況

渦線バンドル束は、渦領域に沿った渦流の渦強さの発達や減衰に応じてトポロジカル特性が変化し、渦強さのトポロジカルダイナミクスを表している。その一方で、この渦線バンドル束の変化に応じて渦流には軸流が発生することが示された。即ち、渦流と渦線バンドル束には相互作用的な構造の組織化が存在していると考えられる。更に、軸流は、圧力勾配の力に逆らって渦線バンドル束の旋回する方向によって定められ、その際の軸流の分布特性が二次形式的に表されることも示された。本研究では、渦流と渦線バンドル束の相互作用的な渦構造の形成の一つのメカニズム、また軸流の分布特性を示すことができた点で目標は達成さ

れたと考えられる。

#### 4. まとめと今後の課題

渦線バンドル束が渦領域中或いは渦流の旋回平面上で旋回することにより軸流が発生し、旋回平面上下の圧力勾配による力とは反対の方向に軸流が発生することが確認できた。

今後は、渦空間における軸流のトポロジカル条件と共に発生した軸流の分布特性の詳細、また圧力と渦線バンドル束のトポロジカルな力の定量的な特性と軸流分布との関連について解明することにより、渦の3次元速度構造形成の詳細が明らかとなり、また現実的な渦の速度モデルの構築に貢献できると考えられる。

#### 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 characteristics derived from local flow geometry and relationships to bundle of vorticity lines in organization of vortical structure, *76th Annual Mtg. Amer. Phys. Soc. Div. Fluid Dyn.*, Washington D. C., (2023), L39.00005.

[2] K. Nakayama, Uchima K. and Y. Hattori: An analysis of self-organization of three dimensional vortical structure derived from interaction between vortical flow and bundle of vorticity lines, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-45, pp. 128-129.

[3] K. Nakayama: Vortical flow derived from local flow geometry and its relationships to flow structure of finite-scale vortex in homogeneous isotropic turbulence, *Proceedings of Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), pp. 1023-1024.

[4] K. Uchima and K. Nakayama: Bending of bundle of vorticity lines in a vortex and its relationships to vortical flow characteristics in homogeneous isotropic turbulence, *Proceedings of Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), pp. 1248-1249.

[5] 中山雄行: ローカルトポロジーに基づく渦の速度構造と渦線バンドル束との相互作用, 第37回数值流体力学シンポジウム, (2023), 3010-13-04.

[6] 内間海斗, 中山 雄行: 一様等方性乱流における渦領域中の渦線バンドル束の曲り特性に関する解析, 日本流体力学会年会 2023, (2023), E3-01.

[7] 内間海斗, 中山 雄行: 一様等方性乱流における渦領域中を通る渦線バンドル束の進行特性, 第21回日本流体力学会中部支部講演会, (2023), 3A-5.

##### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J23I045
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目

## 高圧酸素富化火炎の計測に向けた測定技術の高度化

Advancement of Measurement Technique for Oxygen Enriched Flame under High Pressure

早川 晃弘\*†, 中谷 辰爾\*\*††

近藤 広海\*,\*\*\*, 尾身 興一\*\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻

\*\*\*東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻

†申請者, ††所外対応研究者

### 1. 研究目的

ロケット燃焼に代表される極限環境燃焼現象の解明に向けて、高温・高圧火炎の計測技術の高度化が重要である。本研究では流体科学研究所の高圧燃焼試験設備を用いて、Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS) や火炎発光スペクトル計測に基づく手法を用いて、高圧環境下における火炎の温度定量計測を実施する。これらの異なる手法による温度計測を実施することで、温度定量計測の計測精度の信頼性向上や、極限環境燃焼に対する計測技術の高度化に貢献する。

### 2. 研究成果の内容

東北大学流体科学研究所の高圧燃焼試験設備および、流体科学研究所で開発された高温高圧燃焼校正用バーナーを用いて、0.1 MPa, 0.3 MPa, 0.5 MPa および 1.0 MPa の 4 つの圧力条件において酸化剤中の酸素の占める割合を酸素分率  $\beta = O_2/(O_2 + N_2)$  として、メタン／空気に該当する  $\beta = 0.21$  から、火炎温度がロケットエンジンと同等の 3000 K となる  $\beta = 0.55$  の火炎を計測対象として形成した。図 1 に 1.0 MPa における火炎の直接写真を示す。

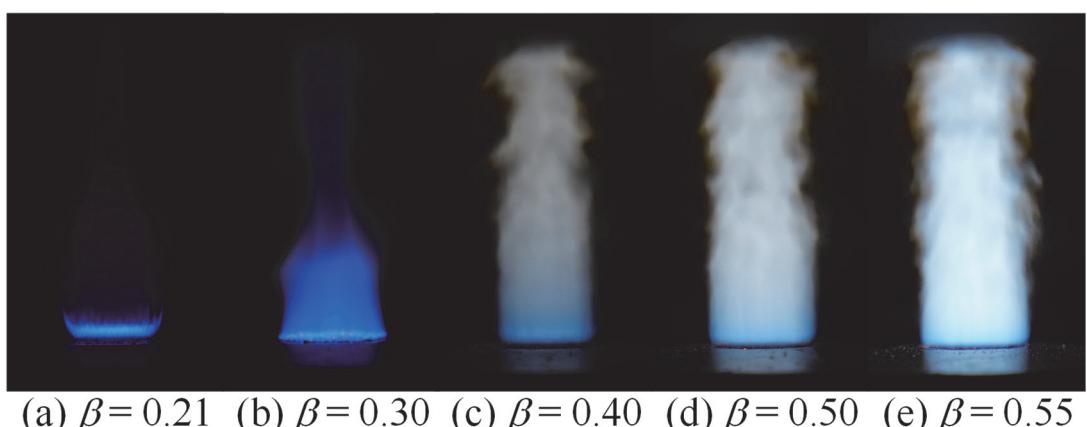


図 1 計測対象の高圧酸素富化メタン／酸素／窒素予混合火炎

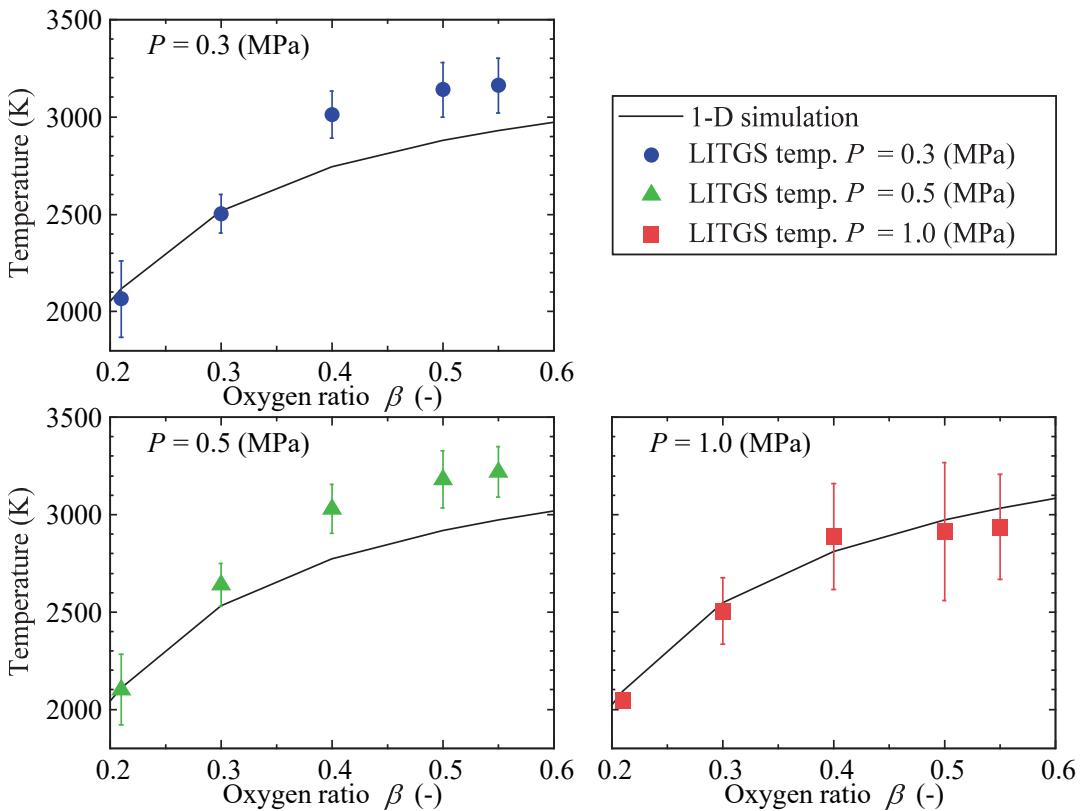


図2 LITGSによる計測結果および1次元数値計算結果

図2にLaser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS)による温度計測結果および、比較対象としてANSYS Chemkin-ProのPremixed Laminar Flame-speed Calculation modelおよびGRI-Mech 3.0を用いた火炎温度を示す。なおLITGSは計測環境の圧力上昇に伴い信号の質が向上する一方で、0.1 MPaでの計測が難しいため、本研究においては0.1 MPaを除く3つの圧力条件で計測を行った。図に示すように1.0 MPaにおいてはLITGSを用いて計測した温度と数値計算の結果が全ての酸素分率の条件において近いものとなった。一方、0.3 MPaおよび0.5 MPaにおいては酸素分率の増加に伴い、LITGSにより計測した結果と数値計算の結果の間で差が生じた。これは1.0 MPaにおいてはLITGS信号の取得に必要な衝突失活が充分であり、正確な温度計測に必要な質の信号が得られたためと考えられる。一方、0.3 MPaおよび0.5 MPaにおいては衝突失活が不十分なため、酸素分率の高い条件において火炎の生成ガスのうち水分子が衝突失活を阻害することで、LITGSによる温度計測結果に影響が生じたものと考えられる。

### 3. 研究目標の達成状況

LITGSによって3000Kの火炎温度計測を達成し、1.0 MPaにおいては数値計算の結果と近い妥当な結果が得られた。さらにLITGSの圧力上昇に伴い計測精度が上昇すること、火炎の生成ガスが計測に影響を及ぼすことが実験において明らかとなり、ロケットエンジンでの計測に向けての知見が得られた。

### 4. まとめと今後の課題

LITGSによって、最大1.0 MPaまでの高圧酸素富化メタン／酸素／窒素予混合火炎の温

度を定量的に計測することができた。今後は LITGS を用いた計測結果および数値計算の結果の妥当性を検証するため、同じ火炎を対象に他の手法による計測を行う。

## 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] 近藤広海, 水野裕太, 工藤拓, 早川晃弘:  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$  予混合火炎の LITGS による温度計測の精度に及ぼす雰囲気圧力と酸化剤中の酸素割合の影響, 第 61 回 燃焼シンポジウム, 秋田県秋田市秋田アトリオン (2023 年), E-125.

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J23I046
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	継続 2 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

有機溶媒中にナノ粒子を分散したサスペンションであるナノフルイドは, 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, 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, 熱的機能の飛躍的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, 溶媒や高分子中のナノ粒子の凝集制御・抑制ならびに構造制御が不可欠であり, その一手法として表面を有機分子で修飾したナノ粒子が注目されている。

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, 基板上での動的濡れ性の制御も重要である。例えば, 基板上の三相接触線およびその近傍のナノフルイドの動的挙動(動的濡れ性)は, プリンテッドエレクトロニクスにおける微細なパターン線幅やパターン形状の精度を決定する重要な因子であり, ナノフルイド中のナノ粒子の構造(凝集・分散構造等)にも強く依存すると考えられる。

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実験と数値シミュレーションの両面から解明することを目的とする。

#### 2. 研究成果の内容

##### 2.1 表面修飾無機固体／高分子間の親和性および界面熱抵抗の評価

表面修飾ナノ粒子と高分子から構成される材料を対象に, ナノ粒子表面の一部を模擬した界面モデルを構築して全原子 MD シミュレーションを行った。無機固体は表面を水酸化した  $a\text{-Al}_2\text{O}_3(0001)$ , 修飾鎖はデカン酸, 高分子は重合度 20 のポリプロピレン(PP)とした。修飾率は最大修飾密度 4.9 分子/ $\text{nm}^2$  を 100% と定義し, 種々変更した。温度は溶融混練による製造プロセスを想定して 450 K に制御した。親和性の指標として, 媒体中に浸っている固体を媒体から取り出すのに必要なエネルギーである浸漬仕事を評価した。浸漬仕事は, 熱力学的積分法の一種である phantom-wall 法により算出した表面修飾固体／高分子間の付着仕事と高分子の表面張力との差から求めた。さらに, 界面垂直方向に定常熱流束を課した非平衡 MD シミュレーションを行い, 界面における温度ジャンプを系内の熱流束で除することで表面修飾固体／高分子間の界面熱抵抗を求めた。全ての計算には LAMMPS を用いた。

図 1(a)に種々の修飾率におけるデカン酸修飾  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PP}$  界面近傍の側面図を示す。修飾率が低い場合では修飾鎖の構造が不規則であるが、高い場合では修飾鎖は界面垂直方向に配向した。また、修飾率が低いほど修飾鎖層への高分子の浸透が高かった。

図 1(b)にデカン酸修飾  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PP}$  間の浸漬仕事に及ぼす修飾率の影響を示す。表面修飾の場合の浸漬仕事は未修飾の場合に比べて何れも大きくなつた。また、浸漬仕事は修飾率 25% で最大であった。これは、修飾鎖層に対する高分子の浸透が大きく、表面修飾固体／高分子間の相互作用が最も強くなつたためと考える。

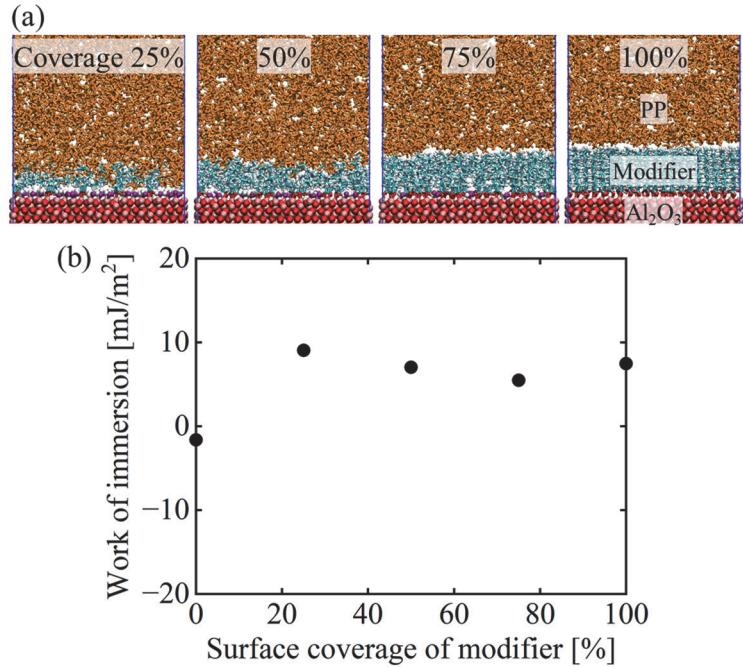


図 1：種々の修飾率におけるデカン酸修飾  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PP}$  系の  
(a)側面図と(b)浸漬仕事 (450 K)

図 2 に界面垂直方向の温度分布および密度分布を示す。左側が  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、右側がポリプロピレンである。修飾していない場合と修飾率が 100% の場合を示す。いずれの修飾率の場合でも、異相界面において温度ジャンプが見られた。修飾率 100% における温度ジャンプ  $DT$  は修飾率 0% に比べて小さかった。界面熱抵抗の逆数である界面熱コンダクタンスを見積もると、修飾率 0% で  $55 \text{ MW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、修飾率 100% で  $154 \text{ MW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  であった。よって、表面修飾による界面熱抵抗の低減を定量的に示すことができた。

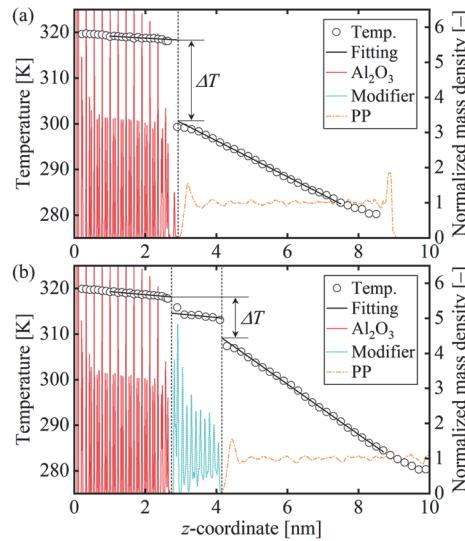


図2：界面垂直方向の温度分布および密度分布  
(a)修飾率0%, (b)修飾率100%

## 2.2 表面修飾ナノ粒子含有ナノフルイド液滴のパターン形成

基板上ナノフルイドの動的挙動の解明を目的として、その動的濡れとナノ粒子配列膜のパターン形成に関わる実験を行った。ナノフルイド試料の分散媒には各種 *n*-アルカンを用い、デカン酸修飾 CeO<sub>2</sub> ナノ粒子（平均粒径 6 nm）を 0.5 wt% となるように分散させた。調製したナノフルイドは、インクジェット装置を用いて Si 基板上に滴下し、位相シフトエリプソメータによる液滴および溶媒蒸発後のナノ粒子層の形状測定を実施した。位相シフトエリプソメータは基板上液滴のナノメートルからマイクロメートルスケールの膜厚分布を高精度に測定できるため、わずか数度以下の接触角や溶媒蒸発後のナノ粒子層の形状の測定が可能となる。また、インクジェット装置で吐出された液滴は1滴あたりおよそ 300 pL であり、滴下数を 100 滴とし、観察を行った。

図3 に有機溶媒種を変えたときの溶媒蒸発後ナノ粒子層の膜厚分布を示す。*n*-ヘキサンを用いた液滴ではスパークスパターンを、*n*-ヘプタン、*n*-オクタン、*n*-ノナンではコーヒーリングを示し、*n*-ヘプタンが最も粒子層の縁における堆積が大きかった。一方、*n*-デカンでは、コーヒーリングが多数形成されるマルチリングを示した。



図3：溶媒蒸発後の基板上ナノ粒子層の膜厚分布

前述のパターンは Bénard-Marangoni 対流、毛管流れ、接触線の Stick-slip 運動から誘起されると考え、無次元数 Marangoni 数  $Ma$ 、Peclet 数  $Pe = U_{h0}/D_p$ 、緩和時間  $\tau_{re}$  と蒸発時間  $\tau_{ev}$  の比を算出した。 $U$  を毛管流れの代表速度、 $D_p$  をナノ粒子の拡散係数、 $h_0$  を最大拡張時の液滴高さとし  $Pe$  を定義した。これら無次元数の算出には液滴形状の測定結果を用いた。

図4に各ナノフルイド液滴の無次元数の測定結果を示す。スパークスパターンを示した *n*-ヘキサンのみ、Bénard-Marangoni 対流の臨界値  $Ma \sim 80$  を超えていた。*n*-ヘキサンは  $Pe$  も他の溶媒より大きな値を示しており、Bénard-Marangoni 対流と毛管流れの複合対流がスパークスパターンを形成させたと考える。*n*-ヘプタン、*n*-オクタン、*n*-ノナンは  $Ma$  が 80 より小さく、Bénard-Marangoni 対流は生じなかったものの、 $Pe$  が 1.2-5.1 と毛管流れがナノ粒子の拡散よりも大きい、あるいは拮抗する程度であったため、コーヒーリングを示した。この3つの試料で *n*-ヘプタンが  $Pe$  と粒子層縁の粒子膜厚とともに大きくなった点は無次元数の意味と整合する。また、*n*-デカンのみ接触線の stick-slip 運動が生じたが、これは  $\tau_{re}/\tau_{ev} \sim 10^{-5}$  であり、とりわけ小さかったためである。一方、*n*-デカンの  $Pe$  は *n*-ヘキサンを除く他の溶媒と同程度であったため、接触線 stick 時にコーヒーリングを形成し、結果としてマルチリングとなつたと考える。

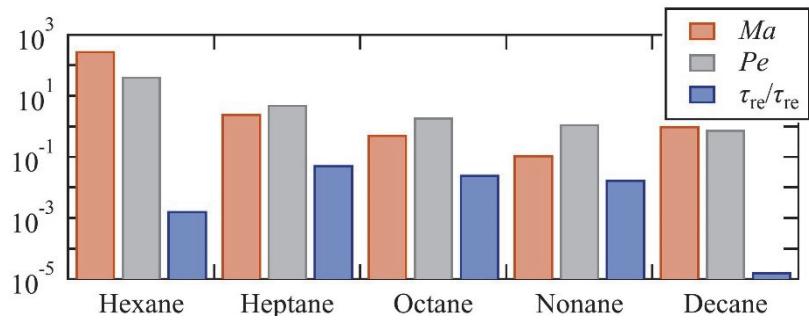


図4：各ナノフルイド液滴に対する無次元数  $Ma$ 、 $Pe$ 、 $\tau_{ev}/\tau_{re}$  の測定結果

### 3. 研究目標の達成状況

MD シミュレーションによる表面修飾ナノ粒子／高分子間の親和性評価により、高分子と親和性の高い表面修飾ナノ粒子の設計指針を確立することができた。また、ナノフルイド液滴からのナノ粒子構造体の形成の観測により、ナノフルイドの動的挙動に関する重要な知見を実験的、理論的に獲得することができた。よって、当初の目的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、有機修飾ナノ粒子を高濃度分散させたナノフルイドの設計指針が示されるとともに、表面修飾ナノ粒子含有ナノフルイドの塗布プロセスの設計・最適化において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した知見と、粒子スケールでの知見、ならびに実験で可視化可能なスケールの知見を融合し、ナノフルイドを用いた材料製造プロセスにおけるナノ粒子構造体の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] Takamasa Saito, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Eita Shoji, Gota Kikugawa, Donatas Surblys, Momoji Kubo: Molecular dynamics simulations for interfacial structure and affinity between carboxylic acid-modified  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and polymer melts, *J. Chem. Phys.*, 159(16), (2023), 164708, doi: 10.1063/5.0169721

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 庄司衛太, 星野瑛, 斎藤大河, 琵琶哲志, 久保正樹, 塚田隆夫, 笠居高明, 阿尻雅文: 接触線近傍ナノ液膜の観測に基づくナノフルイド液滴の超拡張濡れのメカニズム検討, 第 60 回日本伝熱シンポジウム, 福岡, (2023).

[3] 庄司衛太: 動的濡れにおけるナノ液膜の計測と理解：ナノフルイドの超拡張からパターン形成まで, 相変化界面研究会, オンライン, (2023).

[4] 斎藤高雅, 久保正樹, 塚田隆夫, 庄司衛太, 菊川豪太, SURBLYS Donatas: 表面修飾無機固体／高分子間の親和性および界面熱抵抗に関する分子動力学解析, 日本セラミックス協会第 36 回秋季シンポジウム, 京都, (2023).

[5] 久保正樹, 小西徹, 斎藤高雅: 有機修飾無機ナノ粒子と有機溶媒との界面親和性の評価, 化学工学会第 54 回秋季大会, 福岡, (2023).

[6] 久保正樹: 表面修飾ナノ材料の分子・粒子スケール可視化シミュレーション, 第 60 回粉体に関する討論会, 東京, (2023).

[7] Takamasa Saito, Ryo Takebayashi, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Eita Shoji, Gota Kikugawa, Donatas Surblys: Relationship between Nanoscale Structure and Affinity for Organic-Modified Inorganic Solid/Organic Solvent Interface, 2023 *AIChE Annual Meeting*, Orlando, (2023).

[8] Masaki Kubo, Toru Konishi, Takamasa Saito, Eita Shoji, Gota Kikugawa, Donatas Surblys, Atsuki Komiya: Evaluation of the Interfacial Affinity between Organic Solvents and Surface-modified Nanoparticles, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-14, pp.51-52.

[9] Akira Hoshino, Eita Shoji, Tetsushi Biwa, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Takaaki Tomai, Tadafumi Adschiiri: Time-resolved Multi-scale Droplet Shape Measurement of Superspreading Wetting of Nanofluid, *The 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023)*, Sendai, (2023).

[10] 庄司衛太: メゾスケール光計測に基づくソフトマテリアルの動的濡れの研究, 日本伝熱学会北陸信越支部秋季セミナー, 新潟, (2023).

[11] 庄司衛太: ナノフルイド液滴のパターン形成と超拡張濡れ —メゾスケール光計測によるアプローチ—, 化学工学会熱工学部会セミナー, 兵庫, (2023).

[12] 庄司衛太, 斎藤大河, 琵琶哲志, 久保正樹, 塚田隆夫, 笠居高明, 阿尻雅文: 無次元数を用いた基板上インクジェットナノフルイド液滴のパターン形成の整理, 化学工学会第 89 年会, 大阪, (2024).

[13] 斎藤高雅, 庄司衛太, 久保正樹, 辰巳怜, 小池修, 塚田隆夫: マルチスケールシミュレーションによる高分子ナノコンポジット材料の有効熱伝導率解析, 化学工学会第 89 年会, 大阪, (2024).

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）多層体及びその製造方法, 庄司衛太・久保正樹・塚田隆夫・阿尻雅文, 2024. 3. 3, 出願.

(受賞) MFD 大賞, 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関する分子動力学解析, 斎藤高雅, 2023.9.7, 日本セラミックス協会マテリアル・ファブリケーション&プロダクション・デザイン研究会.

コニカミノルタ画像科学奨励賞, 動的濡れにおけるソフトマテリアル特有の駆動力特定に向けた溶質の局在構造イメージング手法の開発, 庄司衛太, 2024.3.5, コニカミノルタ科学技術振興財団.

(マスコミ発表) 該当なし.

Project code	J23I047
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	3rd year

## Design and Optimization of Multidirectional Wings of the Aero-train under the Effect of Static Aeroelasticity

Chenguang Lai\*†, Shigeru Obayashi\*\*††, Yuting Zhou\*

Shuai Feng\*, Liangkui Tan\* and Yujie Zhu\*

\*Chongqing University of Technology

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The purpose of the project is to investigate the aeroelastic response of the multidirectional wings, design and optimize a suitable multidirectional wings for the aero-train, obtain a realistic and completed method of parametric modeling, optimization and analysis, and construct an effective means for the aerodynamic study on the wings of aero-train.

### 2. Details of program implement

This study elucidates aspects inherent to the trailing-edge noise of multi-directional wings, such as the main generating regions of noise, the main noise contribution frequency, noise directivity, sound pressure level (SPL) attenuation characteristics, and how trailing-edge vortex shedding influences the near-field sound generation and far-field propagation. Initially, a three-dimensional model of a multi-directional wing with several interconnected structures was constructed. Then, two multi-directional wings are aligned in tandem to mimic the actual wings of an aero-train body, and the relative spacing ( $R_s$ ) of two multi-directional wings was set as 4C (four times the chord length of the wing), 5C, 6C, and 7C. The unsteady flow fields and sound fields around the multi-directional wings were solved using a hybrid numerical method consisting of large eddy simulation (LES) combined with Möhring acoustic analogy theory. A highly resolved flow field is used to conduct sound source diagnostics, and the velocity spectra, sound pressure level spectra, and turbulence intensity of trailing-edge noise are obtained. The near-field flow obtained by LES, possessing pressure fluctuations and other components, was used as the input data for Möhring acoustic analogy theory to predict the propagation of sound. The solver-related parameters are displayed in Table 1.

Table 1. Solver parameters

Fluid simulation		Acoustic simulation	
Solver precision	Double precision	Solver	MUMPS
Solver type	Implicit, transit, density based	Window Functions	Hanning Window
Turbulence	LES	Acoustic analogy	Möhring
Spatial Difference Method	Second Order Upwind		
Gradient evaluation	Green–Gauss node based		

The multi-directional wing consists of a main wing, a ground effect wing (GEW), an aileron, a wingtip winglet, and a pressure-holding winglet. The reference wing for designing is the NACA4412 airfoil, which proved to be the most suitable wing for the WIG effect in Ahmed's experiment. The wing's three-dimensional geometric-model structure is presented in FIG.1.

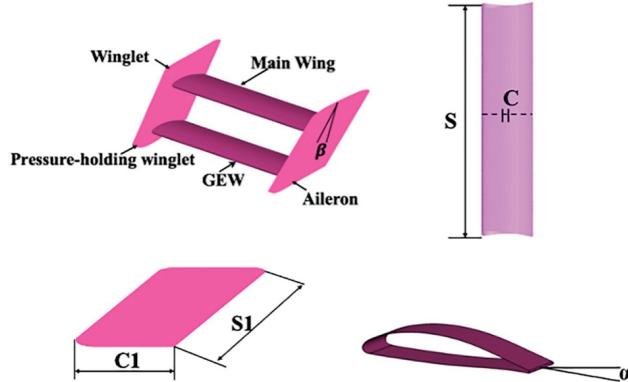


FIG. 1 Three-dimensional geometric model structure of the multi-directional wing.

Considering the presence of a large curvature in multi-directional wings, unstructured meshes were used for meshing. The specific grid strategy is presented in Table 2, and the mesh scene is shown in FIG. 2.

Table 2. Grid strategy

Parameters	Values (mm)	Number of meshes
Mesh size at the leading edge and the trailing edge	10	193079
Mesh size at the wing surface	20	594324
Tail flow zone	40	
Flow field area around the airframe	80	
Core area of the sound zone	120	
Sound zone	320	29928849
Fluid zone	960	1567109
First layer of the boundary	$4 \times 10^{-3}$	

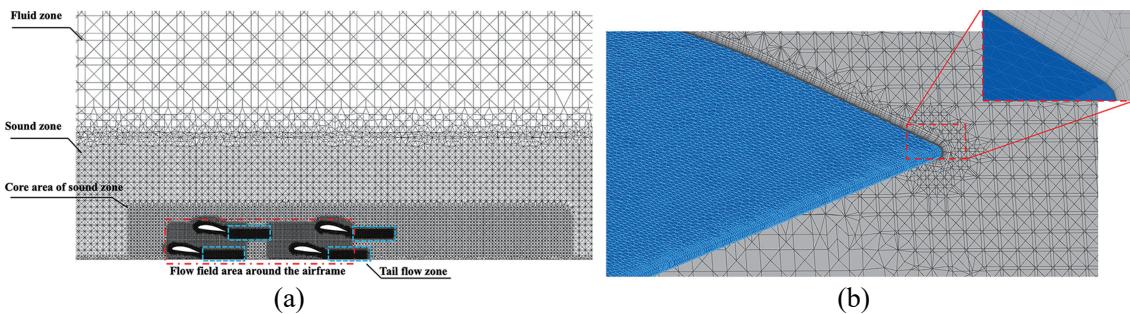


FIG. 2 Grid strategy schematic: (a) gridded zones and (b) the mesh scene and the boundary layer distribution.

### 3. Achievements

(1) Regardless of the relative spacing, the primary frequency components and

generation areas of trailing-edge noise remain consistent. The source region's noise components were predominantly low-frequency noise below 200 Hz, primarily originating from the wing trailing-edge, the wake area, and the aileron tip vortex. This low-frequency noise dominated sound propagation due to its diffraction and penetration capabilities. Additionally, the intermediate-frequency noise, approximately 14 dB lower than the low-frequency noise, was primarily generated by the turbulent motion of the airflow in the sound source region (FIG. 3 and 4).

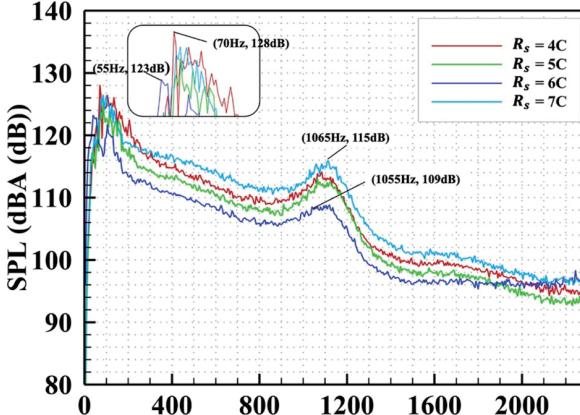


FIG. 3 Curves of frequency response functions of the sound source region.

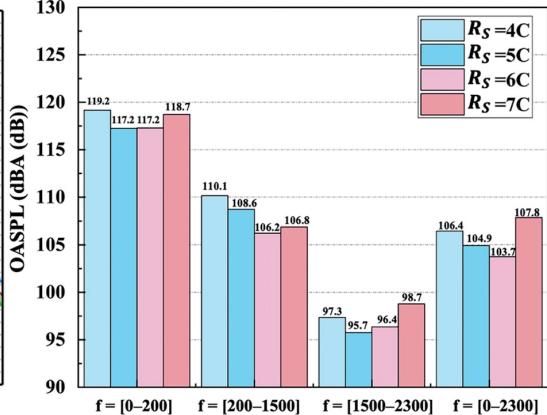


FIG. 4 The OASPL integrated with different frequency bands.

(2) The interference between the front and the rear wings, subject to varying relative spacings, plays a pivotal role in dictating the total acoustic energy within the source region. The turbulence in the rear wing region is dramatically amplified by the vortex shedding occurring at the front wing's trailing edge, culminating in a significant surge in the total acoustic energy. As shown in FIG. 5, a relative spacing of 6C sees the least total acoustic energy, attributed to the diminished interference between the wings and the front wing's role in obstructing the intake airflow within the rear wing region. Consequently, in the design process of the aero-train's multi-directional wing tandem spacing, the judicious utilization of mutual interference between wings can mitigate the gross aerodynamic noise while maintaining dynamic efficiency.

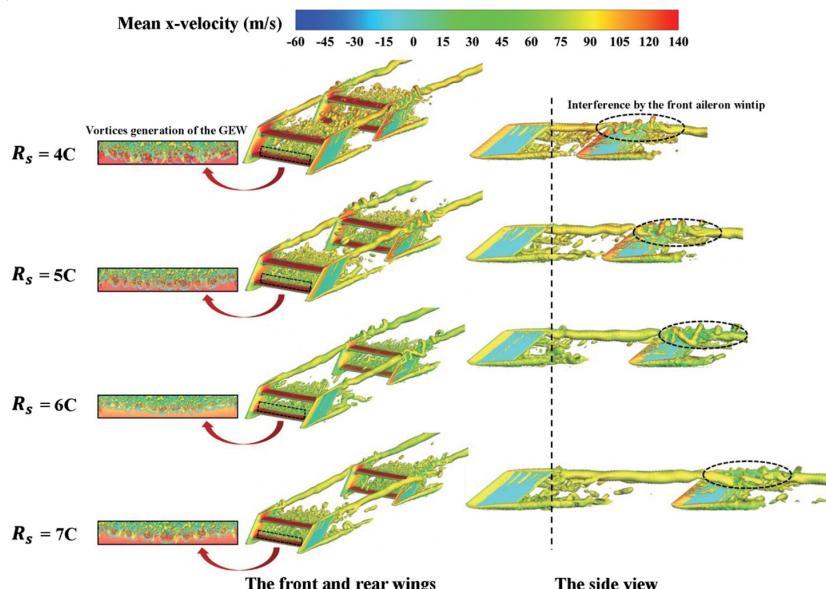


FIG. 5 Instantaneous iso-surface of  $Q = 12000 \text{ S}^{-2}$  around the multi-directional wing

(3) A multi-tier analysis of flow field has been conducted to better understand the generation and propagation mechanisms of trailing-edge noise. This was achieved by studying time-averaged energy fluctuations, helicity, and Reynolds stresses of various components. The disordered airflow around the pressure side of the multi-directional wing, exhibiting airflow separation, triggers vortex noise. Large-scale ring vortex structures at the wing's trailing edge and long strip vortex structures at the aileron tips generate significant energy, leading to strong low-frequency noise. The orbital wall surface amplifies the trailing-edge noise, with the GEW exhibiting a higher sound energy than the main wing.

#### 4. Summaries and future plans

Summaries: The trailing-edge noise generated by multi-directional wings aligned in tandem on an aero-train body causes significant noise pollution. In this study, by changing the relative spacing between the front and the rear wings, numerical predictions of trailing-noise near-field generation and far-field propagation were produced for 0.3 M using the compressible hybrid LES/Möhring method. A multi-tier discussion of the flow field was conducted to better understand the mechanisms of the generation and the propagation of trailing-edge noise.

Future plan: 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.

#### 5. Research results

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

[1] Chenguang Lai, Lihua Liu, Shuai Feng, Shihao Wen, and Guangtao Zhai: Experimental and numerical investigation on aerodynamics characteristics for Formula SAE atcorners, *J. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2023, 37(10): 17-27, doi: 10.3969/j.issn. 1674-8425(z).2023.10.003.

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

[2] Yujie Zhu, Chenguang Lai, and Shigeru Obayashi: Numerical analysis on aeroacoustics of multi-directional wings aligned in tandem of the aero-train, *Proceedings of the Twenty-Third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF 61, pp. 169-172.

##### 3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J23I049
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目（発展）

**胎盤から脳への情報伝達を模倣した“Maternal Brain-on-a-chip”の開発**  
**Development of a “Maternal Brain-on-a-chip” Mimicking the Placenta-to-Brain**  
**Communication in Pregnant Women**

稻垣 舞\*†, 立川 正憲\*, 船本 健一\*\*††

\*徳島大学大学院医歯薬学研究部（薬学域）, \*\*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

妊娠期のみに存在する臓器“胎盤”は、細胞外小胞(エクソソーム)などのメッセージ物質を母体循環血液中へと分泌し、内包するマイクロ RNA(miRNA)やタンパク質を標的細胞に輸送することで、母体の生理機能を調整する。これまでに、女性の脳は、妊娠によって、社会的認知に関連する領域の構造や、記憶力などの機能が変化することが知られており、最近では、single nucleus RNA-seq や single nucleus ATAC-seq から、妊娠マウスの海馬における遺伝子発現が細胞特異的に変化することが報告(*eNeuro* 9: ENEURO.0117-22.2022, 2022)されている。そこで、胎盤から分泌されるエクソソームが、循環血液と脳実質間の障壁として働く血液脳関門(Blood-Brain Barrier, BBB)を透過する可能性を考えた。本研究は、マイクロ流体内に構築した3次元ヒト脳微小血管網(Human BBB on a Chip)を用い、胎盤由来エクソソームのヒト BBB 透過性を評価することを目的とした。

## 2. 研究成果の内容

エクソソームの輸送をリアルタイム追跡するために、CD63 と GFP の融合タンパク質を安定発現させた胎盤細胞を樹立した。酸素分圧・力学的刺激・化学的刺激の3つの因子の制御が可能な三次元細胞培養用チップ内に構築した Human BBB on a Chip を用い、胎盤由来エクソソームのヒト BBB 透過性を評価した。流体科学研究所の船本健一准教授が試作した生体模擬チップを、徳島大学に提供して頂き、実験は徳島大学にて行った。船本准教授とは、インターネット会議と、年2回の研究方針会議を通じて、最新データの共有と議論を行うことで研究推進を図るとともに、令和5年11月及び令和6年3月には、流体研において実地にて研究打ち合わせを行った。令和5年4月～令和6年3月に得られた具体的な研究結果について、以下に示した。

**胎盤由来エクソソームの BBB 内在化評価** : *in vitro* 胎盤モデル細胞として、絨毛がん細胞株(BeWo 細胞)を、*in vitro* BBB モデル細胞として、BBB の実体である脳血管内皮細胞(hCMEC/D3 細胞)を用いた。エクソソームのマーカーとして知られる CD63 と GFP との融合タンパク質を安定発現させた BeWo 細胞(CD63-GFP-BeWo 細胞)を構築した。CD63-GFP-BeWo 細胞の培養上清から、超遠心法を用いて粒子を回収し、Zetasizer nano を用いて粒度分布を解析した結果、エクソソーム画分が精製されたことが示された。さらに、精製したエクソソームは GFP を発現していることが示された。CD63-GFP-BeWo 細胞と hCMEC/D3 細胞を共培養した結果、

hCMEC/D3 細胞内に、GFP 発現胎盤細胞分泌エクソソーム由来の緑色の点状シグナルが観察された。以上の結果から、BeWo 細胞から分泌されたエクソソームは、hCMEC/D3 細胞内に内在化することが示された(図 1)。



胎盤由来エクソソームの BBB 透過性評価：三次元細胞培養用チップを用いて、その内部のマイクロサイズの流路内に、脳血管内皮細胞、アストロサイト、及びペリサイトを共培養することで、三次元のヒト脳微小脳血管網を構築した。構築した Human BBB on a Chip のメディア流路に、BeWo 細胞由来エクソソーム注入したところ、血管内にシグナルが観察され、次第に、血管外のシグナルが増強する様子がリアルタイムで観察された。以上の結果から、胎盤から分泌されたエクソソームは、血液脳関門を透過し、脳細胞に輸送される可能性が示された。

### 3. 研究目標の達成状況

胎盤細胞から分泌されたエクソソームの輸送を追跡可能な細胞モデルを樹立した。マイクロ流体デバイス内に構築した Human BBB on a Chip を用いて、胎盤分泌エクソソームが、BBB を透過し脳細胞に分布する様子を可視化することができた。

### 4. まとめと今後の課題

マイクロ流体デバイス内に構築した Human BBB on a Chip を用い、胎盤分泌エクソソームがヒト BBB を透過し脳細胞に分布する様子をリアルタイムで可視化できた。今後は、胎盤分泌エクソソームがヒト BBB 及び脳細胞の機能に及ぼす影響を解析する必要がある。

### 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] Mai Inagaki, As a researcher, teacher, leader, manager, communicator, decision maker, caregiver, life-long learner, and as a person, *Symposium to Promote Gender Balance and Diversity in Science, “Diverse Perspectives of Woman in Science To Support the Next Generation”*, Hiroshima (2024).
- [2] Masanori Tachikawa, Moemi Hidaka, Yuka Sakamaki, Kenichi Funamoto, Mai Inagaki, Usefulness of the human blood-brain barrier on a chip for brain-targeting drug development, *Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023).
- [3] Mai Inagaki, Role of the blood-brain barrier transport systems for extracellular vesicles in placenta-to-brain communication, *IRCMS Symposium, “Rise of Diversity in Science”*, Kumamoto (2023).
- [4] Mai Inagaki, Transport systems for placenta-derived exosomes at the placental and brain barriers, *Seminar at Uppsala University*, Uppsala (2023).

- [5] Masanori Tachikawa, Mai Inagaki, Hinori Sano, Momoko Sato, Hidetaka Kosako, Kenichi Funamoto, Placenta-derived Extracellular Vesicles: their unique characteristics of the Blood-Brain Barrier (BBB) transport, *25th Symposium Signal Transduction at the Blood-Brain Barriers*, Uppsala (2023).
- [6] Masanori Tachikawa, Mai Inagaki, Kenichi Funamoto, Hinori Sano, Eisuke Nakano, Miku Inai, Momoko Sato, Yuka Sakamaki, Characteristics of placenta-derived extracellular vesicles (pEVs) at the human blood-brain barrier, *The Cerebral Vascular Biology, CVB 2023 meeting*, Uppsala (2023).

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）

なし

（受賞）

徳島県科学技術大賞 若手研究者部門, 稲垣舞, 2023. 10. 21, 徳島県

（マスコミ発表）

なし

Project code	J23I050
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	3rd year

## Study of Shock Wave-Particles Interaction

Kazuya Tajiri\*†, Aiko Yakeno\*\*††

\*Department of Mechanical Engineering-Engineering Mechanics, Michigan Technological University

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

This is the continuing work from the last two years about the shock wave-particles interaction. High-speed flows of gas mixed with solid particles are often observed in the various engineering applications as well as in the natural phenomena. The engineering applications include solid-propellant rocket motor, shock-induced powder compaction, and needleless drug delivery. An example of natural phenomena is volcano eruption. The primary objective of the proposed research is to understand the gas-particle mixture dynamics. In the third year of this project, we will continue focusing on the interactions between multiple shock waves produced by the multiple particles. The particles behind the bow shock(s) are accelerated by the bow shock interaction, and the direction of the acceleration depends on the size of the particles and the distance between the particles. The mechanisms of the particle dynamics induced by the shock wave interaction are to be investigated in this one-year project.

### 2. Details of program implement

The shock tube facility used in this study is unique in that a modified Split-Hopkinson Pressure Bar actuated by a high speed servo valve is used to generate shock waves. Driven section of the tube has open end where the shock wave starts propagating spherically (Figure 1).

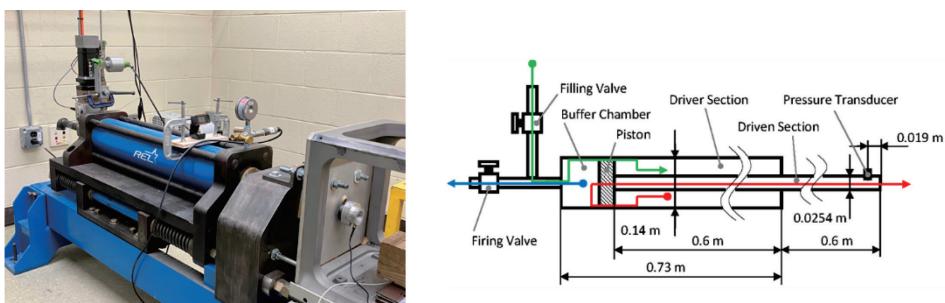


Figure 1: Shock tube facility with driven-section opening

Three different solid particles are used for this study (Table 1). Particles with 1 mm and 3 mm diameters are made of glass, and their density is about  $1900 \text{ kg/m}^3$ , and the particles with 6 mm diameter are made of plastic of which density is about  $330 \text{ kg/m}^3$ .

Table 1: Properties of particles

Diameter	Mass	Density
1 mm	1.5 mg	1900 kg/m <sup>3</sup>
3 mm	40 mg	1900 kg/m <sup>3</sup>
6 mm	56 mg	330 kg/m <sup>3</sup>

Shadowgraph technique is used to visualize the shock wave propagation and the induced particle motions, and a high speed camera (Photron Fastcam Mini AX200) is used to capture the flow field image at frame rate of 40,000 fps, shutter speed of 1/3,800,000 sec, and the spatial resolution of 384x256 pixels.

Initial pressures in the driver-section are selected to 24 atm, 34 atm, and 51 atm. Driven-section is open to the atmosphere. Therefore, three different values of the initial pressure ratio ( $p_4/p_1=24, 34, 51$ ) are used for this study.

### 3. Achievements

Figure 2 shows typical shadowgraph images of the shock waves and particles with different particle diameters extracted from the movie clips ( $p_4/p_1=24$ ). Black area in the right-hand side of the images shows the driven-section outlet of the shock tube. Motion of a particle is manually tracked in some consecutive frames of a movie clip and then the particle speed is calculated. Red lines in Figure 2 show the direction of the particle motion tracked in this method. Direction of the particle motions spreads in the expanding angles from the driven-section outlet.

The particles also interact and collide with other particles, and as a result highly random motion of the particles is observed in various direction.

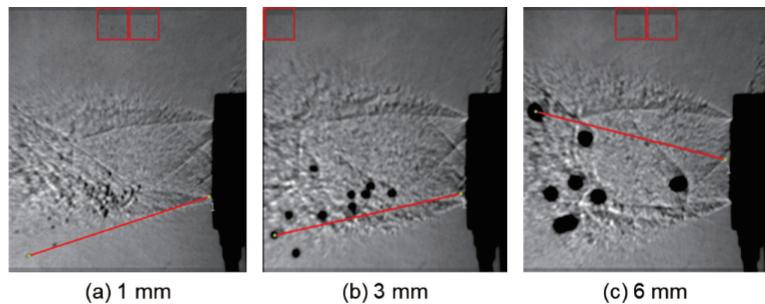


Figure 2: Shadowgraph images of particles in high speed flow ( $p_4/p_1=24$ ).

Total of nine different conditions (three particle sizes and three initial pressure ratios) are tested. In each case four particles are randomly selected and the speeds of these particles are estimated from the movie, as well as the mean particle speed. Figure 3 shows the mean particle speed for all nine cases. Error bars show the standard deviation of the four particle speeds in each case. As observed in Figure 3, the particle velocities vary in the broad range for all cases. This is probably because the particles placed in the shock tube interact before these particles come out of the driven-section outlet. Therefore, in order to analyze the particle-shock wave interaction more accurately, the experimental design must be improved, and it is left for the future studies.

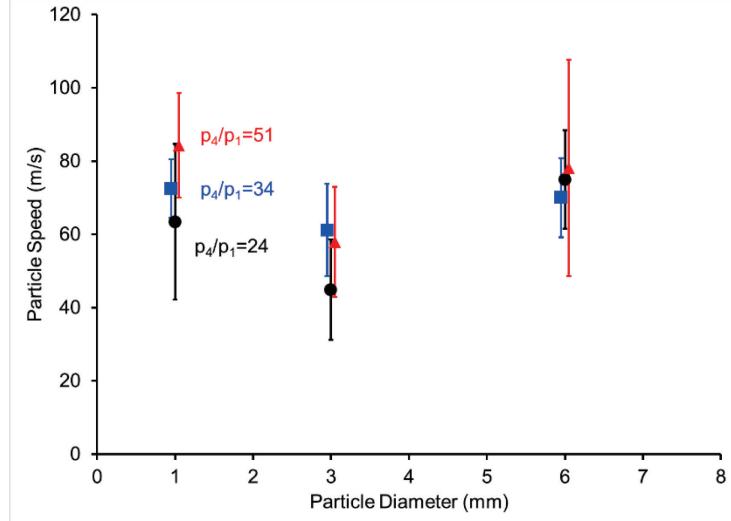


Figure 3: Particle speeds behind shock wave as a function of particle diameter.

Average particle speeds decrease from 1 mm to 3 mm, and increase for 6 mm diameter particles. This is because the density of the particle is lower for 6 mm particles. For the better analysis of the particles-shock wave interaction, more particle diameters with the same material density should be tested which is again left for the future studies.

From the one-dimensional shock tube theory, the Mach number of the shock wave propagation ( $M_s$ ) and the speed of the induced flow ( $u_p$ ) are calculated using the following relations.

$$M_s = \sqrt{\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right) + 1}$$

$$u_p = \frac{a}{\gamma} \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right) \left( \frac{\frac{2\gamma}{\gamma + 1}}{\frac{p_2}{p_1} + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}} \right)^{1/2}$$

where  $\gamma$  is the specific heat ratio and  $a$  is the speed of sound. Pressure ratio across the shock wave ( $p_2/p_1$ ) can be obtained from the initial pressure ratio ( $p_4/p_1$ ) using the relation

$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{p_2}{p_1} \left\{ 1 - \frac{(\gamma - 1) \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right)}{\sqrt{2\gamma \left[ 2\gamma + (\gamma + 1) \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right) \right]}} \right\}^{-2\gamma/(\gamma-1)}$$

In Figure 4 the shock wave Mach number and the speed of the induced flow calculated using the equations above are plotted as function of initial pressure ratio. The shock wave Mach number ( $M_s$ ) and the induced flow velocity ( $u_p$ ) start decreasing when they come out of the driven-section outlet since the phenomena change from the one-dimensional motion to spherical motion in the atmosphere. Therefore these values from one-dimensional analysis cannot be directly compared with the measured particle speeds in the atmosphere. However, the differences between one-dimensional and spherical propagations are still small near the outlet. Particle speeds displayed in the previous figures are also plotted in the same figure. It is obvious that the particle speeds are generally significantly lower than the induced flow speed.

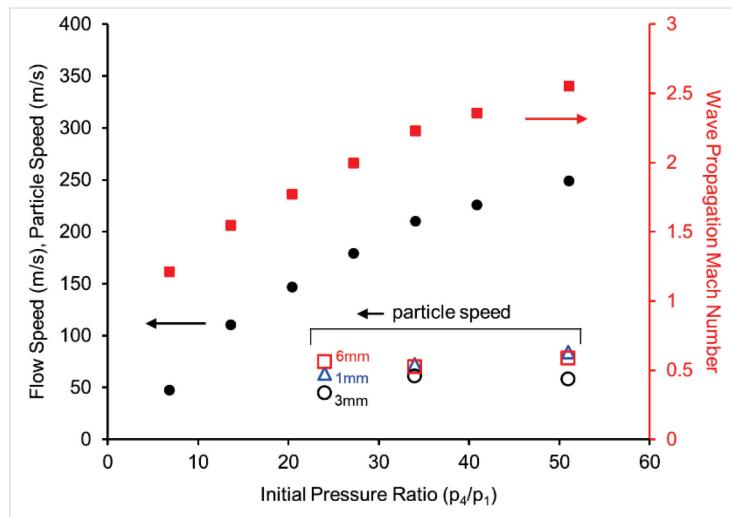


Figure 4: Wave propagation Mach number and flow and particle speeds behind shock wave.

#### 4. Summaries and future plans

Solid particles are placed in the supersonic flows, and the particle speed of the induced motion is estimated from the high speed camera images. The particles have significantly slower velocity compared to the flow speed theoretically calculated from the shock tube initial pressure ratio. Furthermore, at each test the particle speed varies in a wide range. This is probably because the particles interacted each other before these particles come out of the shock tube. In order to study the particles-shock wave interactions, the experimental design needs to be improved more. This is left for the future studies.

#### 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. Tajiri, B. Wavrunek, G. Viyyapu, A. Yakeno, S. Hamada: Propagation of Spherical Shock Wave and Its Interactions with Particles, *34<sup>th</sup> International Symposium on Shock Waves*, Daegu, South Korea, (2023).
  - [2] K. Tajiri, G. Viyyapu, A. Yakeno: Study of Shock Wave-Particles Interaction, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-62, pp. 173-175.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

課題番号	J23I054
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目（発展）

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

これまでの研究で、高い抗菌・抗ウィルス性を示す軟質金属（SMe）である銀（Ag）および銅（Cu）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）において、時間の経過とともに膜中の SMe ナノ粒子が表面へ自己滲出する現象を見出した。この SMe の自己滲出現象を利用し、人の手指による摩擦で消耗した表面の SMe を自動的に自己供給することによって抗菌性が持続する効果が期待される。そこで、人の手指を模擬した軟質ゴムと SMe-DLC の摩擦回数と抗菌性能の関係を明らかにする。

## 2. 研究成果の内容

軟金属/DLC 複合コーティング(SMe-DLC)は、同心複合ターゲット (CCT) を使用した RF マグネットロン スパッタ法によって Si (100) 基板上に成膜した。CCT は炭素 (C) ベースターゲット上に同心円状に配置された軟質金属タブレットから構成されており、SMe-DLC 中の SMe 濃度は、SMe として銀(Ag)および銅(Cu)については CCT 上の SMe/C の面積比を変えることで幅広く変化させることが可能であるため、膜中金属濃度と抗菌性の関係を明らかにする本研究の目的に最適な成膜法である。

金属含有量が低いおよび高い SMe-DLC 上の表面偏析層断面を透過電子顕微鏡 (TEM) で観察した結果を Fig.1 に示す。Ag または Cu の含有量が 50 at.%以上の高金属含有皮膜の表面には SMe (Ag または Cu) による表面偏析層が観察され、それらの厚さは Ag-DLC の方が Cu-DLC よりも厚い偏析層を形成している。さらに、コーティング中の金属含有量が同程度の場合、Ag-DLC 上の偏析層は連続的である一方、Cu-DLC 上の偏析層は不連続であった。これらの Ag または Cu による表面偏析層の形成により、SMe-DLC の抗菌効果が一層高められると考えられる。

SMe-DLC の膜内部から表面へ抗菌性を有する SMe が自己浸出すると、手指との摩擦により減少した SMe 濃度を補填することが期待され、効果的かつ持続的な抗菌・抗ウィルス特性が発現する耐久性の高いフィルムが実現することが期待される。その現象は SMe-DLC の新たな生物学的機能となりうると考える。また、SMe-DLC のような硬質膜は自己修復性が無い為、剥離や摩滅により必要な機能を失うと再度成膜を行わなければならず、再度の成

膜も多大な時間とコストが伴う。しかし、柔軟性の高い樹脂粘着テープにSMe-DLCなどの機能性コーティングを形成できれば、必要な領域に必要な機能を付与することが可能となり、たとえ劣化などにより機能性が失われたとしても、新しい機能性テープに交換するだけで極めて容易に表面機能の回復が可能になることが期待できる。

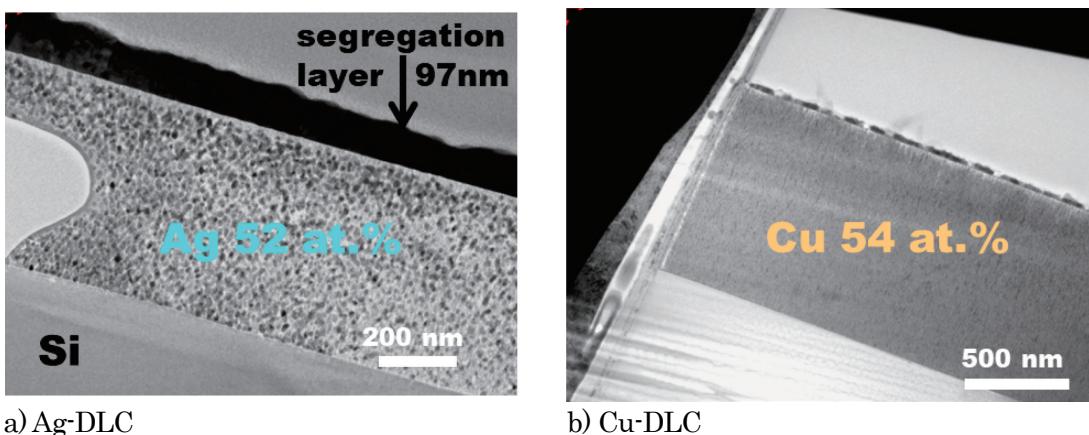


図1: Ag-DLC と Cu-DLC の表面偏析層断面の比較

### 3. 研究目標の達成状況

TEM観察によりAgまたはCuの含有量が50 at.%以上の高金属含有SMe-DLCの表面にはSMe(AgまたはCu)による表面偏析層が観察され、それらの厚さはAg-DLCの方がCu-DLCよりも厚い偏析層を形成していることを確認した。

### 4. まとめと今後の課題

TEM観察により、AgおよびCu含有量が相対的に高いSMe-DLC上には添加軟金属からなる表面偏析層が形成されており、SMe-DLC中の同じ軟金属含有量ではAg偏析層がCu偏析層よりも厚いことがわかった。このような表面偏析層の形成により、AgおよびCu含有炭素膜の抗菌効果が増強されると考えられる。引き続き、SMe-DLCの金属含有量と抗菌性の定量評価を行い、手指との摩擦を模擬した摩擦試験における抗菌性低下とSMeの自己滲出現象による抗菌性回復について明らかにしていく。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

無し

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Minoru Goto: The Composition of Frictional Interface and Tribological Properties of Gold/DLC Nanocomposite Coatings with Different Gold Content, *Proc. ITC FUKUOKA 2023, Fukuoka (2023), DLC and carbon related coatings 5, 29-C-12.*

[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 AFI-2023, Sendai, (2023) CRF-24, pp.79-80.*

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

無し

Project code	J23I055
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	2nd year

## Fundamental Characteristics of Ammonia/Water Vapor/Hydrocarbon Premixed Laminar Flames

Akihiro Hayakawa\*†, Ekenechukwu C. Okafor\*\*††

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Faculty of Engineering, Kyushu University

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Ammonia water solution is expected as a carbon-neutral fuel for internal combustion engines however the fundamental combustion characteristics of as the laminar burning velocity and the response of its flames to stretch has not be well-understood. In addition, due to the lack of measured data on the properties of the flame, chemicals reaction mechanisms for modeling the combustion of the mixture have not been sufficiently optimized and validated. The purpose of this study is to investigate these fundamental premixed flame characteristics of mixtures of ammonia water and other fuels such as methane and hydrogen using a constant volume combustion chamber and to optimize and validate chemical reaction mechanisms with the measured data.

### 2. Details of program implementation.

In first year of this program, experiments were conducted at IFS using a high-pressure constant volume combustion chamber at the High-Speed Reactive Flow Lab to measure the unstretched laminar burning velocity and the Markstein number of  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{-H}_2\text{O}\text{-Air}$  and  $\text{NH}_3\text{-CH}_4\text{-H}_2\text{O}\text{-Air}$  flames. The of water vapor dilution ratio  $Z_{\text{H}_2\text{O}}$  and  $\text{H}_2$  in the flames were investigated. Furthermore, numerical analysis of the flame chemistry was conducted.

In the second year of the program, the measured data from the previous year were employed to validate a detailed reaction mechanism by Okafor et al. [1], which is targeted for optimization in this study. A more comprehensive numerical analysis of the chemistry of the flames were conducted at Kyushu University to underpin the important chemical reaction steps that may require optimization. This was done through a comparative analysis of the chemical kinetics of the hydrogen-blended flames and the methane-blended flames using the reaction mechanism by Okafor et al. [1] and that by Nakamura et al. [2].

It was found that Okafor's mech satisfactorily predicts the measured unstretched laminar burning of  $\text{NH}_3\text{-CH}_4\text{-H}_2\text{O}\text{-air}$  flames, capturing the diluting effects of water vapor on the laminar burning velocity as shown in Fig. 1. However, the mechanism underpredicts the measured data for  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{-H}_2\text{O}\text{-air}$  flames as shown in Fig. 2. Okafor's mech, even though satisfactorily models the combustion of ammonia-air flames and hydrogen-air flames, may not model the interaction of ammonia chemistry and hydrogen chemistry. The laminar burning velocity of  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{-H}_2\text{O}\text{-air}$  flames is more satisfactorily predicted by Nakamura's mech as shown in Fig. 2.

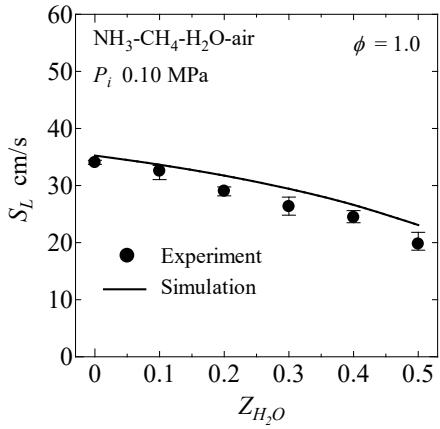


Fig. 1 Variation of the unstretched laminar burning velocity with the water vapor dilution ratio in  $\text{NH}_3\text{-CH}_4\text{-H}_2\text{O}\text{-air}$  flames.

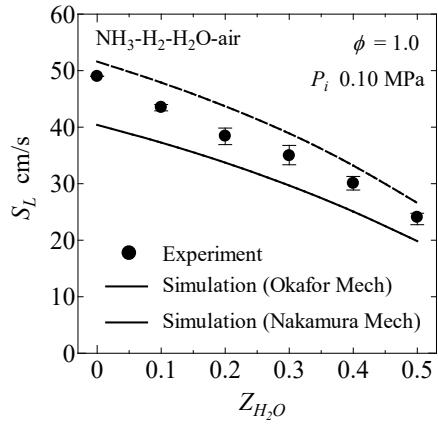


Fig. 2 Variation of the unstretched laminar burning velocity with the water vapor dilution ratio in  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{-H}_2\text{O}\text{-air}$  flames. The experimental data for  $Z_{\text{H}_2\text{O}} = 0$  is from Lhuillier et al. [3]

Sensitivity coefficients for the  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{-H}_2\text{O}\text{-air}$  flames was calculated using Okafor's mech for comparison with results from Nakamura mech as shown in Fig. 4 and 5. Both reaction mechanisms predict essentially similar rate limiting reactions for the flame. A noteworthy observation from the results of both reaction mechanisms is the relevance of the  $\text{N}_2\text{H}_x$  reactions to the prediction of the flame speed of the hydrogen containing flames. These reactions are important in modelling the interaction between the hydrogen chemistry and ammonia chemistry in flames with a relatively high concentration of both fuels. They were found to be less important in the methane-containing flames in this study. It is considered that the underprediction of the measured data by Okafor's mechanism is mainly due to the influence of these  $\text{N}_2\text{H}_x$  reactions and were marked for optimization in future studies.

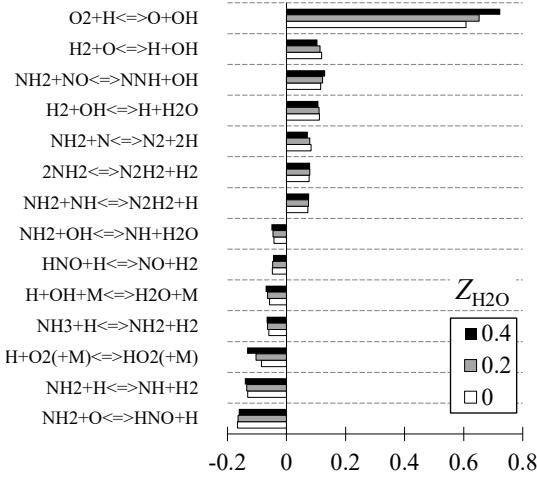


Fig. 4 Sensitivity coefficients for  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{-H}_2\text{O}\text{-air}$  flames calculated using Nakamura's mech.

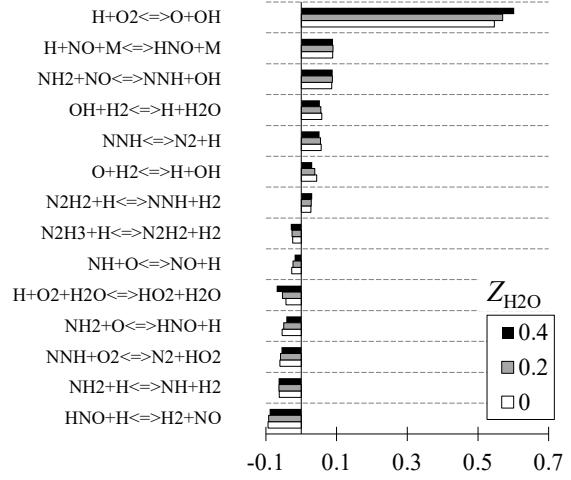


Fig. 5 Sensitivity coefficients for  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{-H}_2\text{O}\text{-air}$  flames calculated using Okafor's mech.

## References

- [1] E.C. Okafor, Y. Naito, S. Colson, A. Ichikawa, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, *Combust. Flame*, 187 (2018) 185-198.
- [2] H. Nakamura, S. Hasegawa, T. Tezuka. *Combust. Flame*, 185, (2017), 16–27.
- [3] C. Lhuillier, P. Brequigny, N. Lamoureux, F. Contino, C. Mounaïm-Rousselle. *Fuel*, 263, (2020), 2020116653.

### 3. Achievements

Detailed analysis of the chemistry of the flames have revealed important chemical reaction steps which will be optimized in the future to improve the prediction of the flame speeds by Okafor's mech.

### 4. Summaries and future plans

It has been shown that Okafor's mechanism does not satisfactorily predict the unstretched laminar burning velocity of hydrogen blended ammonia-water flames owing to the influence of the  $\text{N}_2\text{H}_x$  sub-chemistry. In future studies, the reaction rates and the thermochemical properties of the  $\text{N}_2\text{H}_x$  reactions and species, respectively will be optimized for Okafor's mechanism.

### 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] Ekenechukwu C. Okafor, Masao Hayashi, Taku Kudo, Akihiro Hayakawa, Toshiaki Kitagawa: Comparative Analysis of the Chemical Kinetics of Premixed  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{-H}_2\text{O-Air}$  and  $\text{NH}_3\text{-CH}_4\text{-H}_2\text{O-Air}$  Stoichiometric Flames, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-1, pp. 16-18.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

課題番号	J23I056
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	3年目

**カーボンナノチューブ分散樹脂基複合材料の導電性メカニズムの解明**  
**Conductive Mechanism of Carbon Nanotube Dispersed Resin Based Composite Materials**

中山 昇\*†, 武田 翔\*\*††, 井上 博輝\*\*\*

内一 哲哉\*\*

\*信州大学大学工学部, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*信州大学大学院総合理工学研究科

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

感圧導電性ゴムは、絶縁性のゴム材料と炭素などの導電フィラーからなる複合材料であり、荷重負荷により抵抗値が変化する特性を有するため荷重センサへの利用が期待されている。シリコーンゴム(Silicone)を母材とし、導電フィラーに気相成長炭素繊維(VGCF)を用いたSilicone/VGCFが作製された。しかし、Silicone/VGCFは軽荷重による初期変形で大半の導電パスが形成されるため抵抗値が急激に低下し、さらなる荷重の増加に伴う変形によって残りの導電パスが徐々に増加していくと考えられるため、軽荷重から高荷重まで測定するような感圧導電性ゴムとしては使用できない。高荷重まで抵抗が変化し続けるようなセンサ材料の作製手法として、Silicone/VGCFの発泡成形が挙げられる。発泡させることで内部組織が多孔質構造となり、導電体の接触による導電パスの変化が広いひずみ領域で起こると考えられる。本研究では、VGCFの体積比率が異なるSilicone/VGCF発泡体(以下、Silicone/VGCF foamと示す)を作製し、荷重と抵抗値の関係を明らかにした。

## 2. 研究成果の内容

母材樹脂にはシリコーンゴム(KE-1300T, 信越化学工業株式会社), 硬化剤(CAT-1300, 信越化学工業株式会社), 希釀剤(RTV, 信越化学工業株式会社)を用いた。導電フィラーには繊維径が150nm, 繊維長が8μmの気相成長炭素繊維(VGCF, 昭和電工株式会社)を用いた。発泡剤には平均粒径が9~15μmの熱膨張性マイクロカプセル(HF-48D, 松本油脂製薬株式会社)を用いた。HF-48Dは90~135°Cで加熱することにより体積が50~100倍に膨張する。

シリコーンゴムの主剤、硬化剤、希釀剤を質量比率で45:5:50の割合で混合した。VGCFをシリコーンに対して3~10%の体積比で段階的に変化させて添加した。シリコーンとVGCFを合計した質量に対して3%のマイクロカプセルを添加した。材料の混合には遊星式真空ミキサー(ARV-310, 株式会社シンキー)を用いた。大気圧下で3分攪拌し、0.6kPaまで減圧しながら2分攪拌と脱泡を行う。作製した混合液を金型(3×10×15mm)に充填し、恒温器(そよかぜ、株式会社いすゞ製作所)で40°C、4h保持することで固化させた。

固化後は、恒温器(SDW70, 株式会社三商)で130°Cに達するまで加熱し、マイクロカプセルを膨張させることでSilicone/VGCF foamを作製する。また、マイクロカプセルを膨張させていない試料(以下、Silicone/VGCF/MCと示す)を比較材料に用いた。

本研究で用いた電気的特性の評価装置を図1に示す。Silicone/VGCF/MCおよび

Silicone/VGCF foam を 2 枚の電極基板によって挟み込み、安定化電源にて  $V_0 = 5V$  一定の電圧に制御する。固定抵抗  $R_0 = 1k\Omega$  とした。垂直荷重  $P_n$  を負荷したときの電圧  $V$  を PC、センサインターフェイス(株式会社共和電工, PCD320A)を用いて計測した。垂直荷重は万能試験機(株式会社島津製作所, EZ Test)によって垂直荷重  $P_n$  を  $P_n = 0\sim100N$  と連続的に負荷させた。計測回路は、定電圧源、固定抵抗および可変抵抗による分圧回路とし、電圧  $V$  を式(1)に代入し、電気抵抗  $R_x$  を求めた。

$$R_x = \frac{V_0}{V_0 - V} R_0 \quad (1)$$

Silicone/VGCF/MC および Silicone/VGCF foam に垂直荷重  $P_n$  を負荷したときの垂直荷重  $P_n$  と電圧  $V$  の関係の代表例を図 2 に示す。図 2 より、電圧  $V$  は垂直荷重  $P_n$  に対して連続的に減少した。図 2 で得られた電圧  $V$  から電気抵抗  $R_x$  を求めた。垂直荷重  $P_n$  と電気抵抗  $R_x$  の関係の代表例を図 3 に示す。図 3 より、電気抵抗  $R_x$  は垂直荷重  $P_n$  の増加に伴って、減少していることがわかる。また、VGCF の体積比率が 4% の Silicone/VGCF/MC は荷重が 10N 以上では抵抗値があまり変化しない。一方、VGCF の体積比率が 4% の Silicone/VGCF foam は負荷したすべての荷重において抵抗値が減少しており、Silicone/VGCF/MC よりも高荷重まで抵抗値が変化するセンサ材料になりうることが示唆された。

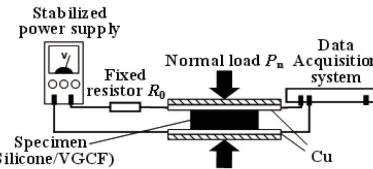


図 1：電気的特性の評価装置の概略図

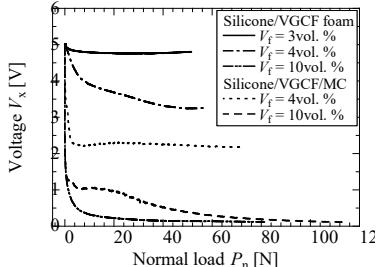


図 2：垂直荷重  $P_n$  と電圧  $V$  の関係

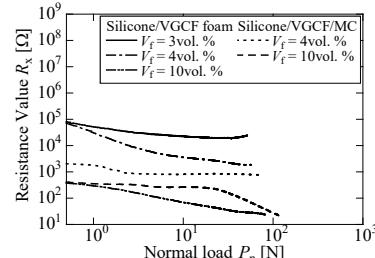


図 3：垂直荷重  $P_n$  と電気抵抗  $R_x$  の関係

### 3. 研究目標の達成状況

低荷重から高荷重まで抵抗が変化する導電性材料の開発ができ、達成度は 80% である。

### 4. まとめと今後の課題

Silicone/VGCF 発泡体を作製し、荷重と抵抗値の関係を明らかにした。今後は、抵抗変化の原理を明らかに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] N. Nakayama, H. Inoue, M. Horita, S. Takeda, T. Uchimoto: Influence of Volume Fraction of Carbon Nanofibers on Electrical Characteristics of Foam Rubber Matrix Composite, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-23, pp. 77-78.

[2] 中山昇, 井上博輝, 堀田将臣, 武田翔, 内一哲哉: 発泡ゴム基複合材料の電気的特性に及ぼすカーボンナノファイバーの体積比率の影響, 日本実験力学会講演論文集, No.23, (2023), pp. 105-106.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）なし

Project code	J23I057
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year (progressing)

## Hybridization of Nanocellulose with Silver Nanoparticles for the Fabrication of Antibacterial Filament Composites by a Field-assisted Flow Focusing Method

Hidemasa Takana\*†, Dylan Edmundson\*\*

Anthony B. Dichiara\*\*††

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*College of Forest Resources, University of Washington

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The overall objective of this project consists of producing macroscopic filaments comprising aligned TEMPO oxidized cellulose nanofibrils (CNFs) pre-adsorbed with silver nanoparticles (AgNPs) for antibacterial applications.

### 2. Details of program implement

This research is divided into two main tasks, as described below. The first task will be completed at the University of Washington under PI Dichiara's leadership, while the second task will be performed at the Institute of Fluid Science under the supervision of PI Takana.

1) Hybridization between CNFs and AgNPs: Faceted AgNPs will be synthesized under environmentally benign conditions using TEMPO oxidized CNFs as both shape-regulating, reducing and stabilizing agents, according to our previously established procedure. Briefly, Tollen's reagents ( $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ ) will first be prepared by adding aqueous ammonia hydroxide of 2 wt% to 2 wt% silver nitrate ( $\text{AgNO}_3$ ) solution until the newly formed solid precipitate dissolved to give a clear solution. Then, the resulting Tollen's reagents will be added to the CNF suspensions in various proportions and the mixtures will be heated to 80 °C in a water bath for 120 min under constant stirring. After cooling to room temperature, the mixtures will be reacted with different quantities of  $\text{H}_2\text{O}_2$  to modulate the shape and size of AgNPs. As-synthesized CNF/AgNP dispersions will then be centrifuged and washed with deionized water prior to their implementation in the field-assisted flow focusing channel. The CNF/AgNP dispersions will be characterized by absorption spectroscopy and transmission electron microscopy.

2) Preparation and characterization of hybrid filaments: As-prepared CNF/AgNP dispersions will be fed through a continuous flow-focusing microfluidic channel to prepare macroscopic filament composites. Pristine filaments comprising TEMPO-oxidized CNFs in the absence of AgNPs will also be generated for comparison purposes. The fabrication procedure is well described in our previous publication. Different channel geometries and applied voltages will be examined to study respectively the effects of electric field on the nanoparticle orientation in material. The structure of the filament composites will be characterized by scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, and X-ray diffraction, while their electrical and mechanical properties will be assessed using a Keithley source meter

unit equipped with a two-probe system and a uniaxial tensile tester, respectively. In addition, the antibacterial activity of the hybrid filaments against *Escherichia coli* (gram-negative) and *Staphylococcus aureus* (gram-positive) will be studied based on our film co-culture method.

### 3. Achievements

Tollen's reagent (i.e. silver ammonia solution,  $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2\text{OH}$ , prepared by the dropwise addition of 5 % ammonia into a 2 mM silver nitrate solution, was added to the CNF suspensions at various ratios. The mixtures were brought to 80 °C under vigorous stirring until the immobilization of zero-valent nanoparticles (NPs) on the CNF surface was completed from the subsequent adsorption and reduction of Ag ions on the CNF surface. The reagentless formation and immobilization of colloidal Ag NPs onto the CNF surface was visualized by the color change of the liquid mixture, which turned from nearly translucent to golden yellow after a few minutes (**Fig. 1a**). The colloidal AgNPs dispersions darkened with increasing Tollen's reagent concentrations, indicating that more AgNPs formed at higher silver precursor concentrations. The formation of AgNPs was further confirmed by the surface plasmon resonance (SPR) peak at 410 nm in the absorption spectra (**Fig. 1b**). As the Tollen's reagent concentration increased, the intensity of the absorption peak increased, but the SPR peak remained at approximately 410 nm, indicating that the size and shape of AgNPs was similar in all cases.

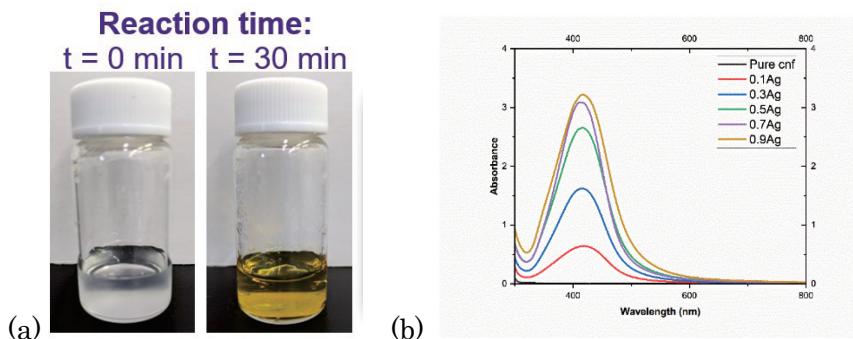


Figure 1: (a) Photos of the aqueous CNF and Tollen reagent mixture before and after reaction at 80 °C under constant agitation. (b) UV-vis absorption spectra of aqueous Ag@CNF dispersions prepared with different amounts of Tollen's reagents.

The resulting Ag@CNF suspensions were then fed through a continuous flow-focusing microfluidic channel to prepare macroscopic filament composites. Pristine filaments comprising pure CNFs without any AgNPs were also generated for comparison purposes. The diameter of as-prepared filaments remained relatively constant around 85  $\mu\text{m}$  regardless of the Ag content. The Ag content of as-prepared filaments can be simply tailored by adjusted the addition level of Tollen's reagent into the CNF suspension prior to the flow-focusing process, as demonstrated by filaments' absorbance measured using a UV-vis spectrophotometer equipped with an integrating sphere and following Beer's law (**Fig. 2**).

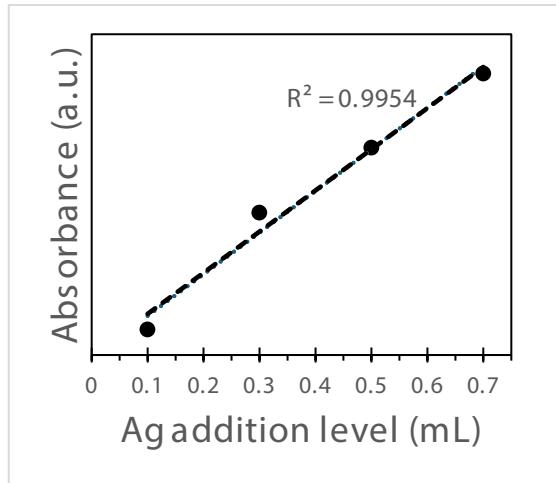


Figure 2. Evolution of the filament composites' absorbance as a function of their Ag content

Electron microscopy coupled with energy dispersive spectroscopy (EDS) was conducted to examine the distribution of Ag NPs within the filaments. High-resolution SEM micrographs showed the presence of nanoparticles with different shapes and sizes on the external surface of the filaments. This may indicate the tendency of Ag metal to form clusters comprised of several smaller nanoparticles. Representative EDS mapping of the surface and cross-section of filaments nanocomposites prepared at the highest Ag content revealed that the Ag NPs (highlighted in green) were evenly dispersed within the filament (Fig. 3).

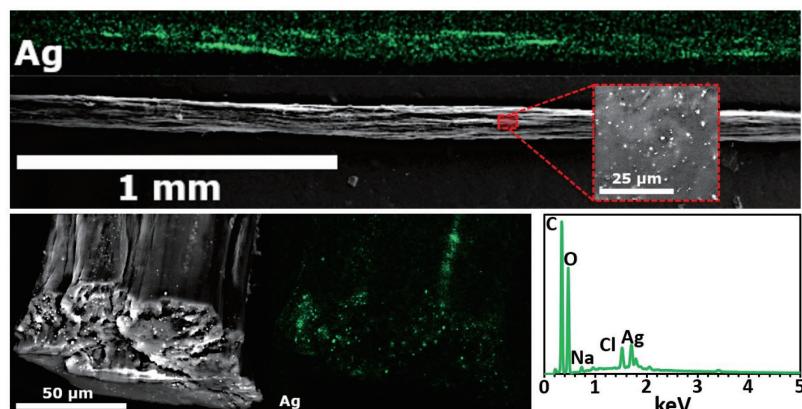


Figure 3. Representative SEM images and EDS mapping of the surface and cross-section of a filament nanocomposite prepared at a Ag addition level of 0.7 mL

#### 4. Summaries and future plans

The next reporting period will focus on characterizing the antioxidant and antibacterial properties of as-produced Ag@CNF filament composites. The following methods will be implemented.

##### 1) DPPH method based on the study from Bhakya et al. 2016

Soak 2-3 samples (i.e. filament replicates) into DPPH solution (1-5 mL) prepared at 1 mM in methanol and vortexed thoroughly. Incubate the mixture at room temperature in the dark for 30 min. Measure the absorbance at 517 nm using a UV-Vis spectrophotometer. DPPH without any sample is used as a control and methanol

is used as the blank solution. The free radical scavenging activity can be expressed as the percentage of inhibition determined with the following formula:

$$\%scavenging = \frac{A_c - A_s}{A_c} \times 100$$

2) Hydrogen peroxide method from the work of Keshari et al. 2016

Soak 2-3 samples (i.e. filament replicates) with 0.3 ml phosphate buffer (50 mM, pH = 7.4) and 0.6 ml hydrogen peroxide solution (2 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in phosphate buffer, 50 mM, pH = 7.4). The mixture is vortexed thoroughly and incubated for 10 min prior to measuring the absorbance at 230 nm using a UV-Vis spectrophotometer. The H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> scavenging activity can be calculated based on a similar equation that used in the DPPH method.

3) Differential scanning calorimetry (DSC)

Place 3-4 mg of material in a crucible to be loaded in the DSC instrument using the following temperature program: heat from room temperature to 350 °C at a rate of 5 °C /min under an oxygen atmosphere (50 mL/min). The onset temperature values from the DSC oxidative thermograms will be analyzed to determine the antioxidant properties of the materials.

4) Antibacterial properties

We propose the use the diffusion method to assess the antimicrobial susceptibility of the Ag@CNF filament composites. To this aim, agar plates will be inoculated with either a gram-positive or a gram-negative bacteria and the samples will be placed on the agar surface. After incubation at 37 °C for 24 h, the size of the zone of inhibition will be measured.

## 5. Research results

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

[1] H. G. Wise, H. Takana, and A. B. Dichiara: Dynamic Assembly of Strong and Conductive Carbon Nanotube/Nanocellulose Composite Filaments and Their Application in Resistive Liquid Sensing, *ACS Applied Materials and Interfaces*, Vol. 15, No. 30, (2023), pp. 36647-36656, doi: 10.1021/acsami.3c03906.

### 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.

[2] A. B. Dichiara, H. G. Wise, and H. Takana: Dynamic Assembly of Strong and Conductive Carbon Nanotube/Nanocellulose Composite Filaments, *Proceedings of the Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS5-1, pp. 462-463.

### 3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not Applicable

(Award) Not Applicable

(Press release)

[1] Techplus, 「東北大、CNFにCNTを混合させて新たな高導電性複合セルロース繊維を開発」, July 19, 2023.

[2] 日経産業新聞, 「微量の水検知、東北大が新繊維 精密機器内のセンサーに」, July 31, 2023.

[3] 日経XTECH, 「CNTにCNFを巻き付けて強度と導電性を両立、次世代センサーへ」, August 1, 2023.

[4] NIKKEI Tech Foresight, 「東北大、高強度のCNT・CNF導電性複合繊維 電子部品に」, August 1, 2023.

Project code	J23I058
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical cares
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	2nd 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 Australia

\*\*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, and artery morphology – on the mechanical property of aorta and carotid arteries, by performing structural analysis simulations with patient-specific blood vascular models, while a series of artery stiffnesses defined at different sections of the arterial model to mimic more sophisticated and realistic artery wall functions.

### 2. Details of program implement

Arterial stiffness has been established as a predictor of adverse cardiovascular events [1]. As an independent predictor of hypertension, arterial stiffness can be described as the loss of distensibility and compliance of blood vessels from an engineering perspective. Studies have shown that stiffness of major arteries are also associated with the generation of atherosclerosis and the development of vascular dementia [2-3]. Interestingly, 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 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 patient-specific vascular geometry of the aorta and carotid arteries was used in this study. To investigate the impact of aortic stiffness on carotid arteries, a series of simulations were performed with different levels of Young's modulus respectively set for different sections of the aorta. Two realistic pressure wave was applied on the inner wall of the entire geometry, with pulse pressures (PP) of 5994 Pa (PP1) and 7369 Pa (PP2), while fixed supports were defined at all openings of the model. Linear transient simulations of a single-layered aorta-carotid model were then performed in ANSYS Workbench 2020 R2 (ANSYS, USA).

The effects of increased aortic stiffness on different segments of the aortic tree, including the ascending, descending aorta, and the aortic arch were explored.

The compliances of all segments of the aorta and carotid arteries at two pulse pressures significantly decrease with the increases of the Young's modulus. The highest compliance difference is noted in the ascending aorta and the aortic arch, 57 and 54 % decrease between Case 1 and Case 5 (Figure 1).

We further applied different levels of Young's modulus to different segments of the aorta across cases. This allows us to examine whether fixed aortic Young's modulus for different regions of the aorta can affect either the left or right carotid arteries. Both left and right carotid arteries showed a decrease in the local compliance with the increase of the aortic Young's modulus. Across both pulse pressures, the left carotid artery was less compliant than the right carotid artery, with a percentage decrease of 11 and 7 %, respectively. Moreover, we observed changes in local compliance with significantly lower levels around the bifurcation and anatomical bends of the carotid arteries when aortic compliance was reduced.

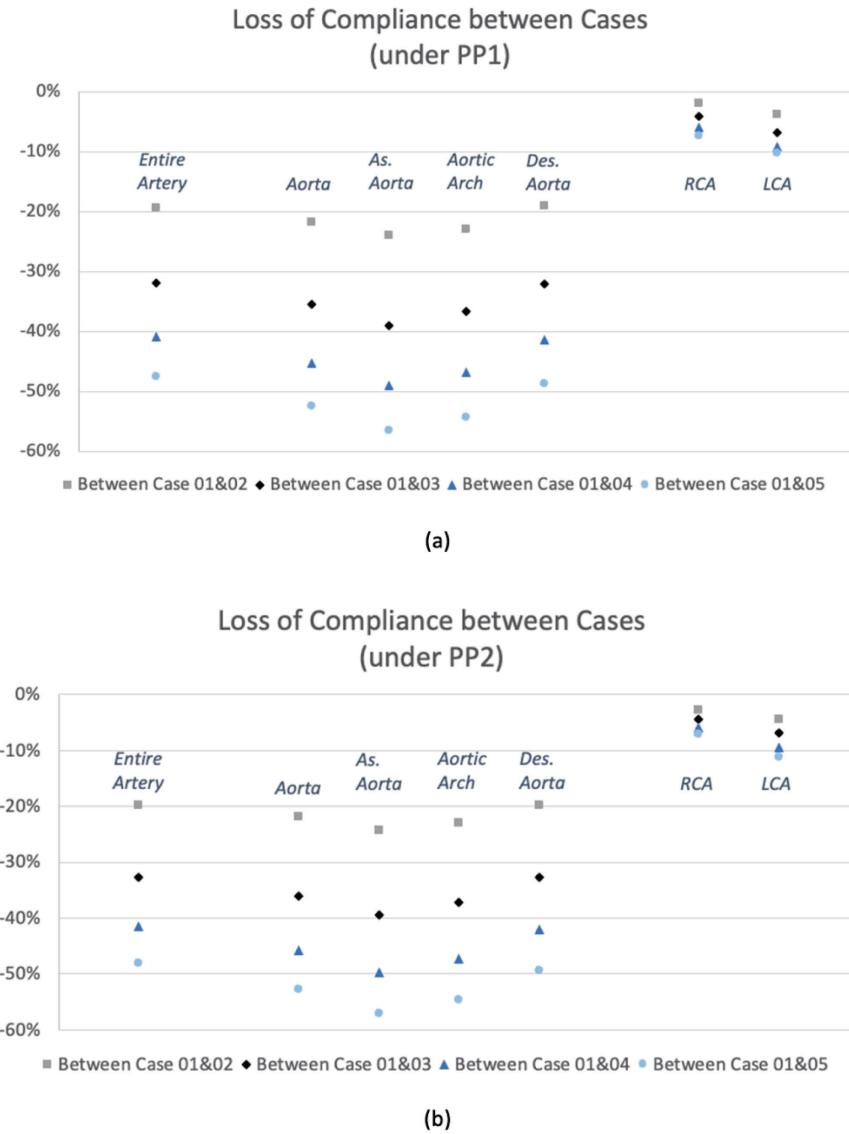


Figure 1: Loss of compliance between cases with different Young's modulus under two pulse pressures.

### 3. Achievements

This study created patient-specific arterial models and develop a novel computer simulation model aimed at evaluating the intricate mechanical interactions between the aorta and carotid arteries, with a series of arterial stiffness on different sections

studied. Furthermore, the quantitative results of the influence on vascular deformation and compliance by varying arterial stiffnesses have been obtained.

#### 4. Summaries and future plans

Through the first two years, we have obtained results indicating that the change in Young's modulus and pressure conditions create substantial impacts on the mechanical properties of the artery. In future, the influence of varying stiffnesses for different arterial sections on a range of mechanical properties are expected to be analysed.

#### 5. Research results

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

[1] M. Petrova, Y. Li, A. Gholipour, H. Kiat, C.S. McLachlan: The influence of aortic stiffness on carotid stiffness: computational simulations using a human aorta carotid model, *R. Soc. Open Sci.* 11(2024): 230264.

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.

#### 6. Reference

[1] P. Palatini et al., *Vasc. Health Risk Manag.*, (2011), 725.

[2] A. de Havenon, K.-H. Wong, A. Elkhetali, J. S. McNally, J. J. Majersik, N. S. Rost, *Am. J. Neuroradiol.*, 40(8), (2019), 1369–1373.

[3] A. F. Logsdon, B. P. Lucke-Wold, C. L. Rosen, J. D. Huber, *Primer on Cerebrovascular Diseases*, (2017), 162–167.

課題番号	J23I059
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目（発展）

## 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\*†, 坂井 玲太郎\*\*, 菊地 亮太\*\*\*, 兼久 勇人\*, 儀間 南軌, 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できるものである。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が重要である。これらの背景のもと、本研究は、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、車両を安定に制御す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、迎角変化に対する最大揚力係数および有害抗力係数の算出し、機体の基本特性を得るとともに、横滑り角に対する揚力係数、ヨーイングモーメントおよびローリングモーメントを含めた 6 分力を計測することで機体の横揺れと偏揺れに対する空力特性を把握する。計測にあたっては、図 1 で示すように供試モデルの下面 2 か所を 6 分力天秤に繋がったストラット支持部に設置する。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 2 月 26 日～3 月 1 日に実施した。なお、供試モデルは図 2 で示すように 3D プリンターで製作し、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消している。

図 3 に風洞実験を実施した結果例として、迎角を変化させた際に働く揚力、および抗力の結果を示す。なお、横軸はゼロ迎角、縦軸は無次元化処理をまだ充分に実施していない。しかし、揚力については迎角が大きくなるにつれて上昇し、15 度付近で低下している。一方、抗力については 5 度付近で最小値を得ている。この結果より、最大揚力や有害抗力といった空力設計に必要なデータを得ることができたこと考える。また、本研究ではその他の力、お

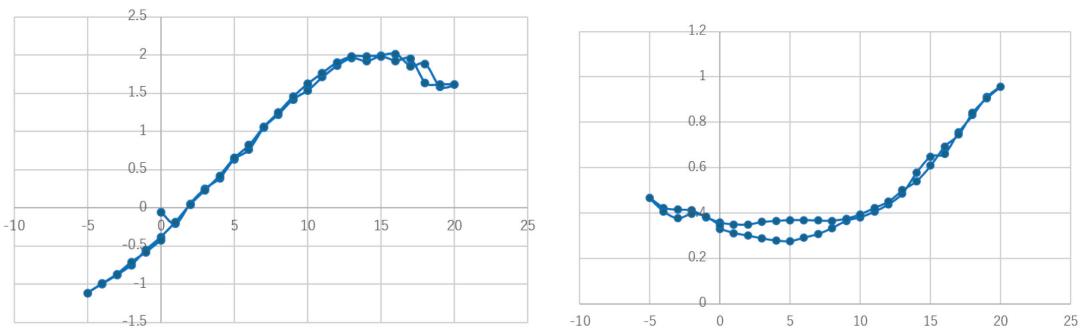
および横滑り角に対するデータなども得ており、現在はこれらデータを精査中である。



図 1：供試モデルの設置例



図 2 作成した供試モデル



(a) 迎角変化に対する揚力 (b) 迎角変化に対する抗力

図 3：風洞実験の結果例

次に、図4に6自由度のフリー飛行シミュレーションの結果を示す。飛行軌跡は $(0, 0, -1000)$ を始点とし、機体の高度が見やすくなるように地面までの垂直線を図示した。その結果、飛行機は高度を変えながら右旋回飛行をしていることが確認できた。現在は、風による擾乱を受けたときの飛行時の安定微係数の算出、および飛行軌跡の確認を進めている。

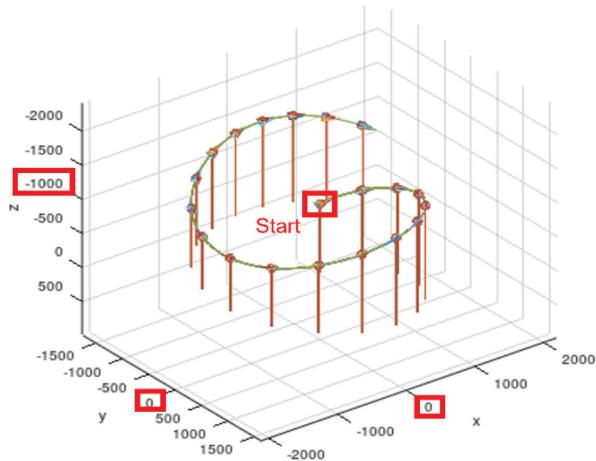


図 4：6自由度のフリー飛行シミュレーション結果例

### 3. 研究目標の達成状況

本研究は、現在データの分析中ではあるが風洞実験を通じて空陸両用車の空力設計に必要な 6 分力データを得ることが出来た。現在は、それらのデータは解析中である。また、6 自由度のフリーフライトシミュレーションを実施できた。[達成度：80%]

### 4. まとめと今後の課題

本研究は、風洞実験により空陸両用車の空力設計に必要な 6 分力データを得るとともに 6 自由度のフリーフライトシミュレーションを実施した。今後は、今回実施した実験の再現性を確認するとともに、高忠実な流体計算ソフト FaSTAR などを通じて予測精度を高めていく。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）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] S. Morizawa, R. Sakai, R. Kikuchi, and S. Obayashi: Initial Study for the Construction of Phenomenology based Control Law for a Roadable Aircraft during Landing phase around Okinawa's Islands, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CFR-54, pp.149-152.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J23I060
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	3rd year

## Explore the Shaping Effects of Arteriovenous Fistula on Haemodynamics in Patients Receiving Haemodialysis

Mingzi Zhang\*†, Makoto Ohta\*\*††

Itsu Sen\*, Yujie Li\*, Hitomi Anzai\*\*, Takeda Kazuki\*\*

\*Department of Biomedical Sciences, Macquarie University

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

By harnessing breakthroughs in image segmentation, design refinement, and computational fluid dynamics, this project aims to unveil the optimal configuration for arteriovenous shunts, ensuring superior hemodynamic efficiency. The goal is to mitigate the risk of arterial occlusion or stenosis following treatment.

### 2. Details of program implement

Research suggests that the branching angles of arteriovenous fistulae (AVF) play a pivotal role in shaping the growth and progression of the associated vasculature. Investigations have unveiled irregular flow patterns and wall shear stress (WSS) distributions [1,2]. Yet, past studies predominantly concentrated on AVF models featuring acute anastomosis angles, overlooking those with obtuse angles. Bridging this research gap, this project delineated and examined geometries spanning diverse angles to assess their influence on disturbed flow and crucial hemodynamic parameters such as WSS distribution.

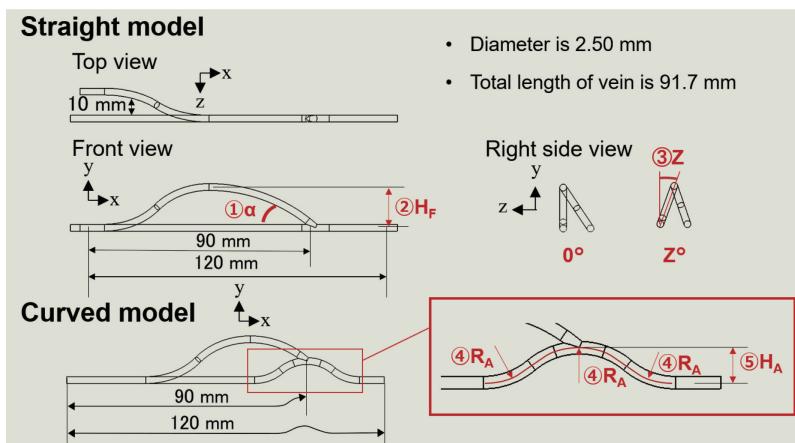


Figure 1: Geometric parameters of the arteriovenous fistulae supporter design determined to be analysed. Design object parameters are coloured in red.

Following the determination of design parameters, a series of models representing arteriovenous fistulae (AVF) with diverse angles, anastomosis heights, and curvatures (as illustrated in Figure 1) were constructed and discretised into approximately three million elements for computational fluid dynamics (CFD) analysis. Ansys CFX, a

commercial software developed by Ansys Inc., USA, was utilised for the simulations, which were conducted on the Integrated Super-computation System housed at the Institute of Fluid Science, Tohoku University. Time-varying boundary conditions were imposed on the proximal artery and vein outlet, set at flow rates of 231 ml/min and 173 ml/min, respectively.

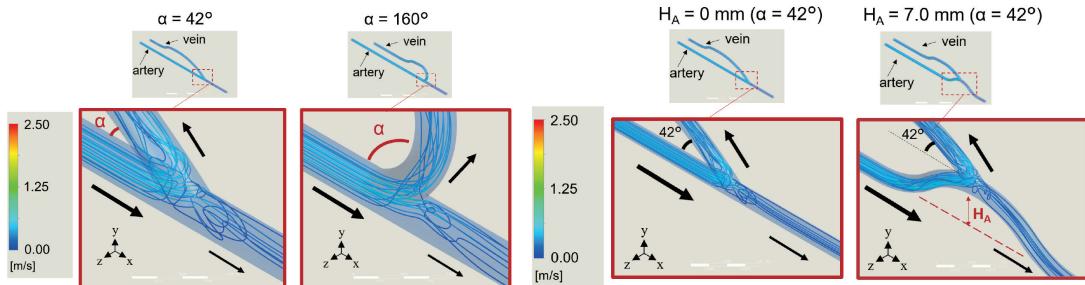


Figure 2. Streamlines visualisation corresponding to different angles (Left) of anastomoses and heights of the native artery (Right) to be elevated for the anastomoses.

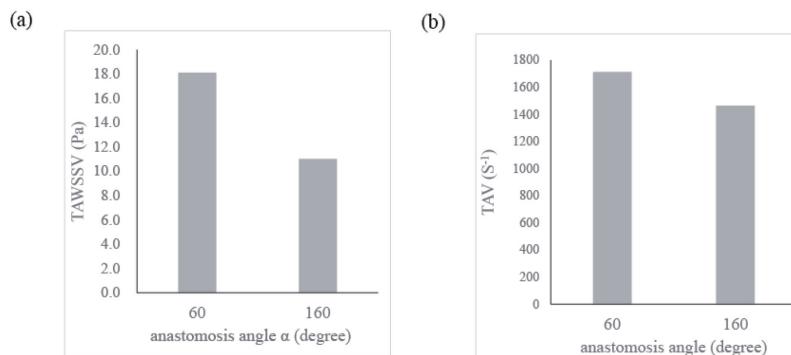


Figure 3. Differences in time-averaged wall shear stress (TAWSS) and time-averaged average vorticity (TAV) between models with different anastomosis angle.

To assess the hemodynamic effects of the AVF angle and the height of the native arteries to be elevated to the side of the bypass vein, streamlines, time-averaged wall shear stress (TAWSS) and vorticity (TAV) were calculated. Figures 2 depict the streamlines and flow pattern changes relative to variations in anastomosis angle, curvature, and height. The results suggest that the flow disturbance tends to decrease as the anastomosis height and curvature increase, as well as when the anastomosis angle becomes obtuse. Figure 3 presents such differences and trends in TAWSS and TAV between anastomosis with acute and obtuse angles.

### 3. Achievements

We have identified the optimal structure of the AVF supporter for individual ESRD patients in need of haemodialysis by CFD-based shunt structural optimisation, considering the real flow-distribution ratio at the arteriovenous bifurcation.

### 4. Summaries and future plans

The project has successfully delineated haemodynamic variations resulting from alterations in the angle of AVF. This discovery marks a crucial milestone in our journey towards comprehending the influence of various morphological characteristics on AVF development. Through continued exploration and analysis of these features, we have attained a deeper understanding of the intricate interplay between morphology and AVF

evolution.

It's widely acknowledged that AVF models with diverse morphological attributes exhibit distinct flow dynamics. Our findings underscore the significant impact of AVF angle adjustments on hemodynamic performance, hinting at the potential benefits of employing obtuse angles for AVF development. Nonetheless, to achieve a more holistic understanding of the intricate relationship between haemodynamics and morphological features, further animal studies and pre-clinical trials into variables such as vessel diameter, anastomosis angle, and curvature is imperative.

**5. Research results**

1) Journal

No applicable

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

No applicable

3) Patent, award, press release etc.

No applicable

**Reference**

[1]B.Ene-Iordache *et al.* *Nephrology Dialysis Transplantation*, 27.1(2012),358-368.

[2]C.V.Cunnane *et al.* *Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 35.12(2019),e3259.

Project code	J23I061
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Upscaling Flow in Geothermal Fractured System Using Digital Rock Physics and Machine-Learning

Julien Maes\*†, Anna Suzuki\*\*††

\*Institute of GeoEnergy Engineering

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Geothermal energy is a promising solution for clean domestic energy generation due to its low carbon dioxide emissions and high utilization rate. Characterizing subsurface fluid flow is crucial to effective geological resource development. Well tracer testing is an important method for understanding underground fluid flow and the influences of injected water. By introducing chemically inert solute tracers into the injection fluid, we can track their migration and analyze flow characteristics to aid in the assessment of well connectivity and reservoir behavior.

Previous research proposed estimating fracture network structures based on tracer response data, assuming the surface areas of flow paths are known. However, it is difficult to apply this method to real-world scenarios because it is impractical to determinize the actual surface area of complex underground fractures. Suzuki et al. (*Geothermics*, 2022) shows to estimate the surface area of a single flow path through optimization of a heat transfer model. However, the actual subsurface consists of multiple flow paths, making accurate simulation difficult.

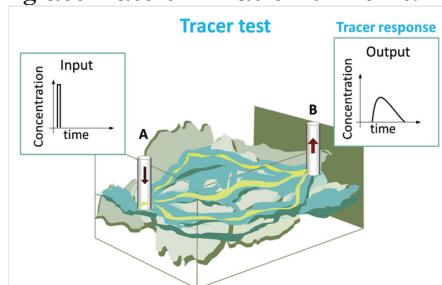


Figure 1: Schematic of tracer test.

In this study, we propose a method to analyze thermal and solute tracer responses to more reliably estimate complex fracture structures. By integrating these techniques, we aim to characterize fracture structures in geothermal systems. Additionally, Suzuki et al. (*Scientific Report*, 2021) demonstrated the potential of persistent homology (PH) analysis to describe flow path structures and to estimate flow properties. In this study, PH will be employed to extract flow path information from tracer data, and the estimation method will be validated using numerical simulation.

## 2. Details of program implement

### 2.1 Relation between fracture and flow

In our study, we consider a fracture within a rock to be a parallel plate characterized by an opening aperture  $b$ , width  $w$ , and length  $L$  as depicted in Figure 2(a). A constant flow rate  $Q$  was injected into the fracture, based on the assumption of a constant average velocity  $u$  as illustrated in Figure 2(b). we can estimate the flow-path aperture  $b$  as

$$b = \frac{Q}{w\bar{u}} = \frac{QT}{wL} = \frac{QT}{A} \quad (1)$$

where  $T$  is the residence time representing the duration that it takes for the fluid to flow between the inlet and the outlet in subsurface, and  $A$  is the flow-path surface area. To estimate the flow-path aperture  $b$  from Equation (1), it is necessary to obtain the flow rate  $Q$ , residence time  $T$ , and surface area  $A$  of the flow path. Among these parameters, the flow rate  $Q$  can be determined by measuring the flow rate at the production well. As mentioned earlier, surface area  $A$  can be estimated using a thermal tracer response. In addition, the residence time  $T$  can be obtained from the solute tracer response. By utilizing these values, the flow-path aperture width could be estimated.

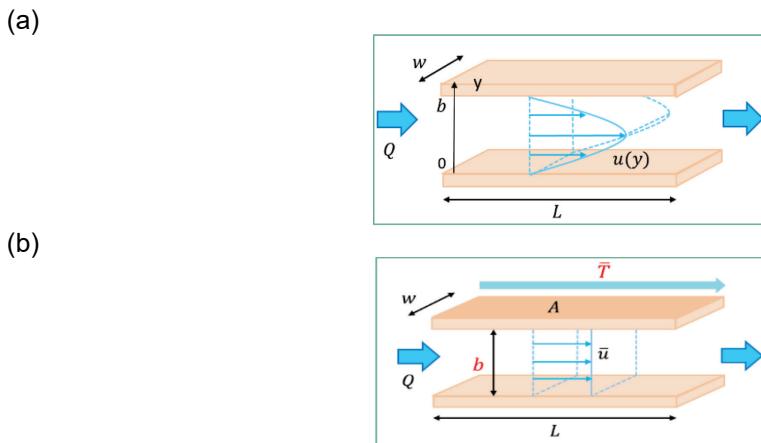


Figure 2: Flow in parallel plates (a) considering the two-dimensional Poiseuille flow and (b) converting to the average flow velocity.

### 2.2 Estimation of Flow-path Surface Area Using Thermal Tracer Responses

The heat transfer model we use assumes water flows through a confined reservoir with parallel plate geometry, bounded by impermeable rock. Advectional flow transports water within the reservoir, with heat exchange governed by the conductive properties of the rock. Thermal conduction along the fluid velocity direction is neglected. By analyzing the given variables and parameters, the model aims to describe the heat transfer processes occurring within the flow channel and the interaction between the water and the surrounding rock. Regarding the boundary and initial conditions, it is assumed that both the flow-channel fluid and the surrounding rock have a constant initial temperature. The basic model can be expanded to include the influence of multiple flow channels connecting an injection well and a production well. In this assumption, interactions between different flow channels are neglected, and the initial and boundary conditions for each flow channel remain the same as in the basic model. This simplified approach

allows for the independent analysis of each flow channel, facilitating the study of thermal behavior in the interconnected system.

By obtaining thermal tracer response (i.e., temperature drawdown observations) resulting from water injection, we can estimate the surface area of rock influencing the injected water's heat transfer. In this study, we assess uncertainty by considering not only the surface area but also the probability distributions of other model parameters. To achieve this, we employ the randomized maximum likelihood (RML) method, which is an approximate Bayesian sampling approach, to estimate the uncertainty of model parameters.

In previous studies, the advection-diffusion equation has commonly been employed to analyze solute tracer responses. Combining the result from heat tracer test, it allows for the estimation of the aperture size for each individual flow path based on their respective flow rates, mean residence times, and flow-path surface area.

We characterize flow path structures by persistent homology (PH). The method of PH analysis is shown in Fig. 3. Fig. 3(a) shows a fracture model with two holes ("flow paths"). Fig. 3(b) is a binarized voxel image of this fracture model. The filtration process in PH analysis can extract the number of flow paths and the narrowest aperture in each flow path from the image.

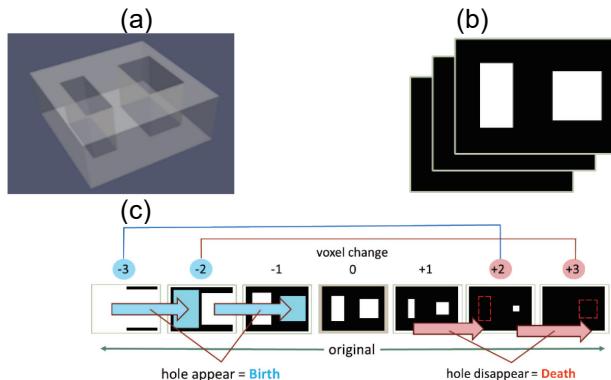


Figure 3: Schematic of filtration process for image. (a) Fracture model. (b) Cross-sectional images. (c) Filtration process

### 2.3 Numerical simulation

The method for estimating the flow-path apertures from thermal and solute tracer test data will be verified in numerical simulation. A fracture model used for the validation is shown in Fig. 4.

To obtain thermal and solute tracer responses, numerical simulations are conducted using OpenFOAM. To simulate conjugate heat transfer, a mesh of the region will be created using GeoChemFoam, our open-source pore-scale transport solver. Subsequently, a series of simulations will be performed with water at different Reynolds numbers, and outlet temperature data will be collected. For the solute tracer test data, a mesh will be generated using snappyHexMesh. The steady-state flow will be obtained using the SIMPLE method. Finally, the advection-diffusion equation will be employed, utilizing the scalarTransportFoam solver, to obtain the solute tracer response.

### 3. Achievements

Expected outcome 1 and 2 have been achieved.

Currently, we are able to obtain tracer responses in OpenFOAM. The tracer response is shown in Fig. 5. There is no clear peak, but there is a tail on the long side. Heat transfer simulations will be performed in the next step.

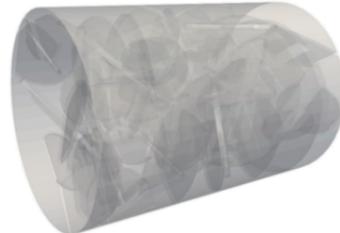


Figure 4: Fracture network model simulating fractures in rocks.

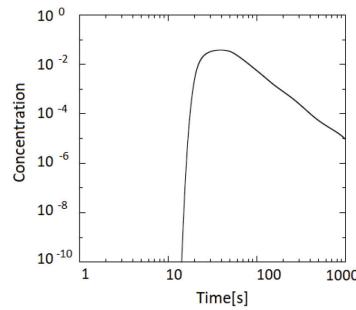


Figure 5 Tracer response simulated in OpenFOAM

### 4. Summaries and future plans

In the next step, we will estimate the flow-path apertures by analyzing the data from thermal and solute tracer responses. We will then compare these estimated values to the flow-path aperture obtained from the PH analysis. The expected results are as follows.

1. In a simple fracture model, conducting a thermal tracer test in numerical simulations can provide valuable data to estimate the surface area of flow paths in the fracture network. This data would be used to fit with the heat transfer equation to optimize the flow-path surface area, which should closely align with the surface area defined in the model. Then, by analyzing solute tracer response, we can estimate the residence time and the flow rate, enabling a fair estimation of flow-path apertures.
2. In complex fractures networks, the flow-path aperture estimated based on heat and solute tracer test should be aligning with the flow-path aperture obtained by the PH analysis

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.  
(included international conference without peer review)  
Not applicable

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

Project code	J23I062
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	2nd year

## Simulation and Optimization of Stent Geometry Design based on Numerical Simulation

Narendra Kurnia Putra\*†, Hitomi Anzai\*\*††, Muhammad Ihsan Maulana\*\*\*

Febriticetta Zahraketzia Sarwono\*\*\*, Isa Anshori\*\*\*\*, Makoto Ohta\*\*

\*Instrumentation, Control, and Automation Research Group, Faculty of Industrial Technology, Institut Teknologi Bandung

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\*\*Engineering Physics Department, Faculty of Industrial Technology, Institut Teknologi Bandung

\*\*\*\*\*Biomedical Engineering Research Group, School of Electrical Engineering and Informatics, Institut Teknologi Bandung

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Computational study has been widely utilized to predict the biofluid behaviour on various treatment such as intravascular stenting and designing the microfluidic sensor devices. Current development of computational method and algorithm has broadly improved the prediction of devices' performance and accuracy, moreover with the presence of virtual simulations, the analysis of fluid behavior from various design of treatment and diagnostics devices can be accurately predicted, this includes the implementation of virtual method of stent deployment and flow simulations under many design variations, also design optimization.

This project aims to do fluid dynamics simulation both for stent deployment and designing the microfluidic diagnostic device. The stenting simulation was developed with contact conditions on the stent-vessel interface. The simulation platform is developed in an opensource platform based on spring-mass analogy. For the microfluidic chamber, the simulation was developed for predicting the performance of the T-shape microfluidic chamber that is usually used for biosensor analysis devices.

### 2. Details of program implement.

Stent deployment simulations have been developed as the representatives of balloon expandable stent which implemented with several deployments' steps. Firstly, the simulation algorithm will be expanding the balloon on the stenosed vessel area, the expanded vessel geometry then exported as geometry files that is used in the stent deployment process. The extended vessel geometry is set as the wall boundary where the stent will be expanded on those vessel segments. The result of this simulation is shown in Figure 1. After the stent has been virtually deployed, the whole geometry can be re-exported as the wall geometry and can be used for further CFD analysis. All the deployment process has been conducted on an opensource program based on mass-spring analogy.

The second project focuses on the development of computational model of T-junction sub-millifluidic channel that usually used in the biosensor and diagnostic devices. This "T" shape consists of two perpendicular side inlet canals which flow two different

kinds of fluid: silicon oil and water. The simulation was performed in ANSYS 2022 R1 (remotely accessed to AFI supercomputer network, IFS, Tohoku University). From this simulation more understanding on the droplet generation process on the T junctions sub-milli fluidic sensor. Besides, this simulation is also beneficial for further development of this chamber for any design improvement.



Figure 1: deployment of stent inside the expanded blood vessel.

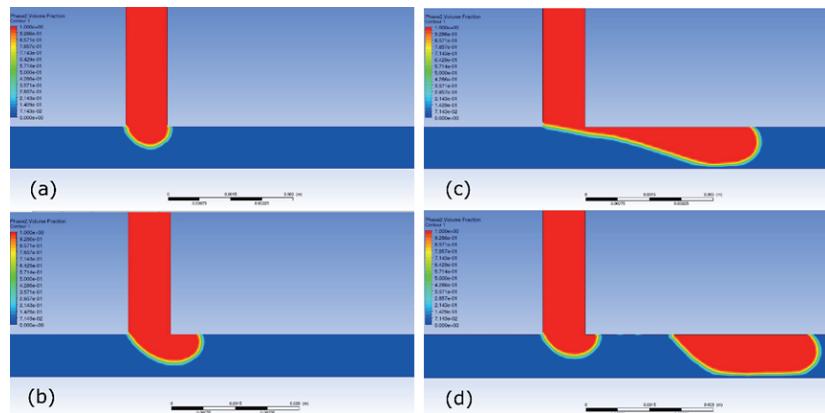


Figure 2: The mechanism of the droplet process observed in the intersection of T shape junction.

### 3. Achievements

- The open source simulation program for the deployment of the stent inside a post balloon-expanded blood vessel segment has been successfully developed.
- The computational model and simulation of T-junction sub-millifluidic channel has been developed.
- The droplet generation process on the T-junction sub-millifluidic channel can be clearly observed.

### 4. Summaries and future plans

The contact conditions of balloon expanded blood vessel segment in this project is still limited to the straight plane contact between the balloon outer surface with the blood vessel. In the realistic stent deployment, especially for the self-expandable stent, the contact conditions is set directly between stent wires and blood vessel, therefore the next project need to include this realistic contact conditions between stent wires and blood vessel wall.

The submicrofluidic channel simulation need to be evaluated by the experiment to compare the results of simulation with the real droplet generation process.

### 5. Research results

- 1) Journal  
Not applicable
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[1] N.K. Putra, F. Z. Sarwono, I. Anshori, M. Ohta, H. Anzai: Numerical Simulation of Droplet Generation on the Sub-Millifluidic Channel, *Proceedings of the Twenty-*

*third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023),  
CRF-25, pp. 81-83.

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

課題番号	J23I063
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	3年目

**自由飛行している次世代再突入カプセル圧力分布計測技術の開発**  
**Development of Pressure Distribution Measurement Technique**  
**for Free Flight Next-generation Re-entry Capsule**

永井 大樹\*\*†, 伊神 翼\*, 滝川 侑弥\*

Hirotaka Sakaue\*\*††, Daiki Kurihara\*\*, Joseph Gonzales\*\*

\*東北大学流体科学研究所

\*\*Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame

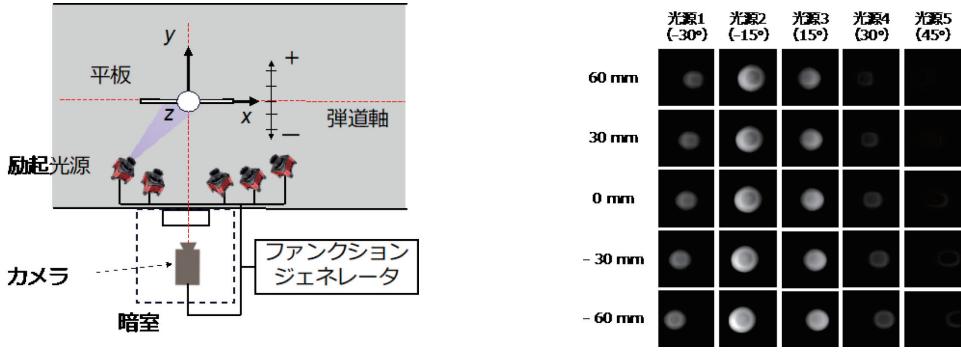
†申請者, ††所外対応研究者

## 1. 研究目的

近年, 木星圏などの深宇宙からのサンプルリターンに向けて, 新しいタイプの再突入カプセルの形状が JAXA で検討されている。その形状は, これまでの”はやぶさ”タイプのカプセルとは形状が大きく異なり, 半頂角が  $60^\circ$  と大きく, 背面に空間を有している形状となっている。このような形状のカプセルは米国で以前検討されたもののその空力的な特性や流れ場の情報はほとんどない。そのため, 将来の深宇宙サンプルリターンミッションにおける設計検討をするためには, その流れ場と模型表面の圧力分布の情報の取得が急務となっている。しかし, 風洞では模型を指示するための支持棒による流れ場が乱されるため, 自由飛行しているカプセルにおける流れ場と圧力分布の情報が必要となる。そこで本研究では, 自由飛行するカプセル形状の模型表面の圧力分布計測をすることを目的とし, その技術開発を行うことを目的とする。

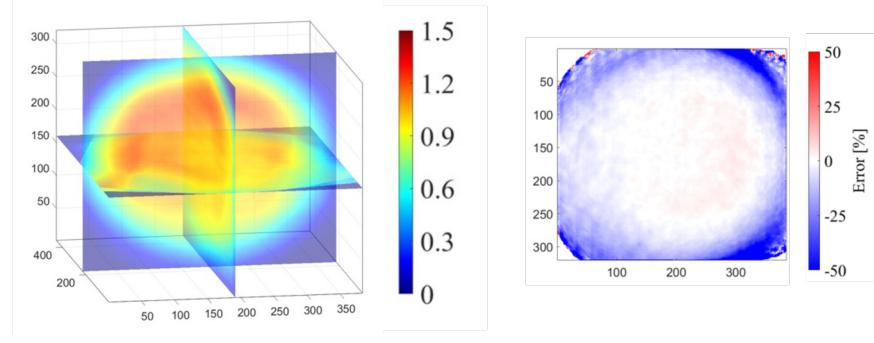
## 2. 研究成果の内容

本研究課題では, 自由飛行している次世代再突入カプセルの圧力分布を計測する方法として, 感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) 計測技術を進めている。その計測手法には, モーションキャプチャ法 (2色法) と 1色法がある。これまでに前者の手法を用いて遷音速自由飛行する球表面の圧力分布を可視化し一定の成果を得ている。ただし, その圧力分布画像は信号雑音比 (Signal-to-Noise Ratio) が十分とは言えず課題が残った。その課題として, 2つの色素を同時に塗布することによる発光・吸収などの干渉があること, もう一つは高速度カラーカメラの ISO 感度が低いことである。そこで本研究では単色 (感圧色素のみ, 1色) の PSP 計測に回帰し, さらに ISO 感度の高いモノクロカメラを用いてリファレンス画像とラン画像を別々に取得する手法を提案している。ただし克服すべき課題として, 自由飛行している物体の姿勢に合わせたリファレンス画像を別途準備する必要がある。この課題解決のために, これまでに, 飛行中のあらゆる姿勢を再現できるリファレンス画像自動取得システムの開発および励起光源の空間的な強度分布を再現する 3D シミュレーションを実施し, 飛行している模型上の照射面判定と PSP 発光分布も再現することで 3 次元空間内における疑似リファレンス画像の作成を行った。しかし正確に飛行位置に対応することができず, 励起光の空間分布の影響を排除できていない。そこで今年度では励起光の空間分布の影響を排除するため, 励起光の 3 次元分布を実験的に事前に取得し (Fig.1), 疑似的にリファレンス画像を作成して, 圧力算出を行った。また, 淀み点における計測値の妥当性を評価するため, 疑似リファレンス画像の使用を考慮した PSP 計測における圧力の不確かさを評価した (Fig.2)。



(a) 励起光分布取得におけるセットアップ

(b) 取得した励起光分布



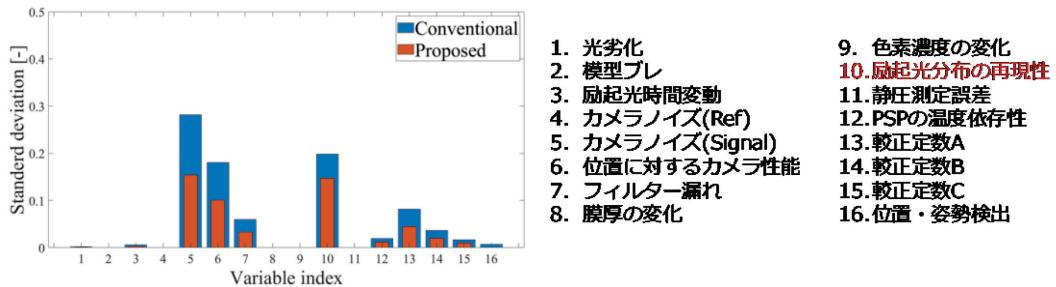
(c) 再現した励起光分布

Fig.1 3 次元励起光分布の再現

$$\frac{V}{V_{pse}} = \frac{\Pi_c}{\Pi_{c_{ref}}} \cdot \frac{\Pi_f}{\Pi_{f_{ref}}} \cdot \frac{h(\mathbf{x})}{h_{ref}(\mathbf{x})} \cdot \frac{c(\mathbf{x})}{c_{ref}(\mathbf{x})} \cdot \frac{q_0(\mathbf{\hat{X}})/q_{0_{ref}}(\mathbf{X})}{q_{pse}(\mathbf{\hat{X}}_s)/q_{pse_{ref}}(\mathbf{X}_s)} \cdot \frac{\Phi(P, T)}{\Phi_{ref}(P_{ref}, T_{ref})} + \Delta(V)$$

$V$	: Signal画像	$\varepsilon_\lambda$	: モル吸光率
$V_{pse}$	: 疑似Ref画像	$h$	: PSPの膜厚
$P$	: 圧力	$c$	: 色素濃度
$T$	: 溫度	$q_0$	: 励起光の光束
$\Pi_c$	: カメラ性能	$\Phi$	: 量子効率
$\Pi_f$	: フィルター性能		

(a) PSP 計測の誤差評価式



(b) 従来手法との不確かさの比較

Fig.2 PSP 計測における圧力の不確かさ評価

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、励起光の3次元分布を事前に取得することで、より正確な疑似リファレンス画像を取得することができた。さらに、PSP計測における不確かさ解析を行い、計測誤差における要因を明かとし、主要な要因を軽減することができた。これに預手、昨年度までに計測した結果にたいしてS/Nが向上したこと、よどみ点における圧力値が理論値により近くなった。これにより、自由飛行する物体表面上の圧力分布計測が達成できたといえる。

### 4. まとめと今後の課題

本年度までで、疑似リファレンス画像の生成と、それを用いた圧力分布算出システムの構築、計測結果の不確かさ評価を達成することができた。そのため、当初の目的である、超音速で自由飛行する物体表面上の圧力分布計測を達成することができたといえる。一方で、実用化するにはS/N向上が必須であり、そのためには、AA-PSPの改良もしくは開発を行う必要がある。今回の成果をもとに新たにテーマを立ち上げ、検討をすることとする。

### 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] Y. Takikawa, Y. Hosono, T. Ogawa, T. Ikami, H. Nagai, J. Gonzales, D. Kurihara, H. Sakaue: Development of Pressure Distribution Measurement Technique on Free-Flight Object Surface at Transonic Speed, *The 34th International Symposium on Shock Wave*, Daegu, Korea (2023), T22-0534.
- [2] Y. Takikawa, Y. Hosono, T. Ogawa, T. Ikami, H. Nagai, J. Gonzales, D. Kurihara, H. Sakaue: Development of Pressure Distribution Measurement Technique Using AA-PSP at Transonic Free-Flight, *20th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS18-9.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23I064
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2年目

## 超高速応答型感圧塗料の開発とその応用

Development and Application of Ultra-fast Response Pressure-Sensitive Paint Technology

永井 大樹\*†, 伊神 翼\*, 阿部 淳之介\*

高橋 俊\*\*††

\*東北大学流体科学研究所

\*\*宇宙航空研究開発機構

†申請者, ††所外対応研究者

### 1. 研究目的

超音速旅客機や大気再突入飛行体周り, 火山噴火などで発生する衝撃波が物体に衝突した際には瞬間に大きな力が加わり, 人体や建物などへの被害が生じる. そのため, 衝撃波が物体を通過する際の力の変化を知ることは非常に重要である. しかし, 物体にかかる力の変化は非常に短時間であり, その計測は非常に困難である. 加えて, 衝撃波が物体上を通過する際には, 物体で反射による衝撃波との干渉により, 局所的に大きな圧力がかかることがある. そのため, 単に力を計測するだけでなく, 物体表面上の非定常圧力分布を計測することが求められる. 本研究では, 超高速応答型感圧塗料を開発し, 衝撃波が通過する際の衝撃波/衝撃波干渉による物体表面上の非定常圧力分布を計測し, 現象を理解することを目的とする.

### 2. 研究成果の内容

本研究課題では衝撃波が物体表面上を通過する際の圧力分布を計測するために, 陽極酸化皮膜型感圧塗料 (Anodized-Aluminum Pressure-Sensitive Paint, AA-PSP) を用いることとした. ただし, 従来の AA-PSP では, 応答性および発光強度が不十分である. そこで, まず発光強度と圧力感度に着目し, 陽極酸化時間, ディッピング溶媒の種類, ディッピング色素濃度に関する調査を行った. その結果, ピレンスルホン酸を色素として用いて, 立ち上がり時間 90%で  $2.3\mu\text{s}$  という高速応答性を持ち, イメージインテンシファイアなどの增幅器を用いて衝撃波面の圧力変化を捉えることができる発光強度を有する AA-PSP の開発することができた.

次に円柱模型に新たに開発した AA-PSP の処理を施し, 衝撃波が円柱上を通過した際の円柱表面圧力分布を時系列画像として取得を行った. その結果, これまで報告されていた円柱を通過後の円柱周り衝撃波反射・回折現象が円柱表面上でも確認することが出来た. これらの時系列圧力分布画像を用いて, 物体表面圧力計測から衝撃波通過時に物体へ与える力計測の算出を行い, その精度評価を行った.

今年度はさらに発展し, 自由飛行体が超音速で飛行する際に発生させるソニックブームが物体上を通過する際の非定常圧力計測 (Fig.1) に取り組んだ. ソニックブームによる物体表面上の圧力変化をとらえることはできた (Fig.2) が, 圧力変化の大きさ, 物体の移動時間, 計測装置までの距離が大きく異なり, 信号雑音比 (Signal-to-Noise ratio) の大きな劣化が見られた. これを改善するために, より高性能な (発光量, 圧力感度, 応答性) AA-PSP の開発にも取り組み, 一定の成果が得られた (Fig.3).

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、自由飛行体が超音速で飛行する際に発生させるソニックブームが物体上を通過する際の非定常圧力計測を行い、その圧力分布と時系列圧力変化の評価を行った。また新たなAA-PSPの開発にも取り組み、一定以上の成果が得られた。このため当初の目標は概ね達成できており、期待通りに進展している。

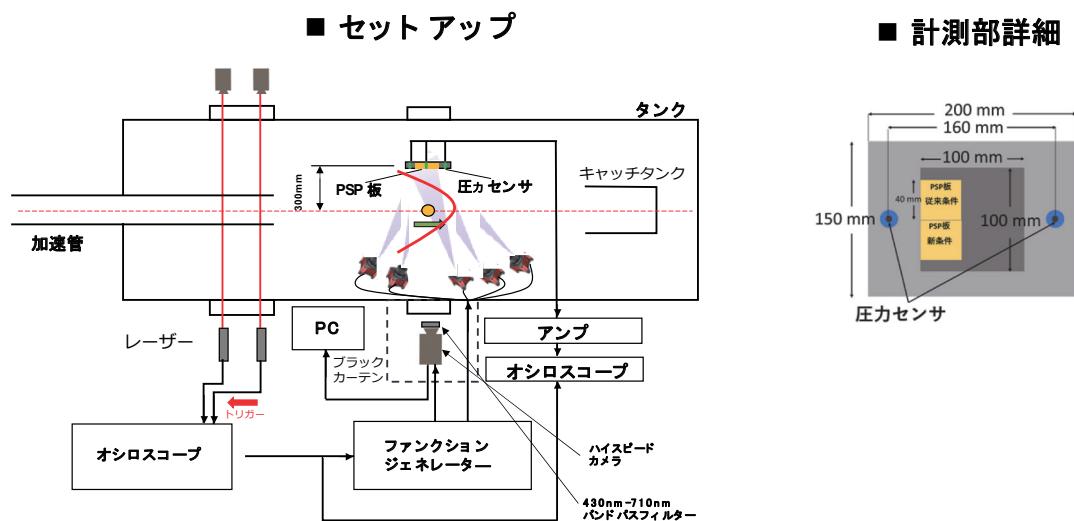


Fig.1 自由飛行体が超音速で飛行する際に発生させるソニックブーム

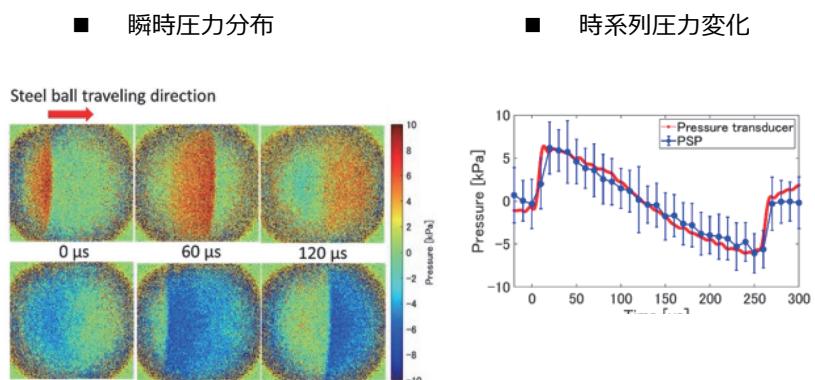


Fig.2 ソニックブーム通過時の圧力分布と時系列変化

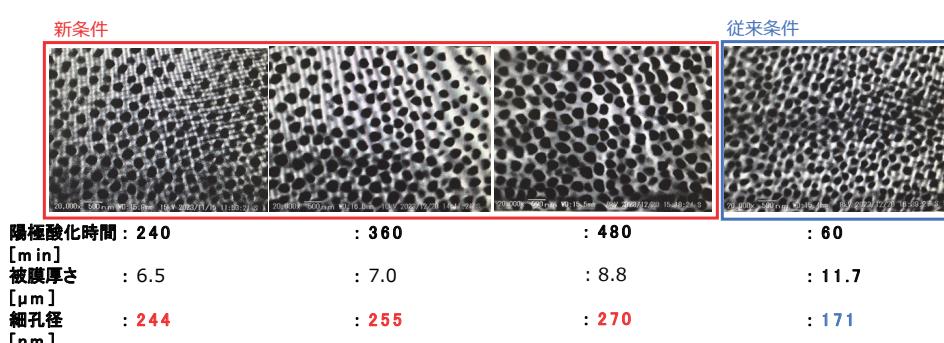


Fig.3 改良したAA-PSPの細孔構造の比較

#### 4. まとめと今後の課題

今後は、開発した新たなAA-PSPを用いて、様々な超高速現象に適用し、その有用性を評価すると共に、更なる性能向上を目指した研究開発を加速する。

#### 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] J. Abe, S. Tamakuma, T. Ogawa, T. Ikami, H. Nagai, S. Takahashi: Unsteady Force Measurement on Cylinder Surface Using Anodized Aluminum Pressure-Sensitive Paint, *The 34th International Symposium on Shock Wave*, Daegu, Korea (2023), T05-0255.
- [2] J. Abe, T. Ogawa, T. Ikami, H. Nagai and S. Takahashi: *Sonic Boom Distribution Measurement of Supersonic Projectile in Ballistic Range*, *20<sup>th</sup> International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS18-11.
- [3] 阿部淳之介, 小川俊宏, 永井大樹: マイクロ秒以下の超高速応答性を持つAA-PSPの開発, 2023年度衝撃波シンポジウム (2024), 109.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23I065
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	3年目

**極低温ループヒートパイプ内部の気液二相熱流動現象の包括的理**  
**Comprehensive Study on Two-phase Thermo-fluid Phenomena in Cryogenic Loop Heat Pipe**

小田切 公秀\*†, 永井 大樹\*\*††

小川 博之\*, 常 新雨\*\*, 横内 岳史\*\*\*

\*宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*東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

本研究では、動作温度 80-100K の極低温ループヒートパイプ(Cryogenic Loop Heat Pipe, CLHP)凝縮器内部の気液二相熱流動現象を明らかにし、CLHP 設計理論を確立することを目的とする。将来の宇宙望遠鏡ミッションにおいて、高感度かつ高精度な観測を実施するためには、望遠鏡および検出器を極低温に冷却することが求められる。これを実現する機械式冷凍機や極低温冷媒を用いる熱制御システムにおいては、その設計自由度を高める観点から特に高効率な極低温熱輸送デバイスが必要とされている。そこで本研究では低熱抵抗で長距離・大量熱輸送が可能な CLHP に着目する。CLHP は毛細管力によって駆動する、蒸発と凝縮を利用した気液二相熱輸送デバイスである。これまで常温 LHP(動作温度 30~90°C)は研究例が数多く存在し、数十 m 級の熱輸送能力が実現してきた。一方で、CLHP は熱輸送距離が 1 m 以下に留まっている。これは CLHP 内部の熱流動現象の知見が不足しており、設計理論が確立されていないことに起因する。具体的には、凝縮部において発生する 1~50 kg/s/m<sup>2</sup> 領域の低質量流束かつ 80~100 K の極低温での凝縮流動様式・熱伝達係数、これらと CLHP システム熱流動・動作特性の関係が明らかとなっていない。そこで本研究では、まず封入流体を窒素とするプロトタイプ CLHP を構築し多様な熱負荷、起動条件における基本的な動作特性を明らかにする。次に宇宙機応用を想定した起動特性・長距離熱輸送に優れるマルチエバボレータ型 CLHP を構築し、実機搭載に近い条件における動作特性を取得する。さらに凝縮部の可視化装置を構築し、内部の凝縮熱流動観察と凝縮熱伝達モデルへのフィードバックを行う。最終的には宇宙機応用に必要不可欠な CLHP システム設計モデルを構築し、実験に基づく検証を行い、CLHP 設計理論の確立を目指す。

## 2. 研究成果の内容

本研究では、1 年目(令和 3 年度)に封入流体を窒素とする重力アシスト型のプロトタイプ CLHP を構築し、東北大学流体科学研究所に設置の小型低温熱試験チャンバを用いて、基本特性評価を実施した。その結果、輸送距離 2 m の条件において動作温度 122 K, 6.5 W の熱輸送を達成した。さらに 2 年目(令和 4 年度)は理論モデルと試験結果の比較から断熱条件の課題を明らかにし、装置を改良した結果、動作温度 115 K で最大 30 W の熱輸送性能を達成した。試験時のパラメータを変更することで、初期熱負荷が起動特性に与える影響、作動流体封入量が熱輸送特性に与える影響、熱負荷上昇時／下降時の温度ヒステリシスの発生条件

を明らかにした。また流体科学研究所での試験に並行して、JAXA 宇宙科学研究所の中型低温熱試験チャンバを用いて、宇宙機搭載を想定したマルチエバボレータ型 CLHP の動作実証試験を実施した。その結果、輸送距離 2 m 水平条件において、動作温度 86 K で最大 24 W の熱輸送を達成したほか、基本動作特性を取得した。

1~2 年目の研究成果に基づいて 3 年目(令和 5 年度)は、重力アシスト型 CLHP については作動流体封入圧および蒸気管で発生する過熱蒸気を考慮した CLHP 定常特性予測モデルを新たに構築した。図 1 にモデル・実験結果の比較結果および CLHP の動作限界予測モデルの計算結果を示す。図 1(a)より、作動流体封入量が異なる 2 条件(3.1 MPa, 3.4 MPa)において低～中熱負荷でそれぞれモデルと実験が良好な一致を示すことが明らかである。高熱負荷で実験結果が高温となった要因としては、蒸発器内の伝熱面で液架橋が消失したことによる蒸発熱伝達率の著しい低下が考えられる。本モデルでは考慮していない現象であることから、今後モデルに実装することが課題である。図 1(b)より従来モデルと比較して、作動流体封入圧、過熱蒸気を考慮した提案モデルがより高い圧力損失を示すことが明らかである。毛細管力( $dP_{drive}$ )と圧力損失( $dP_{total}$ )が交わる点が CLHP としての熱輸送限界を示す。熱負荷 25~30 W の領域が実験から明らかとなった熱輸送限界の領域であるが、提案モデルは従来モデルとは異なり、実験結果を再現していることが明らかである。以上より、提案モデルによって CLHP の動作限界および動作温度を従来と比較して正確に予測することが可能となった。

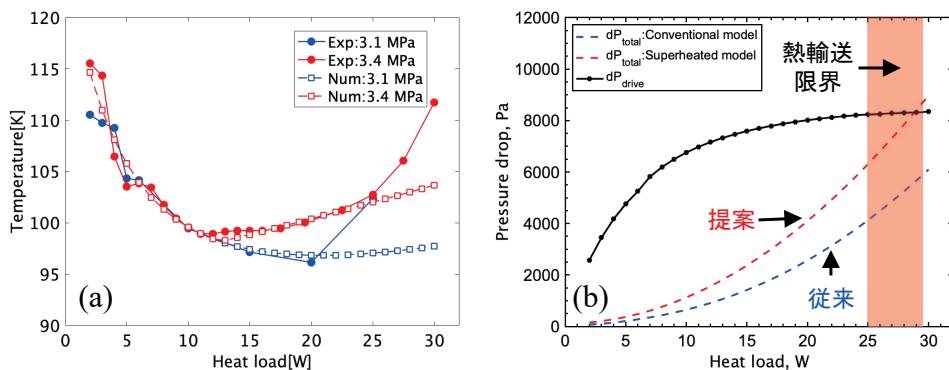


図 1 : (a) 作動流体封入量が異なる 2 条件(3.1 MPa, 3.4 MPa)における CLHP 動作温度の実験結果とモデルの比較、(b) 従来モデルと本提案モデルの熱輸送限界予測結果の比較

また JAXA 宇宙科学研究所で実施のマルチエバボレータ型 CLHP については、凝縮部の気液界面挙動・熱伝達様式を明らかにすることを目的とした凝縮流動観察部(図 2)を新たに構築し、極低温真空環境下(80 K)で可視化試験を実施した。その結果、世界に先駆けて窒素 CLHP 内部の凝縮流動の可視化に成功した。可視観察結果の一例として図 2 に、蒸発器に 4 W の熱負荷を加えた後に、凝縮器内部でスラグ流、波状流、層状流と流動様式が遷移する様子を示す。また実験時に測定した温度、圧力の測定結果に基づいてマルチエバボレータ型 CLHP 定常特性予測モデルから算出した質量流束と、本観察結果の比較により、高精度な流動様式遷移条件および凝縮熱伝達係数の予測が可能となった。さらに CLHP 定常特性予測モデルは実験結果と良好な一致を示すことが確認された。今後は凝縮流動可視化において幅広い条件下(蒸気クオリティ、流路サイズ)での体系的な流動観察が、凝縮熱伝達モデル、遷移条件推定の高精度化に向けての課題である。一方で、本研究活動を通して CLHP 設計理論の確立に向けて大きく前進したと言える。

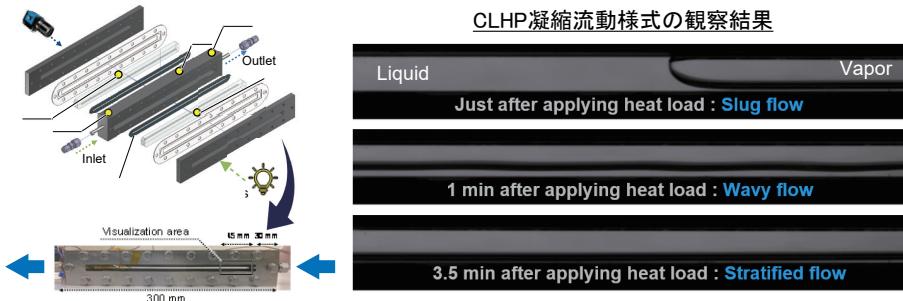


図2：凝縮流動観察部およびCLHP 凝縮流動様式の観察結果

### 3. 研究目標の達成状況

本研究で構築したプロトタイプ CLHP は 80 ~ 100 K の動作温度領域で、重力アシスト条件において最大 30 W を 2 m 熱輸送可能であり、さらにマルチエバポレータ型 CLHP については、水平条件で熱輸送距離 2 m、最大 24 W の熱輸送を達成した。いずれも同程度の熱輸送性能を有する CLHP の先行研究例と比較して約 3 ~ 4 倍長距離の熱輸送が可能であり、今後宇宙望遠鏡の極低温熱システムへと適用することで、熱設計の設計自由度を大きく高めることが期待できる。また、CLHP 内部で生じる 1 ~ 50 kg/s/m<sup>2</sup> 領域の低質量流束の極低温凝縮流動は国内外で基礎的知見が少なかったが、本研究により初めて上記の質量流束域の窒素凝縮流動の可視化に成功した。温度、圧力測定結果と可視観察情報に基づく凝縮流動様式を総合し、CLHP 定常特性予測モデルに反映することで、従来と比較して高精度な理論モデルを構築することができた。部分的に今後の研究課題が抽出された一方で、当初の研究目標はおおむね達成された。

### 4. まとめと今後の課題

これまでの研究活動を通じ、流体科学研究所において実施した一連の試験と CLHP 定常動作特性予測モデルの構築によって、重力アシスト環境下における CLHP の基本動作特性を明らかにした。また宇宙応用を想定したマルチエバポレータ型 CLHP を構築し、水平条件において最大 24 W(熱輸送距離 : 2 m)の実証に成功した。先行研究において知見が不足していた低質量流束凝縮流における熱伝達特性を明らかにすることを目的として、CLHP 内部の凝縮流動可視化に取り組んだ。極低温真空環境下(80 K)で試験を実施した結果、世界に先駆けて窒素 CLHP 内部の凝縮流動の可視化に成功した。また、可視観察結果をフィードバックした CLHP 定常特性予測モデルは実験結果と良好な一致を示すことが明らかとなった。より体系的な流動条件でのデータ取得による理論モデル、流動様式の遷移条件推定の高精度化が今後の課題として挙げられる一方で、本研究活動を通して CLHP 設計理論の確立に向けて大きく前進したと言える。

### 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] X. Chang, T. Yokouchi, K. Odagiri, H. Ogawa, H. Nagano, H. Nagai: Design optimization and experimental demonstration of a gravity-assisted cryogenic loop heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 221(2024), pp. 125037  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125037>
- [2] K. Odagiri, X. Chang, H. Nagai, H. Ogawa: Effect of heat load to a capillary starter pump on thermal characteristics of a 2-m nitrogen cryogenic loop heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, 234(2023), pp. 121109

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121109>

[3] T. Yokouchi, X. Chang, K. Odagiri, H. Ogawa, H. Nagano, H. Nagai: Operating Characteristics of Cryogenic Loop Heat Pipes at Different Filling Pressures, *Proceedings of 52<sup>nd</sup> International Conference on Environmental Systems*, Calgary, (2023)  
<https://hdl.handle.net/2346/94616>

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[4] K. Odagiri, X. Chang, T. Yokouchi, A. Gomi, H. Nagai, H. Ogawa: Study on Two-phase Thermo-fluid Phenomena in a 2-m Nitrogen Cryogenic Loop Heat Pipe, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-59, pp.164-166.

[5] A. Gomi, K. Odagiri, Y. Sakamoto, S. Okazaki, H. Nagai, H. Ogawa: Visualization of Low Mass Flux Nitrogen Condensate Flow Inside a Cryogenic Loop Heat Pipe, *Proceedings of 20<sup>th</sup> International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023)

[6] T. Yokouchi, X. Chang, K. Odagiri, H. Ogawa, H. Nagano, H. Nagai: Heat Transfer Limit Evaluation of Cryogenic Loop Heat Pipe, *Proceedings of 20<sup>th</sup> International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023)

[7] A. Gomi, K. Odagiri, Y. Sakamoto, S. Okazaki, H. Nagai, H. Ogawa: Visualization and Void Fraction Measurement of Condensation Flow in Nitrogen-Charged Cryogenic Loop Heat Pipes, *Proceedings of 34<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science*, Kurume, (2023)

[8] 横内岳史, 常新雨, 小田切公秀, 小川博之, 長野方星, 永井大樹: AA-TSP の極低温二相流可視化計測への適応, 第 19 回学際領域における分子イメージングフォーラム, 調布, (2023)

[9] 横内岳史, 常新雨, 小田切公秀, 小川博之, 長野方星, 永井大樹: CLHP の凝縮現象解明に向けた極低温二相流の気液界面・温度分布同時計測手法の提案, 令和 5 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 相模原, (2023)

[10] 横内岳史, 常新雨, 小田切公秀, 小川博之, 長野方星, 永井大樹: 充填圧の違いが極低温ループヒートパイプの温度振動に与える影響, 混相流シンポジウム 2023, 札幌, (2023)

[11] 小田切公秀, 常新雨, 永井大樹, 小川博之: 抗重力条件下における 2m 級窒素ループヒートパイプの熱輸送特性, 第 60 回日本伝熱シンポジウム, 福岡, (2023)

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)  
なし.

課題番号	J23I066
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目

## 高速飛しょう体周りの流れ場の高感度定量可視化計測法の確立 High Sensitivity and Quantitative Visualization around High-speed Projectile

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

自由飛行する高速飛しょう体周囲で発生する流れ場解析は、次世代静肅超音速機におけるソニックブーム低減など、航空宇宙分野で広く貢献できる。光学的可視化計測は、衝撃波研究で広く活用されているが、後流など、衝撃波に比べて微弱な現象を明瞭に可視化できない。一方、干渉計法は定量的可視化がその特長であるが、微弱な密度変化が支配的となる後流に対しては、必ずしも精度の高い結果が得られるとは限らない。位相変位法は、干渉計精度向上のひとつである。参照光の位相を段階的に変化させることで、干渉縞の輝度分布を変化させ、得られた複数の輝度分布から干渉縞一波長分に満たない密度変化を検知する。参照光の位相変位が必要になることから、定常現象に適用することが専らであり、非定常現象や高速現象への適用には原理的に困難であった。そこで本研究課題では、高速自由飛行する飛しょう体周囲の流れ場計測に、独自設計の位相変位干渉計法光学系を適用し、単一撮影で位相変位干渉計撮影を実現し、従来法では困難な非定常流体现象に対する高精度干渉計測法を確立させることが目的である。

### 2. 研究成果の内容

独自に製作した並列型位相変位干渉計 (Parallel Phase Shift Interferometry, PPSI) を図1に示す。弾道飛行実験装置により超音速飛行させる飛しょう体模型は、球形 (直径 20 mm, アルミナ製, 重量  $17.75 \pm 0.61$  g, 密度 3.8 g/cm<sup>3</sup>) である。球模型は、サボに格納され、弾道飛行実験装置の加速管内において高圧空気 (約 2 MPa, 窒素) で加速し、開放端からノミナル飛行 Mach 数 1.3 で射出される。PPSI は、光源を全固体レーザ (波長 532 nm, 最大 2 W) とし、偏光光学素子 PO (ウォラストン・プリズム, グラン・トムソン・プリズム, 1/2 波長板) により、位相が 1/2 波長異なる 2 つの光束に分離されコリメータレンズ L1 (平凸レンズ, 直径 10 mm.) により共に平行光となる。測定部手前で半透明鏡 HM (1 : 1, 直径 100 mm) で入射光の一部が反射され、参照光となる。測定部を通過した光束は、平面鏡 M で、反射され、で物体光となる。HM で反射された参照光と測定部通過後に M で反射された物体光は、マイクロ偏光板アレイが画像素子直前に装備された高速度偏光カメラ CAM (Photron CRYSTAL-1P) で 1/4 波長ごとの位相変位を受けた 4 枚の干渉縞画像を撮影し、干渉縞画像の輝度分布から、干渉縞間の位相を保管し、高精度な位相分布を得た。

取得した干渉縞分布による球模型周囲の流れ場解析結果を図2に示す。図2a~c は、時間間隔 50 μs で撮影されたものであり、画素数は、256 pix. × 256 pix. である。各図の上半分は、得られた干渉縞 (位相 0°), 下半分は、位相の異なる 4 種類の干渉縞画像から解析した位相分布を示した。また、飛行 Mach 数 1.2 の球模型周りの流れ場の数値解析 (非粘性) 結果を干渉縞

に重ねて描画している。球模型周囲の Bow shock, はく離衝撃波 Separation shock, および球模型の後流 Wake を明瞭に捉えている。また、位相変位干渉縞分布から、定量的な位相分布の再構築に成功している。

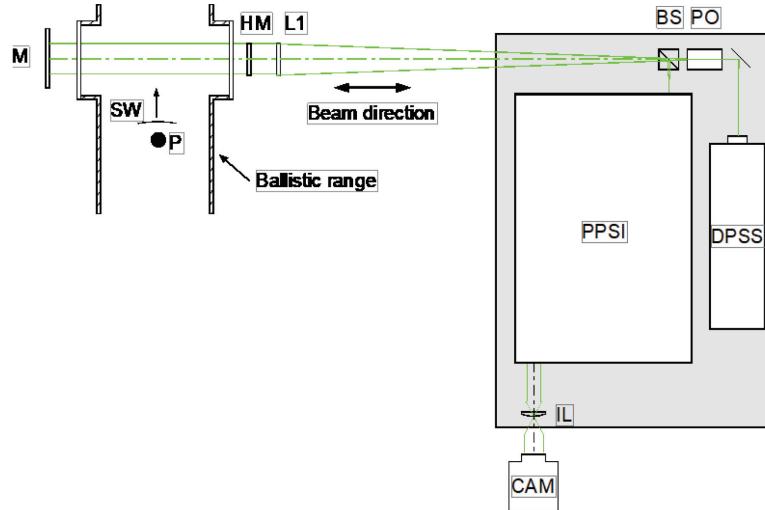


図 1 並列位相変位干渉計による超音速飛しょう体周りの可視化計測系 (PPSI の詳細  
光学系は割愛).

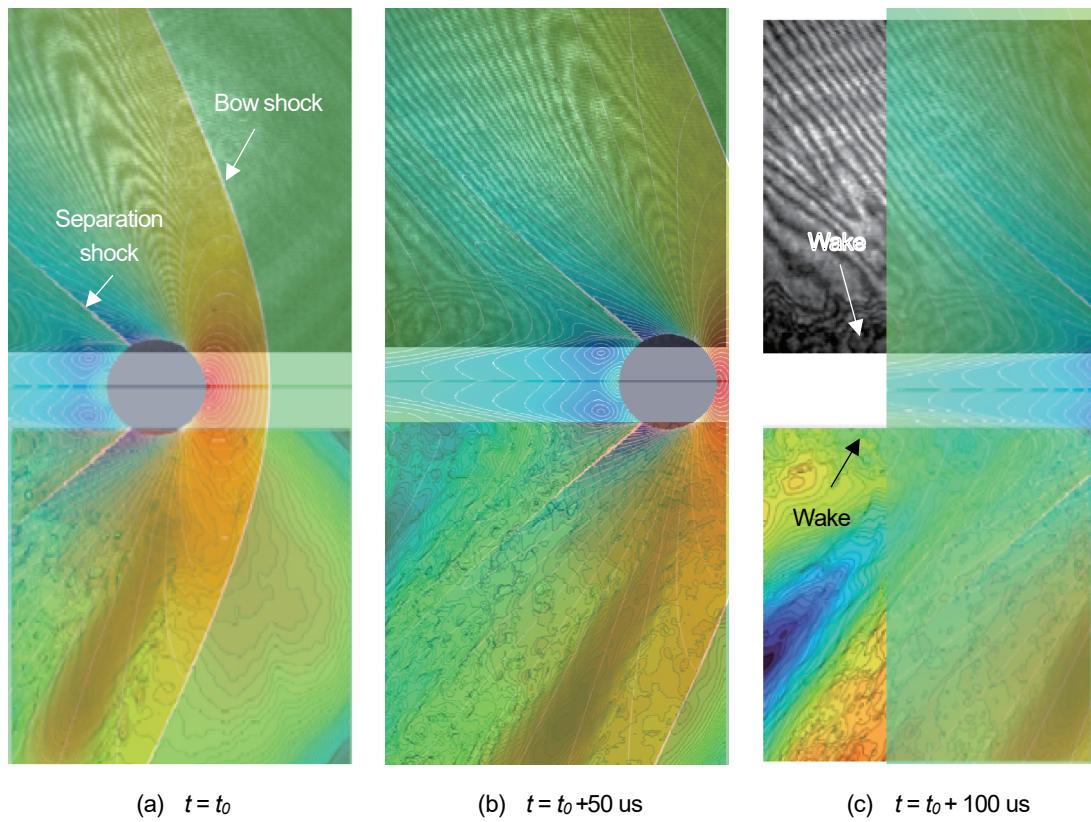


図 2 並列位相変位干渉計による流れ場解析結果. 上半分: 取得した干渉縞 (位相角  $0^\circ$ ), 下半分: 4 つの異なる位相角の干渉縞から再構成された当密度分布 (Abel 変換前). 全体: 飛行 Mach 数 1.30 での球模型周りの流れ場の CFD 解析結果を半透明画像として重ねて描画.

### 3. 研究目標の達成状況

並列型位相変位干渉計を独自に考案・製作し、超音速飛しょうする球模型周囲で発生する流れ場の密度分布を再構築するための位相分布の取得に成功した。これにより、本研究における初期的目標が達成された。一方、得られた位相分布は、視線方向の積分情報となるため、数値計算結果と精度検証には、Abel 変換による断面での位相分布を得る必要があるが、未達となった。

### 4. まとめと今後の課題

超音速飛しょう体周りの流れ場、特にソニックブームや後流などの微弱現象の定量的可視化計測を目的として、並列型位相変位干渉計を独自に考案・製作し、弾道飛行実験装置で直径 20 mm の球模型を M1.2 で射出した。その結果、および今後の課題として以下を得た。

- ・ 超音速自由飛行する球模型周囲の流れ場の位相変位干渉縞画像 (1/4 波長) を取得した。
- ・ 得られた位相変位干渉縞から定量的な位相分布の再構築を達成した。
- ・ 球模型周囲の離脱衝撃波、剥離症擊破、および後流を明瞭に捉えた。
- ・ 今年度の実験は、大気圧環境下での自由飛行であるため、離脱衝撃波直後の密度場など、密度変化が急しゅんな部分における干渉縞分布が、画像素子の空間分解の上限を越えたため、干渉縞分布が取得できない部分が生じた。
- ・ 低圧環境下での実験に移行し、従来の干渉縞計測では取得不可能な微弱現象を計測し、本手法の優位性を明らかにする。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

該当無し

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] F. Wang, I. Nagayama, T. Mizukaki and K. Ohtani, Flow Visualization Around High-Speed Projectile with Point-Diffraction Interferometry, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-51, pp.141-142.

#### 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	J23I070
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year (progressing)

## 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 mitigation remains a key issue for a commercial supersonic aircraft. Experience with Concorde has shown that sonic boom impact is significantly affected by local atmospheric conditions, such as temperature, winds, and relative humidity. Therefore, the impact changes every flight because of atmospheric conditions changing from moment to moment. In the previous research project SEIRA (Sonic-boom Evaluation In Realistic Atmospheres), we have developed a kriging model for sonic-boom evaluation under different meteorological conditions. We have kicked-off the SEIRA II project in 2023; the purpose of the project is to continuously develop the kriging model, to evaluate a model performance of the kriging model, and to integrate it into a chemistry-climate model.

### 2. Details of program implement

Sonic boom variation of north-Atlantic supersonic flight was examined for the kriging model development. Concorde flights were simulated by using the chemistry-climate model EMAC coupled with the air traffic simulation model AirTraf. 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). Concorde departed from John F. Kennedy airport (JFK) at 13:30:00 (UTC) and flew to London Heathrow airport (LHR; eastbound flight) along the great circle at  $M = 2.0$  at 15.3 km altitude. Sonic boom under the flight track at sea level was calculated by using the sonic boom simulation tool based on the KZK equation; the tool has been developed based on Xnoise. The simulation period was set from March 2009 to February 2019.

We analyzed the variation in sonic boom waveforms obtained from the ten years simulation. The waveforms clearly change according to the atmospheric profiles, which results in differences in overpressure. The overpressure ranges from 87.1 to 111.0 Pa; the mean value is 101.0 Pa ( $\sigma = 2.90$  Pa). Our results agree with the previous studies. Seasonal trends in overpressure were analyzed for the period (Fig. 1). The vertical axis shows a difference in pressure between a mean overpressure for the ten years and that for each month. The results show that the overpressure decreases in winter, whereas it increases in summer. This trend agrees with that reported in previous studies. Iura et al. (2023) investigated a seasonal trend of sonic

boom impact with respect to the low sonic boom aircraft designed in the NASA's N+2 program, and showed similar trend for the low-boom waveforms with long rise-time. Therefore, the resulting seasonal trend is quite stable.

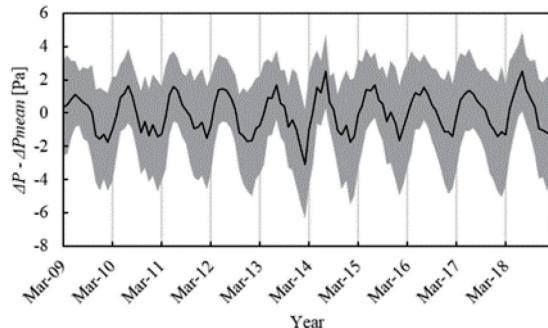


Figure 1 : Variation in sonic boom overpressures obtained from ten years simulations.

### 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. With those results, the Kriging method is developed further. Iura et al. (2023) presented the results at Inter-noise 2023; Yamashita et al. (2023) contributed to AFI-2023.

### 4. Summaries and future plans

The sonic boom variation for Concorde flights over the North Atlantic were analyzed for the period March 2009–February 2019 by using the chemistry–climate model EMAC coupled with the air traffic simulation model AirTraf. The atmospheric profiles on the flight track were calculated from the EMAC model. The obtained overpressure ranged from 87.1 to 111.0 Pa; the mean overpressure was 101.0 Pa ( $\sigma=2.90$  Pa). A seasonal trend of overpressure variation was clearly observed: the overpressure decreases in winter, whereas it increases in summer. This trend is observed every year for the ten years, and thus the trend is quite stable. The results will be reported in a scientific paper, and our kriging model are improved further.

### 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, "Acoustic propagation analysis of sonic boom at atmospheric variation during 10-year flight," *Inter-noise 2023*, Japan, (2023).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [2] H. Yamashita, B. Kern, R. Iura, T. Ukai, T. Misaka and S. Obayashi, "Sonic Boom Variation in Realistic Atmospheres," *Proceedings of the 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-64, pp.178-179.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

課題番号	J23I071
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2年目

## 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

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\*\*, 徳増 崇\*\*\*†, 永島 浩樹\*†

\*琉球大学工学部, \*\*九州大学工学研究院, \*\*\*東北大学流体科学研究所

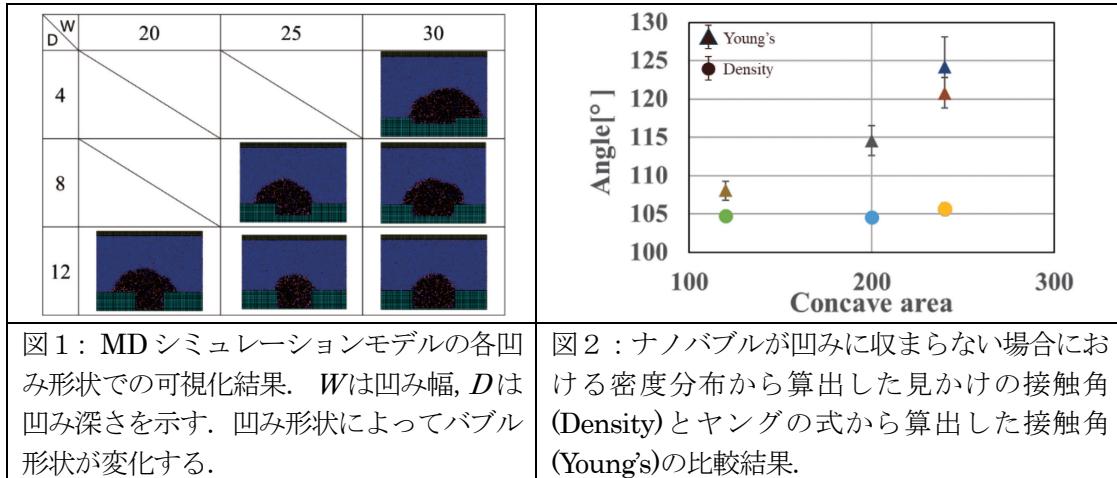
†申請者, †所内対応教員

### 1. 研究目的

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、沸騰の初期現象として工学的に重要であり、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に及ぼす影響について、三相界線における微視的力学バランスに着目し解析を行なった。巨視的バブルの場合、三相界線での力学的バランスはヤングの式により各相間の表面張力と接触角が関連づけられるが、このヤング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まだ十分には明らかにされていない。固体表面のナノバブルの形状変化などは、三相界線における微視的な力学バランスが変化することで引き起こされると考えられるため、壁面の形状とナノバブルの三相界線における微視的な力学的関係を明らかにすることを目標とした。

### 2. 研究成果の内容

昨年度は、分子動力学(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なった。計算系は擬二次元としたうえで、壁面の濡れ性は中性とし、ガス分子のモル分率を2.5%と3.0%に設定した。壁面の凹みの大きさは、凹み深さを4, 8, 12、凹み幅を20, 25, 30の計9つのパターンとした(図1)。発生したナノバブル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、密度分布より算出したナノバブルの見かけの接触角とヤングの式より算出した接触角を比較した。ヤング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よりBukkerの式とヤング-ラプラスの式より算出した。その結果、凹みに収まらないナノバブルは、凹みの断面積が大きくなることで見かけの接触角とヤングの式より算出した接触角との差が大きくなることが分かった(図2)。この結果は、凹み断面積の大きさにより表面張力と類似の力がナノバブル内部方向に作用することを示唆しており、この力も考慮すると三相界線の力学的バランスはヤングの式に一致すると考えられる。次に、凹みに収まるバブルについて、Bukkerの式とヤング-ラプラスの式より算出した表面張力を比較した。その結果、凹みに収まるナノバブルは凹みの角近傍で三相界線がピニングされたことにより安定的に存在することが分かった。この結果より、凹みに収まるナノバブルは、断面積が大きくなることで固体-気体間の表面張力方向にナノバブルを固定するピニング力が作用することが考えられる。これらの結果



より、凹みの断面積が大きくなることでナノバブルを固定する力が次第に大きくなり、一定の凹み断面積になるとナノバブルの三相界線が凹みの角近傍にピニングされ、ナノバブルが凹みに収まることが分かった。また、ピニング力は凹み断面積が大きくなるほど大きくなると考えられる。

### 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を変化させることで三相界線の力学的バランスが変化し、凹みがある固液界面ナノバブルの形状が変化することが分かった。この知見は、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、目的の約半分を達成したと考えている。

### 4. まとめと今後の課題

昨年度の研究結果より、固体壁面の凹み断面積を変化させることでナノバブルの形状が変化することが分かった。今後は凹みの形状や個数により三相界線の力学的バランスがどのように変化するかを調べ、ピニング力の定量化を行い、ナノバブルの三相界線における微視的力学モデルに基づいて固液界面のナノバブルを制御するための指針を得る。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] 城ノ園優佑, 津田伸一, 徳増崇, 永島浩樹: 凹凸のある固体表面上のナノバブルの分子動力学的解析, 熱工学コンファレンス 2023, 神戸, (2023), OS-14 D122.
- [2] Y. Jonosono, S. Tsuda, T. Tokumasu, and H. Nagashima: Molecular Dynamics Study on Mechanical Balance at Three-Phase Contact Line of Interfacial Nanobubble, *Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS21-39.
- [3] Y. Jonosono, S. Tsuda, T. Tokumasu, and H. Nagashima: Molecular Dynamics Study of Interfacial Nanobubble on Convexo-Concave Surface, *The 9th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow*, Jeddah, Saudi Arabia, (2023), ASCHT2023-072.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23I072
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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\*, 大山 博暉\*, 宇野 巧人\*, 碇 哲雄\*, 寒川 誠二\*\*\*,\*\*

\*宮崎大学, \*\*東北大學流体科学研究所, \*\*\*台灣陽明交通大学

†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

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、今回用意した試料はNP間隔が13, 27, 47 nm(以下、NP13, NP27, NP47)の三種類であった。

新規開発したLH-PD法で上記試料の表面変位量の時間変化を測定し、COMSOL Multiphysicsソフトウェアによる理論計算結果と比較した。その結果、表面変位量の時間変化には光吸収量、光形成されたキャリア(電子および正孔)の拡散、キャリアの非発光再結合によって発生した熱の拡散といった物理素過程が大きく関与していることが分かった。昨年度は試料表面にAlを蒸着し、そこに励起光を照射して発熱源を固定することで熱拡散にのみ着目した解析を実施した。今年度はAlを蒸着せずに試料表面に直接励起光を照射してキャリアを形成させた。その状態で、図1に示すように電極間に電場を印可しながら検出光位置の表面変位量を測定した。図2に3つの試料の印可電圧0と5V時の結果を示す。昨年度実施した熱拡散のみの場合には変位量は全て同じだったが、今回の実験ではNP間隔によって変位量が変化し、NP27の試料が最も小さくなった。理論計算および複合膜の結晶性を考慮した解析から、NPとSiGeの界面におけるキャリア再結合や結晶歪み起因の転位におけるキャリア損失のために、NP27の時にキャリア寿命が最も長くなることが分かった。この結果、複合膜での熱散逸が促進され、表面変位量が小さくなったと説明できた。

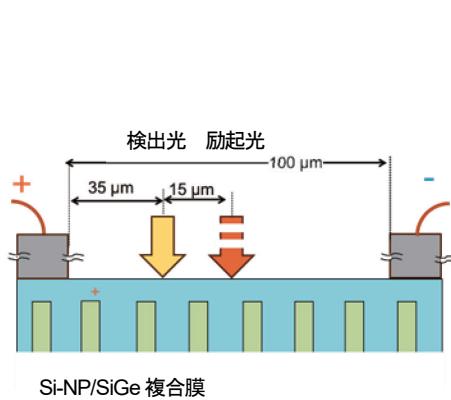


図 1：測定配置概略

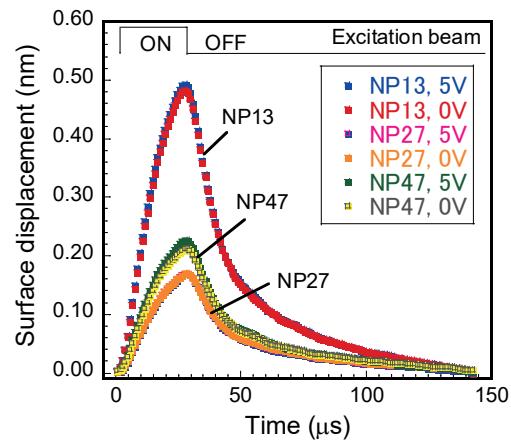


図 2：NP 間隔が異なる試料の表面変位変化

### 3. 研究目標の達成状況

NP 間隔の変化は、光形成されたキャリアの拡散と非発光再結合で発生した熱拡散の両方に大きく影響を及ぼすことが分かった。昨年度は Al を蒸着して発熱源を固定して熱拡散のみを考慮した解析を行い、NP 間隔を小さくすれば複合膜の熱伝導率を減少できることを示した。今年度は直接試料表面に励起光を照射してキャリア拡散に着目した。ただし、形成されたキャリアが界面や転位によって消失するためキャリア寿命と NP 間隔との間に明確な相関が無いことが分かった。量子ナノ構造導入によってフォノン（熱伝導率）と電子（キャリア寿命）の両方を制御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

今年度の公募共同研究によって、NP 間隔が熱物性と電子物性の両方に影響を及ぼすことが明確になった。ただし電子物性と NP 間隔との相関が得られていないため、引き続き NP 間隔の異なる試料を用意して LH-PD 測定および解析を実施し、それぞれの制御方法を模索する。

### 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. Fukuyama, T. Harada, S. Harada, H. Ohyama, D. Ohori, K. Endo, S. Samukawa, and T. Ikari: Carrier lifetime change by nanopillar space in Si nanopillar/SiGe composite films investigated by a laser heterodyne photothermal displacement method, *23rd 2023 IEEE Int. Conf. on Nanotechnology*, Jeju Korea, (2023), MoGT6.3.
- [2] Y. Uno, T. Harada, S. Harada, H. Ohyama, D. Ohori, K. Endo, S. Samukawa, T. Ikari, A. Fukuyama: Analysis of carrier mobility in Si-Nanopillar/SiGe composite films by a laser heterodyne photothermal displacement method, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-21, pp. 70-71.
- [3] 宇野巧人, 原田知季, 碇哲雄, 福山敦彦: 電界下における光ヘテロダイン光熱変位法によるn型Siの局所キャリア移動度解析, 令和5年度応用物理学会九州支部学術講演会, (2023), 26Aa-2.
- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23I073
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目

**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. 研究目的

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CO<sub>2</sub>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. 研究成果の内容

平面上流れでは、擾乱として 2 次元 T-S 波とその斜行波を流入面に導入し直接数値シミュレーションによる計算を行った。断熱条件と壁面加熱条件の間には大きな差は見られなかつた。壁面加熱条件  $T^* = 1.64T_0^*$  の計算では遷移開始位置が上流側にシフトしているような結果が得られたが、この計算は途中で発散てしまい、乱れが十分に発達していない状態の結果であるため、格子点解像度やパラメータ設定など発散の原因となり得る条件を見直して今後再度計算を行う余地がある。断熱条件と壁面冷却条件を比較すると明らかに遷移開始位置が下流側にシフトしており、乱れの発達も遅くなるという結果が得られた。また、壁面冷却条件では壁面摩擦抵抗も減少することが分かった。このことから、壁面を冷却することで流れを安定化させる効果があると考えられる。

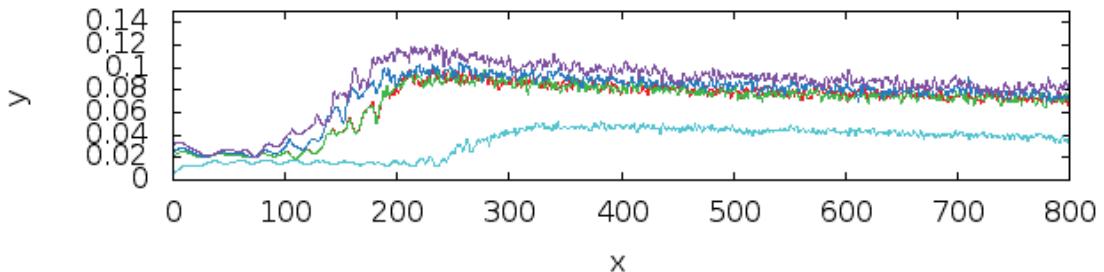


図 1：スパン方向平均をとった壁面局所摩擦抵抗の分布

## 3. 研究目標の達成状況

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。

2023 年度は平板上の乱流境界層の温度制御の研究により、壁面を冷却することが壁面摩擦抵抗を低下させるという結果を得た。これは新しい制御法の可能性を示す重要な結果であり、1 年目としての目標を達成できたと考えられる。

## 4. まとめと今後の課題

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. 研究成果

### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[1] Omar Es-Sahli, Adrian Sescu, M. Zamir A. Koshuriyan, Yuji Hattori, Makoto Hirota, Lagrange Multiplier-Based Optimal Control Technique for Streak Attenuation in High-Speed Boundary Layers, *AIAA Journal*, 61, (2023), 63—75.

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Omar Es-Sahli, Adrian Sescu, Zamir Koshuriyan, Yuji Hattori, Streamwise Pressure Gradient Effect on Görtler Vortices: a Numerical Study in the Compressible Regime, *20th International Conference on Flow Dynamics*, 仙台, 日本 (2023).

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23I074
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目（発展）

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 匠則\*†, 永井 大樹\*\*††  
 山岸 雅人\*, 伊神 翼\*\*, 阿部 淳之介\*\*, 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目的とする。

## 2. 研究成果の内容

今年度は新たにデジタルカメラ11台を利用した多方向同時計測系を追加し、弾道飛行装置内の2箇所で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する3次元密度分布の取得に成功していたが、再突入カプセル模型の計測では、模型の飛行姿勢と飛行方向を同時に計測する必要があった。このため、図1に示すように、多方向同時計測系を追加し一度の計測実験において2箇所から3次元計測を実現するための計測システムを構築した。その結果、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世界で初めて成功した。飛行マッハ数は約1.2で、カプセル模型の飛行方向から模型のピッチ角とヨー角を正確に計測することができた。これらを飛行姿勢の情報と合わせることで、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った。

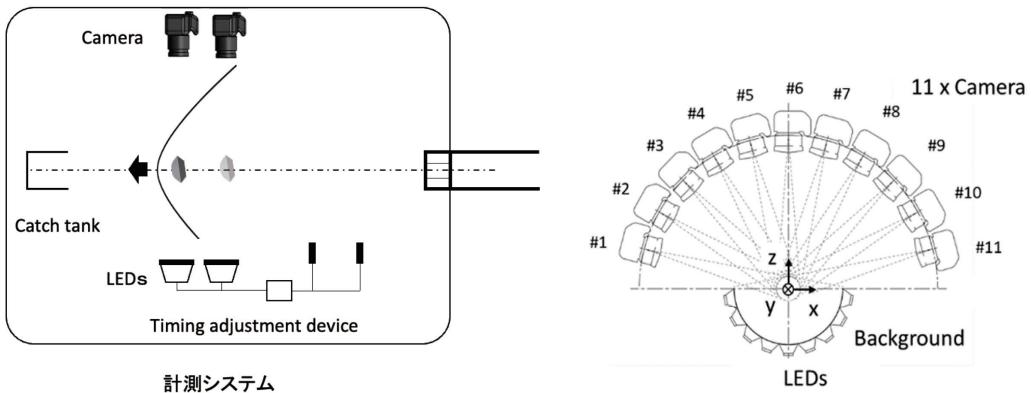


図1：2箇所に配置した多方向同時計測系（左）と11台のカメラの配置（右）の概要

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、これまで実現されていない再突入カプセルまわりの非定常流れ場に対する実験的3次元計測を実現することができた。さらに模型の飛行姿勢と飛行方向を正確に把握することが可能となつたため、本手法により、詳細な実験データの蓄積が可能となる。従来、カプセルの運動解析や最適形状の検討には主に数値解析が用いられてきたが、これらのデータと実験データを直接比較、検証することができるため、研究目標は十分に達成できたと言える。今後は実験データをさらに蓄積し、数値解析と併せて流れ場における現象解明を進めていく予定である。

### 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を合計2台構築し、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3次元計測を実現した。2箇所から計測を行うことで、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, Y. Hirose, M. Ota, K. Ohtani, H. Nagai: Three-Dimensional Density Measurement around A Hayabusa-type Re-entry Capsule Model, *Proceedings of the 20th International Symposium on Flow Visualization 2023 Delft*, (2023), No. 72.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] S. Sato, S. Nogi, N. Kosaka, M. Yamagishi, M. Ota, Y. Hosono, K. Ohtani, H. Nagai: Three-dimensional density measurement of wake region behind re-entry capsule model to clarify the mechanism of its dynamic instability, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-40, pp. 117-119.

[3] 山岸雅人, 高坂菜央, 廣瀬裕介, 稲毛達朗, 宇田川真介, 太田匡則, 滝川侑弥, 大谷清伸, 永井大樹: 2023年度衝撃波シンポジウム, 北九州市, (2024), No. 2A1-2, 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	J23I076
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Evaluation of Heat and Mass Transfer Near the Gas-liquid Interface during the Phase Change of Volatile Organic Compounds

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 heat and mass transfer near the gas-liquid interface during the phase change of volatile organic compounds (VOC) is experimentally measured using an optical measurement method and numerical calculations.

### 2. Details of program implement

#### 2.1 Visualization of acetone vaporization in air

In this study, acetone was chosen as the volatile organic compound, and the heat and mass transfer near the gas-liquid interface during the phase change were experimentally measured using a phase-shifting interferometer, as shown in Fig. 1. Here, the notation 0 s indicates the time just before the acetone injection. The variation in the optical path length difference along the y-axis of the blue dotted line in Fig. 1 is shown in Fig. 2. The optical path length difference near the interface, which indicates the apparent concentration, reached a constant value after approximately 2.0 s from injection. This result indicates that the concentration at the gas-liquid interface reached the saturation concentration of acetone. This result is consistent with those previous works (V. Shevchenko et al., *Chem. Eng. Sci.* 233, 116433, (2021)), where the acetone concentration at the gas-liquid interface reached saturation concentration at 2.0 s just after the injection, and the validity of this visualization experiment was confirmed.

A similar diffusion tendency was confirmed in the case of pressurized CO<sub>2</sub> under 0.55 MPa comparing with a visualization result of air. The apparent concentration gradient of acetone near the interface was steeper. Therefore, it can be estimated that the diffusion coefficient of acetone in CO<sub>2</sub> is lower under high-pressure conditions.

#### 2.2 Evaluation of temperature drop effect on acetone vaporization in air

In this study, the effect of the temperature drop on acetone diffusion in air was discussed with the experimental results in Fig. 1 and the numerical simulation. In this study, the effect of temperature drop on the diffusion coefficient and refractive index was evaluated.

According to the calculation results, the maximum temperature drop near the interface was approximately 7 K at 30 s; however, no significant changes were observed in the concentration distribution. Meanwhile, a slight change in the optical path length difference near the interface was observed. These results were similar to those of a previous study (V. Shevchenko et al., *Chem. Eng. Sci.* 233, 116433, (2021)), and it was confirmed that the temperature drop effect on the concentration distribution and optical parameter changes, such as the refractive index, was weak in acetone vaporization in air.

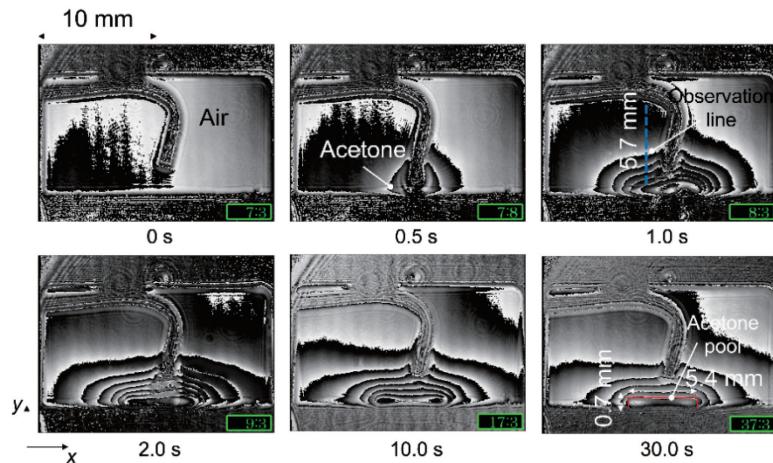


Figure 1: Evolution of phase-shifted data during acetone vaporization in air at 0.1 MPa, 295.65 K.

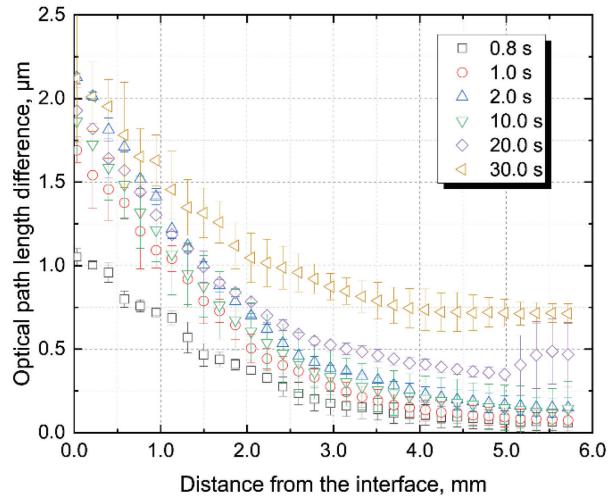


Figure 2: Variations in optical path length difference during acetone vaporization in air.

### 3. Achievements

As expected our plan, we established an experimental evaluation method for the heat and mass transport phenomena in VOC evaporation and conducted a numerical evaluation. In addition, we provided knowledge that will serve as the basis for technological developments to suppress VOC emissions. We also reported our research results at some international conference as shown in “Research results” section.

### 4. Summaries and future plans

In this study, the transient heat and mass transfer of acetone vaporization were measured using the phase-shifting interferometer, and the temperature drop due to phase change was discussed using numerical calculations.

As our next joint research plan, we plan to apply the numerical simulation of VOC diffusion obtained in this study to diffusion phenomena in supercritical fluids.

## 5. Research results Research

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] Y. Kanda, R. Mukai, Y. Hu, L. Chen and A. Komiya: Accurate measurement for transient heat and mass transfer in the vicinity of gas-liquid interface during acetone vaporization utilizing the phase-shifting interferometer, *The 17th International Heat Transfer Conference (IHTC17) IHTC Digital Library*, (2023), (DOI:10.1615/IHTC17.250-50).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [2] R. Mukai, Y. Kanda, Y. Hu, L. Chen and A. Komiya: Measurement and Evaluation of Diffusion coefficients of water and propylene glycol in CO<sub>2</sub> under different pressure using the DPDVA method, *Proceedings of the 22nd European Conference on Thermophysical Properties (ECTP2023)*, (2023).
  - [3] Y. Hu, Y. Kanda, R. Mukai, J. Su and A. Komiya: Pore-scale Simulation of Two phase Displacement and Mass Transfer in Porous Media, *Proceedings of the 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023)*, (2023).
  - [4] R. Mukai, Y. Kanda, Y. Hu, L. Chen and A. Komiya: Evaluation of Organic Solvent Diffusion in Pressurized CO<sub>2</sub> Gas Utilizing Dynamic Pendant Drop Volume Analysis, *Proceedings of the 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023)*, (2023).
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Award)

Best Presentation Award for Young Researcher, "Evaluation of Organic Solvent Diffusion in Pressurized CO<sub>2</sub> Gas Utilizing Dynamic Pendant Drop Volume Analysis", R. Mukai, Y. Kanda, Y. Hu, L. Chen and A. Komiya, Dec. 6, The 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023).

課題番号	J23I077
区分	一般共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目

**自由飛翔体周囲流れ場と表面圧力場の同時計測に向けた基礎研究**  
**Basic Research for Simultaneous Measurement of Flow Field and Surface Pressure Field**  
**around Free-flight 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

自由飛翔体周りの流れ場の研究において、支持干渉の影響なく飛翔体の空力特性を調べるために、バリスティックレンジ試験が実施される。バリスティックレンジ試験では、計測対象である飛翔体を高圧空気や火薬を用いて加速し試験部内に射出する。そのような試験形態であるため、バリスティックレンジを用いた飛翔体試験においては、一般的に飛翔体は一度の試験のみで破損することになり、毎回失われることになる。そのため、バリスティックレンジ試験においては、一度の試験において、飛翔体に関するより多くの試験データを取得することが望ましく、そのために試験時には様々な計測系を整え万全の計測体制を整えておく必要がある。しかしながら、実際の試験においては、バリスティックレンジ試験の性質からそのような計測系を整え試験を実施するのは極めて困難であり、大抵は何らかの単独の計測試験を実施し、限られた計測データのみ取得することになるというのが実情である。

そのような背景を踏まえ、本研究では、バリスティックレンジを用いた空力試験において、一度の試験から流れ場のより多くの定量データを取得するための、空力データの同時計測手法の構築を目指すものとする。特に、飛翔体周りの空力現象と、飛翔体上の圧力場を同時計測する手法の構築を目指し、一度の試験において、飛翔体周りの定量密度場計測と、飛翔体上の定量圧力場計測を同時に実施する方法について検討を行う。本研究では、飛翔体周りの定量密度場計測手法として点回折干渉法 (Point-Diffraction Interferometer, PDI)、飛翔体上の定量圧力場計測手法として感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) 計測手法を採用し、これら計測を同時に実施できる光学系を考案したうえで、それぞれの計測手法を本同時計測手法に適用可能な形に改良することを目指す。

## 2. 研究成果の内容

本研究の目的である PDI と PSP の同時計測手法手法の開発に当たり、双方の可視化計測手法に用いる光源の検討を最初期に実施した。本研究において特に強い制約条件となるのは PSP であり、使用する色素に応じて色素励起用の光源が限定されるため、まずは PSP 側の仕様を確定する作業を実施した。

バリスティックレンジ試験においては、飛翔体上の圧力場の可視化のためには、PSP に高い時間応答特性が必要であり、かつ短時間露光に耐えうる高い発光強度が必要となる。それらを兼ね備えた感圧色素として、本研究ではピレン系色素に着目し、ピレン系色素を陽極酸化皮膜に吸着した陽極酸化皮膜型 PSP (Anodized-Aluminum PSP, AA-PSP) を PSP 計測

に用いることとした。これにより光源としては UV 光源を用いることとし、PDI 計測時においても基本的には PSP 計測に用いる UV 光源と同一の波長を有するレーザー光源を用いることとした。

PSP においては、ピレン系色素を用いた PSP を試作し、パリスティックレンジに用いる前段階の衝撃波可視化試験を実施し、計測時において課題となりそうな点の抽出作業を集中的に行なった。また、それに伴い、従来にない製作手法を用いた AA-PSP の試作も行い、従来型の一般的な製法で作成される AA-PSP と特性比較を行った。PDI においては、限定的ながら UV 光源を用いた光学系構築を行い、こちらにおいても課題点の抽出を行なった。

### 3. 研究目標の達成状況

PDI 光学系の構築においては、光学系として問題なく使用可能であることを確認し、ハードウェア環境が成立すれば十分に研究目的を達成できることを明らかにできた。PSP においては、従来型の AA-PSP に対して新たに提案する AA-PSP の製作手法が有効であると示唆するデータを取得できた。そのため、PSP においては新型製作手法を駆使して作成した AA-PSP の特性向上を図る取り組みを実施しており、現在においてもそれは進行中である。

### 4. まとめと今後の課題

今回の研究において、AA-PSP の新たな製法が本研究の最終目的の実現のために非常に有効であることを見出すことができた。今後は新たな AA-PSP の製作法に注力し、本研究の最終課題を高いレベルで実現することを目指すものである。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] D. Numata, K. Ohtani: Study on Simultaneous Measurement of Various Fluid Information on Free-Flight Objects, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-47, pp.132-133.

[2] 川又有真, 川島健, 沼田大樹: 自動塗装装置を用いて色素吸着した陽極酸化皮膜型感圧塗料の開発, 2023 年度 衝撃波シンポジウム, (2024), 2A2-1.

#### 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	J23I078
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	3rd year

## Product Gas Characteristics of Ammonia/hydrogen Fuel at High Pressure Conditions

Akihiro Hayakawa\*†, Agustin Valera-Medina\*\*††

Marina Kovaleva\*\*, Andrew Philip Crayford\*\*, Hiromi Kondo\*,\*\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*College of Physical Sciences and Engineering, Cardiff University, Cardiff University

\*\*\*Department of Aerospace Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Ammonia is anticipated not only as hydrogen energy carrier but also as carbon free fuel. Thus, to reduce GHG emission, development of combustor operated using carbon-free fuel, such as ammonia is important. Thus, fundamental combustion characteristics of ammonia has widely been studied. In practical combustors, such as a gas turbine combustor, operates under high pressure environment to achieve high-load combustion. Thus, it is important to clarify combustion characteristics of ammonia at high pressure conditions.

In the collaborative research project, flame structure characteristics of ammonia/methane flames stabilized in a stagnation flow were numerically investigated up to elevated pressure.

### 2. Details of program implement

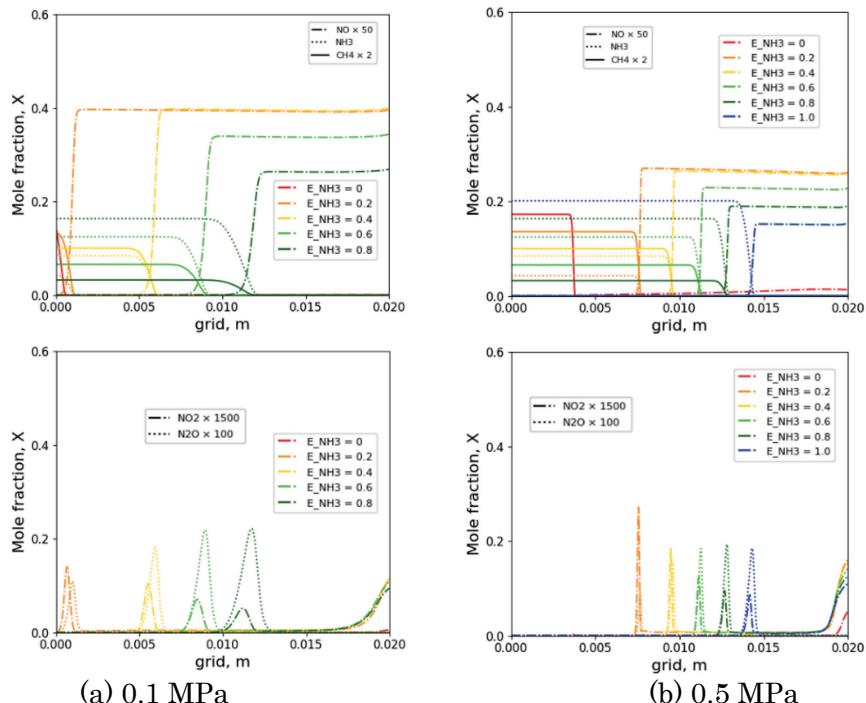


Figure 1: Flame structure of ammonia/methane flames at (a) 0.1 MPa and (b) 0.5 MPa. Here,  $E_{NH3}$  represents the ammonia concentration of the fuel.

In this study, numerical simulations were performed using the FreeFlame and ImpingingJet flame models of Cantera 2.6.0. The distance between the burner outlet to the stagnation plate was set to 20 mm, which is the same for our previous study in [1]. The mixture of ammonia/methane was used as fuel, and concentration of ammonia in the fuel was varied from 0 to 1.0. Numerical simulations were conducted up to 0.5 MPa condition. Detail of the condition of numerical simulation can be found in [3]. Figure 1 represents the species profiles for ammonia/methane flames in a stagnation flow at 0.1 MPa and 0.5 MPa. The profiles of the mixtures were numerically clarified.

### 3. Achievements

In this year, the flame structure of ammonia/methane flames at elevated pressure were numerically clarified. Since the configuration is the same with our previous experiments, the numerical results obtained in this study is relatively easy to compare with experimental results.

### 4. Summaries and future plans

The experimental validation of the results obtained in this study is important. As for the next step, flame structure of ammonia/methane flames stabilized in a stagnation flow will be acquired using laser diagnostics, such as NO-PLIF.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] A. Hayakawa, M. Hayashi, M. Kovaleva, G.J. Gotama, E.C. Okafor, S. Colson, S. Mashruk, A. Valera-Medina: Experimental and Numerical Study of Product Gas and N<sub>2</sub>O Emission Characteristics of Ammonia/hydrogen/air Premixed Laminar Flames stabilized in a Stagnation Flow, *Proc. Combust. Inst.*, 39 (2023), pp. 1625-1633, doi: 10.1016/j.proci.2022.08.124.
  - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
    - [2] M. Kovaleva, G.J. Gotama, A. Hayakawa, E.C. Okafor, S. Colson, A. Crayford, T. Kudo, H. Kobayashi: The Impact of Soret Diffusion on the Product Gas Characteristics of Premixed Laminar Ammonia/hydrogen/air Flames Stabilized in a Stagnation Flow, *Proceedings of the 14th Asia-Pacific Conference on Combustion*, Kaohsiung, Taiwan, (2023), 200 (4 pages).
    - [3] A. Hayakawa, M. Kovaleva, A. Crayford, A. Valera-Medina: Effects of Pressure on Flame Structure of Ammonia/methane/air Premixed Flames Stabilized in a Stagnation Flow, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-2, pp.19-22.
    - [4] M. Kovaleva, A. Hayakawa, E.C. Okafor, Y. Hirofumi, A. Ali, A. Valera-Medina, A. Crayford: The Role of Cyanides and Isocyanides in Emissions Formation of Laminar Premixed Ammonia/methane Flames, *The 61st Symposium (Japanese) on Combustion*, Akita, (2023), D211 (4 pages).
  - 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

Project code	J23I080
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year (progressing)

## 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 Ryukyu

\*\*\*\*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 in multi-scale, 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 membrane, 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 experimental approach, the microscale and macroscale behaviors of multilayer ceramic composites (MCCs) were studied. The primary concern experienced with MCCs is curvature resulting from the differing thermal expansion coefficients (TECs) between adjacent layers of the cell. MCCs will experience curvature in the direction of the material with the higher TEC, and are especially susceptible to curvature with thin film construction. Gaining the ability to confidently predict the curvature of MCCs, assists with structure improvement and tuning for better performance. Stencils were used to cut MCCs into various 2D geometries. For curvature measurements, disks were produced using circular cutting dyes with a diameter of 13 mm. After sintering, the samples were analyzed by comparing the minimum distance between the edges of the disk to the diameter of the sheet and calculating the curvature.

In the molecular simulation approach, we construct a multi-scale molecular simulation model based on the MD simulation and experimental data by using the kMC

method. By using the kMC method, the conduction phenomenon of oxygen ion can be analyzed in 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  $P = J_0 \exp(-E_a / k_B T)$ , where  $J_0$  is the diffusion frequency,  $E_a$  is the activation energy for the diffusion.  $J_0$  and  $E_a$  is computed by MD method and quantum chemical calculation, respectively. Experimental data is also applied for 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, 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 the experimental approach, it was found that an experimental TEC can be used to predict MCC curvature using Timoshenko's analytical model for curvature. It is also valid for various substrates and film thicknesses. Based on this work, we can predict the MCC sheet shape and thin-film pattern necessary to obtain desirable complex ceramic shapes, such as a tube or wave pattern formed from a ceramic sheet. In molecular simulation approach, we constructed an original kMC simulation code that incorporates MD analysis data for Multi-scale analysis.

### 4. Summaries and future plans

In the experimental approach, dual-phase electrolyte membranes will be generated by the lamination process, which is very common and effective for industrial scale applications. Dual-phase electrolyte membranes consisting of  $(Y_2O_3)_{0.02}(ZrO_2)_{0.98}$  (YSZ) and  $Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{2-\delta}$  (SDC) are laminated onto solid oxide fuel cell substrates. These layers are generated by forming ceramic slurries with ceramic powders, then deposited via the tape casting method. Once dried for at least 24 hours, the YSZ is laminated with a hydraulic press onto an anode substrate. The SDC layer is then laminated onto the YSZ layer and the composite is then sintered. After cooling from sintering, the cells are fractured and imaged using a scanning electron microscope to reveal cross-sectional structure as well as surface morphology. Conductivity of the SOEM will be determined using the four-terminal DC technique, and the oxygen permeation flux will also be analyzed. Dual-phase electrolyte membranes also present a more complex curvature problem which can be studied in future work. In molecular simulation approach, the effect of GBs on oxygen ion conduction properties and its correlation will be analyzed using the constructed kMC code created. Furthermore, the validity of the simulation results will be checked by comparison with those of experiments.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] T. Ijichi, H. Nagashima, A. R. Hartwell, J. Ahn and T. Tokumasu: Oxygen Ion Conduction Property of Solid Oxide Membrane Based on Multi-scale Analysis, *ECS Transactions*, 111 (6) (2023), 1597-1602.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [2] T. Ijichi, H. Nagashima, A. R. Hartwell, J. Ahn and T. Tokumasu: Oxygen Ion Conduction Property of Solid Oxide Membrane Based on Multi-scale Analysis, *18th International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC-XVIII)*, May 28-June 2, Boston, MA, (2023).

[3] T. Ijichi, H. Nagashima, A. R. Hartwell, J. Ahn and T. Tokumasu: Experimental and Computational Analysis of Solid Oxide Fuel Cell Multilayer Ceramic Composites, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-16, pp.57-59.

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

Project code	J23I081
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st 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 (Intracranial Aneurysms IA) is a weak or thin spot on an artery in the brain that balloons or bulges out and fills with blood. The bulging aneurysm can put pressure on the nerves or brain tissue. It may also rupture, spilling blood into the surrounding tissue. A ruptured aneurysm can cause serious health problems such as hemorrhagic stroke, brain damage, coma, and even death.

The aim of this project is to establish a comprehensive computational model of aneurysm initiation integrating aspects of hemodynamics, biomechanics, mechanobiology, and the peri-aneurysmal environment. Pre-existing experimental model will be utilized for validation process. The objective is to correlate model-predicted variables with experimental observations, facilitating a deeper understanding of the pathobiology-hemodynamics interaction and elucidating the mechanisms underlying aneurysm development and rupture.

### 2. Details of program implement

A cerebral aneurysm is a vascular condition characterized by local ballooning of an artery in the brain. Cerebral aneurysms are classified as Saccular, and Fusiform aneurysms. Although aneurysm formation and growth are thought to be the result of destruction of the blood vessel wall, the details of the etiology are unclear. Aneurysm formation begins with extrusion of the locally weakened wall of an artery. Some aneurysms stay the same size while others grow continuously.

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.

The role of blood-flow physiological parameters regulating aneurysm morphology and natural history is poorly understood. It is necessary to model intra-aneurysmal hemodynamics using realistic aneurysm geometries because aneurysm geometry is one of the most important factors determining aneurysm flow patterns and WSS distributions that influence aneurysm progression. Most models tend to oversimplify the complex flow patterns observed in aneurysms *in vivo*. The difficulty of developing reliable *in vitro* and animal models has hampered an accurate evaluation of those physiologic parameters. Furthermore, better understanding of the mechanisms of aneurysmal growth requires the study of the interaction among hemodynamics, wall mechanobiology, wall biomechanics, and contacts with the peri-aneurysmal environment structures. This will help improve patient evaluation and treatment.

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). Moreover, the constructed geometries are used to perform a computational simulation for the blood flow through the cerebral aneurysm using CFD.

In this study, a three-dimensional reconstructed IA geometry with experimentally obtained boundary conditions is considered. Hence, a three-dimensional comprehensive model including the Newtonian flow viscosity model under pulsatile flow conditions is developed. The arterial wall elasticity through two-way Fluid-Structure Interaction (FSI) is considered for the developed model to calculate the hemodynamics. Moreover, blood dynamic factors will be used to investigate the flow characteristics with elastic arterial wall and temporal flow responses. The two-way FSI procedure was performed by applying an Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation to calculate the arterial response.

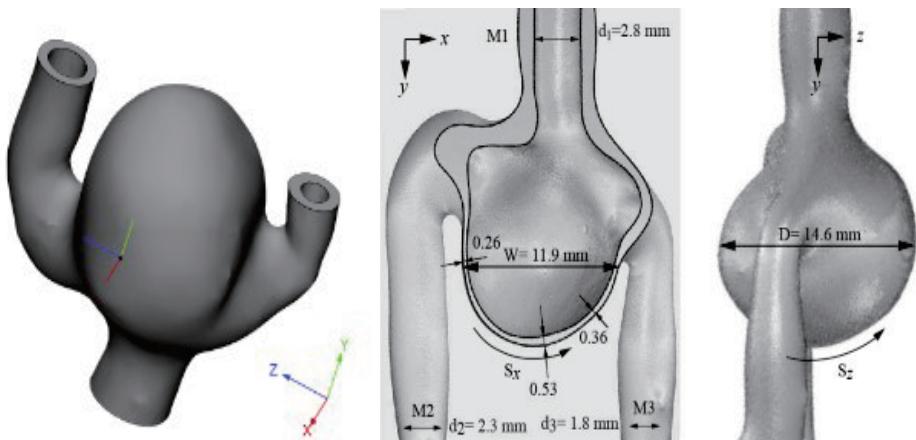


Figure 1: Phantom model development.

### 3. Achievements

The relationship between hemodynamics and cerebral artery aneurysm mechanics has yielded key insights in this investigation.

In this study, the validation process between experimental and numerical models demonstrated a good agreement, particularly regarding the relationship between hemodynamics and cerebral artery aneurysm mechanics. A systematic comparison was performed, evaluating simulated hemodynamic parameters like flow patterns in vitro data as shown in Figure 2Figure 3. This rigorous validation confirmed the accuracy of the numerical predictions and identified significant correlations between simulated

variables and observed aneurysm behavior.

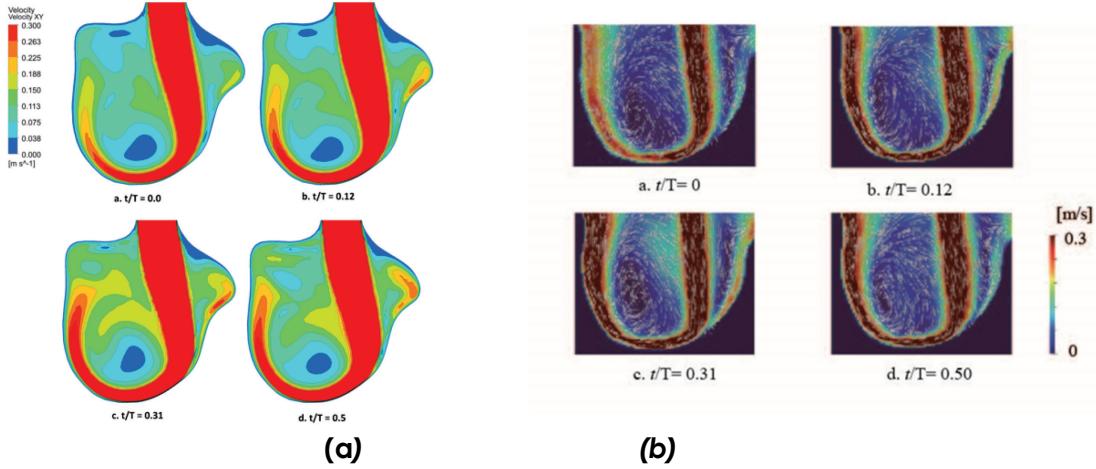


Figure 2: Comparative velocity Contours in the (a) numerical and (b) Experimental elastic models at XY plane along the flow wave.

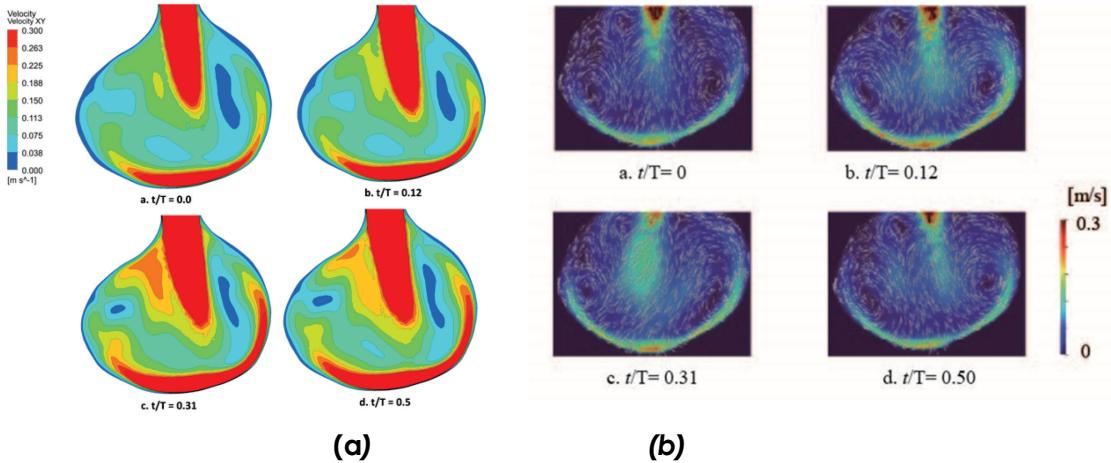


Figure 3: Comparative velocity Contours in the (a) numerical and (b) Experimental elastic models at YZ plane along the flow wave.

Furthermore, Computational simulations revealed nuanced yet impactful 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, influencing key parameters like wall shear stress (WSS), time-averaged WSS, pressure distribution, and formation of stagnation regions and kinetic energy cascades as shown in Figure 4 - 9. 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.

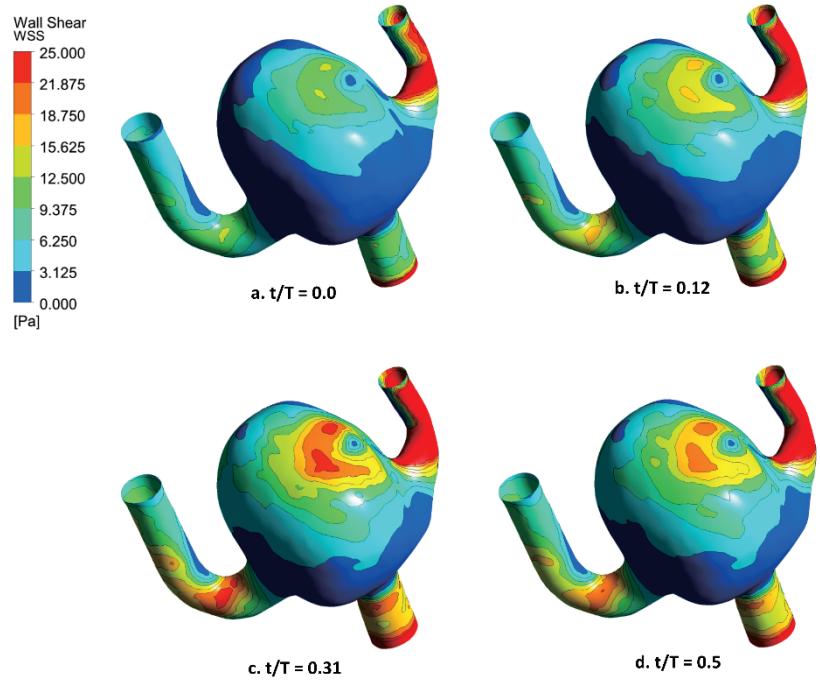


Figure 4: Wall Shear Stress (WSS) along the flow wave.

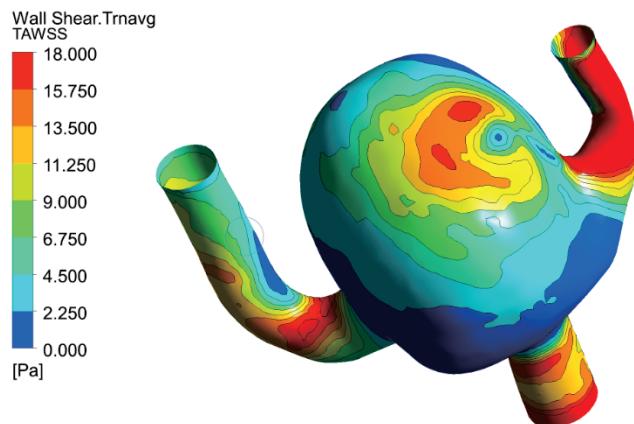


Figure 5: Time-Averaged Wall Shear Stress (TAWSS).



Figure 6: Oscillatory Shear Index (OSI).

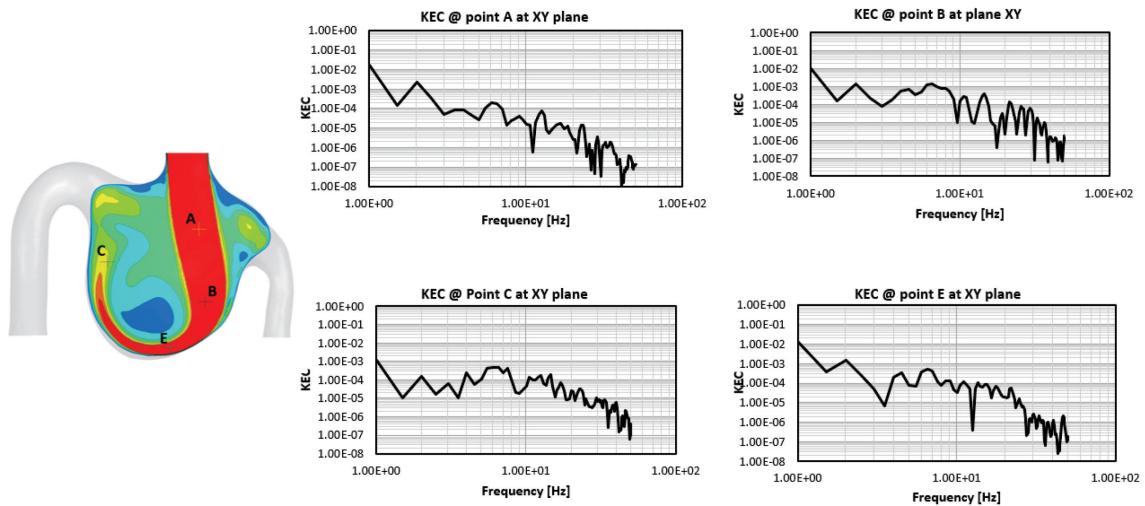


Figure 7: Kinetic Energy Cascades.

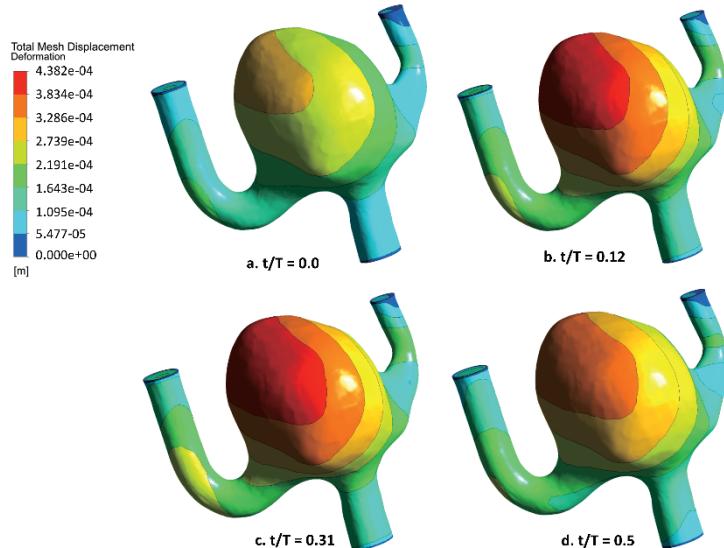


Figure 8: Phantom Model Deformation.

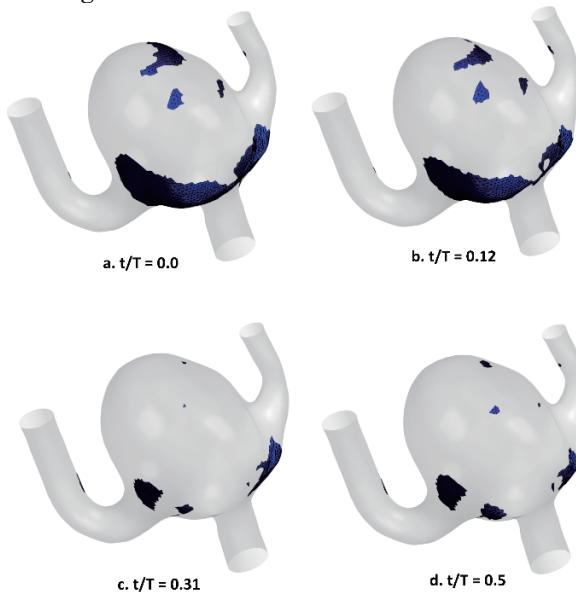


Figure 9: Stagnation Region Where Velocity Reached Near Zero.

#### 4. Summaries and future plans

These findings provide a foundation for developing robust predictive models that integrate theoretical principles with empirical evidence. Such models have the potential to significantly impact clinical decision-making by facilitating personalized diagnoses and tailored treatment strategies.

The current findings boost toward further exploration, refining the model and expanding its reach to address critical challenges and detect deeper understanding.

A pivotal aspect of our future work involves systematically varying boundary conditions to understand their impact on the computational outcomes. By exploring a range of conditions, we aim to identify the set of conditions that most accurately reflect the experimental data. This iterative process will involve adjusting inlet and outlet conditions to find the configuration that best aligns with observed hemodynamic patterns.

A comprehensive exploration of Young's modulus sensitivity is on the horizon. We will systematically vary this parameter, observing its impact on different hemodynamic variables. This in-depth analysis aims to provide an understanding of how mechanical properties influence aneurysm growth and rupture, offering invaluable data for clinical applications.

#### 5. Research results

Not applicable.

Project code	J23I082
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st 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\*, Guohang Lu\*

\*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, not all NDT techniques are powerful to detect CUI. Fortunately, pulsed eddy current testing (PECT) has been proven useful in local wall thinning quantification of the ferromagnetic pipe with insulation. In the past few years, there have been a lot of studies focused on its modeling theory, signal denoising method and feature extraction [\[1-5\]](#). However, the filter effect and adaptability of feature extraction leave a lot to be improved.

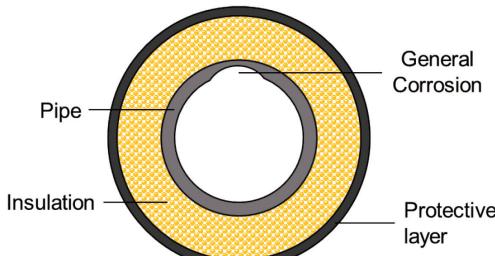


Figure 1 : Corrosion under insulation.

In this study, to improve signal-to-noise ratio and adaptively extract signal feature and finally obtain better quantification accuracy of the ferromagnetic material thinning, a novel signal denoising method with significant filtering effect using Gauss filter and Independent Component Analysis (ICA) and a new PECT signal feature extraction method based on Hough transform (HT) are proposed.

The proposed signal processing method includes Gauss-ICA filter and HT feature extraction method. It comprises the following steps: Firstly, an ICA model can be built using the PECT signal obtained from the experiment and the power frequency interference signal, and then the interference-free signal can be obtained by solving this model with Fast-ICA algorithm. Secondly, a Gaussian filter is used to remove random noise from the interference-free signal to obtain a clean signal. Finally, HT is utilized to recognize the later linear stage of PECT signal, and the arctangent value ( $\theta$ ) of the slope of the recognized line is used as the signal feature.

The main types of the noises embedded in pulsed eddy current signal are power-line interference and Gaussian noise with normal distribution. ICA is firstly introduced to suppress the power-line noises, the power-line interference is shown in Figure 2. The ICA model is  $\mathbf{x} = \mathbf{As}$ , where  $\mathbf{s}$  is independent component (IC) and  $\mathbf{A}$  is the mixture matrix. And the process of ICA is shown in Figure 3. In order to obtain  $u_1(t)$ , the correlation coefficient between each component of the IC matrix and the original PEC signal can be calculated as

$$R(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}[X]\text{Var}[Y]}} \quad (1)$$

The result of calculation is shown in Figure 4. Thus  $IC3$  is the PEC signal free of power-line noise  $u_1(t)$ .

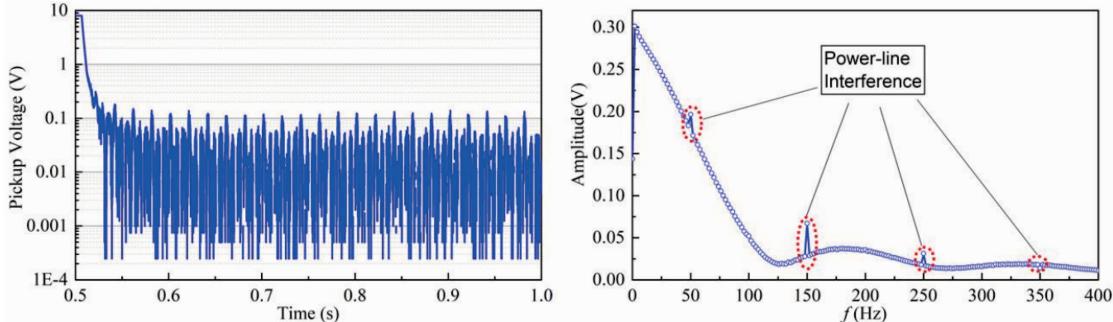


Figure 2 : The power-line interference in raw PEC signal.

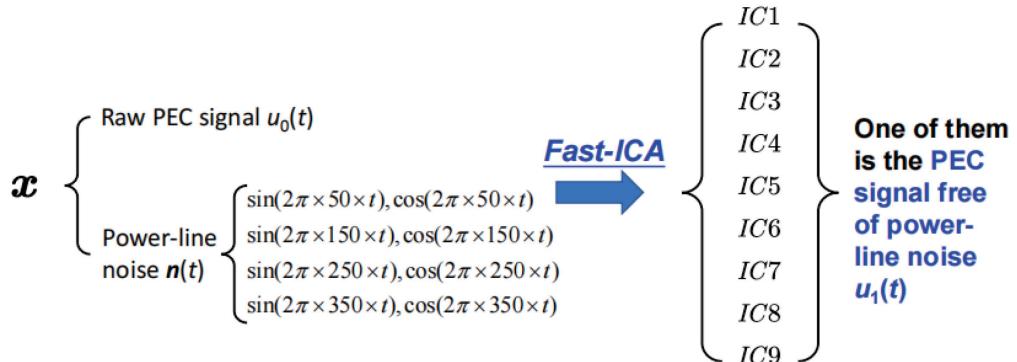


Figure 3 : The process of ICA.

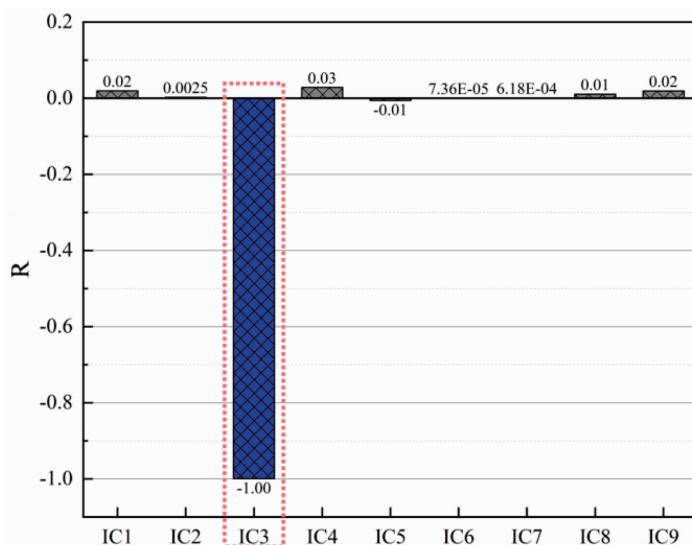


Figure 4 : The calculation of the correlation coefficient between each component of the IC matrix and the original PEC signal.

After eliminating the power-line noises, numerous random noises still exist in the PEC signal with a normal distribution. The random noises are shown in Figure 5. This means that the random noise belongs to Gaussian noise, thus the Gauss filter should be useful to denoise the PEC signal. The Gauss filter is a non-uniform low pass filter, which can be achieved through the convolution with gauss kernal. The expression of Gaussian filtering to  $u_1(t)$  can be described as

$$u(t) = u_1(t) \otimes g \quad (2)$$

Where,  $\otimes$  represents convolution;  $g$  is a Gauss template function with a mean of zero. After Gaussian filtering of  $u_1(t)$ , the pure PEC signal  $u(t)$  is obtained without the power-line interference and Gauss noise.

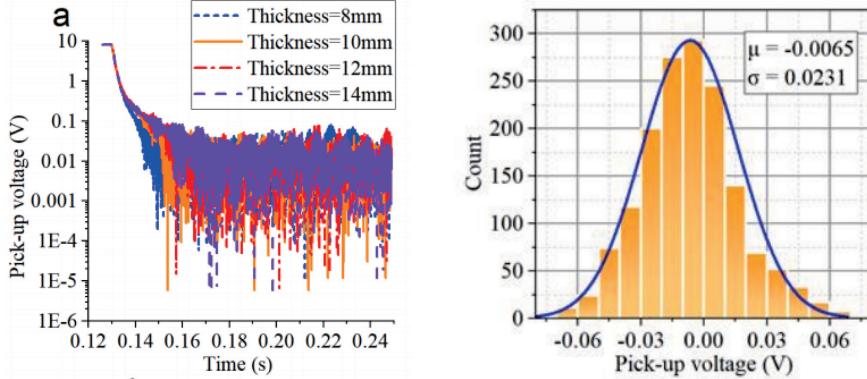


Figure 5 : The Gaussian random noise.

Next, HT is used to adaptively capture the later-stage line part of the smooth PEC signal. The principle of abstracting the line part through HT is shown in Figure 6. For different thicknesses of plates, the later-stage gradient is similarly different. As shown in Figure 7, the starting time of linear varies with the thickness, thus HT is employed to recognize the linear part. The decay rate of the later linear part of PECT signal under single-logarithm coordinate system is regarded as the characteristic value to detect the thinning defects of ferromagnetic material. The characteristic value is related to the thickness of the specimen, so it is called the thickness angle.

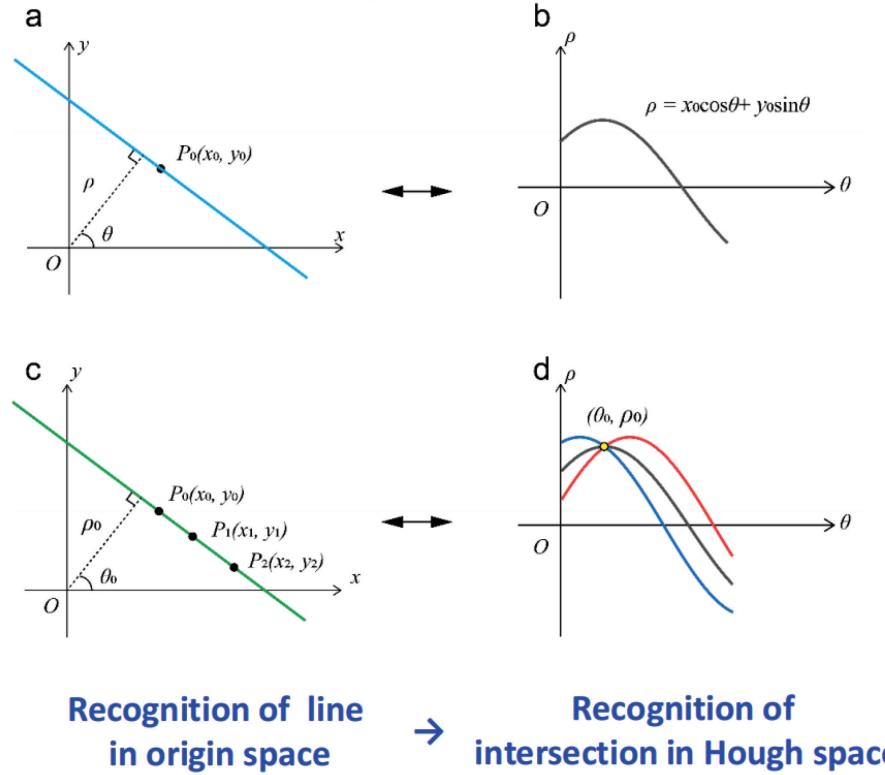


Figure 6 : Principle of HT.

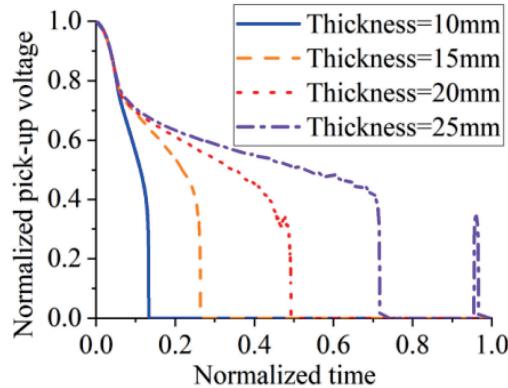


Figure 7 : Normalized PEC signals of different thicknesses.

#### 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) A PEC-based quantitative method for evaluating the thickness of ferromagnetic materials is proposed. The method is assisted by ICA-Gauss filter and Hough transform (HT).
- 2) ICA-Gauss filter is used to suppress the power-line noises and random noises in raw PEC signals. After filtering, the signals becomes significantly smooth.
- 3) HT is used to adaptively capture the later-stage gradient to obtain the arctangent value  $\theta$ , which is called as the thickness angle to measure the thickness of ferromagnetic materials.

### 4. Summaries and future plans

#### 1) Summaries

A PEC-based quantitative method for evaluating the thickness of ferromagnetic materials is proposed. The method is consisted of ICA-Gauss filter and Hough transform (HT). ICA-Gauss filter is used to denoise the PEC signals and HT is employed to recognize the linear part of the signals.

#### 2) Future plans

- ①Fabrication of testpieces of different wall thinning of ferromagnetic material plate and pipe;
- ②Optimization for the developed ICA-Gauss filter by discussing the power-line harmonics to be removed and the downsampling factor.
- ③Discussion on the feasibility and superiority 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] W. Guo, S. Xie, Y. Du, H.E. Chen, Z. Chen, T. Takagi and T. Uchimoto: A Numerical Simulation Method for High-Frequency Eddy Current Testing Considering Displacement Current Effect, *IEEE Transactions on Magnetics*, doi: 10.1109/TMAG.2023.3323810.
  - [2] S. Xie, S. Yang, M. Tian, R. Zhao, Z. Chen, Y. Zheng, T. Uchimoto and T. Takagi: A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques based on wavelet analysis, *NDT and E International*, Vol. 138, (2023), 102900 (14 pages), doi: 10.1016/j.ndteint.2023.102900.
  - [3] Y. Fang, Y. Qu, X. Zeng, H.E. Chen, S. Xie, Q. Wan, T. Uchimoto and Z. Chen: Distinguishing evaluation of plastic deformation and fatigue damage using pulsed eddy current testing, *NDT and E International*, Vol. 140, (2023), 102972 (7 pages), doi: 10.1016/j.ndteint.2023.102972.
  - [4] L. Qiao, H.E. Chen, K. Deng, Z. Wang, Y. Zhao, S. Xie, Z. Chen, T. Uchimoto and T. Takagi:

An inversion scheme for sizing crack from signals of the motion-induced eddy current testing method based on a new formula of signal gradient of ferromagnetic materials, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 198, (2023), 110453 (14 pages), doi: 10.1016/j.ymssp.2023.110453.

- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)  
[5] S. Xie, S. Yang, G. Lu, W. Guo, Z. Chen, T. Uchimoto and T. Takagi: Pulsed ECT signal processing algorithm for better quantification of ferromagnetic material, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-22, pp. 73-76.

- 3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

“Evaluation of wall thinning with thick insulator based on pulsed eddy current testing method using novel signal processing way”, Shejuan Xie, Guohang Lu, Jizhou Zhang, Zhenmao Chen and Hong-En Chen, June 27, 2023, apply.

Project code	J23I084
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	2nd 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 temporally evolving natural convection boundary layer flow along a vertically heated isothermal wall using direct numerical simulation (DNS). The development of the flow and the Grashof number dependence of the first and second order turbulence statistics are examined. In this study we aim to visualization experiment and 3-D numerical simulation of thermal flow fields in a closed cavity under spatiotemporally variable thermal condition are performed near the critical Rayleigh number. This aims to evaluate the natural convection flow for heat transfer enhancement.

### 2. Details of program implement

A three-dimensional direct numerical simulation has been carried out by IFS super computing system, with  $Pr = 0.71$  using a massively parallelized solver. A uniform mesh is used in the homogeneous directions (streamwise and spanwise); while the wall-normal direction employs a logarithmically stretched mesh using Gamma function, with a maximum stretching rate of 3.56%. Here the adequacy of the grid resolution is assessed by the Kolmogorov scale  $\eta_k$  and calculation of the 1D energy spectra. With increasing Grashof number or equivalently Reynolds number,  $\eta_k$  decreases. By the end of simulation, the grid size in the homogeneous directions is 2.5 times large scale of  $\eta_k$ ; while the minimum wall-normal cell (i.e., first cell adjacent to the wall) is about 50% of  $\eta_k$  and the maximum wall-normal cell (i.e., the first cell adjacent to the far-field boundary) is about 6 times large scale of  $\eta_k$ . With this grid size our tests have shown the energy spectra is well resolved in our code. Through the numerical simulations, we revealed the development of turbulence structures and statistics has two stages: at low Grashof number, the flow has a laminar-like near-wall region with a turbulent outer bulk flow; and at higher Grashof number, the entire flow is turbulent. Fig 1 shows the visualisation of the streamwise velocity contours at  $y^+ \approx 15$ . In (a) and (c) the Grashof number is relatively low and the low-speed packets occupy a large wall-parallel area of the instantaneous velocity field; whereas at higher Grashof number in (b) and (d) the flow field appears much more streaky, with streamwise elongated streaks that are commonly seen in the momentum-driven turbulent boundary layers.

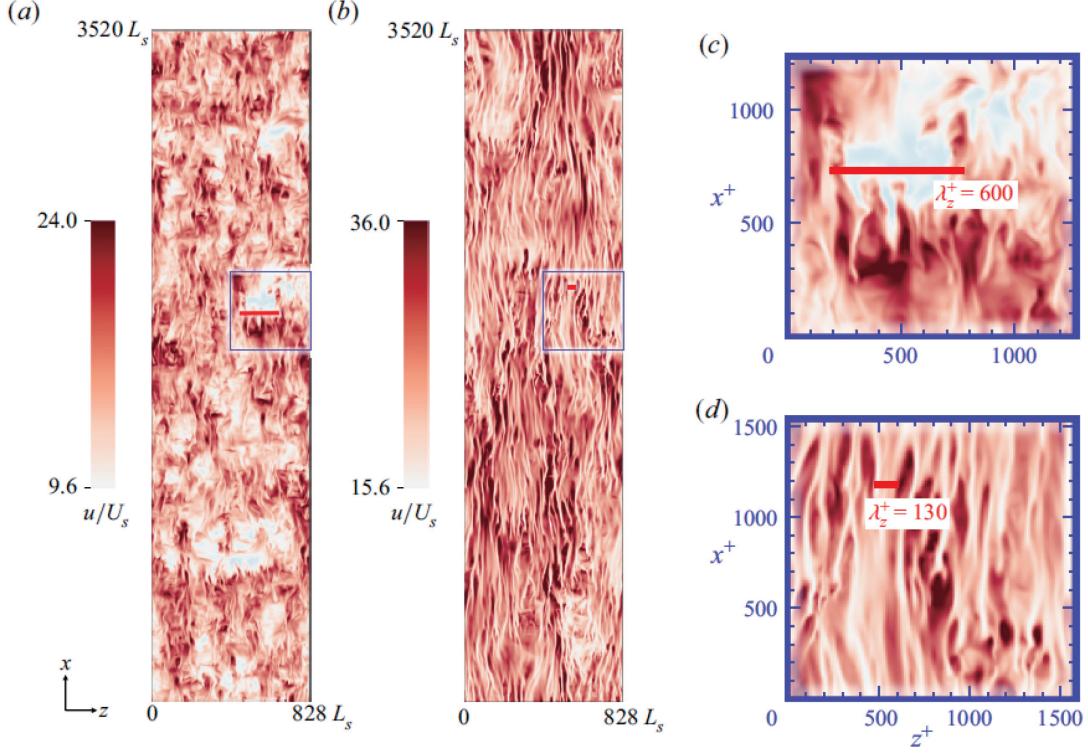


Figure 1: Wall-parallel planes of the normalised instantaneous streamwise velocity in the near-wall region at  $y^+ \approx 15$  for (a)  $Gr_\delta = 10^6$ , and (b)  $Gr_\delta = 2.7 \times 10^7$ . (c,d) Magnified view of the blue boxes in (a,b), respectively. The horizontal red line in (a) and (c) depicts the most energetic length scale at  $Gr_\delta = 10^6$ ; the horizontal red line in (b) and (d) depicts the most energetic length scale at  $Gr_\delta = 2.7 \times 10^7$ .

### 3. Achievements

In 2023, this project has resulted in a joint publication in the *Journal of Fluid Mechanics*. The resulting publication was also featured in *Focus on Fluids* for being 1 of the 12 most significant *Journal of Fluid Mechanics* (JFM) articles in 2023. This project also resulted in two Int'l conference presentations in 2023 – one of which was invited keynote.

### 4. Summaries and future plans

The present study investigates a temporally developing natural convection boundary layer with  $Pr = 0.71$  using direct numerical simulation. The DNS results reveal that turbulence development of such a thermally driven convective flow has two distinct stages: at relatively low Grashof number, the bulk flow is turbulent while the near-wall region is laminar-like or weakly turbulent; at sufficiently high Grashof number, the entire flow becomes turbulent in the sense of von Kármán. In the weakly turbulent regime, the near-wall turbulence is sustained predominantly by the pressure transport in addition to the shear production. At higher Grashof number, the flow becomes fully turbulent, and both turbulent transport and shear production become stronger, while the pressure transport is decreased.

In future study, we will continue to explore the turbulence development in water flows ( $Pr=7$ ) and the transition mechanism towards the ultimate turbulence regime.

## 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] Ke Junhao, N. Williamson, S. W. Armfield, A. Komiya: The turbulence development of a vertical natural convection boundary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 964, A24. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.382>.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [2] Ke Junhao: invited keynote, *the 12<sup>th</sup> Australasian Natural Convection Workshop*, Melbourne Australia, 2023, pp41-42
  - [3] N. Williamson: From the classical regime to the ultimate regime of natural convection: turbulence structure evolution and near-wall streaks. In *American Physics Society, Annual meeting of the Division of Fluid Dynamics*, Washington DC the United States, 2023.
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent) Not Applicable  
  
(Award) Featured in Focus on Fluids, A. Wells, From classical to ultimate heat fluxes for convection at a vertical wall, *Journal of Fluid Mechanics*, 970, F1. 08 Sept 2023. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.665>  
  
(Press release) Not Applicable

Project code	J23I085
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year (progressing)

## 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 achieving the project goals.

### 2. Details of program implement

In 2023, we aim at generating a laser-induced cavitation bubble in a water drop in oil to generate plasma in the bubble, because the discharge in a laser-induced cavitation bubble in oil was difficult. Fig. 1 shows a concept of the generation of laser-induced cavitation bubble in water droplet in oil and discharge in the bubble. A  $10 \times 10 \times 50$  mm glass cell was filled with silicone oil, and a tungsten needle electrode with a radius of 30  $\mu\text{m}$  was set in the silicone oil. The water droplet was supplied using the microtube with an inner diameter of 100  $\mu\text{m}$ . A voltage of up to 5 kV was applied to the electrode. The voltage and current waveforms were measured with an oscilloscope. The cavitation bubble, induced by a laser pulse, was imaged by a high-speed camera at 1 Mfps with a microscope lens. A 532 nm laser was used as background light.

Fig. 2 shows a series of photographs of Fig. 1. In this experiment, the initial droplet size was reduced to 0.5 mm in diameter. In addition, +5 kV was applied to the electrode 10  $\mu\text{s}$  after laser irradiation. The droplet reached its maximum diameter at 60  $\mu\text{s}$  after

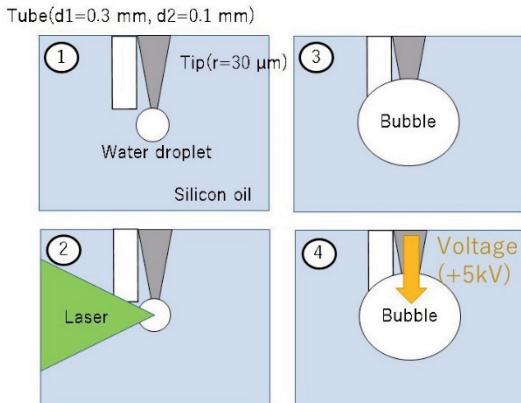


Fig. 1 The concept of generation of bubble in water droplet in oil and discharge in the bubble.

the pulsed laser irradiation, and then converged to a minimum value at about 160  $\mu$ s. Thereafter, a slight rebound is observed once, and finally the droplet diameter is reduced to the initial droplet diameter. Considering these observed shadows as a bubble and a water droplet, it can be inferred that as the rebound bubble moves toward the left of the electrode, the water droplet also deforms and approaches the bubble in the oil.

### 3. Achievements

To generate a discharge in cavitation bubbles in insulating oil, the laser was focused on a water droplet to generate water vapor cavitation bubbles. The discharge was successfully generated inside the bubble. This result shows that we could achieve the first step to charge in a cavitation bubble in oil.

### 4. Summaries and future plans

Successful generation of the discharge in a cavitation bubble in oil opens the next stage to increase the energy density of the cavitation bubble at collapse. The next plan is the generation of discharge in a cavitation bubble in oil by reduction of pressure.

### 5. Research results

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

[1] S. Liu, K. Nitto, O. Supponen, S. Kamata, T. Nakajima, M. Farhat, T. Sato: Plasma-based identification of gases in a laser-induced cavitation bubble, *Applied Physics Letters*, Vol. 123, Issue 9 (2023), Article No. 094102, doi: 10.1063/5.0164732.

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

[2] K. Kurihara, S. Liu, T. Nakajima, K. Ohtani, M. Farhat, T. Sato: Production of Laser-induced Bubbles in Water-oil System, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-46, pp. 130-131.

#### 3) Patent, award, press release etc.

##### (Patent)

“Generation Device and Generation Method of the Electromagnetic Wave”, Takehiko Sato, Siwei Liu, Tomoki Nakajima, March 21, 2024, apply.

##### (Award)

Not applicable

##### (Press release)

Not applicable

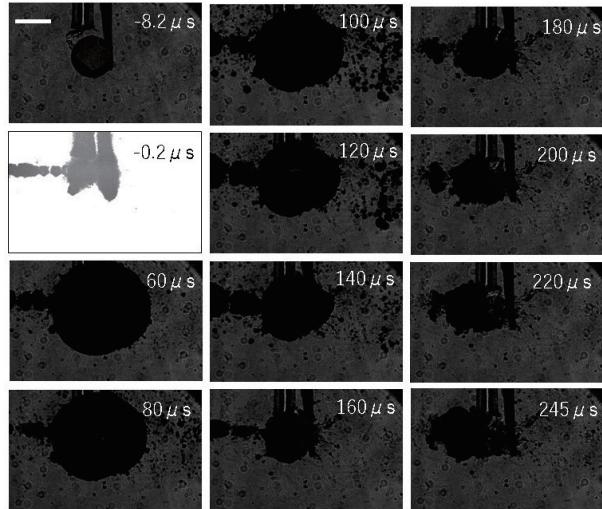


Fig. 2 Images of the bubble behavior generated in the water droplet in oil with application of +5kV. (Frame rate: 1 Mfps, Exposure time: 500 ns, Scale bar: 500  $\mu$ m)

課題番号	J23I086
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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\*\*††

Liu Siwei\*, 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, \*\*\*東北大学工学部

†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  $\mu\text{m}$  ~ 数百  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  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

高速ナノ液滴発生装置を図 1 に示す。主にヒーター、水蒸気発生容器、ガスボンベ、圧力計、温度計、ノズルから構成されている。本装置の原理は、5 気圧の水蒸気混合加圧空気をノズルから大気中に超音速流として噴出させ、凝縮した水蒸気を高速ナノ液滴化するものである。水蒸気はヒーターで水を沸騰させて発生させる。凝縮を防ぐためノズルはワイヤーヒーターで加熱している。容器に供給されるガス圧と水温、ノズル温度を計測し制御する。高速ナノ液滴噴流の可視化は、紫外線ナノ秒パルスレーザーの照射の散乱光を ICCD カメラで撮影した。図 2 は紫外線ナノパルスレーザー照射時

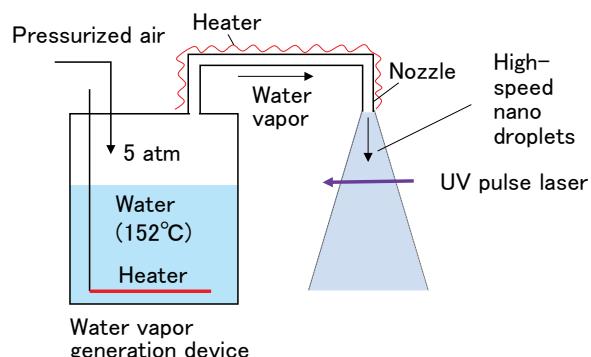


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

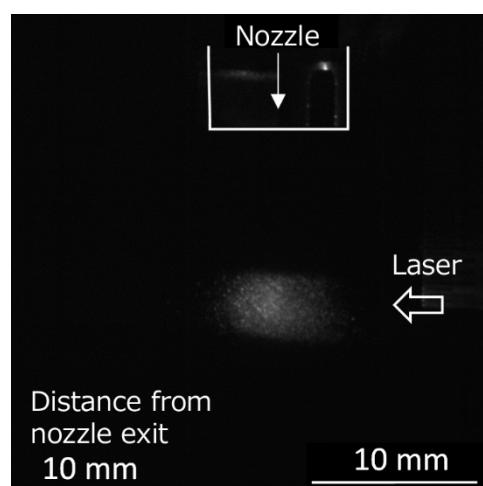


Fig. 2 Image of the scattering emission from the ultrafine droplets by the irradiation of nanosecond pulse laser.

の高速ナノ液滴噴流からの散乱発光を示している。散乱領域には点状に光る点が多数観察できる。この点状の光は個々の液滴からの散乱と考えられる。一方、散乱領域には雲状の散乱光も観察されている。これより、点状の散乱光は、粒径がやや大きめの液滴で、雲状の散乱光は、粒径が小さい液滴の散乱光であることが推測できる。

### 3. 研究目標の達成状況

肉眼では視認できない高速ナノ液滴を、紫外線パルスレーザーを照射しその散乱光を ICCD カメラで撮影することに成功した。これにより、本装置により極めて小さな液滴が生成されていることを実験的に確認することができた。この結果は、高速ナノ液滴の存在の証左となることから、大きな成果となった。

### 4. まとめと今後の課題

液滴の存在を確認する手法を確立できたため、噴流がどのような状態で流れているのかについても可視化に取り組み、高速ナノ液滴の機能性発現との関係を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）

[1] 佐藤岳彦, 劉思維, 中嶋智樹, 肖昀晨, 藤村茂, 金澤誠司: 高速ナノ液滴が拓く「超節水・薬剤フリー・濡れない」殺菌・洗浄, クリーンテクノロジー, Vol. 33, No. 9 (2023), pp. 40-43.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] T. Sato, H. Fujita, R. Kumagai, S. Kanazawa, K. Ohtani, A. Komiya, T. Nakajima, T. Kaneko: Initiation and propagation mechanisms of underwater streamers, *76th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2023)*, Ann Arbor, Michigan, USA, (2023), Presentation No. HR4.00006.

[3] T. Sato, S. Fujimura, S. Kanazawa, Y. Xiao, T. Nakajima, S. Liu: Development of innovative sterilization method by high-speed nanodroplets, *7th Taiwan-Japan Workshop on Plasma Life Science and Technology (TJPL7, TJPL2023)*, Hsinchu, Taiwan, (2023).

[4] T. Sato, S. Kanazawa, K. Tachibana, S. Liu, T. Nakajima: Characteristics of High-speed Ultrafine Droplets, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-34, pp. 104-105.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

##### （特許）

1. 高速ナノミストおよびその生成方法と生成装置、処理方法と処理装置および計測方法と計測装置、佐藤岳彦, 中嶋智樹, Xiao Yunchen, 藤村茂, 出願番号: PCT/JP2021/039443, 110139761(台湾), 2022-559148(日本), 公開番号: WO2022/092069, 202233255(台湾)(2022公開), 116438013(中国)(2023. 7. 14 公開).
2. (仮) ナノ液滴・ナノ粒子の粒径計測法、佐藤岳彦, Liu Siwei, 中嶋智樹, 大熊拓郎, 発明整理番号: P20230067 (2024).

（受賞）該当なし

（マスコミ発表）該当なし

Project code	J23I087
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st 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 provided ammonia fuel mixtures to the nickel side (anode) of the fuel cell. Thermal cracking of the ammonia at high temperatures provided 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 project 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 were 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.

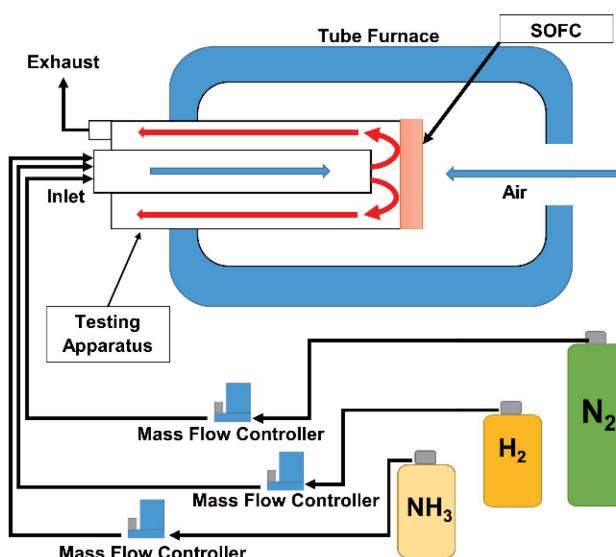


Figure 1: Experimental setup implemented for SOFC testing.

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 mixture compositions which were estimated in the simulation approach and the results were compared to the performance on pure hydrogen fuel. In this way, hydrogen sets the baseline for the SOFCs performance level. Electricity generation was analyzed using a four-terminal DC technique. In order to focus on the direct reactions of ammonia and hydrogen on the SOFC, the model syngas supplied to the cell only contained ammonia, hydrogen, and nitrogen, where nitrogen accounted for any other gas species generated by the MFR. Figure 1 above depicts 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 combined for mixing in a manifold immediately after the mass flow controllers.

### 3. Achievements

The peak ammonia reformation using the MFR system was determined to occur at an equivalence ratio of  $\phi=4$  and a temperature of 1400°C. Tables 1 and 2 show the supply to the MFR and the exhaust exiting the MFR, respectively. The exhaust composition from the MFR makes up the components of the fuel supply to the SOFC, as shown in table 3, with a total flow rate of 100 ml/min.

Table 1 : Supply to Micro-Flow Reactor

$NH_3$ (flow %)	$O_2$ (flow %)	$Ar$ (flow %)
52	10	38

Table 2 : Exhaust from Micro-Flow Reactor

$NH_3/NH_{3,initial}$	$H_2$ (flow %)
0.8	1

Table 3 : Supply to Micro-Flow Reactor

$NH_3$ (flow %)	$H_2$ (flow %)	$N_2$ (flow %)
41.6	1	57.4

The SOFCs were tested with hydrogen first to obtain a good baseline, then tested with the model ammonia syngas. Figure 2 depicts the polarization curves for the SOFC operating on pure hydrogen. The open circuit voltage (OCV) is approximately 1V when testing from 650°C to 750°C. The cell also shows a good maximum power density of 343mW/cm<sup>2</sup> at 750°C. The same SOFC was also used for gathering polarization curves with model ammonia syngas, as depicted in figure 3. While operating on the model syngas, the SOFC showed an anticipated decrease in OCV, power density, and stability. The OCV was approximately 0.9V for all testing temperatures. Since there is only 1% H<sub>2</sub> in the supply flow, the majority of power generation is dependent on the rate of thermal cracking of NH<sub>3</sub>. This means that any fluctuations in thermal cracking will be accompanied by voltage and power fluctuations. With the model syngas, a maximum power density of 128mW/cm<sup>2</sup> at 750°C was obtained. This is approximately 2.7 times less than the cell operating on pure hydrogen. Given that the model exhaust supplied to the

SOFC has a small concentration of H<sub>2</sub>, and most of the flow is inert N<sub>2</sub>, the maximum power is still very good. Additionally, the data from both flow conditions shows the expected relationship between performance and temperature. As the temperature increases from 650°C to 750°C, the OCV and power density experience small and large increases, respectively.

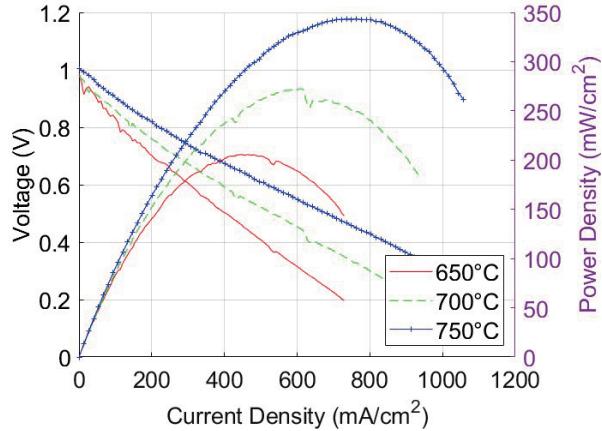


Figure 2: SOFC performance while supplying pure hydrogen at 100mL/min.

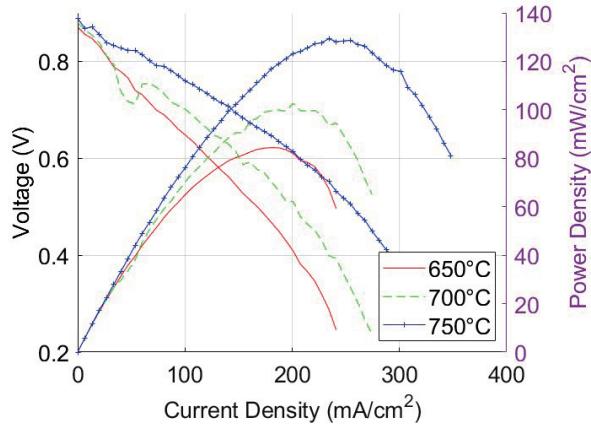


Figure 3: SOFC performance while supplying model syngas at a total 100mL/min.

#### 4. Summaries and future plans

The results discussed above confirm that the anode of the SOFC is successfully completing reactions for the thermal cracking of ammonia. The model ammonia syngas flow, which is very hydrogen deficient, is still able to generate power by directly sourcing H<sup>+</sup> from ammonia gas. The combined ammonia reformation MFR and SOFC system is a viable option for power generation. However, work will be done to improve the pre-reformation process, the SOFC performance, and the selection of fuel supply compositions. Further work is necessary to evaluate the utilization of ammonia through SOFC exhaust analysis, and to determine whether the ammonia degrades the SOFC with prolonged operation. Additionally, future plans involve the use of both a simulation and an experimental approach to determine the correlation between ammonia fuel supplies, with and without additives, and the performance of SOFCs. Additives will include, but are not limited to, small concentrations of hydrogen or water vapor. Based on this correlation, we will establish the optimal ammonia fuel supply conditions for SOFCs. Additionally, the experimental results will be used to update the simulation model and improve its accuracy to the studied experimental cases.

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] C. A. Wilhelm, K. Tamaoki, H. Nakamura, J. Ahn: Solid Oxide Fuel Cell Performance on Ammonia Gas Mixture from a Micro-Flow Reactor, *Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-65.

[2] C. A. Wilhelm, J. Ahn: A Comparison of Solid Oxide Fuel Cell Performance on Ammonia Versus Hydrogen, *Proceedings of the Twentieth Int. Conference on Flow Dynamics* (2023).

[3] C. Wilhelm, K. Tamaoki, H. Nakamura, J. Ahn: Investigation of Ammonia as a Fuel for Solid Oxide Fuel Cells, *ASME POWER Conference Proceedings*, (2023), POWER2023-108936.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

Project code	J23I088
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Combination of Atmospheric Pressure Plasma with Mist Generated by condensation of Water Vapor in Pressurized Air

Yun-Chien Cheng\*†, Jiun-Shian Lee\*\*, Tomoki Nakajima\*\*, Siwei Liu\*\*, Takehiko Sato\*\*††

\*Department of Mechanical Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku 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

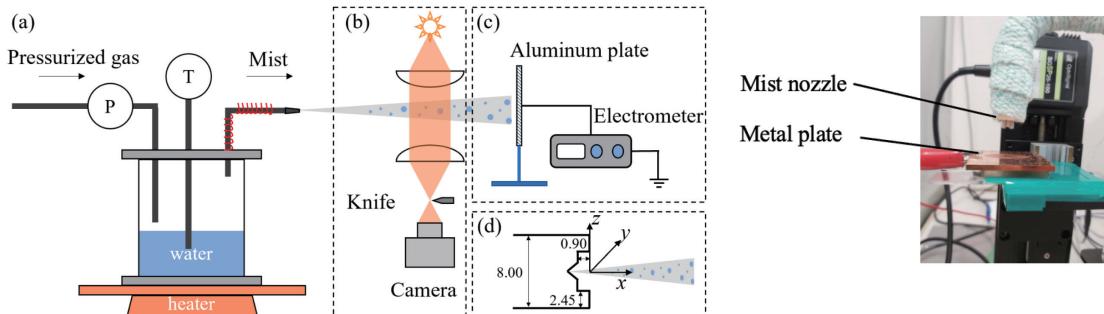


Figure 1. Sketch of the mist system [1] (left) and the photograph (right).

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.

### 3. Achievements

Fig. 2 shows the charge decreased with the nozzle temperature. It may because the high temperature at the nozzle will decrease the condensation of the water vapor and hence, the droplet size of the mist will be smaller. The smaller mist will evaporate and disappear faster, reducing the charge arrive at the metal plate.

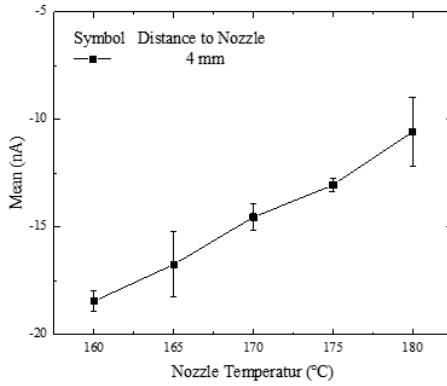


Figure 2. Nozzle temperature effects on the current.

Fig. 3 shows the relationship between nozzle distance to the current. The current decrease with the distance increase, and then approaches zero. It is because the charge mainly generated at the nozzle outlet, where the speed of the flow is highest. With the increase of the distance, the charge reacts with the ambient air and is gradually absorbed.

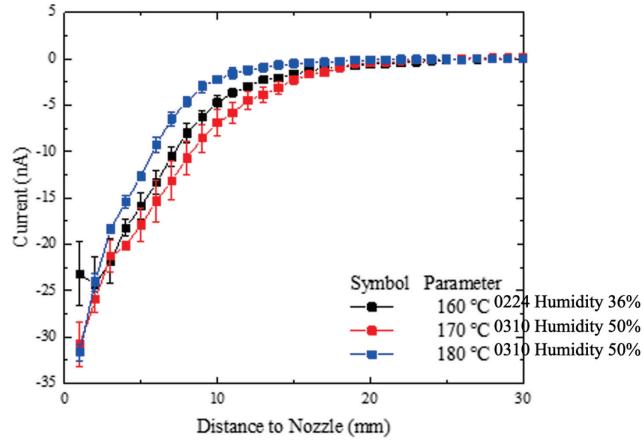


Figure 3. Nozzle distance effects on current.

In figure 4, the heater power increase makes current increase. It may supports that the charge may come from the Lenard effect but not friction. It shows that the current and charge increased with power added to the mist generator container. It is because the power increased can generate more water evaporation, and, hence more droplet condensed at the nozzle outlet. This will cause more current reaching the metal plate, and generate higher current.

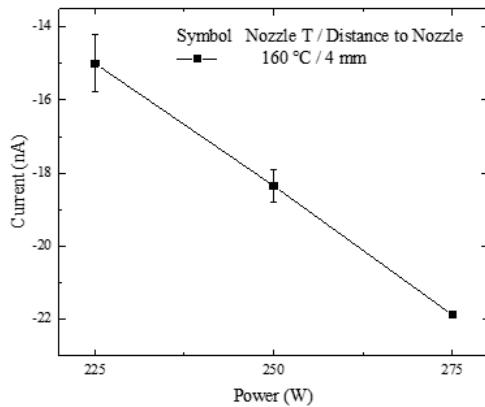


Figure 4. Heater power effects on current

#### 4. Summaries and future plans

In this work, the effects of nozzle distance, nozzle temperature, humidity, power added and water temperature, on the mist current were investigated. 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 droplet 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] T. Sato, S. Fujimura, S. Kanazawa, Y. Xiao, T. Nakajima, S. Liu: Development of innovative sterilization method by high-speed nanodroplets, *7th Taiwan-Japan Workshop on Plasma Life Science and Technology (TJPL7, TJPL2023)*, Hsinchu, Taiwan, (2023).
  - [2] Y.-C. Cheng, T. Sato: Electrical Characteristics of High-speed Mists, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2023)*, (2023), pp. 101-103.
- 3) Patent, award, press release etc.  
YunChien Cheng at National Yang Ming Chiao Tung University, Taiwan.  
Visiting Professor of the Institute of Fluid Science, Tohoku University (Dec./27/2023 - March/26/2024)  
(Patent) Not applicable  
(Award) Not applicable  
(Press release) Not applicable

Project code	J23I089
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	2nd year

## Thermophoretic Separation of Electrolytes for Desalination

Juan F. Torres\*†, Atsuki Komiya\*\*††  
Shuqi Xu\*

\*School of Engineering, Australian National University

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

This project aims to apply a developed interferometry technique to visualize the mass diffusion of salt species in water and other complex fluids such as human blood plasma. We aim to quantify Fickian (isothermal) diffusion coefficients and thermodiffusion (Soret) coefficients, which are used to better understand the interaction between the different species.

### 2. Details of program implement

#### Measurement of thermodiffusive separation

The phase-shifting interferometry technique (PSI) was developed by Torres et al. in 2012 for measuring Fickian diffusion coefficient  $D$  through the visualization of concentration fields between a high- and a low-concentration solution. The PSI system is shown in Figure 1a. In Method A (Figure 1b), we assumed a linear relationship between the unwrapped phase difference  $\psi$  and the concentration difference  $\Delta C$  for determining the contrast factor  $CF = \Delta\psi / (OP \Delta C)$ , where  $OP$  is the optical path of the test cell. If  $CF$  is first determined with solutions of known  $\Delta C$ , then the concentration difference between two unknown solutions can be calculated from the  $\psi$  extracted from the unwrapped PSI images.

In Method B (Figure 1c), we eliminate the mixing that occurred during the injection process by placing the solutions separately in a two-chamber cell. With the two solutions separated, the interference data previously observed (i.e. discontinuities in the phase-shifted data shown in Figure 1b) disappear. In this technique, due to the partitioning wall between the two chambers, the numbers of periods between the two solutions cannot be directly determined visually. Thus, it is important to reduce the  $OP$  until there are no discontinuous changes of  $\phi$  between the two solutions with its value less than one period (i.e.  $\psi_{high} - \psi_{low} = \phi_{high} - \phi_{low} < 2\pi$ ). Since  $CF$  is positive,  $\Delta\psi = \psi_{high} - \psi_{low}$  should always be positive. If  $\phi_{high} - \phi_{low} < 0$ , then they are not in the same period and  $2\pi$  should be added when calculating  $\Delta\psi$ . The calculation of the phase difference using Method B should follow Eq. (19). We noticed that the  $CF$  measured using the two-chamber methods is slightly higher, indicating that the mixing during injection (method shown in Figure 1b) introduced some inaccuracies. All binary NaCl/H<sub>2</sub>O solution concentration differences in the paper were measured with Method B, and Method A was used to ensure the  $\psi_{high} - \psi_{low} < 2\pi$ .

$$\Delta\psi = \begin{cases} \phi_{\text{high}} - \phi_{\text{low}}, & \text{if } (\phi_{\text{high}} - \phi_{\text{low}}) > 0 \\ \phi_{\text{high}} - \phi_{\text{low}} + 2\pi, & \text{if } (\phi_{\text{high}} - \phi_{\text{low}}) < 0 \end{cases}$$

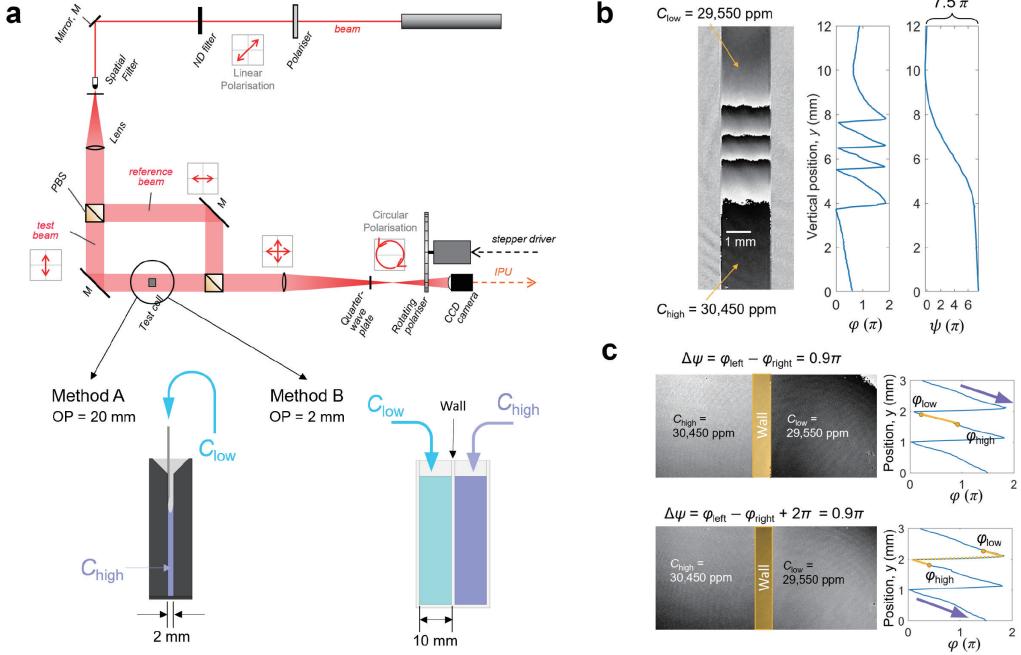


Figure 1: Highly accurate measurement of concentration difference with interferometry. (a) Layout of the polarizing Mach-Zehnder interferometer, which is the basis for PSI. (b) Method A: the contrast factor CF is measured by smoothly injecting a low-concentration solution on top of a high-concentration solution. (c) Method B: to ensure there was no mixing during injection, the two solutions are placed into a two-chamber quartz cell with an optical path of 2mm.

### 3. Achievements

We were able to measure a small concentration difference with this setup, below 500 ppm. This forms the basis for the work we plan for 2024 and beyond, and it is very important because commercial salinity meters are not accurate enough to quantify small salinity differences. This setup was at the ANU for quantifying thermodiffusive desalination, and we plan to use it for other types of characterization.

### 4. Summaries and future plans

The focus of the collaboration has been more on the measurement of concentration differences rather than thermodiffusive separation. Measurement of concentration differences can be applied to thermodiffusive separation as well as many other phenomena. For example, an area in which we started collaborating based on this project framework was that of diffusion of sodium chloride in human blood plasma. This was never quantified before.

This collaborative framework allowed us to strengthen collaborative research on convective flow resonance (one journal paper), measurement of salt diffusion in human blood plasma substitute (one proceedings paper) and mass transfer through macro-isopore membranes (one proceedings paper).

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
[1] T. Koizumi, T. Kogawa, J. F. Torres, Y. Kanda, A. Komiya: Controlling instability waves on vertical natural convection using a buoyant impinging jet, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 148 (2023), 107033, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107033.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)  
[2] R. Zhu, J. F. Torres, S. Moriya, Y. Kanda, A. Komiya, *Proceedings of The 33<sup>rd</sup> International Symposium on Transport Phenomena*, Kumamoto, (2023), 149.  
[3] J. Zhang, S. Xu, A. Komiya, J. F. Torres, *Proceedings of The 33<sup>rd</sup> International Symposium on Transport Phenomena*, Kumamoto, (2023), 204.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

Project code	J23I091
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## An Integrated Study of Quantum Chemistry and Molecular Simulation for Reactive Polymer Materials

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

Reactive polymer materials like epoxy resins are widely utilized as products and reusable ability of polymeric materials have drawn much attention for forthcoming circulation economy. 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. The reactions involved in the DGEBA/TGDDM/4,4'-DDS system are illustrated in Fig. 1.

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.

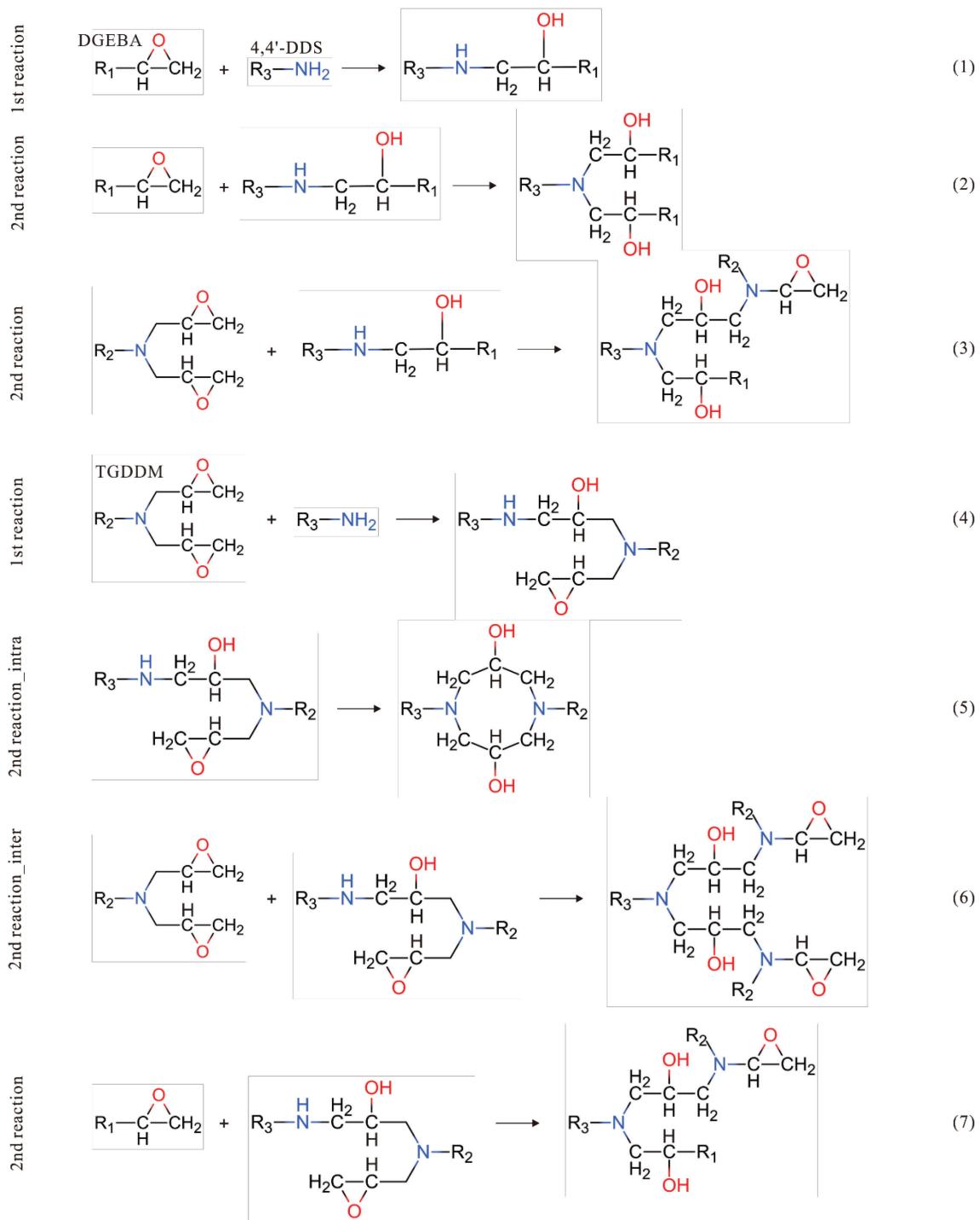


Fig. 1. Reactions involved in DGEBA/TGDDM/4,4'-DDS.

### 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.

#### 4. Summaries and future plans

We have already developed the crosslinking process for multi-component epoxy resin systems. 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 catalyst 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, 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)

[2] Yinbo Zhao and Gota Kikugawa, Structural and Thermophysical Properties of Multi-component Crosslinked Epoxy Polymers: A Molecular Dynamics Study with Curing Reaction Model, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2023)*, Sendai, (2023), CRF-11, pp. 45-46.

##### 3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

## **2. 研究成果報告書 <萌芽公募共同研究>**



課題番号	J23H001
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2年目

## 非定常マランゴニ対流の制御のための低次元モデル構築

### Low Dimensional Modeling of Controlling Unsteady Thermocapillary Convection

工藤 正樹\*†, 青木 啓佑\*, 大林 茂\*\*††

\*都立産業技術高等専門学校 機械システム工学コース, \*\*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

融液からの単結晶作りで問題となる非定常マランゴニ対流をリアルタイムで制御するための低次元モデル (ROM) を構築する. 具体的には “Hydrothermal Wave” (以下 HTW と表記) というマランゴニ対流の流動様式の 1 つを対象とする.

#### 2. 研究成果の内容

2023 年度では ROM の高精度化に必要な基礎知識として高次精度の差分法およびクログリヤモデルについて流体科学研究所で学び, 薄液膜内温度差マランゴニ対流の基礎モデルを用いてノウハウを習得した. さらに, 逐次型データ同化手法としてアンサンブルカルマンフィルタについて学んだ. 詳細を以下に記す.

まず薄液膜内温度差マランゴニ対流の基礎モデルとして 2 次元の天井駆動キャビティ流れを採用した. 図 1 に天井駆動キャビティ流れの流線を示す. ROM の構築には, レイノルズ数  $Re=10,000$  の周期振動流における流速データを用いた. キャビティを x 方向に 0.1 [m], y 方向に 0.1 [m] と設定し, 代表長さを 0.1 [m] とした. 天井の移動壁の速度および代表速度を 0.1 [m/s] とした. 試験流体は水を模擬しており, その動粘度は  $1.0 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$  ( $20^\circ\text{C}$ ) であった.

流速データには数値解析解を用いた. 計算格子には等間隔直交格子を利用し, 計算格子数は水平方向に 340 点, 垂直方向に 340 点とした. 時間進行は 0.001 [s] でクーラン数が 1 以下に収まるようにした. 計算スキームは圧力 - 速度の算出に PISO 法, 対流項などには 2 次精度の差分法 (Gauss linear), 時間差分にはオイラー法を適用した. 解析には OpenFORM®

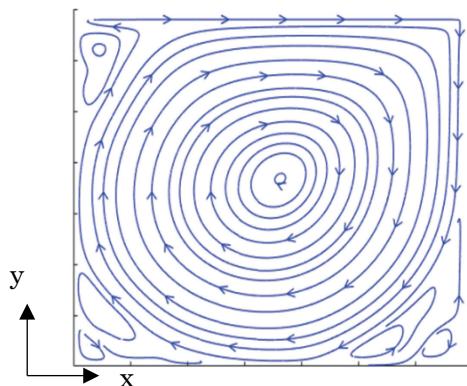


図 1 : 2 次元天井駆動キャビティ流れの流線図 ( $Re=10,000$ )

を用いた。ROM 構築については様々な手法があるが、本研究では固有直交分解(以下 POD)とガラーキン射影を用いた Galerkin ROM (以下 G-ROM) (N. Aubry et al., J. Fluid Mech., 192(1988))を採用した。本研究では、時間を離散化して POD 基底を求めることで計算負荷を大幅に軽減できる Snapshot POD を用いた。G-ROM は速度場を POD 基底で表現したナビエ・ストークス方程式に対して POD 基底との内積を取るガラーキン射影法により得られる得られる。(1)式に POD 基底とその時間係数で表現した流速を、(2)式にナビエ・ストークス方程式を、(3)式に得られた G-ROM を示す。

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \bar{\mathbf{U}}(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^r a_k(t) \boldsymbol{\phi}_k(\mathbf{x}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\frac{da_k(t)}{dt} + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r A_{ijk} a_i a_j + \sum_{i=1}^r B_{jk} a_i + C_k = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$  ( $= (u, v)$ ) は速度、 $\bar{\mathbf{U}}(\mathbf{x})$  ( $= (\bar{U}, \bar{V})$ ) は速度の時間平均値、 $a_k(t)$  は POD モードの時間係数、 $\boldsymbol{\phi}_k(\mathbf{x})$  ( $= (\phi_k^u, \phi_k^v)$ ) は POD 基底である。また  $t$  は時間[s]、 $\rho$  は流体の密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\nu$  は流体の動粘度[m<sup>2</sup>/s]、 $P$  は圧力[Pa]であり、いずれも有次元である。G-ROM の諸係数  $A_{ijk}$ 、 $B_{jk}$ 、 $C_k$  は空間の係数であり、 $a_k(t)$  を算出する前に POD 基底より予め求めることが出来る。次に各係数を式(4)～(6)に示す。

$$A_{ijk} = -\langle \boldsymbol{\phi}_k, \boldsymbol{\phi}_j \cdot \nabla \boldsymbol{\phi}_i \rangle \quad (4)$$

$$B_{jk} = -\langle \boldsymbol{\phi}_k, (\boldsymbol{\phi}_j \cdot \nabla) \bar{\mathbf{U}} \rangle - \langle \boldsymbol{\phi}_k, (\bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla) \boldsymbol{\phi}_j \rangle + \nu \langle \boldsymbol{\phi}_k, \nabla^2 \boldsymbol{\phi}_j \rangle \quad (5)$$

$$C_k = -\langle \boldsymbol{\phi}_k, (\bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{U}} \rangle + \nu \langle \boldsymbol{\phi}_k, \nabla^2 \bar{\mathbf{U}} \rangle \quad (6)$$

ここで  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  は内積、 $i, j, k$  はモードのインデックス、 $r$  は G-ROM 構築に用いたモード数 (< 全モード数  $R$ ) である。POD 解析および G-ROM の構築には MATLAB<sup>®</sup>を用いた。まず  $A_{ijk}$ 、 $B_{jk}$ 、 $C_k$  の空間 1 階差分には 3 次精度の河村・桑原スキームを用い、 $da_k(t)/dt$  の時間差分には 3 次精度のアダムスバッジュフォース法を用いた。

さらに本研究では、G-ROM 構築時に  $k = r+1 \sim R$  の高次の POD モードを切り捨てる事で生じる、G-ROM の本質的な誤差を低減するためにクロージャモデルを導入した。クロージャモデルでは式(3)の空間係数  $A_{ijk}$ 、 $B_{jk}$  を補正する形をとる。本研究では、流体用 ROM ができた当初から存在しかつ挙動が安定している Mixing Length ROM (以下 ML-ROM) (Z. Wang et al., Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 237-240 (2012))と近年発表されたデータ駆動型マルチスケール変分 ROM (以下 DD-VMS-ROM) (C. Mou et al., Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 373 (2021))の 2 つのモデルを用いた。各モデルの式(7)、(8)に示す。

$$\frac{da_k(t)}{dt} + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r A_{ijk} a_i a_j + \sum_{i=1}^r B_{jk} a_i + C_k - (\alpha U_{ML} \delta) S_r a_i = 0 \quad (7)$$

$$\frac{da_k(t)}{dt} + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r (A_{ijk} + \widetilde{A_{ijk}}) a_i a_j + \sum_{i=1}^r (B_{jk} + \widetilde{B_{jk}}) a_i + C_k = 0 \quad (8)$$

まず ML-ROM ((7)式)について、定数  $\alpha$  は多数の試行の上で  $6 \times 10^{-3}$  に設定した。長さスケール  $\delta$  の算出方法は後述する。代表速度  $U_{ML}$  はキャビティ流れの代表速度と合わせて  $0.1$  [m/s] とした。 $S_r = (S_r)_{ij} = \langle \nabla \boldsymbol{\phi}_i, \nabla \boldsymbol{\phi}_j \rangle$ 、 $(i, j = 1, \dots, r)$  で表せ、 $A_{ijk}$ 、 $B_{jk}$ 、 $C_k$  と同様に事

前に計算可能である。なお $\delta$ は下記のように表せる。

$$\delta = \left( \frac{\int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \int_0^{L_3} \sum_{m=1}^3 u_m'^{FOM} u_m'^{FOM} dx_1 dx_2 dx_3}{\int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \int_0^{L_3} \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 \frac{\partial u_m'^{FOM}}{\partial x_n} \frac{\partial u_m'^{FOM}}{\partial x_n} dx_1 dx_2 dx_3} \right)^{1/2} \quad (9)$$

ここでは FOM は Full Order Model (本研究では数値解析が該当する) の略である。流体の計算領域の  $x$  方向,  $y$  方向, および奥行き方向の距離をそれぞれ  $L_1, L_2, L_3$  とする。今回は 2 次元流を対象としていることから奥行き方向は考えないため  $m=n=1, 2$ , および  $x_1$  と  $x_2$  のみ考える。流速  $u_m'^{FOM}$  は POD 基底を用いて以下のように表す。

$$u_m'^{FOM} = \sum_{k=r+1}^R a_k'^{FOM} \phi_k^m \quad (m=1,2) \quad (10)$$

流速の 1 階微分には 3 次精度の河村・桑原スキームを適用した。また数値積分には台形公式を適用した。また  $S_r$ について、POD 基底の 1 階微分には 3 次精度の河村・桑原スキームを適用し、内積は行列のトレースにより算出した。

次に DD-VMS-ROM ((8)式)について、DD-VMS-ROM のクロージャ項は

$$-\left[ ((u_R \cdot \nabla) u_R, \varphi_k) - ((u_r \cdot \nabla) u_r, \varphi_k) \right] \approx (g(u_r), \varphi_k) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r (A_{ijk} + \widetilde{A}_{ijk}) a_i a_j + \sum_{i=1}^r (B_{jk} + \widetilde{B}_{jk}) a_i \quad (11)$$

と表す。クロージャ項は G-ROM の  $A_{ijk}$  および  $B_{jk}$  の補正項  $\widetilde{A}_{ijk}$  と  $\widetilde{B}_{jk}$  で近似することで以下のように最小二乗法により求めることができる。

$$\min_{\tilde{A}, \tilde{B}} \sum_{p=1}^M \left\| -\left[ ((u_R'^{FOM}(t_p) \cdot \nabla) u_R'^{FOM}(t_p), \varphi_k) - ((u_r'^{FOM}(t_p) \cdot \nabla) u_r'^{FOM}(t_p), \varphi_k) \right] - \left( \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r (A_{ijk} + \widetilde{A}_{ijk}) a_i'^{FOM}(t_p) a_j'^{FOM}(t_p) + \sum_{i=1}^r (B_{jk} + \widetilde{B}_{jk}) a_i'^{FOM}(t_p) \right) \right\|^2 \quad (12)$$

ここで  $u_R'^{FOM}, u_r'^{FOM}, a'^{FOM}$  は FOM データから得られ、スナップショット POD の時刻  $t_p$  ( $p=1, \dots, M$ ) における  $a'^{FOM}(t_p)$  は対応するスナップショット  $\mathbf{u}(t_p)$  をガラーキン射影することで下記のように求められる。

$$a_k'^{FOM}(t_p) = \langle \mathbf{u}(t_p), \varphi_k \rangle \quad (13)$$

$$u_R'^{FOM}(t_p) = \langle \sum_{k=1}^R a_k'^{FOM}(t_p), \varphi_k \rangle \quad (14)$$

$$u_r'^{FOM}(t_p) = \langle \sum_{k=1}^r a_k'^{FOM}(t_p), \varphi_k \rangle \quad (15)$$

それぞれ  $\widetilde{A}_{ijk}$  と  $\widetilde{B}_{jk}$  は  $A_{ijk}, B_{jk}, C_k$  と同様に事前に計算可能である。

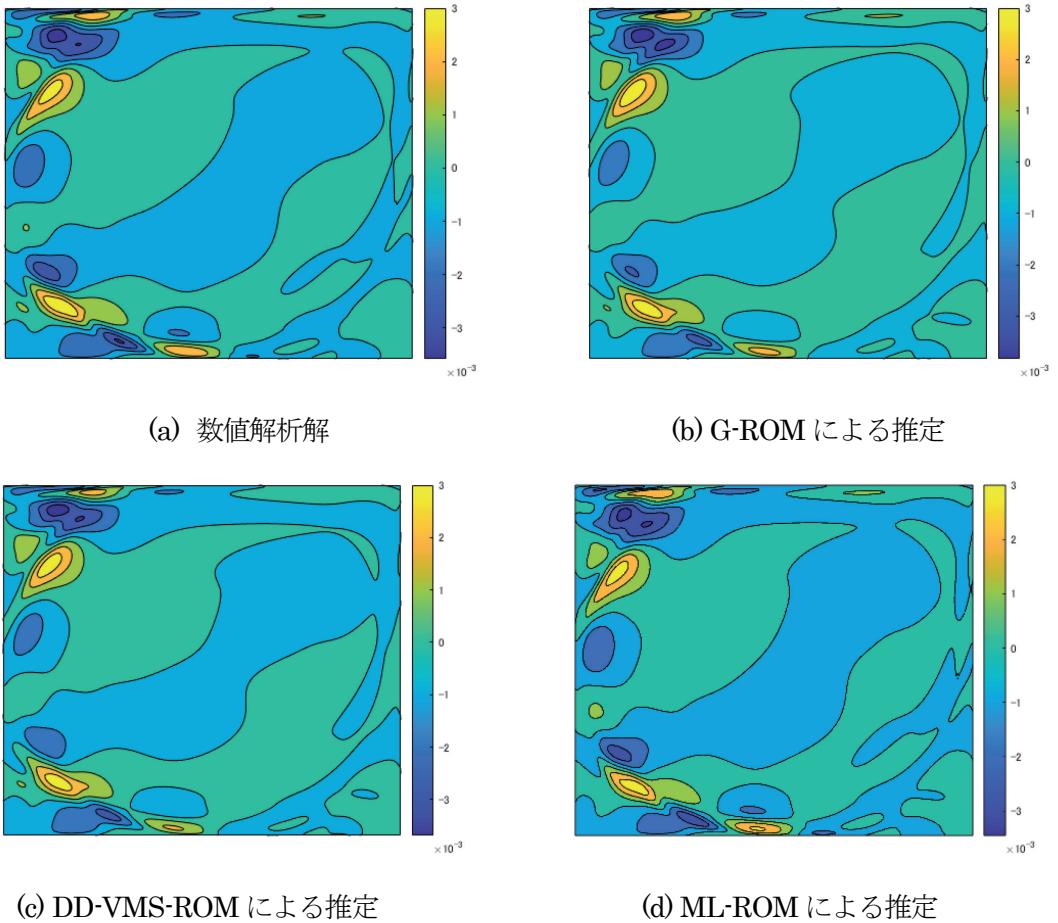


図 2：天井駆動キャビティ流れにおける、水平方向（x 方向）の瞬時流速の 2 次元分布  
(同一時刻のデータ)

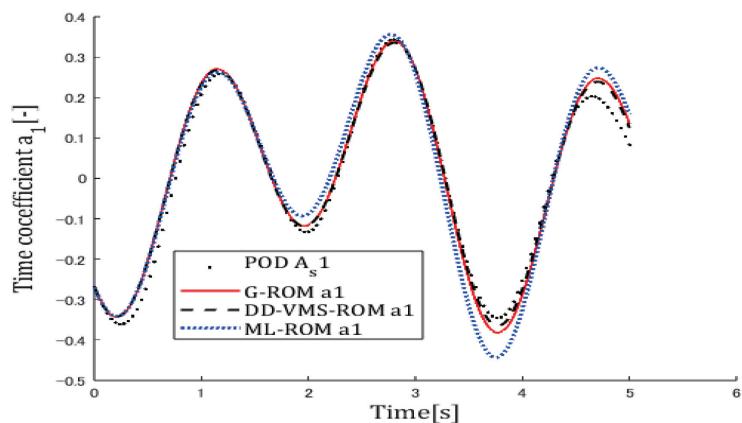


図 3：POD の時間係数  $a_1$  の時系列

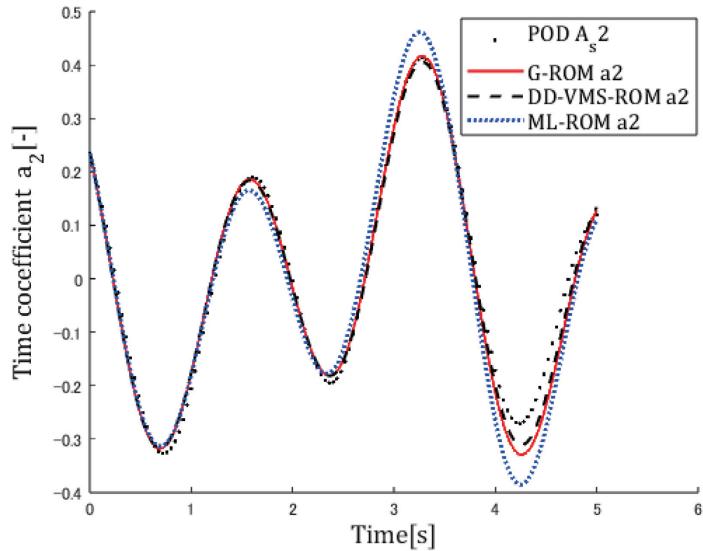


図 4 : POD の時間係数  $a_2$  の時系列

図 3 に各手法で推定された水平方向 ( $x$  方向) の瞬時流速の 2 次元分布を示す。各手法で推定された分布図を比較すると G-ROM, ML-ROM, DD-VMS-ROM のいずれも数値解析解で得られた流速分布を良くとらえていることが分かる。図 4, 5 に POD の時間係数  $a_k$  の時系列を示す。図 4 は最も大きなエネルギーを有するモード 1, 図 5 は 2 番目に大きなエネルギーを有するモード 2 を示す。POD で求めた  $a_k$  を基準して各手法を比較すると、3.5[s]付近までは G-ROM と DD-VMS-ROM の推定値は一致し、3.7[s]付近で両者ともに POD から外れるものの、DD-VMS-ROM の方が POD 解に近い値を示すことが分かる。一方で、ML-ROM は G-ROM, DD-VMS-ROM と近い値をとるもの、所々で値が外れることが見て取れる。最後に図 3 のデータに対して POD で得られた  $a_1$  と各手法で得られた  $a_1$  の差の二乗平均平方根誤差 (RMS 誤差) を算出したところ、G-ROM の RMS 値を基準とした場合、DD-VMS-ROM は RMS 誤差が 9.4% 小さくなつたが、ML-ROM は 4.8% 大きくなつた。誤差の大幅な改善には至らなかつたものの、DD-VMS-ROM の方が G-ROM の推定精度を向上できることがわかつた。

最後にデータ同化について報告する。実際の薄液膜内温度差マランゴニ対流を流体制御する際に、G-ROM を用いて制御アルゴリズムを構築する予定である。入力データである数値解析解と流速の実測値をデータ同化で融合し、入力データを実測値に近づけることで制御効果を向上させることを考えている。これまでにアンサンブルカルマンフィルタおよびアンサンブルカルマンスムーザの理論および実装方法について理解し、プログラムのプロトタイプを開発している段階である。

### 3. 研究目標の達成状況

3 次元非定常マランゴニ対流の低次元モデルの高精度化を図り、さらにデータ同化および予測を行うという目標を立てている。これについて、2022 年度に 3 次元非定常マランゴニ対流の低次元モデルのプロトタイプを開発したものの、速度場の推定精度が低いという問題が残されていた。これに対して、2023 年度にマランゴニ対流の基礎モデル (2 次元天井駆動キャビティ流れ) を用いて、高次精度の差分法とクロージャモデルを活用した低次元モデルの高精度化に関するノウハウを得ることができた。現在、マランゴニ対流の低次元モデルを改造している段階である。他方、データ同化についてはプログラムのプロトタイプを開発し

ており、予測できる段階には至っていない。今後、マランゴニ対流の基礎モデルを用いてプロトタイプの評価、マランゴニ対流を対象としたデータ同化、データ同化で得られた低次元モデルを用いて流れの予測という手順で進める予定である。以上を鑑みると、低次元モデルの高精度化については目標を 80%達成し、データ同化については 25%程度達成したと考える。

#### 4. まとめと今後の課題

マランゴニ対流の基礎モデルを用いて低次元モデルの高精度化に資するノウハウを得ることができた。今後は、マランゴニ対流の高精度化した低次元モデルを完成させる。次にデータ同化および予測については、マランゴニ対流を対象としたデータ同化およびデータ同化で得られた低次元モデルを用いて流れの予測を実施する。

#### 5. 研究成果

##### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] M. Kudo, K. Tanaka, K. Aoki, S. Obayashi: Improved reduced order model for controlling 3-D unsteady thermocapillary convection, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2023)*, Sendai, (2023), CRF-56, pp. 155-157.

##### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23H002
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目（発展）

## 鳥の飛行を規範とした革新的飛行体の開発 Development of an Innovative Air Vehicle based on a Flight of a Bird

石出 忠輝\*†, 大林 茂\*\*†

香川 詩花\*\*\*, 平野 政輝\*\*\*\*, 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

\*\*\*\*木更津高専専攻科制御・情報システム工学専攻, \*\*\*\*\*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, 大規模災害時の的確で迅速な調査や, 宇宙航空研究開発機構を中心に検討されている遠隔探査用小型飛翔体を用いた火星探査システムの開発において, 鳥や昆虫の飛翔に見られるような高度な飛行形態を実現することが提言されている. 本研究は, このような背景のもとで実際の鳥の主翼構造を取り入れた羽ばたき翼模型を製作し, 無線通信による飛行試験を実施し, その有効性を調査する.

### 2. 研究成果の内容

#### 2.1 鳥型翼風試模型

本研究では, 令和4年度萌芽公募共同研究成果を基に図1に示すような鳥型翼を製作した. 初列風切羽11枚, 次列風切羽8枚, アスペクト比7である. 上腕及び羽軸部分にはPETG (Poly Ethylene Terephthalate, Glycol modified), 正羽にはTPU (Thermoplastic Polyurethane) を用いて, 3Dプリンタで製作した. 正羽の厚みは, 0.15mmとしている. 本主翼を, 図2に示すような, フラッピング及びフェザリング運動可能な駆動装置に取り付け風試模型としている.

#### 2.2 空気力測定結果

鳥型翼の効果, 特に正羽の開閉による効果を検証するために, 3種類の主翼に対して空気力測定を行った. 内訳としては, 図1に示す鳥型翼 (A2), 正羽の開閉を防ぐために正羽同士を接着した鳥型翼 (A2※) 及び翼面積及びアスペクト比が鳥型翼と同サイズの橿円翼である. 空気力測定結果を図3に示す. 図3(a) 抗力曲線を見ると, 全迎角領域において鳥型翼は抗力低減作用がある事が分かる. 鳥型翼 A2 と A2※の抗力曲線を見ると, 低迎角領域において, 正羽開閉運動による低減作用があるものと考えられる. 一方で, 図3(b) 揚力曲線を見ると, 鳥型翼の優位性は見られない. 原因として, 振り下ろし時における正羽の重なりが不十分であったものと考えられ, さらなる改善が必要である.

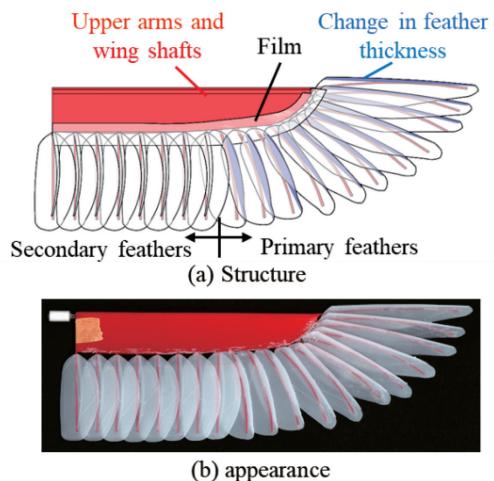


図1：鳥型翼

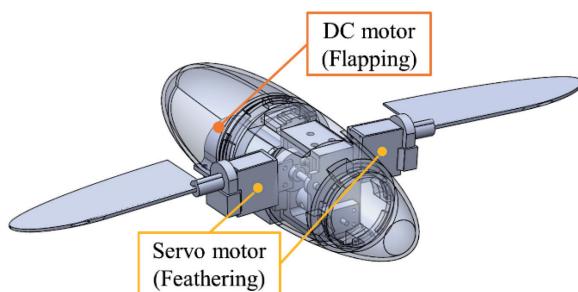


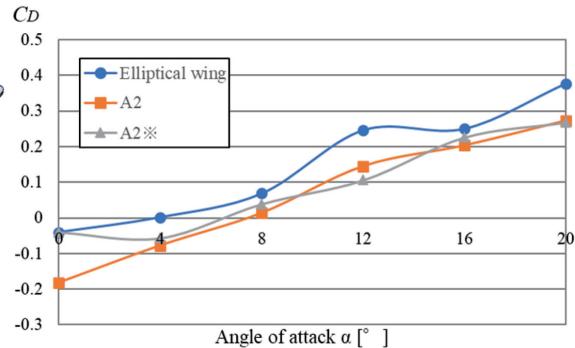
図2：風試模型

### 2.3 小型飛行ロボットの開発

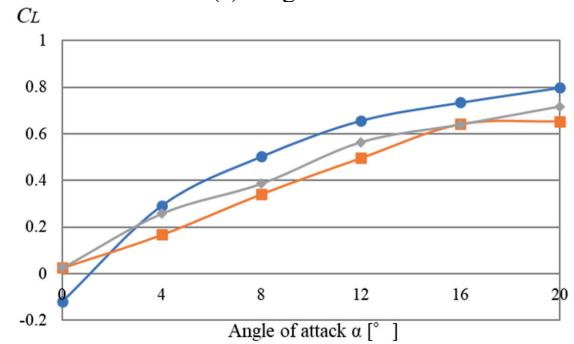
上記鳥型翼模型を用いた風洞実験結果を基に、図4に示す小型飛行ロボットを製作した。全長171mm、全幅328mmであり、胴体部に搭載した2ステージギヤードDCモータの回転を、スライダ・クランク機構を用いてフラッピング運動に変換している。上腕及び羽軸部分を図5に示す4層構造にすることで、主翼根元部分は剛性を高め、翼端部分は柔軟性を高めている。本研究では、スマートフォンからのBluetooth通信を用いたモータ駆動システムを構築した。図6に、飛行ロボット胴体内に配置された各デバイスの実態図線図を示す。飛行試験の結果、DCモータ回転に伴う駆動部分の振動による機体姿勢不安定性が見られ、さらなる改善が必要である。

### 3. 研究目標の達成状況

本公募共同研究を通して、鳥型翼模型まわりの流れの空気力測定結果より、低迎角領域において鳥型翼の優位性を示す事ができた。また小型飛行ロボット開発において、機体製作及び駆動システムの動作確認完了し、研究目標は概ね達成できたものと考えられる。



(a) Drag curves



(b) Lift curves

図3：空気力測定結果

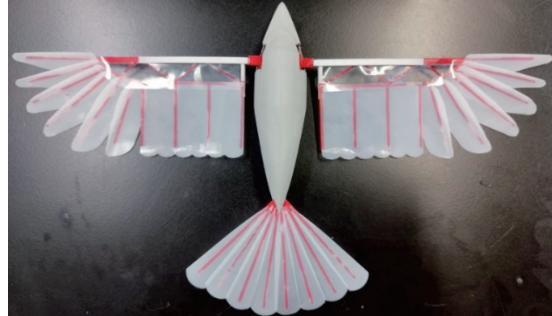


図4：小型飛行ロボット

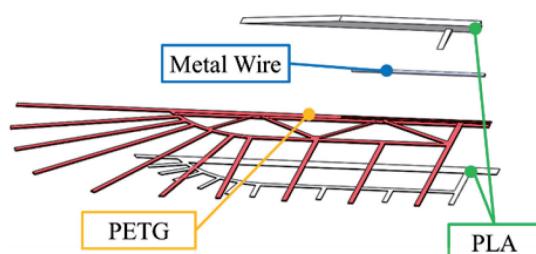


図5：上腕及び羽軸

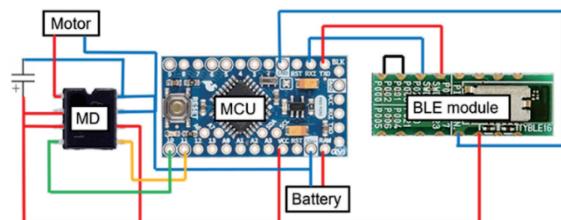


図6：小型飛行ロボット駆動システム

#### 4. まとめと今後の課題

本公募共同研究では、鳥型翼の空力特性有効性についてある程度の知見が得られたものと考えられる。今後は揚抗比を高めるために、翼の柔軟性と強度を併せ持つ主翼構造の開発を進めていきたい。

#### 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] Utaka KAGAWA, Masaki HIRANO, Tadateru ISHIDE, Hajime IZUMI and Shigeru OBAYASHI : Development of an innovative air vehicle based on a flight of a bird, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-53, pp. 147-148.
- [2] Utaka KAGAWA, Masaki HIRANO, Tadateru ISHIDE, Hajime IZUMI and Shigeru OBAYASHI : Research and Development of Automatic Flight of Small Bird-Like Innovative Air Vehicle, *Proceedings of the Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), GS1-26, pp. 162-165.
- [3] 香川詩花, 平野政輝, 泉源, 石出忠輝, 山崎涉, 大林茂 : 鳥の飛行を規範とした革新的飛行体の開発, 第61回飛行機シンポジウム講演集, 北九州国際会議場(北九州市), (2023), JSASS-2023-5235.
- [4] 平野政輝, 香川詩花, 泉源, 石出忠輝, 山崎涉, 大林茂 : 鳥の飛行を規範とした小型飛行体の姿勢計測装置の開発, 第61回飛行機シンポジウム講演集, 北九州国際会議場(北九州市), (2023), JSASS-2023-5236.
- [5] 香川詩花, 平野政輝, 泉源, 石出忠輝, 大林茂 : 鳥の飛行を規範とした革新的飛行体の開発, 日本機械学会関東支部第30期総会・講演会予稿集, 早稲田大学西早稲田キャンパス, (2024), 14E30.

##### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

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	J23R001
Classification	International Multiple Collaborative Research Project
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2023 - March 2024
Project status	1st year

## Experiment on Mechanical Integrity Evaluation of Degradable Zinc Wire under Tensile Load in Flowing Medium

Aike Qiao\*†, Makoto Ohta\*\*\*\*††  
 Shiliang Chen\*, 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

Biodegradable stents can support the vessel for a period, maintain vascular patency, and gradually degrade after vascular remodeling finishes, thereby reducing the limitations of permanent stents. Zinc has become a new type of biodegradable metal after magnesium and iron due to its suitable degradation rate. Mechanical integrity is an important index for degradable stents. The mechanical integrity of zinc is affected by the combined effects of mechanical load and corrosion environment. The current research on stress corrosion of zinc wire has not taken into account the influence of corrosion medium flow rate. Therefore, this study investigated the variation of the mechanical integrity of zinc wire over time in a flowing medium under tensile load. The experimental results will be used for parameter modification in the coupling simulation of stent degradation and vascular remodeling.

### 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 Twentieth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2023). The details of the research are described as follows:

The diameter of the zinc wire is 0.2mm. Three samples are prepared for each test, and the final result is the average of the three samples. The change of mechanical integrity of zinc wire was evaluated by tensile test. The zinc wire was fixed by nuts and constant strain was applied (Figure 1), which was 0%, 2.50 % and 5.00 %, respectively. After different immersion durations, the tensile properties of zinc wire were examined.

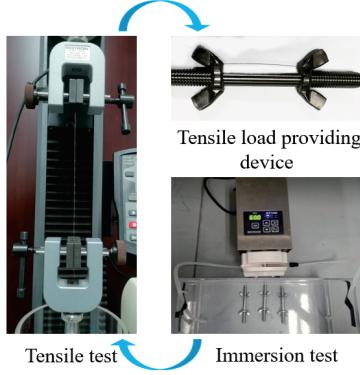


Figure 1: Schematic diagram of the test bench

### 3. Achievements

As the of immersion duration increased, it was observed that the Young's modulus and ultimate tensile strength of zinc wire decreased gradually (Figure 2). With the treatment of 2.50% tensile strain, the Young's modulus of zinc wire decreased, while ultimate tensile strength did not significantly decrease compared to the treatment of 0% tensile strain. With the treatment of 5.00% tensile strain, the Young's modulus and ultimate tensile strength of zinc wire decreased significantly compared to the treatment of 0% tensile strain.

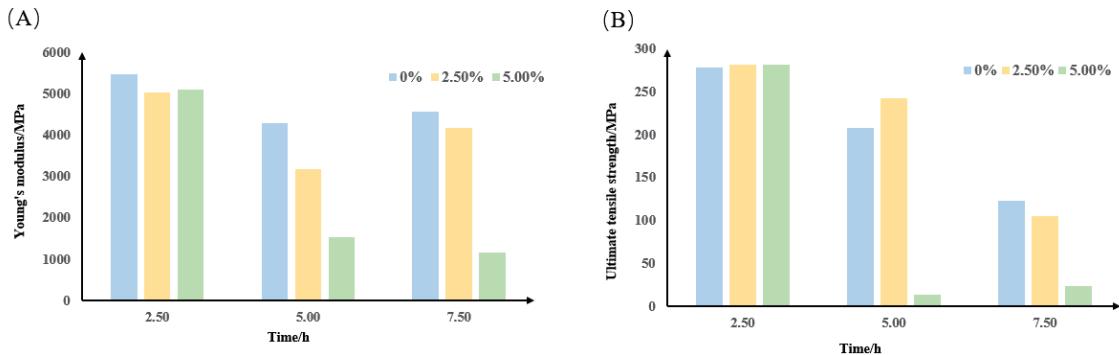


Figure 2: The Young's modulus and ultimate tensile strength of the zinc wire as a function of immersion duration with different tensile strains

### 4. Summaries and future plans

In vitro degradation of zinc wire was investigated in a flowing medium under tensile load. The results suggested that tensile load accelerates the corrosion rates of zinc wire and the corrosion rates increase with increasing loading levels. This study could help to understand the effect of complex stress condition on the corrosion of zinc for the optimization of biodegradable zinc stents. In addition, the experimental results will be used for parameter modification in the coupling simulation of stent degradation and vascular remodeling.

Stents are exposed to various types mechanical loadings after implantation, such as tensile, compression, bending, torsion and fluid-induced shear stress. This study only includes two types of mechanical loads, and the influence of other mechanical loads should be considered. These analyses are reserved for future studies.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] X. Zhang, B. Mao, Y. Che, J. Kang, M. Luo, A. Qiao, Y. Liu, H. Anzai, M. Ohta, Y. Guo, G. Li: Physics-Informed Neural Networks (PINNS) for 4d Hemodynamics Prediction:

An Investigation of Optimal Framework Based on Vascular Morphology, *Comput. Biol. Med.*, 164(2023), pp. 107287, doi: 10.1016/j.combiomed.2023.107287.

- [2] S. Chen, T. Du, H. Zhang, J. Qi, Y. Zhang, Y. Mu, A. Qiao: Methods for Improving the Properties of Zinc for the Application of Biodegradable Vascular Stents, *Biomater. Adv.*, 156(2023), pp. 213693, doi: 10.1016/j.bioadv.2023.213693.
- [3] J. Qi, H. Zhang, S. Chen, T. Du, Y. Zhang, A. Qiao: Numerical Simulation of Dynamic Degradation and Fatigue Damage of Degradable Zinc Alloy Stents, *J. Func. Biomater.*, 14/11(2023), pp.547, doi:10.3390/jfb14110547.

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

- [4] H. Zhang, Y. Yang, S. Chen, A. Qiao, H. Song, W. Fu, H. Anzai, M. Ohta: Numerical Simulation of Vascular Remodeling Under Multiple Mechanical Stimuli, *Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS9-2.
- [5] S. Chen, B. Guo, T. Du, A. Qiao, H. Song, W. Fu, H. Anzai, M. Ohta: Experiment on Mechanical Integrity Evaluation of Degradable Zinc Wire Under Tensile Load in Flowing Medium, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-35.
- [6] B. Guo, S. Chen, Y. Zhang, Y. Yang, A. Qiao: A Numerical Study on the Effects of Mechanical Stimulation and Endothelium Recovery Rate on Vascular Remodeling After Percutaneous Coronary Intervention, *Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS11-9.

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

課題番号	J23R002
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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\*\*\*\*\*

\*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

†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が期待されている。その薄膜化には触媒が必要であり、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

これまでシリコン基板上での酸化物合成について、吸着エネルギーを評価することで結晶成長の方向について予測した。本研究ではグラフェンの成長に適した基板の選定のために、吸着エネルギーに着目した。炭素クラスターを各種基板表面上に置くことでスーパーセルを作成し、吸着エネルギーに着目することで、炭素クラスターの基板表面での安定性を評価した。

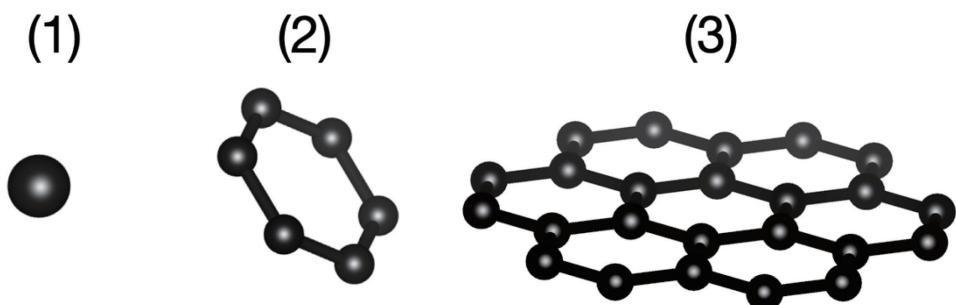


図 1 スーパーセルに用いた炭素クラスター. (1) 炭素原子, (2) 六員環, (3) ナノグラフェン(7×6員環).

表 2 炭素クラスターの安定性評価.

基板	原子位置	ナノグラフェン	六員環
STO	Sr	少し湾曲	
	Ti	少し湾曲	
	O	少し湾曲	
サファイア	Al		
	O		垂直に立つ
MgO	Mg	少し湾曲	垂直に立つ
	O	少し湾曲	
Si(001)	Si	半球状	垂直に立つ
	Si と Si の間	半球状	

炭素クラスターとして、図1に示すように、(1)炭素原子、(2)六員環と(3)ナノグラフェン(7×六員環)を用いた。また、基板の候補として、酸化マグネシウム(MgO)、サファイア、シリコン(Si)、チタン酸ストロンチウム(STO)を選んだ。最初に炭素クラスターと基板表面の構造最適化を行い、スーパーセルを作成した。さらにスーパーセルでの構造最適化も行っている。吸着エネルギーは、炭素クラスター単体と基板表面、スーパーセルの全エネルギーから次式で見積もった。

$$E_{ads} = E_{sub} + E_{cluster} - E_{supercell}$$

ここで、 $E_{ads}$ ,  $E_{sub}$ ,  $E_{cluster}$ ,  $E_{supercell}$  はそれぞれ、吸着エネルギーと基板、炭素クラスター、スーパーセルの全エネルギーになる。

吸着エネルギーによる各種基板での炭素クラスターの安定性は表1のようになり、チタン酸ストロンチウム基板上での安定性が予見された。実際にグラファイトをターゲットにしたレーザー蒸着法で各種基板上に製膜し、その表面を原子力間頭微鏡(AFM)で観察した。製膜後のAFM像の例として、MgO基板とSTO基板上の薄膜表面を図2に示す。吸着エネルギーを用いた予測通り、STO基板上では平坦な膜が成長していることが分かった。

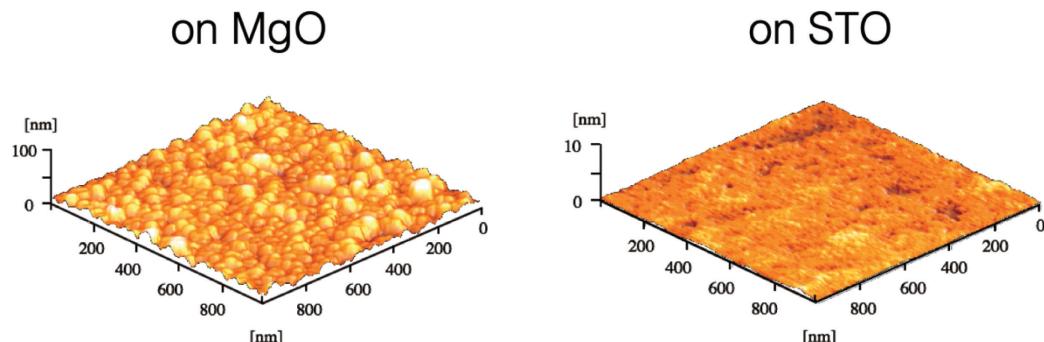


図 2 スーパーセルに用いた炭素クラスター. (1) 炭素原子, (2) 六員環, (3) ナノグラフェン(7×六員環).

### 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 Schlam 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。また、吸着エネルギーを他の材料でも用いることで、実際の製膜の前の基板選択の指標となれることが分かった。

### 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。材料合成の基板選択のための指標となるように、更に多種の基板と材料での考察を進める予定である。また、計算コストが大きいため、構造の最適化を省いた手法なども試みるよていである。

### 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. Kaneko, M. Kurouchi, M. Yasui, D. Shiojiri, M. Mitsuhashi, R.S. Yu, S. Yasuhara, M. Can, K. Sardar, S.K. Sahoo, M. Yoshimura, T. Tokumasu: *Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-20, pp. 68-69.
- [2] S. Kaneko, T. Tokumasu, M. Yasui, M. Kurouchi, M. Mitsuhashi, R. S. Yu, S. Yasuhara, T. Endo, M. Can, K. Sardar, S. K. Sahoo, M. Yoshimura, A. Matsuda, M. Yoshimoto: Stability of Carbon Cluster on Candidate Substrates Evaluated by Molecular Dynamics, *MRS2023 - San Francisco*, San Francisco, U.S.A. (10 April 2023) NM04.09.02.
- [3] S. Kaneko, T. Tokumasu, M. Yasui, M. Kurouchi, S. Yasuhara, T. Endo, M. Can, R. S. Yu, S. K. Sahoo, K. Sardar, M. Yoshimura, A. Matsuda, M. Yoshimoto: Prediction of Orientation of Epitaxial MgO Film Deposited on Si Substrate, *IUMRS-ICAM2023*, Singapore, (26 June 2023) A-0130.
- [4] S. Kaneko, T. Tokumasu, S. Tanaka, C. Kato, M. Yasui, M. Kurouchi, D. Shiojiri, M. Mitsuhashi, R. S. Yu, S. Yasuhara, M. Can, K. Sardar, S. K. Sahoo, M. Yoshimura, A. Matsuda, M. Yoshimoto: Synthesis of superflat graphene on substrates selected by molecular dynamics calculation, *Micro and Nano Engineering Conference (MNE2023)*, Berlin, Germany, (26 Sep. 2023).
- [5] 金子智: 新奇グラフェン作成法の提案, 産業技術連携推進会議 情報通信・エレクトロニクス部会第 16 回電子技術分科会総会, 沖縄県うるま市沖縄県工業技術センター, (2023 年 11 月 9-10 日).
- [6] S. Kaneko, T. Tokumasu, M. Yasui, M. Kurouchi, C. Kato, S. Tanaka, S. Yasuhara, M. Can, R.S. Yu, S. K. Sahoo, K. Sardar, M. Yoshimura, A. Matsuda, M. Yoshimoto: Super flat graphene grown on substrate selected by using molecular dynamics calculation, *MRS-Boston*, Boston, U.S.A., (2023), QT04.03.03.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J23R003
Classification	International Multiple Collaborative Research Project
Subject area	Aerospace
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Prediction and Optimisation of Axisymmetric Shock Reflection in Supersonic Aerospace Applications

Hideaki Ogawa\*†, Masanobu Matsunaga\*, Aoi Shibakita\*, Chihiro Fujio\*  
 Justin Kin Jun Hew\*\*, Roderick Boswell\*\*, Sannu Mölder\*\*\*  
 Ben Shoesmith\*\*\*\*, Rabi Tahir\*\*\*\*, Evgeny Timofeev\*\*\*\*  
 Yoshitaka Higa\*\*\*\*, Taro Handa\*\*\*\*, Yasumasa Watanabe\*\*\*\*  
 Kiyonobu Ohtani\*\*\*\*\*††

\*Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University

\*\*Plasma Power and Propulsion Laboratory, Australian National University

\*\*\*Department of Aerospace Engineering, Ryerson University

\*\*\*\*Department of Mechanical Engineering, McGill University

\*\*\*\*\*Department of Advanced Science and Technology, Toyota Technological Institute

\*\*\*\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††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 (disc) (Fig. 1) occurs at the centreline, because regular reflection is precluded by theory at the symmetry axis in the inviscid regime and at high Reynolds number.

The flow undergoes an abrupt change across the Mach disc, which can exert crucial impact on the performance of the applications, responsible for undesirable events such as intake unstart and under-expanded nozzle operation. 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 disc, which may be suitable to be 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 in a best-practice approach coupling experiment, computation, theory and optimisation. Shock structures and centreline flow properties will be measured optically and via molecular tagging velocimetry in supersonic experimental facilities, in conjunction with numerical simulation using adaptive mesh refinement and viscous correction. The attributes for the incident shock and Mach stem will be used in analytical approaches based on Guderley's analogy, three-shock and curved-shock theories. The resultant methodology will not only serve as a useful design tool for axisymmetric supersonic applications but

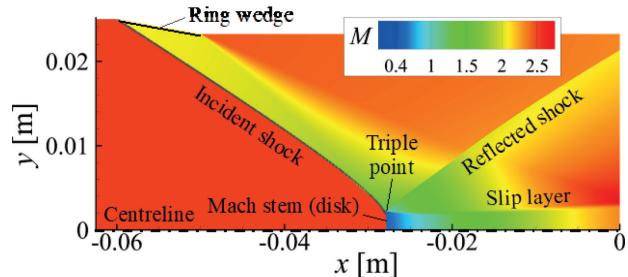


Figure 1: Shock system in ring wedge intake  
 Flow field plot showing the incident shock, reflected shock, and triple point in a ring wedge intake geometry. The plot includes a color bar for the Mach number (M) ranging from 0.4 to 2.5.

also provide valuable insights into underlying flow physics and key design factors.

The flow undergoes an abrupt change across the Mach disc, which can exert crucial impact on the performance of the applications, responsible for undesirable events such as intake unstart and under-expanded nozzle operation. 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 disc, which may be suitable to be 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 prediction and design of centreline Mach reflection by formulating its behaviour and characteristics in a best-practice approach coupling experiment, computation, theory and optimisation. In particular, shock structures and centreline flow properties will be measured optically and via molecular tagging velocimetry in supersonic experimental facilities, in conjunction with computational simulation using adaptive mesh refinement and viscous correction. The attributes for the incident shock and Mach stem will be used in analytical approaches based on Guderley's analogy, three-shock and curved-shock theories. The resultant methodology will not only serve as a useful design tool for axisymmetric supersonic applications but also provide valuable insights into underlying flow physics and key design factors.

## 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 (disc), 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 is 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 is 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 is 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.

### 3. Achievements

#### 1. Analytical modelling of incident shock in ring intake with streamwise curvature

An analytical model has been proposed to predict the shape of the incident shock generated in ring intakes with streamwise curvature (Fig. 2) on a theoretical basis. In this model, the streamline curvature downstream of the incident shock is assumed to be equal to the ring curvature and remain constant. Euler simulations have been performed for various ring shapes and freestream conditions to compare the shape of the incident shocks with those predicted by the analytical models in the region unaffected by expansion waves from the ring trailing edge.

Numerical simulations have been performed using computational fluid dynamics (CFD) to evaluate the analytical model in a parametric manner. The ring geometry is defined by 4 geometric parameters, namely the ring radius, the leading-edge angle, the normalised radius of curvature, and the normalised width, as shown in Fig. 2.

Figure 3 shows an example of the Mach number and static pressure distributions, indicative of the occurrence of Mach reflection as well as the presence of a Mach stream downstream of the Mach disc. Figure 3 (b) displays successive compression waves emanating from the ring wall, signifying increasing static pressure due to isentropic compression of supersonic flow along the concave ring surface. The dotted line shown in Fig. 3 (b) indicates the position of the leading expansion wave generated at the ring trailing edge, which intersects the incident shock.

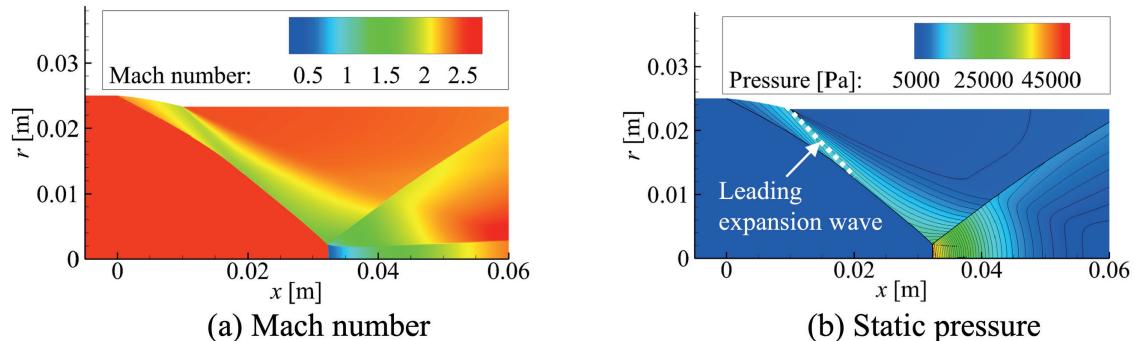


Figure 3: Flowfield ( $\theta_w = 5^\circ$ ,  $\bar{r}_w = 2.5$ ,  $\bar{w} = 0.4$ ,  $M_\infty = 2.5$ )

Figure 4 indicates the part of the incident shock shapes unaffected by expansion waves (Fig. 3b) generated with various ring widths. The overlap of the curves indicates that the shape of the incident shock in the region unaffected by the expansion waves remains the same regardless of the ring width. This signifies that there is no need to consider the ring width as a variable in the modelling of axisymmetric incident shocks.

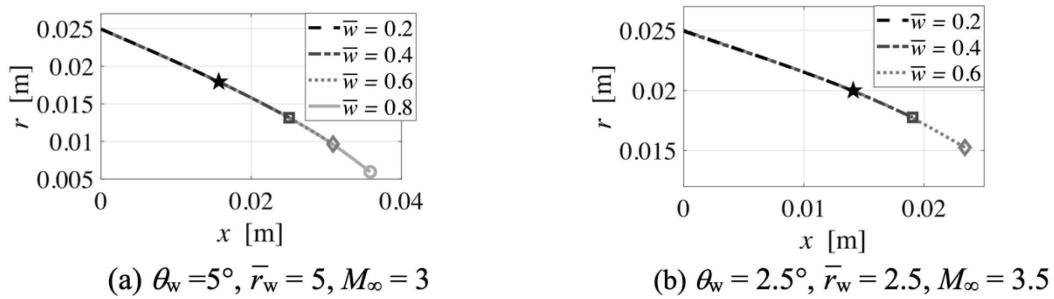


Figure 4: Comparison of incident shock shapes with various ring widths

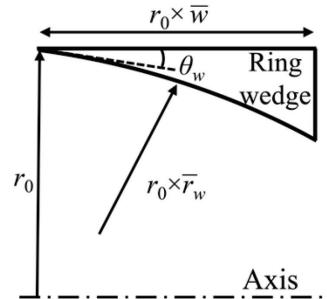


Figure 2: Ring geometry and parameters

Figure 5 schematically depicts the configuration of the Mach shock system as well as the nonorthogonal curvilinear  $\xi$ - $\eta$  coordinates defined in this model.  $\theta$  is the flow deflection angle and  $\beta$  is the shock angle.

The original model proposed by Ren *et al.* has been extended by applying the curved shock theory (CST) to adapt to rings with curvature. This extension has effectively removed the main limitation associated with the assumption of Ren *et al.*'s model, which primarily assumes a linear incident shock, while the extended model still assumes the streamwise curvature downstream of the incident shock  $D_2$  to be constant, fixed at the value of the ring curvature at any location of the incident shock. The extended differential equation has consequently been derived as:

$$R_{xx} = \frac{1 + R_x^2}{\cot \theta + \tan \theta} \left[ \frac{\partial \theta}{\partial \beta} \frac{1}{\tan \theta + R_x} + \frac{1}{\gamma p} \frac{\partial p}{\partial \beta} \frac{1 - M^2}{M^2} \frac{1}{1 - R_x \tan \theta} \right]^{-1} \times \left[ \frac{1}{R} - \frac{D_2(R_x + \tan \theta - \sin 2\theta)}{\sin \theta \tan \theta - R_x^2 \cos \theta} \left\{ \frac{(1 + R_x \cot \theta)^2}{\cot \theta - R_x} (M^2 - 1) - (\cot \theta - R_x) \right\} \right]$$

The extended analytical model that incorporates CST has been found to be able to predict the shape of incident shock when the ring has no or small streamwise curvature (Fig. 6a), while deviations have occurred from the CFD results if the ring has relatively large curvature (Figs. 6b-d). The angle of the incident shock increases because of compressive waves that occur on the concave ring surface, and such influence becomes more pronounced for larger curvature. This has subsequently resulted in larger errors in the predicted incident shock shapes, especially for ring shapes with large wall curvature, suggesting the room and need for further improvement in analytical modelling (detailed information of analytical modelling can be found in Ref. [4]).

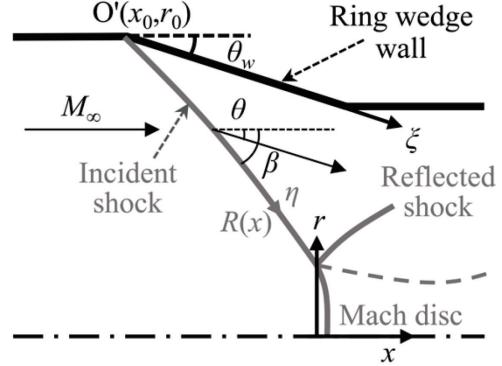


Figure 5: Schematic of Mach reflection and coordinates

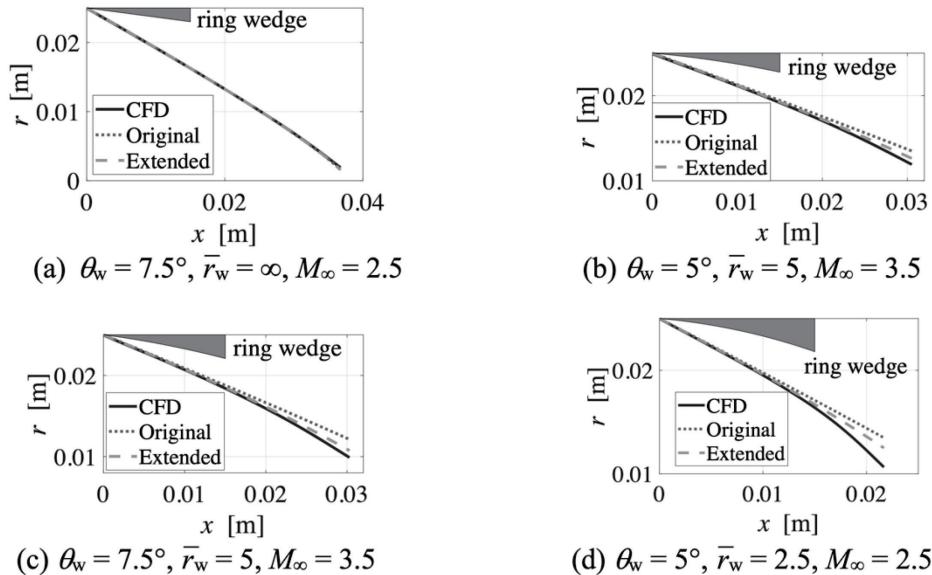


Figure 6: Comparison of incident shock shapes amongst CFD, original and extended models

## 2. Effects of curvature of ring intake on axisymmetric flow

The influence of curved rings on axisymmetric flow (see Fig. 7 for the definitions used in this study) has also been examined by comparing the flowfields in ring intakes without and with curvature with the identical contraction ratio in accelerated freestream.

Figure 8 displays the Mach number distribution at the critical Mach number, at which the shock attaches to the leading edge or the lip of the ring (the critical Mach number is  $M_\infty = 3.50$  for  $\theta_w = 5^\circ$  in this case). Table 1 shows the relationships among Mach number, deflection angle and shock angle. The close agreement of the shock angle with the theory indicates that the shocks attached to the rings are locally strong oblique shock waves near the leading edge at the critical Mach numbers.

According to the Kantrowitz condition applied to isentropic flow downstream of the bow shock under quasi-one-dimensional flow assumption, the upstream Mach number at this contraction ratio would be expected to be 2.85. However, there is a disparity in the critical Mach numbers among the three cases, which may be attributed to multidimensional effects. The ring wedge without curvature exhibits a critical Mach number that is the closest to the theoretical predictions. It has also been found that flow unsteadiness exerts little influence on the critical Mach number when the overall intake length is small in relation to its diameter (details can be found in Ref. [2]).

## 3. Shock reflection from axial cylinder in axisymmetric flow [3]

Shock reflection on an axial cylinder has been investigated, focussing on its transition between regular reflection (RR) and Mach reflection (MR), which occur at larger and smaller cylinder radii, respectively, when the shock impinges onto an axial cylinder, as depicted schematically in Fig. 9. The radius of the cylinder sets the incident shock angle.

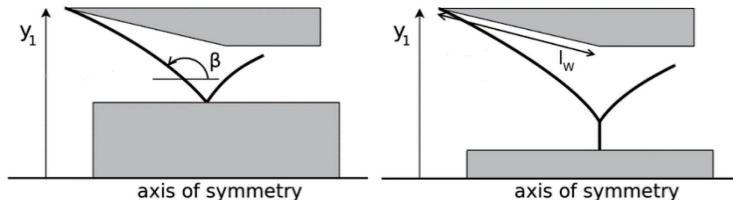


Figure 9: Schematics of regular reflection (RR) at large cylinder radii (left) and Mach reflection (MR) at small cylinder radii (right)

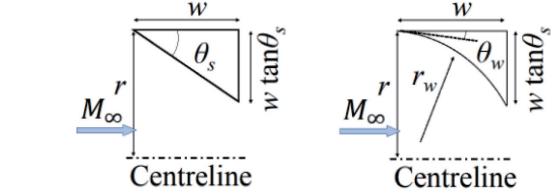


Figure 7: Ring geometries and parameters (left: ring wedge without curvature, right: ring with curvature)

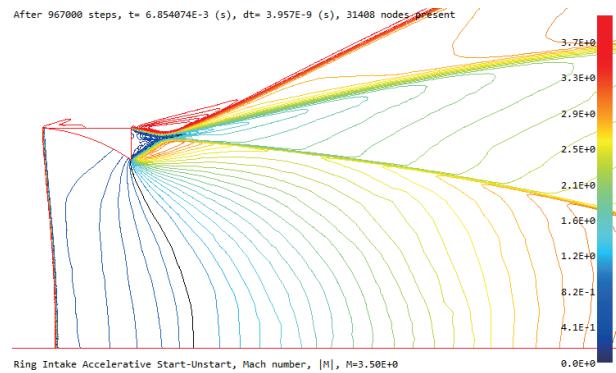


Figure 8: Mach number distributions at critical Mach number (black lines indicate sonic lines)

Table 1 Shock angles at critical Mach numbers

$\theta$	$M_{critical}$	$\beta_{meas}$	$\beta_{theory}$
$20^\circ$	$3.14^\circ$	$82.16^\circ \pm 0.85^\circ$	$82.51^\circ$
$10^\circ$	$3.34^\circ$	$86.42^\circ \pm 1.19^\circ$	$86.74^\circ$
$5^\circ$	$3.50^\circ$	$88.14^\circ \pm 0.50^\circ$	$88.46^\circ$

(details can be found in Ref. [2]).

This study has been conducted in a semi-analytical approach in conjunction with mesh-adaptive CFD. In the semi-analytical approach, the methods of characteristics (MOC) is used to generate predictions of the incident shock, and the MOCMR model for the prediction of the MR flowfield is applied to support the MR-RR transition predictions in comparison with CFD predictions.

It has been shown that simulations conducted with a fixed cylinder radius can generate results with RR at cylinder radii that are extremely close to the transition location predicted by the quasi-steady variable cylinder radius approach, and therefore it is concluded that either approach is suitable for the determination of RR-MR transition in this case. Figure 10 shows the flowfield immediately before and after RR-MR transition at the mesh refinement level  $MRL_{disc} = 10$ . The MOC prediction of the incident shock is shown to lie on top of the CFD one, which largely justifies the use of MOC to determine the incident shock angle associated with transition.

On the other hand, the results indicate RR-MR transition at an incident shock angle that is  $\sim 0.2^\circ$  lower (stronger incident shock) than suggested by the theoretical detachment limit, *i.e.*, slightly outside of the dual solution domain. Results also indicate significant sensitivity to mesh fineness, and it remains possible that with extremely fine meshes, RR-MR transition could be predicted at incident shock angles closer to, or even greater than, the theoretical detachment limit value. The combined approach of CFD and MOC predicts the MR-RR transition shock angle to be  $142.11^\circ$ , which is  $0.53^\circ$  steeper than that given by the von Neumann criterion, *i.e.*, slightly inside of the dual solution domain. The RR-MR and MR-RR transition points were predicted to be distinctly different from one another, and therefore hysteresis was demonstrated. This hysteresis is distinct from the well-known wedge-angle-driven hysteresis in which the shock angle varies due to changes in the wedge angle. (details of this study can be found in Ref. [3]).

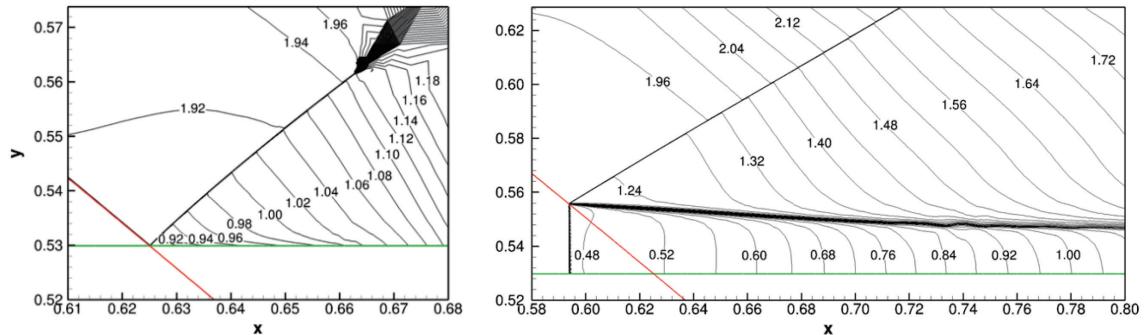


Figure 10: CFD-predicted Mach number flowfield at the point of shock reflection for RR at  $y_{cyl} = 0.5299$  (left) and MR at  $y_{cyl} = 0.5298$  (right) at  $MRL_{disc} = 10$  (green line indicates cylinder surface, and red line shows MOC-predicted incident shock)

#### 4. Viscous effects on centreline shock reflection in ring intake

The characteristics of viscous flowfields shock reflection in axisymmetric ring intakes have been investigated, with particular focus on its transition. The leading-edge angle at which the maximum pressure peak on the axis occurs has been explored for 5 cases (Table 2) with different freestream total pressure values, and hence Reynolds and Knudsen

Table 2: Freestream conditions of 5 cases

Case	$p_0$ [Pa]	$\lambda_\infty$ [m]	Re	Kn
1	100,000	$3.78 \times 10^{-7}$	$5.88 \times 10^4$	$6.30 \times 10^{-5}$
2	75,000	$5.03 \times 10^{-7}$	$4.41 \times 10^4$	$8.40 \times 10^{-5}$
3	50,000	$7.57 \times 10^{-7}$	$2.94 \times 10^4$	$1.26 \times 10^{-4}$
4	25,000	$1.51 \times 10^{-6}$	$1.47 \times 10^4$	$2.52 \times 10^{-4}$
5	12,500	$3.03 \times 10^{-6}$	$7.35 \times 10^3$	$5.04 \times 10^{-4}$

numbers, representing different levels of viscosity. Viscous flowfields in ring intakes are calculated by solving the Navier-Stokes equations assuming slip surface on the ring wall.

Figure 11 shows the relationship between the leading-edge angle  $\theta$  at the maximum static peak pressure and the Reynolds number  $Re$ . The leading-edge angle at maximum peak pressure increases rapidly as the Reynolds number decreases. This is indicative of the increasing influence of viscosity on the leading-edge angle at which maximum peak pressure occurs at lower Reynolds numbers.

Figure 12 displays the Mach number and static pressure distributions on the axis for Case 4. It compares the CFD results for 9 leading-edge angles  $\theta$  and a theoretical value that from the normal shock relation for a Mach disc that would take place in Mach reflection in inviscid flow regime. In this case, the maximum peak pressure has been found to occur at a leading-edge angle of  $1.875^\circ$  (Fig. 12a). In the vicinity of this angle ( $\theta$  ranging from  $1.75^\circ$  to  $2.25^\circ$ ), the static pressure exceeds the theoretical values. However, in case with smaller  $\theta$  values ( $1^\circ$  and  $1.5^\circ$ ), the static pressure peaks are smaller. For large  $\theta$  values, the peak Mach number aligns with the theoretical value, indicating the occurrence of Mach reflection (Fig. 12b). Conversely, when  $\theta$  is small, the Mach numbers remain above 1, indicating the absence of Mach reflection. However, unlike the static pressure distribution, no distinct Mach number distribution can be observed at the state of maximum peak pressure ( $\theta = 1.875^\circ$ ).

Figure 13 shows the flowfield at the state of maximum peak pressure ( $\theta = 1.875^\circ$ ), indicative of thick, curved incident and reflected shock waves and a subsonic region downstream of the reflected shock as a result of strong viscosity. Viscous effects on such flow characteristics have been found to become more pronounced at lower Reynolds number (detailed information on these studies can be found in Refs. [4] and [5]).

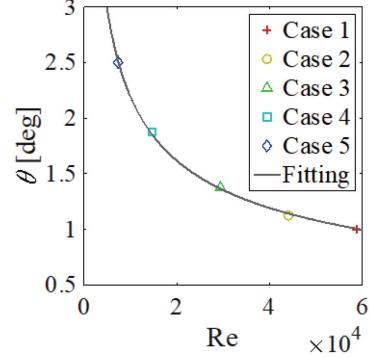


Figure 11: Variation of leading-edge angle at maximum peak pressure with respect to Reynolds number

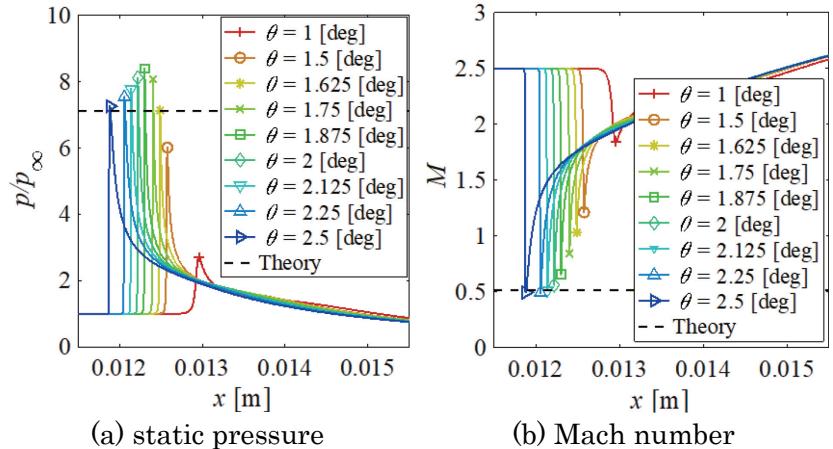


Figure 12: Centreline property distributions (Case 4,  $Re = 1.47 \times 10^4$ )

Figure 13 shows the flowfield at the state of maximum peak pressure ( $\theta = 1.875^\circ$ ), indicative of thick, curved incident and reflected shock waves and a subsonic region downstream of the reflected shock as a result of strong viscosity. Viscous effects on such flow characteristics have been found to become more pronounced at lower Reynolds number (detailed information on these studies can be found in Refs. [4] and [5]).

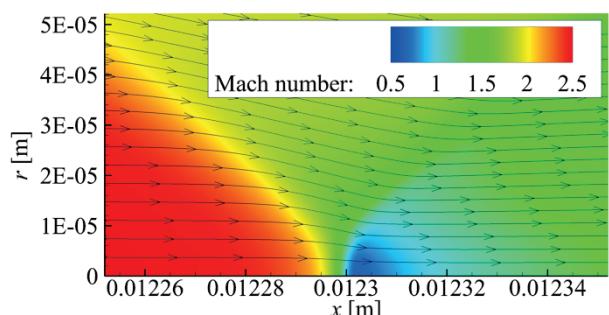


Figure 13: Mach number distributions (close-up) at state of maximum pressure peak (Case 4,  $Re = 1.47 \times 10^4$ ,  $\theta = 1.875^\circ$ )

## 5. Experimental study on centreline shock reflection in ring intake

The flowfields in ring intakes at freestream  $M_\infty = 2.5$  have been visualised by the PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence) method using acetone as a tracer molecule in a suction-type supersonic wind tunnel at Toyota Technological Institute.

The variation of the Mach disc radius with respect to the Reynolds number is plotted in Fig. 14 for the leading-edge angle of  $6.7^\circ$ , in comparison with the CFD results obtained by solving the Navier-Stokes equations assuming non-slip, adiabatic wall surface on the ring wall. Reasonable qualitative agreement can be seen in the decreasing tendency of the Mach disc radius with the Reynolds number between the experimental and CFD results.

Figure 15 compares the visualised shock system in the ring flowfield for the leading-edge angle of  $6.7^\circ$  at the Reynolds number of  $6.64 \times 10^4$  between experiment using PLIF and CFD simulation, indicative of good agreement, with a distinct axisymmetric Mach reflection comprising a Mach disc, incident and reflected shocks, and a slipstream clearly captured in both cases (detailed information on this study can be found in Ref. [6]).

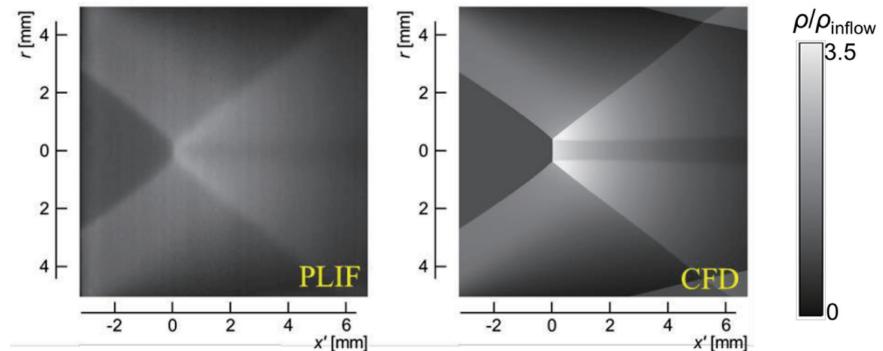


Figure 15: Comparison of Mach reflection between experiment and CFD ( $Re = 6.64 \times 10^4$ ,  $\theta_w = 6.7^\circ$ )

## 4. Summaries and future plans

An improved analytical method for predicting the incident shock in ring intakes has been developed by incorporating the streamline curvature behind the shock based on the curved shock theory (CST). The influence of streamwise curvature has been examined, revealing the existence of strong oblique shocks at the critical Mach number. A semi-analytical method has been proposed and validated for shock reflection and its transition of the incident shock from an axial cylinder. New insights have been gained into viscous effects on the centreline flow properties at transition in ring intakes by numerical investigation. Ring flowfields have been studied and visualised experimentally.

Future plans include full implementation of CST for analytical incident shock modelling, development of prediction methods for the entire Mach shock system and transition of centreline shock reflection in inviscid and viscous regimes in ring intake flowfields. Further insights will be gained by multi-objective design optimisation of ring intakes via surrogate-assisted evolutionary algorithms and data mining. The results will be verified by experimental investigation using the IFS ballistic range and supersonic wind tunnels.

## 5. Research results

### 1) Journal

Not applicable.

### 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.

- [1] Matsunaga, M., Ogawa, H., Hew, J. K. J., Boswell, R. W., Higa, Y., Handa, T., Mölder, S.: Shape Characterisation of Curved Incident Shock Waves in Axisymmetric Ring Intakes with Curvature, *Proceedings of the Thirty-fourth International Symposium on Shock Waves*, Daegu, Korea (2023), T15-0180.
- [2] Shibakita, A., Matsunaga, M., Ogawa, H., Tahir, R., Hew, J. K. J., Boswell, R. W.: Numerical Investigation of Effects of Ring Curvature on Starting Characteristics of Supersonic Ring Intakes, *Proceedings of the Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2023), GS1-30.
- [3] Shoesmith, B., Timofeev, E., Ogawa, H.: Shock reflection from an axial cylinder in axisymmetric flow, *Proceedings of the Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2023), OS7-6.
- [4] Ogawa, H., Matsunaga, M., Shibakita, A., Fujio, C., Hew, J. K. J., Boswell, R. W., Mölder, S., Shoesmith, B., Tahir, R., Timofeev, E., Higa, Y., Watanabe, Y., Handa, T., Ohtani, K.: Numerical Investigation of Viscous Effects on Centreline Shock Reflection in Supersonic Ring Intakes, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2023), CRF-52.
- [5] Matsunaga, M., Hew, J. K. J., Shibakita, A., Ogawa, H., Boswell, R. W.: Numerical analysis of viscous effects on transition of centreline shock reflection in supersonic ring intakes, *Proceedings of the Twenty-first Australian Space Research Conference*, Hobart, Australia (2023).
- [6] Higa, Y., Matsunaga, M., Fujio, C., Ogawa, H., Ohtani, K., Handa, T.: Study on Reynolds-Number Dependence of Axisymmetric Shock Reflection in Supersonic Flow, *Proceedings of AJKFED 2023 (ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference)*, Osaka (2023), 3-05-2.
- [7] Hew, J. K. J., Matsunaga, M., Ogawa, H., Boswell, R. W., Mölder, S.: Analytical and Numerical Studies of Shock Wave Reflection in Axisymmetric Internal Flows, *Proceedings of the Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2023), GS1-31.
- [8] Hew, J. K. J., Boswell, R. W., Matsunaga, M., Ogawa, H.: Focussing of Weak Conical Shocks at Nearly Glancing Incidence, *Proceedings of the Thirty-fourth International Symposium on Shock Waves*, Daegu, Korea (2023), T15-0190.

### 3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.



## **2. 研究成果報告書**

### **<リヨンセンター公募共同研究>**



Project code	J23Ly01
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	2nd 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 condition, the authors are considering a locally active control of mass flux of protein by using a functional membrane. The transient field of lysozyme in hindered diffusion is carefully visualized with 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 study, a phase-shifting interferometer was employed. The membranes tested in the study had different pore sizes but the same porosity, ranging from 25 to 300 microns. The size information of the pores on the membranes is shown in Table 1. The diffusion rate was measured and the influencing factors were analyzed at different stages of the diffusion process.

The results presented in Fig. 1 revealed three distinct trends in the rate of protein passing through the membrane when the pore diameter was between 25 and 300 microns. These findings suggest that the impact of different factors on protein diffusion varies depending on the pore size of the membrane. Particularly, the concentration field of neighboring pores had a greater impact on protein diffusion when the pore size was larger. When the pore size was moderate, the hindrance effect of the membrane on protein diffusion was deemed the dominant factor. Notably, the results showed that Pepsin, whose molecular weight is intermediate between BSA and Lysozyme, displayed different trends, indicating that factors beyond pore size and membrane characteristics also influence protein diffusion. In particular, the pH value of the protein solution was recognized to be an important factor.

These findings have important implications for designing and optimizing membrane-based processes in fields such as biotechnology, medicine, and environmental science. Specifically, the results suggest that the protein molecular size and pH value of the solution should be considered when designing and optimizing membrane-based processes. By understanding the relationship between these factors and protein diffusion, researchers can develop more efficient and effective membrane-based processes for a variety of applications.

Table 1 Membrane pore size and specification

Pore, $d$ [ $\mu\text{m}$ ]	Radius, $r$ [ $\mu\text{m}$ ]	Distance, $l$ [ $\mu\text{m}$ ]	Area ratio
25	12.5	100	
50	25	200	
75	37.5	300	
100	50	400	4.91%
150	75	600	
300	150	1200	

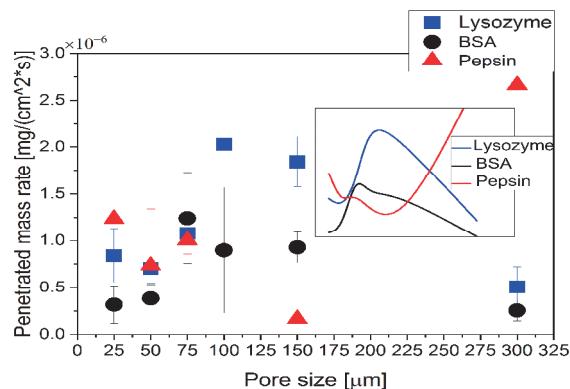


Figure 1 : Relationship between penetrated mass rate and pore size

### 3. Achievements

Two years have passed, and we could accumulate the experimental data of protein diffusion. The achievement level of this year could be evaluated at 85%. We have one special lecture in China and three general presentations in international and national conferences. Also, one PhD student is staying in Lyon for 1 year as double-degree student. Through the series of visualization experiments, the dependencies of molecular structure and macro-pore patterning are clearly measured and discussed. This might contribute to active control of protein mass transport phenomena in aqueous solutions.

### 4. Summaries and future plans

This study investigated protein diffusion through macro-porous membranes and identified three key factors: 1) the experiment results confirmed the influence of neighboring concentration, 2.) in some range of pore's size, the hindering effect of the membrane wall dominates, 3) preliminary analysis suggests that pH value may play a role in the differential diffusion of Pepsin. 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] R. Zhu, J.F. Torres, S. Moriya Y. Kanda and A. Komiya: Experimental evaluation of pore pattern on protein hindered diffusion in macro porous membranes, *Proceedings of the 33rd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-33)*, Kumamoto, (2023), 149.
  - [2] R. Zhu, J.F. Torres, S. Livi and A. Komiya: Active control of protein mass transfer by membranes with various pore patterns, *Proceedings of 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023)*, Sendai, (2023), pp.1320-1322. OS23-6.
  - [3] R. Zhu, J.F. Torres, S. Moriya, Y. Kanda and A. Komiya, Experimental evaluation of hindered diffusion process affected by the different size of macro-pore membrane, *Proceedings of the 60th National Heat Transfer Symposium of Japan*, Fukuoka, (2023), H1425.
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent) (Award) (Press release) Not applicable

課題番号	J23Ly02
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目 (発展)

## 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 混太郎\*, 内一 哲哉\*\*††

Philippe Guy\*\*\*, 武田 翔\*\*

\*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. その配管内部では流体との機械的かつ化学的作用により腐食が生じ, その進行により配管の破断リスクが高まる. このため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してきた. 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

流れ加速型腐食による配管内面に腐食面に見られるような繰り返しのきずをもつ粗面に対して, 配管の外の面から超音波を入射し粗面で反射した超音波を計測する. 反射波からフーリエ変換によって周波数とスペクトルの関係をみると, プローブの仕様に依存した周波数帯をもつスペクトル分布が得られる. これまで本研究では, そのスペクトル分布において特定の周波数のスペクトルが小さくなる現象を確認してきた. 本年度では, まずスペクトルの低下と反射波の信号との関係を明らかにするために実験と数値計算, 文献調査を行った. 数値計算の結果を図1に示す.

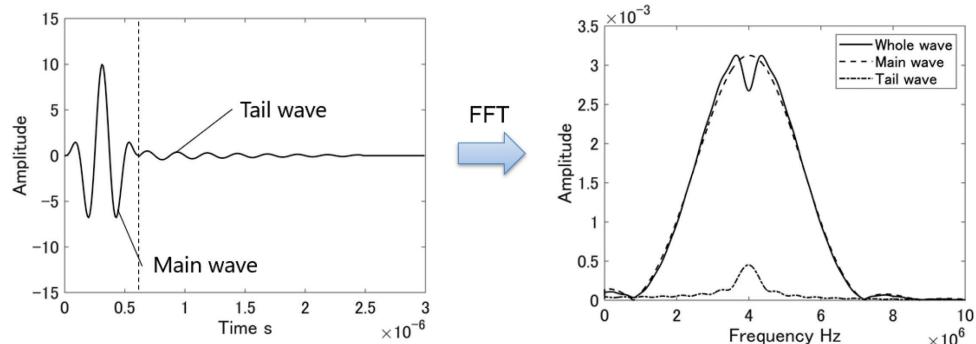


図1 粗面からの反射波の波形と周波数スペクトル波形

図1左は粗面からの反射波を数値計算により模擬した図である。反射面が平面の場合、反射波は入射した超音波の波形とほぼ同じ波形（Main wave）となり、スペクトルは正規分布状の形をとる。一方、反射面が粗さの小さな粗面の場合、反射波は平面の場合とほぼ同じ波形の後に、時間方向に遅れを伴う振幅の小さな波形（Tail wave）が計測される。図1右は、Main, Tail, そしてそれらをつなげた波形データから周波数スペクトルを算出した結果である。Mainのみでは、正規分布状の形であるが、Tailは特性の4 MHz辺りのスペクトルが大きくなっている。それらを含む波形全体の周波数スペクトルでは、4 MHz辺りのスペクトルがMainのスペクトルと比較して減少している。これは特定の周波数スペクトルの減少がMainとTailの波をつなぐで1つの反射波として扱うことにより生じることを示している。また、実験では粗面の状態によって減少する周波数が変化する結果が得られていたため、粗面の情報はTailの波形に含まれていると考えられる。以上のことより、実験データにて確認していた周波数スペクトルの減少の原因が、Mainに遅れて到着するTailの反射波のデータであることを確認した。

次に Tail wave の生じる原因について数値計算を行った。超音波を平面に入射すると、プローブ正面に生じる平面波とともにプローブの両端に生じるエッジ波（球面波）が生じる。平面波は指向性をもって伝搬するため、反射面で反射した後、時間遅れはほぼなく入射面に戻る。一方、エッジ波はプローブの両端の位置からプローブからみて外向きに広がるように伝搬する。反射面が平面であればエッジ波の反射波はプローブの位置にはすぐには伝搬しないが、粗面であればエッジ波の一部が1回の反射でプローブの位置に伝搬する。この反射波の数値計算を実験で使用した試験体と同じ形状を条件として行った。入射波は正弦波にHann窓をかけた4 MHzのパルス波として算出した。図2は反射波にフーリエ変換し周波数スペクトルにした後、平面からの反射波のスペクトルで粗面からの反射波のスペクトルを正規化した結果である。きずのピッチが1.25 mm, 2.00 mmのいずれにおいてもスペクトルが小さくなる周波数が近いことが分かる。これにより、時間遅れの反射波が主にエッジ波の反射波であり、その反射波の形状やスペクトルを解析することにより粗面の形状推定の可能性が示唆された。

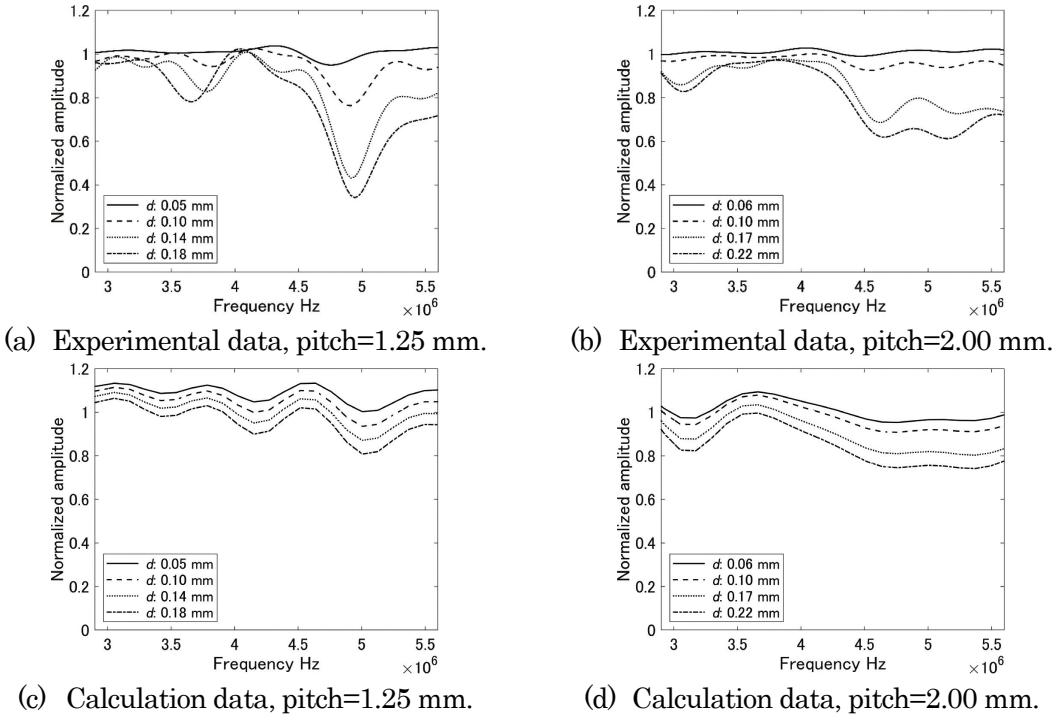


図2 実験と計算による反射波の正規化した周波数スペクトル

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では粗面が超音波の周波数スペクトルを低下させる原因を明らかにした。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

粗面で反射した超音波の周波数スペクトルにおいて、特定の周波数が低下する原因とそれが粗面の形状に依存することを明らかにした。今後はこの特性における粗面のパラメータと周波数との関係を明らかにし、その関係を用いた粗面の形状推定を目指す。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] H. Nakamoto, K. Terada, P. Guy, T. Uchimoto: Effect of Flaw Parameters on Ultrasonic Attenuation, *Proceedings of Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai (2023), pp. 1314-1315.
- [2] H. Nakamoto, K. Terada, P. Guy, T. Uchimoto: Decrease at Specific Frequencies in Frequency Spectrum of Ultrasonic Waves Reflected on Rough Surface, *Proceedings of the 21st International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Tokyo, (2023), PC-2a-17-232.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J23Ly03
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	3rd year

## Investigation of a Predictive Therapeutic Response under Controlled Oxygen Condition in Cancer Patient-derived Organoids

Nicolas Aznar\*†, Kenichi Funamoto\*\*\*††  
 Jean-paul Rieu\*, Satoshi Aratake\*\*  
 \*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 and a life-threatening spread to other parts of the body. 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 colorectal cancers (CRC). Cancer stem cells (CSC) located within the tumor constitute a key medical issue. Due to their high plasticity, this particular cancer cell population is extremely resistant to conventional therapy and responsible for the recurrence of the disease in patients. Therefore, identify novel mechanisms regulating cancer cell plasticity and targeting those CSCs is a prerequisite to open novel therapeutic avenues. While normal cells need the right balance (not too little/not too much) in O<sub>2</sub> concentration to stay healthy, cancer cells in the other hand reside mostly in low O<sub>2</sub> concentration conditions (hypoxia) fueling their growth, resistance to conventional therapies and therefore their aggressiveness. However, due to technological issues, the O<sub>2</sub> level within *in vitro* cell culture experiments is rarely considered and mechanisms regulating differences in O<sub>2</sub> levels between cancer cells and normal cells are yet to be fully unraveled.

A tripartite collaboration including a team at IFS, ILM and CRCL is ready to tackle the challenge of examining how oxygen (O<sub>2</sub>) concentration influence CSC plasticity and their response to anti-cancer therapies.

Using a novel integrative approach that couple innovative *ex vivo* spheroid and organoid culture system as well as cutting edge O<sub>2</sub> diffusion technologies, the outcomes of this work could lead to the development of translational research. On the one hand, this project will help understand how O<sub>2</sub> could impact cancer cell plasticity (CSCs properties), and therefore improve efficacy of conventional chemotherapy. On the other hand, this project could also contribute to enhance human disease modeling paving the way for more pertinent drug screening in combination with O<sub>2</sub> therapy.

To strengthen our collaboration, Dr N. Aznar stayed in Japan for 13 days (Nov. 3-16, 2023) to perform experiments related to this project. Moreover, the project secured funding for a two-year period starting in 2024 from the French ShapeMed program, overseen by University Claude Bernard Lyon 1. This funding encompasses the recruitment of a French engineer and the execution of experiments aimed at advancing the project's development.

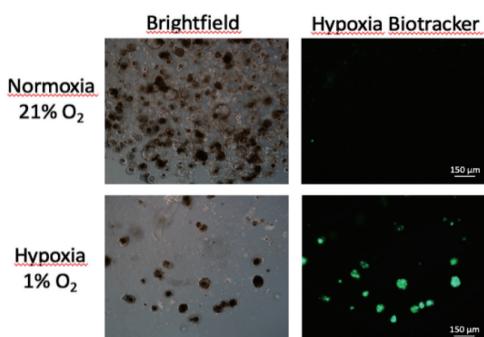
## 2. Details of program implement

### Specific aim 1: Generation of microfluidic device compatible with 3D organoid cultures.

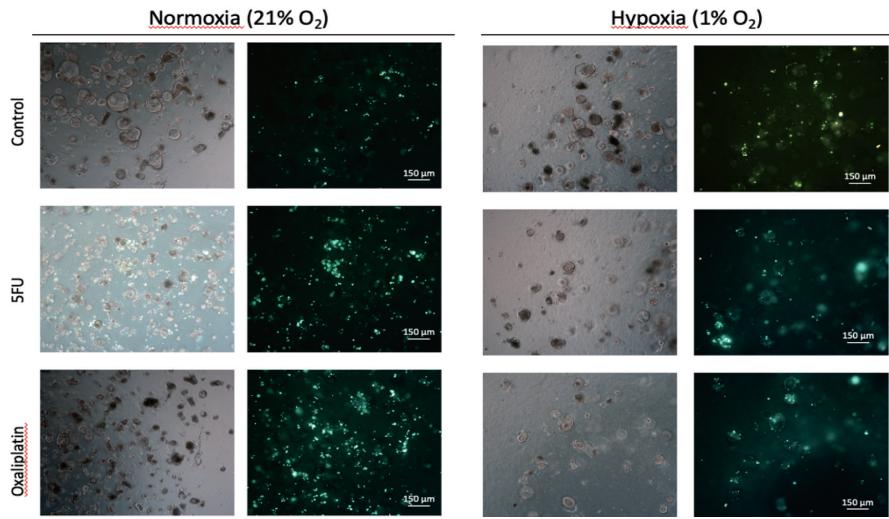
Dr K. Funamoto located at IFS and Dr Rieu Jean-Paul located at ILM are both leading expert in oxygen tension gradient modeling in cancer as well as microfluidic tool development. Dr N. Aznar located at Cancer Research Center of Lyon has developed a strong background in colorectal cancer patient derived-organoid culture as well as a new 3D cell culture technology (patent pending) to study CSC plasticity. Therefore, the first part of this project is focused in combining all collaborators 'expertise to develop a cutting-edge technology allowing to modulate O<sub>2</sub> tension in 3D cell culture using spheroids from cancer cell lines as well as colorectal cancer patient derived-organoids. During Dr K. Funamoto's research stay in Lyon for one month (June-July 2023) as a CNRS invited researcher, we had several in person meeting between all project members to discuss the device structure more in detail. Experiments will be performed in order to validate the biocompatibility of the device with 3D cultures as well as the impact of O<sub>2</sub> (hypoxia vs normoxia) on (1) their self-renewal capacity (colony forming efficiency), (2) their differentiation potential and (3) their stemness properties through analysis of specific SC vs differentiation markers (by Immunofluorescence, Immunoblot and RT-qPCR analysis).

### Specific aim 2: Proof of concept on the impact of O<sub>2</sub> modulation on therapeutic drug response and resistance in Colorectal cancer patient-derived organoids (PDOs).

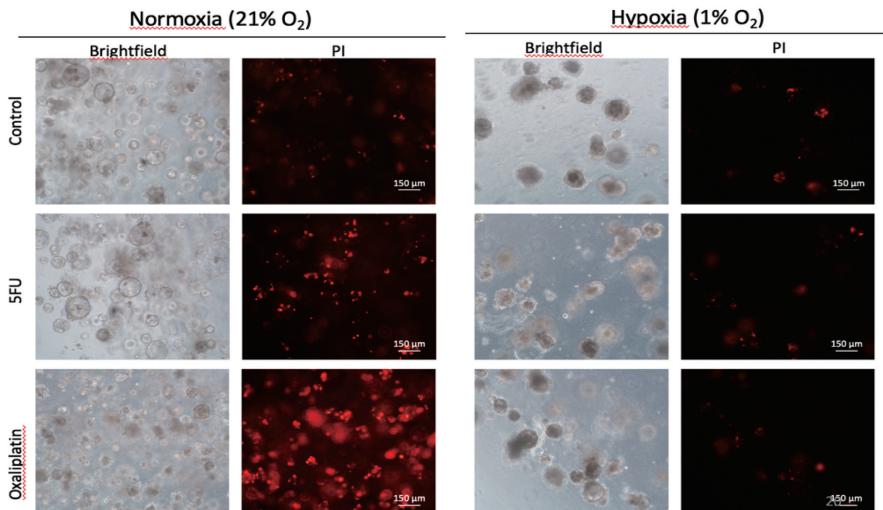
Previous studies have shown strong connections between O<sub>2</sub> and cancer. However, underlying mechanisms are still to be understood. To test if modulating O<sub>2</sub> concentration in the tumor microenvironment could be a good strategy to improve conventional therapeutic drugs' efficiency, experiments using CRC PDOs culture experiments were performed in normoxia vs hypoxia using two different cell incubators, one in 21% O<sub>2</sub> and a second in 1% O<sub>2</sub>. First, CRC PDOs were incubated with a biotracker in order to confirm hypoxic conditions (Figure 1). Next, CRC PDOs were treated with drugs routinely used to treat CRC patients (5-Fluorouracil and Oxaliplatin) (Figures 2 and 3). Cell toxicity and surviving cells were monitored by microscopy by CellTox green and propidium iodide, respectively. Preliminary data show already promising results in that CRC PDOs cultivated in hypoxia grow slower and are more resistant to conventional therapy (5FU and Oxaliplatin) compared to normoxia conditions.



**Figure 1:** Detection and assessment of hypoxic conditions in CRC patient-derived organoids (PDOs). CRC PDOs were cultivated either in normoxia (21% O<sub>2</sub>) vs in hypoxia (1% O<sub>2</sub>) for 15 days and then incubated with Biotracker 520 Green Hypoxia dye (Millipore).



**Figure 2:** Impact of O<sub>2</sub> concentration on CRC Patient-derived organoids (PDOs) and therapeutic response. (A) CRC PDOs were cultivated either in normoxia (21% O<sub>2</sub>) vs in hypoxia (1% O<sub>2</sub>) for 15 days and then treated with 5FU or Oxaliplatin. Cell toxicity assays were performed using CellTox green technology from Promega.



**Figure 3:** Low oxygen concentration reduces PDOs cell death. PDOs were cultivated either in normoxia (21% O<sub>2</sub>) vs in hypoxia (1% O<sub>2</sub>) for 15 days. Dead cells were monitored by microscope using

### 3. Achievements

- Optimization of CRC patient-derived organoid (PDO) cultures from fresh tumors.
- Hypoxic condition decreases CRC PDO growth.
- Hypoxic condition confers resistance of CRC PDO to drugs.
- We designed an innovative 3D cell culture system combined with oxygen gradient.

### 4. Summaries and future plans

Using a novel integrative approach that couple innovative *ex vivo* organoid culture system as well as a new organoid-on-chip platform compatible with O<sub>2</sub> space and time control and fluorescence microscopy, the outcomes of this work could lead to the development of translational research, in line with the “bench to bed” policy of the adjoined iLM and CLB/CRCL. Therefore, by improving *ex vivo* tumor organoid culture conditions, this project may not only have an impact in basic research but could also contribute to enhance human disease modeling. This project will decipher the

unexpected role of O<sub>2</sub> pressure on CSC plasticity (determination vs de-differentiation), identify potential therapeutic targets and evaluate whether strategies aiming at modulating O<sub>2</sub> level could induce a “forced differentiation” in order to dampen CSC plasticity. By promoting CSC differentiation, the final aim of this project will be to sensitize them to conventional therapies and consequently opening a new avenue to eradicate them, thus identifying new alternatives for drug sensitivity that will pave the way for stratified chemotherapy.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)  
[1] S. Aratake, 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 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023)*, (2023), pp. 1336-1337.
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent)  
Not applicable
- (Award)  
Not applicable
- (Press release)  
Not applicable

Project code	J23Ly04
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year (progressing)

## Experimental Study of New Model Electroactive Materials (TEmpuRA)

G. Coativy<sup>1†</sup>, V. Perrin<sup>1</sup>, L. Seveyrat<sup>1</sup>, F. Dalmas<sup>2</sup>, S. Livi<sup>3</sup>, H. Takana<sup>4,5††</sup>, JY Cavaillé<sup>4,5,6</sup>

<sup>1</sup>LGEF, INSA Lyon, <sup>2</sup>MATEIS, INSA Lyon, <sup>3</sup>IMP, INSA, <sup>4</sup>Tohoku University Lyon Center Lyon <sup>5</sup>Institute of Fluid Science, Tohoku University, <sup>6</sup>ELyTMAx IRL

†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 electroactuation 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. 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 electroactuation of dielectric elastomers.

### 2. Details of program implement

We have developed and characterized model epoxy-amine networks doped with controlled amounts of ionic liquids (BMIM-TFSI) with a weight fraction varying between 0.1 and 10%wt to study the impact of electric charge carriers on the electroactuation of elastomers. Our materials were studied electrically (dielectric spectroscopy and bending under constant electric field), mechanically (mechanical spectroscopy) and structurally (EDX, WAXS).

### 3. Achievements

Our results showed that the addition of ionic liquids: 1) does not affect the thermo-mechanical relaxations and 2) increases the electric conductivity by 2 decades for only 0.1%wt and by 4 decades by adding 10%wt of IL. We also show that ion mobility is constant whatever the IL concentration. This data can now be used for modeling our systems.

Bending tests which consist in following the displacement of the free end of a film suspended on the top (Figure1.a) under constant applied electric field showed that the matrix without IL does not bend, whereas the presence of only 0.1%wt of IL was sufficient to induce significant bending. More strikingly after removing the applied electric field, a remanent displacement is observed over days (Figure1.b). This unexpected phenomenon is now intensively investigated to understand its origin. We showed that it is due to the presence of an anionic rich phase close to the positive electrode long after the removal of the applied electric field. Our results were presented at the 20th ICFD conference in Sendai. The authors would like to thank the LyC for its financial support for the round trip (France-Japan).

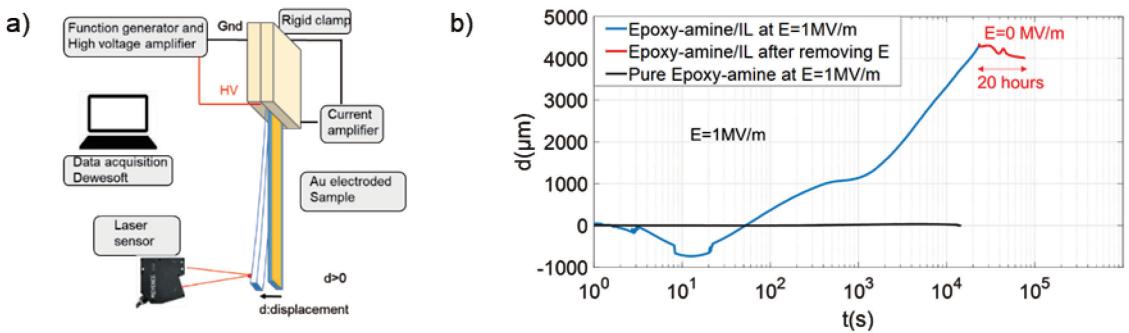


Figure.1 a) Experimental setup of the bending test under electric field b) displacement as a function of time, under  $E=1\text{MV/m}$  no displacement is observed for the pure epoxy-amine and a displacement is observed for epoxy-amine doped with ionic liquid even after removal of the applied electric field.

#### 4. Summaries and future plans

To sum up:

- Epoxy-amine materials doped with controlled amount of ionic liquid (IL) have been synthesized.
- The addition of 0.1 wt.% of IL is sufficient to induce bending under a constant electric field of 0.1 MV/m and to improve significantly the conductivity.
- Physical parameters such as ion mobility have been successfully extracted from our experience and can be used to model our systems and simulate their behavior.
- After removal of the applied electric field, a remanent displacement is observed. This has been shown to be caused by the presence of an organized layer of ions near the positive electrode long after the electric field has been removed.

We will be submitting a first paper in May on the impact of the weight fraction of IL on the electroactuation of epoxy-amine/IL. We also hope to submit a second paper on the identification and understanding of the remanent displacement observed when the electric field is suppressed.

Now we are processing epoxy-amine networks doped with other ionic liquids and plan to process ionopolymer (i.e. with cations grafted onto the polymer backbone) to evaluate the impact of the nature of ions on the electro-mechanical response of our materials. In addition, the use of other ionic liquids will allow IL cations and anions to be mapped by EDX after the applied electric field has been removed.

#### 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] Axel Blain, Gildas Coativy, Florent Dalmas, Sébastien Livi, Gabriel Perli, Véronique Perrin, Laurence Seveyrat, Gildas Diguet, Joël Courbon, Hidemasa Takana, Jean-Yves Cavaillé, Study of the Electroactuation of Doped Epoxy-amine Elastomers with Ionic Liquids under High Electric Fields, Twentieth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023), Sendai, (2023).

[2] Gildas Coativy, Gildas Diguet, Laurence Seveyrat, Véronique Perrin, Florent Dalmas, Sebastien Livi, Hidemasa Takana, Joël Courbon, Jean-Yves Cavaillé, TEMPURA project: Toward understanding of bending behavior of electro-responsive polymers, *ElytWorkshop*, 2024.

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

課題番号	J23Ly05
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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\*†, 小宮 敦樹\*\*††, 谷田 開\*, 秋永 加奈\*

Daniel Henry\*\*\*, Valery Botton\*\*\*

\*秋田大学理工学部/理工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所, \*\*\*リヨン大学 INSA

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

流体に回転運動を与えたときの不安定現象についての研究は、混合を考慮するような多くの産業用途にとって重要である。例えば、回転システムの研究はあらゆる同心駆動装置やタービンロータなどの回転機械設計に役立つだけでなく、小型の回転熱交換器やミキサーなど化学装置の最適化にも役立つ。これらの流れをより良く制御するためには、流れの不安定性が発生する臨界パラメータや、不安定性による流れのパターンの遷移メカニズムを解明する必要がある。本研究では、ミキサー等のモデルとして、同心同軸で回転する二重円すい間の流れを取り扱う。

先行研究として、二重円筒間のテイラー・クエット流に関する研究は数多くなされている。その中でも、内側の円筒のみを軸中心に回転させて円筒間の流れ挙動を調べた研究では、内円筒の回転速度に応じたある臨界点で周方向の回転流が不安定となり円筒間にはテイラー渦が発生する。この遷移の形態は、円筒長さと円筒の幅の比で表されるアスペクトを無限大(円筒が無限長)としたときに、完全なピッチ・フォーク分岐となることがわかっている。しかし、アスペクト比が有限の大きさ(上下に蓋のある系)の場合には、渦の発生形態は不完全分岐となり、さらに回転数を大きくすることで複雑な分岐現象を示す。アスペクト比の変化に対して、豊富な遷移現象が現われるため分岐理論を用いた観点から多くの研究が行われている。一方で、本研究ではアスペクト比が有限で容器の上下に蓋のある系において、円筒の側壁が傾斜した同心二重円すいの場合を取り扱う。上述のように分岐の様相は不完全分岐となり複雑となることが予想される。また、回転による遠心力の斜面成分により、このシステムでは回転と同時にテイラー・クエット流と似た渦が生じることが先行研究より分かっているが、それらの渦の遷移条件等については不明な点が多い。

本研究では同心二重円筒/円すい間内の渦形態が遷移する条件を解明するために、線形安定性および非線形分岐理論を用いた安定解析を行う。さらに、分岐が生じた後の流れを実験および基礎方程式の時間発展をシミュレーションすることで明らかにする。得られた実験結果および数値シミュレーションの結果を用いて動的モード解析を行う。動的モード解析では、多数のモードが出力され、対象とする現象を説明する支配的なモードがどのモードであるかを動的モード解析の結果のみから特定することは一般に難しい。そこで、線形安定解析から得られた不安定モードと動的不安定解析で得られたモードの比較を行い、現象を支配するモードを抽出する方法の確立を目指す。

## 2. 研究成果の内容

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、 $\Gamma=3.75$ ,  $\eta=0.5$ ,  $Re=130$  における流れの解析を行う。先行研究で上記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.2 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、 $\omega_s=0.1280$  となった。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。Fig.2 に示す。これは、速度の絶対値の 10%スカラーレートをマッピングしたものである。 $1/4T_0$  のとき  $r-z$  断面に 4 つの角が貫通しているのに対して、 $2/4T_0$  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。

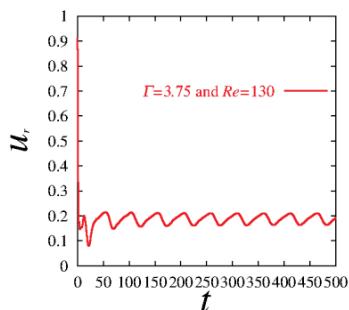


Fig.1 Time evolution for spectral element calculation

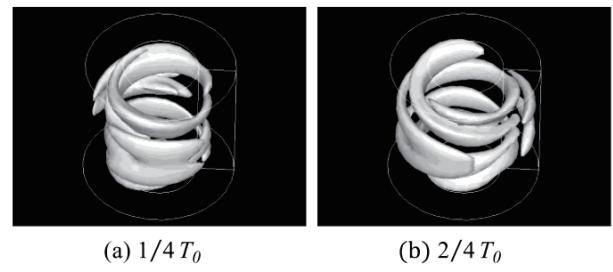


Fig.2 3D mapping (Micro AVS)

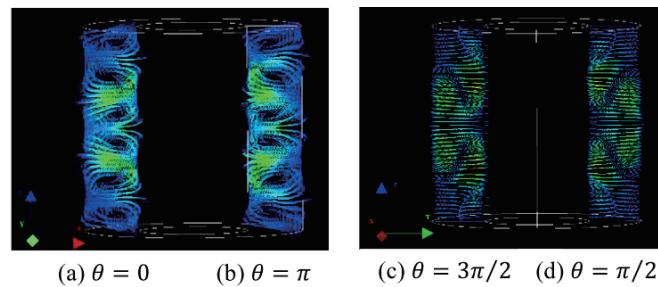


Fig.3 Vector fields (mode1)

SVD の結果から、rank=3 まで次元削除をして DMD を進める。mode1 に着目すると、このモードの実部の値は  $8.854 \times 10^{-6}$  であり、このモードは増幅も減衰もしないことがわかる。さらに、虚部の値は、 $-1.279 \times 10^{-1}$  でありモードがこの各振動数で揺れていることがわかる。この時の  $r-z$  断面のベクトル場を Fig.4 に示す。 $\theta=0, \pi$  では、上下に 3 対の渦が発生していることがわかる。一方で、 $\theta=\pi/2, 3\pi/2$  では、上下に 2 対の渦が発生している。続いて、mode2 について考察する。実部・虚部の値はともにほぼ 0 に等しく、

このモードは増幅も減衰も振動もしないことがわかる。また、 $r-z$  断面のベクトル場を観察すると、上下に 1 対渦が形成されているものであり、これは非定常解が発生する前の結果と酷似している。以上のことから、mode2 の流れに mode1 の揺らぎが重なり合っていることで非定常解が形成されていると考えられる。この結果はスペクトル・エレメント法の結果および線形安定性解析の結果と合致している。

### 3. 研究目標の達成状況

線形安定性を調べるための固有値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ともに固有値と固有ベクトルを導出し、ある程度の相関は認められたが、DMD 単体によるすべてのモードの完全な対応関係は確立できておらず、目標は未達である。

### 4. まとめと今後の課題

今後は、これまで研究手法として用いてきた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との比較を行い、現象を支配するモードを抽出する方法の確立を目指す。線形安定性解析は流体の運動方程式から解析的な手法を用いてのアプローチであり、動的モード解析はデータからのアプローチであるので、全く違う観点からの 2 つ方法を用いて新規な手法である動的モード解析の手法を確立したいと考えている。

### 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] H. Yata, K. Akinaga, V. Botton, A. Komiya, T. Adachi: Nonlinear Bifurcation and Dynamic Mode Decomposition for Taylor Vortex in Gap between Rotating Two Cylinders/Cones, *Proceedings of the Twentieth International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, (2023).
- [2] 谷田開, 秋永加奈, 足立高弘: 動的モード分解を用いたテーラー渦の不安定解析, 日本機械学会東北支部第 59 期総会・講演会, (2023)
- [3] 谷田開, 足立高弘: 回転 2 重円筒間におけるテーラー渦の非線形分岐解析と動的モード分解の関係, 日本機械学会東北支部第 59 気秋季後援会, (2023)

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J23Ly06
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Health, Welfare and Medical Care
Research period	April 2023 - March 2024
Project status	2nd year

## Monitoring Eukaryotic Cell Functions under Various Hypoxic Conditions with Microfluidic Differential Oxygenators

Jean-Paul Rieu\*†, Christophe Anjard\*, Julie Hesnard\*, Nasser Ghazi\*  
Satomi Hirose\*\*, Kenichi Funamoto\*\*\*††

\*The 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

This new project aims to develop new PDMS-based oxygenator devices for cells based on a control of oxygen ( $O_2$ ) permeation through PDMS. Cell proliferation, adhesion and migration of the amoeba *Dictyostelium* and of HL-60 cells (both are immune cell models) are investigated using these new as well as previously developed devices.

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 just be stimulated (or inhibited) by changing the overall  $O_2$  level in the microenvironment in the absence of gradient (aerokinesis). Our recent LyC project 2019-2022 (“Microfluidic Tools to Study Aerotaxis in Eukaryotic Cells”) investigated these responses with *Dictyostelium*. 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 *Dictyostelium* amoebae are responding to  $O_2$  gradients in the 0-1.5%  $O_2$  range (Cochet-Escartin, Funamoto, Rieu et al. eLife 2021).

To clarify the underlying molecular mechanisms, experimental devices need to be improved in order to perform more experimental conditions in parallel and to control separately the absolute value  $C$  of  $O_2$  concentration and the spatial gradient  $\text{grad}C$ . This is the first purpose of this project. Because, long exposure to hypoxia is probably modifying metabolism, gene expression, and in turn, proliferation, motility and cell-cell adhesion. The second purpose is to study these modifications. Finally, different cellular models have to be well explored and compared in order to better understand the mechanisms of aerotaxis.

### 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 as well aerotaxis experiments (as well as their modeling) with *Acanthamoeba castellani* (another asocial amoeba exhibiting strong aerotaxis). He presented his results to ICFD 2023.

We continued the development of new PDMS-based oxygenator devices for cells where 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. K. Funamoto visited Lyon for one month in June-July 2023 (CNRS invited researcher position) to work on that device. To validate the  $O_2$  level calibration, N. Ghazi visited Japan after ICFD 2023 with the  $O_2$  sensor of Lyon team.

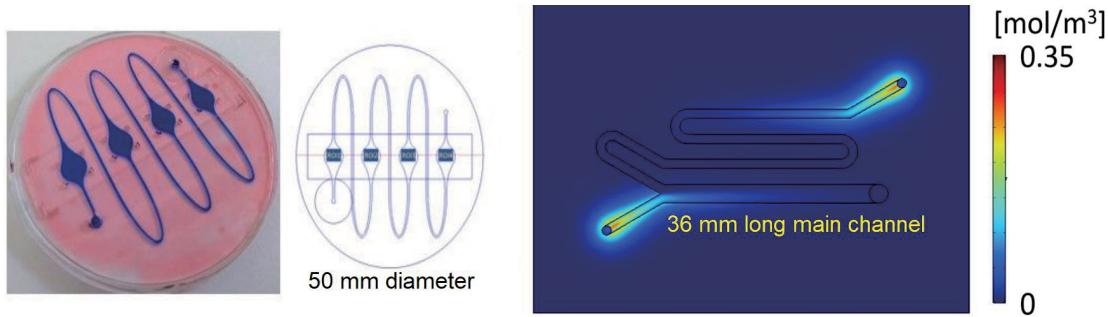


Figure 1: New PDMS-based oxygenator devices where oxygen level is controlled by gas permeation through the porous PDMS. Left: Four-chamber devices; Right: Y junction between a degassed and gasified liquid.

### 3. Achievements

The achievements by our collaborative research are summarized as follows.

- We designed and developed new PDMS-based oxygenator devices for cells where 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. An analytical formula was derived for  $C$  as a function of PDMS thickness, flow rate, channel dimensions. This formula was simulated using the multiphysics software COMSOL. A four-chamber device where  $O_2$  level is divided by two between every consecutive chamber based on this permeation principle was fabricated at IFS (Fig. 1 Left) and tested with the  $O_2$ -sensing films developed during the former project between the two laboratories (Cochet-Escartin et al. 2021). The same  $O_2$ -sensing films was used to measure the  $O_2$  level in a microfluidic platform for the reproduction of hypoxic vascular microenvironment (domestic project of K. Funamoto)
- A Y-junction device merging two fluids with different oxygenation level was as well developed (Fig. 1 Right). It generates a step gradient along the direction perpendicular to the long channel axis in order to investigate cell behaviors under steeper  $O_2$  gradients than those generated by the double-layer microfluidic device developed during former project (Cochet-Escartin et al. 2021).
- We have shown that *Dictyostelium* cells enhances their cell migration under a low  $O_2$  concentration (aerokinesis) and migrate toward an  $O_2$ -rich regions under the 0-2%  $O_2$  range (aerotaxis) and that reactive oxygen species or mitochondria are not involved in aerotaxis.
- We have shown that *Acanthamoeba castellani*, an asocial amoeba, respond to  $O_2$  gradients in 0-2%  $O_2$  range as well.

#### 4. Summaries and future plans

We plan to continue the development of the four-chamber device with controlled O<sub>2</sub> levels in each chamber. It took more time than expected to validate the simulated O<sub>2</sub> levels in the chamber because the sensing film based on the quenched fluorescence of porphyrin by O<sub>2</sub> and included on the bottom surface had a significant impact on the O<sub>2</sub> level itself. We had to reduce its thickness and improve its homogeneity to get results comparable to simulations. We need to repeat and finish the analysis of those validation experiments. We need to repeat growth experiments in the four chambers with *Dictyostelium* and cancer cells. For cancer cells, a few problems associated with the apparition of bubbles at long times have to be solved as the experiments has to be carried out at 37°C during several division times (= several days).

Aerotactic experiments with *Acanthamoeba castellani* are very promising and need to be analyzed, modeled and reported for a publication by N. Ghazi. He will defend his PhD in December 2024 in Lyon.

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] S. Hirose, J. Hesnard, N. Ghazi, D. Roussel, Y. Voituron, O. Cochet-Escartin, J.-P. Rieu, C. Anjard, K. Funamoto: The Aerotaxis of *Dictyostelium Discoideum* Is Independent of Mitochondria, Nitric Oxide and Oxidative Stress, *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 11 (2023) 1134011, doi: 10.3389/fcell.2023.1134011.
  - [2] N. Takahashi, D. Yoshino, R. Sugahara, S. Hirose, K. Sone, J.-P. Rieu, K. Funamoto: Microfluidic Platform for the Reproduction of Hypoxic Vascular Microenvironments, *Scientific Reports*, 13 (2023) 5428, doi: 10.1038/s41598-023-32334-9.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [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, *Proceedings of the 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023)*, (2023), pp. 1338-1339.
  - [4] 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 2023*, (2023).
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent)  
Not applicable
- (Award)  
Not applicable
- (Press release)  
東北大大学プレスリリース, “細胞性粘菌の走気性はミトコンドリアや酸化ストレスに依存しない 酸素を求めて動く細胞の未知の酸素応答機構の解明へ”, 2023年6月16日.

課題番号	J23Ly07
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目

## ナノドットに閉じ込められたスキルミオンのフィンスラー幾何モデルによる研究：応力下での安定性と形態変化

Finsler Geometry Modeling of Skyrmions Geometrically Confined in Nanodots: Stability and Morphology under Stresses

加藤 文武\*†, 鯉渕 弘資\*

Gildas Diguet\*\*, Benjamin Ducharne\*\*, \*\*\*, Hung T. Diep\*\*\*\*

Sahbi El Hog\*\*\*\*\*†, 内一 哲哉\*\*\*†

\*茨城工業高等専門学校, \*\*東北大, \*\*\*Lyon 大学, \*\*\*\*CY Cergy Paris 大学

\*\*\*\*\*Monastir 大学

†申請者, ††所内対応教員

### 1. 研究目的

ナノドットに閉じ込められたスキルミオンの電気的な応力制御に関する既に発表されている実験結果を再現しながら、その生成消滅の機構を Finsler 幾何(FG)に基づいたモデルを用いて解明する。FG モデルの特徴は、相互作用の異方性が動的に発生するため、異方的な相互作用定数を仮定しなくともよいことである。

### 2. 研究成果の内容

図 1(a), (b), (c) に示す 4 面体格子を用いて、応力  $f$ (図 1(d)) と外部磁場  $B$  を変化させて、FG モデルに基づいて Monte Carlo (MC) 計算により、スキルミオン(SKY) (図 1(e)) の状態を研究した。その結果、(i)  $f=0$  の条件下  $B$  を変化させた場合、ナノドットの半径  $d$  が小さくなると小さな  $B$  でも SKY が現われるという閉じ込め効果があること、(ii)  $B=0$  の条件下  $f$  を変化させた場合、標的 SKY ( $f<0$ )、ストライプ ( $f \sim 0$ )、不完全 SKY ( $f>0$ ) が現われること、が分かった。 (i) は[1]の実験結果を再現するものであり、(ii) は[1]の結

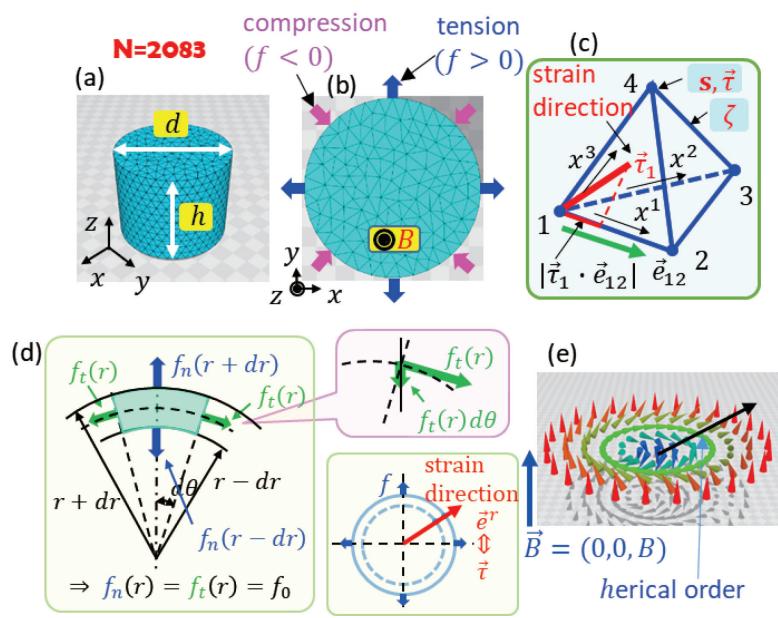


図 1 : (a)ナノドット格子, (b)動径方向の圧縮応力( $f<0$ )と引張り応力( $f>0$ ), (c)4 面体格子と力学変数:ひずみ  $\vec{r}$ , スピン  $s$ , 内部変数  $\zeta$ , (d) $f$  の大きさは  $r$  によらず一定, (e)Bloch 型 SKY

果と完全には一致しないものの対応関係が確認できる。更に、標的 SKY ( $f < 0$ )、不完全 SKY ( $f > 0$ ) は新しい結果であり、それらの生成メカニズムも明らかにした。以下にこれらの概略を示す。

なお、FG モデルでは、強磁性相互作用(FMI)、Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用(DMI)、磁気弾性結合(MEC)の相互作用定数が変数  $\tau, \zeta$  で動的に変動するようにモデル化されている。

### 3. 研究目標の達成状況

図 2 には  $f=0$  の下でのナノドットの閉じ込め効果を示す。直径  $d$  が小さいと、SKY 発生に必要な外部磁場  $B$  が小さくなることが分かる。Confined は SKY が閉じ込められた状態、nonconfined は境界上に SKY が現われている状態またはストライプ相を表わす。これらは、[1] の実験結果と首尾一貫している。

図 3 には  $B=0$  の条件で、 $f$  を変化させた場合に現れる 3 つの相: 標的 (target) SKY, stripe, 不完全 SKY (iSK) を示す。通常の SKY では、中央と境界のスピンの向きが  $\pi$  だけ異なるが、標的 SKY は図の場合  $> 2\pi$  となっているため円形ストライプが現われ、逆に iSK では  $< \pi$  と不完全になっている。これらも SKY の仲間として理論的に研究され[2]、実験的にも確認されている[3]。また、これらの相の変化; 標的、ストライプ、iSK は [1] の実験結果における Vortex, Stripe, SKY に対応するが、標的 SKY と Vortex, iSK と SKY は必ずしも対応しない。この理由としては、(i) [1] の材料は磁気異方性、即ち  $f=0, B=0$  でも面内方向に非ゼロ磁化、を持ったものであり、一方我々のモデルではこの自発的な磁気異方性を仮定していないこと、(ii) 我々のモデルの外力  $f$  のかけ方が[1] の実験方法と少し異なること、磁気弾性効果の相互作用の形による、などが考えられる。

次に、標的 SKY, iSK が現われる機構について考察する。結論から述べると、これらは(i) 外力で境界上の相互作用定数が bulk に比べてより小さくなるという (strain-enhanced) 相互作用の動的な場所依存性による閉じ込め効果、(ii) 外力によって誘起される (strain-induced) 相互作用定数の動的な方向依存性、によるものと考えられる。「誘起」というの

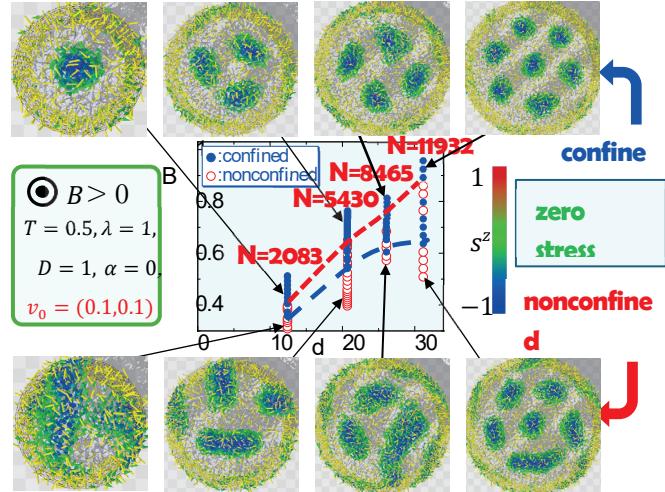


図 2 :  $f=0$  の下でのスキルミオン発生に必要な外部磁場  $B$  とナノドット直径  $d$  の関係

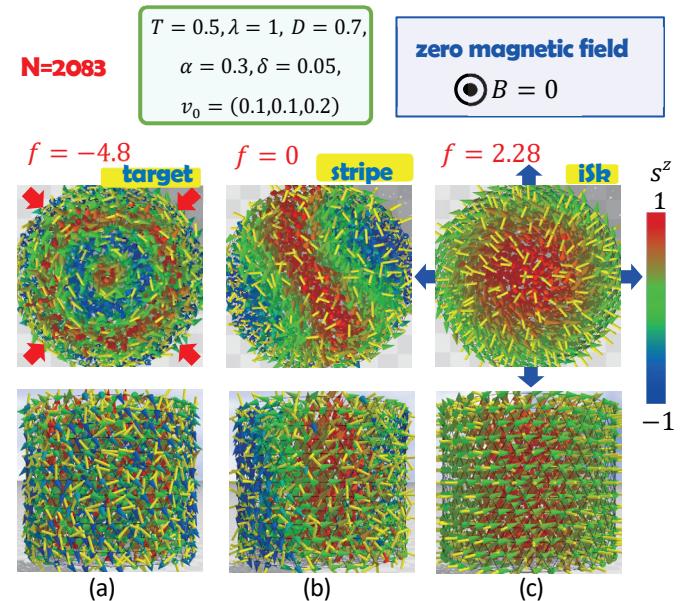


図 3 :  $B=0$  の下で  $f$  を変化させた場合に現れる (a) 標的 (target) SKY, (b) stripe, (c) 不完全 (incomplete:iSK) SKY のスナップショット

は自発的な磁気異方性を仮定していないためである。これらは FG モデリングの方法によりモデルに implement されたもので、外力によって発生するひずみとスピンの相互作用によって増大または誘起されるのである。図 4 には、FMI と DMI の動的な相互作用定数  $\Gamma$  と  $\Omega$  の場所依存性 ((a), (b)) と、方向依存の動的相互作用定数  $\Gamma^\mu$  と  $\Omega^\mu$  の方向依存性 ((c), (d)) を plot する。図 4(a) の  $\Gamma$  は DMI, FMI 共通であるが、側面(side)での値が内部(bulk)での値よりも小さいことが分かる。特に、iSK 相ではこのことが顕著である:  $\Gamma(\text{side}) \ll \Gamma(\text{bulk})$ 。この「相互作用定数が表面と内部で異なる」という事実は、連続モデルの離散化に伴い自然に表れるもので、 $f=0$  でもその違いは存在し、図 1 の閉じ込めの効果はこれによるものである。この「静的な」閉じ込め効果が動径方向の外力  $f$  によって「動的に」、 $\Gamma$  の場所依存性をとおして拡大される。MEC 相互作用の  $\Omega$  も  $\Gamma$  とほぼ同じ傾向を示す((b))。方向依存の  $\Gamma^\mu$  と  $\Omega^\mu$  に関する  $\Gamma$  と  $\Omega$  と同様の場所依存性が見られる ((c), (d))。更に、 $\Gamma^\mu$  と  $\Omega^\mu$  には、 $\Gamma^r(\text{bulk}) > \Gamma^{\theta, z}(\text{bulk})$ ,  $\Omega^r(\text{bulk}) > \Omega^{\theta, z}(\text{bulk})$  のように、動径  $r$  方向の相互作用が円周方向と  $z$  方向の相互作用よりも強くなる傾向が iSK 相において顕著になる。 $r$  方向に関して DMI が強くなるということは  $r$  方向のヘリカルオーダーがより強くねじれる ( $\Leftrightarrow$  SKY の直径が小さくなる) ことを意味するが、同時に、 $r$  方向に関して FMI と MEC も強くなるので結局、ねじれは弱められる ( $\Leftrightarrow$  の直径が大きくなる)。つまり、 $r$  方向に関して MEC が強くなることでヘリカルオーダーのねじれが弱くなった状態で、もともとの FMI と DMI の競合が釣り合う。これが、「外力によって誘起される(strain-induced)相互作用定数の動的な場所・方向依存性」の意味であり、これによって、iSK が発生して安定に存在する。なお、 $\Gamma^{\theta, z}(\text{bulk})$  と  $\Omega^{\theta, z}(\text{bulk})$  は iSK 相での値が、 $f < 0$  におけるストライプ相と target SKY 相での値よりも大きい。このことは、iSK 相では  $z$  方向と  $\theta$  方向のスピン相関(強磁性相互作用を含む)が  $r$  方向よりも強くなることを意味する。実際、iSK 相において磁化  $M^z$  の秩序変数が  $f$  とともに大きくなることが確認される。iSK のスピン状態から予想されることではあるが、 $\theta$  方向のスピン相関は、秩序変数  $M^{xy}$  には  $\pm s_i^x$ ,  $\pm s_i^y$  のそれぞれが cancel してしまうので検出されないが、非極性の  $\theta$  方向秩序変数では  $\theta$  方向の強いスピン相関が検出される。詳しくは論文(研究成果[1])に記載する。

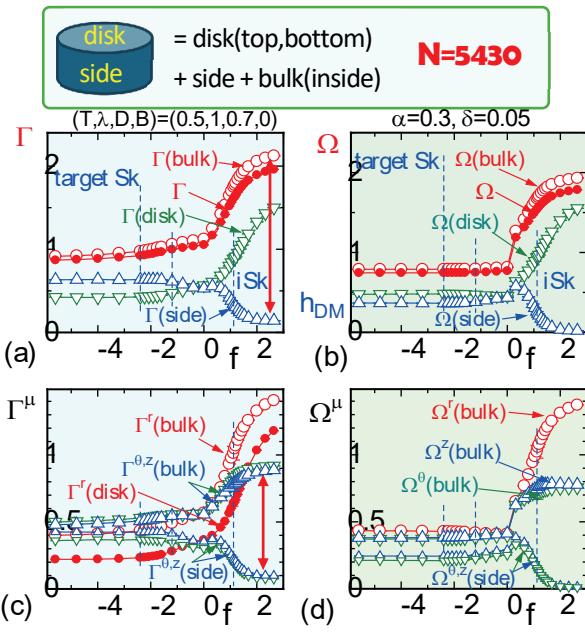


図 4: (a), (b) FMI と DMI の動的な相互作用定数  $\Gamma$  と  $\Omega$ , (c), (d) それらの方向依存の動的相互作用定数  $\Gamma^\mu$  と  $\Omega^\mu$

存性」の意味であり、これによって、iSK が発生して安定に存在する。なお、 $\Gamma^{\theta, z}(\text{bulk})$  と  $\Omega^{\theta, z}(\text{bulk})$  は iSK 相での値が、 $f < 0$  におけるストライプ相と target SKY 相での値よりも大きい。このことは、iSK 相では  $z$  方向と  $\theta$  方向のスピン相関(強磁性相互作用を含む)が  $r$  方向よりも強くなることを意味する。実際、iSK 相において磁化  $M^z$  の秩序変数が  $f$  とともに大きくなることが確認される。iSK のスピン状態から予想されることではあるが、 $\theta$  方向のスpin相関は、秩序変数  $M^{xy}$  には  $\pm s_i^x$ ,  $\pm s_i^y$  のそれぞれが cancel してしまうので検出されないが、非極性の  $\theta$  方向秩序変数では  $\theta$  方向の強いスpin相関が検出される。詳しくは論文(研究成果[1])に記載する。

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、[1]の実験結果を参考にナノドットに動径方向の外力  $f$  をかけた場合のスキルミオンの閉じ込めとその形態変化を Finsler 幾何モデルによって Monte Carlo 計算により研究した。その結果、ゼロ外部磁場( $B=0$ )で、 $f$  が圧縮( $f < 0$ )の場合は標的スキルミオン(target SKY), 引張り( $f > 0$ )の場合は不完全スキルミオン(iSK)が出現することが分かった。これらの現象を引き起こすメカニズムとしては、(i)ひずみによって誘起された相互作用の場所依存性によって強化された閉じ込め効果、(ii)ひずみによって誘起された相互作用の方向依存性、が考えられる。

スキルミオンは2次元単位球面上のスピン配置が平面 $R^2$ 上に投影された topological に安定な配置であるが、これとは別に、3次元単位球面上のスピン配置が3次元空間 $R^3$ に投影された topological に安定な Hopfion が知られており、将来の応用に向けて、最近研究が活発になってきた。Hopfion においても応力や閉じ込め効果による安定化が期待されるが、現在のところ、これらはまだよく分かっていないため、今後の研究課題としたい。

#### 参考文献

- [1] Y. Wang, et al., *Nature Comm.* 11, 3577 (2020), <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17354-7>.
- [2] A. O. Leonov, et al., *EPJ Web of Conferences*, 75, 05002 (2014), <https://doi.org/10.1051/epjconf/20147505002>.
- [3] N. Kent, et al., *Appl. Phys. Lett.* 115, 112404 (2019), <https://doi.org/10.1063/1.5099991>.

#### 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] G. Diguet, B. Ducharne, S. El Hog, F. Kato, H. Koibuchi, T. Uchimoto and H. T. Diep, Monte Carlo Studies on Geometrically Confined Skyrmions in Nanodots: Stability and Morphology under Radial Stresses, *Computational Materials Science*, 243, 113137 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2024.113137>

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] F. Kato, H. Koibuchi, G. Diguet, B. Ducharne, H. T. Diep, S. El Hog, T. Uchimoto, Finsler Geometry Modeling and Monte Carlo Study on Geometrically Confined skyrmions in Nanodots, *Proceedings of Fluid Science Conference 2023 Sendai*, (2023).
- [3] G. Diguet, B. Ducharne, S. El Hog, F. Kato, H. Koibuchi, T. Uchimoto and H. T. Diep, Monte Carlo Studies on Geometrically Confined Skyrmions in Nanodots, *ELyT Workshop 2024, Tukioka Hotel, Kaminoyama*, March 12, (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	J23Ly08
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Numerical Study on Electrical Drift and Diffusion of Ions in Polymer Strips

Joël Courbon\*†, Hidemasa Takana\*\*††

\*INSA Lyon

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

When submitted to a high electric field  $E$ , a neutral polymer strip containing anions and cations bends in a few minutes, then reverts to its original zero curvature in a few hours. This behavior is reversible. It was studied experimentally in the 2000s notably by Pr. Hirai (Shinshu Univ.). In order to try and manufacture electro-mechanical sensors INSA launched an interdisciplinary research project (called Tempura, led by Dr. Coativy) working first on polyurethane dipped in salt water, then manufacturing polymer materials filled with ionic liquid for a better control of the ion concentration. A first crude particle model running on Comsol, based on large differences in anion and cation mobility, provide that it was not necessary to add charge injection to account for the behavior. Yet the ions drift model was crude and lacked the role of diffusion.

Pr. Takana then proposed us to use his own drift diffusion model developed in his lab at IFS (H. Mikami Master Thesis, 2016) in order to improve the modelling. I visited his lab on sabbatical leave from INSA and we were glad to obtain the funding of the current project. The goals were : 1/ to adapt electric double layer (EDL) code developed at IFS to higher voltage, slower kinetics and possibly lower ion concentrations. 2/ Match quantitatively the kinetics of quick anion and slow cation through the polymer strip thickness (about 100  $\mu\text{m}$ ) under DC voltage below 1000 V. 3/ Interface with mechanical model of bending developed at INSA.

### 2. Details of program implement

The applicant stayed at Pr. Takana's lab at IFS April-July 2023, working on the Fortran code EDL. Since our polymer strip was thicker than the capacitor, a 5000-point mesh with high point resolution close to the electrodes had to be generated using IFS supercalculator, after unsuccessful trials to design the finite difference mesh manually. As a matter of fact, plenty of nodes are needed close to the interface, where the field and concentration gradients are large, and almost none in the center of the strip that remains neutral ; in between, a smooth transition is critical.

It worked well : the code proved robust and capable to simulate the ions segregation leading to bending. It was used as a very valuable input for the mechanical bending code running with Comsol at INSA and the preliminary results [1] showed a better fit of the experimental kinetics than using the previous model.

*Our 1D model meets a physical limit at the electrode / polymer interface since there is no electrochemical reaction at the electrodes : the electrons inside the gold plating and the ions on the polymer side remain separated by an unknown distance  $d$  and the electric field  $E$  between them surely is extremely high. However, at that scale, the gold / polymer interface is not flat, meaning that our 1D  $E(x)$  approach does not capture the local field  $E(x,y,z)$  but brings an average in the width  $y$  and length  $z$  directions, mixing*

ionic and electronic charges, thereby softening the discontinuity. The same holds true for the ionic concentrations close to the interface. Our model sets a maximum value  $C_{max}$  that is also an average over the whole strip surface, certainly much lower than local values.

However, a bug was discovered in the mechanical model run at INSA, leading to exaggerated bending amplitude. Therefore, new simulations at much lower ion concentrations were started when I turned back to INSA, on the EDL code now running on the computer stations of IFS Lyon center. While they brought the right order of magnitude for bending, the current density was way too low when compared with experiment. The dilemma was presented as a work in progress at the 20th ICFD conference [2].

*Nevertheless, we obtained working conditions for very high bending amplitudes on low elastic modulus polyurethane, which gives the idea to test experimentally them on much stiffer materials, which could then reach reasonable bending.*

Furthermore, the use of very low initial concentrations enabled to detect a problem with the boundary conditions that were used : they did not respect ion conservation, thereby inducing a higher flow of ions towards the electrodes. The recent correction (February) of the boundary conditions now enables ion accumulation ahead of the electrodes, thereby building a counter electric field that brings the current density to decrease much more than previously [3].

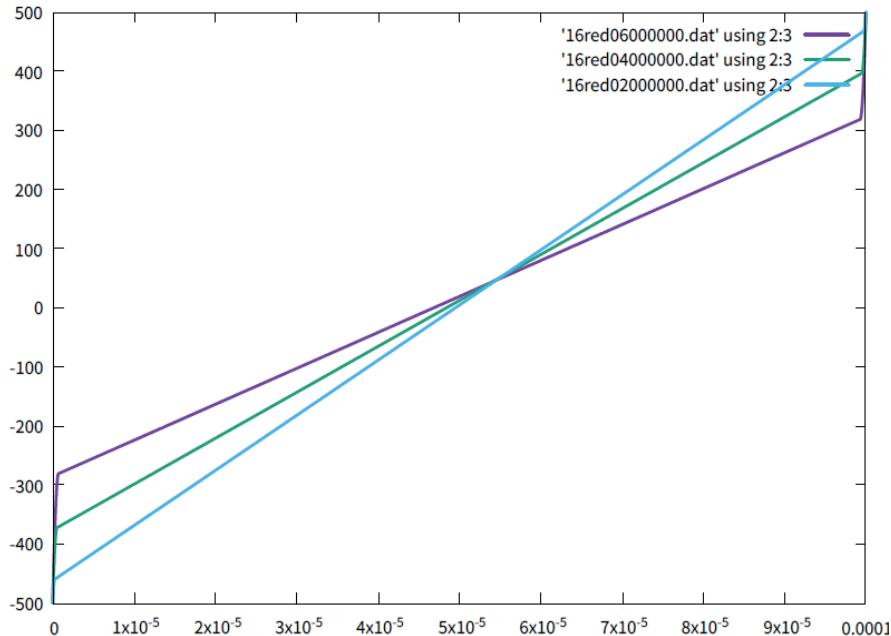


Figure 1: typical electric potential (vertical axis, unit Volt) profiles vs position in strip (horizontal axis, unit meter) at various times after application of the voltage (blue line 200 s, green line 400 s, purple line 600 s). The accumulation of ions in front of both electrodes reduces the electric field in the neutral bulk (linear profile, constant electric field). The figures are asymmetric left-right due to the anion / cation mobility difference.

For longer times (especially for low  $C_{max}$ , the charged zones can become wider, up to a few micrometers), and of course the electric field in the bulk much lower.

### 3. Achievements

The EDL code adaptation now runs well under monotonic conditions and captures the same features as the Comsol model run at INSA. Surprisingly, the effect of the maximum concentration  $C_{\max}$  on the bending amplitude is low. But this may change when testing voltage drops or voltage reversals, since a thick saturated layer (low  $C_{\max}$ , wide charged zone ahead of electrode) is expected to react slower to a voltage drop than a thin layer (high  $C_{\max}$ , narrow charged zone ahead of electrode). Comparison with experiment may help discriminate among the currently rather wide choice of  $C_{\max}$  values. The potential field of applications is large, since experiments made on tailored polymers filled with ionic liquids at INSA (Tempura project) will provide a huge experimental database for model applications.

On the other hand, the application form referred to a tentative application to the modeling of the sintering process of ionic ceramic powders. It will not take place, since a colleague at INSA already started the job.

### 4. Summaries and future plans

(as stated on 2nd year submission file)

Write and submit a paper on the new modelling approach 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).

Apply EDL code to voltage drop and voltage reversal cases, then try and grasp the behavior of the tailored polymers filled with ionic liquids.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable (the goal is to write a paper in Spring 2024 as explained above)
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [1] J. Courbon, H. Takana : Numerical Study on Electrical Drift and Diffusion of Ions in Polymer Strips, *Japanese Society of Electric Engineers regional meeting*, Morioka, July 27 (2023).
  - [2] J. Courbon, H. Takana, J.-Y. Cavaillé, G. Coativy, G. Diguet, Numerical Study on Electrical Drift and Diffusion of Ions in Polymer Strips, *20th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), pp. 1318-1319.
  - [3] H. Takana, J.-Y. Cavaillé, Toward understanding of bending behavior of electro-responsive polymer, *ELyT workshop*, Kaminoyama (2024).
- 3) Patent, Award, press release etc.  
Not applicable

Project code	J23Ly09
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st 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 mass transport free diffusion field. 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 experiment 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

Since this is the first year of the project, an overview of the study is given here and the status of its preparation is reported. The final objective of this study is to produce low-mosaicity crystals by making the uniform concentration field around the seed crystal during crystal growth process. The conceptual schematic is shown in Fig.1. The Japanese side will provide the optical devices for observing the concentration field in tiny area in the vicinity of seed crystal surface, and the French side will provide a micro-sized ultrasonic inducer to conduct the observation experiment described in the purpose of the project. The principal investigator has regularly collaborated with the French team to discuss the possibility of enhancing and controlling mass transfer using the ultrasound-induced flow on the free diffusion field. To demonstrate this experimentally, we fabricated and implemented a specific experimental apparatus and performed the experiment. Also we studied cell design through numerical simulation in this year. In the visualization

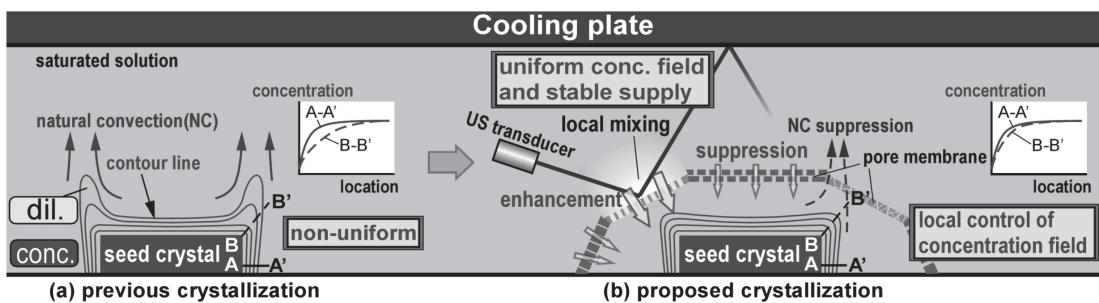


Figure 1 : Concept of this project

experiment, several kinds of proteins were used as samples, and it was experimentally clarified how much difference in mass flux is caused by different conditions in the bulk region for proteins permeating a macro-pore membrane with a specific function as shown in Fig. 2. As clearly the figure shows, the amount of permeated protein molecules vary greatly depending on the diameter and pore arrangement of the membrane, and the time-dependent reduction of mass flux was also observed. On the other hand, based on the relationship between the specifications of the macro-pore membrane and the mass flux obtained from the experiments, the location of the ultrasound-induced local flow was also investigated.

### 3. Achievements

At current status, the achievement level of this year could be evaluated at 90%. We have two general presentations in international conferences. As mentioned above, we are ready to start the visualization experiment of protein mass diffusion applying small ultrasound-induced flow. Now, one PhD student is staying in INSA Lyon for 1 year as double-degree student. The student will perform the experiment 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 revealed that the micropore patterning affects hindered diffusion process even for a constant aperture ratio. This effect might be discussed under the consideration of wall effect of pore membrane and the interference of concentration fields between neighboring micro pores. As future work, the authors will apply the ultrasound induced flow, namely acoustic streaming, and control the local concentration profile in the vicinity of membrane. By changing the concentration condition, the authors will measure the penetrated mass flux and evaluate the hindered diffusion.

### 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] V. Botton, N.E. Ghani, S. Miralles, D. Henry, H.B. Hadid, B. Ter-Ovanessian, S. Marcellin: Flows driven by ultrasounds in liquids in a wall mass transfer enhancement perspective, *Proceedings of the 33rd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-33)*, Kumamoto, (2023), 51.
  - [2] A. Komiya, V. Botton, S. Miralles and R. Zhu: Mass transfer enhancement and control by using ultrasound induced flow, *Proceedings of 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023)*, Sendai, (2023), pp.1316-1317. OS23-4.
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent) (Award) (Press release) Not applicable

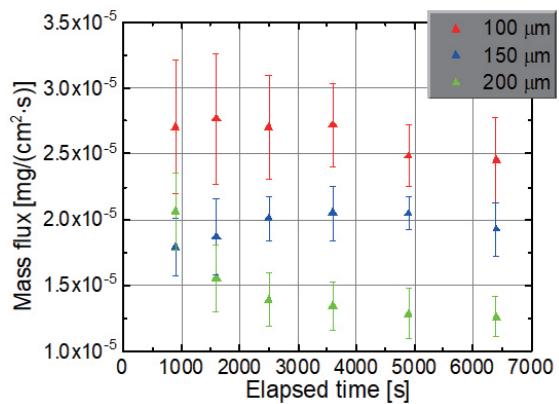


Figure 2 : Time variations of mass flux at 0.5mm above the membrane surface

課題番号	J23Ly10
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	2023.4~2024.3
継続年数	2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に大いに貢献すると考えられているものの改質が必要とされる二次エネルギーであり、かつ常圧でのエネルギー密度は従来の化石燃料に比べて非常に小さいため、高密度水素として貯蔵輸送を行う必要がある。また、高圧に充填された水素を安全に運用するためには、水素の引火限界濃度や安全性を十分考慮した水素ステーション設計、ならびに水素脆化や繰り返し応力の発生に基づく材料劣化の影響を考慮した高圧水素タンクの設計が必須となる。そこで本研究では、高圧水素容器が破壊されたときにつれて発生する水素ガスの漏えい現象を研究対象とし、材料の構造解析と流体解析を同時に扱う連成解析手法の開発を目的とする。また、高圧容器の隔壁のき裂破壊時に発生する水素の漏えい拡散現象を連成解析する計算手法を開発することにより、安全性の高い水素設備の設計に貢献することを目的とする。

### 2. 研究成果の内容

本研究では、き裂伝播に伴う水素漏えい現象を二つのステップに分けて解析を行う。高圧容器にき裂が発生・伝播するまでの材料側の解析と、き裂伝播後の隔壁から高圧水素が漏えいする流体側の解析の2ステップである。本年度においては粒子法により得られたき裂形状データを基に混相流体解析を実施した。図1に漏えい水素のき裂伝ばと流速分布の時間変化を示す。開放隔壁に関して、漏えい開始時はき裂形状に沿った形で水素が直進的に外部に漏れ出しが、時間経過とともに水素は主流に対し垂直軸方向に拡散している様子が見られる。これは、水素の高い拡散性と、高圧容器から常圧の大気に放出された水素が急速膨張しているためであると考えられる。

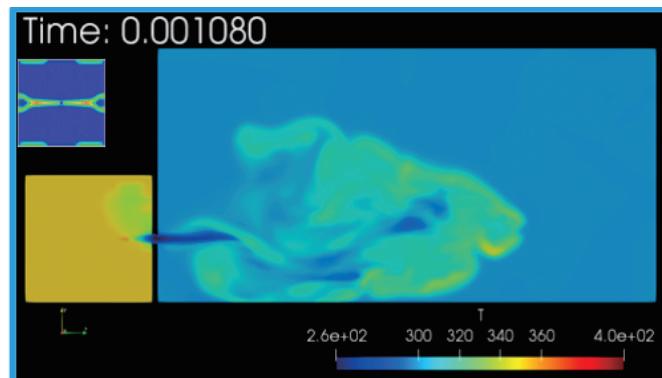


図1 高圧容器のき裂伝ばを伴う漏えい水素の温度分布に関する時間発展計算結果

### 3. 研究目標の達成状況

達成度は70%である。高圧水素タンクのき裂伝播現象を解析する上で必要となる連続体力学理論、線形破壊力学理論の基礎、粒子法の一種である Peridynamics モデルによる材料き裂伝ば解析を実施した。また、3分間高速充填連成解析システムの開発を行い、70MPa 高圧水素高速水素漏えい現象に関する流体-材料連成コンピューティングにより漏洩水素の濃度予測が可能となった。

### 4. まとめと今後の課題

本年度の研究では、Peridynamics model による材料のき裂伝ば現象に関する数値解析手法を構築できた。今後は、高圧水素タンクの漏えい現象を解析する上で必要となる Euler FSI 連成解析モデルの構築を行い、き裂伝ばに伴う水素漏えいに関するシミュレーションを実施する。また、水素以外の水蒸気の拡散挙動との比較検討を実施し、拡散挙動の相違に関して検討を加える必要があることが判明し、今後の課題となった。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[1] Otsuki, H., Ishimoto, J., Ogasawara, N. *et al.* Computational prediction of surface-tension flow mechanism of molten filler in a V-shaped groove geometry in the brazing process of a heat exchanger. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128, 4819–4842 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12222-2>

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] J. Ishimoto and T. Elguedj, Coupled Computing of Fluid-Structure Interaction Problems for Multiphase Energy Systems, *OS23: AFI-2023 IFS Lyon Center Collaborative Research Forum, The 19<sup>th</sup> International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023)*, Nov. 8<sup>th</sup>, 2023, Sendai, Japan.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

日本鋳造工学会 令和5年度 論文賞、混相流解析によるアルミニウム合金ダイカスト溶湯の微視的型内流れの可視化及び定量化、小屋 栄太郎（本田技研工業）・中川昌彦・北川真也・石本淳（東北大学）・仲野 是克・落合 直哉、2023年5月20日、近畿大学東大阪キャンパス。

Project code	J23Ly11
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2023 - March 2024
Project status	3rd year

## Multiscale Simulation of Carbon Electromigration in Iron

Takashi Tokumasu\*†, Patrice Chantrenne\*\*††

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Université de Lyon, France

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

In recent years, the sintering method or the thermal treatment method using electricity (thanks to renewable energy) have become attractive because they are able to perform their process without producing greenhouse gases. For example, spark plasma sintering, induction heating, etc. have been proposed so far. In these methods, it is shown that the process time might be shorter than the traditional method (radiant heat or convection). Thanks to direct Joule effect heating, the heating rate might be higher than 100 °C/s., which is 5 times faster than direct flame heating and 50 times faster than radiation heating. So heating processes using direct Joule heating not only save greenhouse gas but also increase the productivity and the energy efficiency. However, during these processes, not only thermal diffusion but also electromigration occurs. This latter phenomenon has a significant influence on the microstructural change during the thermal treatment. In particular, this is the case for steels in which C is submitted to electromigration. The final goal of this research project is to elucidate the relationship between carbon diffusion under electric field and microstructure in Fe-C alloy. As a starting point, the motion of C in iron under an electric field has been investigated in a perfect crystal grain.

### 2. Details of program implement

In this study, the carbon diffusion under electric field in Fe-C alloy was analyzed to obtain the fundamental knowledge necessary for the simulation of spark plasma sintering or induction heating. The phenomenon was simulated by the molecular dynamics (MD) simulation. In previous work, only one carbon atom was placed in a perfect iron crystal. However, the statistical accuracy of the simulation for one carbon atom is not good enough. So the drift velocity and diffusion coefficient were determined with 64 carbon atoms were placed in the iron crystal. The analytic bond-order(ABO) potential<sup>[1]</sup> and the Lennard-Jones potential were induced to described the atomic interactions. In addition, the parameters of the ABO potential are changed to introduce the multiple carbon atoms. In order to validate the interatomic potentials used, the energy barrier for carbon diffusion was calculated. After validation, the drift velocity of carbon under the electric field was analyzed. These calculations were performed using LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator).

### 3. Achievements

The energy barrier for C diffusion was calculated from the diffusion coefficient of carbon and compared with the DFT results. The Arrhenius plot is shown in the Fig. 1. The energy barrier was extracted from the exponent part in the exponential approximation of the Arrhenius plot. The temperature level was set from 800 K ~ 1100

K. Our result(0.288 eV) is lower than the DFT result(0.86 eV)<sup>[2]</sup>, i.e. the interatomic potential which is used leads to an overestimation of the diffusivity of carbon. From this result, there is a possibility that the computational system does not correctly reproduce the minimum energy path.

The drift velocity due to electromigration was calculated and compared to the Nernst-Einstein relation. The Nernst-Einstein relation is expressed by the following equation <sup>[3]</sup>,  $v = \frac{FD}{k_B T}$ . Where  $v$  is the drift velocity,  $D$  is the diffusion coefficient,  $F$  is the force acting,  $k$  is Boltzmann's constant, and  $T$  is the temperature. The electric field intensity was set at 0.0015 V/ Å ~0.009V/ Å and applied to the x-axis only. The temperature was set at 1100 K. The total simulation time was 10 ns. Two iron atoms were fixed so that the drift velocity of the entire computational system did not occur during the simulations. The carbon atoms were considered within a NVE ensemble. In contrast, the Fe atoms were considered within a NVT ensemble to avoid the temperature increase of the system. The relationship between the MD simulation and the Nernst-Einstein relation is shown in the Fig. 2. From the result, it was found that the slope of the drift velocity increases from the Nernst-Einstein relation, i.e., there is a possibility that the diffusion coefficient of carbon has changed. There is a possibility that the carbon accelerated by the electric field changes the iron structure. It is necessary to analyze the iron structure surrounding the carbon

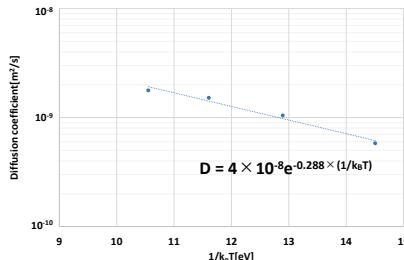


Fig 1. Arrhenius plot

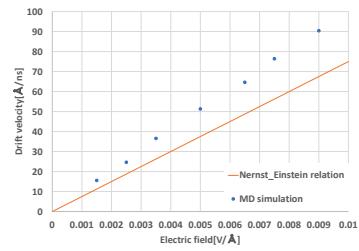


Fig 2. Drift velocity

#### 4. Summaries and future plans

First, the 64 carbon atoms were introduced into the computational system to improve the statistical accuracy. The diffusivity was calculated to obtain the energy barriers. The results showed that the energy barrier was underestimated. It is necessary to validate the diffusion path of carbon. Second, the drift velocity due to electromigration was calculated. From the result, there is a possibility that the diffusivity of carbon has changed. The RDF calculation will be done to analyze the iron crystal structure.

- [1] T. Q. Nguyen, K. Sato, Y. Shibusaki, Computational Materials Science, vol. 150, pp. 510-516, 2018.
- [2] D. E. Jiang and E. A. Carter, Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys., vol. 67, no. 21, pp. 1–11, 2003.
- [3] M. Koiwa, H. Nakajima, Materials Science Series Diffusion in Materials Random Walks on a Lattice, 2009(in Japanese).

#### 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, Takuya Mabuchi, Patrice Chantrenne, Takashi Tokumasu: Molecular analysis for electromigration of carbon atoms in steel, *60<sup>th</sup> National Heat Transfer Symposium of Japan 2023*, Fukuoka, (2023).
  - [2] Ryuta Onozuka, Takuya Mabuchi, Patrice Chantrenne, Takashi Tokumasu: Atomic Scale Investigation of the Electric Field Dependence of Carbon Diffusion in Fe, *Proc. 20<sup>th</sup> ICFD*, (2023), pp. 1344-1345.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

Project code	J23Ly12
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Nano-micro
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Recipe of Polymer Coating by Cold Spray

Bernard Chrystelle\*, \*\*†, Takana Hidemasa\*\*\*††

Lame Olivier\*\*\*\*, Ogawa Kazuhiro\*\*, \*\*\*\*\*, Cavaillé Jean-Yves\*\*

\*Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science, Tohoku University

\*\*ELyTMaX IRL3757, CNRS, Univ Lyon, INSA Lyon, Centrale Lyon, Université

Claude Bernard Lyon 1, Tohoku University, Tohoku University

\*\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\*\*MATEIS, INSA de Lyon

\*\*\*\*\*Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

How to obtain a polymer coating by cold spray? Since the emergence of polymer coating by cold spray, significant improvements have been made regarding the increase of the deposition efficiency or the improvement of the interfacial adhesion strength. However, these successes were achieved using “try and fail” experiments, and little is known about the deposition mechanisms or the state in which the polymer particle should be before spraying and/or impacting the substrate. This research aims to investigate the evolution of the microstructural state of perfluoroalkoxy alkane (PFA) during cold spray. This investigation led to assumptions that will be used to design new spray conditions for successfully achieving polymer coatings.

### 2. Details of program implement

Perfluoroalkoxy alkane (PFA) is a semi-crystalline with excellent spray capabilities when used as feedstock in the cold spray process. Its glass transition temperature is around 353 K, and its melting temperature reaches 578 K. Thus, the polymer is in a glassy state at room temperature. Adding nano-alumina particles to the polymer feedstock or texturing the substrate surface to induce roughness leads to a considerable increase in the powder deposition efficiency from a few percent to nearly 90%. While the surface texturing induced mechanical interlocking with the substrate surface (see Figure 1), adding nano-alumina particles favorized particle interactions. High coating quality is, however, difficult to reproduce for other polymers even though the same spray procedure is used. Thus, two important questions arise: (i) Why is the process working so well for PFA? and (ii) What polymer’s physico-chemical parameters could influence the deposition?

Based on different cold spray studies on various polymers, it has been observed that polymers with a glass transition temperature well above room temperature and rather long macromolecular chains are more likely to provide coating when used by the cold spray process. The glassy state of the particle feedstock will more likely decrease the amount of viscoelastic energy during the polymer deformation. In addition, the long macromolecular chains help delay the effect of the temperature on the mechanical behavior and melting of the powder.

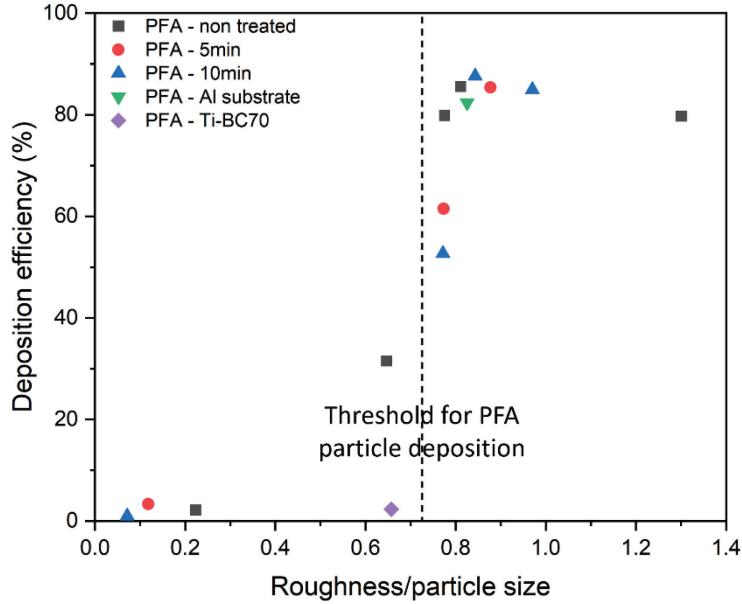


Figure 1: Evolution of the deposition efficiency of PFA on a metallic substrate as a function of the ratio roughness/particle size.

Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were carried out using ANSYS/FLUENT 19.0. The setup was designed according to the experiments performed by Sulen et al. (2022) to investigate the particle thermomechanical behavior. Results have been obtained under the spray conditions (0.5 MPa, 773 K) (see Figure 2). It appears that the polymer particles reach their melting temperature during the flight. A remaining question is: Can this temperature increase influence the particle microstructure, considering that the particle flight time is 0.4 ms?

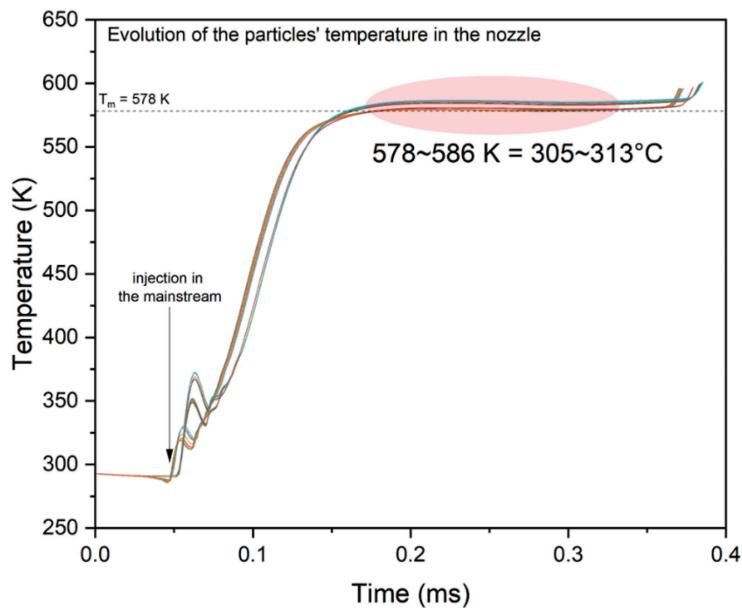


Figure 2: Evolution of the PFA particle temperature during its flight under the spray conditions (0.5 MPa, 773 K).

Raman spectra measurements performed on the coating and powder at different temperatures show the apparition of several additional peaks when the powder is above its glass transition temperature (see Figure 3). However, these peaks are absent in the

Raman spectra of the coating. Thus, it can be assumed that even though the particle temperature increases during its flight in the cold spray nozzle, the flight time is too short to induce any microstructure modification (under the assumption of high molecular weight). Thus, it can be assumed that the particles are in an intermediate state between glassy and rubbery, where the viscoelastic energy of the material is minimal. Thus, upon impact, the particles can deform and remain on the substrate instead of rebounding.

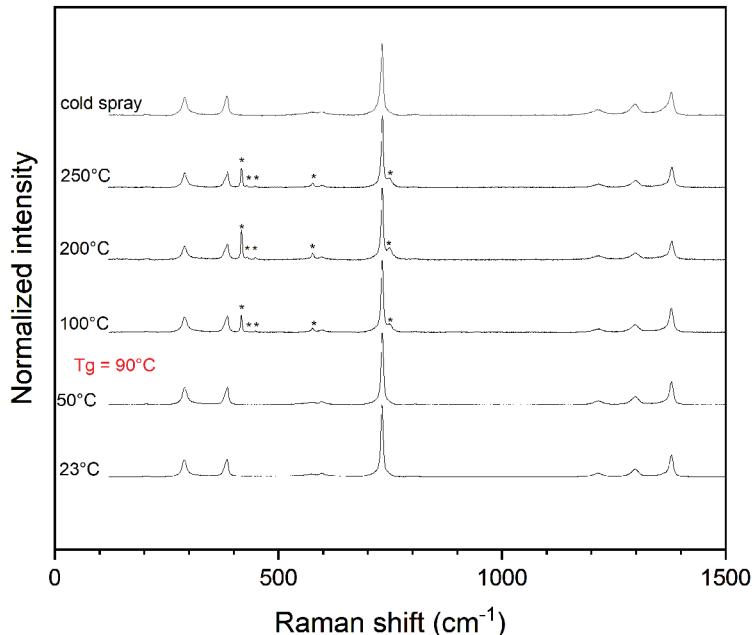


Figure 3: Raman spectra for the PFA powder at different temperatures and a cold spray specimen obtained under the spray conditions (0.5 MPa, 773 K).

According to these results, extrapolation regarding the sprayability of other polymers can be done assuming that the powder needs to be in a glassy when in the feedstock (temperature of the feedstock powder below the  $T_g$  of the polymer) and reach its melting point at the impact.

One interesting polymer for cold spray applications is Ultra-High Molecular Weight PolyEthylene (UHMWPE), which exhibits remarkable properties in terms of wear, corrosion, and impact resistance. However, it is difficult to process it mainly due to its very long macromolecular chains and glass transition temperature well below room temperature (163 K). In addition, its melting temperature is around 403 K. Cold spray experiments performed by Ravi et al. (2015, 2016, 2018) successfully manufactured a UHMWPE coating on a metallic substrate using a 240 mm-long nozzle, however with an extremely low deposition efficiency (<1%).

Based on the previous assumptions, we design a new system to allow spraying UHMWPE particles under the two conditions: (i) in the feedstock, the particles are in their glassy state (temperature below 163 K), and (ii) at impact, the particles reach its melting point. Thus, nitrogen gas is used to cool the feedstock particles and accelerate the particles in the particle inlet, while air is used as the mainstream gas. For the particle temperature to pass from 163 K to 403 K, two solutions are foreseen: (i) increasing the nozzle length, however, a 1 m-long nozzle is unrealistic, or (ii) decreasing the particle size. Based on the CFD simulations and according to the assumptions, the optimal particle size for UHMWPE particles should be around 25  $\mu$ m instead of the 45-63  $\mu$ m currently used (see Figure 4).

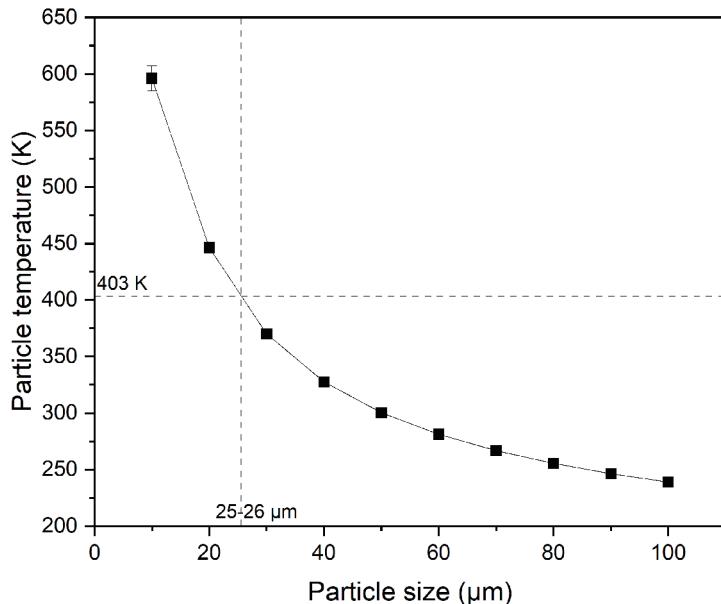


Figure 4: Evolution of the UHMWPE particle temperature as a function of the particle size under the spray conditions (0.4 MPa, 773 K) using a 240 mm long nozzle and nitrogen gas in the particle inlet.

### 3. Achievements

According to this research, several parameters have been identified as primordial for manufacturing polymer coating by cold spray process:

- **Substrate Roughness** (should be in agreement with the particle size)
- **Feedstock powder below its glass transition temperature** (glassy polymer)
- **Melting temperature of the particle before impact**
- **Increase of the interfacial strength due to the addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$**

### 4. Summaries and future plans

Identification of the evolution of the microstructure of PFA powder during the cold spray process has been carried out, and assumptions have been drawn according to these findings. Based on the results, it has been established that the substrate roughness and addition of nano-alumina particles play an important role in the coating formation and adhesion. However, they are not the only parameters to account for. It appears that the thermal state of the powder in the feedstock and at the impact also plays an important role in the coating formation by minimizing the viscoelastic energy of the powder and maximizing the plastic deformation of the powder. Thus, it should appear that in the feedstock, the polymer particles should be in their glass state ( $T < T_g$ ) and reach their melting point (without melting) just before the impact.

According to these results, we designed a new model for spraying UHMWPE whose glass transition temperature is well below room temperature. Numerical results appear promising and must be compared with experimental results to validate the assumptions.

### 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] C.A. Bernard, H. Takana, O. Lame, K. Ogawa, Which mechanisms govern polymer

deposition by cold spray process?, *International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (November 2023)

[2] C.A. Bernard, H. Takana, O. Lame, K. Ogawa, Quels mécanismes gouvernent la déposition de poudre polymère au cours du procédé cold spray ?, *Seminar INSA de Lyon*, Lyon, (December 2023)

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

Project code	J23Ly13
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year

## Epoxy Polymer For Ammonia Storage Solution

Nicolas Mary\*†, Tetsuya Uchimoto\*\*††, Sébastien Livi\*\*\*, Manuel Kuhn\*\*\*\*

\*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

Hydrogen society is worldwide applicable to the fact that this energy concept is based on a universal source of energy. In European countries, hydrogen as an energy vector is designed at the gaseous or the hydride state. In other countries (such as Japan), the ammonia is considered as a potential reservoir of hydrogen. Ammonia has the advantage of a high hydrogen density, well-developed technology for synthesis, distribution, and easy catalytic decomposition. Ammonia can be stored in different physical states: liquid, gaseous, and solid state. Note that the energy cost to produce solid-state ammonia counterbalances the product's advantages, reducing its interest today. The liquid ammonia is obtained either at high pressure or by solubilization in water (aqueous ammonia). The latter is one of the easiest storage conditions (lower energetic cost, safety, etc.), but it has some limits. The higher the temperature, the lower the ammonia solubility will be [1]. Also, aqueous ammonia cannot be used at the end: gaseous ammonia is required as fuel in electricity power plants or engines for instance.

The benefits of greater versatility of ammonia in the energy chain get slightly blurred as ammonia is incompatible with some metals. Valera et al. [2] proposed a metal classification based on chemical compatibility. On the one hand, they report high compatibility with aluminum or cast iron. On the other hand, poor compatibility for copper and its alloys is displayed. Note that this compatibility chart does not consider the infrastructure design: weld cast iron becomes sensitive to ammonia stress corrosion cracking for instance [3]. One protective solution is to apply a polymer coating on metal. As for metals, not all polymers are compatible with ammonia. Valera et al. [2] report higher ammonia compatibility with epoxy than polyurethane for instance. If abundant literature exists on epoxy-coated metals performances [4], results come mostly from atmospheric or marine test conditions which are far from ammonia environments [5]. On the other hand, the current commercial epoxy resins are made with bisphenol-A prepolymer (BADGE) and an amine as a curing agent, which fall under the REACH regulation. Beyond the case studied, new epoxy chemistries are required.

IMP research group reported recently new alternatives to conventional amine hardeners based on ionic liquids (ILs), such as phosphonium ILs. IMP lab have demonstrated that ILs combined with basic counter anions such as dicyanamide, phosphinate, or phosphate anions offer the opportunity to design reactive systems having a tunable reactivity. Such a route leads to new epoxy-IL networks displaying excellent thermomechanical properties, including a high thermal stability under nitrogen (> 400-450 °C), and a glass transition temperature from 80 and 170°C which can be tuned from the chemical nature of the anions [6].

This project aims to discuss the durability of either diamine or ionic liquid epoxy resin in an ammonia environment. Polymer coupons were produced and immersed in ammonia aqueous solution at 25 wt.%. The mass variation of the coupons was calculated after 1176 hours of exposition. A previous work (PhD L. Ollivier Lamarque) demonstrated that these polymers are also sensitive to water uptake. Therefore, immersions were also carried out in distilled water for comparison purposes.

## 2. Details of program implement

Polymer coupons were developed using a prepolymer (BADGE). Two ionic liquids, IL105 and IL103, were selected as cross-linking agents. Both have a phosphonium ion associated with either an ino-acetate (IL103) or a dicyanamide ion (IL105). Two amines were also used as cross-linking agents: D230 (polyether amine) and PACM. The latter is a cycloaliphatic amine resulting in a glass transition temperature of the polymer higher than that when using D230. The addition of a cross-linking agent is done under stoichiometric conditions allowing cross-linking to >90% of the polymers without leaving any free amine or liquids. This corresponds to approximately 10 phr for the ionic liquids and 63 phr for the amines. The coupons are parallelepipeds (approximately 10mm x 5mm x 1mm) whose size is compatible with DMA/DSC tests. The manufacturing parameters are identical to those reported by L. Ollivier-Lamarque.

The initial characterization of the polymer coupons is carried out at IMP. This includes DSC and DMA analyses. The glass transition temperatures determined by DSC are reported in Table 1. If the resin based on D230 has the lowest glass transition temperature, the other three resins have Tg above 100°. Furthermore, the measurement of the contact angle in water shows an advantage of ionic liquids over the hydrophobicity of the resin. Note that this characteristic is modified when it comes to organic media (measurements in diiodomethane). Based on the available Tg data, two materials stand out: IL105 and PACM.

Table 1. Initial characteristics of coupons (glass temperatures, contact angles)

Sample	IL103	IL105	D230	PACM
Tg (°C)	131	150	90	170
Contact angle (°)				
Water	93	105	85	--
diiodomethane	36	80	65	--

The coupons were then immersed in two solutions: the first being distilled water (serving as a reference environment), the second being a 25% ammonia solution (aqueous solution NH<sub>4</sub>OH). Water and/or ammonia uptake was monitored by tracking the mass evolution of the samples. The immersion tests were conducted for 1176 hours at room temperature (approximately 19°C). The coupons were immersed in 40 mL of solution in an aerated and stagnant condition.

Whatever the solution a mass increase was monitored, indicating that the solution penetrated the coupons (Figure 1). For a coupon, the uptake is almost similar in the two solutions except for the IL105.

Figure 1a shows that the uptake is significantly lower for the ionic liquid epoxy coupons. The mass variation between the D230 and PACM samples can be related to their glass temperatures. Similar observations can be made with the ionic liquid group. For both categories, an increase in uptake is linked to a higher glass temperature transition.

Considering the contact angles either in water or diiodomethane, an increase in contact angle leads to an increase in mass variation (for IL103 and IL105 samples).

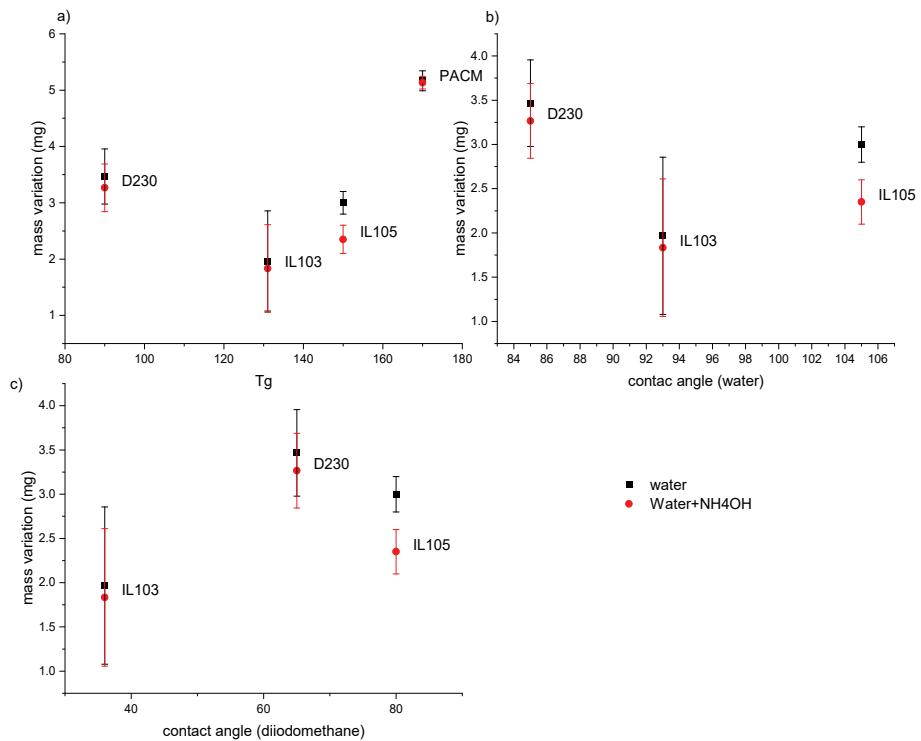


Figure 1. Mass variation after immersion in 40mL solution at 19°C for 1176 hours plotted as a function of initial a) glass temperature transition, the contact angles in b) water and c) diiodomethane.

### 3. Achievements

These first results demonstrate the potential of polymer materials for ammonia storage. Ammonia (NH<sub>4</sub>OH form) does not seem to accelerate the water uptake in water solution. These exposure tests also show that the curing agent has a strong effect on the level of the uptake. Ionic liquids have less influence than the two others.

These results also highlight the complex mechanisms between the polymer material and the solutions resulting in mass evolution. Indeed, the absolute glass transition temperature and the contact angle are not direct descriptors used to predict uptake.

### 4. Summaries and future plans

Demonstration has been done that ammonia solubilized in water does not increase the uptake of polymer. The results also show that new polymer generation (ionic liquid) has strong potential as a coating to protect the structural integrity of metal infrastructure regarding ammonia aggressiveness.

The next step is to quantify the uptake kinetic and expose these materials to a gaseous environment. Work has also to be done on the modification of the glass temperature transition, contact angle and also other thermomechanical parameters after ammonia exposition.

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	J23Ly14
Classification	LyC Collaborative Research Project
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year (progressing)

## Clarification of Flow Structures Related to Jet Noise Generation using Mode Analysis and High-precision Jet Flow Simulation

Aiko Yakeno\*†, Christophe Bogey\*\*††  
Shota Morita\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, Ecole Centrale du Lyon

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Subsonic jet noise, which is generated by jet engines, is called ‘the vortex sound’ because it is mainly caused by the nonlinear and unsteady motion of various scale vortices. Thanks to the recent development of the computation technologies in fluid dynamics, large-scale and highly accurate unsteady jet simulations have become possible. Therefore, detailed aeroacoustics analysis data for subsonic jets have been obtained so far. However, it is difficult to understand the huge and complex turbulence data without the appropriate analysis methods. Based on the above, this study aims to (1) develop a method for extracting flow structures related to noise generation using a mode decomposition method, and (2) quantitatively explain the mechanism of jet noise generation. These studies are expected to provide a clear guideline for future noise reduction design of a jet engine.

### 2. Details of program implement

The investigation is structured around a collaboration between French and Japanese leading turbulent flow research institutions with a shared interest in aeroacoustics in the turbulent jet.

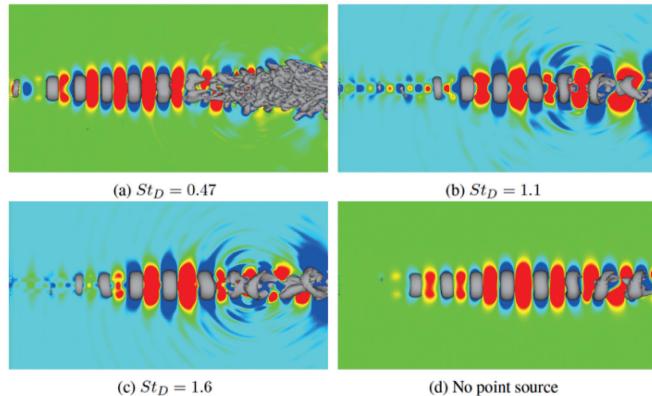


Figure 1: The pressure and vortices visualization results of Navier-Stokes solver with artificial disturbance: (a)  $St_D = 0.47$ , (b)  $St_D = 1.1$ , (c)  $St_D = 1.6$  and (d) no point source case. The pressure contour ranges from 0.99 to 1.01, from blue to green to red. The iso surfaces are that Q-criterion is 0.05, which is colored by grey.

The investigation will be performed both in France and Japan, and it will be divided into two strands. The first is to perform large-scale numerical simulations of aerodynamic noise using jet flow simulations that are accurate enough to resolve the acoustic waves (performed in France by Dr. Bogey). The second is to try to extract the structures related to noise generation from the numerical simulation data carried out by

Dr. Bogey using data-driven methods such as mode decomposition (to be carried out in Japan by Dr. Yakeno and Mr. Morita, the third-year doctoral student). These two researches complement each other and are based on the expertise of each applicant: Dr. Bogey, who belongs to the University of Lyon, has the know-how and facilities to perform large-scale numerical simulations of jet streams. On the other hand, the Obayashi and Yakeno research group at Tohoku University has been actively conducting research using data science and fluid science and has strengths in flow structure extraction methods such as mode decomposition techniques.

### 3. Achievements

One of our research objectives has been to quantitatively explain the mechanism of jet noise. We found that a feedback loop phenomenon exists in high-speed subsonic jets. A feedback loop is a phenomenon in which jet noise influences the initial instability of the flow, and the characteristics of the jet noise are determined by the repetition of this influence. In order to investigate the conditions under which this phenomenon occurs, we developed a new analysis method using flow simulation. This method generates a sound source that simulates jet noise in laminar jet flow and investigates the "sensitivity" of jet turbulence to noise frequencies. The results show that the sound waves in the three-dimensional jet are most sensitive to frequencies that match the turbulent frequency of the initial instability observed in feedback loop phenomena. This result supports the feedback loop phenomenon in jet noise. These results were presented at ICFD2022 and iTi2023 (held in July) and would be published in the journal "Progress in Turbulence X."

### 4. Summaries and future plans

Results of the two approaches (1<sup>st</sup> year: tlsDMD, 2<sup>nd</sup> year: sensitivity analysis) suggest that the guided jet waves propagating on the jet axis are sound waves generated at the end of the potential core, which cause K-H instability and turbulence in the jet. It is concluded that the feedback loop phenomena seen in supersonic and collisional jets also occur in subsonic free jets. We are currently compiling and submitting two academic papers regarding the results of each method. We have received a request for a minor revision of one, and will be re-submitting the other too.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] Shota Morita, Aiko Yakeno, Christophe Bogey, Shigeru Obayashi: Flow Sensitivity Analysis for the Feedback Loop Phenomenon of Subsonic Jet Noise Generation, *Progress in Turbulence X*, accepted.
  - [2] Shota Morita, Aiko Yakeno, Christophe Bogey, Shigeru Obayashi: Modal Analysis of High-Speed Subsonic Jet Noise: Visualization of an Internal Feedback Loop, *Journal of Flow and Energy*, accepted.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [3] Shota Morita, Aiko Yakeno, Christophe Bogey, Shigeru Obayashi: Flow Sensitivity Analysis for the Feedback loop phenomenon of subsonic jet noise generation, *Interdisciplinary Turbulence Initiative (iTi) 2023*, Italy, (2023), No. 141.
  - [4] Shota Morita, Aiko Yakeno, Christophe Bogey, Shigeru Obayashi: Clarification of Flow Structures Related to Jet Noise Generation Using Mode Analysis and High-Precision Jet Flow Simulation, *The 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023)*, Sendai, (2023), OS23-9.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

## **2. 研究成果報告書**

### **<リーダーシップ共同研究>**



課題番号	J23L003
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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

2006 年 Basel 地域に埋設されている 6 つの 3 成分短周期地震計で収録された 3067 イベントの速度波形データを解析した。特に RIE2 と OT2 という 2 観測点が解析に十分なシグナルノイズ比を示した。RIE2 は深さ 927m の堆積岩中、OT2 は深さ 2487m の花崗岩質の基盤岩中に設置されている。OT2 と RIE2 のスペクトル形状はやや異なっており、OT2 が平坦な低周波部分と 100Hz 付近からの 2 乗で減衰する高周波部分から構成されるのに対して、RIE2 では低周波の平坦部はそれほど顕著に見えず、高周波成分は  $\omega$ 2 乗で減衰するものと  $\omega$ 3 乗で減衰するものが混在していた。

シグナルノイズ比が 5 倍以上のデータを選別し、OT2 と RIE2 それぞれの変位スペクトル記録に対して、理論スペクトルを地震モーメントとコーナー周波数を未知数としてグリッドサーチによりフィッティングした。さらに、得られた地震パラメタを使って応力降下量を求めた。応力降下量は、OT2 では 0-10 MPa と推定されたのに対して、RIE2 では 0-2 MPa 以下と非常に小さい値となった。OT2 では 50-200Hz 程度とコーナー周波数が推定されていたのに対し、RIE2 では 15-40Hz 程度とやや低い値に推定されたことがこの違いを生んでいると考えられる。

### 3. 研究目標の達成状況

今年度は、バーゼル地域の誘発地震の応力降下量を精査する段階まで来ている。未だ応力降下量に関して検討すべき事項は多少あるが、まずは達成度を示しており、関連学会で発表もできている。最終年度は目標とする直接計測データとの比較と論文公表を見込める状態となっており、研究は計画通りの進展を見せている。

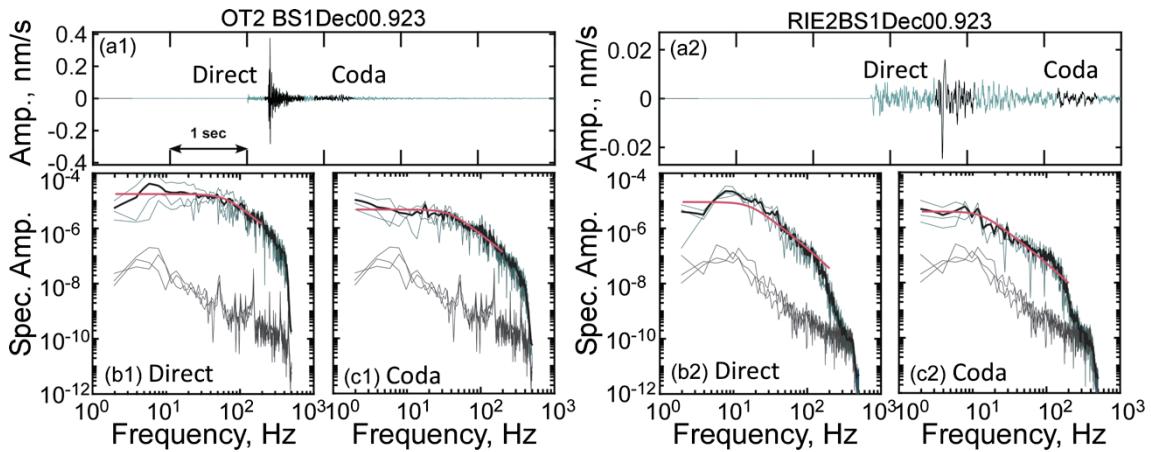


図1：応力降下量の推定値（左: OT2, 右: RIE2）

#### 4. まとめと今後の課題

観測点によるコーナー周波数の違いは、直達波を利用したことによるディレクティビティやラディエーションパターンの影響の可能性がある。コーダ波の利用やスペクトル比の利用により, azimuthに影響されずに安定的に震源パラメタが推定できるか、さらなる検証が必要である。

最終的に、得られた応力降下量の値を直接計測と比較すると同時に、応力降下量の時空間変化についても評価する。

#### 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. Yoshimitsu, Y. Mukuhira, H. Asanuma: Direct Comparison between Resolved Shear Stress and Stress Drop Implementation of Software Library for Flow Analysis, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-10, pp.43-44
- [2] 吉光奈奈, 椋平祐輔, 浅沼 宏: Basel 地熱地帯における誘発地震データとその地震パラメタの評価, 日本地震学会 2023 年度秋季大会, (2023).

##### 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	J23L014
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4~2024.3
継続年数	1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\*\*††

中野 政身\*\*\*\*, 田中 大貴\*

\*同志社大学理工学部, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*東北大学未来科学技術共同研究センター

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

### 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

射出装置を完成させた. この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)

### 2.2 形状による空力特性への影響の解明

アスペクト比の異なるリング翼を射出装置から発射し, そこから得られた各種空力特性に関するデータを比較し, アスペクト比が空力特性に与える影響についての関係性を解明した.

## 2.3 数値解析によるモデル周囲の詳細な流れの解析

数値解析では実験と異なる条件で3次元シミュレーション実施のための予備調査を実施した。

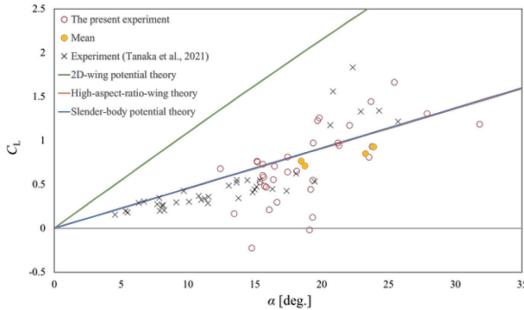


Fig. 1 Lift coefficient

## 3. 研究目標の達成状況

射出装置を使用することで、広い迎角範囲での多くの飛行データをとることが出来た。これらのデータを運動解析することで、モデルに作用する流体力（揚力/抗力）、モーメントを算出し、流体力やモーメントがモデルの軌道にどう影響しているかを確認できた。運動解析方法についても再検討し、精度向上を図ることができた。またアスペクト比が空力特性に影響を及ぼすことを確認することができた。

数値計算に関しては将来の大規模計算実施時のための計算条件を具体的に検討することができた。

## 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。来年度からは秋田大学の足立先生も研究に加わる予定であり、数値計算によるリング翼の特性の解明が期待できる。さらに風洞実験の実施も予定している。様々な角度からのアプローチによってリング翼の特性の解明に努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] D. Tanaka, T. Wada, Y. Naito, M. Nakano, J. Ishimoto, H. Tanigawa, K. Hirata, “Effects on the Aerodynamics of a Spinning Hollow Cylinder in Flight” *The twentieth International Conference on Flow Dynamics*, (2023).

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23L016
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	3年目

## Tensile Effect by Wall Shear Stress around Stagnation Point and Flow Instability by Wall Elasticity in Full-Scale Patient-Specific Aneurysm Model

Gaku Tanaka\*†, Ryuhei Yamaguchi\*\*, Shuhei Sato\*, Albadawi Muhammed\*\*\*, Khalid M. Sqr\*\*\*\*, Atsushi Totsuka\*\*, Hitomi Anzai\*\*, and Makoto Ohta\*\*\*††

\* Graduate School of Engineering, Chiba University

\*\* Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\* Faculty of Engineering, Alexandria University

\*\*\*\* Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

In the present study, we measured the flow structure in middle cerebral aneurysm using PIV at orthogonal multiplane. In particular, the effect of wall elasticity on gradient of wall shear stress (WSSG) and flow instability in a patient-specific middle cerebral aneurysm using *in vitro* using PIV.

### 2. Details of program implement

The phantom was reproduced from an image-based, patients-specific middle cerebral aneurysm (Fig. 1). The current phantom model was fabricated using a silicone elastomer (Sylgard 184, Dow Chemical) using a specialized technique via mold made from water-soluble plaster. The velocity pattern was measured by semi 3D-PIV using UV Laser (i.e., CW ultra violet Laser of wave length 375 nm with aneurysm 0.8W). The working fluid is aqueous glycerol potassium solution. WSS was estimated from the tangential velocity along aneurysm wall. The flow waveform is approximated in a simple sinusoidal pulsatile wave at mean velocity with mean Reynolds number of 350, mean flow rate of 170 ml/min and inlet vessel diameter of 2.8 mm. Major purpose of this study was to determine the effects of elastic wall on WSS and flow instability within a patient-specific cerebral aneurysm.

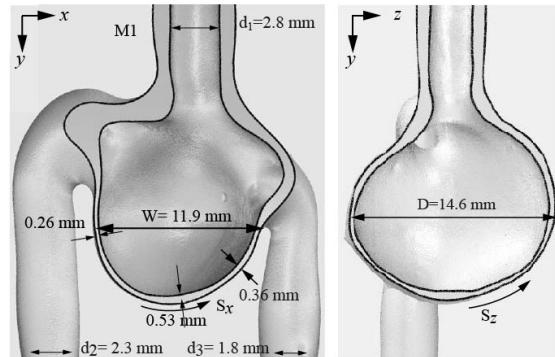


Fig. 1 Morphology of middle cerebral.

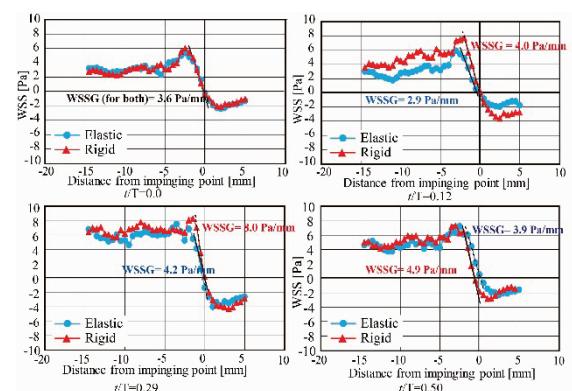


Fig. 2 WSS and WSSG at four phases.

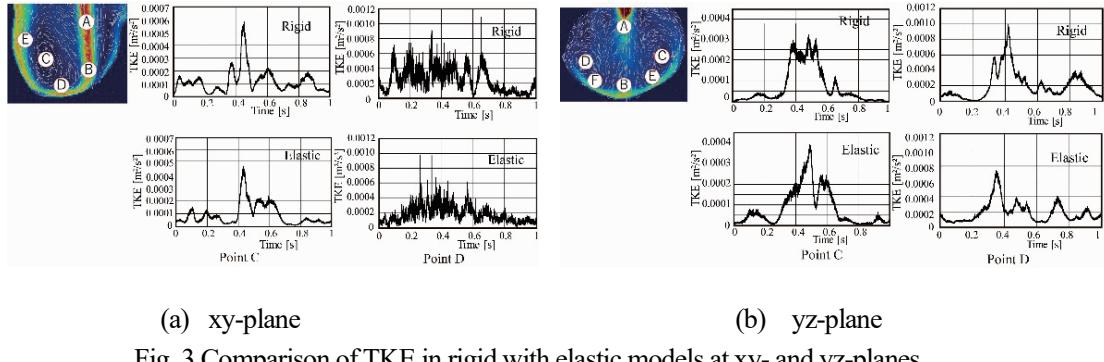


Fig. 3 Comparison of TKE in rigid with elastic models at xy- and yz-planes.

### 3. Achievements

Firstly, the effect of elasticity on wall shear stress (WSS) and gradient of WSS (WSSG) is noticed in xy and yz-planes as shown in Fig. 2. WSS and WSSG in elastic is smaller than those in rigid models. WSS is influenced by the deformation of the aneurysm wall induced by the static pressure and the elasticity. The WSS directly acts on the vascular lumen as a biological stimulator. The suppression of WSS and the WSSG by elasticity implies a smaller stimulating force on the aneurysm wall. The flow instability was experimentally clarified at orthogonal multiplane within aneurysm. In particular, there was a difference in the TKE between the elastic and rigid models as shown in Fig. 3. The mean TKE in elastic model at global points is smaller than that in rigid models. Also, the wall elasticity suppresses the turbulent kinetic energy (TKE), i.e., in elastic more than that in rigid models. The generally smaller TKE in the elastic model in comparison with the rigid model highlights the stabilizing effects of wall elasticity on fluid flow.

### 4. Summaries and future plans

We realized a thin-walled elastic phantom model of a full-scale patient-specific aneurysm at the apex of the bifurcation of the MCA. The flow instability in elastic model was attenuated in comparison with in rigid model. The stretching force WSSG acting on aneurysm wall was suppressed in elastic model.

### 5. Research results

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

[1] R. Shimodoumae, G. Tanaka, R. Yamaguchi, and M. Ohta, Numerical Simulation of Flow Behavior in Basilar Bifurcation Computed Tomography Angiography, *Int J Numerical Method in Biomed Eng.*, 2024, DOI: 10.1002/cnm.3805

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

[2] S. Satoh, N. Ikeya, G. Tanaka, M. Ohta, R. Yamaguchi, T. Nakata, Effect of wall elasticity on flow instability and wall shear stress in patient-specific cerebral aneurysm, *2023 JSME Annual Conference*, J021p-1.

[3] G. Tanaka, R. Yamaguchi, S. Sato, A. Muhamed, M. Sqr Khalid, H. Anzai, M. Ohta: Hemodynamics Effect of Wall Elasticity on Flow Dynamics within MCA Aneurysm, *Proc. 23<sup>rd</sup> International Symposium on AFI-2023*, Sendai,(2023),CRF-37,pp.111-112.

[4] S. Sato, G. Tanaka, M. Ohta, R. Yamaguchi, Effect of wall elasticity on wall shear stress of patient-specific middle cerebral aneurysm, *AP Biomech 2023*, p.56.

#### 3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J23L017
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1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\*†, 燐野 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

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、流れ方向に一様な 2 次元リブレットを採用した。また、リブレットの溝幅については、乱流域において、マッハ数 0.2 における壁座標基準で 15 度となるように設定した。本研究では流入条件として、ブラジウス層流解に壁面垂直方向に周期的な擾乱を与えることで乱流遷移流れを再現した。

図 1 に滑面に対するリブレットによる抵抗低減率分布を示す。図 1 において横軸は流れ方向座標、縦軸は抵抗低減率を示しており、縦軸の値が正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。横軸の  $x/\delta_{in} = 140$  が流入に相当し、横軸下に記載している矢印は乱流域を示している。実線はリブレット面、破線は滑面における乱流域をそれぞれ示しており、青線はマッハ数 0.2、赤線はマッハ数 0.85 の場合である。図 1 に示すようにマッハ数が増加すると乱流域におけるリブレットの抵抗低減性能が減少することが分かった。図 2 は、横軸に流れ方向座標、縦軸にリブレットの溝幅を各マッハ数における滑面上の壁座標で整理した値を示している。図 2 より、マッハ数が増加するにつれ、乱流域ではその値が理想値 (15 から 25 度) よりも低くなることが分かる。つまりマッハ数が変化することで、縦渦のサイズとリブレットの溝幅の関係が変化し、抵抗低減性能が変化することが明らかとなった。

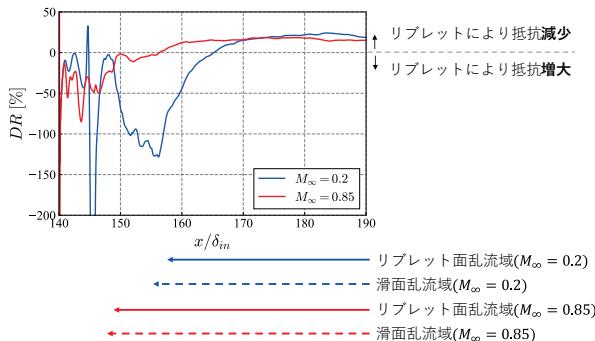


図1：非圧縮流れと圧縮性流れにおけるリブレットの抵抗変化率の比較

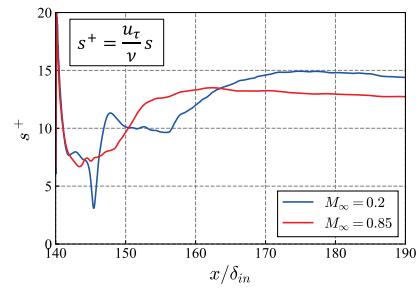


図2：無次元溝幅分布

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、まず、圧力勾配のない圧縮性流れにおけるリブレットの粘性抵抗低減効果およびそのメカニズムを明らかにすることを目的とし、2. に記したように概ね達成した。一方で、圧力勾配がリブレットの性能に与える影響調査については未達成であり、2024年度に実施する。

### 4. まとめと今後の課題

本研究成果により、圧縮性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。今後は遷音速旅客機へリブレットをより効率的に適用することを目指し、圧縮性乱流境界層におけるリブレットの最適な溝幅を明らかにする。また、圧力勾配がリブレットの抵抗低減効果に与える影響を明らかにしていく予定である。

### 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] 金子賢人, 大山聖, 焼野藍子: 層流域におけるリブレット粗さ効果に関する数値研究, 日本航空宇宙学会第54期定時社員総会および年会講演会, 東京(2023).
- [2] K. Kaneko, A. Oyama, A. Yakeno, S. Hamada: Riblet surface effect on laminar to turbulent transition by Direct numerical simulation, *Aerospace Europe Conference*, Lausanne (2023). <https://www.eucass.eu/doi/EUCASS2023-365>.
- [3] K. Kaneko, A. Oyama, A. Yakeno: Riblet surface effect on viscous drag in the laminar, transitional, and turbulent flow, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-63, pp.176-177.
- [4] 金子賢人, 大山聖, 焼野藍子: 圧縮性境界層の層流・遷移・乱流におけるリブレットの効果, 令和5年度宇宙航行の力学シンポジウム, 相模原(2024).
- [5] K. Kaneko, A. Oyama, A. Yakeno, S. Hamada: Mach Number Effect on the Drag Reducing Performance of the Riblet in the Transition and Turbulent Flow, *AIAA SCITECH Forum*, Orlando, (2024). <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2024-0890>.

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	J23L018
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目

**回転同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の高性能化に向けた研究**  
**Study for High Performance of Rotating Co-axial MHD Energy Conversion Device**

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

風力発電機稼働時の回転トルク制御と同時に余剰風力エネルギーの回収を可能とする回転同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の機構が、東北大学流体科学研究所 高奈秀匡教授によって提案されている。この変換装置の内円筒は風車軸に直結され、風車が回転すると内円筒が回転し、装置内部に充填した液体金属が周方向に流動する。電気伝導性を有する液体金属の流れに外部磁場を印加することで、それらの相互作用 (MHD 相互作用) によって流れと反対向きにローレンツ力が生じる。このローレンツ力によって軸回転トルクを制御し、余剰風力時にも軸回転速度を定格に保つことが可能となる。また、同時に内円筒と外円筒を金属製とし、その間に外部負荷抵抗を接続することで、ファラデーの電磁誘導の法則に基づき電気出力を得ることも可能となる。

本装置の機構は高奈教授による基礎実験 (風力の代替として AC モータを利用) により既に実証されているが、同装置内の液体金属流れ、すなわち MHD 相互作用下における回転同軸二重円筒間流れ (テイラーハイドロ流) の詳細な理解には及んでいない。本装置の高性能化のためには、装置内の電磁流体现象の基礎的な学理の深化が必要不可欠である。

そこで、本研究では、回転同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の高性能化に向けて、精緻な三次元電磁流体数値解析手法を新たに開発することにより、これまで明らかになっていなかった外部負荷抵抗値を変化させた際の同装置内の電磁流体挙動とその性能との関係を解明することを目的とする。

## 2. 研究成果の内容

本研究で対象とする同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の概念図を図 1 に示す。回転する内円筒と静止している外円筒は金属製の電極とし、その間に外部負荷を接続する。上下壁は絶縁壁とした。内円筒から外円筒までの幅を  $h$  と、高さ  $L$  との比であるアスペクト比は 1 とした。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を 8000 とし、乱流状態における検討をした。

図 2 に、液体金属が有する内部抵抗  $R_i$  に対する負荷抵抗  $R_l$  の比である抵抗比  $R_p = 1000$  (開放側) と  $R_p = 10$  (短絡側) における、高さ中央における時間平均した周方向流速分布を示す。粘性力に対するローレンツ力の比であり、磁束密度  $B_z$  に比例する無次元数であるハルトマン数  $Ha$  を増加させると、層流を仮定している半径方向一次元の理論解では、ローレンツ力に

よって流速が減少していくことがわかる。開放側では、その速度減少が顕著であり、 $Ha=200$ において、逆流が発生している。一方、短絡側では、 $Ha=30$ から逆流が発生している。これは、開放側に比べてより大きな半径方向電流 $j_r$ が流路内に流れるため、ローレンツ力 $j_r B_z$ による流速の減速がより甚大だからである。一方、三次元数値解析の結果では、無磁場の場合には乱流状態のため、壁方向への乱流粘性拡散により、流路中央では平坦な流速分布となる。このとき、 $Ha$ を増加させていくと、乱流が抑制され層流化していくので、内円筒や外円筒近傍の速度勾配は緩やかになる。 $Ha=100$ の場合に比べて、 $Ha=200$ のほうが、内円筒近傍での速度勾配が急であるが、これは高さ中央での分布のためであり、高さ方向にも平均をした流速分布では、その傾は $Ha=100$ よりも、 $Ha=200$ のほうが緩やかになることは確認している（これは、後述の図4の入力分布からも確認できる）。なお、三次元計算では、 $r-z$ 流路断面内に渦電流が発生する。このような多次元効果の違いが、図2の一次元理論解析と三次元数値解析の結果の違いとして表れている。

図3に電圧 $V$ と電流 $I$ の抵抗比依存性を示す。抵抗比が増加するにつれて、電圧は増加していくが、ある値で一定となり、電流はある値から減少してゼロに漸近していく。下記の関係が $V$ と $I$ の間には成り立つ。

$$V = V_{ind} - R_i I = R_l I, \quad V_{ind} = B_z \int_{r_{in}}^{r_{out}} \langle u_\theta \rangle dr$$

ここで、 $\langle \dots \rangle$ は空間平均を表す。 $V_{ind}$ は起電力を表し、周方向速度の内円筒半径 $r_{in}$ から外円筒半径 $r_{out}$ までの積分に関係している。電流がゼロとなる（ $R_p$ が無限大での）開放電圧は起電力と等しくなり、その値は $Ha$ が増加するにつれて増加している。これは、図2に示した開放側の速度分布の半径方向積分値の違いから理解できる。また、 $R_p$ がゼロ（ $R_l = 0$ ）における短絡電流値の違いも、起電力の違いから説明できる。 $Ha$ が大きいほど図2における平均速度の半径方向への積分値が減少し、起電力が減少するので、短絡電流も増加する。

図4に、入力（単位時間あたりの入力エネルギー：内円筒でのせん断応力と速度の積の流路内体積積分）と電気出力（ $VI$ ）の抵抗比依存性を示す。入力は抵抗比にあまり依存しないことがわかる。これは、図2に示した内円筒近傍での速度勾配が、 $Ha=30$ 以外では開放側でも短絡側でもほぼ変わらないことに起因している。また、上述のように、 $Ha$ に対する速度勾配の変化が、層流と乱流で異なることから、 $Ha$ が増加すると一次元では入力は増加し、三次元では減少している。発電出力は、ある抵抗比で最大値を持つ。この最大値を与える抵抗比の $Ha$ 依存性などは、今後さらに検討を進める。

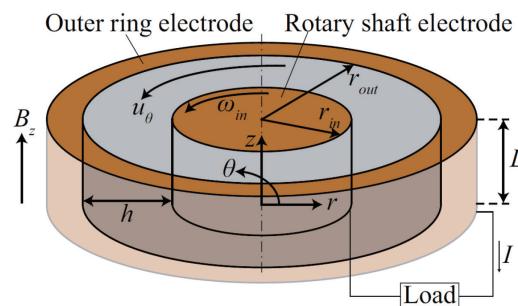


図1：同軸二重円筒型MHDエネルギー変換装置の概念図

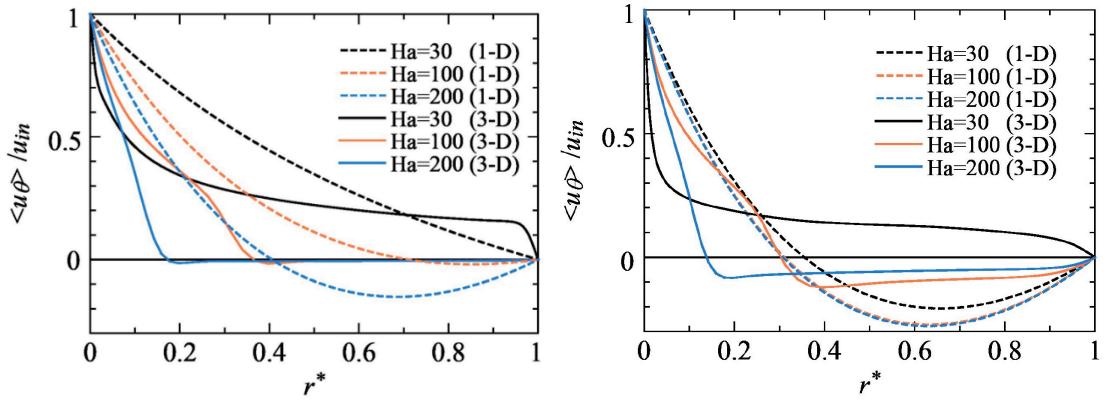


図2：抵抗比 $R_p = 1000$ （左図）と $R_p = 10$ （右図）における高さ中央での時間平均流速分布

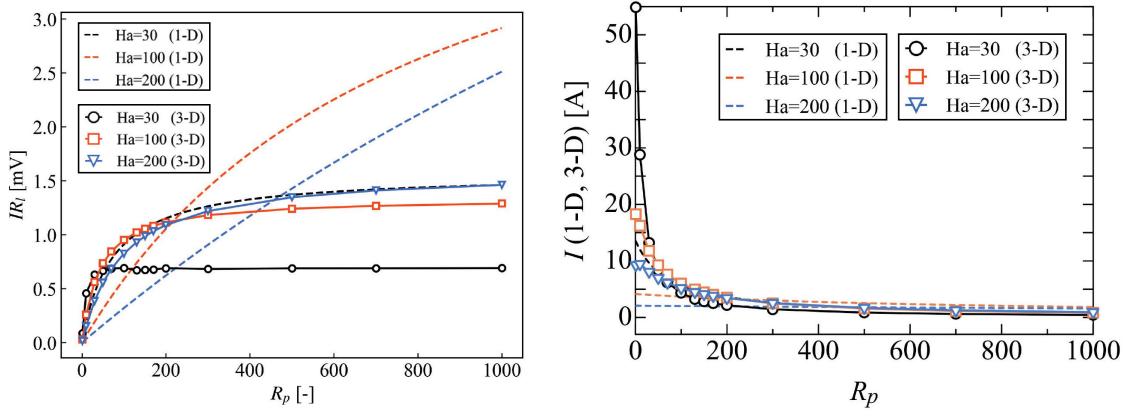


図3：電圧 $V = IR_l$ （左図）と電流 $I$ （右図）の抵抗比 $R_p$ 依存性

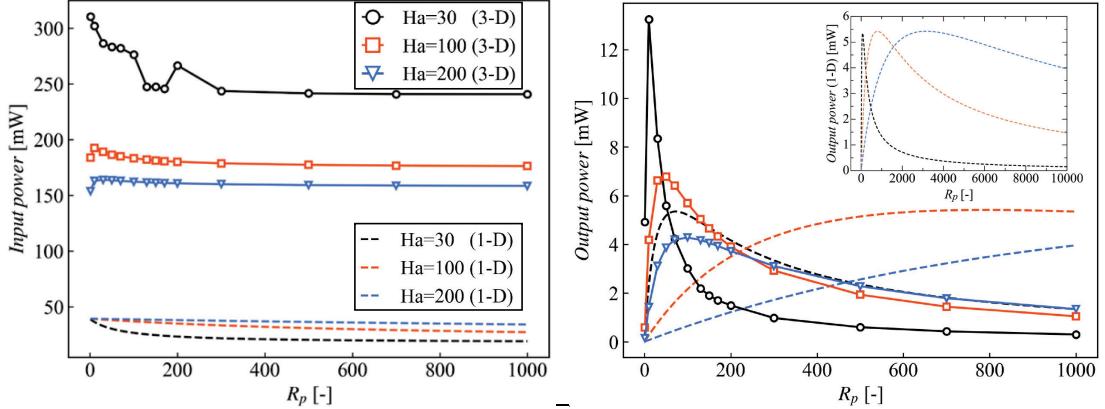


図4：入力（左図）と電気出力（右図）の抵抗比 $R_p$ 依存性

### 3. 研究目標の達成状況

回転同軸二重円筒型MHDエネルギー変換装置の高性能化に向けて、負荷抵抗の変化を考慮できる精緻な三次元電磁流体数値解析手法を新たに開発した。これまで明らかになつていなかつた外部負荷抵抗値を変化させた際の同装置内の電磁流体挙動とその性能との関係を解明することができた。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言える。

#### 4. まとめと今後の課題

今年度、負荷抵抗の変化を考慮できる精緻な三次元電磁流体数値解析手法を新たに開発し、上下壁が存在する状況や乱流状態を考慮した三次元数値計算により、一次元理論解析との違いも明らかになった。今後は、その違いがどのような物理現象に起因しているのか、流路内の流れ場や渦などの可視化により、さらに詳細に検討していく。負荷抵抗値を変化させた場合の発電効率、トルク制御への影響などを調査し、実証試験用装置の設計指針を獲得することが課題である。

#### 5. 研究成果

##### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] 長谷部喬大, 佐々木亮, 藤野貴康, 高奈秀匡, 小林宏充: 同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の発電特性に関する実験と理論解析, 電気学会論文誌B, 143巻, 7号 (2023), pp. 454-460, doi: 10.1541/ieejpes.143.454.
- [2] Takahiro Hasebe, Ryo Sasaki, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana, Hiromichi Kobayashi: Experimental and theoretical analyses on power generation characteristics of co-axial MHD energy conversion device, *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 216, No. 3 (2023), pp.1-8, e23446, doi: 10.1002/eej.23446.

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] Takahiro Hasebe, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana, Hiromichi Kobayashi: Study on Streaky Structure in the Vicinity of Rotating Inner Cylinder in Co-axial MHD Energy Conversion Device, *Twentieth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023)*, Japan (2023), 2 pages.
- [4] Hiromichi Kobayashi, Takahiro Hasebe, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana: MHD turbulent Taylor-Couette flow with end walls in axial magnetic field, *The 22nd edition of the International Couette Taylor Workshop (ICTW23)*, Spain (2023), 1page.
- [5] Takahiro Hasebe, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana, Hiromichi Kobayashi: MHD Coupled Simulation of Taylor-Couette Flow of Liquid Metal, *The X International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED 2023)*, Greek (2023), 1page.
- [6] 長谷部喬大, 藤野貴康, 高奈秀匡, 小林宏充: 同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置における発電効率の負荷抵抗依存性に関する 3 次元数値解析, 電気学会 新エネルギー・環境研究会, 浜松 (2023), 6 ページ.
- [7] 長谷部喬大, 藤野貴康, 高奈秀匡, 小林宏充: MHD 相互作用下の Taylor-Couette 乱流におけるストリーケ構造に及ぼす内円筒回転速度と外部印加磁場の影響, 複雑流動ダイナミクス研究会, 京都 (2023).

##### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23L023
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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ことが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 0.5 MPa, 液体温度 56°C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, 相変化が過剰に促進され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, 霧囲気圧力が大気圧, 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ン

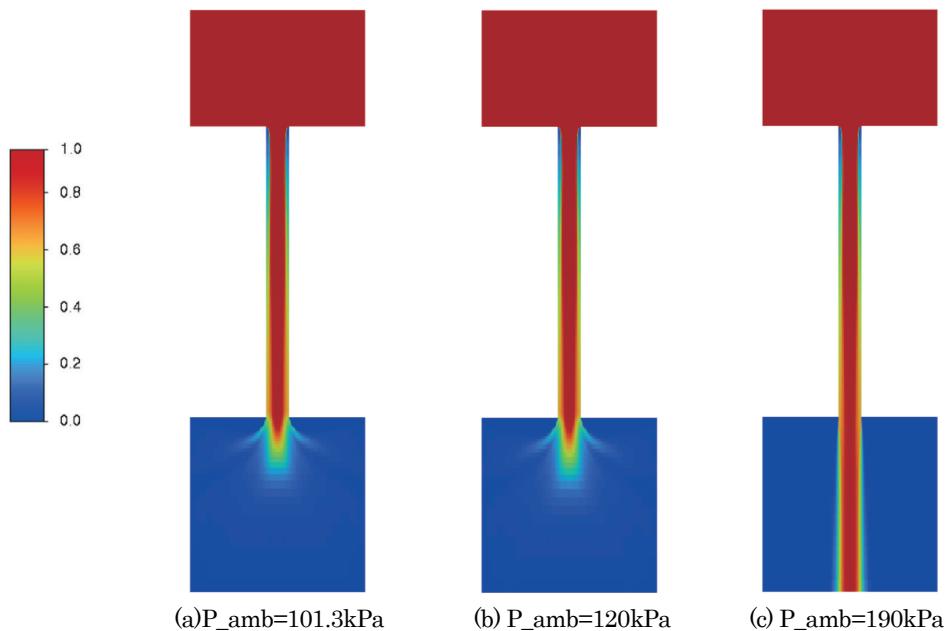


図1：2次元ノズルにおける液相体積率の計算結果 (n-pentane)

ンによる気相領域が存在し、ノズル部分では霧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、霧囲気圧力が 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た。

図2に加熱壁面を有する2次元ノズルのコンセプトを示す。左が装置の要点であり、上部を液体で満たし、液体は壁面に囲まれたオリフィス部を通過して容器内に噴射される。基本的には透過型の可視化用2次元ノズルであるが、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3に2次元ノズル作成後の装置試運転で得られた3枚の画像をサンプルとして示す。これらは流量や温度を変化させた際の画像の一部であるが、いずれにおいてもノズルオリフィス部のキャビテーションや気泡生成状況をよくとらえられていることが分かる。なお、壁面温度を変化させると生成状況に変化が見られたものの、現状は詳細検討のためのデータ蓄積の段階である。

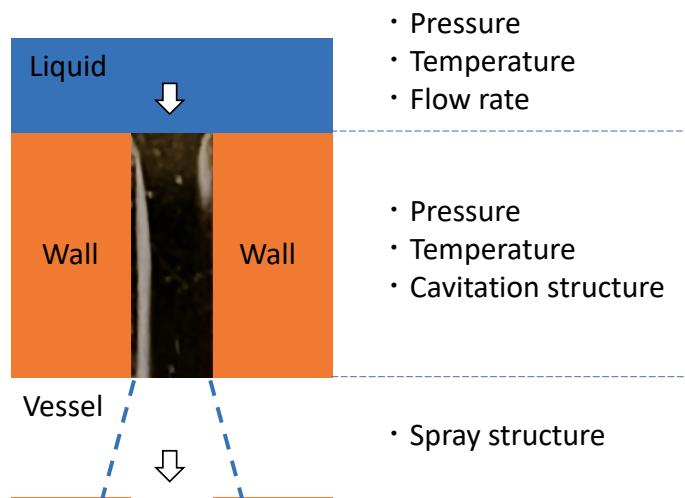


図2：加熱壁面を有する2次元ノズルのコンセプト



図3：2次元ノズルにおけるキャビテーション形状

### 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に加熱影響を考慮した実験が可能な装置を立ち上げられたため、最終目標にむけて今年度実施すべき内容は達成できているものと考える。

### 4. まとめと今後の課題

燃料温度と霧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装置のコンセプトについて検討し、実験装置の作成を行った。今後は、この装置における実験により得られた結果を先述のキャビテーションモデル改良の際に基礎データとして用いていきたい。

## 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] 川原田光典, 大島逸平: 液体アンモニア噴射におけるノズル内部流動のモデリングに関する一考察, 混相流シンポジウム 2023 講演論文集, 札幌, (2023), pp. 1.

[2] N. Kawaharada and I. Oshima: Study on the Injection Process of Next-Generation Liquefied Fuels, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-4, pp. 25-27.

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23L027
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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\*\*††

森 浩一\*, 小川 泰一郎\*, 森合 秀樹\*\*\*, 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が成功する等, 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では, 主に先端部周辺で生じる高い熱流束の高精度かつ高効率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, 热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場の熱流束の予測精度を実証すると共に向上させるため, 埋め込み境界法の開発と改良を行ってきた。初年度の研究では, 超音速における円柱周りの熱流束予測精度は他者と比較して十分な精度を持つことが示せた。そこで, 2年目の研究では, くさび型を対象として, くさび型より生じる斜め衝撃波を対象として直交格子上での熱流束予測を行った。流入マッハ数 3, レイノルズ数  $10^5$  の条件において, Fine 格子を用いて得られた圧力センター及び温度センターを図 1 に示す。格子密度を変更して得られた解析結果より, 物体表面から法線方向に取得した圧力分布を図 2 に示す。比較対象とした構造格子の解析 (BFC) に比べて, 衝撃波距離の若干のずれが確認できる。また, 同じ位置で取得した温度分布を併せて図 2 に示す。直交格子では, 格子密度によらず BFC に比べて物体近傍の温度勾配が低く予測されていることが確認できる。本解析結果より, 直交格子法と埋め込み境界法を用いた解析により, 超音速流れにおいて表面熱流束予測が可能であることは示されたが, 精度に関しては格子細分化や埋め込み境界法の修正により, 更なる改善の必要がある。

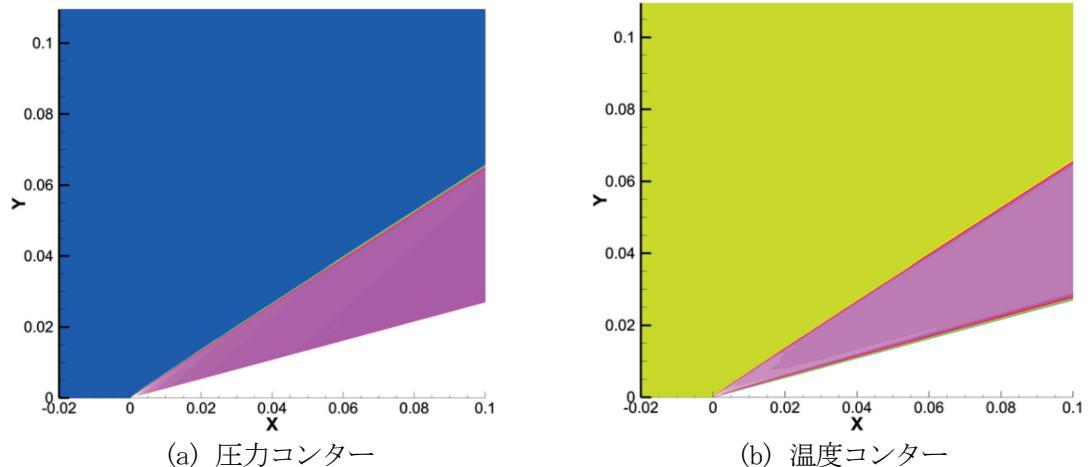


図 1：くさび型に対する超音速流れの解析結果

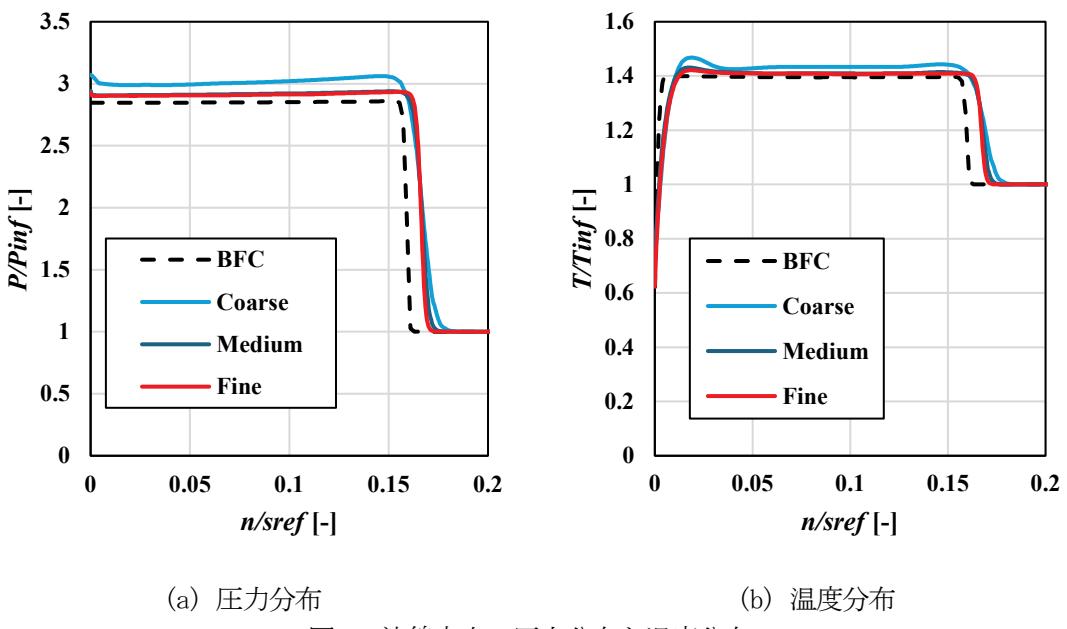


図 2：法線方向の圧力分布と温度分布

### 3. 研究目標の達成状況

本研究で開発した直交格子法 CFD により、くさび型形状の表面温度・熱流束分布予測が可能であることを示した。直交格子 CFD ワークショップにおける参考値との比較により、同様の分布が得られている一方、物体近傍における予測精度には更なる改善の余地があることが明らかとなった。今後、超音速飛翔体の空力設計・熱設計に活用するには、更なる予測精度の向上が必要である。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、超音速／極超音速で飛行する機体から生じる衝撃波に伴う表面熱流束予測可能な直交格子法の研究を行っている。今年度の結果より、くさび型形状の表面熱流束分布を予測することが可能となったが、実用性の向上には解析精度の改善が不可欠である。今後、物体近傍の格子密度の細分化や埋め込み境界法の改善を図り、予測精度の向上を目指す。

## 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] D. Sasaki, K. Miyata, S. Ogawa, K. Mori, K. Abe, 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-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-42, pp. 122-123.
- [2] K. Abe, K. Yoshida, D. Sasaki, S. Takahashi, A. Yakeno, S. Obayashi: Estimating Heat Flux on a Wedge in Supersonic Flow Using Building-Cube Method, *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Asian Computational Fluid Dynamics*, Bengaluru, (2023), Paper ID 17.

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23L028
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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\*\*†  
 藤田 昂志\*\*\*, 高橋 俊\*\*\*\*, 川本 裕樹\*\*\*\*\*  
 \*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

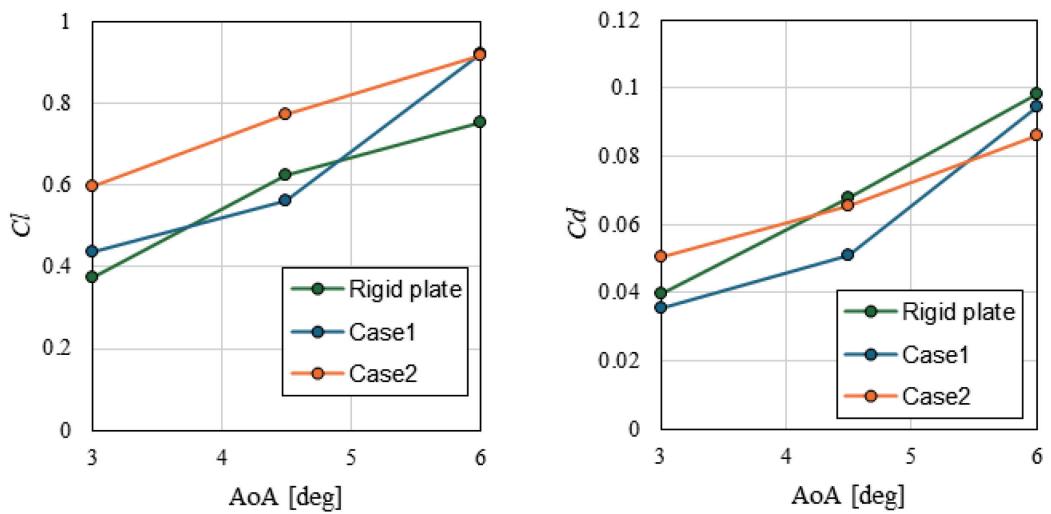
## 1. 研究目的

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CFD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が目的である。

## 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った。膜翼の弾性係数を変化させた2ケースの連成解析を行い、変形しない剛体平板翼の非定常流体解析を実施した。図1に剛体平板翼と柔軟膜翼の平均空力係数を示す。弾性係数の小さいCase2は、剛体翼や弾性係数の大きいCase1と比べて揚力係数が向上していることが確認できる。図2に示す実際の流れ場を比較すると、剛体平板翼では前縁より剥離しているのに対して、柔軟膜翼では形状の変形により前縁での剥離が見られず、柔軟膜翼に沿って流れていることが確認できる。その結果、柔軟膜翼の空力性能が剛体膜翼に比べて向上していることが確認できる。

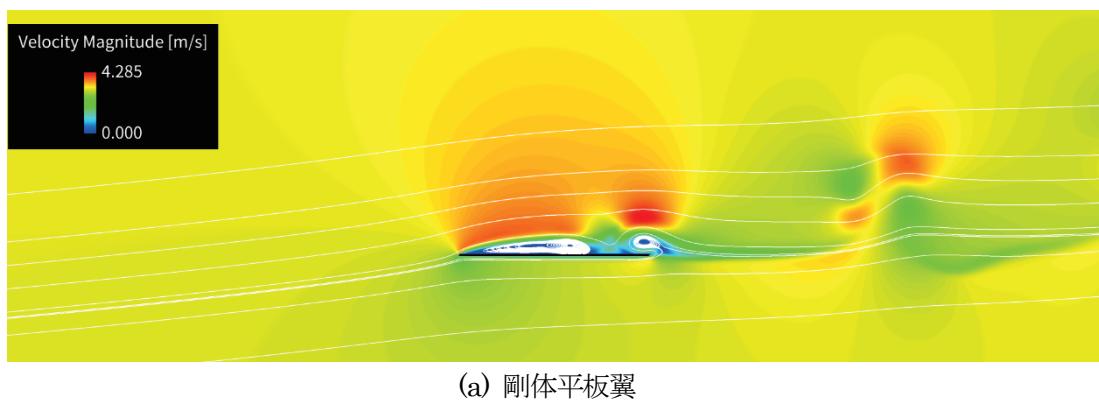
本研究を通して、弾性係数の小さい柔軟膜翼は流れ場に応じて変形することで、空力性能が向上することが確認できた。今後、実際の柔軟膜翼を再現したモデルを使用することで、実際に使用する柔軟膜翼の空力特性を調べることが可能である。



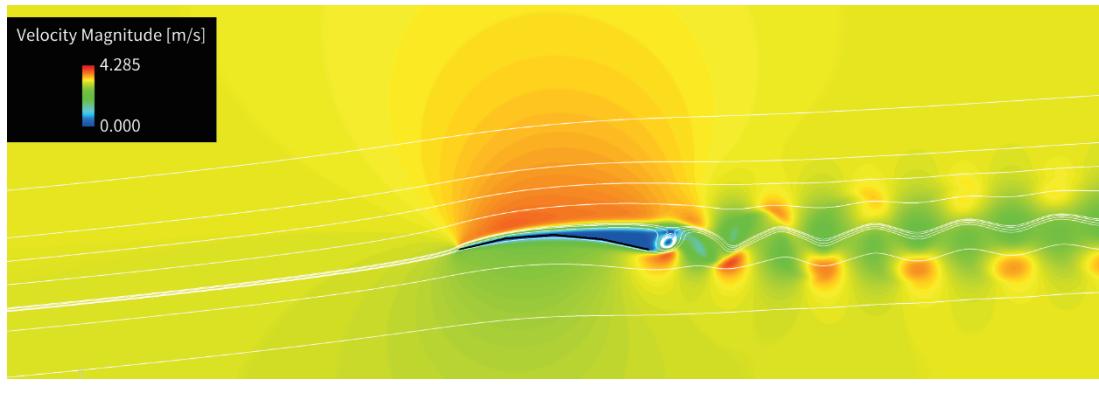
(a) 揚力係数

(b) 抵抗係数

図 1 : 剛体翼と柔軟膜翼の平均空力係数



(a) 剛体平板翼



(b) 柔軟膜翼 (Case 2)

図 2 : 迎角 4.5 度における流速の瞬時場と流線

### 3. 研究目標の達成状況

本研究の目標は、柔軟膜翼周りの非定常流れ場を実験的・数値的手法で理解することである。今回、2次元流体・構造連成解析手法を構築し、柔軟膜翼周りの非定常流体解析が可能となった。解析の結果、変形する翼の空力性能が剛体翼に比して向上することを示した。ただし、実験で使用している柔軟膜の剛体を再現した解析や実験との比較には至っておらず、次年度以降に実施する。また、高迎角時における解析には、3次元流体・構造連成解析が不可欠であるが、大規模解析時間が必要となることから、今年度は未実施である。今後、高迎角での柔軟膜翼の解析を再現するために、3次元解析への拡張が必要である。

### 4. まとめと今後の課題

今年度の研究で開発した流体・構造連成解析手法により、柔軟膜翼の解析が可能となった。その結果、膜の剛性による形状の変化に伴い、変形しない剛体翼に比べて空力性能が向上することが確認できた。今後、実験で使用している柔軟膜翼を再現した解析を実施して本手法の解析精度を明らかにすることで、本手法の検証を行う必要がある。その後、本手法を3次元化することで、高迎角における柔軟膜翼の優位性や、その要因について明らかにすることが可能となる。

### 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] D. Sasaki, K. Funada, K. Fujita, Y. Kawamoto, S. Takahashi, T. Ikami, H. Kurahashi, H. Nagai: Computational and Experimental Study of Unsteady Flowfield around Flexible-membrane Wing at Low Reynolds Number toward Mars Airplane, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-41, pp. 120-121.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23L032
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目（発展）

ロータ配置の対称性に着目したマルチロータ機の地面効果の解明  
 Study on Ground Effect on Multirotor Unmanned Aerial Vehicles  
 Considering Symmetry Rotor Position

大塚 光\*†, 永井 大樹\*\*\*††

得竹 浩\*, 西村 練\*\*\*

伊神 翼\*\*, 原 大生\*\*\*\*

\*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, \*\*\*\*金沢大学理学域

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

クアッドロータ機の地面効果の評価方法について、対称な計算格子や実験装置ではなく全機を模擬した解析及び実験の必要性を検証することが本研究の目的である。また、実験による解析だけでは難しかった地面効果中の小型クアッドロータ機後流の3次元的な流れ構造をCFD解析によって明らかにする。

## 2. 研究成果の内容

### a. 地面効果のCFD解析

解析時間の削減を狙い、計算領域を全機分と1/4にした場合の地面効果の影響を受けるクアッドロータ機の後流解析を行った。解析の結果、対称面を設定した場合は、全機解析よりも強い噴流が形成されることを確認した。クアッドロータ機による地面効果解析では、全機モデルの解析が必要であると考えられる。(成果1)

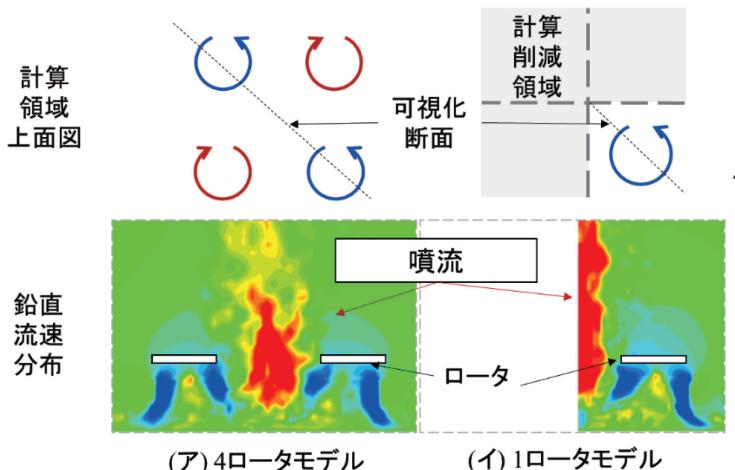


図1：解析領域の違いによるクアッドロータ機中央での噴流形成の比較

### b. 実験による地面効果の解析

1つのロータを2面の壁近傍に設置し、クアッドロータ機を模擬した地面効果推力計測を行った。CFD解析結果と同様に、クアッドロータ機よりも強い噴流が2面の壁の間に噴流が生じることを確認した。この結果を受けて、2面の壁と地面の近傍で生じる推力変動を頂点効果と呼び、推力変動量の評価を行った。（成果2）

### c. ロータ表面流れのCFD解析

回転翼解析ツールを用いて、一様な風の中に置かれたロータ表面の圧力分布とロータに加わる空気力の解析を行った。成果に基づいて、プリコニング角による流れ中のロータピッチングモーメント変化のメカニズムを明らかにした。（成果3）

## 3. 研究目標の達成状況

目的としていた、機体地面効果の全機解析の必要性を実験及びCFD解析結果から示すことができた。一方で、3次元流れ構造の分析は、CFD解析に時間を要したため、比較ケースが少なく、現在解析結果の取りまとめを行っている。解析が終了したケースの分析に基づいて、CFD解析による流れ構造を文章にまとめる予定である。ロータ配置による流れ構造の比較に至らず、機体設計に供する解析結果を取得できなかつた。

## 4. まとめと今後の課題

CFD解析と実験により、対称面を設けた場合には噴流の強さが変わるために、クアッドロータ機の地面効果解析には、CFD解析が実験に関わらず全機モデルを用いた解析が必要であることを確認した。

本課題の推進により、「頂点効果」や「プリコニング角によるロータピッチングモーメント制御」といったテーマの開拓につながった。今後は、地面効果だけでなく、複数ロータの後流が干渉した際のロータ性能解析を中心として、マルチロータ機周り流れの可視化実験とCFD解析を行う予定である。

## 5. 研究成果 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

### 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, T. Hara, H. Tokutake, H. Nagai: Simulation of Fountain Flow Development in Quadrotor Wake with Symmetry Boundary Condition, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-39, pp. 115-116.

[2] 赤羽峻瑛, 原大生, 大塚光, 得竹浩, 伊神翼, 永井大樹: 頂点効果によるロータ推力変動の評価, 61回飛行機シンポジウム, 北九州, (2023), 1F12.

[3] 大塚光, 加藤優紀, 森健登, 米田将吾, 砂田茂, 得竹浩: プリコニング角に対する横風中のロータピッチングモーメントの評価, 第55回流体力学講演会および第41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, (2023), 2C05.

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（受賞）

第55回流体力学講演会／第41回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 最優秀賞（流体力学部門），プリコニング角に対する横風中のロータピッチングモーメントの評価，大塚光, 加藤優紀, 森健登, 米田将吾, 砂田茂, 得竹浩, 2023.11.21, 日本航空宇宙学会。

課題番号	J23L037
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	1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

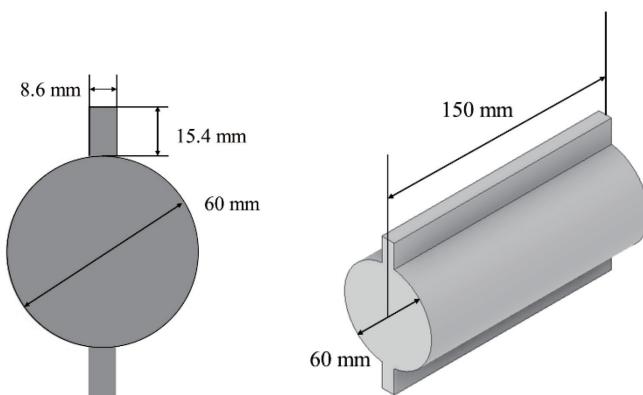
†申請者, ††所内対応教員

## 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現象とマグナス力と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

本研究では、矩形断面のストレートフィン付き円柱を用いて、回転中の流体力変動と流れ場を取得し、対比を行った。図1にフィン付き円柱を示す。矩形断面のストレートフィンが180°離れた位置に取り付けてある（2条）。フィンのサイズは幅8.6 mm (0.14D), 高さ



(a) : 3D view

(b) : 断面形状

図1：ストレートフィン付き円柱モデル

15.4 mm ( $0.26D$ ) である。円柱の回転は、回転速度と主流速  $U_0$  との比である周速比  $\theta$  ( $\theta = D\omega/2U_0$ ) で定義した。ここで、 $\omega$  は円柱モデルの角速度である。

図 2 に、 $\theta = 0.5$ における 1 回転中の揚力変動の結果を示す。フィン位置を示す角度  $\alpha$  は、図中にポンチ絵で描いてある。フィンを  $180^\circ$  離れた対称位置に 2 条設置したため、1 回転中の揚力変動はピークが 2 度存在し、変動の傾向も対称となった。

図 3 に  $\theta = 0.5$  における回転円柱周りの流れ場（渦度センター）の様子を示す。図は、揚力変動の最大値を示す  $\alpha = 45^\circ$  前後の流れ場である。 $0^\circ$  では、フィンの影響はほとんど確認できない。円柱上面には、時計回転の負の渦度層が存在している。その後、フィンの角度が大きくなると、フィンと主流との干渉でフィン背後において渦の成長が起こる（図 3(b) の赤丸印）。この強くなった渦は時間の経過とともに円柱上面に沿うように下流側に流れて

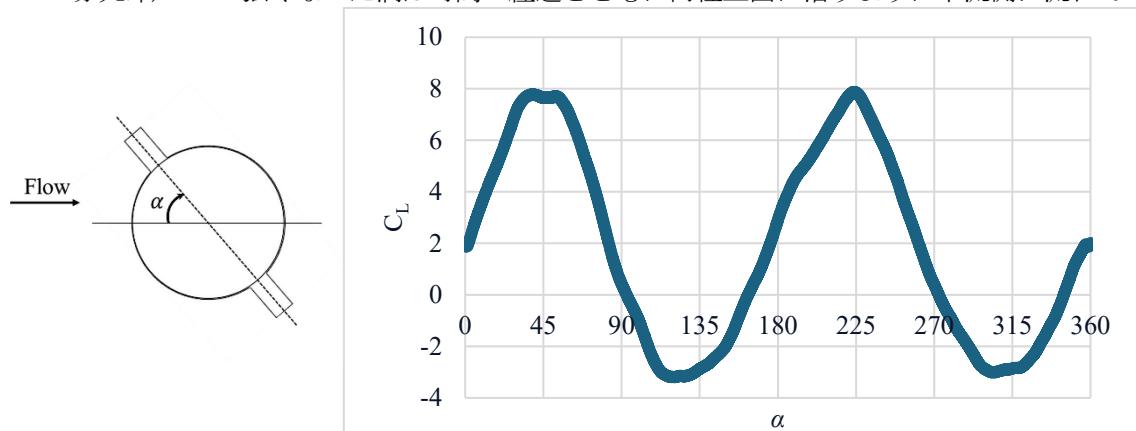


図 2：揚力測定の結果

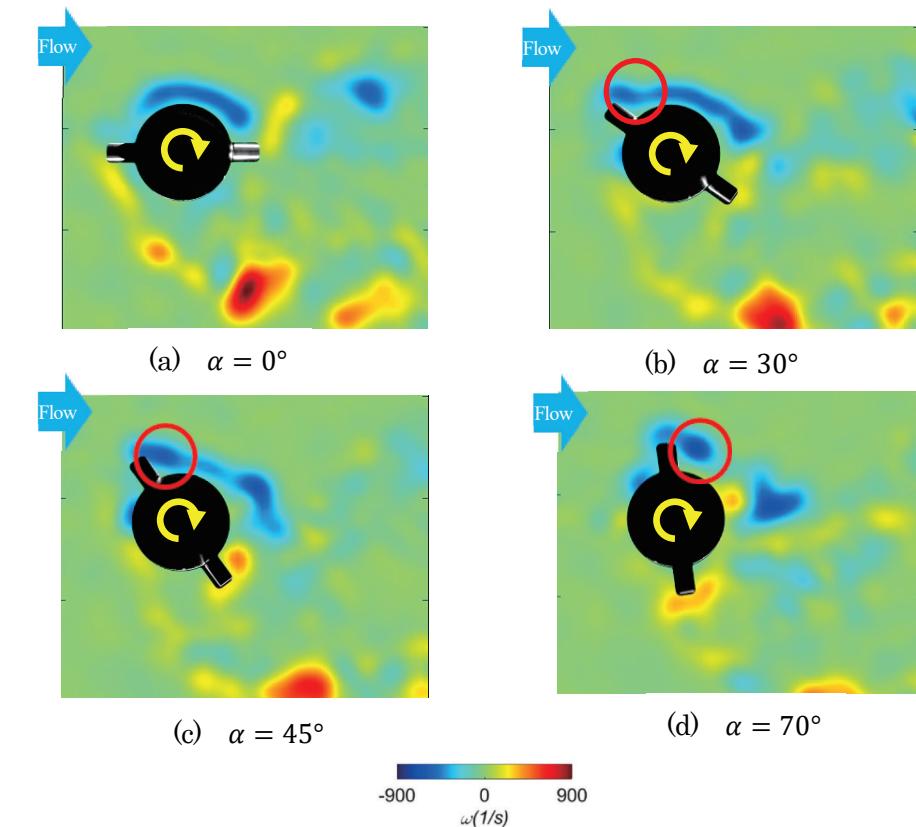


図 3 渦度センター図 ( $\alpha = 0 \sim 90^\circ$ )

いく。さらに、フィン角度が進むとフィンと主流との干渉が大きくなり、フィン背後でより強い渦が確認できる（図 3(c)の赤丸印）。このフィンと主流との干渉で強さを増す渦は、 $\alpha=45^\circ$  を過ぎるとフィンから剥がれ下流方向に放出される（図 3(d)の赤丸印）。このため、円柱上面に沿った流れは弱くなる。それにともない、揚力は徐々に減少していく。

一方、図 4 に 1 回転中の揚力変動が最小となる  $\alpha=120^\circ$  前後の流れ場を示す。円柱下側の流れを見ると、フィンにより反時計回転の正の渦が発生している。この渦は、フィンが上流側に移動するに連れて成長していく。 $\alpha=120^\circ$  付近では、円柱下側に強い正の渦（図 4(b)青丸印）が存在している。この時、円柱上面での負の渦は弱いままである（図 4(b)赤楕円印）。円柱下側に存在する正の渦は、円柱周りの循環を弱める。そのため  $\alpha=120^\circ$  付近で揚力が減少する。その後、さらにフィンが上流側に移動すると、下側の正の渦は円柱から離れて下流方向に流れていく。円柱から離れることで正の渦の影響は小さくなる。あわせて、円柱上面では、負の渦が  $\alpha=120^\circ$  に比べ強くなっている（図 4(c)赤楕円印）。フィンが  $90^\circ$  より小さい角度では、フィンは主流を妨げるよう作用する（主流とフィンとの干渉は大）。それに対して、 $90^\circ$  を超える角度では、フィンは主流を妨げず、逆にフィンに引きずられた流れを円柱表面に吸い込む効果が得られているといえる。こうして、 $\alpha=120^\circ$  を超えると、円柱上面、下面の流れがそれぞれ変化していくことで揚力も徐々に回復していく。

### 3. 研究目標の達成状況

円柱に取り付けたフィンによって引き起こされる流体現象を、矩形断面のストレートフィンを用いて明らかにした。本年度は、フィンの断面形状を変えた際の流れ場への影響までは理解できなかったが、時系列 PIV で渦生成と渦成長という渦の挙動については計測できるようになり、目標は概ね達成できた。

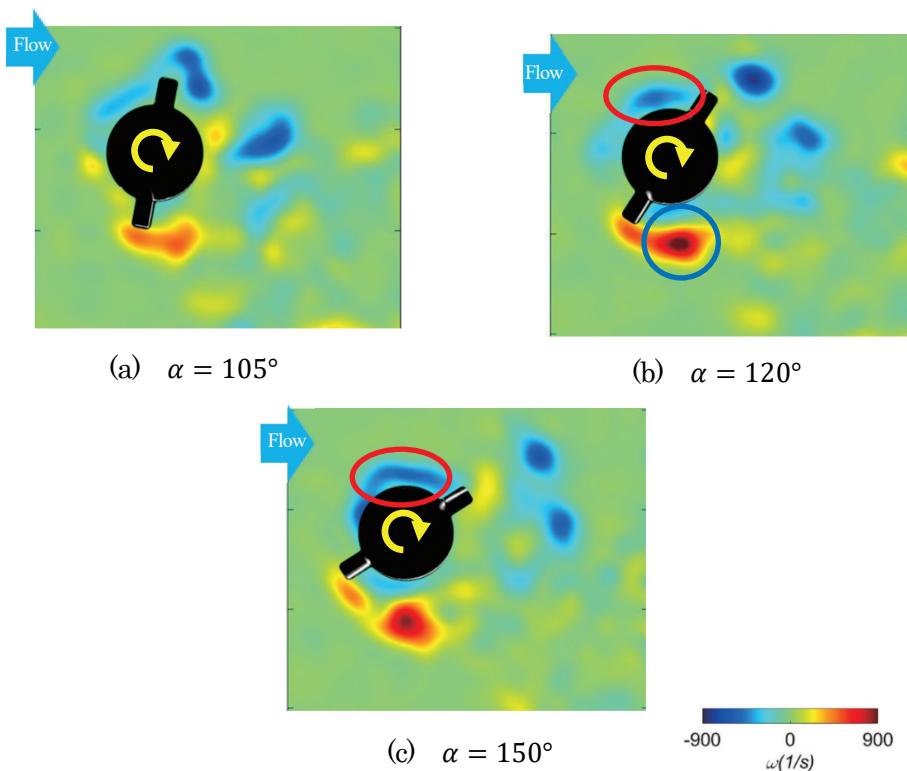


図 4 渦度コンター図( $\alpha = 90\text{--}180^\circ$ )

#### 4.まとめと今後の課題

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った。円柱周りで発生する渦の強さ、位置が上下面での圧力差に関連し、円柱周りの循環に影響することで揚力変動が起こる。そのため、円柱に設けたフィンにより、こうした渦流れを制御できれば、揚力増加につながる。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。また、フィンの断面形状の違いが発生する揚力に与える影響についても明らかにしていく。

#### 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] I. Okuyama, N. Kato, H. Hasegawa: Lift force enhancement improved by fin shape attached to the rotating cylinder for magnus wind turbines, *International Conference on Power Engineering-2023 (ICOPE-2023)* , Kyoto, (2023), 1270.

[2] I. Okuyama, H. Hasegawa, S. Obayashi: Unsteady Flow Fields Induced by Rotating Cylinder with Fins in a Magnus Wind Turbine, *The 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2023)*, Sendai, (2023), CRF-60, pp.167-168

[3] 奥山一氣, 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揚力の変動と流れ場の関係, 日本機械学会東北支部第 59 期総会・講演会, 仙台, (2024), 107.

##### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23L040
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目（発展）

**実効粘度の非接触測定に向けた慣性移動を伴う懸濁液流れの数値的・実験的研究**  
**Numerical and Experimental Study on Suspension Flow with Inertial Migration toward**  
**Contactless Measurement of Effective Viscosity**

川口 美沙\*†, 福井 智宏\*\*

船本 健一\*\*\*††

\*東京農工大学, \*\*京都工芸繊維大学

\*\*\*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

懸濁液のレオロジーを理解することは、様々な分野に関連する重要な課題である。一般に、懸濁液の実効粘度は粘度式によって見積もることができる。しかし、多くの粘度式は、流路壁、粒子位置、粒子間相互作用が懸濁液の実効粘度に与える影響のいずれかを考慮していないか、もしくは時々刻々と変化する微細構造（空間的な懸濁粒子の分布）と実効粘度の評価には適していない。慣性を伴う流路内流れにおいて、懸濁粒子は流れと直交する方向に移動し、速度勾配に起因する揚力と壁面からの反発力が釣り合う平衡位置に集約し(Segre-Silberberg 効果)、粒子分散状態は非一様になる。本研究は、そのような非一様分散状態における圧力駆動される懸濁液流れの粒子分散状態および粒子挙動と実効粘度の関係を明らかにすることを目的とする。

## 2. 研究成果の内容

本研究では、正規化格子ボルツマン法および仮想流束法 (Kawaguchi *et al.*, *Compt. Fluids*, 2022) を用いて、圧力駆動される平行平板間懸濁液流れの数値解析を行った。Doyeux ら (PRF, 2016) が提案した粘度推定法に着想を得て、平行平板間で流動する懸濁液の実効粘度を推定した。計算モデルは、初期に一様に分散したモデル (model HS)，単一粒子のみを含むモデル (model S)，初期に流れに対して垂直方向に 1 列に配置したモデル (model V) を用いた。懸濁液流れの数値計算結果から得られる実効粘度 (図 1, 黒丸) に対し、初期に粒子-壁面間距離が異なる model S を用いた計算結果から粒子 1 個当たりの寄与を元に推定される実効粘度 (図 1, 赤アスタリスク) は高濃度ほど数値解析結果よりも高い値となった。一方、model V の粒子 1 個当たりの寄与を元に重ね合わせによって推定される実効粘度 (図 1, 赤三角) は計算した濃度の範囲では数値解析結果に近い値となった。これらのことから、一様分散懸濁流れでは、鉛直モデル (model V) における粒子間の流体力学的相互作用が有効粘度への寄与を小さくしていることが推察される。

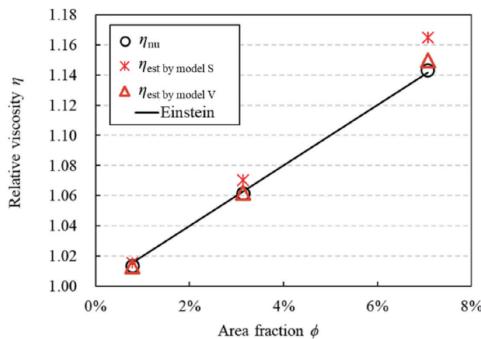


図 1：初期に一様に分散している懸濁液流れにおける粒子濃度に対する相対粘度. 実線は Einstein の粘度式の結果であり, 推定値( $\eta_{est}$ )は一粒子あたりの粘度への寄与から推定した値.

### 3. 研究目標の達成状況

当初予定していた実験結果と数値計算結果の直接比較までは達成できなかった. しかし, 数値計算において, 流体力学を受けて並進・回転運動をする粒子の運動を能動的に制御することで, 粒子の運動が, 懸濁液の実効粘度に与える影響について調査することができた. これにより, 粒子挙動および流体力学的相互作用に関する新たな知見が示唆され, 垂直方向の粒子間相互作用は実効粘度の低下につながり, 並進粒子速度は粒子間の局所粘度分布に影響することが示唆された.

### 4. まとめと今後の課題

本研究では, 圧力駆動される懸濁液流れにおける粒子分散状態および粒子挙動と実効粘度の関係を明らかにすることを目的として, 数値解析を行った. Segre-Silberberg 効果による懸濁粒子の非一様分散における実効粘度推定のため, 複数の解析モデルを用いて実効粘度の推定を行った. その結果, 一様分散状態における懸濁液の実効粘度には, 垂直方向の粒子間相互作用による実効粘度低下の影響が含まれていることが示唆された. 今後は, 局所実効粘度分布の推定および粒子の回転運動および流体力学的相互作用の影響を定量的に評価し, これらの結果をまとめて論文投稿を目指す.

### 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] Misa Kawaguchi, Tomohiro Fukui, Kenichi Funamoto, Effective Viscosity Estimation Using Resultant Wave of Wall Shear Stress Distribution in Plane Poiseuille Suspension Flow, 20th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2023), OS11-3, pp. 704-705.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(受賞)

Best presentation Award for Young Researcher, Effective Viscosity Estimation Using Resultant Wave of Wall Shear Stress Distribution in Plane Poiseuille Suspension Flow, Misa Kawaguchi, Tomohiro Fukui, Kenichi Funamoto, 2023 年 12 月, 20th International Conference on Flow Dynamics.

課題番号	J23L042
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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2**  
**Measurements of Fundamental Physical Properties of Functional Fluids for Efficient**  
**Subsurface Developments II**

澤山 和貴\*†, 棕平 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

単純な流路モデルを設計し、対応研究者の棕平助教のラボで機能性流体を用いた流路閉塞実験を行い、同時に弾性波速度をテスト計測した。その結果、より精緻な結果を得るために、流路モデルの大きさに応じて測定周波数の影響を詳細に検討する必要があることが明らかとなった。そこで小型の流路モデルを3Dプリンタで設計し直し、申請者のラボで予備実験を複数行い、測定周波数の影響を検討した。

まずは予備実験用に測定システムを構築した（図1）。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（WF1974）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（DLM5034）で記録した。初動の到達走時と送受信トランステ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。送受信器にはフジセラ製のトランステューサを用いた。入力パルスは振幅10Vの正弦波形に設定し、測定周波数は0.1, 1, 3, 5MHzと変化させた。なおS/N比を改善するため、透過波形は1000回以上スタッカ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速度を計算した。

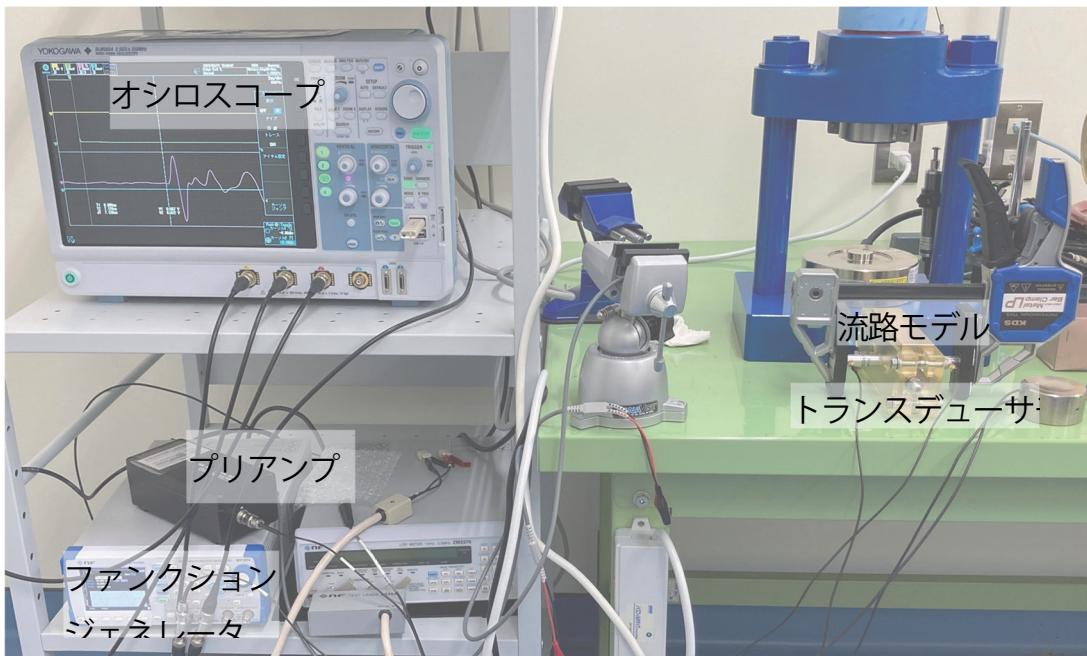


図 1：予備実験用の実験レイアウト

測定の結果、流路中の流体が空気、水、粘性標準流体と粘性が上がるにつれて、透過波の到達時間が早くなつた（図 2）。これは、流路の中の粘性状態の変化が地震波速度で検知可能である可能性を示唆している。P 波速度を解析すると、測定周波数 5 MHz の時の速度変化が最も大きく、空気の場合が 2960 m/s、水の場合が 3370 m/s、標準粘性流体の場合が 3750 m/s であった。さらに Voigt 平均による理論計算の結果、機能性流体が固化した場合は、さらに 170% の速度増加が見込まれる結果となつた。

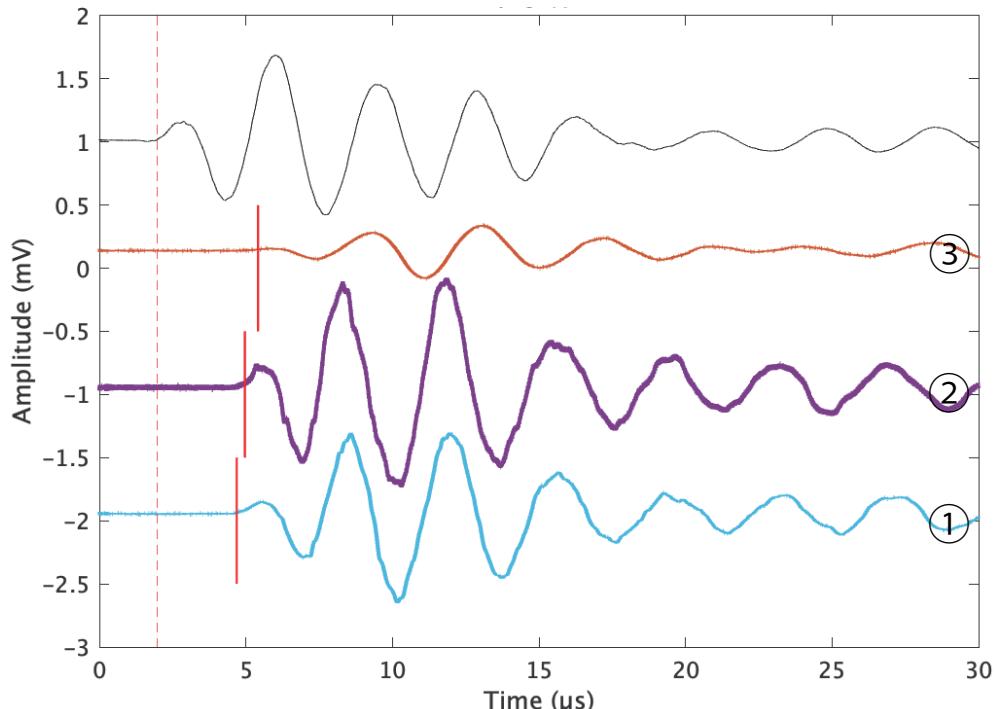


図 2：周波数 5 MHz の測定結果波形。黒線は送信波形、色つきの線は透過波形で、流路内がそれぞれ①空気、②水、③粘性標準流体のときの結果。

### 3. 研究目標の達成状況

- ① 機能性流体の固化による弾性波速度測定
  - ・測定レイアウトを確認し予備実験を行った.
  - ・測定条件に関する詳細な検討が必要との課題が明らかとなった.
- ② ①を可能とするための最適測定条件の探索
  - ・流路モデル内の流体を空気・水・標準粘性流体の3パターンに変化させ、弾性波速度を実測した.
  - ・測定周波数の影響を検討し、理論モデルとの比較から有意な速度変化であることが確認できた.
  - ・この試算をもとに①の実験レイアウト・測定システムを再構築し、本実験を行うのが次なるステップである.

### 4. まとめと今後の課題

機能性流体が固化した場合の地震波速度検知を目的として、流路内の流体が置換した場合の速度測定システムを構築した。測定周波数の検討の結果、流体の粘性が高くなるにつれて速度が大きくなる傾向が確認され、予備実験のレイアウトでは周波数5MHzの時の速度変化が最も大きい結果となった。さらに Voigt 平均による理論計算の結果、機能性流体が固化した場合は、さらに 170% の速度増加が見込まれる。この測定条件をもとに、今後は実際に機能性流体が固化した場合の速度測定に挑む。

### 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. Sawayama, Y. Mukuhira, Z. Rongchang, T. Ito, Acoustic Measurement on Basic Physical Properties of Functional Fluids for Innovative Underground Development, *The 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-9, pp. 41-42.

#### 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	J23L048
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	1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\*\*††

田中 大\*, 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燃焼させると燃費の低減と NO<sub>x</sub> や黒煙など有害排出ガスの低減効果が確認されている。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。しかしながら、なぜ熱発生率が向上したのか、燃焼時間が短縮したのかについては不明である。そこで、本共同研究によりファインバブル混入燃料の燃費低減のメカニズム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 にエジェクタ式ファインバブル発生器を示す。発生器の長さは 34mm、直径は 20mm である。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碎かれファインバブルが生成される。

図 2 は、Phase Doppler Particle 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、エジェクタ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。微細気泡発生装置は循環ポンプと混合分級槽を有し、連続的に微細気泡燃料 (FBF) を生成する。混合分級タンク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 CORIFLOW 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。実験セットアップの制限から、本研究では軽油の代わりにエタノールを燃料として使用した。

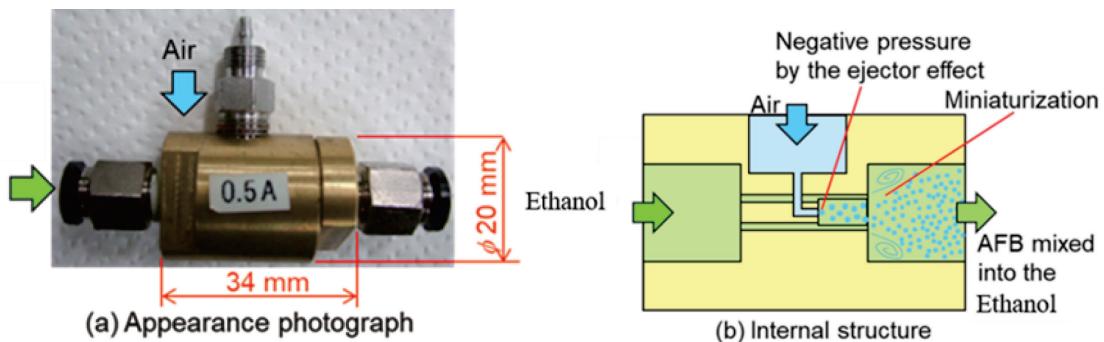


図 1：エJECTA式ファインバブル発生器

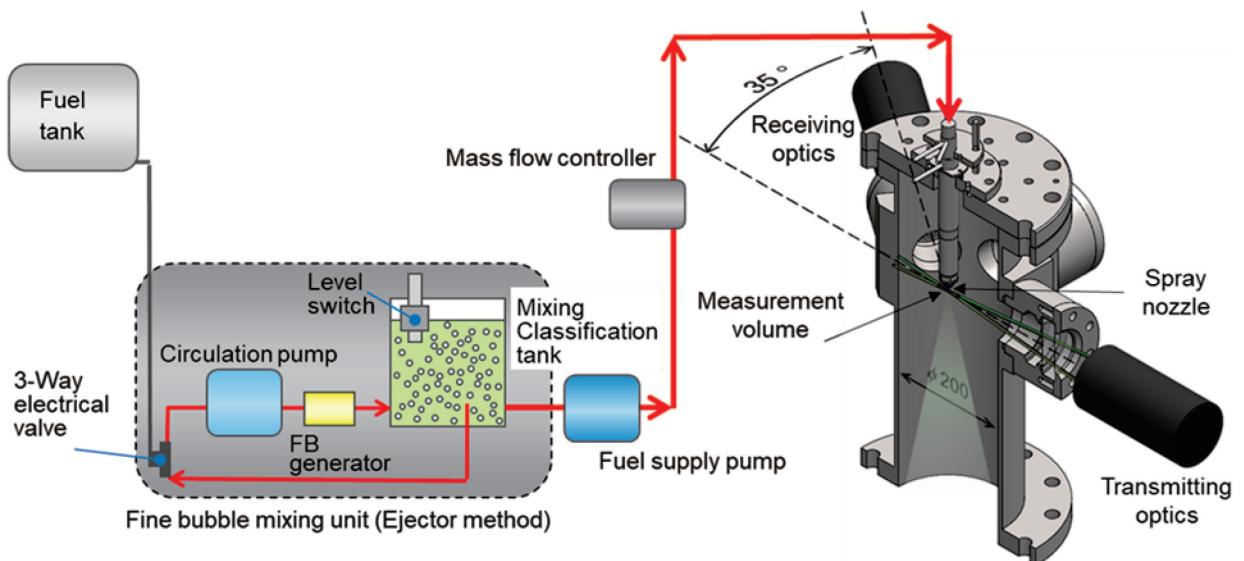


図 2：PDPA による噴霧粒径計測の概略図

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) の噴霧形状を測定するため、高速バックライトイメージ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霧圧力条件での、ファインバブルが噴霧形状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る。

図 3, 4 は MATLAB によって画像処理や解析が行われた結果をまとめたものを示す。図 3 の上段は CF の噴霧形状、下段は FBF の噴霧形状、列は各霧圧力の CF と FBF の噴霧形状をそれぞれ示す。図 4 の横軸はチャンバー内の霧圧力、縦軸は FBF と CF の噴霧角を示す。

FBF と CF 噴霧角の違いについて比較すると、FBF の液滴が CF の液滴に比べ貫通力が弱いため、FBF の噴霧角は CF の噴霧角よりも小さい。両者の噴霧角は霧圧力の上昇に伴い減少した。また、FBF と CF の噴霧角の差は霧圧力の増加とともに拡大した。よって FBF の噴霧角は CF の噴霧角よりも霧圧力により影響を受ける。

上記より、FBF の噴霧は CF の噴霧に比べて、ノズル先端から高さ 4.2mm 付近の噴霧エッジ外側の液滴数が減少し、これにより噴霧角が低下する。

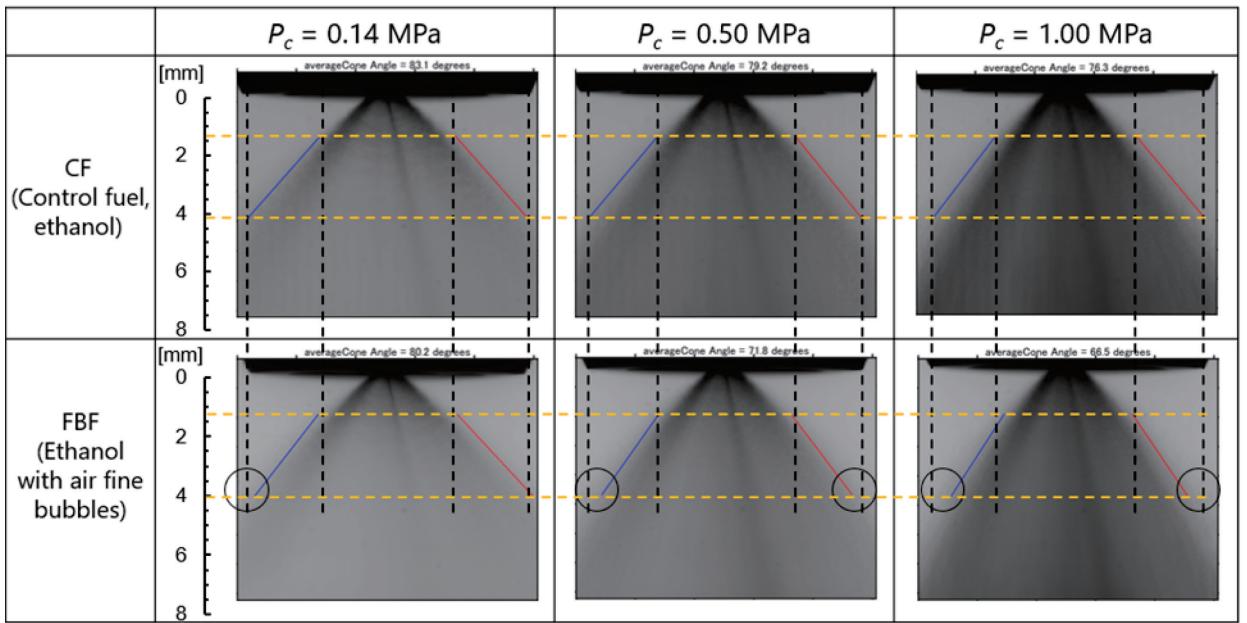


図 3: CF と FBF の各霧囲気圧力下の噴霧形状

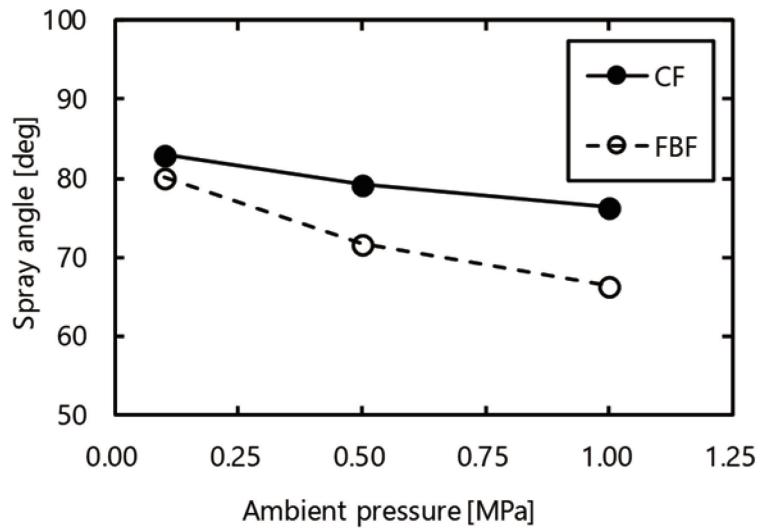


図 4 : 噴霧角に対する霧囲気圧力の影響

図 5, 6 に PDPA よって計測された位置  $r = 5 \text{ mm}$ ,  $z = 5 \text{ mm}$  および  $r = 5 \text{ mm}$ ,  $z = 10 \text{ mm}$  の FBF と CF の各霧囲気圧力に応じたザウター平均粒径 (SMD) を示す。

FBF の SMD は  $z = 5 \text{ mm}$ ,  $r = 5 \text{ mm}$  において CF の SMD よりも小さいこと計測された。しかし,  $z = 5 \text{ mm}$  以外の測定点では, FBF の SMD は CF よりわずかに大きい傾向が見られた。また, 液膜直後を除く測定点での FBF の SMD は CF よりも大きくなる傾向があった。加えて, CF と FBF の SMD は霧囲気圧力に依存し, 霧囲気圧力の増加に従って SMD も増加することが明らかになった。このことから液膜直下で溶解した空気の再析出により, 一次微粒化が促進される傾向にあり, これによって液滴数が増加し, 液滴の合一が促進される。

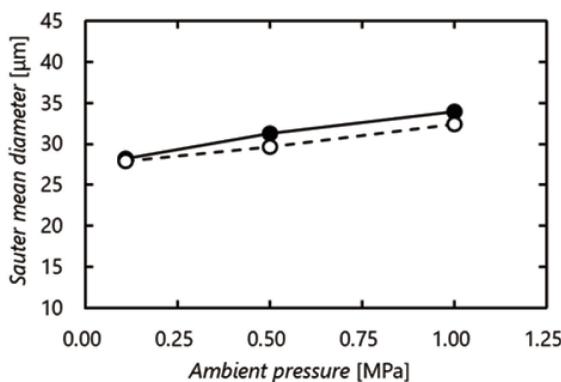


図 5：ザウター平均粒径に対する雰囲気圧力の影響 ( $r=5$  mm,  $z=5$  mm)

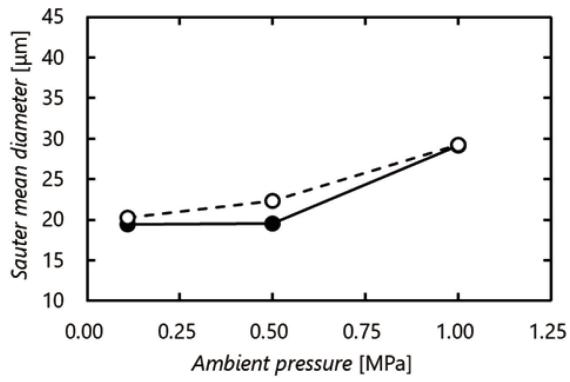


図 6：ザウター平均粒径に対する雰囲気圧力の影響 ( $r=5$  mm,  $z=10$  mm)

### 3. 研究目標の達成状況

燃料としてエタノールを用いたファインバブルを混入した燃料の燃費低減メカニズムについて、噴霧された液滴の微粒化促進が明らかとなった。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、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、ファインバブル添加が噴霧特性に及ぼす影響を調べた。主な結果を以下に示す。

- FBF の噴霧角は CF に比べて、小さくなる。
- FBF の噴霧は CF に比べ、雰囲気圧力の影響を大きく受ける
- FBF の噴霧は CF の噴霧に比べて、一次微粒化を促進する。

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

[1] Jumpei Obata, Yasuhito Nakatake, Hiroshi Tanaka, Hirofumi Yamashita, Akihiro Hayakawa, Atomization and Combustion Characteristics of Fine Bubble Fuel, Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2023), CRF-3, pp. 23-24.

#### 3) その他 (特許、受賞、マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

課題番号	J23L051
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1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

航空機の機体とエンジンは別に設計開発されている。機体はエンジン吸排気の影響を、エンジンは機体（特に主翼）の影響を、相互に受けるため、各設計ではモデル化により相互作用に対応する。今後主流になると予測される高バイパス化・ショートナセルエンジンの設計では、過去のデータベースがないため、モデル化には再度膨大な実験・開発が必要となり非現実的である。本研究では、稼働状態のエンジンを含む航空機全機の大規模統合解析を実施し、次期航空機の設計開発プロセスを加速させる。

## 2. 研究成果の内容

NASA Rotor67 を参考に作成したエンジン（ディフューザ・パッセージ・22枚の動翼で構成）と、NASA Common Research Model を参考に作成したエアフレーム（胴体・主翼・パイロン・ナセルで構成）を統合解析した。解析には、JAXA 開発の sliding mesh 法対応型 3 次元圧縮性 Navier-Stokes ソルバ FaSTAR-Move-AE により非定常解析を行った。その結果、巡航条件下での安定的計算が行え、1989 年実施の NASA 実験条件を再現した定量的な

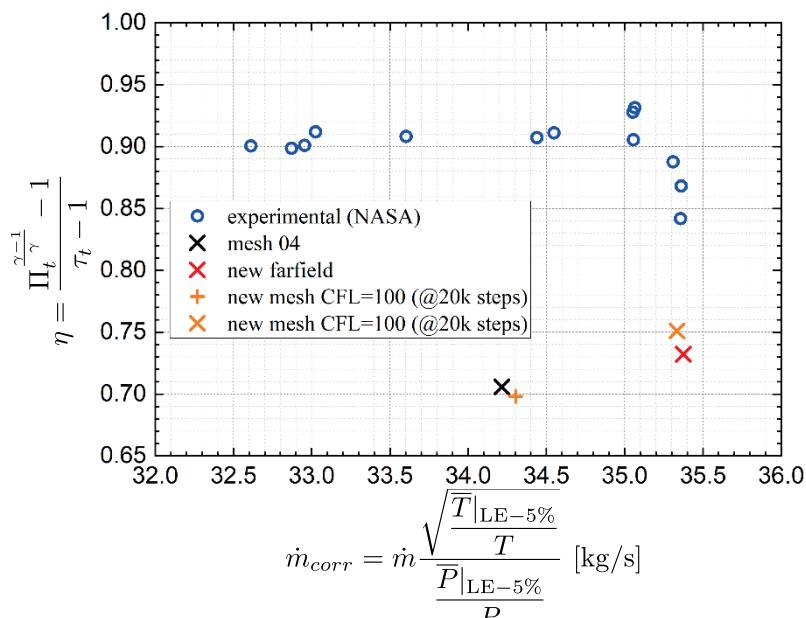


図 1：修正質量流量 vs. ロータ断熱効率

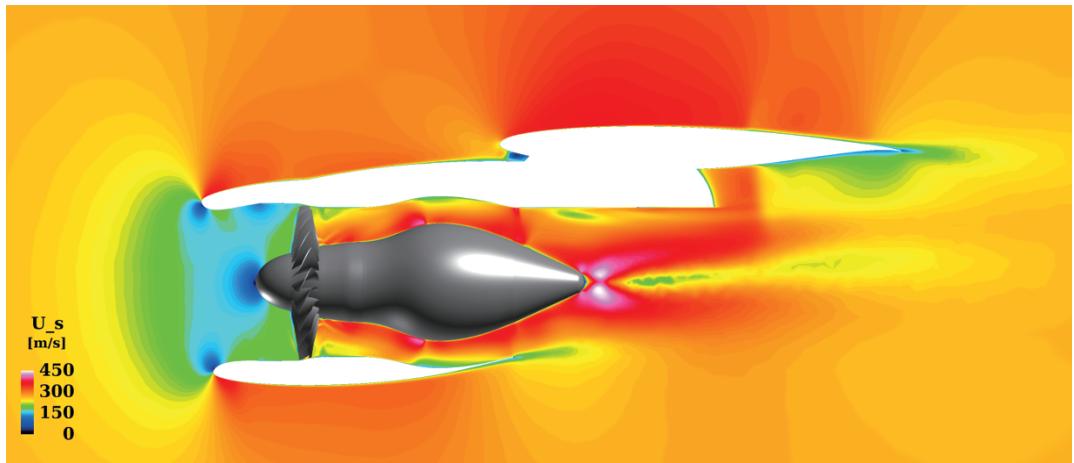


図 2 : エンジン内部を含む  $x$ - $z$  断面での  $U$  方向速度分布

データ比較 (図 1) と詳細な物理現象の捕捉 (図 2) に成功した.

### 3. 研究目標の達成状況

Sliding mesh 法への移行により, 解析時間を 1/10 程度に圧縮し, 現実的な計算時間で案的的な解析を行えるようになった. 当初目標の巡航条件での機体と稼働エンジンとの相互干渉効果をモデル化なしに捕捉した.

### 4. まとめと今後の課題

機体と稼働エンジンを統合した形態に対する, 巡航条件での安定的な frozen-rotor 解析の実施に成功した. 本統合解析の威力を最も発揮する, 巡航条件以外の非設計点での transient-rotor 解析の実施が次の課題である.

### 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] Mueller, J., Chiba, K., Oba, Y., and Obayashi, S.: Aerodynamic Effect of Engine Exhaust on Aircraft Whole Body - Integrated Analysis of Airframe and Running Engine Using Sliding-Mesh Method, *20th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, 6-8 November 2023.
- [2] Mueller, J., Chiba, K., and Oba, Y.: Influence of the Engine Exhaust on the Wing Pressure Distribution Computed with an Integrated Simulation of Airframe and Running Engine, *AIAA AVIATION 2023*, San Diego, CA, USA, 12-16 June 2023.
- [3] Mueller, J., Chiba, K., and Oba, Y.: Influence of Engine Exhaust on Wing Underside Flow for a Passenger Aircraft, *22nd Computational Fluids Conference*, Cannes, France, 25-28 April 2023.
- [4] 千葉 一永, Mueller, Jan, 大庭 芳則: Sliding mesh 法による稼働エンジンと機体の統合解析, 令和 5 年度航空宇宙空力シンポジウム, 神奈川県三浦市, 19-20 January 2024.
- [5] Mueller, Jan, 千葉 一永, 大庭 芳則: Sliding mesh 法による航空機体と稼働エンジンの統合解析, 第 37 回数値流体力学シンポジウム, 名大, 15-17 December 2023.

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	J23L052
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目

**3Dスキャンとプリントによる物理的き裂モデル**  
**Physical Fracture Models by 3D-scanning and -printing**

Michael Kröhn\*†, Anna Suzuki\*\*††

\*GRS gGmbH

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

## 1. 研究目的

実験用のパーツをデジタルで作成し、その形状を繰り返しプリントすれば、同じ形状を使った並行テストが容易に実現できる。一方、実際の3Dプリントプロセスにおける不正確さは、プリンターの所定の精度限界の範囲内で考慮されることが多いが、それ以外の不正確さの原因については、一般的にそれ以上調査されることはない。これまでには、Formlabs®のForm 3ステレオリソグラフィ(SLA)プリンターが流動試験用の実験セットアップを3DプリントするためにGRSで使用された。本研究の目的は、その試験のために作製された3Dプリントサンプルの精度と再現性を調査することである。この研究では、3Dプリンターよりも精度の高い3Dスキャナーを利用して精度を評価する。また、印刷された材料が水と接触した際に発生する可能性のある水分の取り込みについても評価する。さらに、異なるプリンターを使用した実験の再現性についても議論する。

## 2. 研究成果の内容

### 2.1 印刷精度

水力実験を繰り返す場合、理想的には、同じ構造でプリントしたサンプルが同じ結果を示すことを期待する。しかし、3Dプリンターの精度や使用される材料が結果に影響を与える可能性がある。本研究では、水圧実験と同様の条件下で、印刷プロセスとFormlabs®の印刷材料「clear」の挙動を評価した。印刷プロセス中にはみ出した部分が破損するのを防ぐために、CADファイルに記述された形状に追加される支持構造、または追加の支持材料のいずれかを使用するのが一般的である。サポート方法は3Dプリンターの選択によって決定されるため、以下の考慮事項は3Dプリンターの種類によって異なる可能性がある。プリンターの精度は、3つの空間方向すべてにおいて同じとは限らない。このような場合、印刷方向が印刷精度を考慮する決定的な要因となる。

測定のために、角度30°, 45°, 60°の3つの平面からなるサンプルを作成し、Form 3プリンタで2回印刷した。印刷プロセスの再現性と、印刷されたオブジェクトと下層のstlファイルとの間の偏差をチェックした。この目的のために、GRSで2つの印刷サンプルの3Dスキャンを17 μmの解像度で行った。

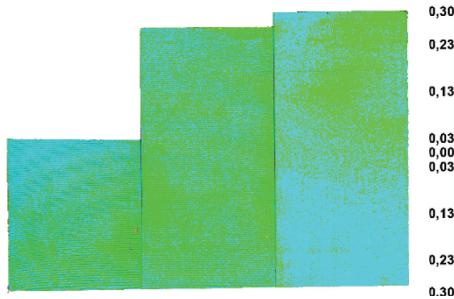


図 1 : 2 つの印刷サンプルの偽色比較.

## 2.2 水との相互作用

基本的にすべてのプラスチック材料と同様に、印刷プラスチックは水を取り込む。ほとんどの水圧破壊試験では水が使用されるため、透明な印刷材料の吸水挙動は特に興味深い。最初の試験シリーズでは、1辺の長さが 1cm の印刷立方体の吸水挙動を異なる条件下で測定した。使用する印刷材料が透明であるため、3D スキャンによる立方体の体積変化を測定することはできなかった。

印刷材料の吸水量を測定するため、32 個のキューブを印刷し、吸水量を最小にするためにパラメータを変化させて後処理を行った。制御されたパラメーターは、イソプロピルアルコールによる洗浄時間と、UV 光硬化チャンバーでの硬化時間と温度であった。この工程の後、支持構造を取り除き、すべてのキューブの重量を最初に測定した。その後、スクリュートップ瓶に入れたキューブを水道水に沈めた。サンプルの重量を定期的に測定したところ、250 日後でもキューブは最終重量に収束することなく水分を取り込んでいた。

印刷物は液体の水との接触だけでなく、大気中の水蒸気への暴露によっても影響を受ける。この影響を定量化するためには、周囲の湿度と温度をコントロールすることが不可欠である。この目的のために、Vapor Sorption Analyser (VSA) が導入された。VSA は、統合された高感度スケールを備えた制御可能な小型気候チャンバーを提供する。使用した Formlabs 材料の等温線が測定された。

印刷材料の乾燥挙動も試験した。この研究のために、液体水による取り込み試験から 3 つのキューブを 1 カ月後に取り出し、乾燥剤を入れたデシケーターに入れた。乾燥過程でのキューブの重量も定期的に測定した。約 60 日後、キューブは最初の重量より軽くなっていた。それでも測定は続けられ、さらなる乾燥が観察された。

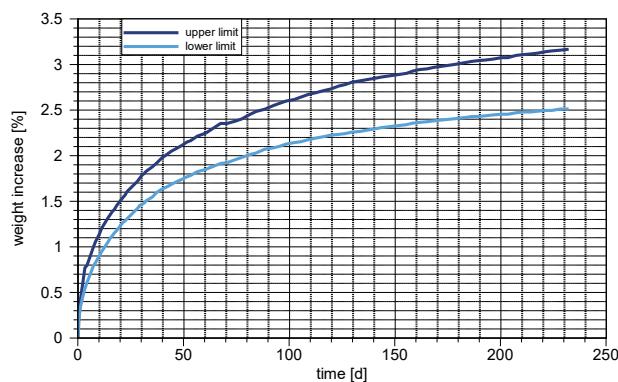


図 2 : 印刷サンプルの吸水率の経時変化.

### 2.3 CAD ファイルの転送性

同じプリンターで印刷した製品の再現性を確認した後、異なるプリンターで印刷したサンプルを用いた実験の再現性に関する最初のテストが行われた。すでに 2017 年に、100 以上の平行平板破断を有する DFN を含む円筒状サンプルが作成されている。これは 3D Systems 社の ProJet™ HD 3000 Plus プリンターで印刷された。このプリンタはサポート材を使用するため、サポート材を溶解するためのさまざまな溶媒がテストされ、CT スキャンを用いてその効率が比較された。その後、サンプルの透過性測定が行われた。同じ参照データに基づき、2 つのサンプルが同様のプリンターで印刷され、GRS 研究所で実験が繰り返された。その間に、新しい支持体材料が開発され、旧製剤よりも水に溶けやすくなつた。そのため、GRS での実験では、支持体の溶解には水と超音波洗浄機のみを使用した。

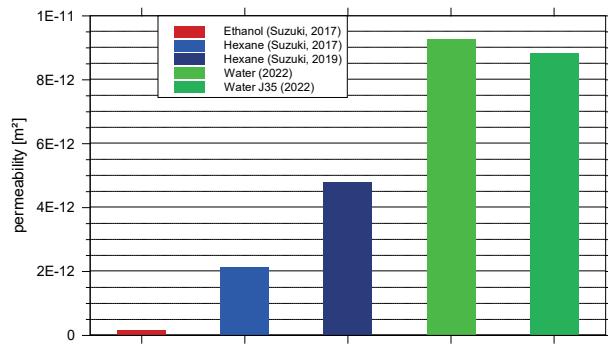


図 3：同じ参照データに基づき、印刷された DFN サンプルの浸透率測定。

### 3. 研究目標の達成状況

直感的には、CAD によって（数値精度の範囲内で）正確に作られた物体は、3D プリントによって実世界の鏡像になると 생각くなる。しかし、参照ファイルと 3D スキャンプリントの間に比較的大きな偏差があることから、そう考えず、実験に使用する前にプリントしたサンプルをチェックする必要性が浮き彫りになる。現在、この目的のために選択されている機器は、表面形状用の 3D スキャナーか、内部構造用の CT スキャナーである。ここでも、どの測定装置にも有限の精度があることを念頭に置くことが肝要である。本研究で説明した変形は、適用された印刷方法の不可欠な部分である支持構造によって引き起こされる可能性がある。異なる支持体を持つプリンターを使用する場合、さまざまな種類の偏差や表面効果が考えられる。とはいっても、印刷プロセスの再現性は所定の精度範囲内にあることが確認され、これは印刷サンプルを用いた並行実験にとって有益である。また、3D プリンター間の CAD ファイルの互換性は、プリンターの開発レベルが異なる印刷サンプルで同様のテスト結果を再現することで実証できた。水と接触すると、印刷サンプルは水分を取り込み、変形する傾向がある。これらの変形の影響は、水への暴露時間に大きく依存する。原理的には、相対湿度の低い環境での乾燥にも同じメカニズムが適用されるが、その方向は逆である。水力実験の実行時間を最適化することで、避けられない変形を管理可能な範囲まで減らすことができる。

### 4. まとめと今後の課題

破断面や DFN のレプリカの 3D プリントは、水力実験に使用できる有望な技術である。その可能性を最大限に活用するためには、起こりうる誤差の原因をすべて考慮に入れることが不可欠である。そのいくつかは本研究で指摘したが、さらなる調査が必要である。3D プリンターで作製したサンプルを用いた実験は、再現性というトピックをより深く検討するた

めに継続する予定である。単一のき裂レプリカを含む水圧試験に基づく別の比較実験を行う予定である。実験装置は IFS と GRS で 3 回プリントし、その後 GRS で 3D スキャンする予定である。さらに、プリントの違いが実験結果に与える影響を定量化するため、GRS の研究室で 6 つのサンプルすべてについて流動試験を実施する。

## 5. 研究成果

### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] M. Kröhn, A. Suzuki: Accuracy Considerations Concerning 3D Printed Fracture Models, The 20th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2023), pp. 923-926.

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23L053
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	2023.4 ~ 2024.3
継続年数	3年目

## 数値流体力学解析と細胞実験による血管疾患の機序解明

Elucidation of Mechanisms on Vascular Diseases

by Integration of Computational Fluid Dynamics Analysis and Cellular Experiment

宮内 優†, 船本 健一\*\*†, 津田 晋吾\*\*

曾根 一輝\*\*, 柳田 翔平\*\*, 茂 零音\*

\*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

高齢化や生活様式の変化によって血管疾患の患者数は年々増加しており、国内外において高い死亡率を占めている。これまでの研究において、血流動態と血管疾患の関連性が多く報告されているが、細胞動態、血流現象、疾患の発症・進展の間で時空間スケールが大きく異なるため、それらの相互作用の詳細は明らかとなっていない。本研究では、血管疾患として微小血管網の虚血再灌流障害と左心室内の血流動態を対象に、数値流体力学解析と細胞実験を実施する。また、それらを融合することで、血流動態と血管疾患の関連について明らかにすることを最終的な目標とする。

本年度は、以下の2点について研究を実施した。(i) 大動脈三尖弁と開口形状や位置が異なる5種類の大動脈二尖弁を設置した数値流体力学解析により、大動脈弁の形状が左心室内の血流動態に及ぼす影響について調べた。また、(ii) 血管透過係数を推定するデータ同化手法については、透過係数が過大評価される原因を明らかにし、その補正方法を提案した。

### 2. 研究成果の内容

#### (i) 大動脈弁の形状が左心室内の血流場に及ぼす影響の解明

大動脈は動脈瘤などの循環器系疾患の好発部位であり、その発症・進展には上流に位置する左心室から流入する血流が大きな影響を及ぼしていると考えられる。大動脈弁は一般的には三つの弁尖からなる三尖弁であるが、全人口の約0.5~2.0%は生まれつき弁尖が2つしかない二尖弁である。二尖弁である患者は、大動脈解離や大動脈瘤などを発症する割合が高いことが知られている。本研究では、三尖弁と開口方向の異なる5種類の二尖弁に対して数値流体力学解析を行い、それらを比較することで弁形状が左心室内の血行動態に与える影響を調べた。各モデルの弁開口形状および左心室全体の計算格子を図1に示す。弁を除く左心室の形状は全てのモデルで同じである。開口部面積はModel Tが4.20 cm<sup>2</sup>、Model B0<sub>lat</sub>、B0<sub>ap</sub>が1.84 cm<sup>2</sup>、Model B1<sub>LR</sub>、B1<sub>RN</sub>、B1<sub>NL</sub>が1.60 cm<sup>2</sup>である。数値流体力学解析には熱流体解析ソフトウェア(Fluent 17.2, ANSYS, USA)を用いて7心周期まで解析を行い、左心室内の血流の変化がほぼ周期的となる4週目以降の計算結果について考察を行った。

血行力学パラメータの一つである時間平均壁せん断応力(TAWSS)の分布を図2に示す。三尖弁モデルModel Tと比較して、二尖弁モデルModel B0およびB1では、TAWSSが大動脈弁の辺縁部において上昇していることがわかる。これは大動脈弁の開口部面積が三尖弁モデルに比べて半分以下と小さく、拍出速度が大きくなっていることが原因と考えられる。定量的な比較を行

うため、大動脈弁を取り付けた平面の各節点の TAWSS を抽出し、算術平均を計算した（図 2）。図より、大動脈弁以外は同じ左心室形状を有するモデル間でも、身体に対して前後方向に開口するモデル（Model  $B0_{lat}$  および  $B1_{NL}$ ）では、大動脈弁縁部の TAWSS が低いことがわかる。また、身体に対して上下方向に開口するモデル間では開口部が左に位置するモデル（Model  $B1_{LR}$ ）ほど TAWSS が高いことが分かった。

TAWSS が高かった二尖弁のモデル Model  $B1_{LR}$  および  $B0_{ap}$  では、直線状の速度ベクトルが大動脈弁開口部で衝突しているが、TAWSS が低い二尖弁のモデル Model T および  $B0_{lat}$ 、 $B1_{NL}$  では渦様の速度ベクトル分布が観察された（図は省略）。三尖弁の Model T においても渦様の流れが観察されることから、これら渦様の拍出血流が正常な流れと考えられる。これに対し、身体に対して上下方向に開口するモデル（ $B1_{LR}$  および  $B0_{ap}$ ）では、この渦様の流れが大動脈弁開口部で阻害されて直線状の速度分布に変化し、大動脈弁近傍で大きく加速するために血流の速度勾配が高く、結果としてせん断応力の上昇につながっていると考えられる。

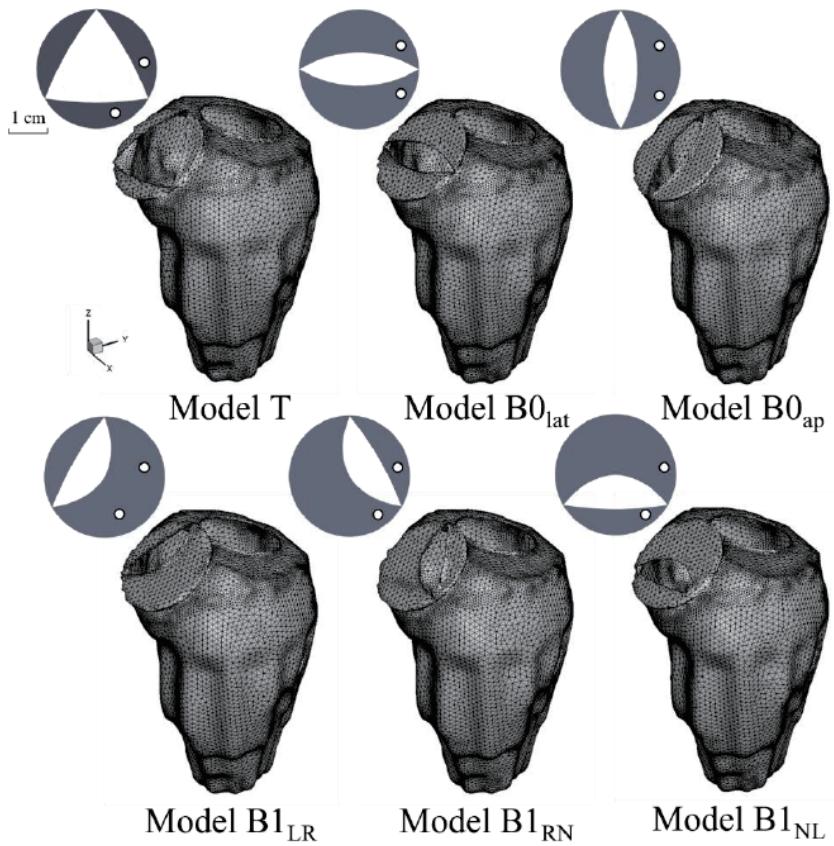


図 1 大動脈弁モデルの形状と左心室モデルの計算格子。

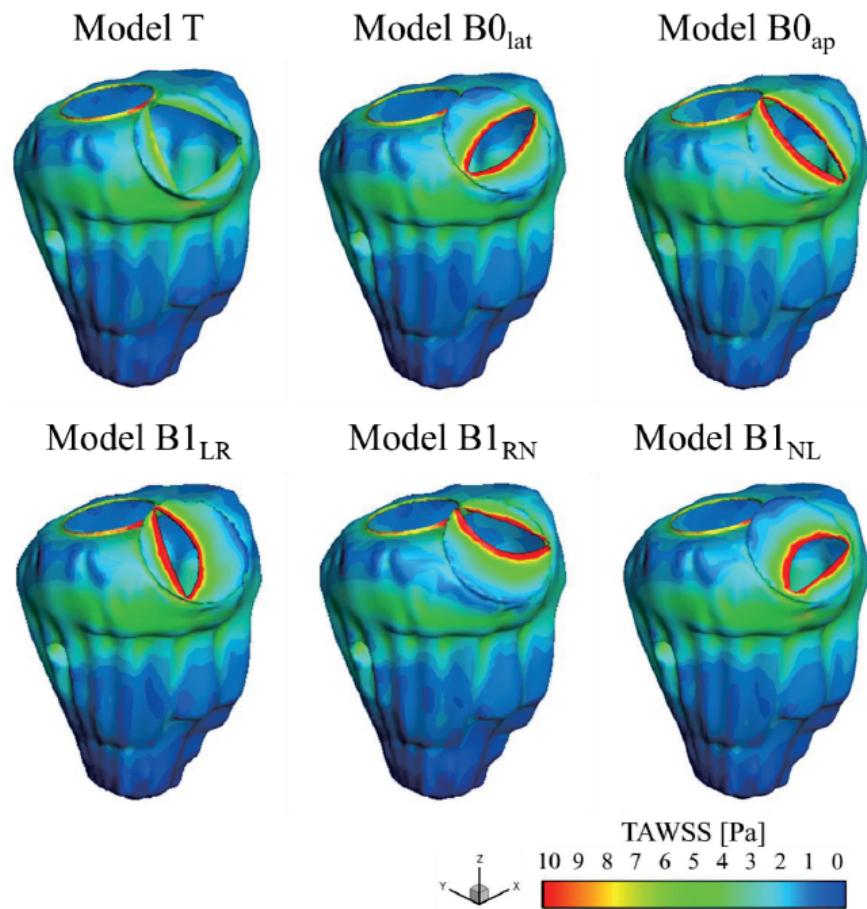


図2 各左心室モデルのTAWSS分布.

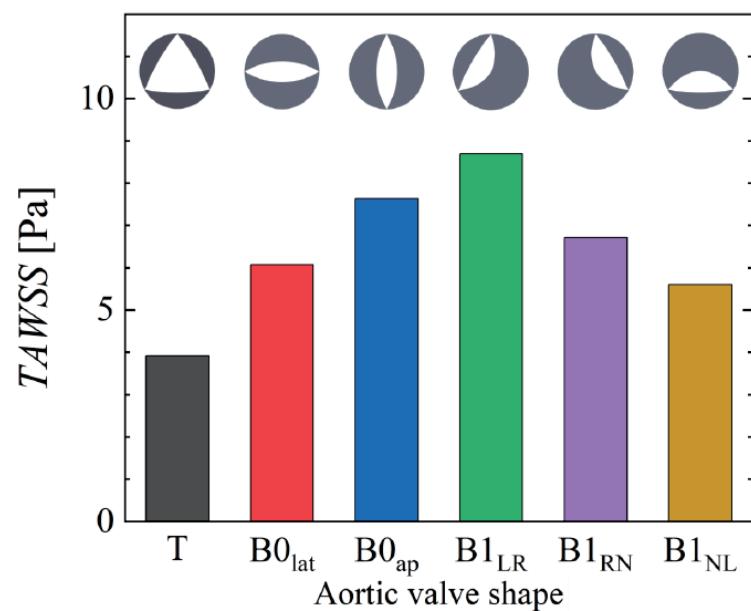


図3 大動脈弁近傍のTAWSSの平均値.

## (ii) 血管透過係数を推定するデータ同化手法

血流と組織間の物質交換を制御する血管透過性は、生体内の恒常性維持のために血管壁が有する重要な性質であり、その異常は種々の血管疾患を誘発することが知られている。我々は血管壁上の透過係数分布を求める方法として、データ同化による血管透過性の推定手法を提案している。これまでの研究より、擬似的に作成した正規分布に従う計測ノイズを含んだ濃度計測データに対してはノイズが大きいほど推定された透過係数の平均値が過大評価されることがわかった。本研究では、透過係数が過大評価される原因を明らかにし、その補正方法を提案することを目的とした。

図4はSNR（計測ノイズ）に対する推定誤差の変化を示したもので、図中の赤点よりSNRが小さいほど推定誤差 $\Delta P$ は大きくなる。この曲線形状より、補正式の関数形を指数関数とし、次式で定義した。

$$\Delta P = \beta_1 + \beta_2 e^{-\beta_3 \cdot \text{SNR}} \quad (1)$$

ここで、 $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ はフィッティングによって定まる係数である。SNR = 15, 20, 30, 40 の $\Delta P$ の値を用いて最小二乗法により決定した式(1)の曲線を図4に青線で示す。フィッティングに用いた各SNRの値における $\Delta P$ に対し、補正式の結果は正確に一致している。また、SNRの値が比較的高いSNR=80の値に対しても概ね良好な一致している一方で、SNR=15では近似曲線と実際の推定誤差 $\Delta P$ に差があることがわかる。このことから、式(1)により変化の傾向を表現できたが、 $\Delta P$ の変化の大きい低SNRの領域に対してはフィッティングに使用するSNRの値を変えるなどの工夫が必要であることがわかる。

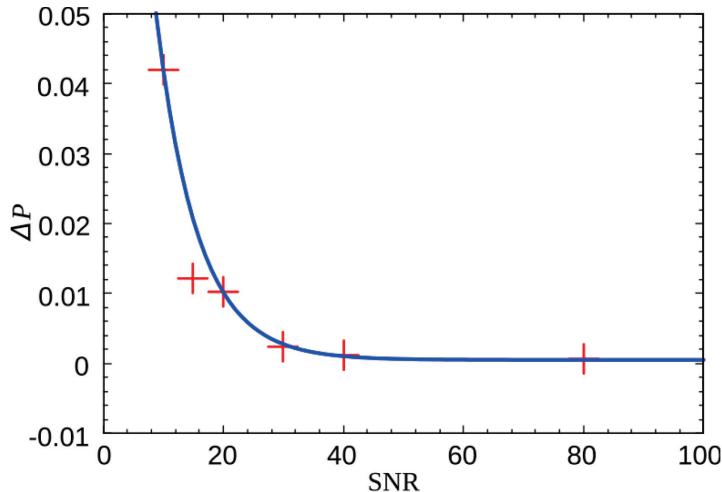


図4 SNRによる推定誤差 $\Delta P$ の変化。赤点：提案手法による推定値。  
青線：補正曲線。

### 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

左心室内血流に関する研究では、大動脈弁の位置に三尖弁または開口形状の異なる二尖弁を設置し、左心室内の血流動態および血行力学の変化を数値流体解析により調べた。解析結果より、大動脈弁形状のみならず開口方向や位置により、左心室内の大動脈弁近傍や心尖部付近における血行動態が大きく変化することが分かった。これらは、大動脈弁形状によって一意に合併症リスク

クが変化するとは言えないことや、特定の開口方向や位置によってリスクが急激に高くなる可能性があることを示唆している。本研究では、弁形状を除いた左心室の形状や左心室の運動は同じであり、今後は患者一人一人に応じた左心室モデルを作成し、血流の数値解析を行う必要性がある。血管透過係数を推定するデータ同化手法に関する研究では、透過係数が過大評価される原因を明らかにし、その補正方法を提案した。今後は、補正方法の改良を行うとともに、提案手法の多次元化や実際の計測データに対する有効性を調べる。

## 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] S. Miyauchi, K. Hosoi, S. Tsuda, T. Hayase, K. Funamoto: Numerical analysis of hemodynamic changes and blood stagnation in the left ventricle by internal structures and torsional motion, *AIP Advances*, 13, 045105 (2023), doi: 10.1063/5.0143833.

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] S. Tsuda, S. Miyauchi, K. Funamoto: Hemodynamic Changes in the Left Ventricle by Bicuspid Aortic Valve Geometries, *Proceedings of the Twentieth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2023), OS9-12.

[3] 茂零音, 宮内優, 竹内伸太郎, 船本健一: ラグランジュ未定乗数法に基づく血管透過性の推定のためのデータ同化法（推定値の補正方法の提案）, 日本機械学会 第 36 回計算力学講演会(CMD2023), (2023), OS-0204.

### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J23L067
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	3年目

## プラズマを用いたサステイナブルアンモニア製造法の開発 Sustainable Ammonia Production by Plasma Method

白石 僚也\*†, 平松 颯真\*, 早水 庸隆\*\*, 妹原 七虹\*\*, 徳増 崇\*\*\*††

\*山口大学, \*\*米子工業高等専門学校, \*\*\*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

アンモニアは沸点が比較的高いことなどから、水素より使いやすいクリーンエネルギーとして注目されている。しかし現在のところ、アンモニア製造には多量の CO<sub>2</sub>排出が伴う。この CO<sub>2</sub>は主に化石燃料改質による水素製造工程で排出されるが、他にもアンモニア合成過程で高温・高圧環境を作り出すため、各工程間の輸送のために CO<sub>2</sub>が排出される。一方、プラズマを用いると、CO<sub>2</sub>排出なしに常温・常圧環境で水素を製造することができる。申請者らはプラズマによる水やアルコールの分解反応場に窒素ガスを導入することで、CO<sub>2</sub>フリー、常温・常圧、ワンステップのアンモニア合成が可能であることを示した。しかしながらエネルギー効率が悪いという問題がある。そこで本研究では実用化レベルの 40 kJ/g-NH<sub>3</sub> を達成することを最終目的とする。

他方で、春山ら(T. Haruyama et al., *Green Chem.*, 2016)は水と窒素プラズマの界面で生じる界面反応を用いることで従来のプラズマ法と比較して高効率にアンモニアを製造できることを示した。そこで本研究では、水(水素源)を微細化し、窒素プラズマとの界面面積を増加させることで高効率化を試みた。

### 2. 研究成果の内容

図 1 にアンモニア製造装置の概略図を示す。本研究では、水素源に蒸留水 (H<sub>2</sub>O), 窒素源に純窒素 (N<sub>2</sub>ガス) を用いた。キャリアガスであるアルゴン (Ar) をノズルに流し、アルゴンの流れに水素源である蒸留水を乗せることで、霧吹きのようにして微細水滴を作り反応炉内に噴射した。また、ノズルの反対側から窒素源である純窒素ガスをトーチに吹き込み、電源から、電圧 2.5~3.5 [kV], 周波 19 [kHz], パルス幅 1 [μs] の直流パルス電圧をトーチに印加することでプラズマを発生させ、窒素プラズマジェットとして反応炉内に噴射した。水素源である微細水滴と窒素プラズマジェットを衝突させることで、窒素と蒸留水を接触・反応させる。プラズマ化された純窒素ガス中の窒素原子(N)が微小水滴中の水素原子(H)を奪い取る(界面反応)ことでアンモニアを生成する。反応炉の下部にはノズルから噴出した水が溜まり、製造されたアンモニアはこの水に溶かされることで回収される。また反応炉から排出されるガスを蒸留水に触れさせることでもアンモニアを回収する。その後、回収した水のアンモニア濃度を、イオンクロマトグラフィーを用いて測定する。そして、得られた濃度と回収水量、投入電力からアンモニア製造量とアンモニア製造効率を求める。水滴群の表面積は水滴径と数密度に依存し、それらはノズル出口からの距離に依存して変化すると考えられる。そこで、ノズルとプラズマトーチの距離を 70 [mm], 140 [mm], 210 [mm] と変化させて実験を行った。

また、水滴の粒径・粒子数の測定を行った。図2に測定装置の概略図を示す。シャドウグラフ法を用いてノズルから噴射された微小水滴を可視化し、ハイスピードカメラを用いて可視化された水滴の画像を撮影する。光源としてLEDストロボスコープを用い、水滴の噴射方向と垂直かつ水滴の背面に設置する。撮影した画像から画像解析ソフトを用いて水滴と水滴数を求め、その後、数密度を算出する。数密度  $n$  は写真一枚あたりの粒子数  $N$  と写真のピクセル数、シャッター速度  $1/2000$  [s] から求める。本研究ではノズルの噴射口から  $70$  [mm],  $140$  [mm],  $210$  [mm] の位置で3回ずつ撮影を行った。解像度は  $1024$  [pixel]  $\times$   $1024$  [pixel]、撮影サイズ  $5.6$  [mm]、撮影速度  $2000$  [Hz]、シャッター速度  $1/2000$  [s]、撮影枚数  $1000$  [枚]とした。また、画像処理における分解能は  $11.0$  [ $\mu\text{m}$ ] である。

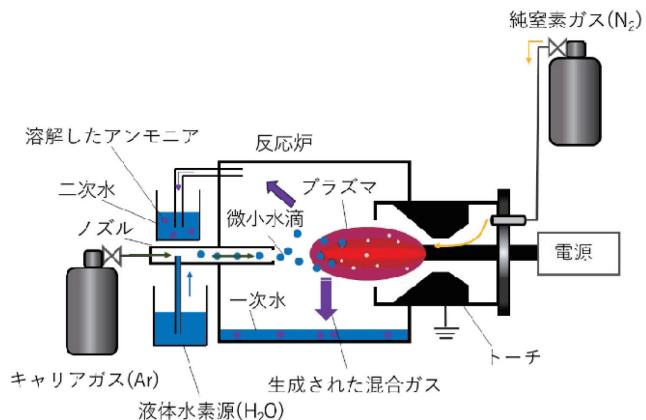


図1：アンモニア製造装置の概略図

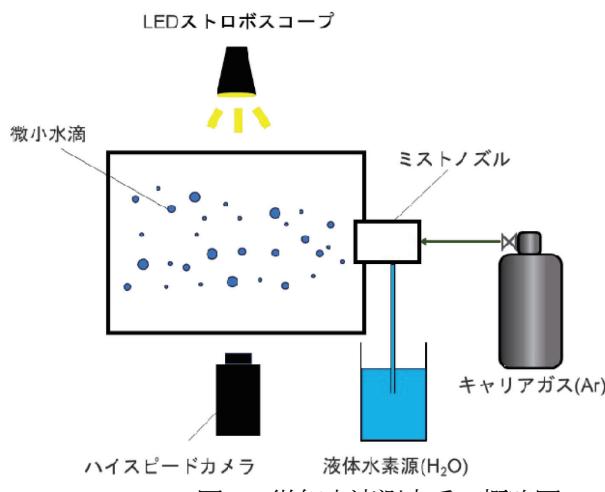


図2：微細水滴測定系の概略図

図3に測定で得られた水滴径の分布を示す。図3よりどの距離でも、測定範囲内での最小粒径である  $10\sim20$  [ $\mu\text{m}$ ] の粒子数が最も多いことが確認された。また、径の分布は正規分布になると予想されるため、実際は  $11$  [ $\mu\text{m}$ ] 未満の範囲にも多数の水滴が存在する可能性が高い。これらのことから、水(水素源)を微細化することができたといえる。次に図4にアンモニア製造効率と水滴数密度の距離依存性を示す。図4に示されるように、距離が短くなるほど効率は増加した。また、数密度も距離が短くなるほど大きくなつた。これらのことから、距離が短いほど界面面積が大きいため、アンモニア製造効率が向上したと考えられる。また、アンモニア

製造には窒素活性種が多い方が有利であるが、活性種はトーチ出口付近に多く存在し、トーチから距離が離れるに従って減少する。そのため、距離が遠い場合は活性種が不足することでアンモニア製造効率が低下していることも考えられる。本研究で得られた効率はバルク水を用いた場合と同等かやや高い程度であった。今後は距離を近くすることで、バルク水の場合より高効率が得られると考えられる。また、紫外線により補助エネルギーを与えることで効率が向上することが報告されているため(T. Haruyama et al., *Green Chem.*, 2016), 本研究でも紫外線を導入する。微細水滴の場合、バルク水より大きな紫外線の効果が得られるのではないかと予想している。

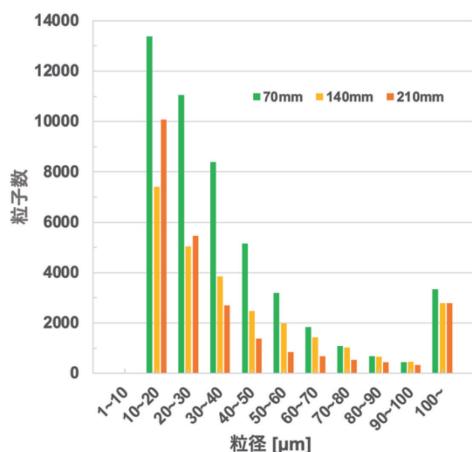


図 3 : 水滴の粒径分布

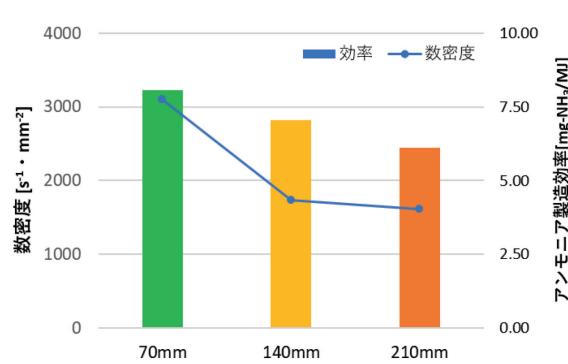


図 4 : アンモニア製造効率と水滴数密度の距離依存性。

### 3. 研究目標の達成状況

目標達成度は 55% である。

### 4. まとめと今後の課題

水素源である水を微細化し、界面反応面積を増加させることでアンモニア製造効率の向上を図った。その結果、数ミクロンの水滴が形成されていることが確認され、またサブミクロンサイズの水滴も多数存在することが示唆された。アンモニア製造効率は従来のバルク水を用いた場合と同様かやや高い程度であったが、水滴生成ノズルとプラズマトーチの距離をさらに近くすることで、バルク水の場合を超える効率を得られる可能性が高い。また今後は紫外線照射により更なる効率向上を図る。

### 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. Hiramatsu, R. Shiraishi, Y. Hayamizu, N. Sehara, T. Fujii, Takashi Tokumasu: Improvement of Ammonia Production Efficiency by Interfacial Reaction between Nitrogen Plasma and Fine Water Droplet, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-17, pp.60-62

#### 3) その他 (特許、受賞、マスコミ発表等)

なし

課題番号	J23L068
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	3年目

## 機械学習が加速させる地下流体エネルギーに係る破壊現象の理解

### Understanding Failure Phenomena Accelerated by Machine Learning for Subsurface Energy Development

椋平 祐輔\*†, 直井 誠\*\*†\*\*\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*京都大学防災研究所, \*\*\*現所属 北海道大学理学部

†申請者, ††所外対応研究者

#### 1. 研究目的

近年地震学分野では、機械学習をはじめとする様々な人工知能技術を導入した解析手法が開発されており、P-S波の検出や、初動極性読み取り等の専門家の目視解析が最も高いパフォーマンスを見せてきたルーティン解析等において、大変良いパフォーマンスを見せている。本共同研究では、同技術を地下流体エネルギー開発分野で取得された微小地震、低周波地震、室内実験のAEに応用し、基本的な地震解析の効率を劇的に向上させ、より多くの有意な信号を検出し、これまで未知であった物理現象の解明に繋げる。

#### 2. 研究成果の内容

昨年度、AEの連続計測が可能な計測システムの整備を進めた。AEの連続取得データは、本研究で進める機械学習を用いたAE解析にとっても、多くのデータが利用できる為に有効である。本年度は、導入したAE計測システムの様々なテスト、評価を行い、計測システムの構築と性能評価を実施した。AEロガーで取得された信号をSSDにリアルタイムで書き出す事が可能なPCを導入し、データ書き出しに遅れがないか等を、ストレステスト等を行う事で上記計測条件でのシステムの堅牢性を確かめた。さらに、その過程で、実験中の間隙水圧の分布や伝播をより網羅的に取得するために、断層を含む試験片の弾性波速度をモニタリングすることとした。これは垂直歪みを補完する物理量の計測となる。そこで、弾性波速度モニタリングに必要なスイッチングシステムを導入した。このデバイス選定・既存の計測システムへの組み込み等も研究時間を割く必要があった。残念ながらマンパワーが不足して思うように研究が進まない部分もあったが、計測システムは、ほぼ完成しており、あとは実験を実行し、データを収集するのみとなった。もちろんいくつかの予備実験は実行しており、各種計測システムのテストに加え、科学データも集まりつつある (Fig.1)。

#### 3. 研究目標の達成状況

三年度目には、導入したAE解析システムの整備に時間を取りてしまい、中々実際の実験を行い、機械学習をベースとした解析手法を試すには至らなかった。一方で、地熱フィールドの微小地震の極性読み取りの方に、適用する必要性があり、そちらへの適用が先になってしまった。やはり、しかし、ここまで蓄積してきたノウハウは無駄ではなかったと共に、今後も本実験・AEの研究は進めていくため、そこでの飛躍を望む。

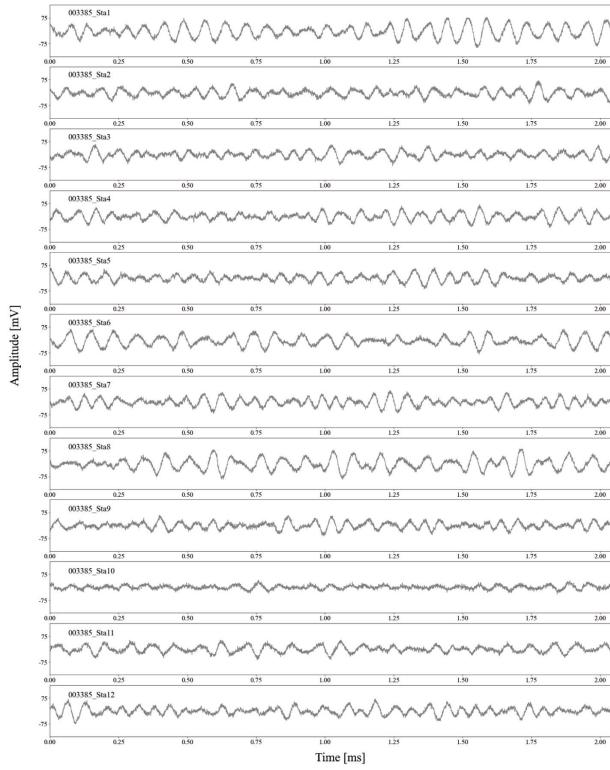


図 1：実験で得られた通常の AE とは異なる信号.

#### 4.まとめと今後の課題

本共同研究では、伊藤研で実施する室内岩石実験で計測する AE の高度化、さらに高速化を目指して、AE の解析や、機械学習の導入で実績のある直井氏のノウハウを導入しようと試みた。まずは AE の連続計測を可能とする計測システムを導入した、次に連続取得データを効率的に解析する解析手法を導入した。残念ながら実験実行が追いつかず全ての項目を達成できっとは言い難いが、AE 解析の進展は見られた。今後も岩石実験は続き AE のデータは蓄積していく。改めて機械学習を用いた解析による効率化を推進していく。

#### 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] Y. Mukuhira, M. Naoi, T. Ito: Introduction of New AE Monitoring System for Big-data AI-aided Acoustic Emission Analysis, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-8, pp.39-40.

##### 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	J23L069
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	3rd year

## High Speed Schlieren Velocimetry of EHD Enhanced Phase Change Thermal Storage

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

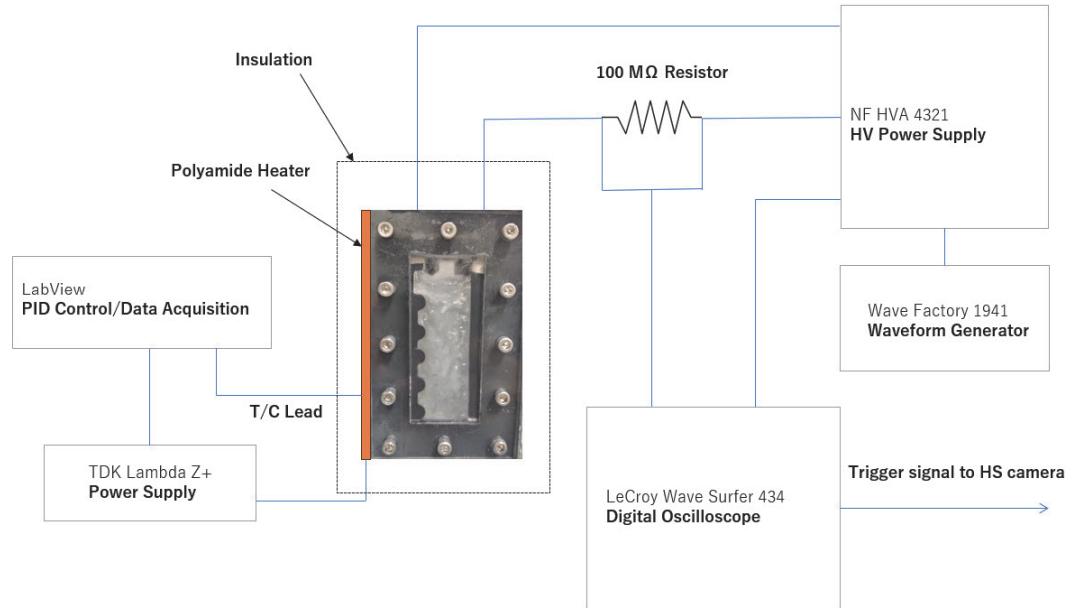


Figure 1: Experimental test facility schematic for simultaneous measurements of current vs voltage, heat transfer and flow visualization using Schlieren visualization.

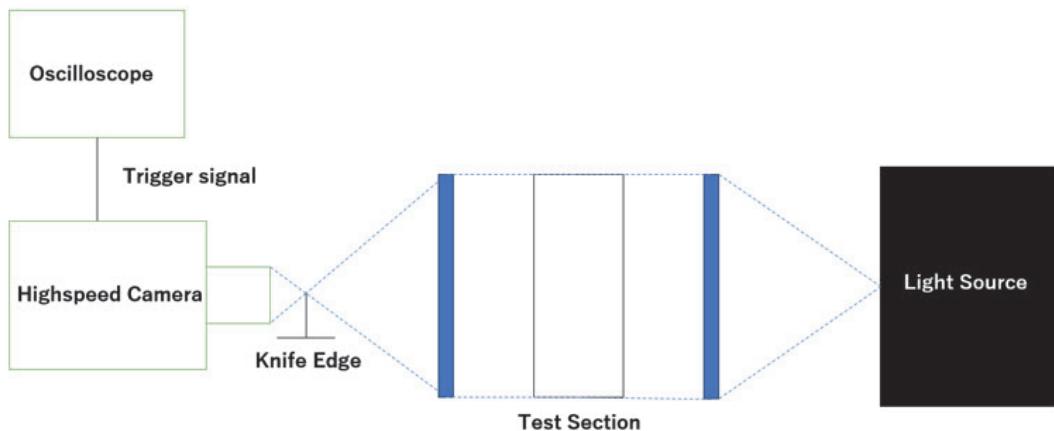


Figure 2: Schlieren visualization schematic

### 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  $\sim 100\text{nA}$  to  $\sim 4\text{nA}$ , but the flow velocities and heat transfer enhancement 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 enhancement, and are therefore novel findings.

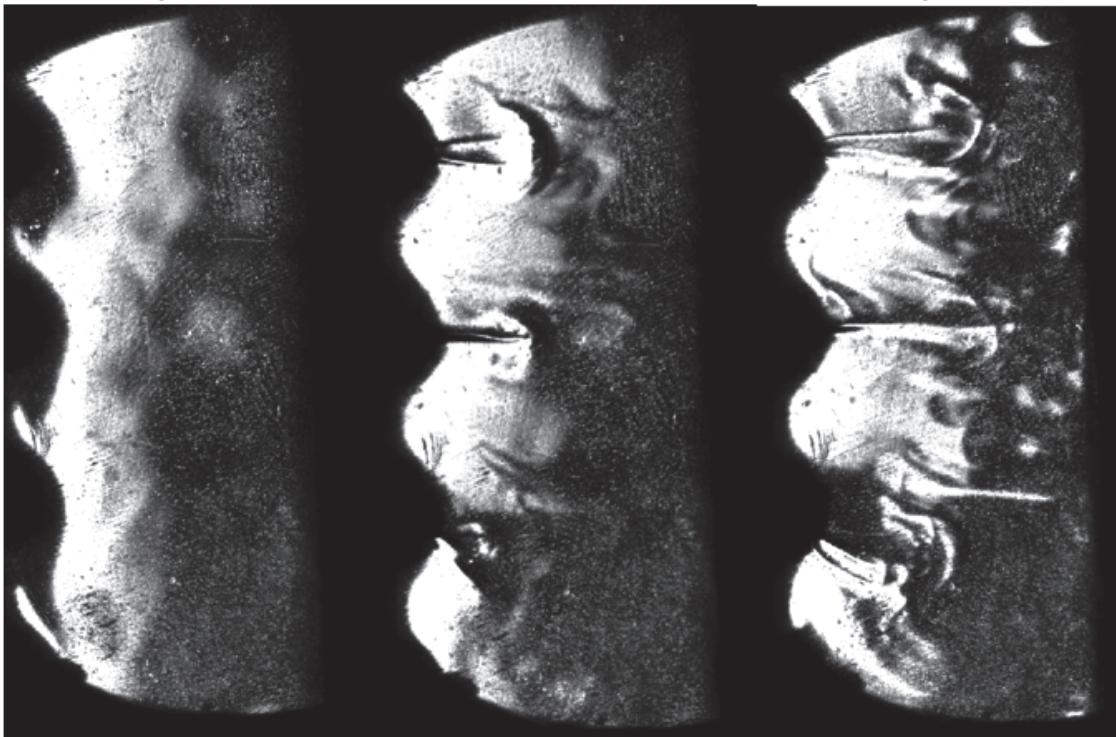


Figure 3: Schlieren visualization of jets for 0.06Hz- 8KV applied voltage left to right 0s, 1.2s, 2.1s.

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  $\sim 0.1\text{Hz}$ .
- 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.
- $\sim 50$  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.

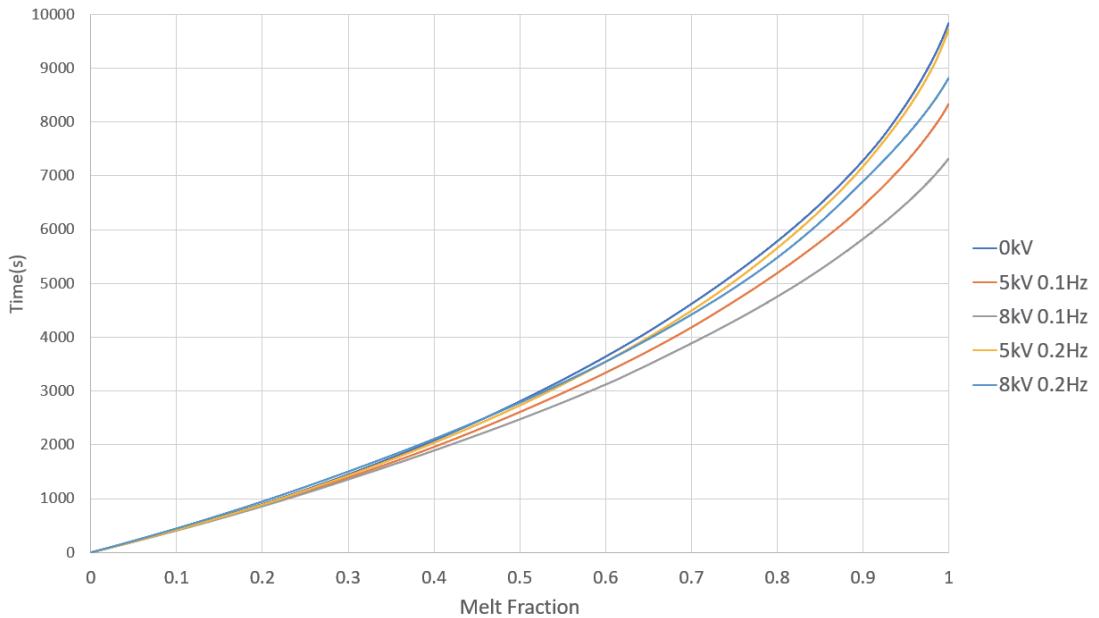


Figure 4: Time elapsed (s) vs Melt Fraction for different applied voltages.

#### 4. Summaries and future plans

In the next collaboration we plan to investigate the surface finish effect on charge injection. We were surprised how much less charge injection there was for the smoother stainless-steel electrode compared to the copper, which had a rougher surface finish.

Some challenges with the test section we still need to address:

- The heat loss was too great, which made heat transfer measurements sensitive to room conditions (temperature, A/C)
- The test section broke down above 8kV because the electrode wires were frayed, preventing higher applied voltages.

The findings from our first collaboration in 2022 and this year's collaboration in 2023 will be summarized in 2 journal papers to be submitted in 2024. 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 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.

[1] E. Chariandy, S. Liu, T. Sato, J. Cotton, "Schlieren Velocimetry of Phase Change Material Heat Transfer Enhancement under the Application of Electrohydrodynamics", *International Symposium on New Plasma and Electrical Discharge Application and on Dielectric Materials 2023*.

[2] E. Chariandy, S. Liu, T. Sato, J. Cotton, "Heat Transfer Enhancement of Phase Change Material Under the Application of an Oscillating Electric field" *Proceedings of the 23rd International Symposium of Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023),CRF-31,pp.95-98.

3) Patent, award, press release etc

Not applicable.

課題番号	J23L075
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	1年目（発展）

## 分子動力学法を用いた界面ナノバブルの応力解析

### Stress Analysis of Surface Nanobubble by Molecular Dynamics Simulations

堀 琢磨\*†, 菊川 豪太\*\*††

\*東京農工大学大学院工学研究院先端機械システム部門

\*\*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

界面ナノバブルは、ナノ材料の製造や核沸騰の促進など、さまざまな活用が期待されている。いくつかの先行研究は界面活性剤の界面ナノバブルへの影響に焦点を当てている。例えば実験的研究により、界面活性剤はその種類によって、界面ナノバブルの形状を変化させることや、形成を阻害することが明らかとなっている。また、擬2次元系の分子動力学シミュレーションを用いた先行研究によると、Lennard-Jones流体の蒸気からなる界面ナノバブルは、界面活性剤の導入により安定性が失われることが明らかとなっている。これらの先行研究により、界面活性剤が表面ナノバブルに与える影響について多くの知見が得られたが、実際に観察される、水分子中の窒素気体からなる球冠上の界面ナノバブルへの界面活性剤の作用およびその機構は明らかにされていない。

そこで本研究では分子動力学シミュレーションを用いて、界面活性剤を導入した界面ナノバブルの応力の評価を行い、形状に与える影響についてその分子論的機序を明らかにする。

#### 2. 研究成果の内容

グラファイト基板-水-窒素気体からなる系の分子動力学シミュレーションを行った。図1(a)に示す系の断面のように、底面に配置したグラファイト基板上の中央に疎水性サイトを設け、その直上に窒素気体からなる界面ナノバブルを形成した。分子動力学シミュレーションではまず、系の緩和のために配置した天面のグラフェンに圧縮方向に力を加えた後、界面ナノバブル形成のために圧力を解放した。

以上のようにして界面ナノバブルを形成する際に、界面活性剤の分子を導入し、各分子の分布への影響を評価した。界面活性剤にはペンタノール分子を用いた。図1(b)に示す水分子の数密度分布を評価することで、ペンタノール分子の導入によって、界面ナノバブルの接触角は減少し、平坦な形状になることがわかった。またペンタノール分子は、固液気三相界面に集中的に分布し、そのOH基が水分子の方向を向く傾向にあることがわかった。

これらの結果についての機構を明らかにするため、窒素分子の応力分布を評価した。具体的には、気体分子の運動エネルギー項およびビリアル項からなる応力テンソルを求めた。さらに座標変換により、円筒座標成分のテンソルを取得した。図1(c)に示す応力の半径方向成分の応力分布のように、ペンタノール分子の有無によって、大きな差はみられなかった。一方で、応力分布から界面エネルギーを求めることで、それらのバランスが、ペンタノール分子が界面ナノバブルを平坦な形状にする結果と整合することが明らかとなった。

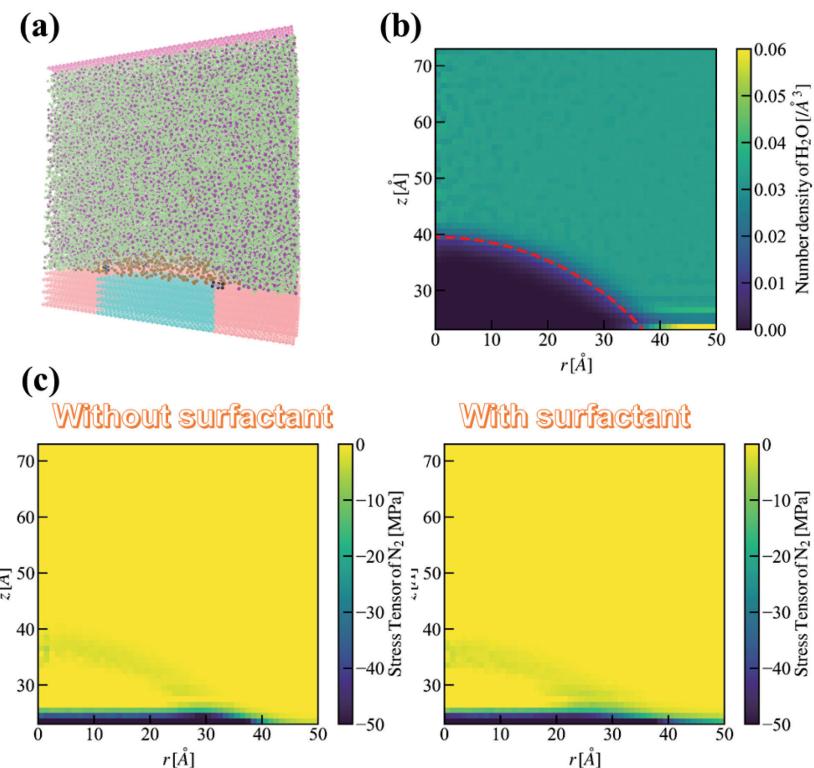


図1：(a) グラファイト基板上の疎水サイトに形成する界面ナノバブルの断面図, (b)水分子の密度分布および形状評価のためのフィッティング曲線, (c)界面活性剤分子の有無ごとの、窒素気体分子の応力分布.

### 3. 研究目標の達成状況

界面活性剤の導入による界面ナノバブル内の応力分布への影響を明らかにした。さらに界面エネルギーを求めることで、そのバランスが界面ナノバブルの形状の変化と矛盾しないことがわかった。一方で、これまで得られた知見が、異なる界面活性剤分子やより大きな界面ナノバブルに対して成立するかは不明である。

### 4. まとめと今後の課題

分子動力学シミュレーションによって、界面活性剤が界面ナノバブルの形状へ及ぼす影響と、その力のバランスの観点からの機構を明らかにした。一方で、得られた結果が普遍的であるかの解析が今後必要である。

### 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] T. Hori, G. Kikugawa, “Effect of Surfactant on Surface Energy of Nanobubble Composed of Nitrogen Gas”, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-12, pp.47-48
- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）  
なし

課題番号	J23L079
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	2023.4 ~2024.3
継続年数	2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

微細流路内部に存在する液滴の熱及び運動量輸送現象は液相-気相-固相からなる接触線やマクロな流体力学ではあまり考慮されない固体壁の特性が大きく影響するため、非常に複雑な運動をしている。さらに、ナノスケールでは、系のサイズが小さい場合、現在提案されているモデルが使用できるかどうかは明らかではない。本研究では、分子動力学法を用いて、微細液滴の固体と液体の間の熱と運動量の輸送特性を詳細に解析する。

### 2. 研究成果の内容

Nm オーダーの微細流路内を一定の速度で運動する液滴を考え、その液滴と流路を構成する固体壁面との間に生じる力のうち、液滴の進行方向と同成分の力(以降、摩擦力と称する)を評価する。流路幅および液体原子-固体壁面原子間の相互作用の大きさを変化させて、得られた力のそれらに対する依存性を明らかにする。これまでの研究では液体として Ar を採用した。本年度は液体として水を考えた。2つの液体の Ar 原子は球体であるが、水分子は球体ではなく異方性を有しているという違いがあり、その異方性が液滴に生じる摩擦力に与える影響に注目した。

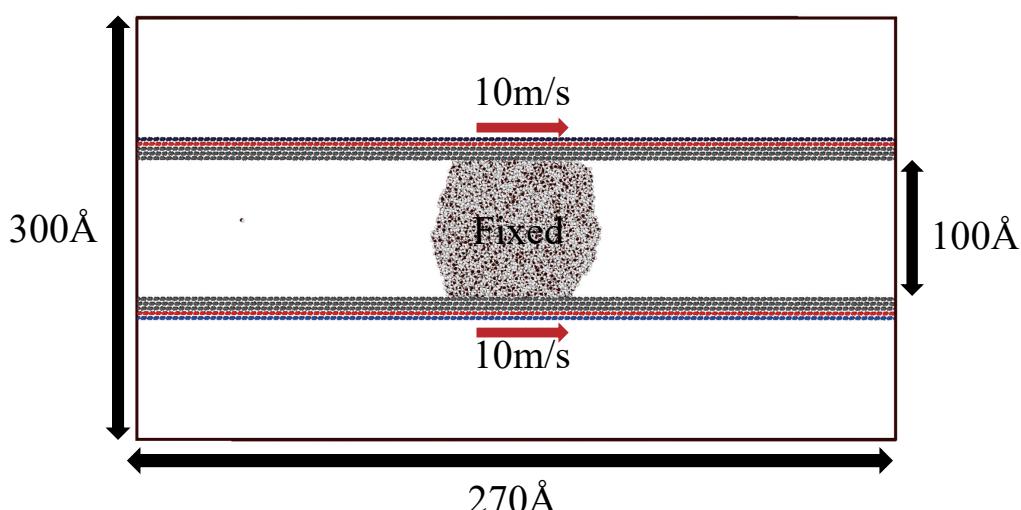
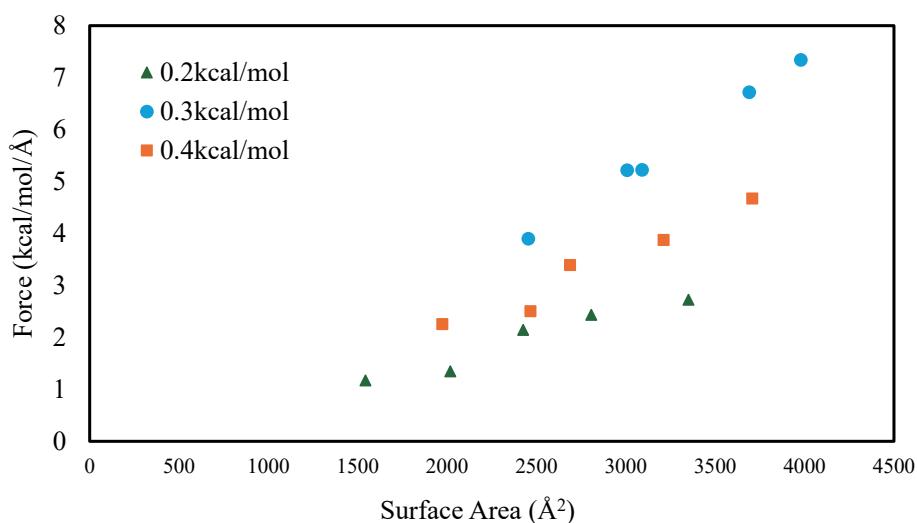


図1 計算系のスナップショット。奥行方向は表示していない。固体壁面の一部(青い原子)を 10m/s で運動させ、液滴は重心が計算系の原点に固定されている。

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は1年度目に得られたAr液体の結果を用いて論文を執筆した(近日投稿予定). また, 液体をAr流体から水に変更し, 計算を行った. 液体Ar粒子で使用した力の評価方法が水を用いた系には使用できないため, 新たに計算方法を考案し確立した. 100Åの流路に対して, 水分子の数を10000個から200000個まで2500個ずつ増加させ, 液滴と固体壁面の接触面積が異なる5つの計算系を作成した. また, 固体壁面を構成する原子と水分子中の酸素原子との相互作用パラメータの大きさを0.2kcal/mol, 0.3kcal/molおよび0.4kcal/molと変化させた. 図2は横軸に接触面積, 縦軸に力の大きさを示している. 接触面積が大きくなると摩擦力の大きさが大きくなっていることがわかる.



### 4. まとめと今後の課題

これまで, Ar液体で得られた結果をもとに液体を水へと変更した. これにより, 応力分布を用いた摩擦力の評価が困難となつたため, 新たに評価方法を確立した. 今後はこの評価方法を用いて, 固体壁面と水との相互作用を変更した系での研究を行う.

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

特になし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Akinori Fukushima and Takashi Tokumasu, Analysis of Heat and Momentum Transport Characteristics Through Droplets Inside Nanoorder Channel, *Proceedings of the Twenty-third International symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-18, pp.63-65.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) 特になし

(受賞) 特になし

(マスコミ発表) 特になし

課題番号	J23L083
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	宇宙・航空分野
研究期間	2023.4 ~2024.3
継続年数	3年目

**火星探査航空機の空力と動特性に対するプロペラ後流の影響調査**  
**Influence of Propeller wake on Aerodynamics/ Flight Dynamics Characteristics for Mars Airplane**

金崎 雅博\*†, 永井 大樹\*\*††

\*東都大学工学部, \*\*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

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(ISAS/ JAXA)に設置された火星探査航空機リサーチグループ (RG) を中心として、火星探査用の無人航空機(火星探査航空機)の研究開発を進めている。火星探査航空機が実現できれば、工学的価値のほか、高精度かつ広範囲な理学観測が可能になり、火星の広域探査に貢献することが期待される。この火星探査航空機は電動プロペラによる推進が計画されている。火星大気と地球大気の条件の相違により、地球上のプロペラ推進機との空力設計とは異なる知見・理解に基づく設計が求められる。

本申請研究では、火星探査航空機を対象に、翼胴性能評価・設計に必要なプロペラ後流の翼性能への影響を調査することを目的とする。具体的には、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics: CFD) を用い、概念検討段階 (第 1 図) における翼・推進系の評価・設計を実施する。

その際に、プロペラの有無など、プロペラ後流の影響を定量化する。ここでは、計算コスト低減のために、体積力モデリングにもとづくアクチュエータディスクを用いるが、本研究の遂行により概念機に対応できる体積力分布を求めることができる。

次に、求めた空力形状と推進設計に対する、最適空力制御設計を行う。ここでは、2022 年度までに構築した空力・飛行連成の大域的ロバスト最適制御手法を援用できる。特に、外乱流に対するロバスト性に着目した飛行制御設計を目指す。

## 2. 研究成果の内容

### 2.1 プロペラ後流にさらされる翼における翼断面設計への影響

CFD を用い、複数の翼型に対してプロペラ後流の影響に焦点を当てた準二次元計算を行い、プロペラ後流中の火星飛行機主翼翼型変更に伴う翼性能や翼周りの流れ場への影響を調査した。過去の共同研究において、CFD によりプロペラ後流による舵効きへの影響調査を行い、特にプロペラを主翼後縁に配置した場合にエレベータの舵効きが強くなることを示したが、プロペラ後流中にある翼性能に関する体系的な知見を得るために、厚みやキャンバーの変化を伴う主翼翼型への調査は行われていない。計算は第 2 図に示すように、準二次元性を担保した形状を対象とする。

設定した各翼型でプロペラ無・有のときの主翼表面流線、および  $C_p$  分布を第 3 図に示す。第 3 図 (a)(b)においてプロペラ吹き上げ側に着目し、プロペラ後流無しの場合と比較する。プロペラ後流無しの場合に比べて、プロペラ後流があるときには圧力が低い領域が前縁側に押し出されるように広がっている。第 3 図 (a)(c)において、プロペラ吹き下し側に着目し、プロペラ無しの場合と比較する。プロペラ無しの場合に比べて前縁付近で圧力の高い領域が

広いが、翼型ごとにその広さは異なる。また、後縁側でも圧力の高い領域が広がっている。プロペラ吹き上げ側では、プロペラ後流の影響で主翼の迎角が局所的に大きくなるため、剥離しやすくなる。第4図(a)(b)より、断面主流方向速度分布をプロペラ無しの場合と比較すると、全ての翼型でプロペラ吹き上げ流による剥離の促進が見られ、NACA4406でその影響が最も大きい。第4図(a)(c)より、プロペラ無しの場合とプロペラ吹き下し側の断面主流方向速度分布を比較する。プロペラ吹き下し流の影響で、迎角が局所的に小さくなるため、剥離抑制の効果が見られる。一方で、プロペラ吹き下し流の影響で迎角が小さく翼表面上での加速も小さいため、剥離が起らぬ場合の表面圧力はプロペラ無しの場合と比較して下がりにくい状態にある。よって第3図(c)の後縁部分での圧力はプロペラ後流無しの場合と比較しても高くなつた。

NACA0006とNACA0012に着目する。第4図(a)よりプロペラ後流無しの場合、NACA0006は翼厚が小さく前縁から剥離しており、NACA0012は翼厚が大きいため後縁失速による剥離が見られる。第4図(c)より、プロペラ吹き下し側に着目すると、NACA0006は後縁まで剥離が抑制されているが、NACA0012は後縁で剥離が生じている。よって、前縁剥離に対してはプロペラ後流による剥離抑制効果が大きく、後縁剥離に対してはプロペラ後流の影響が後縁まで及ばず、後縁では剥離が見られる。

NACA0006とNACA4406、および石井翼に着目する。第4図(a)よりプロペラ無しの場合、全翼型で剥離が見られるが、それぞれ位置は異なる。NACA0006および石井翼は、前縁付近で剥離が見られ、NACA4406はキャンバーによって前縁付近の一様流に対する迎角が小さくなっているため、翼上面の加速面積が大きく、コード30%付近から剥離が見られた。プロペラ後流の有無に着目すると、プロペラの吹き下し流によって全翼型で剥離は抑制されているが、NACA4406では後縁に剥離が生じている。これはキャンバーによって局所的に迎角が大きくなるため剥離が生じていると考えられる。一方、石井翼はNACA4406に比べ、キャンバー最大位置が後方であるため、この影響は受けにくい。

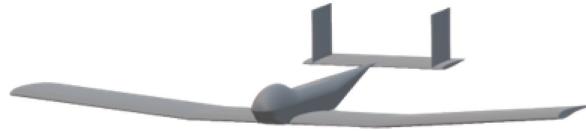
## 2.2 空力-飛行連成計算とだ面制御のロバスト最適化

次に、第11図にしめすような風擾乱を考慮した飛行経路最適設計を行うことで、カプセルの揺れと風擾乱が飛行履歴に及ぼす影響を調査する。ここで風擾乱を不確実性として扱い、カプセルの揺れは機体初期ピッチ角が期待値からずれることと考えることで模擬できる。火星探査航空機は高精度かつ広域探査の両立が求められるため、飛行時間・飛行距離を目的関数とする。本研究では、MABE-2と同様の滑空機を想定して、最適化問題を解くための手法としてNon-dominated Sorting Generic Algorithm-II(NSGA-II)20,21)を用いる。集団サイズを40個体と設定し、初期個体は一様乱数を用いて生成する。世代数は1200世代とし計算を行う。不確実さの考慮には、Polynomial Chaos Expansionを用い、次数を6とした。

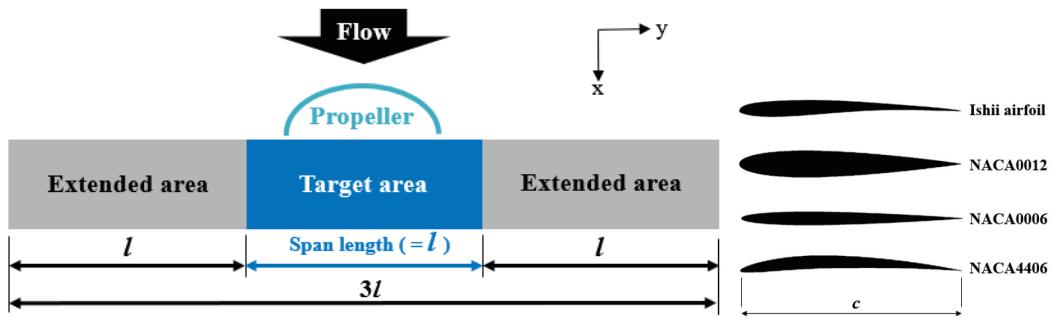
第12図に風速 $\pm 4, \pm 12, \pm 20$ m/sの風擾乱が生じた際の飛行履歴を示す。第12図(a)に示す飛行経路より、追い風20m/sにおいて最大飛行時間、向かい風20m/sにおいて最小飛行距離・最小飛行時間となる。追い風20m/sについて、第12図(b)に示すピッチ角は、機体放出直後から $0^\circ$ に向けて最も速く増加しており、第12図(c)に示す飛行高度より最も高い高度で引き起こしを完了している。一方で向かい風20m/sについて、第12図(b)に示すピッチ角は、機体放出直後から $0^\circ$ に向けて最も遅く増加しており、第12図(c)に示す飛行高度より最も低い高度で引き起こしを完了している。このことから追い風20m/sにより、機首上げが促進され引き起こしに時間を要さなかったことで高高度からの滑空飛行となり、最大飛行時間となる。一方で向かい風20m/sでは、機首上げが妨害され引き起こしに時間を要したこと、低高度からの滑空飛行となり、最小飛行距離・最小飛行時間となる。

追い風と向かい風の風速の強さについて、第12図(b)、第12図(c)に示すピッチ角・飛行高度を見ると、風速の強さによって引き起こし完了高度が異なっている。このことから追い風では、風速が強いほど機首上げを促進し、引き起こし完了高度が高くなる。一方で向かい

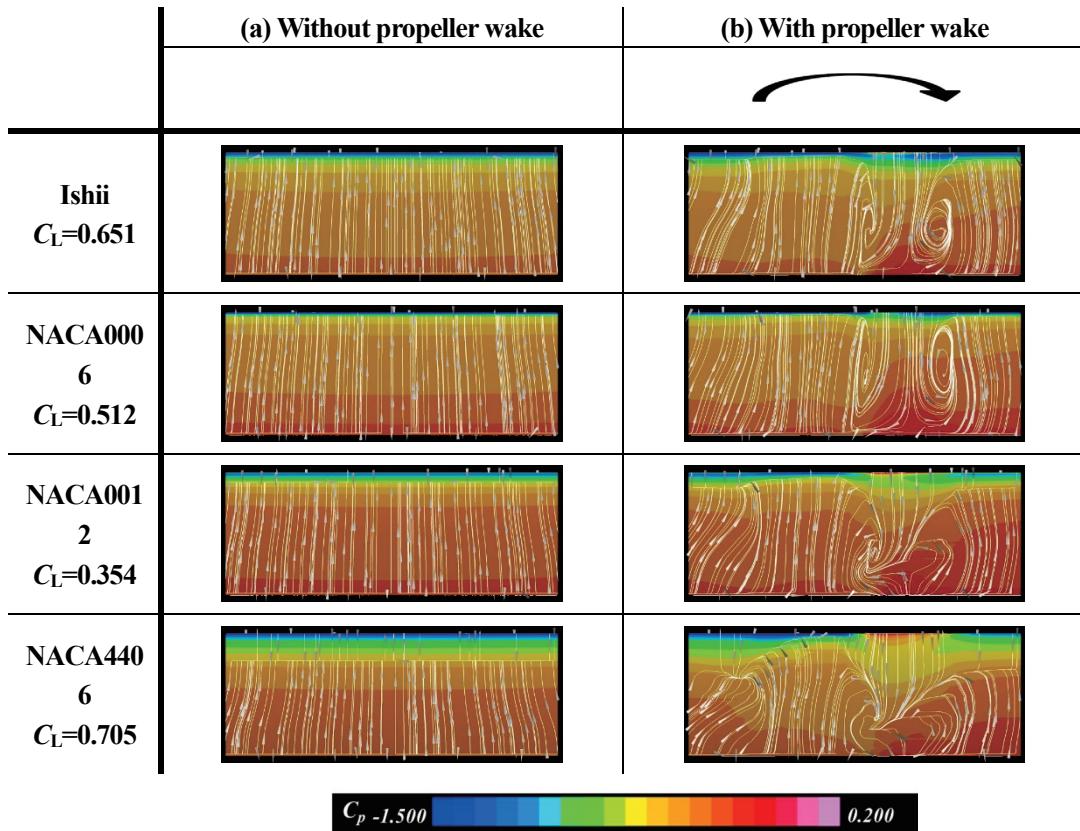
風では、風速が強いほど機首上げが妨害され、引き起こし完了高度が低くなる。そして引き起こし完了高度に伴い、飛行距離・飛行高度が変化する。



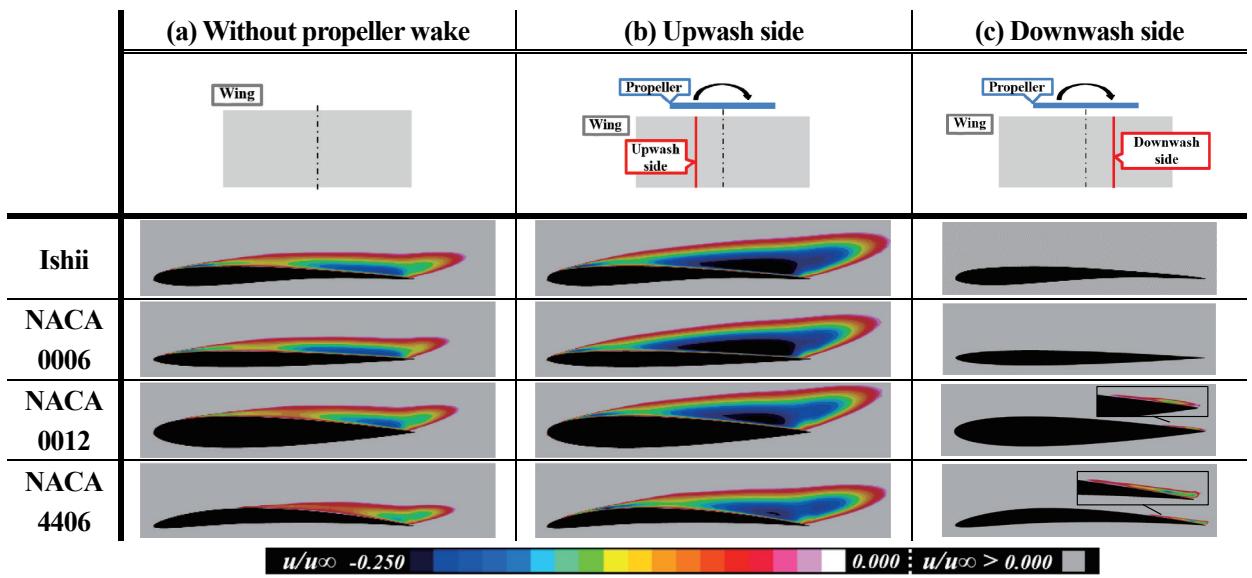
第1図：モデルとした火星探査航空機



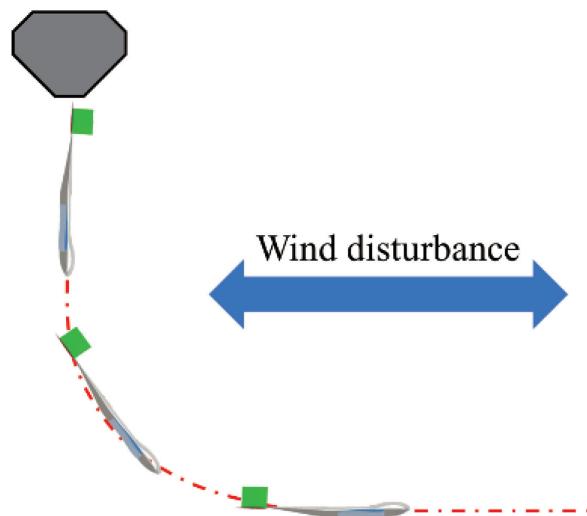
第2図：計算対象の平面形と翼型



第3図：主翼表面流線および $C_p$ 分布



第4図：断面主流方向速度分布



第5図：考慮する風擾乱（風速と風向が時間的に変化せず、地面にたいして 水平の一様風を想定）。

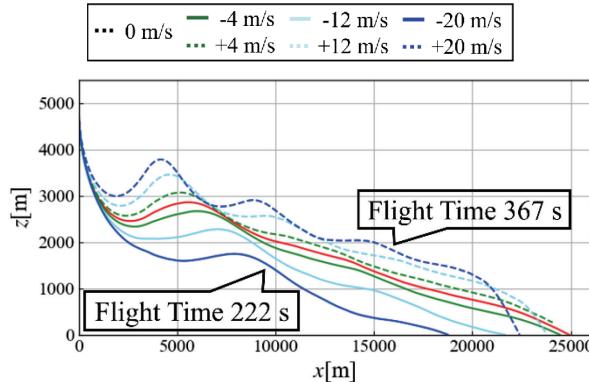


図 7(a) 飛行経路

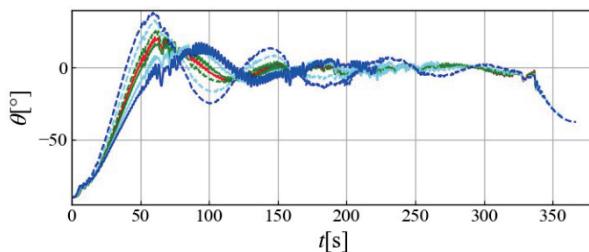


図 7(b) ピッチ角

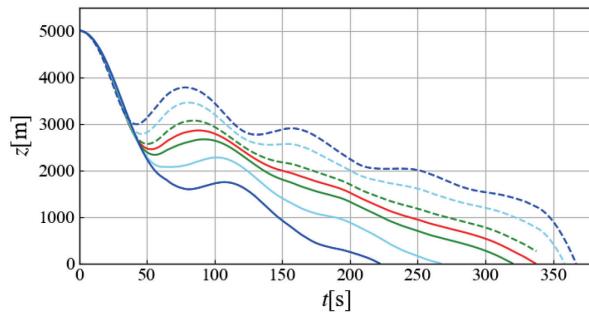


図 7(c) 飛行高度

第6図：風速 $\pm 4, \pm 12, \pm 20$  m/sの風擾乱が生じた際の飛行履歴（時系列のエレベータ舵角より各風速での飛行計算を実施）。

### 3. 研究目標の達成状況

プロペラ後流が主翼空力性能に及ぼす影響について、非構造格子の CFD による準二次元計算を用いて調査した。プロペラ後流の有無が翼型に及ぼす性能や流れ場は理解された。空力性能についてはプロペラ後流の有無で相関があったことから、最適設計においては、プロペラ後流に晒された際の特有の問題をさらに考察し、最適化問題を定義する必要があり、キャンバーの影響性などケース数を増やして実施した。本研究は 2023 年度中に国内学会で発表した。

不確定性を含む火星探査航空機の飛行最適化については、風擾乱のみを不確実性として扱い、風擾乱を考慮した問題の飛行経路最適設計を行うことができた。ここでは、プロペラ後流の影響まで考慮した数値計算には至らなかったが、上述の性能相関性があることと、最適化手法が汎用化されたことから、今後の検討課題とできる。ここまで得られた成果は、2024 年度の航空宇宙学会主催の年会講演会において講演する。

#### 4.まとめと今後の課題

プロペラ後流が主翼空力性能に及ぼす影響について検証した結果、プロペラ後流により全ての翼型で揚力・抗力がともに増大し、迎角によって剥離位置が変化することでプロペラ後流による影響も変化することがわかった。2024年度には、国際会議論文として発表する予定である。

不確定性を含む火星探査航空機の飛行最適化については、風擾乱を考慮した問題の飛行経路最適設計を行うことでカプセルの揺れと風擾乱が飛行履歴に及ぼす影響を定量化した。プロペラ後流の影響の評価に用いるほか、機体の展開の不確実さを考慮した飛行経路最適化に用いる予定である。

#### 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] Hasegawa, N., Kanazaki, M., and Nagai, H., "Influence of Propeller Wake on Mars Airplane Wing Geometry," *The 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023)*, November 2023.

[2] 長谷川 奈南, 金崎 雅博, 永井 大樹, 「火星飛行機におけるプロペラ後流中の主翼翼型に対する影響調査」, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 1C09, 富山市, 2023 年 10 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

Project code	J23L090
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2023 ~ March 2024
Project status	1st year (progressing)

## Data Analysis of Thermo-Physical Properties of Organic Materials Using Machine Learning 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

Recently, a machine learning-based framework realizing high throughput screening for the material exploitation and optimization has drawn much attention, and this data-driven approach for material development is called materials informatics (MI). The advantage of MI technology is that it can realize material discovery in cyberspace using big data as opposed to the conventional trial-and-error material discovery using high-cost experiments, and target materials can be discovered quickly. Recently, a new paradigm, which is recognized as physics-guided machine learning (PGML), has been proposed. PGML does not utilize only the data themselves, but also underlying physical laws or physical interpretation of properties, and enables to improve model accuracy of ML when small data sets are only available. In this context, clarifying the physical mechanisms governing physical properties and understanding the correlation between physics and data will accelerate performance of the PGML in materials discovery and optimization of properties.

### 2. Details of program implement

To correlate the molecular structure with thermophysical properties, we have adopted the following input parameters for describing linear and branched alkanes. These parameters distinctly encode structure with nonnegative number, which are then fed into different ML algorithms as inputs. The five parameters are as follows:

1. The number of carbon atoms in a molecule.
2. The smallest number of C-C bonds present between the one end of the carbon back bone and its adjacent branch.
3. The number of C-C bonds present in the branch that is nearer to an end of the longest carbon back bone.
4. The number of C-C bonds between the other furthest end of the backbone of the molecule and its nearest branch.
5. The number of C-C bonds within the second branch.

For example, in the case of alkanes with a single branch, the third and fifth parameters (3 and 5) will be zero, as there are no additional branches to consider. Similarly, for a linear molecule all other values except first parameter become zero.

### 3. Achievements

We considered the molecular structural details of linear, single, and double-branched alkanes as input parameters in the ML algorithms, represented by non-negative numbers. To assess the predictive capabilities of various machine learning algorithms in reproducing experimental thermophysical properties (kinematic viscosity, molar

heat capacity, enthalpy, thermal conductivity, and speed of sound), we examined five ML algorithms: random forest regression, decision tree regression, feedforward neural network, multiple linear regression, polynomial regression models. 15 linear and branched alkanes at different temperatures and pressures were examined. Among these models, the random forest regression demonstrated superior performance in reproducing the studied thermodynamic and transport properties when compared to the other four models (Table 1). The RFR model achieved impressive %AARD values of 0.056 %, 0.0768 %, 0.0122 %, 0.0022%, and 0.0353 %, along with MAE values of 0.192  $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ , 0.0096  $\text{kJ/mol}$ , 0.0001  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 0.0025  $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ , and 0.7010  $\text{m/s}$  for predicting the kinematic viscosity, enthalpy, thermal conductivity, molar heat capacity, and speed of sound of alkanes, respectively. Correlation matrix analysis reveals that the thermal conductivity of alkanes is majorly influenced by the number of carbon atoms in a molecule (Figure 1).

#### 4. Summaries and future plans

We employed different machine learning algorithms to predict the thermophysical properties of various alkanes and refrigerants at different temperatures and pressures. As a next step, we will explore the feature selection and engineering for better predictive capability. Furthermore, we will also explore optimization of target properties with Bayesian framework

Table 1: Statistical parameters for predicting thermal conductivity (W/m.K) of alkanes from various ML models

Statistical parameter	RFR	DTR	FNN	MLR	PR
$R^2$	1	0.999	0.660	0.616	0.722
%AARD	0.0122	0.0422	40.49	46.21	13.48
MAE	0.0001	0.0002	0.225	0.190	0.038

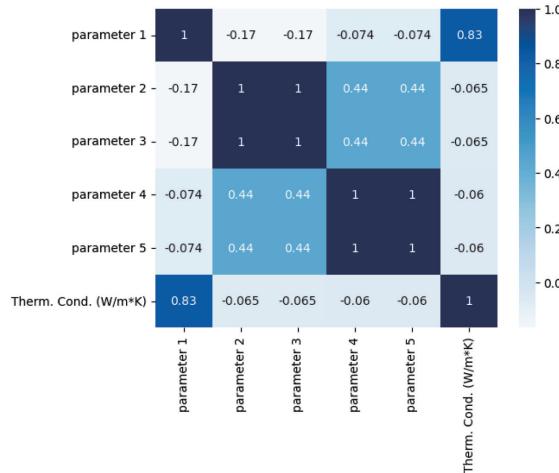


Figure 1: Correlation matrix heatmaps between various inputs variables and thermal conductivity at constant temperature and pressure for alkanes

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] K. Rathod, S.C. Ravula, P.S.C. Kommireddi, R. Thangeda, G. Kikugawa, H.K. Chilukoti: Predicting thermophysical properties of alkanes and refrigerants using machine learning algorithms, *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 587 (2024), 114016 (19 pages), doi: 10.1016/j.fluid.2023.114016.

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

[2] H.K. Chilukoti, Sota Suzuki, and G. Kikugawa: Data Analysis of Thermophysical Properties of Organic Materials Using Machine Learning Algorithms, *Proceedings of the Twenty-third International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2023), CRF-13, pp. 49-50.

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

## 索引

足立 高弘	277	白石 僚也	358
阿部 圭晃	48	杉山 慎一郎	105
安西 眠	105, 164	鈴木 杏奈	159, 349
石出 忠輝	241	高奈 秀匡	94, 146, 274, 287, 296, 317
石本 淳	292, 311	高橋 公也	39
伊藤 靖仁	57	高橋 俊	170
稻垣 舞	131	高橋 聖幸	66
鵜飼 孝博	69	竹内 希	94
内田 諭	30	武田 翔	138, 143
内一 哲哉	208, 267, 283, 301	田中 学	313
遠藤 和彥	27	千葉 一永	346
大島 逸平	321	寺島 修	77
大谷 清伸	21, 25, 69, 177, 195, 253	徳増 崇	45, 182, 199, 250, 294, 358, 370
太田 信	34, 87, 150, 156, 202, 247, 313	直井 誠	361
太田 匠則	189	永井 大樹	50, 52, 66, 77, 108, 167, 170, 173, 189, 328, 331, 372
大塚 啓介	48, 50	永島 浩樹	182
大塚 光	331	中武 靖仁	342
大林 茂	111, 127, 153, 180, 235, 241, 325, 333, 346	中村 寿	74, 99, 220
大堀 大介	184	中本 裕之	267
大山 聖	315	中谷 辰爾	118
岡島 淳之介	17, 23, 80, 89	中山 昇	143
小田切 公秀	173	中山 雄行	114
加藤 文武	283	沼田 大樹	195
金崎 雅博	372	長谷川 裕晃	333
金澤 誠司	218	服部 裕司	39, 57, 92, 102, 114, 186
金子 智	250	早川 晃弘	118, 140, 197, 342
川口 美沙	337	平田 勝哉	311
川原田 光典	321	福島 啓悟	370
神田 雄貴	192	福山 敦彦	184
菊川 豪太	230, 368, 378	船本 健一	131, 270, 280, 337, 353
北川 一敬	21	堀 琢磨	368
北村 圭一	52	楳原 幹十朗	25
工藤 正樹	235	松田 佑	108
久保 正樹	121	間部 謙三	27
古川 琢磨	89	馬渕 拓哉	60
後藤 和泰	45	丸田 薫	32
後藤 実	138	水書 稔治	177
江目 宏樹	17	宮内 優	353
小林 宏充	317	椋平 祐輔	309, 339, 361
小宮 敦樹	121, 213, 227, 265, 277, 290	森澤 征一郎	153
佐々木 大輔	325, 328	焼野 藍子	134, 305, 315
佐藤 岳彦	30, 216, 218, 224, 363	吉光 奈奈	309
澤山 和貴	339		
下栗 大右	99		

Abid Ustaoglu	80	Valéry Botton	290
Adrian Sescu	186	Xiaorui Song	87
Agustin Valera-Medina	197	Yinbo Zhao	230
Aike Qiao	247	Yingxue Hu	192
Angéla Jedlovszky-Hajdú	34	Yujie Li	150
Anthony B. Dichiara	146	Yun-Chien Cheng	224
Bernard Chrystelle	296		
Chenguang Lai	127		
Christophe Bogey	305		
Ekenechukwu C. Okafor	140		
Fayza Yulia	60		
Gildas Coativy	274		
Hari Krishna Chilukoti	378		
Hideaki Ogawa	253		
Hiroshi Yamashita	180		
Hirotaka Sakaue	167		
Ivan Delbende	102		
James Cotton	363		
Jean-Paul Rieu	280		
Jeongmin Ahn	199, 220		
Joël Courbon	287		
Juan Felipe Torres	227		
Julien Maes	159		
Kazuya Tajiri	134		
Michael Kröhn	349		
Mingzi Zhang	156		
Mohamed Farhat	216		
Muhamed Albadawi	202		
Narendra Kurnia Putra	164		
Nicholas Williamson	213		
Nicolas Aznar	270		
Nicolas Mary	301		
Olivier Mathieu	74		
Outi Supponen	55		
Patrice Chantrenne	294		
Peter Stephan	23		
Pramudita Satria Palar	111		
Samuel L. Manzello	32		
Sébastien Livi	265		
Shejuan Xie	208		
Siwei Liu	55		
Stefan Llewellyn Smith	92		
Thomas Elguedj	292		

東北大学流体科学研究所  
令和 5 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

令和 6 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

