



東北大学

# 令和3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 2021  
Joint Usage / Research Center  
"Fluid Science Global Research and Education Hub"

## 東北大学 流体科学研究所

Institute of Fluid Science  
Tohoku University



## 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 年度より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、その成果の適用先としての観点から、環境・エネルギー、人・物質マルチスケールモビリティ、健康・福祉・医療、基盤研究の 4 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「流体科学研究拠点」活動報告書（平成 21 年度実施分については公募共同研究報告書）として公表されている。

第 2 期中期計画期間中には公募共同研究はほぼ 100%の採択率であったが、予算が限られる中、最終年度には採択額の充足率が 5 割を切ることになり、また拠点評価では、社会の要請に応える課題を選別しているのかという指摘があった。このため、第 3 期中期計画期間では、採択率を絞り社会の要請に応える課題を選別して充足率を上げるとともに、不採択の課題に対しては所長リーダーシップ経費により萌芽的な研究として支援するリーダーシップ共同研究を開始している。また、平成 30 年度リヨンセンター（材料・流体科学融合拠点）の設置に伴い、新たにリヨンセンター公募共同研究を開始した。

本報告書は令和 3 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、124 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ますと共に、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 4 年 9 月

東北大学流体科学研究所長  
丸田 薫



# 目次

## 1. 令和3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	2
1.5	公募共同研究実施状況	3
1.6	研究成果の発表件数	7
1.7	平成21年度から平成27年度までの活動成果	7

## 2. 研究成果報告書

<令和3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>

J21H001	水素-空気予混合火炎の不安定挙動に及ぼす不活性ガス添加の影響	13
	門脇 敏 (長岡技術科学大学)、小林 秀昭 (東北大学)	
J21H002	遠心ポンプで発生するキャビテーション不安定現象の可視化	15
	姜 東赫 (埼玉大学)、伊賀 由佳 (東北大学)	
J21H003	Efficient Uncertainty Quantification of Fluid Flow Problems via Combination of Kriging Surrogate Modeling and Proper Orthogonal Decomposition	17
	Mehrdad Raisee Dehkordi (University of Tehran)、下山 幸治 (東北大学)	
J21H004	圧縮性DNSを用いた管楽器の流体音響解析	20
	高橋 公也 (九州工業大学)、服部 裕司 (東北大学)	
J21H006	ソニックブーム波形の立ち上り時間に及ぼす乱流干渉の影響	23
	鶴飼 孝博 (大阪工業大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J21H007	弾性体の変形-周囲流-遠方場音情報の複合動的解析による空力音発生メカニズム解明	27
	寺島 修 (富山県立大学)、小西 康郁 (東北大学)	
J21H008	表面修飾ナノ粒子サスペンションのナノスケール界面現象に関する研究	37
	塚田 隆夫 (東北大学)、小宮 敦樹 (東北大学)	
J21H010	機能性薄膜のエピタキシャル成長における量子・分子論的考察	42
	金子 智 (神奈川県立産業技術総合研究所)、徳増 崇 (東北大学)	
J21H011	構造化照明を用いた高精度PSP計測手法の開発	44
	松田 佑 (早稲田大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J21H013	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	47
	大塚 啓介 (東北大学)、藤田 昂志 (東北大学)	
J21H014	プラズマを用いたサステナブルアンモニア製造法の開発	49
	白石 僚也 (米子工業高等専門学校)、徳増 崇 (東北大学)	
J21H015	火星飛行機におけるプロペラ後流・主翼干渉流れの解明	51
	北村 圭一 (横浜国立大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J21H016	非普遍的な乱流場における乱流エネルギー・スカラー輸送機構に関する基礎研究	55
	伊藤 靖仁 (名古屋大学)、服部 裕司 (東北大学)	
J21H017	高速・低環境負荷での炭素触媒合成を可能とするキャビテーションプラズマ反応場の制御	58
	竹内 希 (東京工業大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J21H019	セルロース単繊維創成法に向けたクロスフロー下での棒状ブラウン粒子相互作用モデル及びシミュレーション法の開発	62
	石本 志高 (秋田県立大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	

J21I020	Study on Fundamental Combustion Characteristics of Jatropha Surrogate Fuel .....	64
	Willyanto Anggono (Petra Christian University)、早川 晃弘 (東北大学)	
J21I023	渦コア領域における渦流のトポロジーが渦軸を形成するメカニズムに関する研究 .....	66
	中山 雄行 (愛知工業大学)、服部 裕司 (東北大学)	
J21I024	懸濁液レオロジーの機能的制御を目指した実験観察ならびに数値解析 .....	70
	福井 智宏 (京都工芸繊維大学)、船本 健一 (東北大学)	
J21I025	An Experimental Study of Ethyl-Methyl-Carbonate (EMC) Combustion .....	72
	Olivier Mathieu (Texas A&M University)、中村 寿 (東北大学)	
J21I026	Product Gas Characteristics of Ammonia/Hydrogen Fuel at High Pressure Conditions.....	76
	早川 晃弘 (東北大学)、Valera-Medina, Agustin (Cardiff University)	
J21I027	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 .....	78
	椋平 祐輔 (東北大学)、直井 誠 (京都大学)	
J21I028	弾道飛行装置を用いた再突入飛翔体周り的高エンタルピー流れの分光実験 .....	81
	山田 剛治 (東海大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J21I029	金 / 硬質炭素ナノ構造体による腐食環境下における摩擦面温度検出機能を有する薄膜しゅう動材料の研究 .....	83
	後藤 実 (宇部工業高等専門学校)、三木 寛之 (東北大学)	
J21I030	実気象条件下におけるソニックブーム評価関数の開発 .....	85
	山下 博 (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt)、大林 茂 (東北大学)	
J21I031	Transition Delay and Drag Reduction Mechanism by Designed Surface Roughness .....	87
	焼野 藍子 (東北大学)、Nugroho Bagus (The University of Melbourne)	
J21I032	新規動脈血管モデルを組み込んだ頭頸部循環における拍動循環シミュレータ構築の試み .....	91
	坪子 侑佑 (早稲田大学)、太田 信 (東北大学)	
J21I035	Numerical Simulations as Evaluation Method for Biofluidic Experiments .....	95
	Narendra Kurnia Putra (Institut Teknologi Bandung)、安西 眸 (東北大学)	
J21I036	高感度非発光再結合検出による量子ナノ構造におけるフォノン物性の評価 .....	98
	福山 敦彦 (宮崎大学)、寒川 誠二 (東北大学)	
J21I037	Effects of Pulsatile Flow on Endothelial Permeability and Cell Motility .....	100
	Eugenia Corvera Poiré (National Autonomus University of Mexico)、船本 健一 (東北大学)	
J21I038	同軸円筒MHDエネルギー変換機内の電磁流体现象の研究.....	103
	小林 宏充 (慶應義塾大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J21I039	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 .....	106
	槇原 幹十朗 (東北大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J21I041	ふく射熱遮蔽機能を有する消防装置の開発 .....	108
	江目 宏樹 (山形大学)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J21I043	レーザー誘起気泡内の圧力測定法の開発 .....	111
	佐藤 岳彦 (東北大学)、Mohamed Farhat (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL))	
J21I044	Correlation Between Oxygen Ion Conductivity and GBs in Solid Oxide Electrolyte Membrane .....	114
	徳増 崇 (東北大学)、Jeongmin Ahn (Syracuse University)	
J21I045	Design and Optimization of Multidirectional Wings of the Aero-Train Under the Effect of Static Aeroelasticity .....	116
	Chenguang Lai (Chongqing University of Technology)、大林 茂 (東北大学)	
J21I047	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 .....	120
	永井 大樹 (東北大学)、坂上 博隆 (University of Notre Dame)	
J21I048	データ同化による宇宙機熱システムの高精度推定手法の確立 .....	123
	永井 大樹 (東北大学)、三坂 孝志 (産業技術総合研究所)	

J21I049	超音速境界層のアクティブ層流制御技術の開発 .....	126
	服部 裕司 (東北大学)、Adrian Sescu (Mississippi State University)	
J21I050	らせん渦における不安定性と波の相互作用の解明 .....	128
	服部 裕司 (東北大学)、Ivan Delbende (LIMSI)	
J21I051	Numerical Simulation of a Thermal Plasma Reactor for the Wastes to Energy .....	130
	Sooseok Choi (Jeju National University)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J21I052	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解 .....	135
	小田切 公秀 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)、永井 大樹 (東北大学)	
J21I054	Numerical Study on Transonic Flow Characteristics Over Return Capsules .....	137
	Bok Jik Lee (Seoul National University)、永井 大樹 (東北大学)	
J21I055	Exploration of Novel Combined Compression-Ignition Combustion Engine and Solid Oxide Fuel System for Power Generation and Emission Control .....	139
	Jeongmin Ahn (Syracuse University)、中村 寿 (東北大学)	
J21I056	プレノプティック光学系による高速飛しょう体周囲の流れ場可視化計測 .....	143
	水書 稔治 (東海大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J21I057	中枢創薬のための三次元ヒト血液脳関門チップの開発 .....	145
	立川 正憲 (徳島大学)、船本 健一 (東北大学)	
J21I059	サウナ室等の高温環境下における人体皮膚表面の相変化伝熱現象の調査 .....	148
	古川 琢磨 (八戸工業高等専門学校)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J21I061	コアスケールのモデリング 3D マイクロモデルを用いたマルチスケール気孔率の検討 .....	150
	鈴木 杏奈 (東北大学)、Julien Maes (Heriot-Watt University)	
J21I062	データ駆動型複雑媒体内の流動モデリング .....	154
	鈴木 杏奈 (東北大学)、James Minto (University of Strathclyde)	
J21I063	地熱温泉セミナー .....	159
	鈴木 杏奈 (東北大学)、Roland N. Horn (Stanford University)	
J21I064	高周波渦電流探傷法に基づいた CFRP 欠陥評価 .....	161
	Chen Zhenmao (Xi'an Jiaotong University)、内一 哲哉 (東北大学)	
J21I065	Detecting and Locating Microseismic Events at Groningen as a Natural Laboratory for Understanding Induced Seismicity Mechanisms .....	164
	仲田 典弘 (Massachusetts Institute of Technology)、椋平 祐輔 (東北大学)	
J21I066	Unsteady Aerodynamics of Axially Oriented Low Fineness Ratio Cylinders .....	166
	Colin Britcher (Old Dominion University)、大林 茂 (東北大学)	
J21I067	Novel Insights Into the the Co-Combustion of Carbonyl Compounds and Hydrocarbon Fuels .....	173
	Denis Knyazkov (Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion)、中村 寿 (東北大学)	
J21I068	Multifunctional Hybrid Filaments Comprising Aligned Nanocellulose and Carbon Nanotubes Synthesized by a Field-Assisted Flow Focusing Method .....	177
	Anthony B. Dichiaro (University of Washington)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J21I071	Hybrid Nanomaterials Reinforcement in Biolubricants .....	179
	徳増 崇 (東北大学)、Yusuf Rodjali, Nasruddin (Universitas Indonesia)	
J21I072	極超音速飛翔体上の圧力場計測を目指した新型感圧塗料の開発 .....	182
	沼田 大樹 (東海大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J21I073	温度境界条件の時空間変化による自然対流の挙動評価 .....	184
	小宮 敦樹 (東北大学)、Nicholas Williamson (The University of Sydney)	
J21I074	Explore the Shaping Effects of Arteriovenous Fistula on Haemodynamics in Patients Receiving Haemodialysis .....	186
	Mingzi Zhang (Macquarie University)、太田 信 (東北大学)	

J21I076	低エネルギーによる高効率室内空間換気を目的とした自然対流の能動制御 .....	188
	小宮 敦樹 (東北大学)、Victoria Timchenko (The University of New South Wales)	
J21I077	プラズマ-生体界面における活性種挙動の数値動力学的考証 .....	190
	内田 諭 (東京都立大学)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J21I078	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 .....	192
	中山 昇 (信州大学)、三木 寛之 (東北大学)	
J21I079	Studying Structure-Property Relations for Organic Materials using Machine Learning.....	194
	Hari Krishna Chilukoti (National Institute of Technology, Warangal)、菊川 豪太 (東北大学)	
J21I080	An innovative Method of Generating Plasma Microbubbles in Flowing Water .....	196
	Jong-Shinn Wu (National Yang Ming Chiao Tung University)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J21I081	Individual Effects of Plasma-Generated Electrical Field, Short-Life Species, and Long-Life Species on Cell .....	198
	Yun-Chien Cheng (National Yang Ming Chiao Tung University)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J21I082	Study of Shock Wave-Particles Interaction .....	201
	Kazuya Tajiri (Michigan Technological University)、焼野 藍子 (東北大学)	
J21I083	Design and Simulation of Nanopillar-Embedded MOSFETs .....	204
	Yiming Li (National Yang Ming Chiao Tung University)、寒川 誠二 (東北大学)	
J21I086	The Dynamic Behavior of Marine Ecosystems in the Complex Flows .....	208
	Evgeniy Dats (Institute of Applied Mathematics FEB RAS)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J21I088	Numerical Simulation of Flowfields Over Mars Entry Capsules .....	210
	古館 美智子 (Chungnam National University)、永井 大樹 (東北大学)	
J21I089	地熱貯留層モデルの不確実性定量化のための新しいパラメータ化手法の検証 .....	214
	鈴木 杏奈 (東北大学)、Ruanui Nicholson (The University of Auckland)	
J21I090	既存空港を利用した那覇空港を拠点とした際の離島や都市部を結ぶ飛行車両の実現性の検討 .....	218
	森澤 征一郎 (沖縄工業高等専門学校)、大林 茂 (東北大学)	
J21I091	Construction of Flutter Boundary in Aeroelasticity via Advanced Machine Learning Models .....	222
	Pramudita Satria Palar (Bandung Institute of Technology)、下山 幸治 (東北大学)	
J21I092	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 .....	224
	金崎 雅博 (東京都立大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J21I093	Thermal Conductivity Reduction and Carrier Concentration Optimization for Development of Nanocomposite Materials With Enhanced Thermoelectric Figure of Merit .....	228
	Vladimir Khovaylo (National University of Science and Technology "MISIS")、三木 寛之 (東北大学)	
J21I094	Prediction and Design Methodology of Axisymmetric Shock Reflection in Supersonic Flow .....	232
	Hideaki Ogawa (Kyushu University)、大谷 清伸 (東北大学)	
J21I095	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 .....	234
	宮内 優 (宮崎大学)、船本 健一 (東北大学)	
J21I098	Towards Next Generation CFD Models of Intracranial Aneurysm (NX-CFD): In-Vitro Validation Studies and In-Silico Benchmarking of Intracranial Transitional Flow .....	236
	Khalid M. Saqr (Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport)、太田 信 (東北大学)	
J21I099	Application of Core-Based Inversion to Reconstruct Stress Field in an Underground Geoscience Laboratory .....	238
	伊藤 高敏 (東北大学)、Ma Xiaodong (ETH Zürich)	
J21I100	実寸脳動脈瘤壁への壁せん断応力による張力に伴う進展と流れ不安定性への弾性壁の影響 .....	241
	田中 学 (千葉大学)、太田 信 (東北大学)	

<令和3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>

J21R001	Endovascular Stent and Vessel Remodeling	247
	Aike Qiao (Beijing University of Technology)、太田 信 (東北大学)、 Song Hongfang (Capital Medical University)、Fu Wenyu (Beijing Union University)	
J21R002	An Electrically Efficient Self-Sustained Microcombustion/Flame-Assisted Fuel Cell (FFC) System	250
	Jeongmin Ahn (Syracuse University)、丸田 薫 (東北大学)、Milcarek Ryan (Arizona State University)	
J21R003	Modeling on Boiling and Bubble Dynamics Induced by Laser Emitted From Optical Fiber	252
	岡島 淳之介 (東北大学)、Roman Fursenko (ITAM SB RAS)、 Sergey Mokrin (Far-Eastern Federal University)、Vladimir Gubernov (LPI RAS)、 Sergey Minaev (IAM FEB RAS)	
J21R004	An Efficient Algorithm of Inlet Turbulence Generation for Cross-Platform-Based Parallel Computation and Its Application for Flows	260
	阿部 圭晃 (東北大学)、Vincent, Peter (Imperial College London)、 Freddie D. Witherden (Texas A&M University)、Brian C. Vermeire (Concordia University)、 Kazuhiko Komatsu (東北大学)、Kozo Fujii (東京理科大学)	

<令和3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>

J21H001	小鳥型高性能飛行ロボットの開発	269
	石出 忠輝 (木更津工業高等専門学校)、大林 茂 (東北大学)	
J21H002	電子聴診器による血液乱流の解明	272
	平野 雅嗣 (明石工業高等専門学校)、船本 健一 (東北大学)	

<令和3年度東北大学流体科学研究所特別国際公募共同研究採択課題>

J21T001	Development of Measurement Method of High-Speed Micro Mist in Environmental Energy Devices	277
	佐藤 岳彦 (東北大学)、James S. Cotton (McMaster University)	

<令和3年度東北大学流体科学研究所重点公募共同研究採択課題>

J21J001	超微小液滴と高速衝突の科学	281
	佐藤 岳彦 (東北大学)、渡部 正夫 (北海道大学)、矢野 猛 (大阪大学)	

<令和3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>

J21Ly01	TiC 粒子分散 Al 基複合材料の強度発現機構解明	285
	栗田 大樹 (東北大学)、武田 翔 (東北大学)	
J21Ly02	Stability of Jet Diffusion Flames Cofiring With Carbon-Free Ammonia	287
	小林 秀昭 (東北大学)、Cedric GALIZZ (INSA de Lyon)	
J21Ly03	TATAMI: "Thermal AcTuation and energy hArvesting using MultiPhyisic alloys"	291
	LALLART Mickael (LGEF INSA de Lyon)、三木 寛之 (東北大学)	
J21Ly04	Microfluidic Tools to Study Aerotaxis in Eukaryotic Cells	299
	Rieu Jean-Paul (University Claude Bernard Lyon 1)、船本 健一 (東北大学)	
J21Ly05	Coupled Computing of Fluid-Structure Interaction Problems for Multiphase Energy Systems	302
	石本 淳 (東北大学)、Thomas Elguedj (INSA de Lyon)	
J21Ly06	交流電場下でのセルロースナノファイバーの応答特性	304
	高奈 秀匡 (東北大学)、Florent Dalmas (INSA de Lyon)	

J21Ly07	生体物質と相互作用する原形質流動の数値シミュレーション	307
	野呂 秀太 (仙台高等専門学校)、内一 哲哉 (東北大学)	
J21Ly08	Numerical Modelling of the Particle Temperature Evolution During Cold-Spray Process	312
	BERNARD Chrystelle (Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J21Ly09	Multiscale Simulation of Carbon Electromigration in Iron	316
	徳増 崇 (東北大学)、Patrice Chantrenne (INSA de Lyon)	
J21Ly10	回転二重円すい間に発生するテイラー渦の安定性と乱流遷移	318
	足立 高弘 (秋田大学)、小宮 敦樹 (東北大学)	
J21Ly11	MAGIC: "Magnetic AGing in ferromagnetic"	320
	Benjamin DUCHARNE (ELyTMaX, INSA de Lyon)、内一 哲哉 (東北大学)	
J21Ly12	場の環境変化を利用した膜によるタンパク質輸送能動制御	323
	小宮 敦樹 (東北大学)、セバスチャン リビ (INSA de Lyon)	
J21Ly13	Ionic Liquid Polymer for Corrosion Resistance Applications	325
	Mary Nicolas (INSA de Lyon)、内一 哲哉 (東北大学)	
J21Ly14	磁歪複合材料のセンシングとエネルギーハーベスティングへの応用	327
	栗田 大樹 (東北大学)、武田 翔 (東北大学)	
J21Ly15	スキルミオン安定性の3Dシミュレーションと磁歪現象の機構	329
	加藤 文武 (茨城工業高等専門学校)、内一 哲哉 (東北大学)	
J21Ly16	Investigation of a Predictive Therapeutic Response Under Controlled Oxygen Condition in Cancer Patient-Derived Organoids	334
	Aznar Nicolas (University Claude Bernard Lyon 1/Cancer Research Center of Lyon)、船本 健一 (東北大学)	
J21Ly17	Experimental and Numerical Approaches for Water Film and Particle Flow Analyses (and its Particle Deposition Behavior) for Repairing Leakage Pipes by Cold Spray Process (or Solid-State Particle Impingement Process)	338
	BERNARD Chrystelle (Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J21Ly18	Theory for Electrostriction of Polymeric Actuator. (TEmpuRA)	342
	Gildas Coativy (LGEF INSA Lyon)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J21Ly19	Modal Approach for Extracting Flow Structure Related to the Subsonic Jet Noise Generation	345
	焼野 藍子 (東北大学)、Christophe Bogey (Universite de Lyon)	
J21Ly20	超音波による配管内の腐食の定量化	348
	中本 裕之 (神戸大学)、内一 哲哉 (東北大学)	
J21Ly21	High Impact Resistance of Titanium/UHMWPE Composites Coatings by Cold Spray	350
	高奈 秀匡 (東北大学)、Lame Oliver (INSA de Lyon)	
＜令和3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＞		
J21L012	水中爆発を用いた洗浄効果向上の研究	355
	北川 一敬 (愛知工業大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J21L018	分子動力学シミュレーションによる固液界面における不凝縮ガスに関する解析	358
	堀 琢磨 (東京農工大学)、菊川 豪太 (東北大学)	
J21L021	通気性のある生地を被覆した物体の空力改善に関する基礎研究	360
	長谷川 裕晃 (宇都宮大学)、大林 茂 (東北大学)	
J21L022	加熱壁面に衝突する液滴の熱流動様相に関する研究	362
	岡部 孝裕 (弘前大学)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J21L033	超低レイノルズ数流れにおける数値的・実験的研究による非定常空力現象の解明	366
	佐々木 大輔 (金沢工業大学)、下山 幸治 (東北大学)	

J21L034	極低温液体水素中における気泡初生の量子分子動力学解析 .....	369
	津田 伸一 (九州大学)、徳増 崇 (東北大学)	
J21L040	飛行する回転中空円筒の実験と数値解析 .....	371
	平田 勝哉 (同志社大学)、石本 淳 (東北大学)	
J21L042	水中ストリーマの高速進展機構 .....	373
	佐藤 岳彦 (東北大学)、金澤 誠司 (大分大学)	
J21L053	再突入カプセル形状物体後流域の定量的密度計測 .....	375
	太田 匡則 (千葉大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J21L058	はやぶさ型カプセルの後部形状が背面流れに及ぼす影響の解明 .....	377
	山田 剛治 (東海大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J21L060	タンパク質の GPI 修飾の解明および予測法の開発 .....	379
	越中谷 賢治 (青山学院大学)、太田 信 (東北大学)	
J21L069	実際の構造を反映させた多孔質材料内部の固気反応を伴う物質移動と構造変化の大規模シミュレーション .....	381
	松下 洋介 (東北大学)、小宮 敦樹 (東北大学)	
J21L070	ナノ構造界面での気体分子散乱特性の分子動力学解析 .....	383
	徳増 崇 (東北大学)、武内 秀樹 (高知工業高等専門学校)	
J21L084	種々の微粒子流れの数値解析法の開発と工学的応用 .....	385
	高橋 俊 (東海大学)、大林 茂 (東北大学)	
J21L085	自励振動ヒートパイプの設計高精度化に向けた低次元化モデルの開発と応用 .....	388
	高橋 俊 (東海大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J21L087	航空機体と稼働エンジンとの統合解析 .....	391
	千葉 一永 (電気通信大学)、大林 茂 (東北大学)	
J21L097	分子動力学シミュレーションを用いた接触線近傍に働く摩擦力の解析及び数値モデリング .....	393
	福島 啓悟 (福井大学)、徳増 崇 (東北大学)	



## 1. 令和3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) 人・物質マルチスケールモビリティ、3) 健康・福祉・医療、4) 基盤流体科学の4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)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3年度公募共同研究は、令和3年4月1日から令和4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2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3年10月に公募共同研究成果報告会、同年11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を記載している。

## 1.2 公募共同研究成果報告会

令和3年10月27日～29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-2021において開催した。コロナ禍のためオンラインにより実施した。本報告会では102件(一般・重点・特別国際・国際連携・萌芽88件、リヨンセンター公募共同研究14件)のオンラインポスター発表(図1)が行われ、199人の出席者があった。

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。

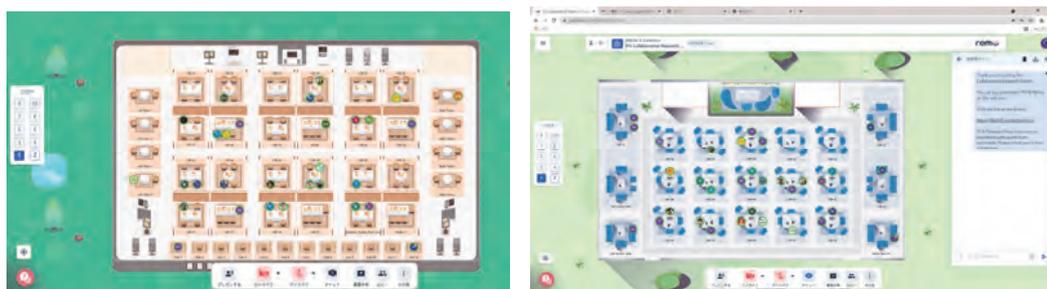


図1：AFI-2021 オンラインポスター発表の様子

## 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

	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

## 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4年3月に、令和2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)は流体科学研究所ホームページに掲載されている。

(<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/koubo/seika.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、人・物質マルチスケールモビリティ、健康・福祉・医療、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

		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 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	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

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

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

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

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

※採択額には、20%のインセンティブが含まれる。

表 4 : リオンセンター公募共同研究の申請・採択状況

リオンセンター 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

※リオ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 5：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。

## 2) 研究者の受け入れ状況

本研究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

	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。

### 3) 研究費

本公募共同研究にて使用した研究費の内訳を表7に示す。

表7：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。

#### 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

	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

#### 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	58
	国際	20	28	30	34	34	36	39
分野別件数 (国内/国際)	エアロ スペース	7 (5/2)	7 (5/2)	10 (7/3)	12 (9/3)	13 (10/3)	16 (12/4)	16 (3/13)
	エネルギー	16 (8/8)	14 (5/9)	18 (6/12)	20 (7/13)	21 (7/14)	21 (7/14)	21 (7/14)
	ライフ サイエンス	7 (5/2)	13 (8/5)	13 (9/4)	14 (8/6)	19 (12/7)	17 (12/5)	15 (8/7)
	ナノ・ マイクロ	17 (10/7)	17 (10/7)	23 (17/6)	24 (17/7)	24 (18/6)	24 (17/7)	22 (14/8)
	基盤	5 (4/1)	12 (7/5)	13 (8/5)	15 (10/5)	16 (12/4)	18 (12/6)	23 (16/7)
採択率 (%)		100	98	100	100	99	98	99
充足率 (金額) (%)		26～	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



## 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	J21I001
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	2021.4 ~2022.3
継続年数	1年目（発展）

**水素-空気予混合火炎の不安定挙動に及ぼす不活性ガス添加の影響**  
Effects of inert-gas addition on the unstable behavior of hydrogen-air premixed flames

門脇 敏\*†, 小林 秀昭\*\*††

\*長岡技術科学大学システム安全工学専攻, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

### 1. 研究目的

近年、環境負荷低減に直結する燃焼の一つとして、水素-空気希薄予混合火炎が衆目を集めている。そして、爆発に至り易い水素火炎を制御する術として、不活性ガスの添加が注目されている。水素火炎は不安定な振る舞いを示し易いことが知られており、それを制御するには火炎の不安定挙動に関する知見が不可欠である。これまでの数値計算では、領域を広げた場合のセル状火炎の不安定挙動に与える熱損失の影響を報告している。また、圧力が現象に与える影響を示し、活性化学種の分布などを明らかにしている。しかし、不活性ガスの添加が水素火炎の特性に及ぼす影響については精査されておらず、不安定挙動に及ぼす効果は未だ不明瞭である。

そこで本研究では、水素火炎の不安定挙動に及ぼす不活性ガス添加の影響を調べる。不活性ガス（水蒸気など）の添加の割合を変化させて数値計算を遂行し、火炎に加えられた微小擾乱の増幅率と波数との関係、つまり分散関係を求める。また、セル状予混合火炎の不安定挙動や燃焼速度を調べ、不活性ガス添加の影響を明瞭にする。さらに、実験結果との比較検討を行い、その効果を精査する。ここでは、不安定挙動の基本メカニズムを明らかにすることを目的とする。

### 2. 研究成果の内容

図1は、当量比を0.5とし、初期圧力が1atm、未燃ガス温度が348Kのときの断熱・非断熱条件下における分散関係を示したものである。水蒸気濃度が増加すると共に、増幅率は小さくなり、不安定領域は狭くなる。また、非断熱条件下では、増幅率は小さくなり、不安定領域は狭くなる。

図2は、セル状火炎の温度分布を示したものである。水蒸気濃度が増加すると、火炎の温度は低下し、セルの凹凸は深くなる。これは、水蒸気添加によりガスの熱拡散率が減少し、拡散-熱的效果が強くなるからである。また、非断熱条件下では火炎面近傍で局所的な温度差が生じ、セルの凹凸は深くなる傾向がある。

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、水素-空気予混合火炎の数値計算を遂行し、不安定挙動に及ぼす不活性ガス添加の影響を精査した。そして、水素の希薄予混合燃焼において、不活性ガス添加が火炎面の不安定挙動に大きな影響を及ぼすことを示した。以上のことから、火炎の不安定挙動に及ぼす不活性ガス添加の効果に着目した本研究は、十分な成果を得ている。

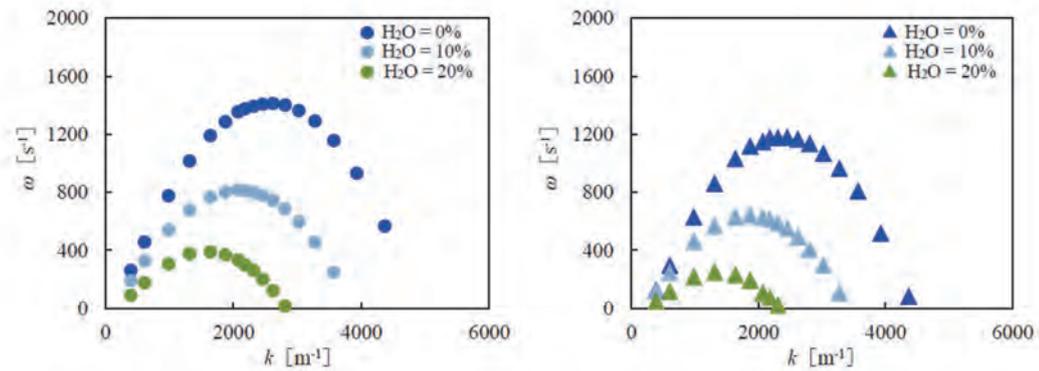


図1 断熱（左）・非断熱（右）条件下における分散関係

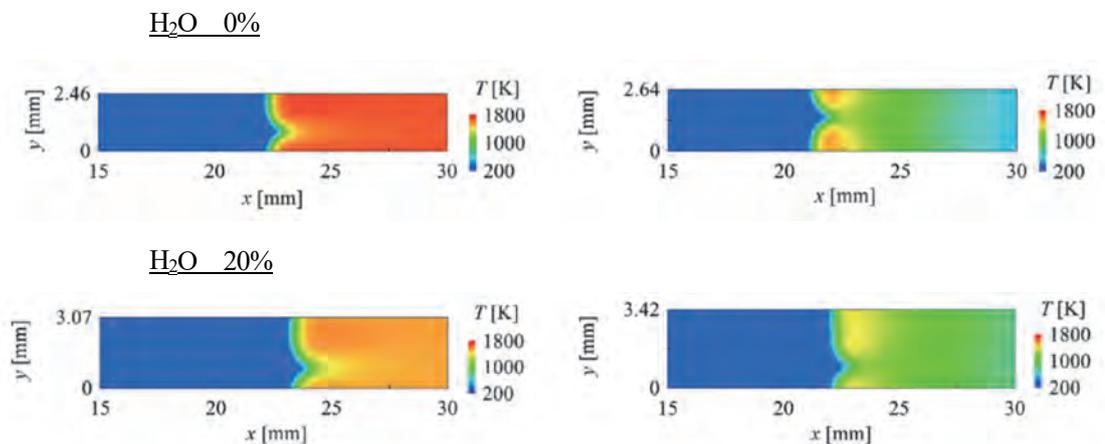


図2 断熱（左）・非断熱（右）条件下におけるセル状火炎の温度分布

#### 4. まとめと今後の課題

不活性ガスの添加に着目し、火炎挙動に及ぼす影響を精査した。今後は、化学種分布の影響を調べると共に、火炎の不安定挙動における初期温度の影響を明らかにする。

#### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

##### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] 古山大誠, トエトエアウン, 勝身俊之, 小林秀昭, 門脇敏, 断熱・非断熱条件下における水素-空気希薄予混合火炎の不安定挙動に及ぼす水蒸気添加の効果, 日本機械学会論文集, 87巻, 898号, 21-00107, (2021)

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] Kadowaki, S., Furuyama, T., Kawata, K., Katsumi, T., and Kobayashi, H., Numerical simulation on instability of hydrogen-air-steam lean premixed flames based on the detailed chemical reaction model, *Proceedings of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, pp. 137-138, (2021)

##### 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

課題番号	J21I002
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	2021.4～2022.3
継続年数	1年目（発展）

**キャビテーション不安定現象の遷移メカニズムの解明**  
**Clarification of the transition mechanism of cavitation instabilities**

姜 東赫\*†, 伊賀 由佳\*\*††  
 \*埼玉大学工学部, \*\*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**

これまでインデューサにおけるキャビテーション不安定現象の可視化実験が行われているが、軸流ポンプの構造のため、羽根車の流路の一部でしか観察ができておらず、不安定現象の種類によっては可視化ではキャビティの挙動を捉えることができない。そこで本研究では、キャビテーション不安定現象の挙動を観察することを目的とし、軸方向から羽根車全体を観察できる可視化用の遠心羽根車を用い、キャビテーション不安定現象の観察を行う。また、画像解析を用いてキャビティの振動を定量的に捉えることを試みる。さらに、騒音測定を用いたキャビテーション不安定現象の発生の検出を試みる。

**2. 研究成果の内容**

本実験ではキャビテーションの発生に伴う騒音を調査するため、図1に示す位置で、精密騒音計(RION NL52)による音圧測定を行った。実験は羽根車の回転数を 825 rpm 一定で行う。高速度カメラでキャビテーションの様相を記録すると同時に音圧の測定を行った。データロガーの記録上限が 500,000 点であるため、サンプリング周波数は 5 kHz で 100 秒間の回転数、流量、入口圧力、出口圧力、音圧を測定する。

図1は 50 Hz 以下の FFT 解析の結果である。キャビテーション未発生時と定常なキャビテーション発生時を比較すると、キャビテーションによって 41 Hz 付近にピークがあることがわかる。巡回キャビテーションが発生すると、9 Hz とその高調波、また 17 Hz 付近に特徴的なピークが現れる。特に、17 Hz は定常なキャビテーション発生時やキャビテーション未発生時と明らかに異なるため、この周波数は巡回キャビテーションによるものと考えられる。

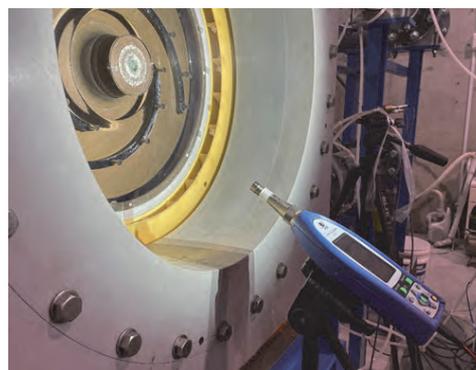


図1：音圧測定的位置

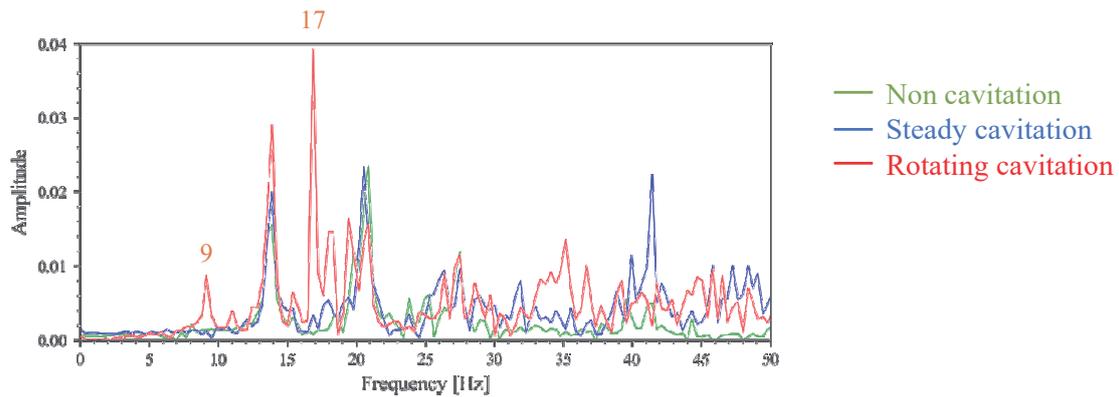


図2：音圧スペクトル

### 3. 研究目標の達成状況

可視化実験における、ポンプ外部空間での音圧測定の結果より、旋回キャビテーションに伴う音圧の変化を捉えることができた。音圧測定のFFT解析結果を用いた、キャビテーション未発生、定常なキャビテーション発生、旋回キャビテーション発生時の比較から、旋回キャビテーション発生時には17 Hzの卓越周波数が発生し、それはキャビティの挙動によるものであることを確認した。キャビテーション数を連続的に変化させる加圧実験における音圧測定より、ポンプ外部での音圧測定による、旋回キャビテーションの発生の検出が可能であることを示した。

### 4. まとめと今後の課題

今年の研究により以下の点がわかった。

- ・キャビテーションサージと超同期旋回キャビテーションの様相を観察した。
- ・音圧測定より、旋回キャビテーションにより発生する17 Hzの音圧の振動を捉えることができた。
- ・旋回キャビテーションに特有の周波数に注目することで、音圧測定により旋回キャビテーションの発生を簡易的に検出することが可能であることを示した。

減圧・加圧時の圧力制御が不十分である。今後、減圧装置を改善し、より精密に圧力制御を行い、キャビテーション不安定マップを完成する予定である。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Takashi Yokoi, Donghyuk Kang, Motohiko Nohmi, Tomoki Tsuneda, Junnosuke Okajima, Yuka Iga: “Visualization of rotating cavitation in a centrifugal pump”, *AICFM16*, 横浜, (2021).

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J21I003
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

## Efficient Uncertainty Quantification of Fluid Flow Problems via Combination of Kriging Surrogate Modeling and Proper Orthogonal Decomposition

Mehrdad Raisee\*†, Koji Shimoyama\*\*††

\*School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Most of the engineering applications have sources of uncertainty that can severely affect the system performance. These uncertainties lead to a gap between the actual operating and the nominal design conditions of the system. In recent years, a new field called non-deterministic computational fluid dynamics has been emerged, which examines the effect of random variables on the performance of systems. In real engineering systems, due to complex geometries, various boundary conditions and complexity of the implemented physical models, we often face with a large number of random variables. In such problems, implementing classical uncertainty quantification (UQ) methods such as polynomial chaos expansion (PCE) lead to exponentially increment of the computational cost. Thus, in real world problems, it is not possible to use such methods to quantify the effect of random variables. The first objective of this work is to examine the performance of the efficient methods in UQ analysis of CFD problems with large number of random variables. The second objective of this study is to improve the performance of the methods in terms of reducing computational cost and increasing the method accuracy.

The considered methods are multifidelity surrogate models and use the non-intrusive PCE. In this research project, three efficient UQ methods; namely: i) the Proper Orthogonal Decomposition (POD), ii) the Compressed Sensing (CS) or  $\ell_1$ -minimization and iii) the Kriging method are combined to reduce the computational time of UQ. During the first and second years of the project, a non-intrusive UQ framework is developed based on the combination of multi-fidelity POD and compressed sensing. In the third year of the research collaboration, the computational model is further refined by incorporating the Kriging method.

### 2. Details of program implement

During the first two years of the collaboration, UQ analysis of two challenging CFD problems (i.e. RAE2822 airfoil and NASA Rotor 37) with large number of random variables are performed using the developed method. It is found that the first version of the developed model (i.e. combination of POD and compressed sensing) significantly reduces the computational cost of the UQ analysis of these problems. During the third year of the research, the developed model is further refined by introducing the Kriging method. More specifically, the  $\ell_1$ -minimization technique is employed to recover dominant PCE coefficients through low-fidelity calculations.

Then, the optimal basis functions of non-intrusive POD approach are obtained which can reproduce the overall behavior of the stochastic field with affordable computational cost. In the final step, these optimal basis functions are used in the trend part of the Kriging. The method performance is examined using two new challenging CFD problems.

### 3. Achievements

In this research, to reduce the computational cost of uncertainty quantification, a new method based on the combination of POD method with Sparse Polynomial Chaos Expansion (PCE) and Kriging approaches is developed. As shown in Fig.1, the performance of the proposed method is investigated using two challenging test cases, namely: a) Film cooling jet in cross-flow and b) Leading-edge film cooling of a gas turbine blade with 7 and 10 uncertain variables, respectively.

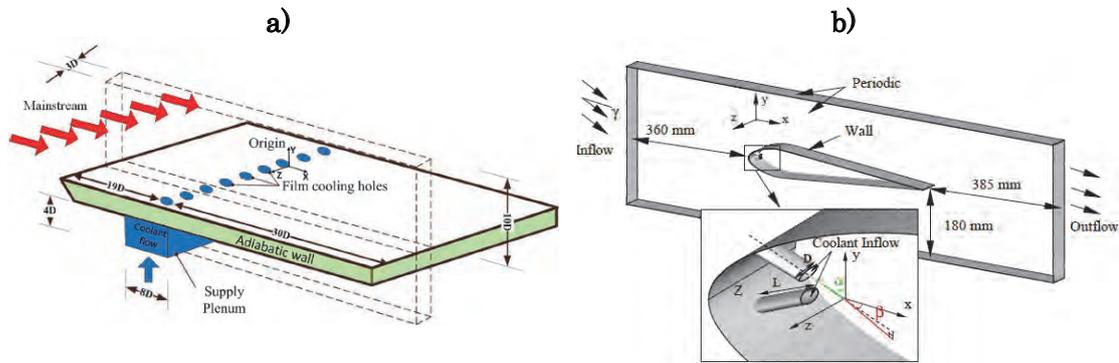


Figure 1: Geometry of: a) Film cooling jet in cross-flow and b) Film cooling at the leading edge.

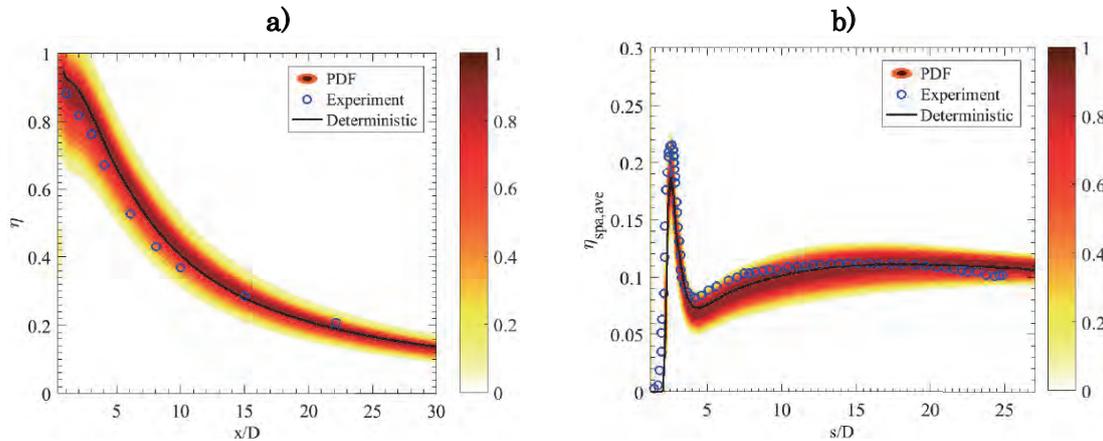


Figure 2: Contour of normalized 2D PDF of adiabatic effectiveness for: a) Film cooling jet in cross-flow and b) Film cooling at the leading edge.

As demonstrated in Fig. 2, the non-deterministic solutions encompass entirely the experimental data as a result of taking into account the variations of input variables. For the first test case, the new method reduces the computational cost by 91% and 53.9% with respect to the full PCE and POD methods. For the second test case, the computational cost reductions are 81% and 37.9% in comparison to the full PCE and POD methods, respectively.

The outcome of the research is submitted to Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization.

#### 4. Summaries and future plans

This project is concerned with the development of affordable UQ methods to handle large number of simultaneous uncertainties. The proposed multi-fidelity approach uses the advantages of three efficient UQ methods; namely the sparse PCE, the POD and the Kriging methods. In general, the proposed method is found to be superior in terms of accuracy in comparison to combined POD and compressed sensing, especially in the cases with the lower number of low-fidelity samples. For continuation of the research collaboration, efficient methods for Robust Optimization (RO) will be explored. The main challenges in achieving a robust optimization in Fluid Dynamics problems are the high computational cost of the procedure and methodology for assessing the robustness of system performance. The classical method for RO lack the required efficiency when utilized in robust optimization of Fluid Dynamics problems. To address this shortcoming, efficient metal modeling approaches such as Kriging, machine learning and adaptive sampling will be used. The research findings will be presented in the upcoming ICFD2022 conference.

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [1] A.Mohammadi-Ahmar, A.Mohammadi, M.Raisee and K.Shimoyama: Uncertainty Quantification of CFD Problems by Combination of Sparse Polynomial Chaos Expansion, Proper Orthogonal Decomposition and Kriging, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2021)*, Sendai, 27-29 October 2021, CRF-43.
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent) Not applicable.  
(Award) Not applicable.  
(Press release) Not applicable.

課題番号	J21I004
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

**圧縮性 DNS を用いた管楽器の流体音響解析**  
**Numerical study on wind instruments with compressible DNS**

高橋 公也\*†, 住田 玲\*, 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、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 を用いたモデル解析を行い、1) エッジトーンを音源とする小型のエアリード楽器(リコーダー、オルガンパイプ等)の発音機構の解明、2) ホルンのマウスピースに発生する流体音の解明を目指す。これまで、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。

## 2. 研究成果の内容

これまでのエッジトーンの成果をまとめた原著論文が出版された[1]。本年度の具体的な研究課題の成果は以下のとおりである。

### 1) DNS をもちいた小型エアリード楽器の解析

前年度までのメンバーであった田畑氏と協力し、エアジェット楽器の歌口近傍の Lighthill 音源の第1項と第2項の解析を行った。その結果、図1に示すように、通常無視できるとされる第2項が、第1項よりも1桁程度大きな値を持つことがわかった。より単純な回転渦対 (Co-Rotating Vortex Pair) 問題でも同様の結果が得られた。一方で、遠方場の音波は、第1項からの放射でよく説明できると考えられている。Lighthill の音源は、音波だけでなく、局所的な擬似音波や流体的な密度揺らぎも作り出すと言われている。この観点から考察を今後行う必要がある。

### 2) DNS を用いたホルンのマウスピースの解析

前年度から引き続き、ホルンのマウスピースの2次元モデルの解析を行った。この解析は、マウスピースを単体で吹奏するバジングと呼ばれる演奏法を再現したものである。今年度

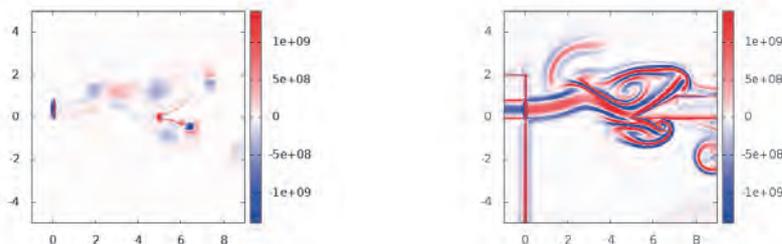


図 1 エアリード楽器の Lighthill の音源項(左 : 第 1 項、右 : 第 2 項)

は、長方形ではあるが唇の形状を再現し、唇を振動させその隙間を周期的に閉じるモデルの解析を行った。また、口腔の効果を検討するために、マウスピース後方に長方形の口腔を取り付けたモデルの解析も行った。行った解析は、a)唇を固定し、一定流速を与えたもの、b)それに周期的な流速を与えたもの、c)唇を振動させ一定流速を与えたもの、d)それを口腔を取り付けたモデルで行ったもの、計4種類である。振動の周期はマウスピースのヘルムホルツ共鳴周波数としている。モデル a)では、減衰振動が見られたが、モデル b)-d)では周期的な音波の放射が見られた。図2に、唇の後方に口腔を配置したモデルのマウスピース近傍の流速分布と遠方の圧力分布を示す。流速分布を見るとマウスピースのカップ内と口腔内に渦が発生しているが、圧力分布を見るとマウスピース開口からの周期的な音波の放射が見られる。図3にカップ内の圧力振動の結果を示す。周期的な流速を加えたものは、振幅は大きいほぼ正弦波である。唇を振動させるモデルでは、振幅は小さくなり若干ではあるが正弦波的でなくなる。口腔を取り付けたモデルでは、振幅は小さくなるが、その波形は正弦波とは異なり、現実のマウスピースの演奏音に近いものが得られる。

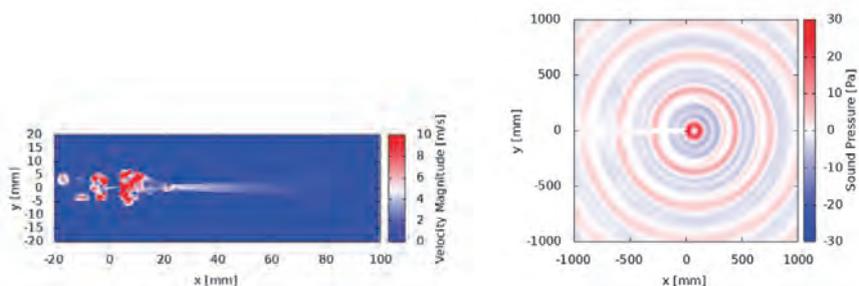


図 2 口腔を取り付けたホルンのマウスピースの解析 (左 : 流速分布、右 : 圧力分布)

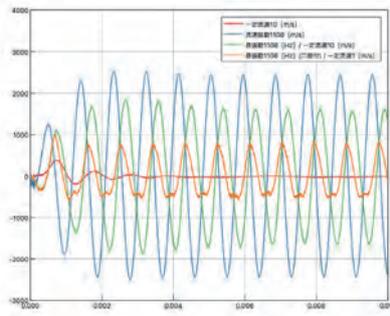


図 3 マウスピースカップ内の圧力振動

### 3. 研究目標の達成状況

エッジトーンの研究をまとめ原著論文が出版された[1]。また、これまでの研究成果をまとめた発表を ICFD2021 で行った[2]。DNS を用いた小型エアリード楽器の解析では、Lighthill の音源項の第 1 項と第 2 項の比較検討を行った。さらに、ホルンのマウスピースの問題では、唇振動を再現するモデルの解析に成功し、口腔の効果を取り入れたモデルの解析もおこなった。その成果を AFI2021 で発表した[3]。これより、当初の目標をほぼ達成したと考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

今後の課題は以下の通りである。DNS を用いたホルンのマウスピースの解析では、Lighthill の理論等を用いて解析し、流体が音波になる場所を特定することを試みる。さらに、可能であれば、円筒座標系を用いて軸対象モデルを作成し、限定的ながら 3 次元計算を行い、2 次元計算との違いを考察することを目指す。ホルンの解析の手法を応用し、オーボエ等のダブルリードの解析を行う。ダブルリードでは、細くて長いリード部分の影響で、音波の発生領域の特定は未解決な問題である。振動する 2 枚のリード片の動きを再現するモデルを開発し解析を進める。Lighthill の音源の問題では、回転渦対、エッジトーン、エアリード楽器における第 1 項と第 2 項からの音波の放射について検討を進める。

### 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] S. Iwagami, T. Ryoya, T. Kobayashi, Y. Hattori and K. Takahashi “Numerical Study on Edge Tone with Compressible Direct Numerical Simulation: Sound Intensity and Jet Motion”, *International Journal of Aeroacoustics*, 20 (2021) pp.283-316, doi: 10.1177/1475472X211003296.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] K. Takahashi, R. Tabata, S. Iwagami, S. Ikoga, R. Sumita, S. Takanami, T. Kobayashi, Y. Hattori, “Numerical study on sounding mechanism of air-jet instruments with compressible fluid simulation”, *Proceedings of 18th International Conference on Flow Dynamics*, Oct. 2021, pp.637-639.(Invited paper)
- [3] R. Sumita, R. Tabata, T. Kobayashi, K. Takahashi, Y. Hattori, “Numerical Study of a French Horn Mouthpiece with Compressible Direct Numerical Simulation”, *Proceedings of 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Oct. 2021, pp.175-177.

#### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J21I006
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

## ソニックブーム波形の立ち上がり時間に及ぼす乱流干渉の影響

Effects of the turbulence interaction on the rise time of a sonic boom pressure signature

鶴飼 孝博\*†, 大谷 清伸\*\*††

中川 穂南\*

\*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

過去に申請者は、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」が乱流効果を受けづらいと示唆する研究成果を挙げた(APPL ACOUST 114, pp.179-190, 2016). しかし、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

本年度は、KZK 方程式ベースの衝撃波伝播解析ツールを用いて「立ち上がり時間の長い圧力波形」の“立ち上がり時間”と乱流干渉時間の関係を数値解析的に調査した。図1に本解析で使用した飛行モデルを示す。このモデルは東北大学流体科学研究所所有の弾道飛行装置を用いて射出できる設計となっている。モデル先端の円錐部から「立ち上がり時間の長い圧力波形」が生成され、この円錐部の長さ  $l$  を変更することで“立ち上がり時間”の異なる圧力波形が生成できる。図2に生成した飛行マッハ数 1.4 かつ  $H/L = 0.395$  ( $H$ : 高度,  $L$ : モデル全長) の近傍場圧力波形を示す。なお、“立ち上がり時間”が最も短い波形を Model A とし、“立ち上がり時間”が最も長い波形を Model E とした。さらに圧力波 - 乱流場の干渉時間を変更するため、数値的に生成した等方性乱流場の幅  $W$  を 50~250 mm に変更し、干渉時間  $t_{int} = 0.145 \sim 0.727$  ms の範囲で乱流干渉の効果を評価した。

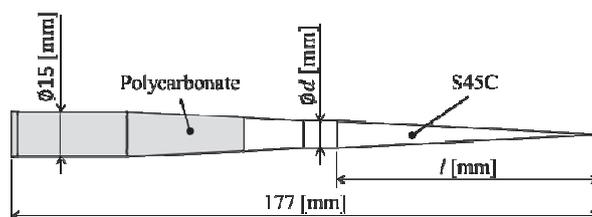


図1：飛行モデル

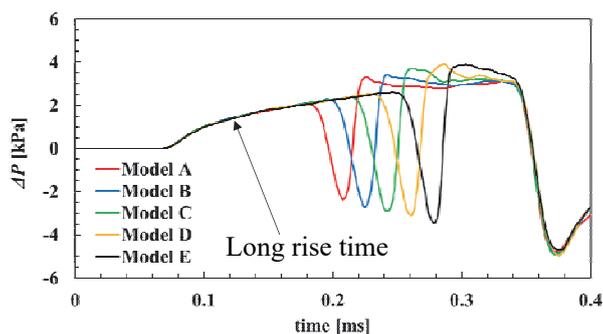


図2：1寸法の異なるモデルから生成された  $H/L = 0.395$  における近傍場圧力波形

図3に、Model A～Eの「立ち上がり時間の長い圧力波形」における平均最大過剰圧比  $P/P_{w/o}$  および最大過剰圧の標準偏差  $P_{std}$  を示す。下付き  $w/o$  は乱流が干渉していない状態を示す。ここで、 $P/P_{w/o} = 1$  は、乱流干渉により最大過剰圧が変動しないことを意味する。乱流場との干渉時間  $t_{int}$  が増加すると乱流干渉により平均の最大過剰圧が低下するものの、「立ち上がり時間」が長いと乱流の影響を受けにくい。つまり、「立ち上がり時間」が最も長い Model E において、 $P/P_{w/o}$  が1に近くなっている。一方、最大過剰圧の標準偏差  $P_{std}$  においても、平均最大過剰圧と同様に、Model E が最も乱流干渉の影響を受けず、干渉時間の増加とともに標準偏差が増加する。「立ち上がり時間」の長さによって乱流干渉の影響が変化することの原因を明らかにするため、圧力波波面の到達時間  $t_{ar}$  を調査した。図4に到達時間変動  $\Delta t_{ar} = t_{ar, w/o} - t_{ar}$  の平均値を示す。ここで、 $\Delta t_{ar}$  が正の場合は、乱流干渉によって波面の到達が遅れる。観測点（高度0 m）では、Model A が Model E より  $\Delta t_{ar}$  が大きくなった。つまり、Model A では、乱流干渉によって波面の到達が遅れて ( $t_{ar}$  が長い)、「立ち上がり時間の長い圧力波形」が「立ち上がり時間の短い波形」に変化し始めていることが示唆される。一方、Model E では、乱流干渉によって波面が比較的遅れずに到達しており ( $t_{ar}$  が短い)、Model A よりも「立ち上がり時間の長い圧力波形」を維持していると考えられる。到達時間と最大過剰圧の関係を調べるため、この相関係数を算出した (表1)。Model A～Eの全てにおいて、負の相関があり、波面が遅れた場合に最大過剰圧が増加し、波面が進んだ場合に最大過剰圧が減少することが分かった。この傾向は先行研究と一致している。また、「立ち上がり時間」が長くなるにつれ、この相関が弱くなり、Model E において乱流干渉による最大過剰圧変化が最も弱いことが相関値からも確認できた。

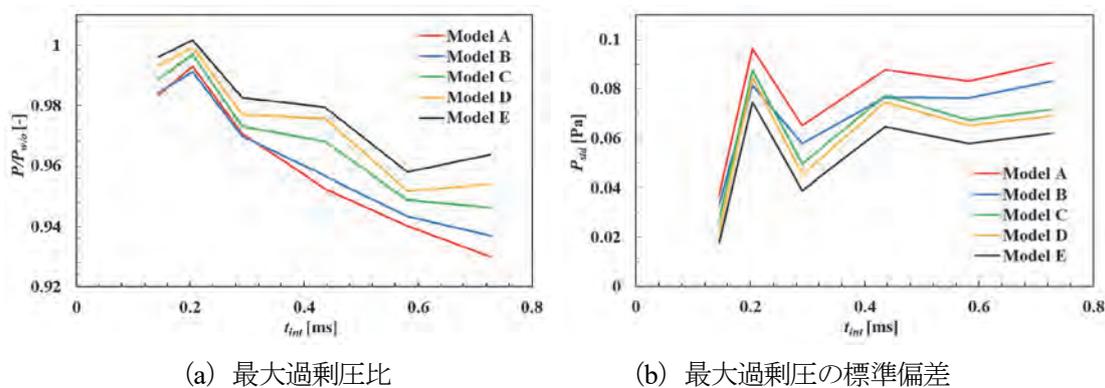


図3：干渉時間変動による乱流効果

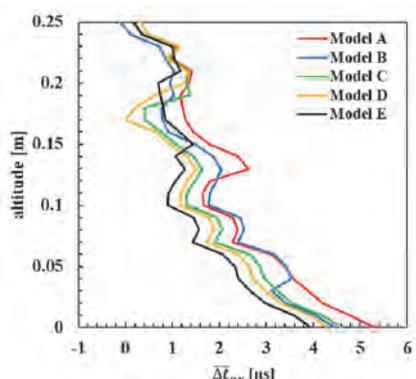


図 4：干渉時間変動による波面到達時間 at  $t_{int} = 0.727$  ms

表 1：到達時間と最大過剰圧の相関値

	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E
Correlation coefficient	-0.87	-0.84	-0.8	-0.74	-0.7

### 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」が乱流効果を受けにくいことを数値的に実証した。特に、“立ち上がり時間”の長さとの到達時間の関係を詳細に調査し、“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。この研究成果は、今後の低ブーム超音速旅客機開発に貢献できると考えられる。

### 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“立ち上がり時間”と乱流干渉時間の関係を数値解析的に調査した。乱流干渉時間を固定した場合、「立ち上がり時間の長い圧力波形」の“立ち上がり時間”が長い波形では、乱流干渉によって最大過剰圧とその変動値が低くなることが分かった。つまり、乱流干渉による影響を受けにくいことが明らかになった。また、乱流干渉によって衝撃波波面が遅れずに到達することで、「立ち上がり時間の長い圧力波形」を維持し、最大過剰圧も変動しないと考えられる。本研究の解析条件は、東北大学流体科学研究所所有の弾道飛行装置を用いた実証実験を見越して調整しており、今後の実証試験を経て、本解析結果の妥当性を確認することを期待している。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

- [1] M. Kobayashi and T. Ukai: Effectiveness of a Supersonic Jet-Jet Interaction Technique on Flow Structure in an Underexpanded Jet Impinging on a Perpendicular Plate, *Acta Astronautica* 195 (2022), pp.163-168. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.03.010>
- [2] T. Ukai: The Principle and Characteristics of an Image Fibre Background Oriented Schlieren (Fibre BOS) Technique for Time-Resolved Three-Dimensional Unsteady Density Measurements, *Exp Fluids* 60:170 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03251-2>
- [3] 鵜飼孝博：画像伝送光ファイバーを応用した3次元BOS法の原理と基礎特性, *JAXA Special Publication*, ISSN 1349-113X, JAXA-SP-21-008 (2022), pp.235-241.

## 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [4] R. Hata and T. Ukai: Particle Motion due to a Surface Shape in Jet-Particle Interaction, *33<sup>rd</sup> International Symposium on Space Technology and Science*, Online, (2022), 2022-g-10.
- [5] M. Kobayashi and T. Ukai: Asymmetrical Unsteady Flow Field due to a Supersonic Impinging Jet Controlled by Fluidic Injectors, *33<sup>rd</sup> International Symposium on Space Technology and Science*, Online, (2022), 2022-e-25.
- [6] H. Nakagawa, T. Ukai and K. Ohtani: The Effects of Time Scale on the Interaction between the Pressure Waveforms and Turbulence, *33<sup>rd</sup> International Symposium on Space Technology and Science*, Online, (2022), 2022-e-26.
- [7] M. Kobayashi and T. Ukai: Surface and Spatial Flow Structure of an Underexpanded jet with Vertical Jet Interactions Impinging on Perpendicular and Inclined Plates, *AIAA SCITECH 2022 Forum*, Online, (2021), AIAA 2022-2582.
- [8] H. Nakagawa, T. Ukai and K. Ohtani: The Numerical and Investigations of the Pressure Rise Time on the Turbulent Interaction, *The 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Online, (2021), CRF-50.
- [9] H. Yamashita, B. Kern, T. Ukai, R. Iura, T. Misaka and S. Obayashi: Sonic-boom Calculation of a Realistic North Atlantic Flight, *The 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Online, (2021), CRF-60.
- [10] 太田勝也, 鵜飼孝博: ニューラルネットワークを用いた超解像技術のBOS法への適応, 2021年度衝撃波シンポジウム, (2022).
- [11] 黒田拓真, 鵜飼孝博: Portable Fiber BOSの特性評価, 2021年度衝撃波シンポジウム, オンライン, (2022).
- [12] 鵜飼孝博, H. Zare-Behtash, K. Kontis and A. Russell: シュリーレンベースの定量可視化技術を用いたナノ秒パルスプラズマアークチューエータの誘起流について, 日本機械学会流体工学部門 A-TS 05-24 研究会「プラズマアークチューエータ研究会」第8回シンポジウム, 基調講演, オンライン, (2022).
- [13] 畑梨香, 鵜飼孝博: 噴流とレゴリス干渉により拡散した粒子が噴流構造に及ぼす影響” 混相流シンポジウム2021, オンライン, (2021).
- [14] 井浦玲伊, 鵜飼孝博, 山本敦史, H. Yamashita, B. Kern, 三坂孝志, 大林茂: 気象データを基にした実在大気によるソニックブームの伝播解析, 第53回流体力学講演会/第39回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2021, オンライン, (2021).
- [15] 鵜飼孝博: 画像伝送光ファイバーを応用した3次元BOS法の原理と基礎特性, 第53回流体力学講演会/第39回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2021, オンライン, (2021).
- [16] 中川穂南, 鵜飼孝博, 大谷清信: 圧力波形—乱流場間の時間スケールが圧力変動に及ぼす影響, 第59回飛行機シンポジウム, オンライン, (2021).

## 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J21I007
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

弾性体の変形-周囲流-遠方場音情報の複合動的解析による空力音発生メカニズム解明  
 On the multi dynamic mode analysis of flow-induced noise from an elastic bodies

寺島 修\*†, 小西 康郁\*\*††  
 西川 礼恩\*, 森崎 稜磨\*, 重 昂輝\*, 奥野 未侑\*\*\*, 小松崎 俊彦\*\*\*  
 \*富山県立大学, \*\*東北大学流体科学研究所, \*\*\*金沢大学  
 †申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

本研究では、吹流しや旗、昆虫の羽根、植物の葉などに代表される弾性体が流体に曝された際に、その変形により周囲の流体と相互干渉することにより発生する音の発生機構の解明とその制御手法の構築を行う。

## 2. 研究成果の内容

一様流中の旗に関する研究は、Fairthorne や Thoma の研究を皮切りに、基本的な流体-構造連成問題として数多く行われ、日本では Taneda の研究がよく知られている。初期のこれらの研究では旗の流体抵抗やはためきの周波数、はためきの形態などの基本的な情報が調べられた。

旗に関する研究は基本的な流体-構造連成問題である一方、その後も数多く行われた。これらの研究については Yu らの Review 論文によくまとめられている。旗で生じる振動の種類は大きく3つに大別され、通常の旗で発生する自励振動、流れ方向に対抗する形で設置された対向旗で発生する自己制御振動、カルマン渦列などの速度変動を発生させる物体後流に設置された旗で生じる強制振動が挙げられる。近年はこのような旗で生じる振動をエナジー・ハーベスティングや伝熱・混合促進に利用する研究が多く行われている。この理由として、流体起因振動は外力を伴わないため、上記の工学的応用を効果的かつ低コストで汎用性高く実現できるためと考えられている。

このように近年でも旗に関する研究が世界中で広く行われている一方、旗の振動と発生する音の関係については深く調べられていない。そこで本研究では、旗の振動と発生音の計測、および、旗の後流の速度の計測を行い、これらの関係について調べた。

図1に実験に使用した旗の寸法を示す。旗の流れ方向の長さは410 mm、幅は300 mm、質量は11 gである。また、流体と旗の質量比の逆数  $M_s$  は0.18であり、Double-neck mode と呼ばれる振動モードが発生すると予想される。この旗を図2、図3に示すように風洞の吹き出し口に設置し、旗の変形と発生音の関係を調べた。また、旗の後流の速度分布の計測をPIVにより行った。座標系は図2、図3に示すように風洞吹き出し口中央とした。実験方法の詳細は頁数の制約上割愛する。

図4に流速  $U_\infty$  が30 m/sの時の流体音の計測結果の周波数解析結果を示す。図中には図2に示した Microphone 1と2の計測結果を暗騒音の計測結果と併せて示した。図4より、旗で発生する流体音は面直方向に伝わる指向性を有していることがわかる。また、この流速で

は 60 Hz の特徴的な音が発生していることがわかる。

図 5 に旗の長さ  $l$  を変更して  $Ms$  を 0.18, 0.26, 0.60 とし,  $U_\infty$  を 20, 25, 30 m/s とした場合に発生する流体音の周波数  $f_p$  を示す. ここで,  $f_p$  とは図 4 に示すように計測結果の周波数解析結果に現れる特徴的な音の周波数を指す. 図 5 より, いずれの  $Ms$  においても  $f_p$  は流速に線形比例していることがわかる. しかし,  $f_p$  は  $Ms$  に依存して変化しており,  $Ms$  が小さい, すなわち旗の長さ  $l$  が長いと  $f_p$  が小さくなることがわかる. なお,  $f_p$  を  $U_\infty$  と  $l$  で無次元化した無次元化周波数  $St$  は  $Ms = 0.18, 0.26, 0.60$  ではいずれの流速条件においてもそれぞれ 0.82, 0.45, 0.23 となった.

図 6 に旗の長さ  $l$  と厚さ  $t$  を種々変更して  $Ms$  を 0.18, 0.26, 0.36, 0.45, 0.54, 0.60, 0.80 とした場合に発生する流体音の無次元周波数  $St$  を示す.  $St$  は  $f_p$  を  $U_\infty$  と  $l$  で無次元化したものである. 図 6 より,  $St$  は  $Ms$  の増加につれて減少する傾向にあるが,  $Ms$  が大きくなる, すなわち, 旗の長さが短くなる, もしくは, 旗の重さが流体の重さに対して相対的に重くなるにつれ,  $St$  は一定値に近づく傾向を示す. これは, これ以上旗の長さを短く, あるいは, 旗の重さを重くしても旗の振動モードが変化しないことを表している. これまでの研究により  $Ms$  が 0.7 を超えると  $St$  が 0.23 となることが示されており, 本研究の結果もこれらの結果と矛盾しない.

図 7 に  $z=0$  における旗の変位の時間変動の変動強度 (RMS 値)  $D_{rms}$  の計測結果を示す. また, 図 8 には旗の下流近傍の  $D_{rms}$  の分布を示す. 両図には全周波数の時間変動を基に求めたものと  $f_p$  の周波数の時間変動から算出したものを示した. 両図より, いずれの計測結果においても旗の下流方向端部に近づくにつれて  $D_{rms}$  は大きくなっている. しかし,  $D_{rms}$  が最大となる位置は両者で差異があり,  $f_p$  の周波数の時間変動から算出したものの方がより下流側に最大となる位置が存在した. これはすなわち, 旗で発生する音の音源が旗の下流端部であることを表しており,  $D_{rms}$  が最大となる位置とは一致しないことを示している. また, 図 8 より, 旗の下流端のスパン方向中央位置で  $f_p$  の周波数に対応する時間変動が大きくなっており, この位置が音の発生に強く関わっていると考えられる. さらに, 図 7, 図 8 の結果を踏まえると, 図 9 に示すように  $Ms = 0.18$  の旗では 1 node mode と 2 nodes mode の和で表される Double-neck-mode の振動が生じているものと考えられる.

図 10, 図 11 に旗の後流の主流方向 ( $U$ ), 垂直方向 ( $V$ ) の速度分布を示す. 両図は瞬時速度分布であり, Microphone 1 で計測した  $f_p$  の周波数の音の音圧が最大となる時刻のものである. なお, 旗とマイクロホンとの距離に基づき音圧の計測結果と速度の計測結果には時間差が生じるため, 旗とマイクロホンとの距離と音速に基づき音圧の計測時刻の補正を行った. 図 10, 図 11 より, 大きな音が発生している時には旗の後流に垂直方向速度が正と負の領域が旗の設置位置 (変形中心位置,  $y = 0$ ) に対して上方と下方に交互に並ぶ分布となっており, その出現周波数が  $f_p$  の周波数と一致した. また, これらの領域の移流速度は主流速度の 0.7-0.8 倍程度であることが明らかとなった. これより,  $Ms = 0.18$  の場合の流体音はカルマン渦列に類似した後流渦構造の存在によりもたらされているものと考えられる. なお, 同じ厚さの旗を用いた場合,  $Ms$  が大きく 1 node mode や Single-neck となった場合は発生する音圧が小さく, 図 10, 図 11 に見られた垂直方向速度が正と負の領域の空間スケールが小さくなっていることが明らかとなった. このため, 旗の振動モードが Double-neck-mode となることで後流渦構造の空間スケールや構造の明瞭度が変化し, 発生する音圧が大きくなる可能性が示唆された.

図 12 に流速  $U_\infty$  が 30 m/s の時の  $y = 0$  の計測断面における流速分布を示す. 図中の色が主流方向流速を表している. 左図が瞬時流速, 右図が平均流速を表している. 平均流速の算出には 10,920 枚の撮影画像を使用したため, およそ 2 秒間の計測結果の平均値を表している. この結果より, 旗の後流の旗の下流端からやや離れた位置に高速域が形成されることが明らか

かとなった。

図 13 に図 12 の結果に対して Snap shot POD 解析を施し得られた、第 1-第 4 モードの速度変動エネルギーを有する主流方向速度変動の分布を示す。第 1 モードの速度変動のエネルギー寄与率は約 7% で、第 1-第 4 モードでは約 20% 程度であった。POD 解析の結果、旗の下流端のスパン方向端部には旗の面直方向 ( $y$  方向) に軸をもつ渦が存在することが明らかとなった。上述の通り、二次元的なはためきを行い、空力音の音源となっている旗の下流端の中央付近の後流には、カルマン渦列に類似したスパン方向 ( $z$  方向) に軸をもつ渦構造の存在が確認された。しかし、旗のはためきの三次元性が高まる旗のスパン方向端部では旗の後流の中央方向へ向かう流れが誘起され、図 12 に示すように旗の後流の旗の下流端からやや離れた位置に高速域が形成されるものと考えられる。

最後に、双方向流体-構造連成解析の結果を示す。解析は汎用熱流体解析ソフト ANSYS FLUENT および構造解析ソフト ANSYS MECHANICAL (ANSYS 2020 R2) を用いて行った。

図 14 にシミュレーションで用いた旗の寸法を示す。座標系は流れ方向を  $x$ 、旗の面直方向を  $y$ 、旗の幅方向を  $z$  とした。上流側 8 mm の部分の拘束条件を固定とし、旗の  $z$ - $x$  面および下流側  $y$ - $z$  面の拘束条件を摩擦なし支持とした。また、旗の固定部を除く流体に接する 5 つの面を流体と固体の境界面の設定とし、ダイナミックメッシュを有効化した。ANSYS FLUENT と ANSYS MECHANICAL それぞれのソフトにて流体解析および構造解析を行うが、システムカップリング機能を用いて、設定した境界面にて流体力と構造変形の計算結果の受け渡しを相互に行い、解析を進めていく双方向の解析を試みた。メッシュは六面体形状とし、最小メッシュサイズは 2 mm とした。乱流モデルは LES (Large Eddy Simulation) とした。タイムステップは 0.0002 s、計算時間は 0.1 s とした。解析に用いた物性値を表 1 に示す。

図 15 に計算領域の寸法を示す。計算領域は  $x$  方向に 600 mm、 $y$  方向に 450 mm、 $z$  方向に 300 mm とした。流入部には 30 m/s の一様流流入条件を与え、流出部にはゲージ圧を 0 とする圧力境界条件を与えた。本シミュレーションでは、(a) 流入面のスパン方向長さを 200 mm としたものの、(b) 流入面のスパン方向長さを 50 mm としたものの、2 種類を用意し結果を比較した。

図 16-18 に流体構造連成解析で得られた 3 つの時刻における  $y$  方向変位のコンター図を示す。いずれの図においても、(a) は流入面のスパン方向長さが風洞試験と同様に 200 mm、(b) は流入面のスパン方向長さを 50 mm にまで狭めた場合の解析結果である。図 16-18 より、実験結果と同様に流れ方向端部付近で  $y$  方向変位が最も大きくなる傾向が確認できた。また、(b) の流入部を狭めたケースではスパン方向端部と中央部の  $y$  方向変位に差が生じており、実験の際に見られた端部の巻き上がりのような変形をしていることがわかる。一方、流入が 200 mm 幅のケースと比較すると、流入部 50 mm のケースでは、 $y$  方向変位の分布のスパン方向の対称性が低くなっていることが分かる。これらのことから、流入部を狭めた場合、旗の端部と中央で流れに速度差が生じたことによって、旗の変形の均一性を弱めたと考えられる。解析により得られたこれらの傾向は概ね風洞実験でこれまで得られた結果と矛盾しないため、来年度以降、解析技術の精度の向上にも取り組む予定である。

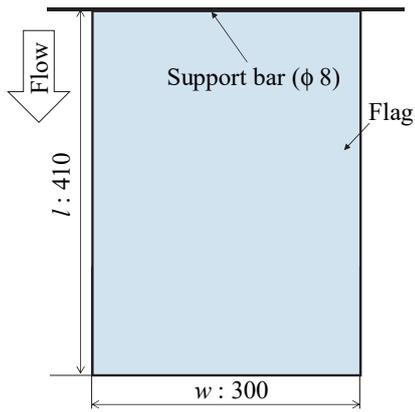


図1 実験に使用した旗

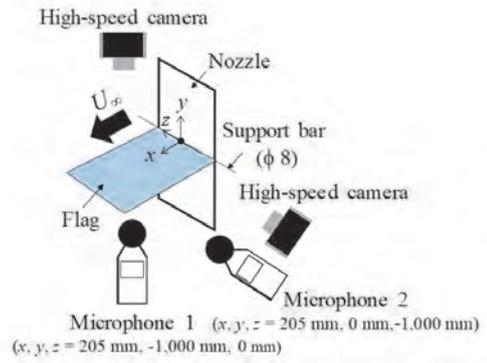


図2 発生音と旗の動きの同時計測方法

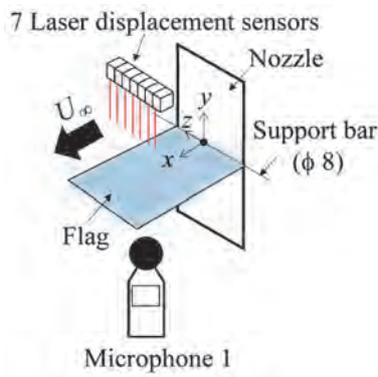


図3 発生音と旗の振動の同時計測方法

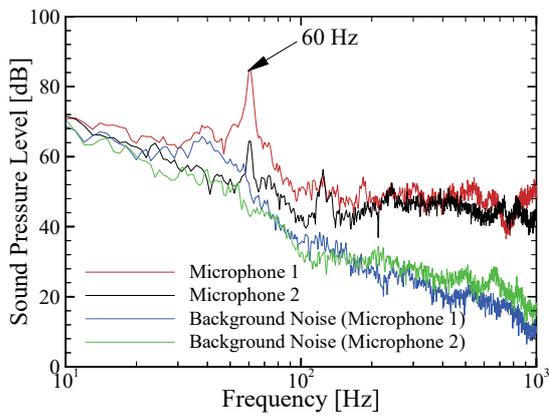


図4 発生音の計測結果

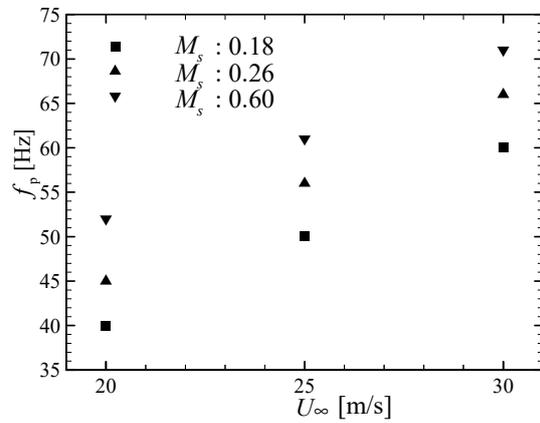


図5 発生音の周波数と流速の関係

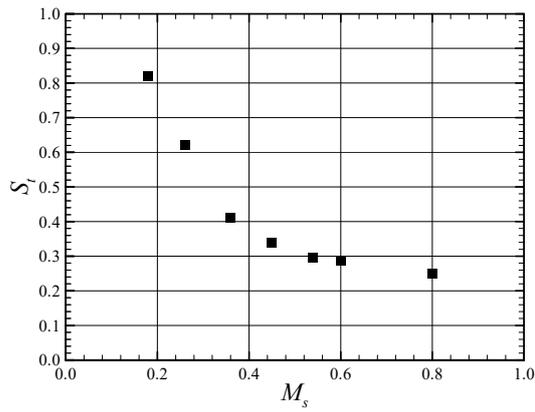


図6  $St$  と  $Ms$  の関係

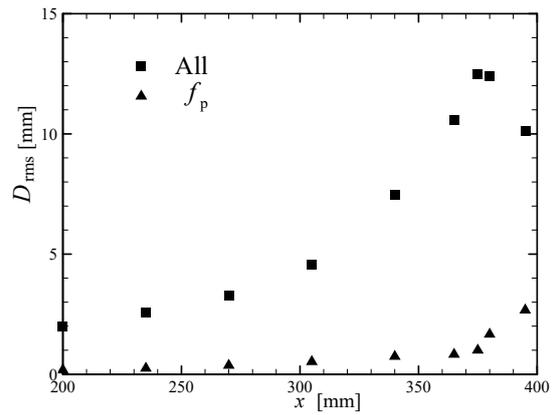


図7 各流れ方向位置の振動の大きさ

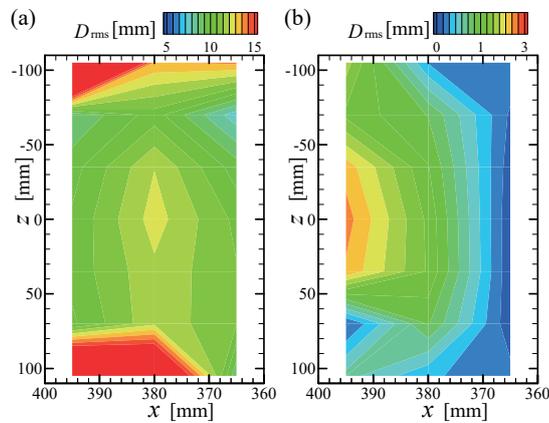


図8 各位置の振動の大きさのコンター図

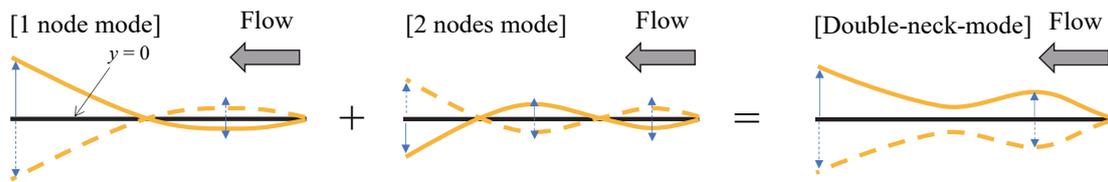


図9 旗の振動モード

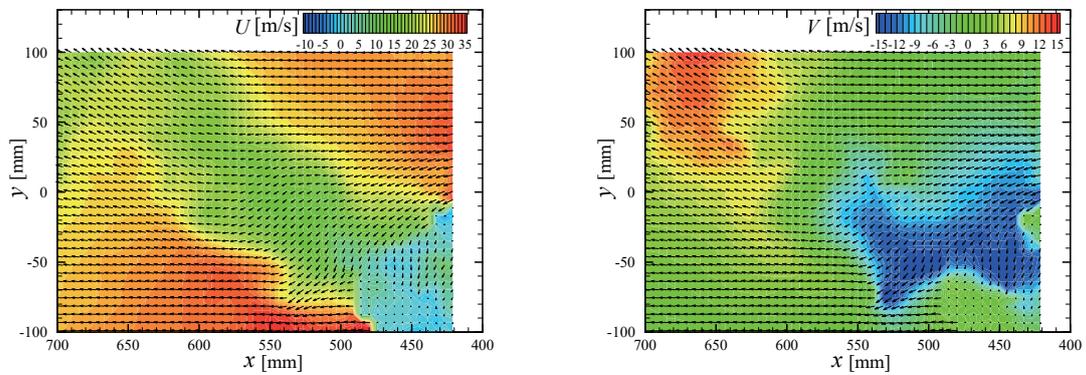


図10 旗の後流の速度分布 ( $U_\infty = 25$  m/s,  $z = 0$ , 左: 主流速度, 右: 垂直方向速度)

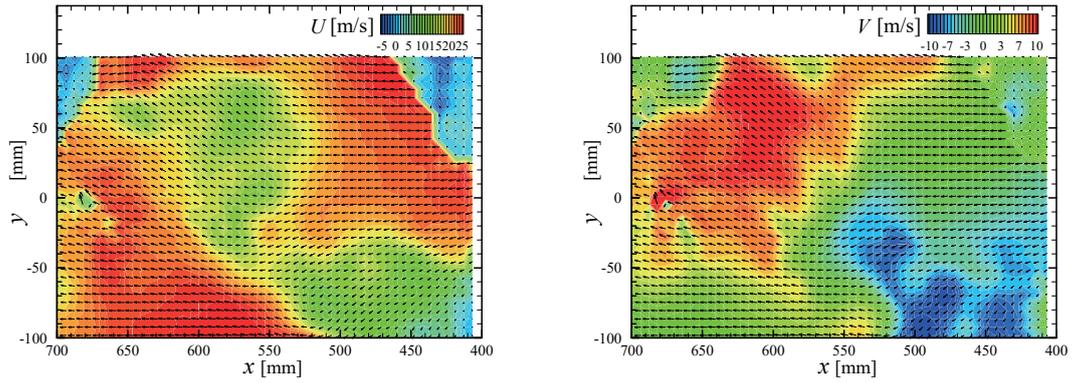


図 11 旗の後流の速度分布 ( $U_\infty = 30$  m/s,  $z = 0$ , 左: 主流速度, 右: 垂直方向速度)

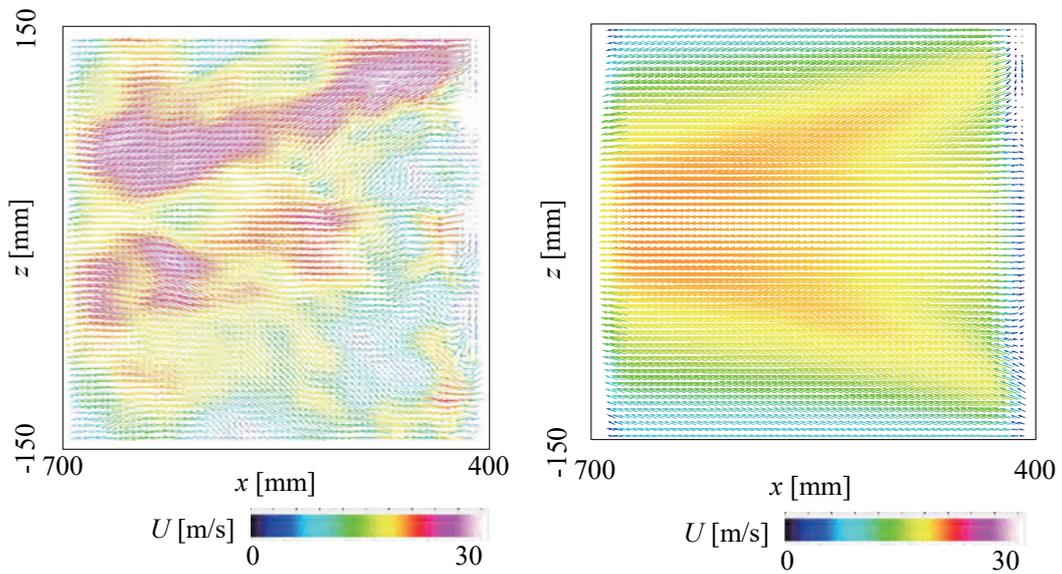


図 12 旗の後流の速度分布 ( $U_\infty = 30$  m/s,  $y = 0$ , 左: 瞬時流速分布, 右: 平均流速分布)

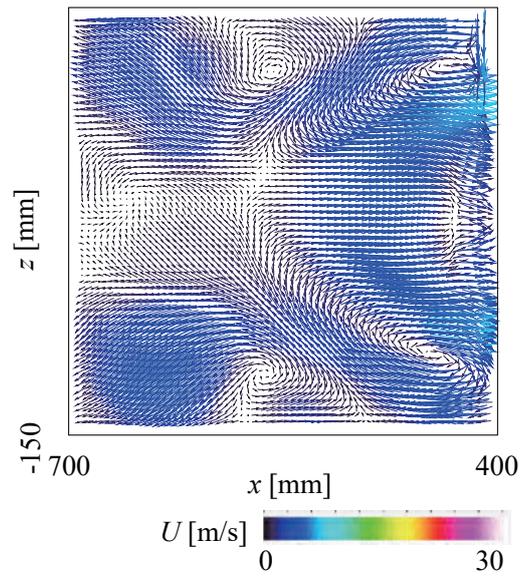


図 13 旗の後流の速度変動分布 ( $U_\infty = 30$  m/s,  $y = 0$ , 第1-第4モード)

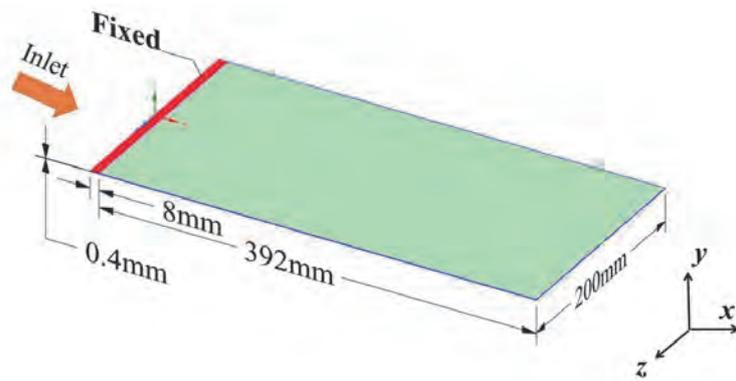


図 14 解析対象とした旗

表 1 各物理量の値

	Air	Polyethylene
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1.225	950
Viscosity (Pa · s)	1.7894e-5	
Young' s modulus (Pa)		1.1*10 <sup>9</sup>
Poisson' s ratio (-)		0.42

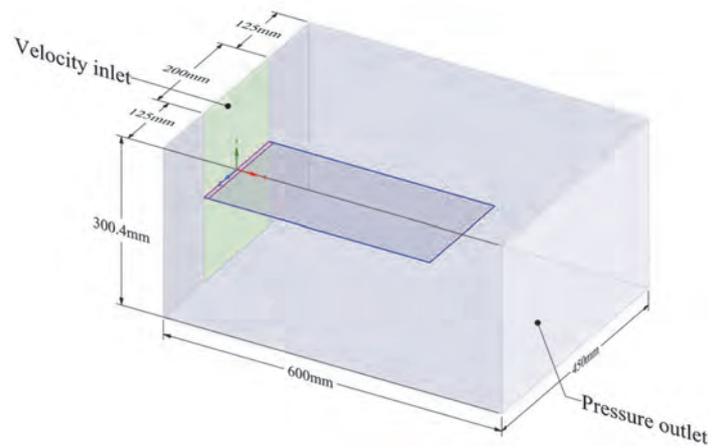
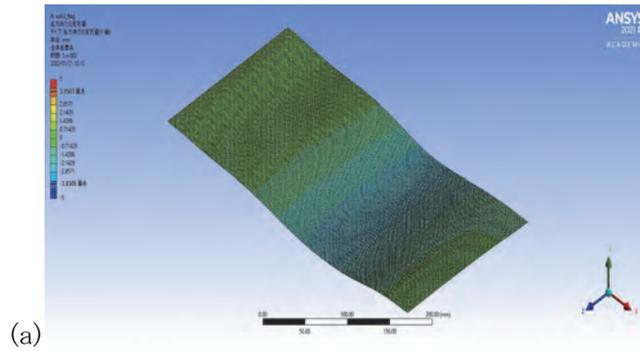
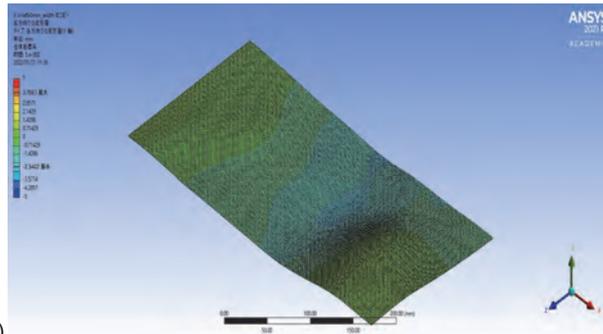


図 15 解析領域

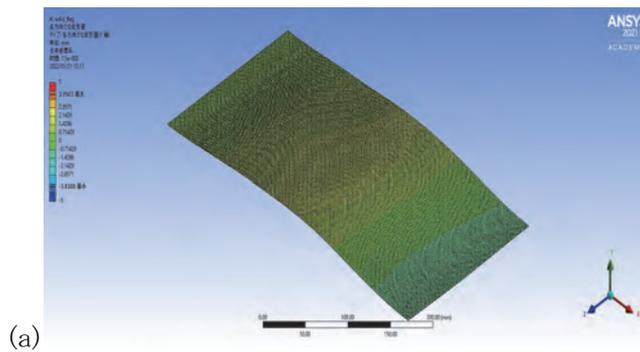


(a)

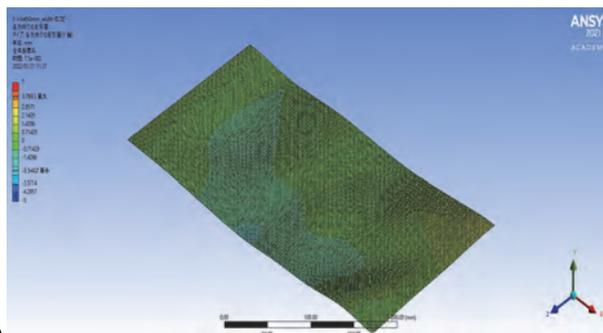


(b)

図 16 旗の  $y$  方向変位分布 ( $t = 0.050$  s, (a): 流入部幅 200 mm, (b): 流入部幅 50 mm)



(a)



(b)

図 17 旗の  $y$  方向変位分布 ( $t = 0.075$  s, (a): 流入部幅 200 mm, (b): 流入部幅 50 mm)

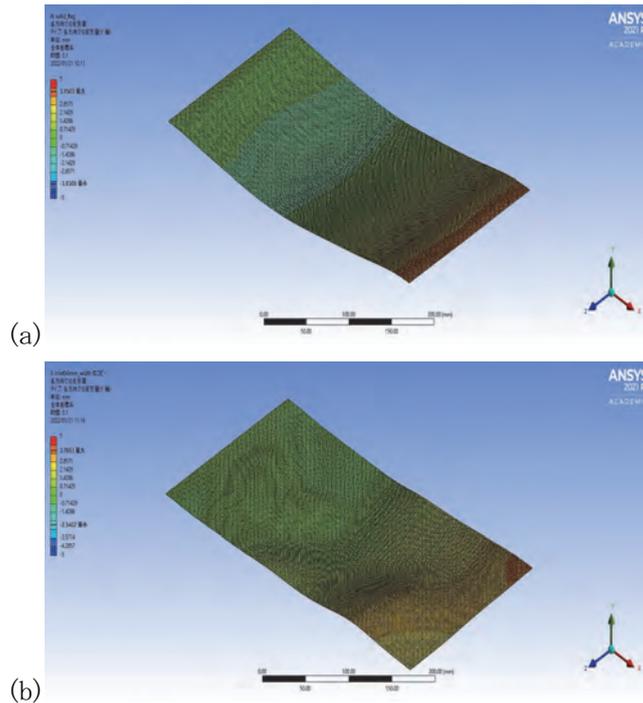


図 18 旗の  $y$  方向変位分布 ( $t = 0.100$  s, (a): 流入部幅 200 mm, (b): 流入部幅 50 mm)

### 3. 研究目標の達成状況

本研究により予想される成果は、工学的観点では、変形を伴う弾性体から発生する音の計測・解析・予測技術が確立でき、世の中に数多く存在する変形や変位を伴う工学製品の発生音や発生振動の予測・低減・制御に貢献できる。学術的観点では、弾性体の変形による弾性体と流体の相互影響により発生する音の特性を解明できる点に意義がある。これまで、音と流体がそれぞれ独立で干渉しない（相互不干渉）場合や、衝撃波のように音が流体へ影響を与える（音→流体干渉）場合などの検討は行われているが、相互に影響・干渉がある場合の検討は行われておらず、この点からも本研究は学術的価値があると考えられる。

今年度得られた成果は、上記の予想される成果のうち、世の中に数多く存在する変形や変位を伴う工学製品の発生音や発生振動の予測・低減・制御に貢献できる、という点に寄与したものと考えられる。

### 4. まとめと今後の展望

当初の予定通り、最終年度である 2021 年度は、(a)弾性体の後端のスパン方向端部の流れ構造、(b)弾性体の上下面の流れ構造、の 2 点の計測を行い、両者と発生音の関係について明らかにすることができた。両者の結果をまとめ、現在海外学術誌へ投稿予定である。

今後は 3 年間の公募共同研究で様々な角度から研究を行った、「弾性体の流体起因事例振動」を利用したクリーンエネルギー発電技術に関する研究を推進する予定である。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 奥野未侑, 西川礼恩, 伊神翼, 寺島修, 小西康郁, 小松崎俊彦: 一様流中の旗の後流構造に

関する研究, 日本機械学会 北陸信越支部 2022 年合同講演会 講演論文集, (2022), Paper No. G015 (3 Pages).

[2] M. Okuno, R. Nishikawa, K. Shige, O. Terashima, Y. Konishi and Toshihiko KOMATSUZAKI: Experimental Study on the Relation Between Flow-Induced Vibration and Noise Generation of a Fluttering Flag, *ASME IMECE 2021*, (2021), IMECE 2021-77447.

[3] M. Okuno, R. Nishikawa, K. Shige, O. Terashima, Y. Konishi and Toshihiko KOMATSUZAKI: On the relation between the wake of the flag in a free stream and its sound radiation, *Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2021), Paper No. 5146 (3 Pages).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J21I008
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4～2022.3
継続年数	3年目

**表面修飾ナノ粒子サスペンションのナノスケール界面現象に関する研究**  
**A study on nano-scale interfacial phenomena of surface-modified nanoparticle suspensions**

塚田 隆夫\*†, 小宮 敦樹\*\*††, 菊川 豪太\*\*, 久保 正樹\*, 庄司 衛太\*  
 \*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

有機溶媒あるいは高分子融液と表面修飾無機ナノ粒子からなるサスペンションの濡れ現象を、CFD-DEM 連成シミュレーションおよび位相シフトエリプソメータを用いて、ナノスケールの観点から解明する。また、分子動力学 (MD) シミュレーションを利用して、表面修飾ナノ粒子と周囲流体との界面構造および親和性を分子レベルで検討し、サスペンション中のナノ粒子の分散性について考察する。

## 2. 研究成果の内容

### 2.1 表面修飾ナノ粒子サスペンション液滴の拡張挙動の CFD-DEM 連成シミュレーション

流体運動では連続式および熱揺動を考慮した Landau-Lifshitz Navier-Stokes 方程式を、粒子運動では各粒子の Newton の運動方程式を、液滴表面形状は level-set 関数の移流方程式を支配方程式とし、粒子と流体の運動と液滴界面形状の連成シミュレーション<sup>1)</sup>を行った。ここで、粒子間相互作用力として、van der Waals 力、粒子間接触力、毛管力、粒子表面に存在する有機修飾鎖に起因する相互作用力を考慮した。なお、本研究では、計算時間を考慮し、液滴内外の密度比、粘度比を 1 と仮定した。解析では、三次元直交座標系において、 $x$  方向 2000 nm、 $y$  方向 125 nm、 $z$  方向 350 nm を計算領域とし、オレイン酸あるいはデカン酸修飾  $Al_2O_3$  ナノ粒子 (粒径 25 nm) を含む半円筒形トルエン液滴 (初期液滴半径 250 nm) の基板上での拡張挙動を解析した。

図 1 に結果の一例として、10  $\mu$ s 経過後におけるオレイン酸修飾およびデカン酸修飾ナノ粒子サスペンション液滴のスナップショット (粒子体積分率  $f=0.3$ )、粒子体積分率と液滴の固液接触長との関係を示す。ここで、粒子-溶媒間接触角は  $0^\circ$ 、溶媒-基板間接触角は  $15^\circ$  とした。修飾鎖がオレイン酸の場合、 $f=0.35$  で液滴の固液接触長は減少するが、粒子体積分率が 0.30 以下では液滴の拡張距離に変化はなかった。一方、デカン酸の場合、粒子体積分率の増加に伴い液滴の固液接触長は減少した。これは、デカン酸修飾ナノ粒子はトルエンとの親和性が低いため、液滴の拡張の過程でナノ粒子凝集体を形成することにより、液滴高さの低下が抑制され、結果として液滴の拡張が抑制されたためと考える。

### 2.2 表面修飾ナノ粒子サスペンション液滴の溶媒蒸発に伴う収縮挙動の可視化計測

Si 基板上に置かれたデカン酸修飾  $CeO_2$  ナノ粒子を含むサスペンション液滴を対象とし

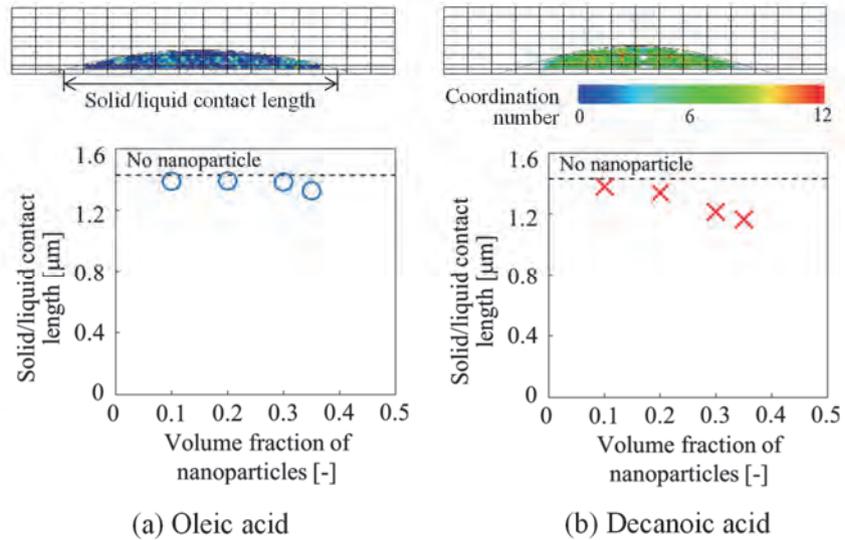


図1：異なる修飾鎖におけるナノ粒子サスペンション液滴のスナップショットおよび粒子体積分率と固液接触長との関係

て、溶媒蒸発時の接触線近傍の液膜形状および溶媒蒸発に伴い基板上に形成されるナノ粒子層の膜厚分布を位相シフトエリプソメータにより計測した。ここで、デカン酸修飾  $\text{CeO}_2$  ナノ粒子（平均粒径 6 nm）は超臨界水熱法<sup>2)</sup>により合成し、有機溶媒には *n*-オクタン、*n*-ノナン、*n*-デカンを用いた。なお、有機溶媒の飽和蒸気圧は、*n*-オクタン > *n*-ノナン > *n*-デカンの順であり、蒸発速度は *n*-オクタンが最大である。図2に結果の一例として、ナノ粒子濃度 0.1wt% の *n*-オクタンおよび *n*-デカンを溶媒とするサスペンション液滴に関して、液滴接触半径と接触角の経時変化（時間は溶媒蒸発完了時を  $t=0$  としている）を示す。*n*-オクタンの結果が示すように、溶媒蒸発に伴い、接触角が一定の時は、液滴半径が減少、液滴半径が一定の時は、接触角が減少する、いわゆる Stick-Slip 現象が生じている。また、*n*-デカンの結果と比較すると、蒸発速度が高いほど Stick-Slip 現象が顕著であることがわかる。

図3は、図2において溶媒が完全に蒸発した際に基板上に形成されたナノ粒子層の膜厚分布を示す。両溶媒の結果を比較すると、ナノ粒子層の平坦度は蒸発速度の低い *n*-デカンの方が高いことがわかる。

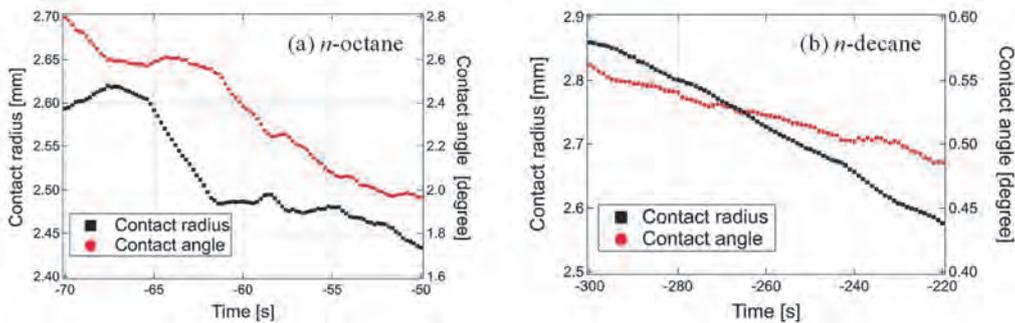


図2：異なる有機溶媒におけるナノ粒子サスペンション液滴の接触半径および接触角の経時変化

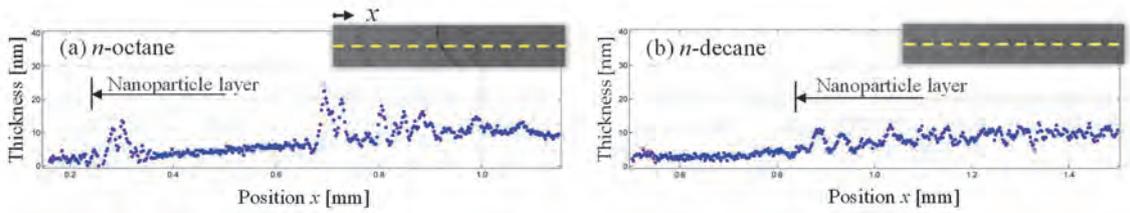


図3：異なる有機溶媒における溶媒蒸発完了時のナノ粒子層膜厚分布

### 2.3 表面修飾ナノ粒子サスペンションの表面張力測定および固液間界面親和性の評価

表面張力の測定には Pendant Drop 法を用いた。図4に種々の有機溶媒における表面張力 $\gamma$ に及ぼすナノ粒子濃度の影響を示す。ナノ粒子濃度が高いほど表面張力は低下したが、ある濃度以上では一定( $\gamma_{\infty}$ )となった。これは、気液界面にナノ粒子が吸着することで表面張力は低下するが、ある濃度以上では気液界面のナノ粒子数が飽和吸着量に達するためと考える。気液界面へのナノ粒子吸着による表面張力変化 $\Delta\gamma$ は、球形粒子吸着に伴う自由エネルギー変化を考慮すると式(1)で表される<sup>3)</sup>。

$$\Delta\gamma (= \gamma_0 - \gamma_{\infty}) = \Gamma_{NP}\gamma_0\pi r^2(1 - \cos\theta)^2 \quad (1)$$

ここで、 $\gamma_0$ は純溶媒の表面張力、 $r$ は粒子半径、 $\Gamma_{NP}$ は粒子の界面吸着量、 $\theta$ は粒子-溶媒間接触角である。飽和状態の吸着粒子が気液界面に六方最密で配置すると仮定して界面吸着量 $\Gamma_{NP}$ を評価し、図4で一定となった表面張力 $\gamma_{\infty}$ を用いて式(1)から粒子-溶媒間接触角 $\theta$ を算出すると表1の $\theta(\text{Exp})$ となった。接触角の値から、固液間界面親和性はトルエンおよびデカリン系よりシクロヘキサン系の方が高いことがわかる。

以上の結果の理論的裏付けを目的に、全原子分子動力学(MD)計算を用いて有機修飾無機固体/有機溶媒界面の親和性、すなわち接触角を評価した。具体的には、MD計算により固液界面の付着仕事 $W_{adh}$ <sup>4)</sup>と溶媒の表面張力 $\gamma_0$ を求め、式(2)より濡れ係数 $k$ を算出し、接触角 $\theta$ を求めた。

$$k (= \cos\theta) = \frac{W_{adh} - \gamma_0}{\gamma_0} \quad (2)$$

結果を表1の $\theta(\text{MD})$ に示す。MD計算による計算値は実験値と同様、固液間界面親和性はトルエンおよびデカリン系よりシクロヘキサン系の方が高い傾向を示した。

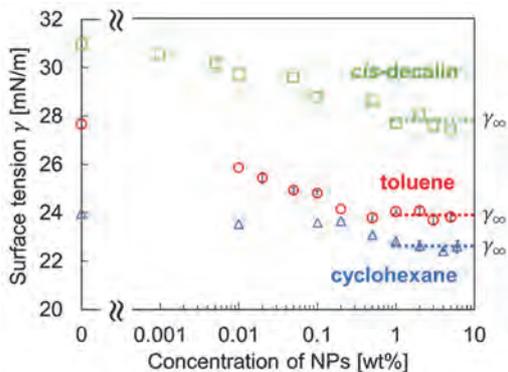


図4：表面張力に及ぼすナノ粒子濃度の影響

表1：ナノ粒子-溶媒間接触角

	$\theta(\text{Exp})$ [°]	$\theta(\text{MD})$ [°]
toluene	52.2	62.3
cis-decalin	48.8	64.1
cyclohexane	41.3	51.9

(参考文献) 1) Fujita, M. et al., J. Comput. Phys., 281 (2015) 421 ; 2) J. Zhang et al., Adv. Mater., 19

(2007) 203 ; 3) Binks, B. P., *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 7 (2002) 21 ; 4) F. Leroy et al., *Macromol. Rapid Commun.*, 30 (2009) 864

### 3. 研究目標の達成状況

研究成果に示す通り, 1) CFD-DEM 連成シミュレーションによる表面修飾ナノ粒子サスペンション液滴の拡張挙動 (濡れ挙動) とナノ粒子体積分率, さらにはナノ粒子の構造との相関の解明, 2) 超臨界水熱法により合成した表面修飾ナノ粒子を含むサスペンション液滴の溶媒蒸発時の濡れ挙動およびナノ粒子層の形成過程の可視化, さらには 3) ナノ粒子サスペンションの表面張力に及ぼすナノ粒子濃度の影響, 表面張力測定と MD シミュレーションによる固液間界面親和性の評価など, 当初の目標を達成できたと判断する.

### 4. まとめと今後の課題

本研究により確立した実験および理論的評価技術を利用し, (ナノ粒子-溶媒間親和性) - (サスペンション中のナノ粒子の構造) - (サスペンションのマイクロ動的濡れ特性) の相関についてより詳細に明らかにするとともに, 親和性だけでなく, 溶媒蒸発速度等のプロセス条件とナノ粒子の構造, 特に溶媒蒸発後のナノ粒子層の構造との相関について明らかにする必要がある.

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] Eita Shoji, Takahiro Kaneko, Tatsuya Yonemura, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Atsuki Komiya: Measurement of dynamic wetting using phase-shifting imaging ellipsometer: comparison of pure solvent and nanoparticle suspension on film thickness profile, apparent contact angle, and precursor film length, *Experiments in Fluids*, 62, 206 (2021), doi: 10.1007/s00348-021-03296-3.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] 庄司衛太, 齋藤大河, 琵琶哲志, 久保正樹, 塚田隆夫, 筈居高明, 阿尻雅文: ナノフルイド液滴蒸発時の動的濡れと堆積ナノ粒子層の光学測定, 化学工学会第 87 年会, (2022). (受賞講演)
- [3] 小西徹, 齋藤高雅, 久保正樹, 塚田隆夫: 有機修飾無機ナノ粒子を含む有機溶媒の表面張力測定及び固液間界面親和性の評価, 化学工学会第 87 年会, (2022).
- [4] 庄司衛太, 星野瑛, 齋藤大河, 琵琶哲志: 飽和条件下における Si 基板上アルカン液滴の先行薄膜の光学測定, 化学工学会第 87 年会, (2022).
- [5] Takamasa Saito, Ryo Takebayashi, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Eita Shoji, Gota Kikugawa, Donatas Surblys: Molecular Dynamics Analysis on the Interfacial Affinity between Organic-Modified Solid and Organic Solvent, *2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies*, (2021).
- [6] Takamasa Saito, Masaki Kubo, Eita Shoji, Takao Tsukada, Gota Kikugawa, Donatas Surblys, Atsuki Komiya: A Study on Nano-scale Interfacial Phenomena of Surface-modified Nanoparticle Suspensions, *Eighteenth International Conference on Flow Dynamics*, (2021).
- [7] 齋藤高雅, 竹林遼, 久保正樹, 塚田隆夫, 庄司衛太, 菊川豪太, Surblys Donatas: 有機修飾固体/有機溶媒界面の親和性に及ぼす表面修飾鎖および溶媒の影響, 第 42 回日本熱物性シンポジウム, (2021).
- [8] 齋藤大河, 庄司衛太, 琵琶哲志, 久保正樹, 塚田隆夫, 筈居高明, 阿尻雅文: Si 基板上ナノ流体液滴の蒸発を伴う動的濡れと堆積ナノ粒子層の可視化計測, 熱工学コンファレンス 2021, (2021).

- [9] 久保正樹, 庄司衛太, 齋藤高雅, 塚田隆夫 : ナノ材料の界面親和性評価と構造形成, 化学工学会第 52 回秋季大会, (2021).
- [10] 大塚俊輝, 久保正樹, 塚田隆夫, 小池修, 辰巳怜 : 基板上を拡張する表面修飾ナノ粒子含有ナノフルイド液滴の数値シミュレーション, 化学工学会第 52 回秋季大会, (2021).
- [11] 庄司衛太, 齋藤大河, 琵琶哲志, 久保正樹, 塚田隆夫, 笈居高明, 阿尻雅文 : ナノフルイド液滴蒸発時の動的濡れと堆積ナノ粒子層の光学測定, 化学工学会第 52 回秋季大会, (2021).
- [12] 庄司衛太, 齋藤大河, 琵琶哲志, 久保正樹, 塚田隆夫, 笈居高明, 阿尻雅文 : ナノフルイドの動的濡れにおける接触線近傍のナノマイクロ膜厚分布計測, 混相流シンポジウム 2021, (2021).
- [13] Eita Shoji, Taiga Saito, Tetsushi Biwa, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Takaaki Tomai, Tadafumi Adschiri: Measurement of dynamic wetting of a nanofluids droplet and nanoparticles deposition during evaporation, *Droplets 2021*, (2021).
- [14] 竹林遼, 齋藤高雅, 久保正樹, 塚田隆夫, 庄司衛太, 菊川豪太, Surblys Donatas : 分子動力学シミュレーションによる有機修飾  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /溶媒間の親和性に及ぼす修飾鎖長および溶媒の影響, 第 58 回日本伝熱シンポジウム, (2021).
- [15] 庄司衛太, 金子峻大, 久保正樹, 塚田隆夫, 小宮敦樹 : Si 基板上的  $\text{SiO}_2$  ナノ粒子/PDMS 懸濁液の先行薄膜の膜厚分布測定, 第 58 回日本伝熱シンポジウム, (2021).

### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) シンポジウム賞奨励賞, ナノフルイド液滴蒸発時の動的濡れと堆積ナノ粒子層の光学測定, 庄司衛太, 2022.3.16, 化学工学会粒子・流体プロセス部会.  
 青葉工学研究奨励賞, 位相シフト技術を導入した光学計測手法の開発と熱物質輸送現象への展開, 庄司衛太, 2021.12.8, 青葉工学振興会.  
 日本機械学会奨励賞 (研究), 位相シフト法を用いた熱物質輸送の光学可視化計測の研究, 庄司衛太, 2021.4.22, 日本機械学会

(マスコミ発表等) なし

課題番号	J21I010
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	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

機能性薄膜のエピタキシャル成長における量子・分子論的考察 研究題目  
Theoretical simulation on epitaxial growth of functioning thin film

金子 智\*†, 徳増 崇\*\*††  
須藤 理枝子\*\*\*, 安原 重雄\*\*\*\*

\*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

\*\*\*さがみはら表面技術研究所, \*\*\*\*ジャパン・アドバンスト・ケミカルズ

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

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、理論的な考察を行う。

## 2. 研究成果の内容

酸化物マグネシウム(MgO)のシリコン基板上エピタキシャル成長については、結晶成長の面内配向に関する考察を付着エネルギーの観点から見積もり、発表(Japanese Journal of Applied Physics vol. 58 SAAD06 (2019))している。更に、シリコン基板上でエピタキシャル成長したMgOの格子定数は小さくなっていることを報告し、格子欠陥によるモデルを用いた量子化学計算により考察した。本研究では、実験で得られた収縮した格子定数とバルクの格子定数を持つMgOのシリコン基板上での安定性を評価した。また、収縮したMgOの格子定数について、projector augmented wave method(PAW)法を用いた手法を新しく導入して、欠陥モデルでの最適化を行った。

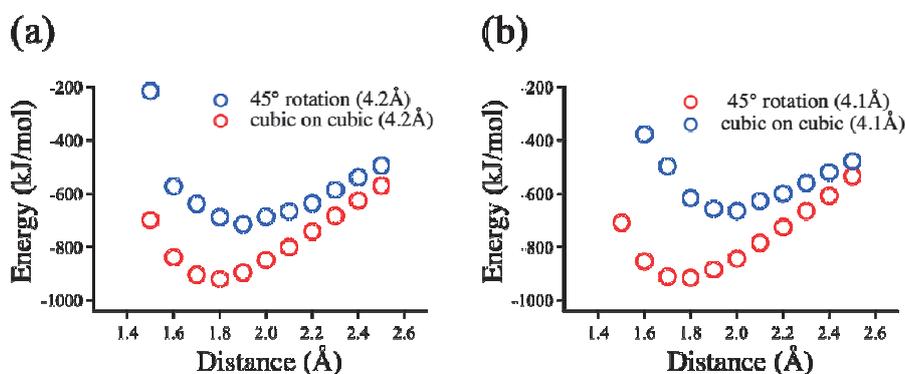


図 1 格子定数の異なる結晶での吸収エネルギー

付着エネルギーの見積もりには、Material Studio でモデルを構築し、DMol3 でシリコン基板上的 MgO のエネルギーを評価している。MgO の格子定数の見積もりには、atomska[1]で格子欠陥を導入し、ABINIT[2]を用いた PAW 法で構造の最適化を行なっている。成膜にはパルスレーザー蒸着法を用いてシリコン基板上に MgO 薄膜を成膜している。

格子不整合からは MgO はシリコン基板に対して 45 度回転して成長することが予想されるが、我々の実験では回転しない cubic on cubic 成長していることが分かっている。また、格子定数が 4.2Å から 4.1Å に収縮していた。本研究では、45 度回転と cubic on cubic 成長の安定性をそれぞれの格子定数 4.2 と 4.1Å で比較した。図 1 は回転と cubic on cubic 成長での吸着エネルギーの見積もりであり、バルクの格子定数である 4.2Å(図 1(a))と実験で得られた 4.1Å(図 1(b))の場合を示している。格子収縮の有無に関係なく、実験結果と同じく 45 度回転成長よりも、cubic on cubic 成長が安定していることが分かる。PAW 法による構造の最適化については今後進めていく予定である。

### 3. 研究目標の達成状況

欠陥導入には更に大きなスーパーセルを用いることで、欠陥を均一に導入することができた。また、2 件の発表をオンラインで行い、1 本の論文がアクセプトされた。

### 4. まとめと今後の課題

量子化学計算による構造最適化を進めている。さらに、様々な結晶方位を持つ基板での機能性薄膜の成長について検討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)

[1] Satoru Kaneko, Takashi Tokumasu, Manabu Yasui, Masahito Kurouchi, Shigeo Yasuhara, Tamio Endo, Masaki Azuma, Akufumi Matsuda, Mamoru Yoshimoto, Sumanta Kumar Sahoo, Kripasindhu Sardar, Jyh-Ming Ting, Masahiro Yoshimura “Crystal orientation of epitaxial oxide film on silicon substrate”, *Applied Surface Science* 586 (2022) 152776, doi: 10.1016/j.apsusc.2022.152776

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Satoru Kaneko, Sumanta K. Sahoo, Kripasindhu Sardar, Jyh-Ming Ting, Masahiro Yoshimura, Rieko Sudo, Shigeo Yasuhara, Tamio Endo, Manabu Yasui, Masahito Kurouchi, Masaki Azuma, Chiemi Kokubun, Takashi Tokumasu “Lattice constant prediction of magnesium oxide on defect model”, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Miyagi, Japan, (2021), CRF-22

[3] Satoru Kaneko, Takashi Tokumasu, Manabu Yasui, Masahito Kurouchi, Akifumi Matsuda, Mamoru Yoshimoto, Sumanta Sahoo, Kripasindhu Sardar, Jyh-Ming Ting, Masahiro Yoshimura, “Stability of Graphene Growth on Insulating Substrates in View of Absorption Energy Evaluated by Molecular Dynamics”, *Materials Research Society* (MRS) Boston, U.S.A., (2021)

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(受賞)

なし

(マスコミ発表)

なし

課題番号	J21I011
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	2021.4～2022.3
継続年数	2年目

**構造化照明を用いた高精度 PSP 計測手法の開発**  
**Development of PSP Measurement Technique Using Structured Illumination**

松田 佑\*†, 伊神 翼\*\*  
江上 泰広\*\*\*, 永井 大樹\*\*\*\*††  
\*早稲田大学理工学術院, \*\*東北大学工学研究科  
\*\*\*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

圧力の面分布計測が可能な手法として感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint; PSP) 計測法が注目を集めている。圧力を面分布可能な計測手法は、複雑な流動場を詳細に理解し、機器開発に利用する上で非常に重要な技術である。本研究ではこの PSP 計測法に着目し、圧力変化の小さな流れ場に対して問題となるカメラショットノイズ等の影響を排除する手法を提案した。また、構造化光を利用した空間パターン励起照明を行うことで、従来は困難であった外乱光下での圧力分布計測を実現することを目指した。

## 2. 研究成果の内容

PSP による圧力計測法では、励起光を PSP 膜に照射した際の PSP 発光の強度が圧力によって変化することを利用する。計測対象となる圧力変化が小さい場合、PSP 発光強度の変化も小さくなり、カメラのノイズと同程度になる。本研究の目的のひとつとして、このノイズを除去する手法の構築を行った。本研究では、得られた圧力分布に対して固有値直行分解 (Proper Orthogonal Decomposition; POD) を行うことで圧力場を構成するモード抽出を行う。センサー位置最適化問題の解として得られる空間座標における圧力値変動を時系列フィルタリングする。このフィルタリングされた値に対して、各モードの係数をスパースモデリングによって推定することでノイズの少ない圧力場を再構成する手法を提案した。実証実験として、流体科学研究所の小型低乱風洞を用いた実験を行った。計測対象には 40 mm 角、高さ 100 mm の角柱背後に生じるカルマン渦列を用いた。生データと提案手法による結果を図 1 に示す。図のようにノイズを極めて効果的に除去することに成功している。

もうひとつの目的として、外乱光下での PSP 計測に関する研究を実施した。PSP の励起光には、一般に空間的に一様な光が利用されるのに対し、本研究では構造化光を利用することで外乱光を除去した計測の実現を目的とする。PSP 発光強度分布をカメラで撮影する際、PSP 発光以外の光 (外乱光) が入射すると、これを PSP 発光強度と分離するのが難しく計測誤差となる。そのため、一般に PSP 計測は暗室内で行われる。しかし、実際の風洞試験や室外での実機の計測においては、暗室にするのが難しい場面が多くあり、このような環境下で外乱光の影響を除去して PSP 計測の可能な手法の確立が求められている。このような計測手法の実現のために、本研究では DMD (Digital Mirror Device) を用いて空間パターン化した励起光を PSP に照明した。これにより、PSP の発光は励起光の空間パターンと高い空間相関を有した

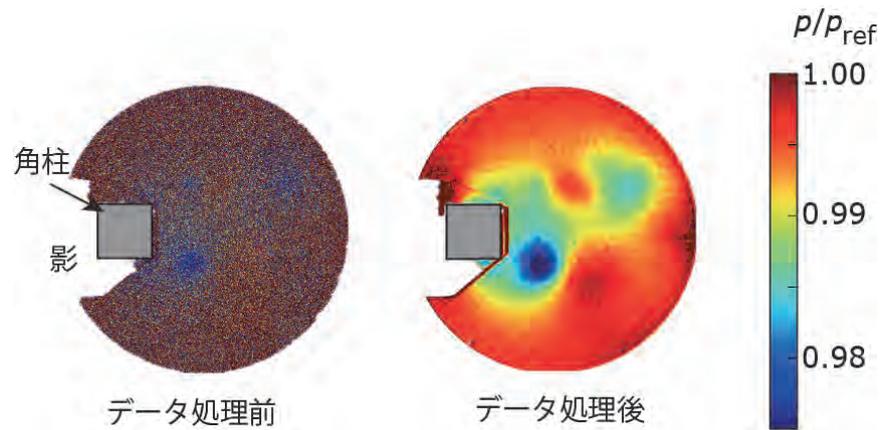


図1 提案手法によるノイズ除去前後の圧力分布  
(研究成果[1]から引用・改変)

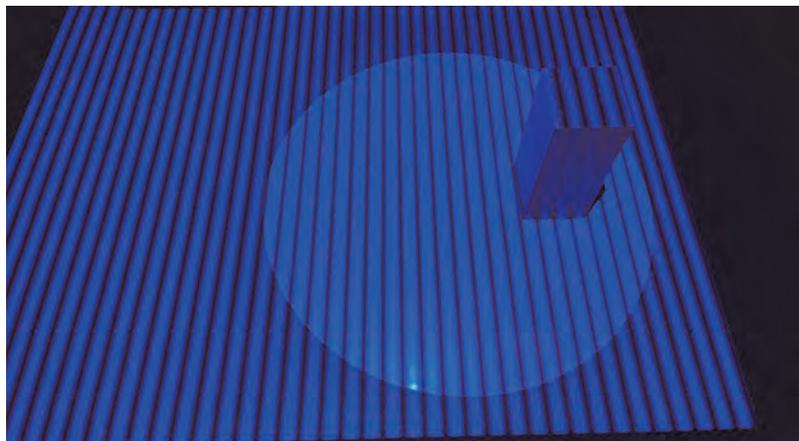


図2 構造化照明を行った様子。円形箇所が PSP  
塗布部分，縞模様が構造化照明の様子。

パターンとしてカメラで検出でき、低相関のパターンは外乱光として除去することができる。ただし、1つの空間パターンのみで計測を行う場合、励起光パターンの明暗分布のうち暗部でのPSPデータが取得できなくなるため、空間パターンの位相を変えながらデータを取得することで、外乱光の影響を除いたPSP発光画像を再構築する。本研究ではこれまでに構築してきた外乱光下でのPSP計測の実証実験として、実験に際しては、DMDを用いた励起光源を正弦波状に照明して実験を実施した。計測対象は、先と同様にカルマン渦列としている。図2に実験装置概要を示す。現在は取得したデータの解析を実施し、論文投稿中である。

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、PSP計測におけるノイズ除去と外乱光下でのPSP計測の実現に関して研究を実施した。提案手法により、PSP取得画像から大きくノイズを低減することに成功している。また外乱光下での計測においても前年度までの実験室レベルでの実証実験から、風洞実験による実証実験に進展させることができおり順調に研究が推移していると言える。

#### 4. まとめと今後の課題

ノイズ除去法に関しては、PSP 計測以外のその他の分布計測法に利用できる適用範囲の広い手法であり、多分野への適用が期待される。今後は、一層のノイズ低減が期待される。

#### 5. 研究成果

##### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[1] T. Inoue, Y. Matsuda, T. Ikami, T. Nonomura, Y. Egami, and H. Nagai, "Data-driven approach for noise reduction in pressure-sensitive paint data based on modal expansion and time-series data at optimally placed points," *Physics of Fluids* 33, 077105 (2021).

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] T. Inoue, Y. Matsuda, T. Ikami, T. Nonomura, Y. Egami, and H. Nagai, "Proposal of a noise reduction method for pressure-sensitive paint data using mathematical optimization," *Eighteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan (2021).

##### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（マスコミ発表）化学工業日報，2021年7月21日，高精度ノイズ除去法 スパースモデリング採用PSP計測法向け，2021. 7. 21.

課題番号	J21I013
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	1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\*†, 藤田 昂志\*\*††

永井 大樹\*\*, 榎原 幹十朗\*, Shuonan DONG\*, 廣谷 俊輔\*, 葛野 諒\*, Yanan WANG\*\*\*

\*東北大学工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所, \*\*\*University of Warwick

†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索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。そこで本研究の第一目的を「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」、第二目的を「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

2021 年度の本課題 1 年目で、下記の成果が得られた。

### ① 理論構築

回転角ではなく、勾配ベクトルを用いる構造モデリング理論を発展させ、慣性項の非線形性を排した膜翼の大変形構造解析手法を提案した[業績 1]。構造モデルを国際共同研究者 Wang 博士が有用性を示してきた空力モデル Unsteady Vortex Lattice Method [業績 2]と連成させることで、空力弾性解析を可能とした。共同研究者全員が使いやすいようにエクセルベースでパラメータ入力ができるコードを開発した。高速解析可能な二次元解析コードと詳細解析可能な三次元コードの 2 つを開発した。図 1 に解析結果の 1 例を示す。

### ② 提案モデルによる数値解析

国際共同研究者 Prof. Palacios の開発した空力弾性解析コード SHARPy との比較で、提案手法の構造解析の性能を検証した[業績 3]。

### ③ 風洞実験による解析の妥当性実証

所内対応教員：藤田が膜翼の風洞実験を行った。膜翼の変形量と空力の計測に必要な実験系を構築し、解析手法の実証に必要な実験データ取得に向けた基盤を整えた。

### 3. 研究目標の達成状況

スパン方向、コード方向の3次元大変形を考慮した構造空力連成モデルの確立し、第一研究目的を達成できたといえる。

### 4. まとめと今後の課題

第一目的は十分に達成できた。第二目的を達成するために今年度整えた実験系を用いて、多角的に変形形状や空力特性を計測すること、および解析手法の高効率化を今後の課題とする。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] Otsuka, K., Del Carre, A., Palacios, R., “Nonlinear Aeroelastic Analysis of High-Aspect-Ratio Wings with a Low-Order Propeller Model,” *Journal of Aircraft*, published online. DOI: 10.2514/1.C036285
- [2] Wang, Y., Zhao, X., Palacios, R., and Otsuka, K., “Aeroelastic Simulation of High-Aspect Ratio Wings with Intermittent Leading-Edge Separation,” *AIAA Journal*, published online. DOI: 10.2514/1.J060909

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] Otsuka, K., Wang, Y., Palacios, R., and Makihara, K., “Strain-Based Geometrically Nonlinear Beam Formulation for Flexible Multibody Dynamic Analysis,” *SciTech Forum 2022*, Online, USA, (2022), AIAA 2022-0848. DOI: 10.2514/6.2022-0848 【口頭】
- [4] Otsuka, K., Dong, S., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K., “Nonlinear Aeroelastic Analysis Coupling Unsteady Vortex Lattice Method and Strain-Based Beam Formulation,” *The 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Online, Japan, (2021), CRF-62. 【ポスター】
- [5] Otsuka, K., Dong, S., and Makihara, K., “Absolute Nodal Coordinate Formulations for Aeroelastic Analysis of Next-Generation Aircraft Wings,” *17th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control (MSNDC)*, Online, USA, (2021), DETC2021-68162. DOI: 10.1115/DETC2021-68162 【口頭】
- [6] 大塚啓介, Shuonan Dong, 榎原幹十朗, 「歪を要素変数とする非線形梁要素の柔軟マルチボディ解析への拡張」, 第63回構造強度に関する講演会, 下関, 8月, 2021. 【口頭】

#### 3) その他 (受賞)

- [7] 青葉工学研究奨励賞, 「次世代航空機の高効率な一連解析を実現する非線形移動型モデリング」, 大塚啓介, 2021年12月, 青葉工学振興会.

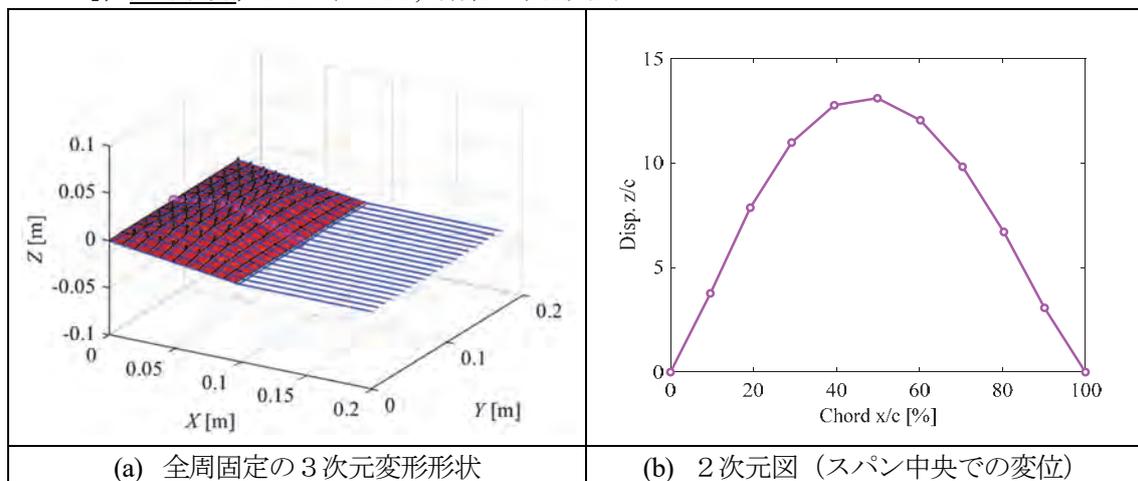


図1 開発した膜翼空力弾性解析コードによる解析例

課題番号	J21I014
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	2021.4~2022.3
継続年数	1年目

**プラズマを用いたサステナブルアンモニア製造法の開発**  
**Sustainable Ammonia Production by Plasma Method**

白石 僚也\*†, 早水 庸隆\*, 妹原 七虹\*, 中西 啓太\*, 中山 裕貴\*, 徳増 崇\*\*††  
 \*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、プラズマを用いた炭化水素分解では、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炭化水素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実験で示した。しかしまだ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 0.3 MJ/g-NH<sub>3</sub> を達成することを最終目的とする。また、分子動力学シミュレーション(MD) を用いて、プラズマを使ったアンモニア合成反応のメカニズムを詳細に明らかにすることを目的とする。令和3年度は、水やアルコールなどの液体水素源を微細化し、これを窒素プラズマに接触させることで高効率化を試みた。また、水/窒素プラズマ界面反応シミュレーションのためのモデル構築を試みた。

## 2. 研究成果の内容

図1に作成したアンモニア製造装置の概略図を示す。タンク内に溜められているメタノール中に(水素源)に、純窒素ガスを流すことで、メタノールの微細液滴を含んだ窒素の流れ(以後、原料流という)を反応路に流入させる。この原料流はプラズマによって分解され、下流で温度が下がり再結合する際にアンモニアが合成される。図1に示す装置を用いて、常温・常圧下・ワンステップアンモニア合成を試みた。また、電極材料を W, Fe, Cu とし、電極材料がアンモニア合成効率に与える影響を調べた。その結果、電極材料が Cu である場合に最大効率 58 MJ/g-NH<sub>3</sub> が得られた。これは従来のプラズマ法の約2倍の効率であり、本研究の提案する手法の有効性が示された。一方、MDシミュレーションにおいては、まず水の界面とバルク構造の比較を行うため、反応性力場分子動力学法(ReaxFF MD)を用いて真空層が両端に存在する水の界面/バルク計算を実施した。1.25 ps の NVT 計算の後に、界面近傍の水分子は表面に対して垂直に配向し、バルクとは異なる構造に変化する様子が目視で確認された(図2)。

また、令和3年12月1日(水)に東北大学流体科学研究所にて、共同研究集会を行なった。集会には、申請者、徳増教授に加え、米子高専と東北大学から合わせて8名の学生が参加した。実験を担う米子高専と、MDシミュレーションを担う東北大学流体科学研究所双方が現

在の進捗状況について報告し、今後の方針を検討した。また、東北大学側から米子高専側に MD シミュレーションの基礎に関する講義が行われた。

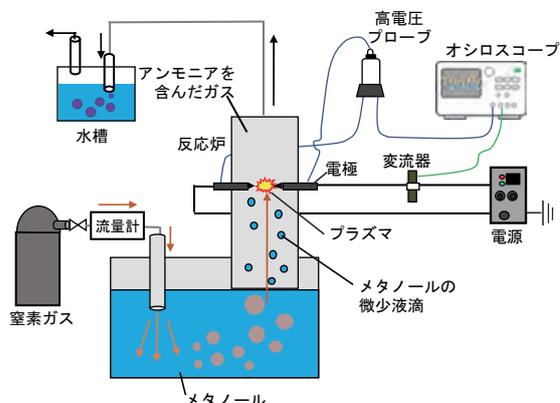


図 1. 作成したアンモニア製造装置の概略図.

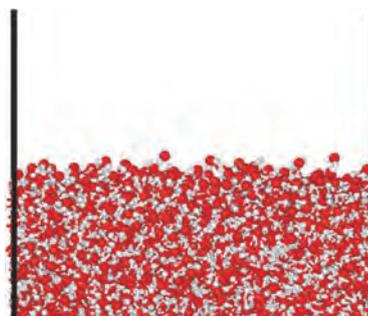


図 2. 作成したモデルによる水の界面/バルクシミュレーション.

### 3. 研究目標の達成状況

液体/プラズマの界面反応を利用したアンモニア合成装置を作製し、実験を行った。その結果、目標効率には届かないもの、提案する手法で従来法の 2 倍の効率を得ることができた。またシミュレーションでは、最表面の水分子がバルクとは異なる方向に配向する様子を再現できた。最終目標に対する進捗は 40% 程度であるが、元より目標効率達成には数年を要すると考えており、1 年目の達成状況としては良好である。

### 4. まとめと今後の課題

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の効率を 0.3 MJ/g-NH<sub>3</sub> にすることを目標に新たな実験装置を設計・製作し、実験を行った。また MD シミュレーションのためのモデルのプロトタイプを作成した。現状の達成状況は 40% 程度である。今後は液滴の径・数密度、プラズマの形態などについて実験的検討を行う。また MD シミュレーションでは水分子の配向解析などを通じて、定量的に構造の変化を確認する。

### 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] Yuki Nakayama, Ryoya Shiraishi, Yasutaka Hayamizu, Naoya Uene, Takashi Tokumasu, Sustainable Ammonia Production by Plasma Method, *Proceedings of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), Poster No. CRF-69

- 3) その他 (特許、受賞、マスコミ発表等)  
なし

課題番号	J21I015
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4 ~2022.3
継続年数	1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\*, 藤田 昂志\*\*  
伊神 翼\*\*\*

\*横浜国立大学, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*東北大学工学研究所

†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広がり、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。

## 2. 研究成果の内容

本研究では、プロペラとその後方に固定翼が配置された形状(図 1)を用いて数値解析を行うことで、風洞スケールの模型(非圧縮流れ)と実機スケールの模型(プロペラ付近は圧縮性流れ)周りの流れ場を比較した。それにより、実際の火星での飛行時に生じるプロペラ周りの圧縮性の影響がその後流中の固定翼の空力特性に与える影響を調査した。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  $Re=30,000$  で一定とした。プロペラ回転数は 4500 rpm であり、迎角は  $4^\circ, 7^\circ$  とした。この時、風洞スケールではプロペラ翼端マッハ数は  $M_{tip}=0.10$ 、実機スケールでは  $M_{tip}=0.52$  となる。

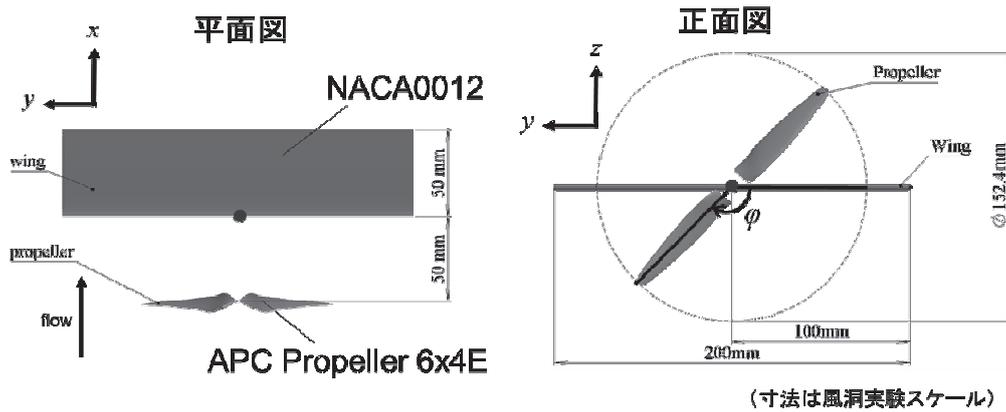


図1：計算対象

迎角  $4^\circ$  の時、実機スケールでは固定翼の非定常的な揚力変動の大きさが風洞実験スケールよりも増大した (図 2) これは、プロペラ後流渦と固定翼の剥離せん断層が周期的に干渉して生じる渦の圧力が実機スケールの方が低圧になるために生じていた (図 3)。また、迎角  $7^\circ$  の時と共通して、実機スケールではプロペラから生じる圧力波が弱まることで、その圧力波が固定翼へ与える影響も弱まり、固定翼の揚力変動の高周波成分が消失した (図 4)。

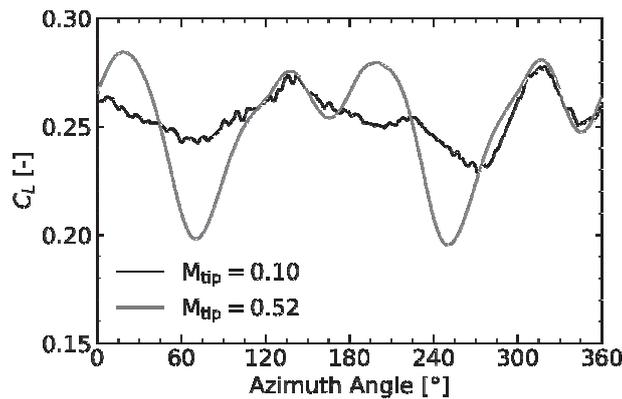


図2：プロペラ1周中に固定翼に働く揚力係数 (迎角  $4^\circ$ )

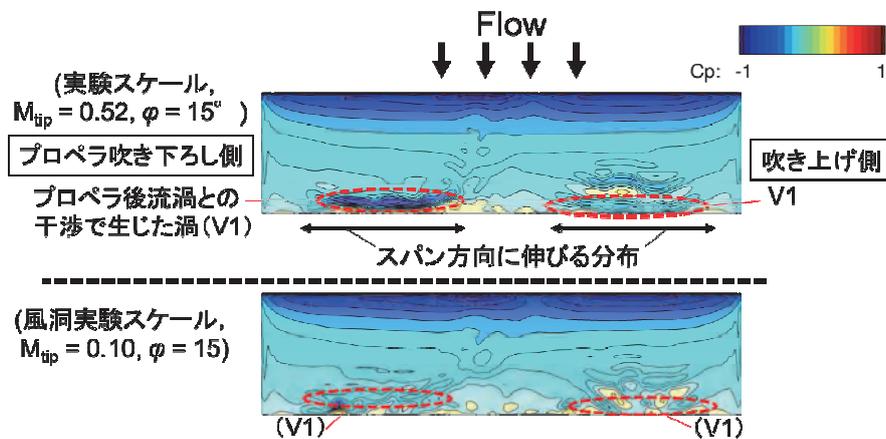


図3：固定翼表面の圧力係数分布の比較 (迎角  $4^\circ$ )

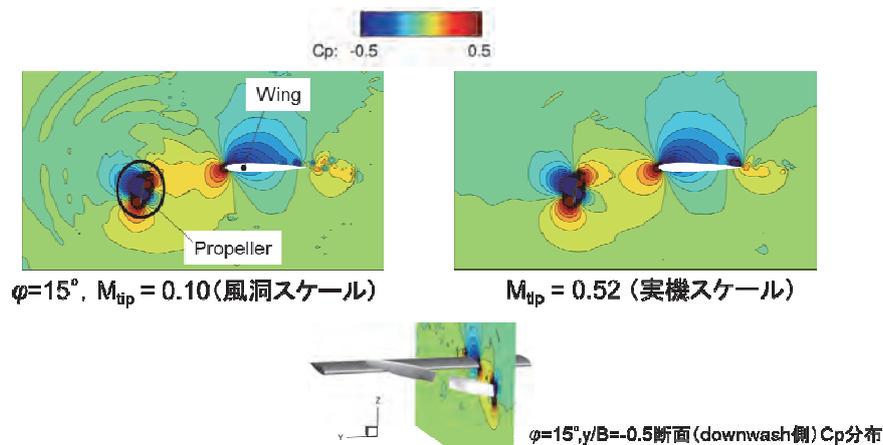


図4：プロペラと固定翼周りの圧力係数分布（プロペラ方位角  $\phi = 15^\circ$  の瞬時場）

また、迎角  $7^\circ$  の時、実機スケールでは固定翼上の渦運動が複雑になることで、不規則な非定常揚力変動が生じるようになった（図5）。

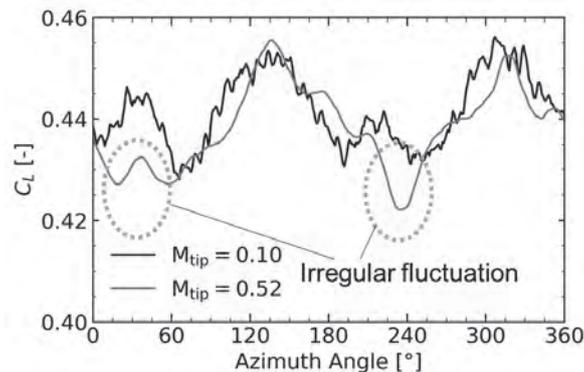


図5：プロペラ1周中に固定翼に働く揚力係数（迎角  $7^\circ$ ）

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、プロペラが推力を生まない状態で純粋にプロペラの回転により生じる流れを固定翼が受ける場合の、基本的な流れ場構造および機体に働く空気を明らかにすることができた。よって、概ね期待通りに研究が進展している。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、火星飛行機周りに生じる空気力と流れ場について、風洞試験および実際に火星で飛行を行う際に生じる違いを数値解析により調査した。その結果、実機で飛行を行う際には風洞試験よりも大きな振動が生じること、また風洞試験で生じていた高周波の振動が消失することが明らかになった。それらの現象のメカニズムを詳細に明らかにすること、および様々な飛行状況での風洞試験と実機飛行の差を調査することが今後の課題である。

### 5. 研究成果

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Y. Furusawa, K. Kitamura, H. Nagai: Numerical Study on Mach Number Effects of Propeller on Propeller-Wing Interaction, *18th International Conference on Flow Dynamics*, Online, (2021), OS18-1.
- [2] Kitamura, K., Furusawa, Y., Ikami, T., Fujita, K., and Nagai, H.: Propeller-Slipstream/Main-Wing Aerodynamic Interaction for Mars Airplane, CRF-34, *The 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021)*, Online, Oct-29-2021.
- [3] 古澤善克, 北村圭一, 永井大樹: プロペラ・固定翼空力干渉においてプロペラの翼端マッハ数変化が与える影響の数値解析, 第59回飛行機シンポジウム, オンライン, (2021), 1B-03.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

課題番号	J21I016
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	2021.4~2022.3
継続年数	1年目（発展）

**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\*†, 岩野 耕治\*, 長田 孝二\*, 渡邊 智昭\*,  
Yi Zhou\*\*, 酒井 康彦\*\*\*, 服部 裕司\*\*\*\*††  
\*名古屋大学大学院工学研究科, \*\*南京理工大学,  
\*\*\*名古屋産業科学研究所, \*\*\*\*東北大学流体科学研究所  
†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

近年, 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, その物理現象の解釈やスカラ輸送機構の詳細まで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

本報告では, 格子乱流場に対して得られた結果について述べる.

図1に計算領域の概略図を示す. 格子間隔  $M$  に対して, 主流方向長さが  $32M$ , 鉛直およびスパン方向長さが  $6M$  であり, 乱流格子が流入部から  $2M$  の位置に設置されている. 格子間隔と主流方向速度に基づくレイノルズ数  $Re$  は 5000, 9000, 15,000 とした.

図2に乱流エネルギーの減衰係数  $C_\epsilon$  と乱流レイノルズ数  $Re_\lambda$  の関係を示す. 図より,  $Re=15000$  の場合にはほぼ全領域で  $C_\epsilon$  が一定となるのに対して,  $Re=5000$  の場合には下流域でも一定とならず  $Re_\lambda$  に反比例する分布となることがわかる. そこでこの原因を明らかにするために, 速度変動差に対する二次構造関数による解析を行った. 図3に, 構造関数に現れる移流項, 非線形項, および粘性項の分布を示す. なお横軸はマイクロスケール  $\lambda$  で無次元化されている. この図から,  $Re=5000$  の場合には, 通常平衡性の議論で重要となる非線形項ではなく, 移流項の寄与が乱流エネルギーの減衰係数  $C_\epsilon$  に及ぼす影響が大きなことが明らかになった. つまり, レイノルズ数が低い場合に  $C_\epsilon$  が一定とならない原因は非平衡性ではなく, 移流項の寄与であることが明らかになった.

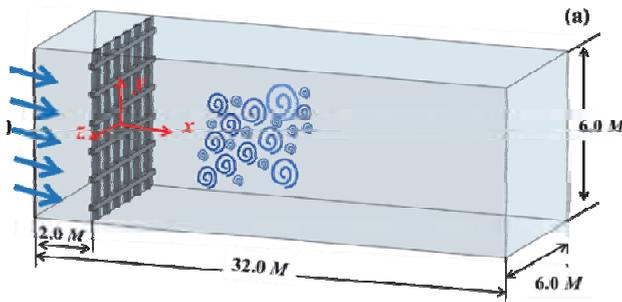


図1：計算領域の概略図

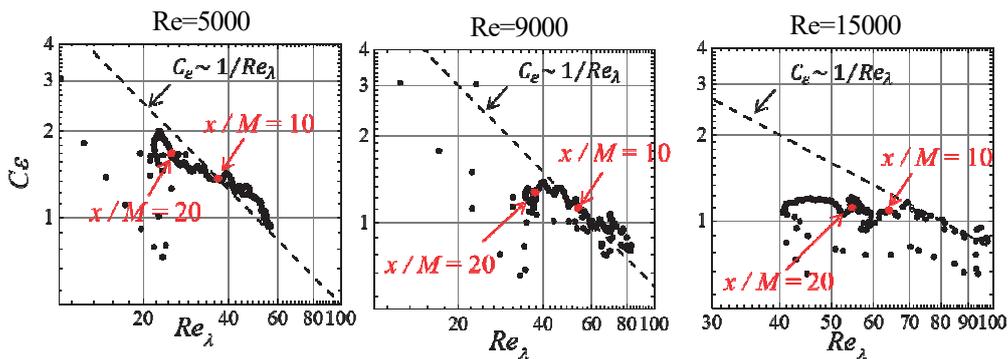


図2：乱流エネルギーの減衰係数  $C_e$  と乱流レイノルズ数  $Re_\lambda$  の関係

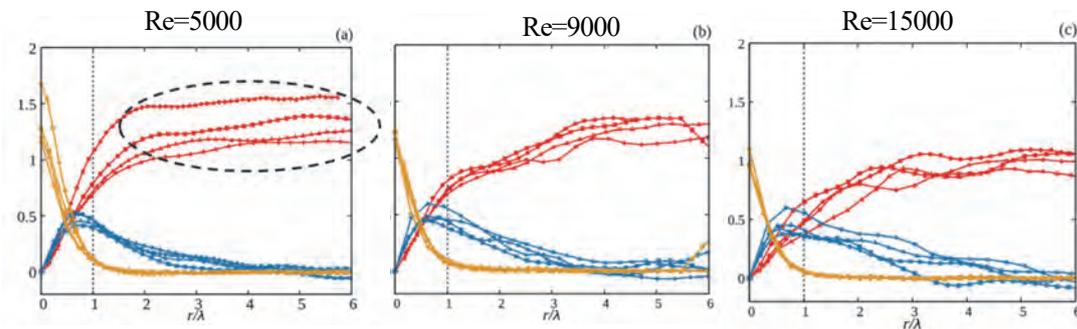


図3：構造関数に現れる各項の距離に対する寄与（赤：移流項，青：非線形項，黄色：粘性項）．異なるプロットは異なる主流方向位置を表す．

### 3. 研究目標の達成状況

プロジェクトの1年目である本年度は，平行棒後流，格子乱流場や混合層流など様々な流れ場に対する数値シミュレーションプログラムを構築するとともに，構造関数を用いた解析を実施するなど，おおむね研究は順調に進捗したと言える．

### 4. まとめと今後の課題

本年度の研究から，平行棒後流における速度変動パワースペクトルの挙動やその乱流モデリング，レイノルズ数が低い格子乱流場における乱流エネルギー減衰挙動と平衡性の関係などを明らかにできた．次年度は衝撃波を伴う場に対するプログラムの構築や，スカラ場の拡散減衰挙動に関する研究も実施する予定である．

## 5. 研究成果

### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Y. Zhou, Y. Ito, K. Nagata, T. Watanabe, K. Iwano, T. Hattori, Y. Sakai, Turbulent energy transport in wakes behind bars and grids, *Proc. of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021)*, Sendai, (2021), CRF84, pp. 178-180.

[2] M. Wang, Y. Ito, Y. Yurikusa, Y. Sakai, K. Iwano, The relation between dissipation and the scale-by-scale transport in grid-generated turbulence, 2021 年度日本機械学会年次大会, オンライン, (2021), No. S055-22/4 pages.

[3] 汪 沐陽, 百合草 拓哉, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁, 格子乱流でのスカラの逆カスケード方向の輸送現象に関する研究, 日本流体力学会年会 2021, オンライン, (2021), No. 507/4 pages.

[4] 汪 沐陽, 大川 拓己, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁, 乱流混合層におけるエネルギーおよびスカラの渦スケール間輸送機構の解明, 第 35 回数値流体力学シンポジウム, オンライン, (2021), No. A09-3/4 pages.

[5] M. Wang, Y. Ito, T. Okawa, K. Iwano, Y. Sakai, Numerical Investigation about Inverse Cascade Phenomenon in Mixing Layer, *Proc. of the 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD-2021)*, オンライン, (2021), No. OS15-7/4 pages.

### 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	J21I017
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	2021.4~2022.3
継続年数	2年目

高速・低環境負荷での炭素触媒合成を可能とするキャビテーションプラズマ反応場の制御  
Control of reaction field in cavitation plasma for high-speed and eco-friendly synthesis  
of carbon catalysts

竹内 希<sup>\*\*†</sup>, 高奈 秀匡<sup>\*\*††</sup>

\*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

有機溶媒中で生成する液中プラズマは、炭素触媒として使用可能なナノ炭素材料を室温・大気圧下で高速に生成することが可能である。溶媒の導電率が極めて低い有機溶媒中ではプラズマ生成が困難であったが、キャビテーションにより生成した微小気泡群を供給することで、低導電率溶媒中でもプラズマの安定生成が可能となった。本年度は、流動キャビテーションよりも反応場の制御性向上が期待される超音波キャビテーションを用いてプラズマを生成し、電気的特性と併せて気泡や流れ場の詳細観測を行うことで、プラズマ生成状態とキャビテーション条件の相関を把握し、ナノ炭素材料合成におけるプラズマ反応場の制御を実現することを目的とする。

## 2. 研究成果の内容

図1に炭素合成実験構成を示す。ホモジナイザ（超音波分散機 UH-50; SMT Corp.）を接地側電極とすることで、電極間に微小気泡と液流を導入した。高電圧側電極にはニッケル電極（ $\phi = 2.4 \text{ mm}$ ）を用い、接地側電極との距離は  $0.3 \text{ mm}$  とした。液中プラズマ発生用電源（MPP04-A4-200; 栗田製作所）によって、両極性パルス電圧をリアクタの電極間に印加することで液中プラズマを発生させた。印加した両極性パルス電圧の振幅は  $3.4 \text{ kV}$ 、周波数は  $80 \text{ kHz}$ 、パルス幅は  $500 \text{ ns}$  である。液流の流速はホモジナイザの出力によって変化する。溶液中にグラファイト粉末を分散させ、その移動を高速度カメラ（MotionProX-4; REDLAKE）によって観測し、オープンソースソフトウェアである OpenPIV を用いて PIV 解析することで図2のような流速分布を得た。以降、図2における左側と右側の条件をそれぞれ Slow flow, Fast flow とする。図2の範囲における流速の平均は、Slow flow が  $6.58 \text{ mm/s}$ 、Fast flow が  $228 \text{ mm/s}$  であった。

溶液をキシレン  $120 \text{ mL}$  として、30 分間プラズマを生成し、合成された炭素材料は吸引濾過を行うことで溶液から分離した。分離後の炭素材料は恒温器中  $80^\circ\text{C}$  で 3 時間以上乾燥を行った後、管状電気炉（TMF-300N; アズワン）を用いてアルゴン雰囲気下  $300^\circ\text{C}$  で 3 時間加熱を行い、乳鉢ですりつぶして粉末状にした。こうして得られた炭素材料の比表面積および細孔分布を、窒素ガス吸着法（BET 法）によって分析した。ここで、Slow flow で合成された炭素材料を SfC、Fast flow で合成された炭素材料を FfC と呼ぶこととする。

不活性ガス雰囲気中での焼成により、炭素材料の部分結晶化が起こり、酸素還元反応（ORR）触媒性能が増加することが知られている。ORR 触媒性能評価においては、合成し

た炭素材料の焼成を行った。セラミック製の炉心管を挿入したプログラム管状電気炉 (TMF-300N; アズワン) を用い、アルゴンガスを 0.3 L/min の流量で流し続けた状態において 1000°C で焼成した。焼成後の FfC を FfC 1000 と呼ぶ。ORR 触媒性能はリニアスイープボルタンメトリ (LSV) 測定により評価した。

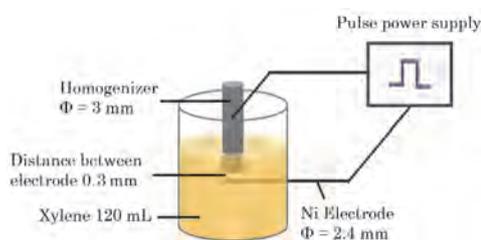


図 1 : 実験装置構成

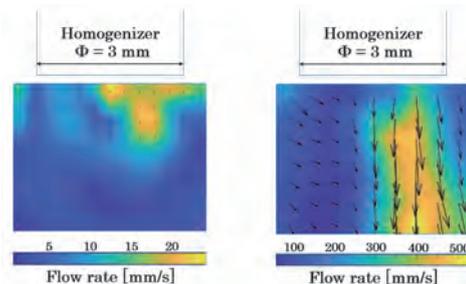


図 2 : 流速分布 (左 : Slow flow, 右 : Fast flow)

Slow flow 条件および Fast flow 条件において、それぞれ 30 分間プラズマを生成し、得られた炭素粉末材料の合成速度を調べた。その結果、Slow flow 条件で 15.1 mg/min、Fast flow 条件で 0.98 mg/min であった。合成速度に大きな差があるが、これは主に単位時間あたりの放電回数が影響している。Slow flow 条件では、印加パルス毎に必ず放電が発生するが、Fast flow 条件では強い液流によってプラズマ生成に寄与する気泡が流されるため、プラズマが発生しない場合がある。Fast flow 条件において、(放電したパルスの回数) / (印加したパルスの回数) を計算すると、実験開始 10 分後では 47.8%、30 分後では 21.4% となっており、これが合成速度の差の要因となったと考えられる。

TEM による観察では、合成された炭素材料は主に球形の一次粒子が凝集していること、また、FfC の一次粒子径が SfC に比べて小さいことが分かった。炭素材料結晶性のラマン分光法や X 線回折法による解析では、SfC と FfC には大きな違いは見られなかった。表 1 および図 3 に BET 法で測定した比表面積および細孔分布をそれぞれ示す。SfC および FfC の比表面積はそれぞれ 230.87 m<sup>2</sup>/g、402.95 m<sup>2</sup>/g であり、全細孔容量はそれぞれ 1.134 cm<sup>3</sup>/g、0.851 cm<sup>3</sup>/g であった。FfC の比表面積 402.95 m<sup>2</sup>/g は他研究において液中プラズマ (ソリューションプラズマ) で合成された炭素材料と比べて大きく、反応場に微小気泡と液流を導入することで、炭素材料の微細構造を変化させられることが示唆された。

表 1 : 比表面積, 細孔容積, および平均細孔径

Type	Surface area [m <sup>2</sup> /g]	Pore volume [cm <sup>3</sup> /g]	Average pore size [nm]
SfC	230.87	1.1342	19.65
FfC	402.95	0.8512	8.45

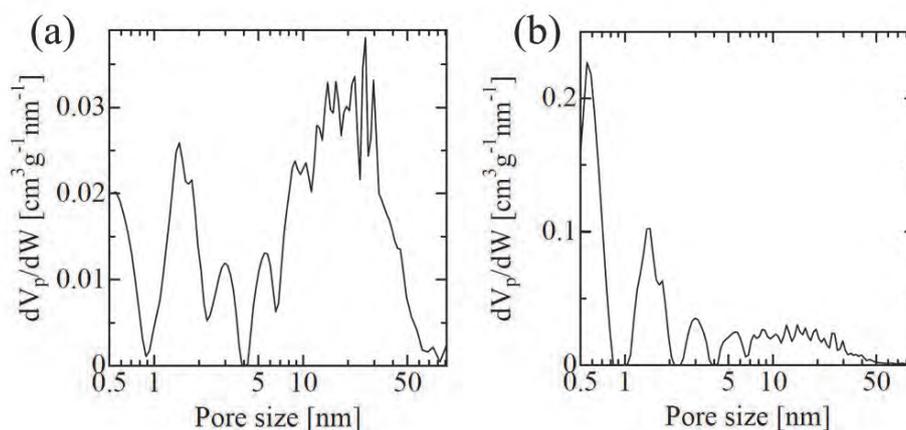


図3：細孔サイズと微分容積，(a) SfC，(b) FfC

LSV 測定によって得られた波形に Koutechy-Levich (K-L) 式を適用し、ORR 触媒としての特性を評価した。ORR オンセット電位は、SfC が  $-0.171$  V、FfC が  $-0.135$  V、FfC 1000 が  $-0.083$  V であった。SfC に比べて FfC は高いオンセット電位が得られており、表 1 に示した高い比表面積による活性点の露出によって、より高いオンセット電位での活性を進行することができたと考えられる。また、FfC 1000 は FfC と比べてさらに高いオンセット電位を示した。反応電子数は SfC、FfC、FfC 1000 それぞれにおいて、2.47、2.18、2.24 であり、本研究において合成された炭素材料は全て 2 電子反応が支配的であることが示された。また、活性支配電流は SfC、FfC、FfC 1000 それぞれにおいて、 $2.09$  mA/cm<sup>2</sup>、 $3.21$  mA/cm<sup>2</sup>、 $13.87$  mA/cm<sup>2</sup> であった。

### 3. 研究目標の達成状況

昨年度の成果により、キャビテーション気泡や高速液体流を伴う液中プラズマ反応場が、従来の液中プラズマ反応場とは異なることが分かり、各種パラメータの調整によるキャビテーションプラズマ反応場の制御、および、合成される炭素材料の粒径、表面積などの制御による優れた触媒活性の実現が期待された。今年度の成果として、液流の流速によって炭素材料の一次粒子径や比表面積を大きく変化させられることが分かった。また、高速液流条件で得られた、一次粒子径が小さく、比表面積が大きい炭素材料は、ORR 触媒として高いオンセット電圧を示し、優れた触媒性能が確認された。よって、キャビテーション条件による反応場制御および触媒性能向上が可能であることが示されたことから、研究目標の達成度は高いと評価できる。

### 4. まとめと今後の課題

微小気泡および液流を導入した有機溶媒中プラズマ生成により、合成される炭素材料の諸特性や触媒性能を制御可能であることが示された。ただし、使用したホモジナイザの仕様により、発生する微小気泡と液流の個別制御ができず、微小気泡の影響と液流の影響を詳細には分離できていない。今後は、微小気泡を一様に供給した溶液内部で液流流速を制御して、炭素材料特性とプラズマ生成条件の関係性をより詳細に明らかにし、材料特性の精密な制御と触媒性能のさらなる向上を図る。

### 5. 研究成果

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[1] 山崎翔矢, 竹内希, 高奈秀匡: 液中プラズマ法で合成したナノ炭素材料特性の放電条件依存性, 電気学会論文誌 A, 142 (2022), pp. 59-66, doi: 10.1541/ieejfms.142.59.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] N. Takeuchi, M. Chiba, and H. Takana: Analysis of reaction field in cavitation plasma for high-speed and eco-friendly synthesis of carbon catalysts, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-5, pp. 10-12.

[3] 今泉颯太, 竹内希, 高奈秀匡, Qi Lun 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, 2022 年度静電気学会春期講演会, Zoom meeting, (2022), 1a-2, pp. 5-10.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J21I019
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	1年目

## セルロース単繊維創成法に向けたクロスフロー下での棒状ブラウン粒子相互作用モデル及びシミュレーション法の開発

Developing an interaction model of rod-like Brownian particles in a crossflow for nanocellulose mono-fiber creation using flow focusing

石本 志高\*†, 渡邊 友哉\*, 高奈 秀匡\*\*††

\*秋田県立大学システム科学技術学部, \*\*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

高奈らの先行研究により, Flow-focusing 流路上流に配置した電極による電場で, 流路下流域におけるセルロースナノ繊維(CNF)の配向度向上および改善された単繊維創成が報告された. しかしながら, 流路下流域における配向度減少のメカニズムは不明であり, 高濃度単繊維創成の壁となっている. 本研究では, 主な原因と考えられる回転拡散と CNF 粒子の性質に着目して, これらを流路流れ場における配向度の数値計算や, ブラウン粒子のマイクロシミュレーションを用いて解明する. 流れ場内の配向度計算では実験状況の再現, ミクロシミュレーションでは回転拡散係数の実測値と棒状粒子の理論値との乖離をシミュレーションおよび実験データの解析により明らかにし, 相互作用モデル構築を目指す. これらを用いて, 高精度高強度 CNF 創成法の創出を目指す.

### 2. 研究成果の内容

汎用数値計算ソフト (ANSYS Fluent) で得た流路内の流れ場から流線を抽出し, ラグランジュ描像のスモルコフスキー方程式を元に配向オーダーパラメータを数値計算し, 実験値と比較した (図1). 前年度と比較してさらに下流域までの結果を得たが, 前年度と同様の定性的な一致に留まった.

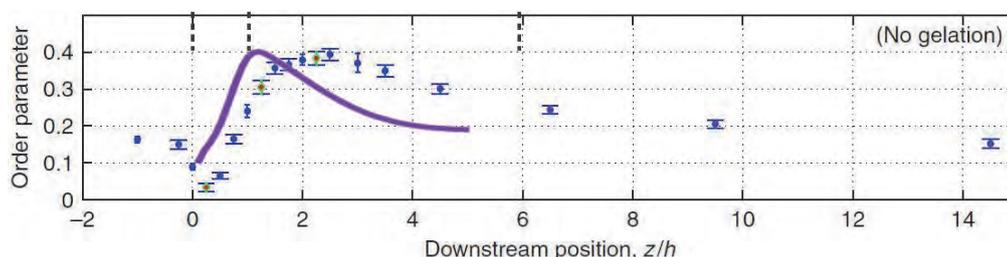


図1: 先行研究[Hakansson, Nat. Comm. 5 (2014)] との比較. 実線が数値計算結果.

回転拡散係数に関して, 棒状高分子の理論による理論値と実験的に得られた値との間に乖離がある. 本研究では CNF を半屈曲性高分子鎖として数理モデルを構築し, ブラウン動力学シミュレーションを用いて複数のヤング率に関して各々の回転拡散係数を算出した. また, CNF の AFM 画像から持続長の推定を試みた.

ブラウン動力学シミュレーションでは、単純な棒状ブラウン粒子で実験値の再現が難しいことが確認されたため、CNFを半屈曲性高分子鎖とし、直径20nm、長さ200nmの高分子鎖を10個の球状ブラウン粒子の連結で表すShish-kebabモデルで表現し、各種エネルギー項を導入したブラウン動力学シミュレーションを実施した。ヤング率および粘性係数を変化させた4条件で数値計算し、回転拡散係数の実測値との比較から、想定されるヤング率および持続長の範囲を確認した。ヤング率はkPaからMPaのオーダーであると推定され、この範囲での回転拡散係数は8.2~42.2 [1/s]と算出され、高奈による実測値1.20を含む範囲を得られた。また、AFM画像より持続長は82.9~451[nm]と推定された。

### 3. 研究目標の達成状況

当初の目的に則し、配向度計算手法の構築や実験との定性的な一致を得たが、コロナ禍で実験との協働が進められず、溶液条件や繊維長等の実験条件との比較に関して詳細な考察は困難となった。全体的な達成度として60~70%程度となった。

### 4. まとめと今後の課題

手法の構築と実験との定性的な一致、さらに回転拡散の定性的な再現を得たが、定量的な一致のために更なる改良と共同研究の深化が求められる。今後は、実測のCNF長値や回転拡散係数等の解析を進め、より現実に即したマイクロシミュレーションを構築することで、実用に供する解析法の確立が期待される。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Y. Ishimoto, A. Oooka, H. Takana: Simulation Study on Orientation Order Profile in Nanocellulose Mono-fiber Creation Using Flow Focusing, *The 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021)*, Sendai, Japan (2021年10月27-29日).

[2] 渡邊友哉, 津川暁, 石本志高: セルロースナノファイバー生成における配向秩序のシミュレーション研究について, ソフトバイオ研究会 2021, 2021/11/16~18.

[3] 渡邊友哉, 石本志高, 高奈秀匡, ブラウン動力学シミュレーションによるセルロース ナノファイバー懸濁液の回転拡散係数の研究, 日本機械学会東北支部 第52回学生員卒業研究発表講演会, 2022年3月8日.

#### 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

Project code	J21I020
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## Study on fundamental combustion characteristics of Jatropha surrogate fuel

Willyanto Anggono\*†, Akihiro Hayakawa\*\*††

\* Department of Mechanical Engineering, Petra Christian University

\*\* Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

A utilization of biofuel is potential solution to achieve a carbon-neutral society. From the standpoint of conflict of food resources, non-edible plants should be used as feedstock of biofuel. Jatropha oil which is produced from Jatropha plant (*Jatropha curcas*) is a potential fuel. For practical application, Jatropha methyl ester is used as biofuel for an internal combustion engine. Since Jatropha methyl ester is the mixture of several species, it is difficult to understand the fundamental combustion characteristics. However, methyl oleate ( $C_{19}H_{36}O_2$ ) and methyl linoleate ( $C_{19}H_{34}O_2$ ) are considered as major compositions of Jatropha methyl ester. In the first-year project, we investigated the combustion characteristics of suspended single droplets of pure methyl oleate and pure methyl linoleate. In this year, we extend the study to clarify the combustion characteristics of the mixture of methyl oleate and methyl linoleate.

### 2. Details of program implement

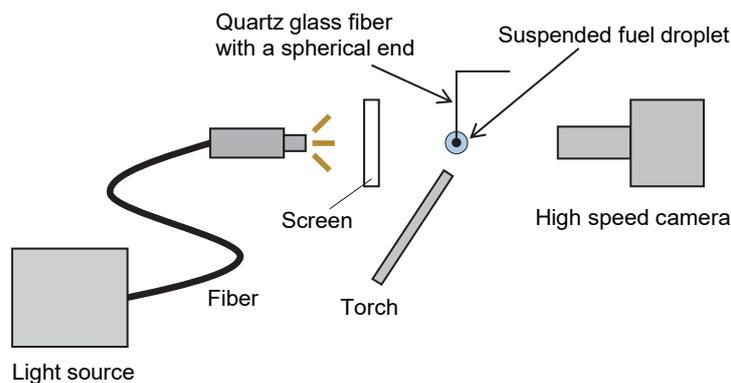


Fig. 1. Schematic figure of the combustion experiments of suspended single droplets [1].

Figure 1 shows the schematic figure of experimental setup. The combustion characteristics of suspended fuel droplets were experimentally investigated. The experiments were conducted under atmospheric pressure and normal gravity. Fuel was suspended by the quartz glass fiber with a spherical end. In this study, two mixtures of the methyl oleate and methyl linoleate were examined. The volumetric fraction of methyl oleate and methyl linoleate for the mixture 1 were 30% and 70%, respectively, and the volumetric fraction of methyl oleate and methyl linoleate for the

mixture 2 were 70% and 30%, respectively. The volume of the suspended fuel was 3  $\mu\text{l}$ . The fuel was ignited by a torch. The images of droplet and flame were acquired by the backlight imaging with a high-speed camera (Photron, FASTCAM Mini AX 100) and a micro lens (Nikon, focal length of 105 mm), and two extension tubes (Nikon, PN-11). The frame rate was set to 60 fps. After the experiments of the mixture, soot was generated on the glass fiber. Thus, the soot was burned by another torch before next experiment.

### 3. Achievements

Figure 2 shows the representative flame images of the suspended single droplets at 2 seconds before the burn out of droplets. The flame images were clearly obtained, and no significant difference of image was observed. As for the next step, the change of the droplet diameter will be measured.

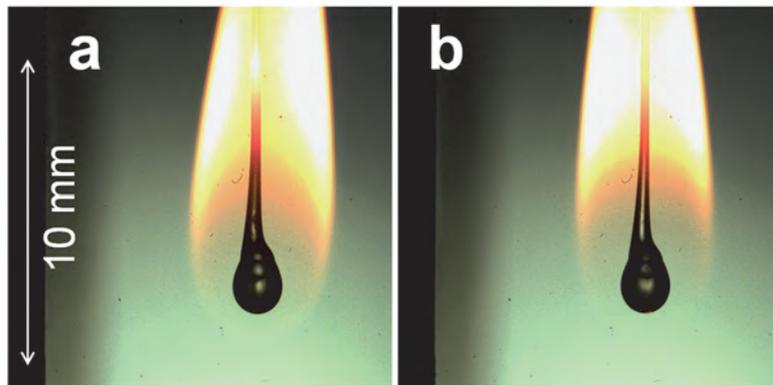


Fig. 2. Instantaneous flame images 2 s before the burn out of the suspended single droplets for (a) the mixture 1 (methyl oleate : methyl linoleate = 0.3:0.7) and (b) the mixture 2 (methyl oleate : methyl linoleate = 0.7:0.3).

### 4. Summaries and future plans

In this study, the flame experiments of suspended single droplets of the mixtures of methyl oleate and methyl linoleate were experimentally conducted. As for the next step, the change of droplet diameter will be measured. Also, pool combustion experiment will be examined.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.  
(included international conference without peer review)  
[1] A. Hayakawa, W. Anggono, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-64, pp. 139-140.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

### 6. References

- [1] A. Hayakawa, W. Anggono, Combustion Characteristics of Suspended Single Droplets of Methyl Oleate and Methyl Linoleate, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information* (2021), 139-140.

課題番号	J21H023
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	2021.4~2022.3
継続年数	1年目

**渦コア領域における渦流のトポロジーが渦軸を形成するメカニズムに関する研究**  
**A study of mechanism that the vortical flow topology in its core region forms topological characteristics of a vortical axis**

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、乱流渦における渦中心領域でのトポロジー、並びにこのトポロジーによる力などの様に作用して渦軸のトポロジーを構成するか、という観点から渦軸のバンドル特性と渦流との関係について解析するものである。

乱流渦また様々な流れで発生する渦は、気象・海洋等の環境や発電の効率・安定性等に大きく影響する。この渦中心を同定、また渦構造を解明するために様々な渦軸の定義が提案されているが、渦・渦軸の同定で用いられる渦度ベクトル・渦線バンドル（バンドル束）は渦中心領域では渦流れ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, 12th AFI (ICFD2020)), 何を用いて渦軸を同定できるか、という課題が流体科学に課せられた。

そこで、本研究では、局所トポロジーの物理量(Nakayama, Phys. Rev. Fluids, 2017), また local axis geometry theory (Nakayama, ICFD2019; Nakayama, APS-DSFD2019)を用いて、渦流が定めるトポロジカルな力（渦伸長）における渦線への作用、また軸線バンドルのトポロジカル特性を変えるメカニズムを解明することを目的とする。

**2. 研究成果の内容**

本研究に関する理論研究において、渦領域では渦伸長(vortex stretching)が渦線の軌道を渦状にする作用を与えていることを示したが、これは渦度ベクトル空間における定式化であるため、実際の物理空間・渦領域における渦伸長の作用に直接結びつけることはできない。local axis geometry theory による渦線バンドルのトポロジー分析では、渦流の旋回平面上における本バンドルのトポロジカル特性を局所トポロジーの物理量を用いて特定するが、このとき半径方向、周方向成分に関する特性を各々解析する。このアイデアを用い、渦度ベクトル場において旋回平面上の分布を半径方向、周方向成分に分解し、これらの各成分の渦伸長作用を評価することにより渦線バンドルの旋回メカニズムを明らかにすることができた。

テイラーレイノルズ数  $Re_\lambda$  が約 35 の一様等方性乱流において、擬スペクトル法による DNS (Direct Numerical Simulation) の解析の部分領域における複数の渦領域(渦流の swirlity  $\varphi=3$  のコンター) , 並びに渦領域中を通る渦線バンドルの例を図 1 に示す。本図中の  $\eta$  はコルモゴロフ長さであり、渦線バンドルは、本バンドルの旋回の強さを示す swirlity ( $\varphi_\omega$ ) のコンターにて表している。渦領域中では本バンドルが旋回している領域 ( $0 < \varphi_\omega$  の部分) が多いが、図中右側の渦領域や中央の渦領域の一部の様に旋回していない領域 ( $\varphi_\omega < 0$  の部分) も存在する。こ

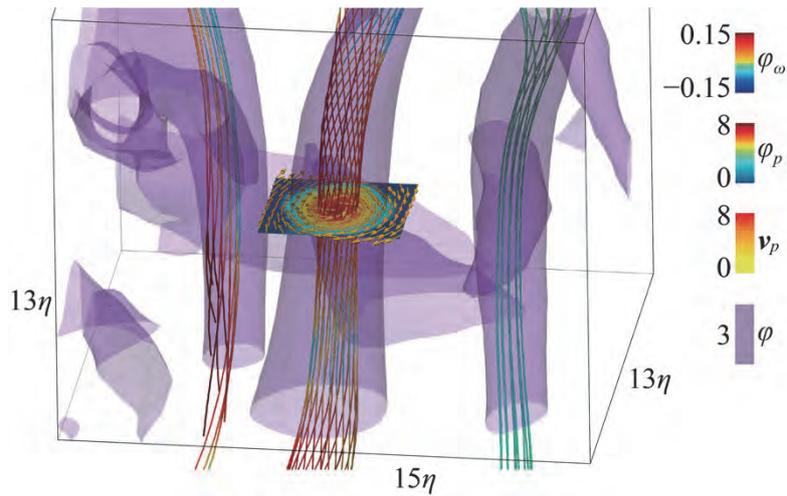


図 1 : DNS の部分領域における渦領域 ( $\varphi=3$  の 3 次元コンター) 中を通る渦線バンドル ( $\varphi_\omega$  のコンター), 並びに  $\varphi$  の 2 次元コンター  $\varphi_p$  で示した旋回平面における渦流れ  $v_p$ .  $\eta$  はコルモゴロフ長を示す. 渦度ベクトルは図中の下方を向いており, 中央の渦領域では渦流が時計回りに旋回している中で渦線は時計回り, 無旋回, 反時計回りの旋回の様相を呈している. 一方, 右側の渦領域中に渦線バンドルは, 殆ど旋回していない.

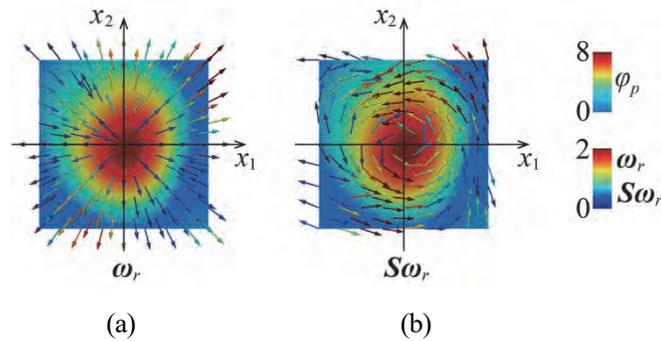


図 2 :  $\varphi$  の 2 次元コンター  $\varphi_p$  で示した旋回平面上の渦度ベクトルの (a) 半径方向成分  $\omega_r$  の分布, 並びに (b)  $\omega_r$  に関する渦伸長作用  $S\omega_r$  の分布.

これらの渦領域におけるある旋回平面上の渦度ベクトル場から半径方向成分のみを抽出したベクトル場  $\omega_r$ , 並びにこの成分に関する渦伸長作用の力  $S\omega_r$  を図 2 にそれぞれ示す. 図中の  $\omega_r$  は吸込み, 湧出しの両方の成分が混在するが, 渦伸長によりそれぞれ反時計回り, 時計回りの力が作用していることが解る. 渦度の半径方向成分が全周で吸込みや湧出しの様相である場合, バンドル全体が同一方向に回転, 即ち渦状となるが, これには渦領域に沿った渦流の発達や減衰が関わっている.

一方, 速度勾配テンソルの局所トポロジーが示す渦軸方向ベクトルを接ベクトルとした一つの渦軸の定義 eigen-vortical-axis line (Nakayama and Hasegawa, Fluid Dyn. Res., 2018) において, このベクトルの旋回平面上の成分は, 渦流のトポジカル量から構成される行列を渦度ベクトルに作用させて表すことができる. このとき, 渦伸長による本 line への作用は, 渦線に対する旋回作用が抑制されることが理論的に示された. この解析例を図 3 に示す. 本図では, 渦線バンドルが旋回する一方で本 line は旋回が抑制され, 渦コア領域を進んでいることが解る.

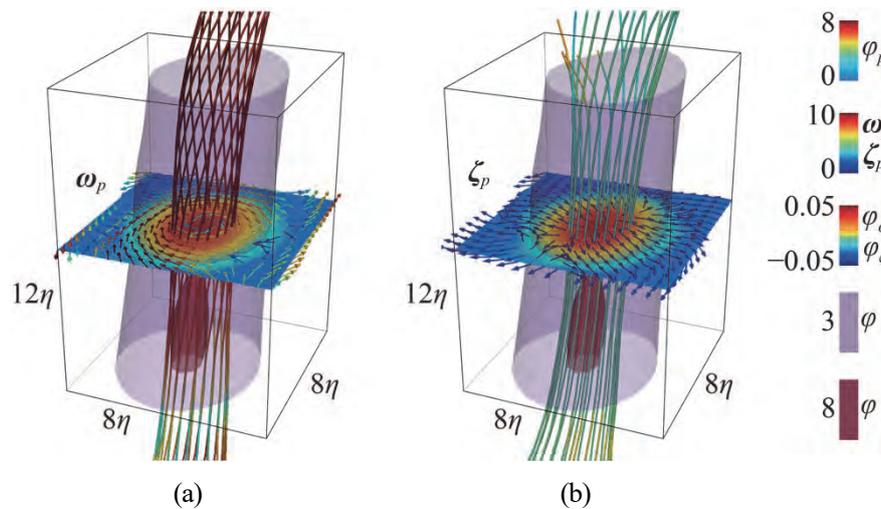


図3: ある渦領域( $\varphi=3, 8$ の3次元コンター)中を通る(a)渦線バンドル( $\varphi_\omega$ のコンター)及び $\varphi$ の2次元コンター $\varphi_p$ で示した旋回平面上における渦度ベクトル $\omega_p$ , 並びに(b) eigen-vortical-axis line バンドル(本 line の swirlity  $\varphi_\zeta$ のコンター)及び旋回平面上における本 line の接ベクトル $\zeta_p$ . 旋回する渦線バンドルに対し, eigen-vortical-axis line バンドルは旋回が抑制されている.

### 3. 研究目標の達成状況

本研究の目標であった渦流が定めるトポロジカルな力(渦伸長)の渦線への作用, また渦線バンドルのトポロジカル特性を変えるメカニズムの解明について, 渦度ベクトル場を旋回平面上で半径方向・周方向成分に分解して解析することによりそのメカニズムが明らかになった. 更に, eigen-vortical-axis line は旋回が渦流のトポロジーにより抑制されることも明らかにされた. この結果により, 本目標は十分達成されたと考えられる.

### 4. まとめと今後の課題

local axis geometry theory に基づく解析により, 渦領域中の渦伸長による渦線バンドルへの作用のメカニズムと渦伸長と本バンドルのトポロジカル特性との関係が明らかになり, また, eigen-vortical-axis line は渦流れのトポロジーが旋回を抑制していることが示された.

本研究結果により, 渦線並びに eigen-vortical-axis line の局所トポロジーに基づく軸線のトポロジー特性は渦伸長と関わる事が明確となった. 一方, この特性は渦流のトポロジーと関係がある. これらのバンドルが渦中心を通る安定性, またこのときの渦流のトポロジーの条件を解明すること, 或いは渦中心を通る軸線の接ベクトルが満たすべきトポロジカル条件を導くことが渦軸の統一的定義に繋がると考えられる. この渦軸定義の確立は, 気象や海洋, また発電や航空, 交通機械等の広範囲な分野の渦解析や渦の抑制技術に貢献するものである.

### 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] K. Nakayama and Y. Hattori: A Study of Relationships between Vortex Dynamics and Topological Features of a Bundle of Vortical Axes, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai(オンライン), (2021), CRF-85, pp. 181-183.

- [2] K. Nakayama: A Theory and Analysis that a Vortex Makes the Vorticity Lines Vortical through Vortex Stretching, *74<sup>th</sup> Annual Meeting of American Physical Society Division of Fluid Dynamics*, Arizona (オンライン), (2021), A24.00009.
- [3] Y. Adachi and K. Nakayama: A Feature of Vortical Axis in Coalescence of Vortical region in a Homogeneous Isotropic Turbulence, *74<sup>th</sup> Annual Meeting of American Physical Society Division of Fluid Dynamics*, Arizona (オンライン), (2021).
- [4] K. Hyoudou and K. Nakayama: The Analysis of the Topological Characteristics of Bundle of Axes Lines, *74<sup>th</sup> Annual Meeting of American Physical Society Division of Fluid Dynamics*, Arizona (オンライン), (2021).
- [5] 兵藤京香, 中山雄行: 渦コア領域における軸線バンドルの特性, 日本機械学会第 99 期流体力学部門講演会, オンライン, (2021), OS11-08.
- [6] K. Nakayama: A Study of Relationships between Vortex Dynamics and Topological Features of a Bundle of Vortical Axes, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai(オンライン), (2021), CRF-85, pp. 627-629.
- [7] Y. Adachi and K. Nakayama: Coalescence of Vortical Regions and Bifurcation of Vortical Axes in a Homogeneous Isotropic Turbulence, *Proceedings of Eighteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai(オンライン), (2021), pp. 743-744.
- [8] K. Hyoudou and K. Nakayama: Axis Bundle Relationships between Vorticity Lines and Eigen-vortical-axis lines in Vortical Core Region, *Proceedings of Eighteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai(オンライン), (2021), pp. 736-738.

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	J21I024
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

懸濁液レオロジーの機能的制御を目指した実験観察ならびに数値解析  
Experimental observation and numerical simulation toward smart control of suspension rheology

福井 智宏\*†, 船本 健一\*\*††  
川口 美沙\*, 岡村 直希\*, 村田 滋\*  
\*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

微小流路や血管を流れる微粒子は、慣性の影響により流れと直交方向にも移動し、粒子の空間的な分散状態である微細構造は時々刻々と変化する。その結果、壁面から一定の距離にある慣性力に応じた平衡位置に集中分布する。この現象は Segre-Silberberg 効果として知られる。懸濁液の実効粘度は、懸濁粒子の分散状態や運動により変化するが、この巨視的な懸濁液の実効粘度と微視的な懸濁粒子の挙動の関係は未だ明らかではない。本研究では、懸濁液流れの微細構造と巨視的なレオロジーの関係を紐解くことを目的とする。

## 2. 研究成果の内容

本研究ではこれまでに、剛体球粒子を含む懸濁液流れの実験観察を行い、PTV を用いて粒子の半径方向分散状態の評価および速度分布から実効粘度の推定を試みた。血液を想定した場合、懸濁粒子は赤血球などの血球成分であり、非球形粒子となる。そこで、粒子形状による分散状態の時間変化および、それに伴う実効粘度の変化について調べるため、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。

計算条件は、コンファインメント（流路幅に対する粒子直径の比） $C=0.05$ 、レイノルズ数  $Re=128$  とし、アスペクト比  $AR=1$  と  $2$  の円形および楕円形粒子を用い、初期分散状態は乱数を用いてランダムに決定した。数値解析結果より、時間の経過に伴い、壁面近くの粒子が中心軸方向に移動し、壁面から一定の位置に集中分布した（図 1）。

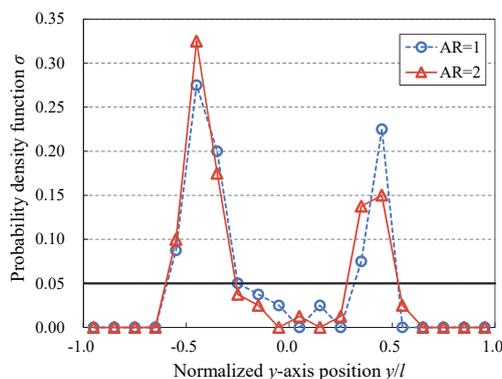


図 1: 無次元時間  $t=100$  における円形( $AR=1$ )および楕円形( $AR=2$ )粒子の  $y$  方向分散状態の比較。

相対粘度は、粒子形状によらず、時間の経過に伴い低下した(図2)。無次元時間100では、アインシュタインの粘度式から求められる相対粘度と比較して、約1%低くなった。Doyeuxら(2016)によると、一様せん断流れにおいて、粒子が壁面に近いほど、粘度への寄与が大きくなる。粒子の慣性移動に伴い、壁面から粒子が離れて中心方向に移動し、粒子-壁面間距離が広がっていくことにより、粘度が低下したと考えられる。以上の結果から、流路に対する粒子の大きさが小さい( $C \approx 0.05$ )場合には、粒子形状の影響は小さいと考えられる。

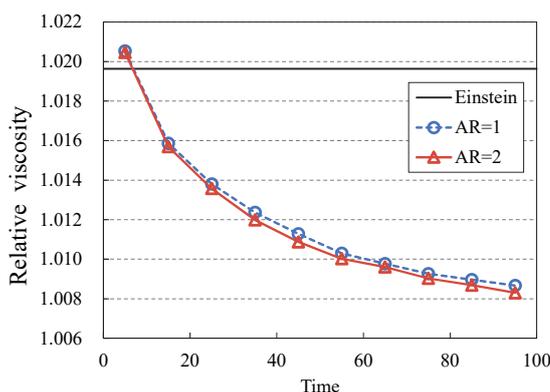


図2：相対粘度の時間履歴。

### 3. 研究目標の達成状況

懸濁液レオロジーの機能的制御に向けて、実験的な微細構造の評価から、実効粘度評価につなげるため、数値計算を用いて粒子の分散状態(粒子-壁面間距離)の変化が相対粘度に与える影響を調査した。

### 4. まとめと今後の課題

懸濁粒子の形状が、流路内流れにおける懸濁粒子分散状態に与える影響を数値計算によって調べた。その結果、粒子形状によらず慣性移動によって粒子は壁面から一定の距離に集中分布し、 $AR \leq 2$  および  $C = 0.05$  の条件においては、粒子形状は分散状態および実効粘度にほとんど寄与しなかった。微細構造評価からの実効粘度評価の実現に向け、実験研究と数値解析の定量的な比較により結果を統合することが今後の課題として挙げられる。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] M. Kawaguchi, T. Fukui, and K. Funamoto: Numerical Study on the Inertial Migration and Effective Viscosity in Pressure-driven Suspension Flows including Elliptical Particles, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Online, (2021), CRF-72, pp. 154-155.

#### 3) その他(特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J21I025
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

### An Experimental study of ethyl-methyl-carbonate (EMC) combustion

Olivier Mathieu\*†, Hisashi Nakamura\*\*††

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

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

The aim of the project was to study experimentally the combustion of ethyl-methyl-carbonate (EMC), a flammable component of the liquid electrolyte in Lithium-ion batteries. The fire safety aspect of this type of battery is important to understand and quantify, as they are used in many applications, including electric vehicles. There is very little data available in the literature for the combustion properties of this molecule.

#### 2. Details of program implement

Several types of experiments have been conducted to investigate the combustion chemistry of EMC. First, ignition delay time in fuel/air mixture were measured at various equivalence ratio at around 1 atm, Fig. 1. As one can see in Fig. 1a, EMC has a peculiar behavior in that the ignition delay time is not sensitive to the equivalence ratio (contrary to most hydrocarbons). When comparing the data with the model developed by the group of the IFS-responsible member (Dr. H. Nakamura) [1] in Fig. 1b-c, it is visible that the model predicts the data with good accuracy although it tends to be slightly under-reactive.

Laminar flame speeds were also measured as a way to compare the model with another type of global kinetics data. As visible in Fig. 2, the laminar fame speed of EMC at 1 atm and 403 K is accurately predicted by the model, well within the experimental uncertainty.

---

[1] Takahashi S, Kanayama K, Morikura S, Nakamura H, Tezuka T, Maruta K. (2021). Study on Oxidation and Pyrolysis of Carbonate Esters using a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile. Part II: Chemical Kinetic Modeling of Ethyl Methyl Carbonate. *Combustion and Flame*, In press, 2022.

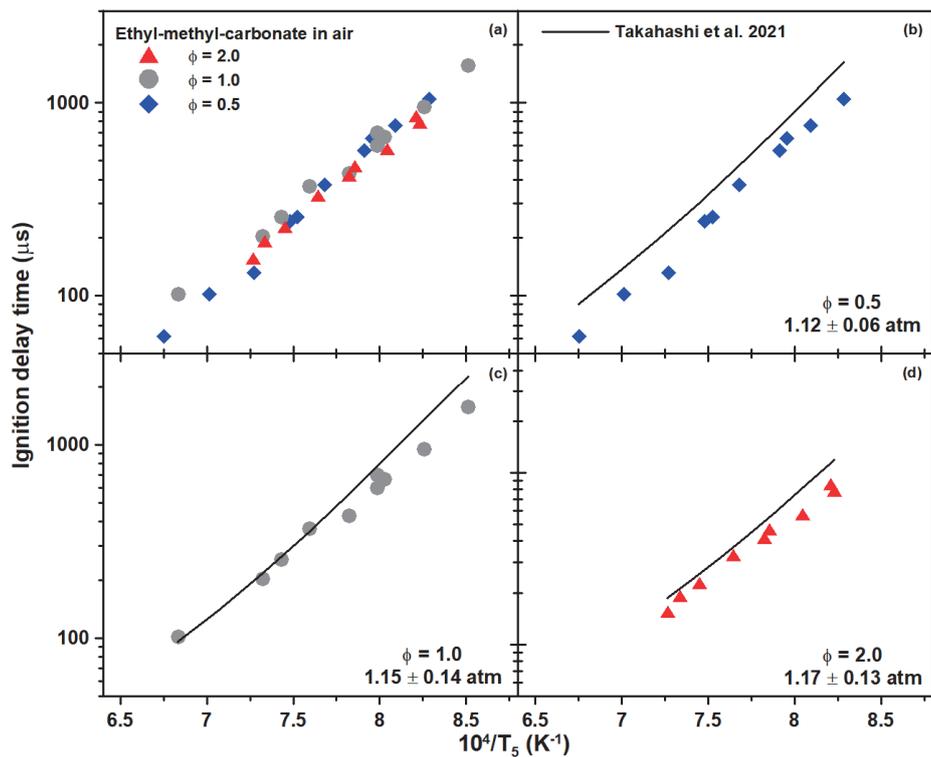


Figure 1: Ignition delay time of Ethyl-Methyl-Carbonate in air and comparisons with the model from Takahashi et al. [1].

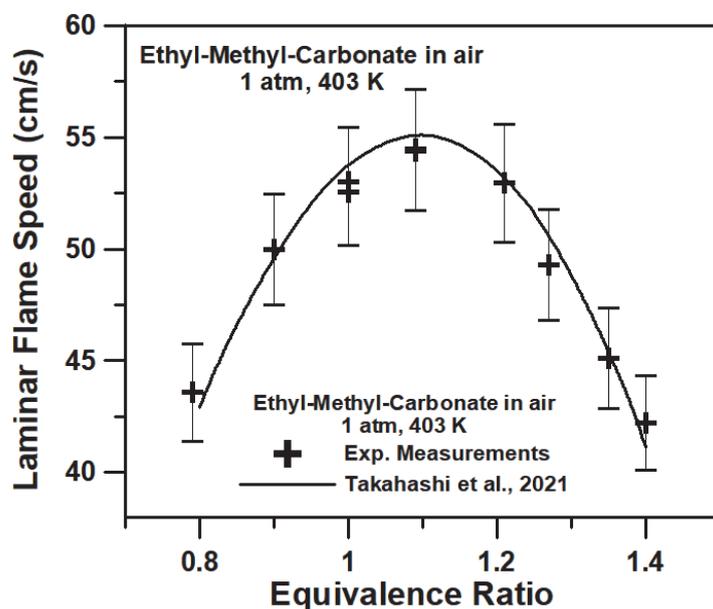


Figure 2: Laminar flame speed of Ethyl-Methyl-Carbonate in air at 1 atm and an initial temperature of 403 K and comparison with the model of Takahashi et al. [1].

To complement the global kinetic data presented in Fig. 1 and 2, CO profiles using a laser extinction diagnostic were measured for the pyrolysis (Fig. 3) and oxidation (Fig. 4) of EMC. The comparison with the Takahashi et al. model with the pyrolysis

results in Fig. 3 show that the model tends to over-estimate the level of CO produced by EMC. Note that the model tends to be over-reactive at lower temperatures.

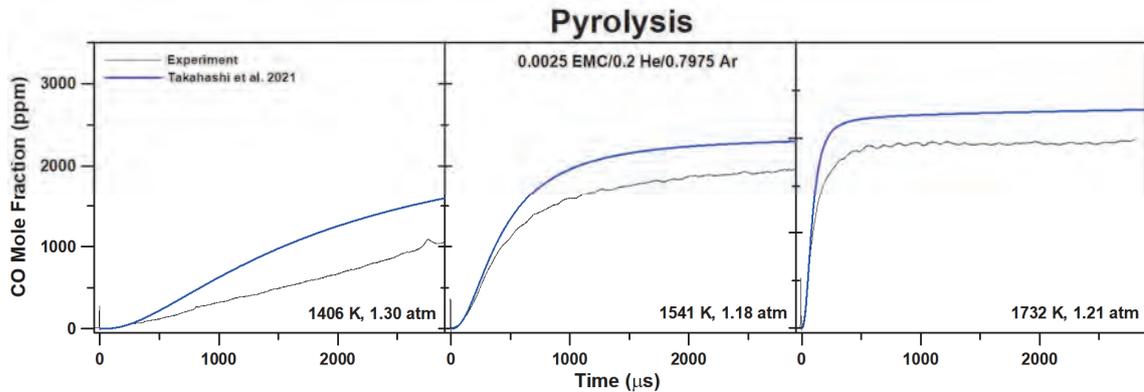


Figure 3: CO profiles from EMC pyrolysis in 99.25% dilution and comparison with the model of Takahashi et al. [1].

This too large production of CO is also observed for the oxidation data in Fig. 4, for a stoichiometric mixture. It is interesting to note that, in presence of oxygen, the model is now under-reactive as the predicted appearance of CO is too slow below 1500 K. The shape of the CO profiles is well reproduced by the model.

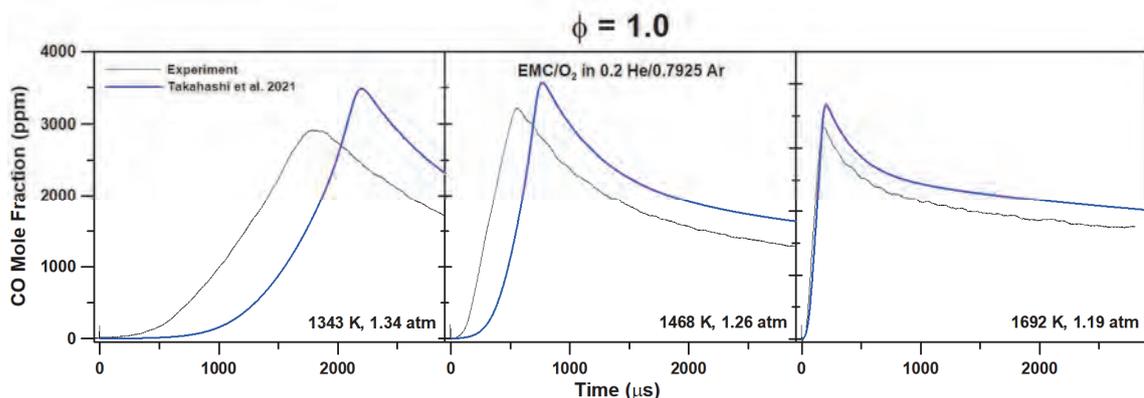


Figure 4: CO profiles from a stoichiometric mixture of EMC in 99.25% dilution and comparison with the model of Takahashi et al. [1].

A previous study with Dimethyl-Carbonate (DMC) from Atherley et al. [2] showed that the CO concentration in pyrolysis can be accurately predicted in similar conditions. Since EMC has one fragment from DMC and one fragment from DEC (DiEthyl-Carbonate) in its structure, the reason behind the too large formation of CO with EMC was considered to be due to the ethyl fragment. Similar experiments for CO measurements were performed with DEC pyrolysis, and it was found that the over-prediction of the CO profile by the model was about twice the one observed with EMC, confirming the assumption. A chemical analysis was conducted and showed that, under the conditions investigated, the main reaction pathway for CO formation with DEC involved ethanol ( $C_2H_5OH$ ) formation. Experiments with

[2] Atherley T, de Persis S, Chaumeix N, Fernandes Y, Bry A, Comandini A, Mathieu O, Alturaifi S, Mulvihill CR, Petersen EL. (2021). Laminar flame speed and shock-tube multi-species laser absorption measurements of Dimethyl Carbonate oxidation and pyrolysis near 1 atm. *Proc. Combust. Inst.* 38: 977.

ethanol pyrolysis were then performed and showed that indeed the issue with the problem was coming from a branching ratio between reactions during ethanol pyrolysis. It is planned to fix the model and publish the ethanol pyrolysis data soon, and then use the fixed ethanol model to adjust the DEC model if necessary, and from there adjust the model for EMC and publish the data in a journal.

### 3. Achievements

The experimental measurements planned in the project proposal were performed, along with additional measurements to allow validating the model. A conference paper for the ICDERS was written and accepted for oral presentation after review. The paper will be presented in June 2022 in Italy. A paper and poster presentation were made for the 18<sup>th</sup> ICFD.

### 4. Summaries and future plans

To summarize, the experimental measurements that were planned for this project have been performed. These measurements exhibited flaws in modern detailed kinetics models which led to supplemental experiments with ethanol to clarify the discrepancy. At this stage, the model for ethanol needs to be updated to match these additional experiments and this will serve as a base to validate the DEC and EMC models. A paper on ethanol pyrolysis will be written in the coming weeks, followed on a paper for linear carbonates pyrolysis, including EMC, and papers on DEC and EMC oxidation will follow. The EMC paper will encompass the results presented in the conferences listed below.

### 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] O. Mathieu, K. Kanayama, S. Takahashi, T. Tezuka, H. Nakamura, E. L. Petersen, K. Maruta: An Experimental study of ethyl-methyl-carbonate (EMC) combustion, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-66.

- 3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J21I026
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

## Product Gas Characteristics of Ammonia/hydrogen Fuel at High Pressure Conditions

Akihiro Hayakawa\*†, Agustin Valera-Medina\*\*††

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*College of Physical Sciences and Engineering, Cardiff University

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Ammonia is considered as a potential hydrogen energy carrier as well as a carbon-free fuel. However, because of weak combustion characteristics of pure ammonia/air flames, flame enhancement is important to improve flame stability. Hydrogen addition is a way of promising flame enhancement procedure for ammonia flame as hydrogen is also carbon free and is easily obtained from ammonia. In this study, product gas characteristics of ammonia/hydrogen/air flames were investigated experimentally and numerically. In the first year, product gas characteristics of ammonia/hydrogen/air premixed laminar flames in stagnation flows were investigated at atmospheric pressure.

### 2. Details of program implement

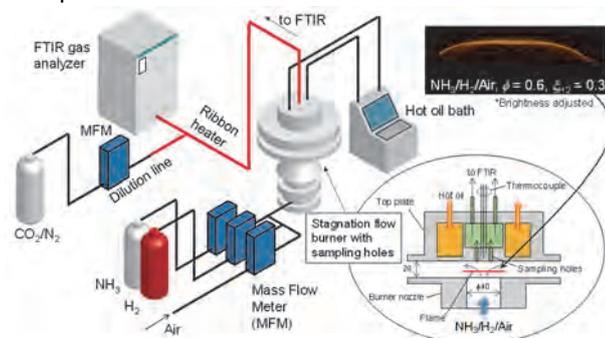


Fig. 1. Schematic figure of the experimental setup and the burner structure used in this study.

Figure 1 shows the schematic figure of experimental setup. Ammonia/hydrogen/air premixed laminar flames were stabilized using a stagnation burner with an outlet diameter of 40 mm with a stagnation plate mounted 20 mm above the burner outlet. The hydrogen fraction in the binary fuel of ammonia/hydrogen,  $\zeta_{H_2}$  was set to 0.3. An FTIR gas analyzer was employed for gas analysis. In addition, a dilution gas sampling method was employed. A  $CO_2/N_2$  ( $CO_2 = 15.9\%$ ) standard bottle was used for the dilution gas.

### 3. Achievements

Figure 2 shows the product gas characteristics of ammonia/hydrogen/air premixed laminar flames for various equivalence ratio,  $\phi$ . The numerical results were also plotted in the figure. NO mole fraction increased up to around 8700 ppm. The interesting characteristics was that large amount of  $N_2O$  were produced at

equivalence ratio of 0.6. Since  $N_2O$  has large global warming potential of 300, production/reduction mechanisms for  $N_2O$  were important. Numerical results showed that the H radical concentration and stagnation wall temperature were important for  $N_2O$  production.

#### 4. Summaries and future plans

In the second year, experiments at high pressure will be carried out. The modified top plate available for high pressure was already prepared. First, the flame stability at high pressure were studied. Then, product gas sampling from high pressure ammonia/hydrogen/air premixed flames will be carried out.

#### 5. Research results

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

[1] A. Hayakawa, M. Hayashi, G.J. Gotama, M. Kovaleva, E.C. Okafor, S. Colson, T. Kudo, S. Mashruk, A. Valera-Medina, H. Kobayashi, *Proceedings of the 13th Asia-Pacific Conference on Combustion* (2021) W4-26.

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

[2] A. Hayakawa, M. Hayashi, G.J. Gotama, M. Kovaleva, E.C. Okafor, S. Colson, T. Kudo, S. Mashruk, A. Valera-Medina, H. Kobayashi, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-65, pp. 141-142.

[3] 早川晃弘, 林雅生, M. Kovaleva, G.J. Gotama, E.C. Okafor, S. Colson, S. Mashruk, A. Valera-Medina, 工藤琢, 小林秀昭, 第 59 回燃焼シンポジウム講演論文集(2021), B324.

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

#### 6. References

- [1] G. J. Gotama et al., *Combust. Flame*, 236 (2022) 11753.
- [2] E.C. Okafor et al., *Combust. Flame*, 187 (2018) 185-198.
- [3] H. Nakamura et al., *Combust. Flame*, 185 (2017) 16-27.
- [4] J. Otomo et al., *Int. J. Hydrogen Energy*, 43 (2018) 3004-3014.

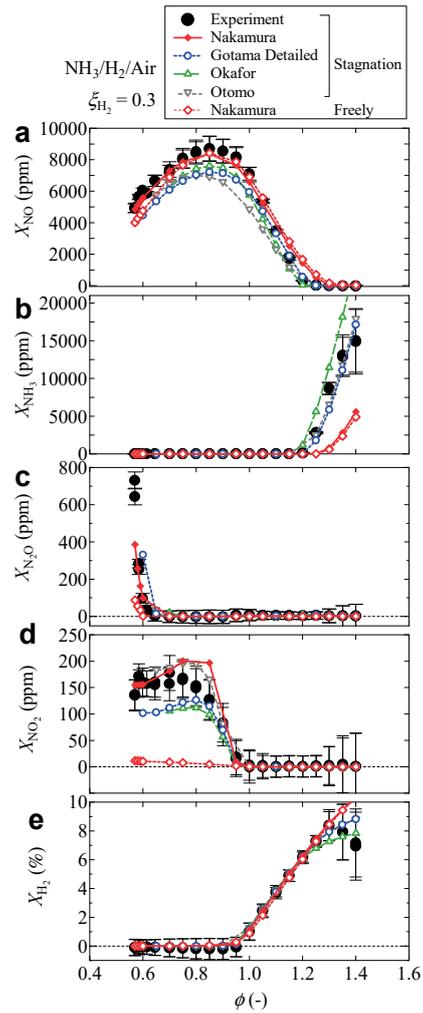


Fig. 2. Relationship between the mole fractions of (a) NO, (b)  $NH_3$ , (c)  $N_2O$ , (d)  $NO_2$ , and (e)  $H_2$  and the equivalence ratio,  $\phi$ . The numerical results calculated using Gotama mech [1], Okafor mech [2], Nakamura mech [3] and Otomo mech [4] were also plotted.

課題番号	J21I027
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	2021.4~2022.3
継続年数	1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<sup>\*†</sup>, 直井 誠<sup>\*\*††</sup>  
<sup>\*</sup>東北大学流体科学研究所, <sup>\*\*</sup>京都大学防災研究所  
<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>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**

本年度は本研究で使用する室内実験のAEデータの取得に注力した。ここでは椋平が所属する伊藤研究室で実施されている二軸圧縮下の大型岩石試験片に対して注水を行った際に発生するAEを対象とした(図1)。

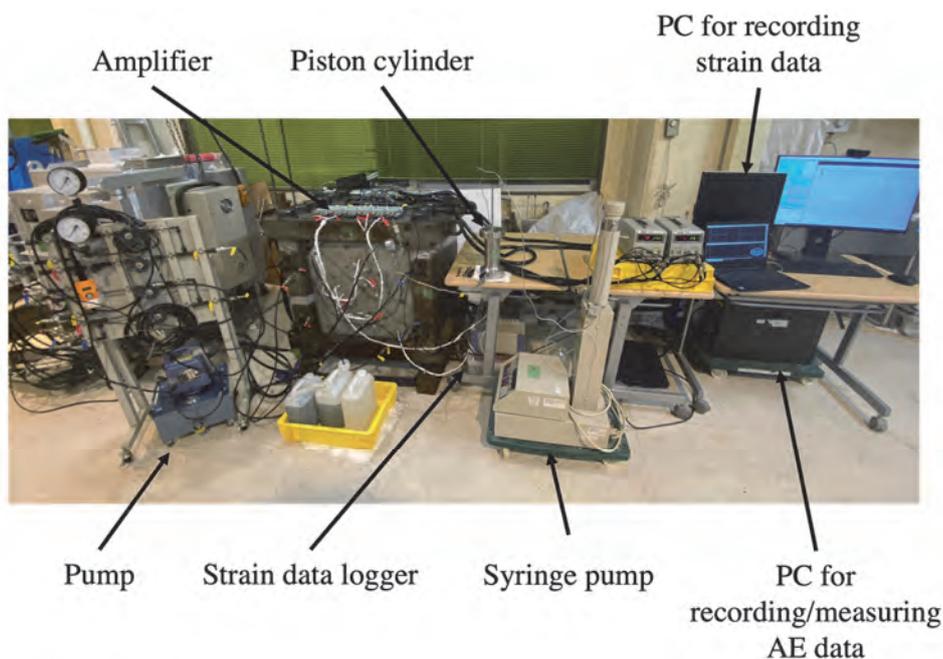


図1：実験装置概要

ここでは、大型フレームに研磨済みの断層面を有する一辺 60cm の大型の岩石試験片を設置する。この試験片に対してフラットジャッキにより封圧を載荷する。さらに、断層面に直交するように掘削された坑井に対して注水し、せん断滑りを誘発させる。せん断滑りが発生した際には AE が発生するので、載荷されていない面に設置した AE センサによって計測する。

### 3. 研究目標の達成状況

初年度では本研究で使用する大量の AE データを、せん断試験より取得した (図 2)。一般的な AE 解析を実施し、それに基づく基本的なせん断破壊実験の性状を、AE 解析を通して明らかにした。本研究で実施する機械学習による解析結果との比較対象は準備できた。

### 4. まとめと今後の課題

本年度で、今後研究で使用する AE データ、機械学習の入力とするための基礎データの取得が概ね完了した。次年度より、いよいよ機械学習の応用を行うとともに、さらに室内実験データの蓄積を進め、新たなデータへの解析事例を増やしていく。

### 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] Aoki, K., Mukuhira, Y., Naoi, M., and Ito, T., Understanding failure phenomena accelerated by machine learning for subsurface energy development, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-40, pp. 28-29.

#### 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

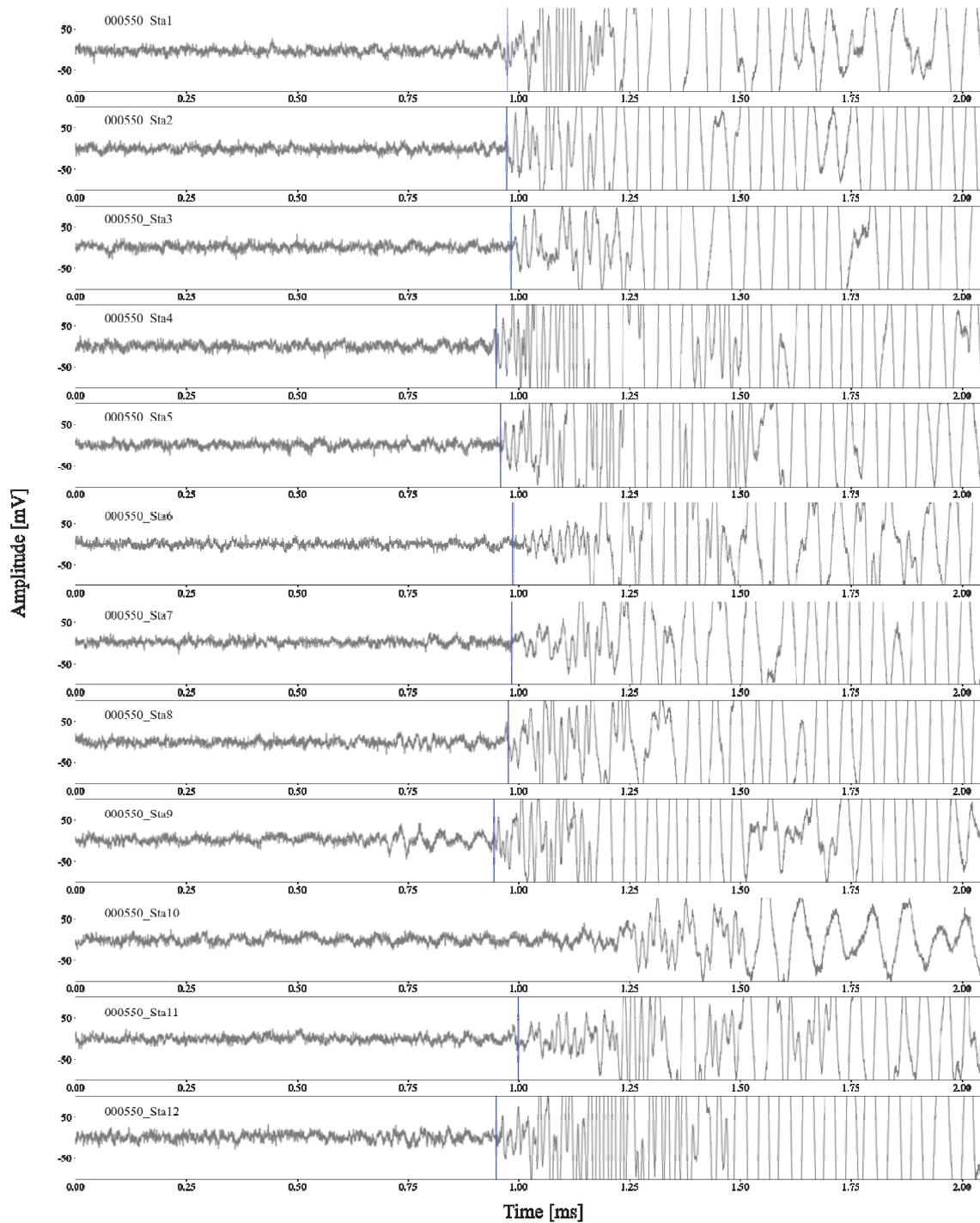


図 2 : 本研究で取得した AE の一例

課題番号	J21I028
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	2021.4～2022.3
継続年数	1年目（発展）

**弾道飛行装置を用いた再突入飛翔体周りの高エンタルピー流れの分光実験**  
Spectroscopy of high enthalpy flows around a reentry vehicle with Ballistic Range

山田 剛治\*†, 高橋 俊\*, 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

惑星探査機の大気突入飛行の際には、機体前方に強い離脱衝撃波が生成されて空力加熱が生じる。そこで空力加熱から探査機を守るためには、加熱量を正確に予測して適切な厚みと形状の熱防御材料を開発することが求められている。空力加熱率を正確に予測するためには、衝撃層内で生成されるプラズマ流の特性を明らかにする必要がある。しかしながら、プラズマ流中では、複雑な熱化学反応や輻射エネルギー輸送が生じて特性解明が困難である。これまで衝撃波管や膨張波管により探査機周りのプラズマ流の特性解明に関する研究がなされてきたが、実際の飛行環境を完全に再現したものではない。そこで、本研究では弾道飛行装置を用いた自由飛行試験により、実際の飛行環境に近い条件で大気突入探査機周り流れのプラズマ流の特性解明に取り組む。

## 2. 研究成果の内容

本研究では、これまでに空気に比べて熱化学構造が単純な希ガスのアルゴンを試験気体として研究を行ってきた。本年度は、新型コロナウイルスの影響により弾道飛行装置を用いた自由飛行試験を実施することができなかった。予定していた試験条件においてプロジェクトイル周り流れの CFD 解析を行ったので、得られた結果について報告する。表 1 に一様流条件を示す。プロジェクトイルの速度が 4.12km/s と高速であるため、衝撃層内のアルゴンは熱化学反応を伴いプラズマ化する。そこでアルゴンの熱化学反応を考慮してプロジェクトイル周り流れの解析を実施した。支配方程式としては、2次元軸対象ナビエストックス方程式を用い、化学種としては、アルゴン原子、アルゴンイオン、電子の 3 化学種を考慮した。熱化学モデルとしては、並進温度と電子温度を別々に取り扱う 2 温度モデルを適用して、それらの緩和過程を考慮した。またアルゴン中の反応過程としては、アルゴン原子の電離現象のみについて考慮し、単純化のため電子励起について考慮していない。図 1 にプロジェクトイル周りの温度分布の計算結果を示す。それぞれ、上半分は並進温度、下半分は電子温度となっている。これより、模型先端部表面付近の衝撃波に圧縮された領域においては、並進温度が 10000K 程度まで上昇しているのが分かる。一方で電子温度については、4000K 程度までの上昇にとどまり、並進温度よりも低くなっている。これより模型先端部付近の衝撃層内では、電子温度が並進温度よりも低い熱的非平衡状態にあることが分かる。一方で、模型肩部から下流の領域においては流れの膨張に伴い並進温度は 3000K 程度まで減少することが確認できる。これに対して、電子温度は、並進温度のような急激な減少は見られず、模型表面付近では先端部よりも高くなり 8000K まで上昇しているのが分かる。よって肩部から下流の模型表面付近においては、電子温度が並進温度よりも高い熱的非平衡状態が膨張により形成されることが分かる。図 2 にプロジェクトイル周りのモル分率分布を示す。それぞれ上

半分はアルゴン原子，下半分は電子となっている．これよりプロジェクタイトル肩部表面付近で若干電離が進んでいるものの，電子のモル分率は  $10^{-5}$  程度であり，本条件においては電離度が非常に小さく電離が支配的でないことが分かる．よって電離反応のみでなく，電子励起も考慮した数値解析が今後必要であると考えられる．

表 1 一様流条件

$V$ [km/s]	$P$ [Pa]	$T$ [K]	Test gas
4.12	600	293	100%Ar

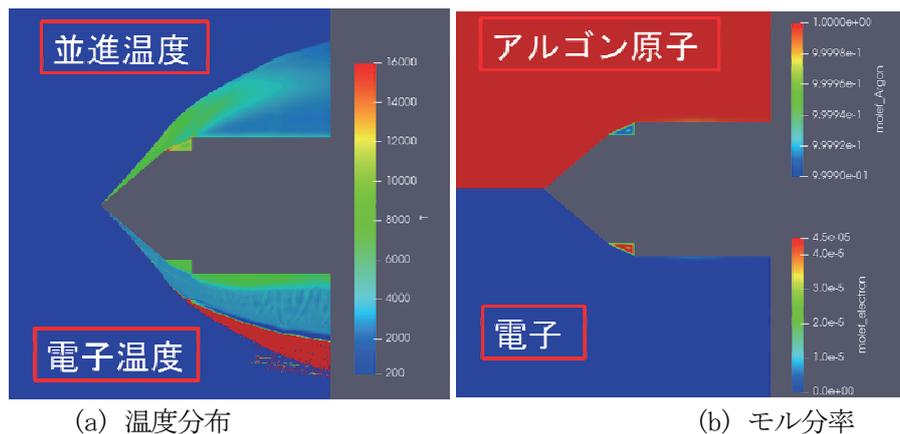


図 1 : プロジェクタイトル周りのアルゴン流れの解析結果

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は，弾道飛行装置を用いた自由飛行試験が実施できなかった．そのため，申請書の予想される成果で記載した実飛行に近い環境での信頼性の高いデータの取得と再突入飛翔体周り流れの熱化学特性の解明が達成できなかった．しかしながら，事前にプロジェクタイトル周りのアルゴンプラズマ流の数値解析を実施することで，熱化学特性や電離度などが得られた．これより来年度以降に実施する実験による検証と数値解析モデルの予測精度向上のための準備が整ったと考えられる．

### 4. まとめと今後の課題

本研究では，弾道飛行装置を用いて極超音速で自由飛行する飛翔体模型周りのアルゴン流れの特性について CFD 解析を行った．これより模型先端の圧縮領域と模型肩部下流の膨張領域の衝撃層内のそれぞれ特性が異なる熱的非平衡状態が形成されることが明らかになった．また本条件においては，電離度が非常に低くアルゴン原子の電子励起が支配的であることが分かった．

### 5. 研究成果

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] G. Yamada, S. Takahashi, and K. Ohtani: Emission Spectroscopy of Argon Flows around a Hypersonic Free Flight Cylinder, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-51.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J21I029
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	2021.4～2022.3
継続年数	2年目

**金/硬質炭素ナノ構造体による腐食環境下における摩擦面温度検出機能を有する  
薄膜しゅう動材料の研究**  
Study on the function of Au-DLC nano-composite coatings acting as thermo-sensor  
in the sliding interface under severe corrosive conditions

後藤 実\*†, 三木 寛之\*\*††  
伊藤 耕祐\*\*\*, 武田 翔\*\*

\*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,

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

同心円複合ターゲットを Ar+ でスパッタして DLC マトリクス中に金(Au)を異なる濃度で分散した Au-DLC を成膜し、ナノ構造制御により厳しい腐食環境下における摩擦界面温度センサ機能発現の可能性を探求する。化学的に不活性な炭素(C)とAuをナノ複合化することで厳しい腐食環境下で稼働する機械要素の摩擦界面温度の精密測定が可能になり、摺動条件の最適化による焼付き故障の防止に資する機能性薄膜しゅう動材料の創製を目的とする。本年度も、新型コロナウイルスの影響で東北大学流体科学研究所の装置を使用した実験ができなかったため、Au-DLC の摩擦・摩耗特性としゅう動相手材摩擦面の組成・構造を明らかにすることを主目的とする。

## 2. 研究成果の内容

本年度は COVID-19 感染症の影響で流体研における Au-DLC の比抵抗測定は実施できなかった。しかし、公募共同研究費で購入した成膜試料を使用し、独自に開発した同心円複合ターゲットを使用した高周波マグネトロンスパッタ法により成膜した Au-DLC について、ボールオン型摩擦・摩耗試験機を用いて異なる荷重条件における JIS SUJ2 鋼球との摩擦特性を求め、Au とほぼ等しいスパッタ収率である Cu を同等量添加した Cu-DLC との比較検討を行った。また、しゅう動相手材摩擦面に生成した膜中金属成分に由来するトライボフィルム(T.F.)について、透過電子顕微鏡(TEM)によるナノ構造観察を行った。

垂直荷重が 0.5～5 N の範囲における Au 濃度が 24at.% の Au-DLC の摩擦係数は、荷重の増加に伴い若干の減少傾向がみられる荷重依存性を示し、0.2 程度の安定した値を示した。一方、Cu 濃度 21at.% の Cu-DLC の摩擦係数は Au-DLC よりも変動幅が大きく、0.6～0.3 の範囲で荷重の増加と共に摩擦係数の減少傾向を示した。しゅう動相手材摩擦面観察の結果、Au-DLC のしゅう動相手材摩擦面には Au を主成分とする金属質 T.F. が安定して形成されており、その結果、安定した接触状態が維持されたと考えられる。TEM による T.F. 断面の観察結果より、Au を主成分とする T.F. と JIS SUJ2 しゅう動相手材との界面は不明瞭であり、拡散層が形成されたために強固な付着力が生じていることがわかった。Au および Cu を主成分とする T.F. の TEM 観察の結果を図 1 に示す。

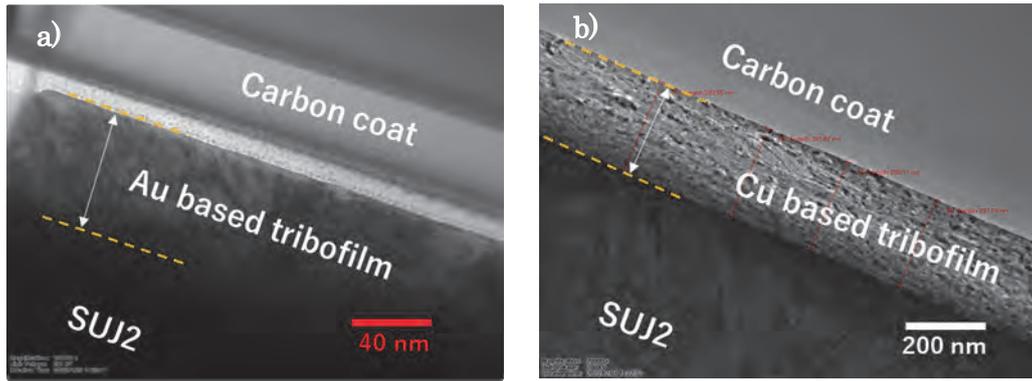


図1：SUJ2 鋼球上の Au および Cu を主成分とする T. F.の断面像

### 3. 研究目標の達成状況

次世代炭素ナノ複合しゅう動材料の接触界面反応制御を高精度に制御するトライボシステム設計手法の確立に向けて、比抵抗の温度依存性によるセンサ機能発現が期待される Au-DLC の成膜条件とナノ構造の影響の一端を明らかにした。

### 4. まとめと今後の課題

本研究で、高周波マグネトロンスパッタ法で成膜した Au 濃度 24at.% の Au-DLC の摩擦特性を調査し、同等の Cu 濃度の Cu-DLC の摩擦特性との比較を行った。その結果、Au-DLC の摩擦係数は、しゅう動相手材摩擦面に Au を主成分とするトライボフィルムが安定して生成するために 0.2 程度の低く安定した値が得られ、Cu-DLC の 1/3~2/3 の値になることがわかった。また、TEM による T. F. の断面観察の結果、Au を主成分とするトライボフィルムとしゅう動相手材の界面には拡散層が確認され、T. F. の強固な付着力により安定した摩擦界面が維持されたと考えられる。引き続きしゅう動相手材の組成を変化させた場合の Au-DLC の摩擦特性を明らかにし、腐食環境下における挙動と抵抗率の温度依存性の関係を明らかにすることが今後の課題である。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 後藤 実: 収束イオンビームによる軟質金属 DLC ナノコンポジット膜の薄片化と透過電子顕微鏡による摩擦特性の定量評価, 関西潤滑懇談会 7 月例会 ポスター発表会, web, 2021. 7. 9 (2021), No. 24.

[2] Minoru Goto, Hiroyuki Miki, Kosuke Ito, Sho Takeda: Study on the function of Au-DLC nano-composite coatings acting as thermo-sensor in the sliding interface under severe corrosive conditions, *Proc. AFT-2021*, Oct. 27-29, 2021, Online, CRF-28 (2021) p.64.

[3] 後藤 実: Au/DLC ナノコンポジット膜の乾燥摩擦係数におよぼすヘルツ接触圧力の影響, トライボロジー会議 2021 秋 松江, 10 月 29 日 (2021) pp.27-29.

[4] 古賀 梨乃, 藤本 大輝, 後藤 実, 磯村 昇吾, 竹市 嘉紀: 軟質金属含有硬質炭素膜による高温固体潤滑薄膜材料の研究, 先進的技術シンポジウム(ATTS2021), 2022 年 3 月 8 日 (2022) web.

#### 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

Project code	J21I030
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

Development of sonic boom evaluation function under real meteorological conditions

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. Concorde experience has shown that sonic boom impact changes every flight because of atmospheric conditions changing from moment to moment. The project SEIRA (Sonic-boom Evaluation In Realistic Atmospheres) has been kicked-off in June 2020. The aim of the SEIRA project is twofold: to examine relationships between sonic boom impact and atmospheric conditions, and to develop a surrogate model for sonic boom evaluation under realistic atmospheric conditions. The study of the second year mainly analyzed a variation in sonic boom impact of Concorde flights over the north-Atlantic.

### 2. Details of program implement

Daily flights of Concorde were simulated by using the chemistry-climate model EMAC (v2.54) coupled with the air traffic simulation model AirTraf (v2.0). The simulation setup consists of the following: the Concorde departed from Heathrow airport (LHR) at 10:30 (UTC) and flew to John F. Kennedy (JFK) airport (westbound flight) on the great circle at  $M=2.0$  at 15.3 km flight altitude. Sonic boom under the flight track at sea level was calculated; the simulation period was set from March 2009 to February 2010.

The atmospheric profiles clearly show the seasonal changes in temperature, relative humidity, zonal and meridional wind components in the lower stratosphere and troposphere. Figure 1 shows that the annual mean overpressure of Concorde is 100.0 Pa; the overpressure ranges from 86.8 (minimum) to 111.0 (maximum) Pa through the year. Our results agree with that reported by literature (92.9 Pa). The seasonal mean overpressure ranges from 99.0 (winter) to 102.0 (summer) Pa. That is, the overpressure decreases in winter, whereas it increases in summer. Although the quantitative values of the changes in the overpressure vary depending on different methodologies, atmospheric conditions, simulation periods, aircraft types, etc., the obtained seasonal change in the overpressure agrees with previous studies.

### 3. Achievements

The EMAC simulations (Work Package 1) have been accomplished and sonic boom simulations (WP2) have been carried out by using the Integrated

Supercomputation System of AFI Research Center, IFS, Tohoku University. The obtained meteorological data were also analyzed in WP3 by the Proper orthogonal decomposition (POD). Therefore, a surrogate model for sonic boom impact is constructed based on the Kriging method and its validation is performed in the third year. Yamashita et al. (2021) introduced the present results at AFI-2021 in Sendai (virtual conference); Iura and Ukai et al. (2021) contributed to ANSS 2021.

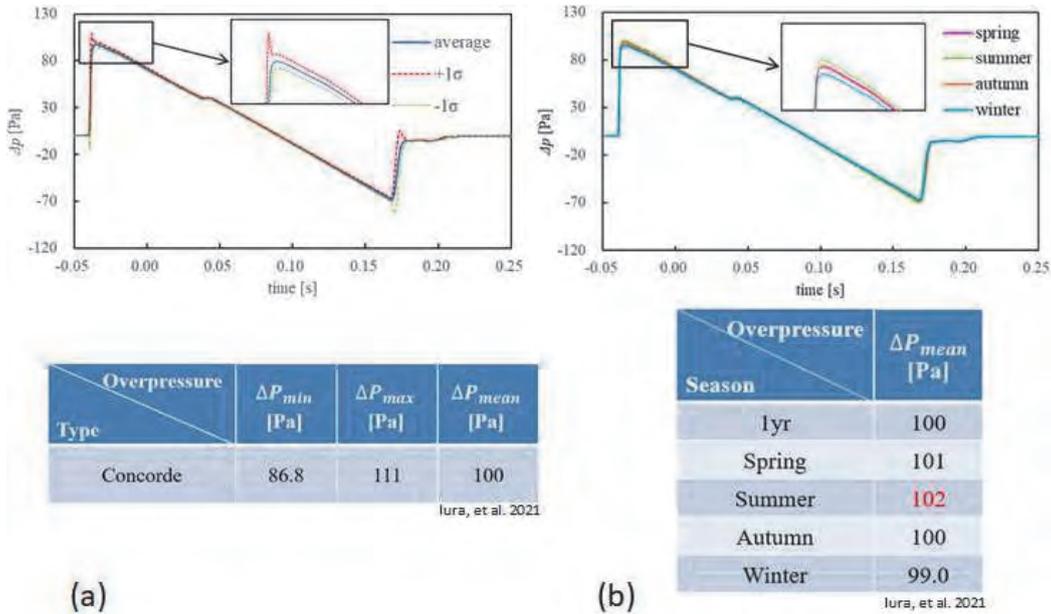


Figure 1 : 1yr sonic boom variation of Concorde north-Atlantic flights: (a) overpressure variation and (b) seasonal trend.

#### 4. Summaries and future plans

The Concorde flights were simulated from March 2009 to February 2010 under realistic atmospheric conditions by using EMAC/AirTraf. The overpressure ranged from 86.8 to 111.0 Pa (the annual mean of 100.0 Pa); the overpressure decreased in winter, whereas it increased in summer. The main research activity for the third year is to construct the surrogate model and its validation. A scientific paper that examines relationships between sonic boom impact and atmospheric conditions is submitted.

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [1] H. Yamashita, B. Kern, T. Ukai, R. Iura, T. Misaka and S. Obayashi, “Sonic-boom calculation of a realistic North Atlantic flight,” *Proceedings of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, CRF-60, Sendai (online), (2021).
  - [2] R. Iura, T. Ukai, A. Yamamoto, H. Yamashita, B. Kern, T. Misaka and S. Obayashi, “Analysis of sonic boom propagation by the real atmosphere based on meteorological data,” *The 39th Aerospace Numerical Simulation Symposium*, 2B08, Japan (online), (2021).
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

Project code	J21I031
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility of human and materials
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year (progressing)

## Transition delay and drag reduction mechanism by designed surface roughness

Aiko Yakeno\*†, Bagus Nugroho\*\*††  
 Shingo Hamada\*\*\*, Sayaka Suzuki\*\*\*, Shigeru Obayashi\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Faculty of Engineering and Information Technology, The University of Melbourne

\*\*\*Department of Aerospace Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The flow on a rough wall has attracted a lot of attention over the last 80 years because of its complexity and practical importance. Surface roughness generally contributes to the increase in drag, however recent numerical studies (including by the applicant works, Tameike *et al.* (2021) etc.) have shown that the transition is delayed depending on the wavelength of the small wavy roughness. Therefore, the purpose of this study is to understand the transition flow on such a rough surface in more detail and to examine a more effective roughness shape.

### 2. Details of program implement

The investigation is between Australia's and Japan's leading turbulent flow research institutions with a shared interest in boundary layer research and roughness. The first is a numerical simulation using the Direct Numerical Simulation (DNS) (which was conducted in Japan by Dr. Aiko Yakeno), which advanced from that of 2D transition to that of 3D. And the second is a laboratory experiment using a wind tunnel (which was planned to be conducted in Australia by Dr. Bagus Nugroho). Since the experiment at the University of Melbourne became difficult to prevent corona infection, it was decided to carry out the experiment in a small wind tunnel of the Institute of Fluid Science.

#### 2-1. Direct Numerical Simulation

The effectiveness of controlling turbulent transitions was verified for various surface roughness shapes (Fig. 1), by performing the three-dimensional direct numerical simulations. An artificial disturbance that induced the Tollmien-Schlichting (TS) wave at the inlet boundary was applied and the computational domain size was reduced. The surface roughness is demonstrated by the boundary-fitting grid shown in figure 1. Parametric studies were performed for different wavelengths with fixed amplitude height of the wavy roughness surface. In this study, the Reynolds number is set to 3500, based on the inlet boundary layer thickness.

#### 2-2. Wind tunnel experiment

The effectiveness of the roughness surface was also verified by wind tunnel experiments (Fig. 2). The experiments were performed at the open-loop benchtop wind tunnel, WT4401, by Omega Engineering Inc. A restrictive plate was set in upstream, and the flow became turbulent of approximately 30 % intensity at the test section. Different sand-grained roughness surfaces were set at the test section, 100x100x500 [mm]. Profiles of the streamwise boundary layer and turbulence fluctuations were measured by a hot-wire anemometer and were compared between cases of with or without the roughness.

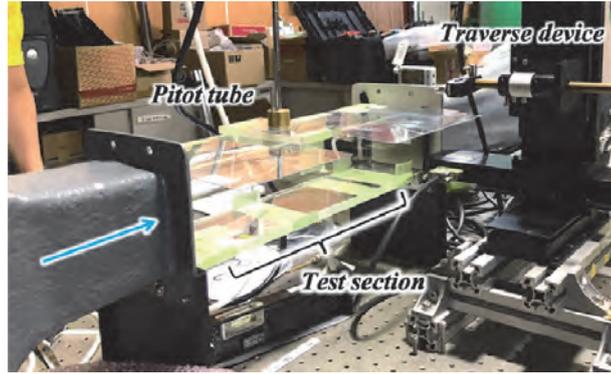
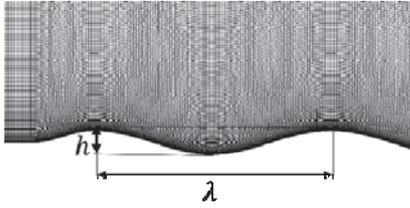


Fig 1 Computational grid and definition of roughness parameters. (left)  
 Fig 2 Equipment of the wind tunnel testing. (right)

### 3. Achievements

We show the instantaneous visualization of flow over the wavy roughness in Fig. 3. Firstly, it was confirmed that the TS waves were amplified when the surface roughness was consistent with the TS instability. Then, a rapid three-dimensionalization of vortices was observed for roughness wavelengths smaller than the TS wavelength. We computed the phase and the turbulence statistics to decompose contributions of TS wave and the three-dimensional breakdown to increase turbulence kinetic energy. Suppressing the turbulent transition by maintaining the TS wave until downstream in the optimal wavelength case agreed with previous two-dimensional studies. The reason why the transition was delayed the most with a certain wavelength is that it is the most effective in suppressing the growth of TS waves, although it is less effective in suppressing the growth of three-dimensional vortices, and because of maintaining TS waves, the three-dimensional nature of the vortices was suppressed.

In the experiment, we have obtained some difference in boundary layer profiles so far. Further investigation is now being performed.

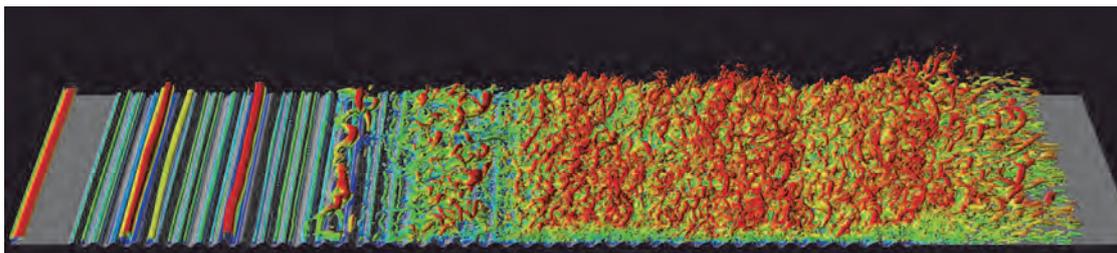


Fig.3 Instantaneous iso-surface of the 2<sup>nd</sup> invariant of a velocity gradient tensor;  $Q = 0.001$  colored with streamwise velocity  $u$  from 0.0 (blue) to 1.0 (red). Flow comes from left to right.

### 4. Summaries and future plans

Direct numerical simulations were performed to investigate the effect of surface roughness on the turbulent transition when TS waves are induced by artificial disturbances. It is found that the turbulent transition is delayed at certain wavelengths, and some statistics were modified with the surface roughness. Further research will be conducted to find an effective roughness shape and to propose the most effective roughness shape for transition delay effect and drag reduction.

## 5. Research results

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

- [1] A. Yakeno: Drag reduction and transient growth of a streak in a spanwise wall-oscillatory turbulent channel flow, *Physics of Fluids*, 33 (2021), pp. 065122, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0050547>
- [2] A. Yakeno and S. Obayashi: Propagation of stationary and traveling waves in a leading-edge boundary layer of a swept wing, *Physics of Fluids*, 33 (2021), pp. 094111, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0063936>

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

- [3] S. Obayashi, T. Misaka, A. Yakeno, R. Kikuchi: Digital-Twin Fluid Engineering, *The biennial International Conference on Cybernetics (CYBCONF2021)*, (2021.6.10). **Plenary Lecture**
- [4] A. Yakeno, S. Obayashi: Traveling-wave propagation in the swept leading-edge boundary layer at high Reynolds number, *International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM)*, (2021.8.).
- [5] S. Hamada, A. Yakeno, S. Suzuki, S. Obayashi, B. Nugroho: Transition delay and drag reduction mechanism by designed surface roughness, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2021)*, (2021.10.29).
- [6] S. Obayashi, A. Yakeno, M. Hirota, Y. Ide, N. Tokugawa: Computational Laminar Flow Technology, *Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2021)*, (2021.11.16). **Plenary Lecture**

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

#### (Award)

#### [7] フロンティア表彰

「これまで、流体機械の低抵抗化のため、遷移、剥離、そして乱流に作用する流体制御の研究を行い、特にエネルギー過渡増幅など流体安定性に基づく秩序渦に着目した機構解明や、制御の高性能化に対し優れた成果をあげた。」

焼野 藍子, 2022.3.15, 日本機械学会流体工学部門.

#### [8] 竜門賞

壁乱流準秩序構造に着目した摩擦抵抗低減制御に関する研究

焼野 藍子, 2022.2.19, 日本流体力学会.

#### (Press release)

#### [9] 東北大学プレスリリース

「世界初！旅客機主翼の流れの遷移メカニズムを解明 後退翼の層流化により空気抵抗の大幅減へ前進」, 2021.9.14

<http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/09/press20210914-02-waves.html>

#### [10] 東北大学 流体科学研究所プレスリリース

「世界初！旅客機主翼の流れの遷移メカニズムを解明 後退翼の層流化により空気抵抗の大幅減へ前進」, 2021.9.14

<https://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/news/1750/>

#### [11] 日本経済新聞

「東北大、旅客機主翼の流れの遷移メカニズムを解明」, 2021.9.14

<https://www.nikkei.com/article/DGXLRS617903 U1A910C2000000/>

[12] エンジニアのためのキャリア応援マガジン「fabcross for エンジニア powered by MEITEC」

「旅客機主翼の層流から乱流への遷移メカニズムを解明 - 将来の低計算コストでの航空機開発に寄与 東北大学」, 2021.9.15

[https://engineer.fabcross.jp/archive/210915\\_tohoku\\_u.html](https://engineer.fabcross.jp/archive/210915_tohoku_u.html)

[13] 航空新聞社 jwing.net

「東北大, 後退角主翼前縁部の乱流遷移メカニズム解明」, 2021.9.21

<https://www.jwing.net/news/43116>

[14] 月刊「子供の科学」2021年12月号

巻頭ニュース「飛行機が低燃費に? 主翼の空気の流れを解明!!」, 2021.11.10

<https://www.seibundo-shinkosha.net/magazine/kids/67211/>

課題番号	J21I032
区分	一般公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2021.4～2022.3
継続年数	1年目

新規動脈血管モデルを組み込んだ頭頸部循環における拍動循環シミュレータ構築の試み  
Development of a novel arterial lesion vessel model for pulsatile cerebrovascular circulatory simulation

坪子 侑佑<sup>\*†</sup>, 岡本 吉弘<sup>\*\*</sup>, 太田 信<sup>\*\*\*††</sup>

<sup>\*</sup>早稲田大学理工学術院総合研究所, <sup>\*\*</sup>国立医薬品食品衛生研究所医療機器部

<sup>\*\*\*</sup>東北大学流体科学研究所

<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>所内対応教員

## 1. 研究目的

頭頸部循環における血管内治療機器の生体外性能評価のため、拍動循環シミュレータの開発および高度化を進めている。本研究においては、PVA-H（ポリビニルアルコールハイドロゲル）製を用いた脳血管病変モデルを新たに共同開発し、開発中の拍動機構に組み込むことで治療機器の拡張・留置性能を生体内と同等に定量評価可能なシミュレータ構築を目指すこととした。

## 2. 研究成果の内容

モデル要求仕様や詳細設計についての打ち合わせ、モデル作製作業、作製したモデルの物性評価の際に実験や対面の打ち合わせを実施するため年2回（2名）の東北大学流体科学研究所訪問を計画していたが、新型コロナウイルス感染症の拡大による出張制限により流体研への訪問が不可能であった。よって、ZoomによるWeb会議（計5回）を行い、シミュレータの構成、頭頸部循環の創出のための要求仕様等について議論し、血管モデル部の仕様を決定し、太田信教授の研究室にて、形状、物性の異なる数パターンの血管モデルを試作いただいた。

シミュレータ構築における拍動機構の開発は研究代表者の坪子と共同研究者である国立医薬品食品衛生研究所医療機器部の岡本吉弘室長とで行い、流体研で開発された動脈血管モデルを組み込むことで、生体内の血圧・血流条件（表1）を模擬し、臨床使用される治療機器を用いて頭頸部へのカテーテルアクセスが可能な拍動循環シミュレータを構築することができた（図1、国立医薬品衛生研究所医療機器部性能評価室にて2回の実験実施）。拍動循環により得られた頸動脈圧・流量波形を図2に示す。

また、構築したシミュレータを活用可能な臨床ニーズの抽出のため、昭和大学横浜市北部病院脳神経外科の山家弘雄医師にご協力いただき、訪問して医療機関の造影環境下での拍動循環シミュレーションの実施に課題点や評価方法について議論し、評価システムの改良に資する知見を得た。

表 1：目標とした頸部血圧・流量条件

Parameters	Values
Pump rate bpm	70
Systolic fraction %	35
Target pressure (systole/diastole) mmHg	130/80
Target flow rate L/min	0.5

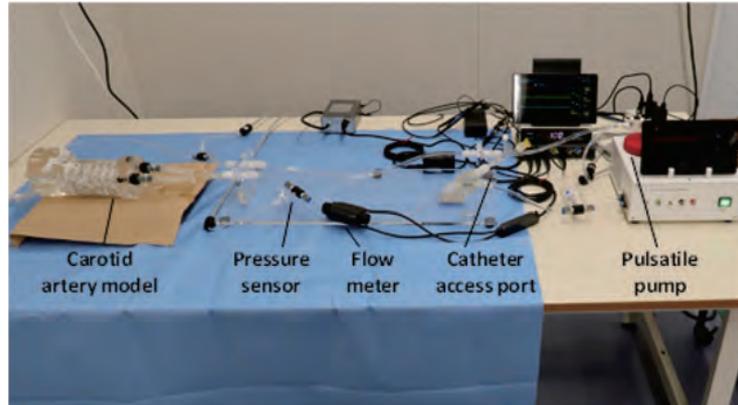


図 1：東北大学流体科学研究所（太田研究室）で開発された頭頸部血管モデルを組み込んだ新規拍動循環シミュレータの全体図

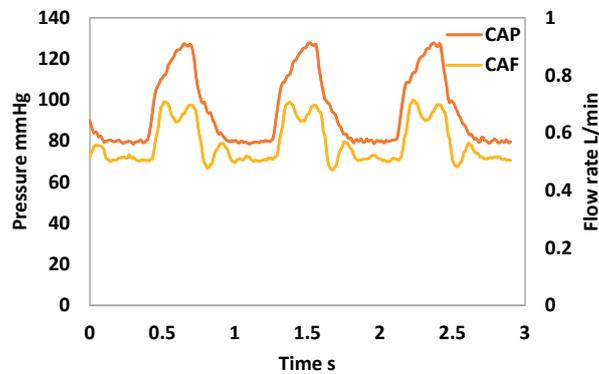


図 2：構築したシミュレータにより得られた頸動脈圧・流量波形

### 3. 研究目標の達成状況

本年度においては、新規に拍動循環シミュレータを構築し、これを用いて頭頸部の血液循環を創出することを目標とした。開発いただいたモデル血管を用いて、シミュレータにて生理的な循環動態の創出と実際の治療機器による血管アクセスならびに留置ができた点で一定の成果が得られたと考える。

### 4. まとめと今後の課題

本年度に開発いただいた頭頸部血管モデルは、実験における複数回計測の再現性を担保するためシリコン製のものを用いたが、構築したシミュレータにおいて、今後 PVA-H 製モデルを組み込んで拍動循環シミュレーションを行っていくことで、従来のシリコン製血管モデルではなし得なかった血管内腔の摩擦係数や動粘弾性を模擬する病態血管モデルの開

発によって、留置される治療機器の拡張性能や移動抵抗性をより高度な生体内環境の再現下で定量評価可能な実験系の構築が期待される。

## 5. 研究成果

### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

- [1] K. Takeda, Y. Tsuboko and K. Iwasaki: Latest outcomes of transcatheter left atrial appendage closure devices and direct oral anticoagulant therapy in patients with atrial fibrillation over the past 5 years: a systematic review and meta-analysis, *Cardiovasc. Interv. Ther.*, (2022) (14 pages), <https://doi.org/10.1007/s12928-022-00839-1>.
- [2] H. Sakoda, M. Uematsu, Y. Okamoto and Y. Haishima: In vitro evaluation of delamination resistance of PEEK and CFR-PEEK, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Vol. 236, No. 2, pp. 279-285, (2021), <https://doi.org/10.1177/095441192111042992>.
- [3] H. Tomita, S-H. Kim, R. Inuzuka, H. Matsui, H. Tachimori, T. Kobayashi, A. Kato, T. Fujii, Y. Haishima, Y. Okamoto and H. Sakoda: Stent Implantation for Congenital Heart Diseases in Japan - Comprehensive Analysis From the Japanese Society of Congenital Interventional Cardiology Registry, *Circ. J.*, Vol. 85, No. 9, pp. 1517-1524, (2021), <https://doi.org/10.1253/circj.CJ-20-0915>.
- [4] M. Nakayama, N. Tanaka, T. Uchiyama, T. Ohkawauchi, Y. Tsuboko, K. Iwasaki, Y. Kawase and H. Matsuo: The stability of flow velocity and intracoronary resistance in the intracoronary electrocardiogram-triggered pressure ratio, *Sci. Rep.*, Vol. 11, No. 1, (2021), 13824 (10 pages), <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93181-0>.

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [5] 坪子侑佑: 大動脈解離モデルにおける偽腔内の血流と血管壁への負荷，第 86 回日本循環器学会学術集会，オンライン，(2022)，JSME-JS2-4.
- [6] 池原大烈，坪子侑佑，小原功，新浪博士，岩崎清隆: 冠動脈バイパス術におけるグラフト吻合部と狭窄部の位置関係の粒子画像流速計測法による血行力学的解析，第 59 回日本人工臓器学会大会，千葉，(2021)，S.159.
- [7] 坪子侑佑，伊佐地康佑，許雪童，四方田直輝，岩崎清隆: 断層粒子画像流速計測法を用いた大動脈解離モデルにおける解離進展の力学的機序解明に関する基礎検討，第 59 回日本人工臓器学会大会，千葉，(2021)，S.5.
- [8] 伊佐地康佑，坪子侑佑，四方田直輝，岩崎清隆: 拍動下でフラップが可動する新たな大動脈解離モデルの開発および偽腔内血流との関係の検討，LIFE2020-2021，オンライン，(2021)，ROMBUNNO.1-4-1-4.
- [9] Y. Tsuboko，Y. Okamoto and M. Ohta: Development of a Novel Arterial Lesion Vessel Model for Pulsatile Cerebrovascular Circulatory Simulation, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), (2 pages).
- [10] 坪子侑佑，許雪童，伊佐地康佑，岩崎清隆: 断層粒子画像流速計測法による冠動脈血管モデルの三次元ひずみ定量計測法の開発，日本機械学会 2021 年度年次大会，オンライン，(2021)，J021-15.
- [11] 池原大烈，坪子侑佑，新浪博士，岩崎清隆: 粒子画像流速計測法による冠動脈バイパス術後の左冠動脈前下行枝内流れの評価可能な実験系の構築，第 26 回日本 Advanced Heart & Vascular Surgery/OPCAB 研究会，オンライン，(2021).
- [12] 許雪童，藍龍之介，前原瑠海，坪子侑佑，岩崎清隆: 拍動循環装置を用いた経カテーテル弁

の弁葉とステントフレーム間の流れの可視化, 日本機械学会第 33 回バイオエンジニアリング講演会, オンライン, (2021).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許)

なし

(受賞)

第 59 回日本人工臓器学会大会 大会賞優秀賞, 断層粒子画像流速計測法を用いた大動脈解離モデルにおける解離進展の力学的機序解明に関する基礎検討, 坪子侑佑, 2021 年 11 月 26 日, 一般社団法人日本人工臓器学会.

(マスコミ発表)

なし

Project code	J21I035
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

## Numerical Simulations as Evaluation Method for Biofluidic Experiments

Narendra Kurnia Putra\*†, Hitomi Anzai\*\*††, Suprijanto\*, Bonfilio Nainggolan\*, Petrus Canisius Astuto Santosa\*, Mahoto Ohta\*\*, Tomo Kinoshita\*\*\*, Mikha Hilliard\*, Muhammad Rafi Sudrajat\*.

\*Engineering Physics Dept. Faculty of Industrial Technology, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\*Dept. Diagnostic Radiology, Tohoku University Hospital

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

As proposed, there are two main objectives of the current project:

1. Using CFD to map the wall shear stress (WSS) conditions which affecting endothelial cells (ECs) under flow inside the flow chamber and how it reacts to two stent wires positioned in the middle of chamber.
2. Optimizing the renal artery catheterization during Adrenal Venous Sampling (AVS) process.

### 2. Details of program implement

Based on the purpose of the project mentioned above, this project has been conducted as follow:

1. CFD simulation of the flow chamber system has been performed to investigate the effect of stent placement to the endothelial cells alignment under flow exposure. The results show that a positive agreement exist between the flow pattern, WSS conditions on the bottom of the chamber dish and the ECs alignment and migrations. From the comparison between simulation and experimental investigation via fluorescence microscope on the post-flow-exposure conditions, the ECs alignment on the surface of stent struts are indicated as the reendothelialization process occur along the stent's surface. The details finding on this work have been published in *Frontiers in Physiology* 2022 as listed on the part 5 number [1].
2. For the optimization of catheterization process during AVS procedure, the complete exercise of simulation with different set of design variables of catheter tip's geometry has been performed computationally with around 30 samples of simulation. From these results, various effect on blood vessel constrictions during the AVS procedure due to different variations of number and depth of notches on the catheter tip's have been investigated. Figure 1 shows one of the results of flow parameters investigation on catheter design of four notches and 70% depth. From this project, the meta-model response surface map has been constructed as the model representation of the changing of the system behaviour due to variations of the catheter geometry.

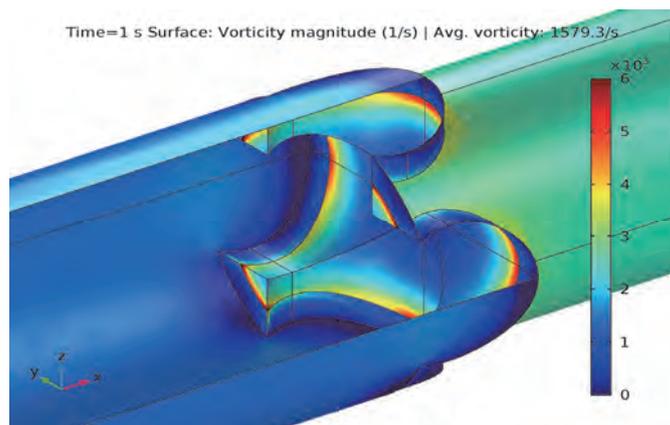


Figure 1 : Flow conditions on the modified catheter tip with four number of notches and 70% depth.

### 3. Achievements

As stated on the project's proposals, the expected results from this project are:

1. Final paper on the ECs alignment comparison with WSS from CFD have been successfully submitted and accepted in *Frontiers in Physiology* 2022 as listed in part 5 number [1] below.
2. The exploration on the design effect to the catheterization performance on affecting the vessel constriction during the S-AVS procedure has been constructed as a meta-model response surface map. This meta-model map shows the approximation of the system behavior on the vessel deformation due to the changes of number and depth of catheter's tip notches. The results has been reported as a research paper draft to be submitted in the near future.

### 4. Summaries and future plans

As progressed by this project, we developed the CFD model and simulation for investigate the flow condition inside the cellular flow chamber as well as the optimization method for intravascular catheter design. In the future project, we plan to apply those developed method for the stent application. Today, design improvement of stent has been rapidly progressed with various type of design and positioning technique. However, more investigations on how this design works towards the treatment goal needs to be investigated. The future project will be focused on the further study of how stent design and positioning may affect the intravascular treatment outcomes via in silico modeling and simulation also some evaluation on its hemodynamics conditions.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] Z, Wang, N.K. Putra, H. Anzai, M. Ohta: Endothelial Cell Distribution After Flow Exposure With Two Stent Struts Placed in Different Angles, *Frontiers in Physiology*, 12:733547 (2022). doi: 10.3389/fphys.2021.733547
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [2] P.C.A. Santosa, N.K. Putra, B. Nainggolan, Suprijanto, M. Ohta, H. Anzai: Investigations on Different Boundary Conditions to the Intravascular Flow Conditions, *The 21st International Symposium on Advanced Fluid Information* (2021),

- [3] Z Wang, N.K. Putra, H. Anzai, H. Taniho, N. Ohtsu, Y. Kojima, M. Ohta: Evaluation of endothelialization enhancement by anodization stent surface treatment. *The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics* (2021) PP2-25.
- [4] J. Muliany, N. K. Putra, Nugraha, T. Kinoshita, M. Ohta, H. Anzai: Exploration of intravenous microcatheter tip design effects on the segmental adrenal venous sampling procedure, *The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics* (2021) PP2-27.
- [5] M.S.S.Hashuro, S. Tupin, A. Totsuka, T. Song, K. Daibo, N.K. Putra, M. Ohta : Particle image velocimetry feasibility on transparent ultrasound PVA hydrogel phantom with scatterers. *The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics* (2021), PP2-29.

課題番号	J21I036
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	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

**高感度非発光再結合検出による量子ナノ構造におけるフォノン物性の評価**  
**Investigation of phonon dynamics in quantum nano-structures by using high-sensitivity**  
**detection of the non-radiative recombination**

福山 敦彦\*†, 寒川 誠二\*\*††, 原田 知季\*, 碓 哲雄\*  
 \*宮崎大学工学教育研究部, \*\*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

超スマート社会の実現には量子井戸や量子ドットといった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は、現在のレーザーやセンサといったデバイスの性能を飛躍的に向上させる可能性があるためである。しかしながら、ナノスケールに微細化されたデバイスの発熱・放熱が高性能化を阻害する。つまりデバイス内で発生するフォノン（熱）の生成および輸送特性を明確にすべきである。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、宮崎大学が所有する光熱変換分光法を適用する。本研究課題では、非破壊・高感度且つナノスケール材料への適用を考慮し、光ヘテロダイン干渉系を新たに導入する。これによって量子ドットのフォノン物性を明確にし、従来のレーザーやセンサといった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。今年度は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間隔を変化させた。用意した試料はNP間隔が25, 40, 60 nm（以下、NP25, NP40, NP60）の三種類であった。今年度は、従来の光熱変換分光法を発展させて、光吸収後の発熱によって生じる表面熱膨張をヘテロダイン干渉計により非接触で検出するレーザーヘテロダイン光熱変位（以下、LH-PD）法を新規構築した。得られた表面変位量を理論計算結果と比較することで、Si-NP/SiGe複合膜の熱伝導率を議論した。

図1に808 nmのレーザー光を照射したときの表面変位量の時間変化を示す。全ての試料においてレーザー光照射後に変位量が指数関数的に増加し、照射終了後に指数関数的に減少した。変位量はNP間隔が最も狭いNP25が最も大きく、約0.9 nmだった。それぞれの試料における変位量最大値で規格化して時間変化を比較したところ、NP40の時間変化がもっとも遅く、NP25とNP60が同程度の時間変化になった。表面変位量の時間変化は、材料の光学的物性値（光吸収： $\alpha$ ）と熱的物性値（熱伝導率： $\kappa$ ）によって変化する。そこで、光吸収に

よって生じた熱に対する三次元の熱拡散方程式を解くことで表面変位量およびその時間変化の計算を行った。その結果、図2に示すように $\kappa$ が大きいほど表面変位の時間変化が早くなることが分かった。NP40の時間変化がもっとも遅くなったことから、NP間隔が40 nmの時に熱伝導率が最も小さくなることが示唆された。

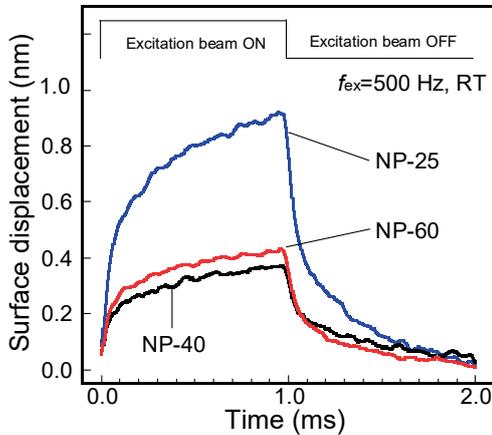


図1：表面変位量の時間変化

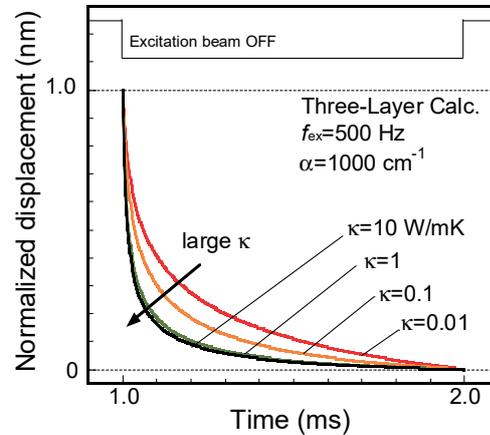


図2：時間変化の熱伝導率依存性（計算）

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は新たにLH-PD法を構築し、発熱による試料表面膨張量を直接測定することが可能となった。NP間隔によって表面変位量やその時間変化が変化し、理論計算からも作製したSi-Ns/SiGe複合膜の熱伝導率が変化したこと確認できた。本研究提案のフォノン物性制御のための新しい評価手法を確立できたことから、達成度は8割と判断する。

### 4. まとめと今後の課題

NP間隔によって表面変位量の時間変化が変化した。得られた結果は、光照射面を含む面内の熱拡散も考慮した三次元の熱拡散方程式による理論計算で再現することができた。今後はNP間隔を細かく変化させた試料を用意して $\kappa$ との関係を明確にする。

### 5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む） なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 原田知季, 安良田裕基, 森田浩右, 碓哲雄, 福山敦彦: 光ヘテロダイン光熱変位法によるSi熱伝導率の非破壊非接触測定, 令和3年秋季第82回応用物理学学会学術講演会, オンライン(2021), 12a-N106-8.

[2] T. Harada, Y. Arata, K. Morita, T. Ikari, A. Fukuyama: Development of non-contact and non-destructive method for estimating the thermal properties by using the laser heterodyne photothermal displacement method, 第42回超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム, オンライン(2021), 1J1-3.

[3] K. Morita, T. Harada, Y. Arata, D. Ohori, S. Samukawa, T. Ikari and A. Fukuyama: Non-contact and non-destructive investigation of thermal properties of Si-nanopillar/SiGe composite films by using a laser heterodyne photothermal displacement method, online(2021), CRF-31.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等） なし

Project code	J21I037
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2021 - March 2022
Project status	2nd year

## Effects of pulsatile flow on endothelial permeability and cell motility

Eugenia Corvera Poiré\*†, Kenichi Funamoto\*\*††

\*Faculty of Chemistry, National Autonomous University of Mexico

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Vascular endothelial cells (ECs) which cover inside vascular lumen form a monolayer. Collective migration of ECs is essential for vasculogenesis and angiogenesis as well as for maintenance of vascular homeostasis. The cell motility changes when ECs are exposed to different external fields, moreover, cell response and morphology vary with the external fields. The aim of the project is to study changes in permeability and cell motility of ECs due to different mechanical stresses, imposed through variation of frequency and amplitude of external forcing.

### 2. Details of program implement

We study the effects of mechanical imposition of dynamic stresses to vascular endothelial monolayers by controlling pulsatile fluid flow in contact with ECs. By integrating UNAM experimental methods and IFS in-house microchip, we observe of ECs and evaluate their permeability. UNAM group has a technique to generate pulsatile flow in a microcapillary, in the frequency range of 0.5-300 Hz, by using a piezoelectric actuator. IFS group has a cell culture technique that uses a microfluidic device to control a microenvironment. The integration of these techniques will enable us to evaluate behaviors and characteristics of ECs, while controlling oscillatory shear stress and pressure in a microchannel. Theoretically, we will use the model of reference (Vazquez-Vergara P., et al., *Phys. Rev. Fluids.*, 6(2), 2021) to make predictions about the dynamics of a pulsatile culture-medium slug. We will extend the model to analytically compute shear rates at different distances from the wall and at the wall, which would be the one felt by a cultured endothelial monolayer. Furthermore, we will characterize our experimental and theoretical results in terms of characteristic frequencies of the system.

### 3. Achievements

During the second year for our collaborative research project, all collaborative research has been done remotely due to the pandemic of COVID-19 as the last year. We reconstructed the UNAM experimental setup for pulsatile flow generation in a microchannel fabricated from polydimethylsiloxane and a slide glass at IFS (Fig. 1 left). By using a piezoelectric actuator, a water slug in a microchannel of 1,000  $\mu\text{m}$  width and 300  $\mu\text{m}$  height was fluctuated to generate oscillatory pressure (Fig. 1 right). Motions of the interface of water slug can be monitored by using a digital camera mounted on a microscope, and variations of pressure difference between the upstream and downstream of the slug is measured with a pressure sensor to analyze the shear stress felt by ECs. Cell culture in the microchannel has been separately considered with the IFS original microchip. A microchannel covered with ECs is installed into

the pulsatile experimental setup and the changes of cell motility and cell morphology when the slug of cell culture medium flows over a monolayer of endothelial cells is being investigated.

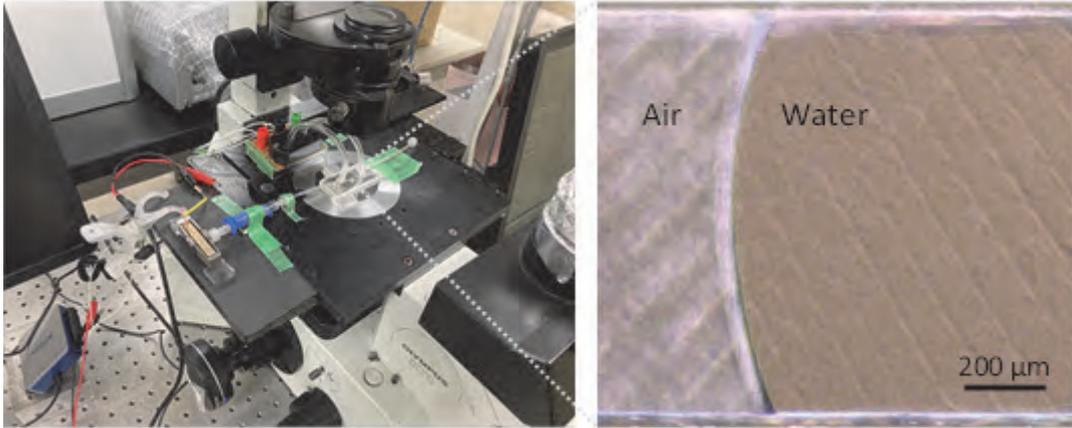


Figure 1: Experimental setup to generate pulsatile flows in a microchannel (left) and an example of visualization of the interface of water slug in the channel (right).

We have computed theoretically the maximum shear stress in contact with the wall in an oscillation cycle,  $\tau_{MAX}$ , as a shear response function,  $\chi_{shear}$ , times the amplitude of pressure gradient,  $\Delta p^0/L$ , that is,  $\tau_{MAX} = \chi_{shear} \frac{\Delta p^0}{L}$ . We have done this for three fluids: water at 20°C, water at 37°C, and cell culture medium at 37°C. Figure 2 shows the theoretical shear response function,  $\chi_{shear}$ , for the three fluids. We can observe that the theoretical model predicts a tiny difference in the dynamic permeability at physiological temperature between a water slug and culture medium slug. This is a useful feature since water, which is much cheaper than culture medium, is being used for preliminary experiments. At frequencies below 50 Hz, the shear response function is proportional to the frequency imposed by the driving pressure drop. This implies that for a constant pressure drop amplitude; doubling or tripling the frequency will double or triple the maximum shear stress felt by the cells.

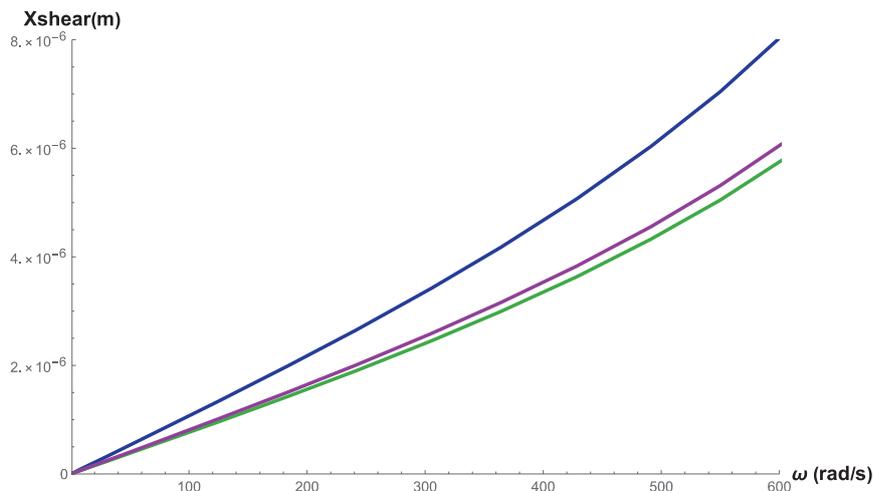


Figure 2: Shear response function for a fluid slug formed of each one of three fluids: water at room temperature, used as reference, with blue line, water at physiological temperature, with purple line, and cell culture medium at physiological temperature, with green line.

temperature with green line, culture medium at physiological temperature with magenta line.

As stated on the annual report of the first year, the magnitude of the dynamic permeability,  $K$ , is related linearly with the amplitude of the pulsatile slug velocity,  $v$ , for a given pressure drop amplitude,  $\Delta p$ , as  $K = vL/\Delta p$ , where  $L$  is the slug length. Also,  $K$  grows linearly with the imposed frequency for over two decades of the log scale. This implies that for a constant pressure drop amplitude; doubling or tripling the frequency will double or triple the amplitude of flow velocity. This will certainly be true close to physiological frequencies.

These results will allow us to impose a range of shear rates to the endothelial cell monolayer to cover physiological and non-physiological conditions, solely by tuning the frequency of the imposed pulsatile driving. To linear order, both the dynamic permeability and the shear rate should be independent of the amplitude of the pulsatile pressure drop. This feature will allow us to know the range of validity of the imposed amplitude of external forcing when comparing with our model.

#### 4. Summaries and future plans

The experimental setup was constructed, and now is being validated. Cellular experiments to study the motility and morphology of ECs will be conducted by applying various levels and frequencies of shear stress to ECs range by solely changing the frequency of the pulsatile pressure drop. We hope to find a characteristic frequency range in which cell motility increases/decreases to promote non-invasive therapies for pathological tissues.

#### 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. Funamoto, E. Corvera Poiré: Effects of Shear Stress on Endothelial Cell Motility, *Proceedings of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFT-2021)*, (2021), CRF-73, pp. 156-157.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

課題番号	J21I038
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	2021.4~2022.3
継続年数	2年目

**同軸円筒 MHD エネルギー変換機内の電磁流体现象の研究**  
**Study on MHD phenomena in Co-axial MHD Energy Conversion Device**

小林 宏充\*†, 高奈 秀匡\*\*††  
 佐々木 亮\*\*\*, 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余剰風力エネルギーの回収ならびにトルク制御のために、同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置 (図 1 左) を検討する。本装置の機構は高奈准教授による基礎実験 (風力の代替として AC モータを利用) から既に実証されている。しかし、今後の実風車による実証研究に向け、それに見合った同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の設計には、同装置内の電磁流体现象の理解が必要不可欠である。とりわけ、ローレンツ力による層流化の有無、流路内の速度分布、渦電流、壁面摩擦力など、軸回転のトルク制御性や電気出力に大きな影響を与える電磁流体现象に関しては、それらの運転条件依存性を含め、詳細な理解が必要となる。

そこで、本研究では、同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の設計指針を導くための基礎データの提供に資するべく、同変換装置内の電磁流体现象の学理的知見を 1 次元ならびに 3 次元電磁流体数値解析から与えることを目的とする。

## 2. 研究成果の内容

2 年目である今年度は、内筒が回転する同軸二重円筒内電磁流体流れにおいて、半径方向 1 次元理論解析解を導出し、抵抗比 (外部負荷抵抗値と液体金属の内部抵抗値の比) と Hartmann 数 (無次元化された印加磁束密度) に対する発電効率、ジュール損失、壁面摩擦損失の依存性を調べた。その結果、外円筒半径に対する内円筒半径の比 (半径比) に応じて、発電効率を最大化する抵抗比と Hartmann 数の最適な組み合わせが存在することがわかった。その最大効率は、半径比とともに増加し、最大理想発電効率が存在することがわかった。1 次元理論解析解からは、ジュール損失は、非常に小さいことがわかり、大半が内円筒壁での摩擦損失であることがわかった。

1 次元理論解析では、z 軸に対して垂直に存在する上下壁面の影響や円周方向に対する垂直面内に形成されるテイラー渦の影響を考慮することができない。そこで、3 次元数値計算コードを開発し、東北大流体研のスーパーコンピューターにて実行した。まずは、レイノルズ数の小さい層流条件で 1 次元理論解析との比較を行った。その結果、内円筒側の上下壁近くに渦電流が存在すること、上下壁近くに Hartmann 境界層が存在することから、最適な抵抗比と Hartmann 数の組み合わせは高負荷側にわずかにシフトすることがわかった。本計算条件では、渦電流のためにジュール損失は 1 次元理論解析より 2 桁大きくなることがわかった。また、半径方向に対して z 軸方向に長い形状では、内円筒近傍にテイラー渦が現れ、壁面摩擦損失が増加するが、わずか

な磁束密度を印加することで、テイラー渦が抑制され、壁面摩擦損失を低減できることがわかった。さらに、実用時に相当する乱流条件での検討を実施した。その結果、Hartmann ( $Ha$ ) 数を増加させると乱れが抑制され、層流化することがわかった。また内円筒壁近傍に現れるストリーク流れ(図1中央: $Ha=0$ )も抑制され、3つ又状の構造が現れることがわかった(図1右: $Ha=100$ )。乱流中の渦構造は流れ方向(円周方向)に引き延ばされた構造であるが(図2左: $Ha=0$ )、Hartmann 数を増加させていくと渦構造がローレンツ力によって抑制され(図2中央: $Ha=30$ )、磁場が印加された  $z$  軸方向に渦が並ぶ準二次元構造が現れることがわかった(図2右: $Ha=100$ )。

さらに、実験室で実験可能な小型の同装置を作成し、回転数に対する開放電圧を測定した。内円筒が金属で作成されているため、そこで発生する起電力を数値計算し、その起電力分を実験で得られる開放電圧から差し引くことで、3次元計算と比較した。3次元計算では、実験で使用されたヘルムホルツコイルによる磁場分布を考慮できるようにし、実験と同条件での計算が可能となった。その結果、3次元計算結果は、実験で得られた開放電圧の回転数依存性をよく説明できることがわかった。また、磁場の  $z$  軸方向分布が一定の場合に比べ、内円筒および外円筒付近の磁場が中央より小さくなる分布を持つ場合は、渦電流が抑制されるが、半径方向磁場分布も考慮すると渦電流が強められることが明らかになった。

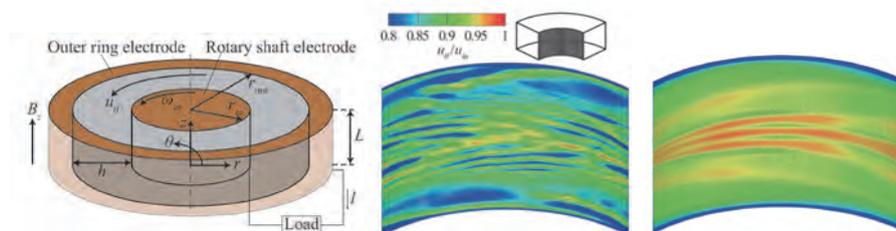


図1：同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の概念図(左)、内円筒近傍でのストリーク構造(中央： $Ha=0$ 、右： $Ha=100$ )

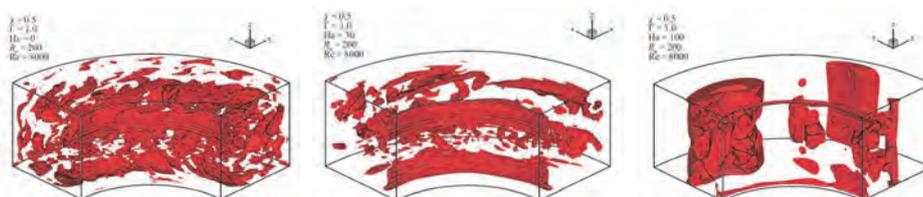


図2：装置内の渦構造(左： $Ha=0$ 、中央： $Ha=30$ 、右： $Ha=100$ )

### 3. 研究目標の達成状況

同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置内の電磁流体现象の学理的知見の獲得のために、半径方向 1 次元理論解析を行い、抵抗比や Hartmann 数が電磁流体場や発電性能・トルクへ与える影響を見積もることに成功した。この知見を活かして、小型の実験装置を作成し、実験を実施した。さらに、3次元数値計算に着手し、層流条件のみならず乱流条件での電磁流体现象の理解が可能となった。実験における磁場分布を考慮した 3次元数値計算も可能となり、実験装置内での電磁流体现象の学理的知見の獲得が可能となった。本共同研究により得られた成果は、主要な国内および国際会議において発表されるとともに、電気学会論文誌に掲載された。以上のことから、本共同研究の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、実験を説明する 3次元電磁流体乱流数値シミュレーション技術を確立した。今後は、本計算を用いて、実証試験用装置の設計指針の獲得、ならびに同装置内の電磁流体现象の解明を

実施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] 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理論解析, 電気学会論文誌 B, 141 巻, 10 号 (2021), pp.642-648, doi:10.1541/ieejpes.141.642.

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] Ryo Sasaki, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana, Hiromichi Kobayashi: Liquid metal flows with MHD interaction in rotating co-axial cylinder, *The IX International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED 2021)*, Online, (2021), IS04B-3, 1 page.
- [3] Ryo Sasaki, Takayasu Fujino, Hidemasa Takana, Hiromichi Kobayashi: Large Eddy Simulation of Liquid Metal Flow in Co-axial MHD Energy Conversion Device, *Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021)*, Sendai, (2021), OS20-11, 2 pages.
- [4] Hiromichi Kobayashi, Hidemasa Takana, Ryo Sasaki, Takayasu Fujino: Study on MHD phenomena in Co-axial Energy Conversion Device, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021)*, Sendai, (2021), CRF-6, 2 pages.
- [5] 佐々木亮, 藤野貴康, 高奈秀匡, 小林宏充: 層流条件下での同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の発電特性に関する数値解析, 電気学会 新エネルギー・環境研究会, オンライン開催, (2021), FTE-21-041, 6 ページ.
- [6] 佐々木亮, 藤野貴康, 高奈秀匡, 小林宏充: MHD 相互作用下における Taylor-Couette 流れの三次元数値シミュレーション, 第 35 回数値流体力学シンポジウム, オンライン開催, (2021), B01-2, 2 ページ.

### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J21I039
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	2021.4~2022.3
継続年数	1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**

植原 幹十朗\*†, 大谷 清伸\*\*††,  
 小林 稜平\*, 鈴木 麻友美\*, 柄澤 菜々美\*  
 \*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帯状テザーを提案する。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つ目は帯状テザー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て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帯状テザーの損傷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に示す様に、両端を治具で固定し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に損傷の定義を示す。テザーに衝突したプロジェクタイルは一次破壊Aと、一次破壊により生じたデブリクラウドによる最も大きな貫通穴の弧長である二次破壊Bが生じた。最大穴の弧長はアルミ製形状保持具も発泡ウレタン製形状保持具もほとんど同じ性能であった。一方で、損傷領域の弧長で見た時は、図3に示すようにアルミ製形状保持具と発泡ウレタン製形状保持具で大きな差が生じた。アルミ製形状保持具の場合は2次損傷に無数の穴が生じたからである。アルミニウムは重いので、細かく粉砕されずに複数の塊のままデブリクラウドとして2次被害を起こしたからだと考えられる。一方、ウレタンは軽いので、2次損傷への影響は小さかったと言える。つまり、破断の観点からはアルミニウム製よりも発泡ウレタン製の形状保持具の方が適していることが分かった。デブリ除去に係る時間にて形状保持具を評価するために、定量的な比較を行う。図4に示す通り、中実円柱テザーと形状保持具を付加した中空円筒テザーでは大きな違いが分かる。テザー全長が短い場合は、テザー全長が短くても除去時間が短くなっていることが分かる。また、テザーは全長が短いほうがデブリとの衝突リスクも小さく、展開も容易であるため好ましい。従来の中実円柱テザーよりも形状保持具付きの中空円筒テザーが優れていることを示した。

### 3. 研究目標の達成状況

テザーへの衝突損傷を定量的に評価出来た。テザーの衝突現象を把握して定量的評価に繋げている。目標である衝突損傷を定量的に評価できているので十分に研究目的を達成している。

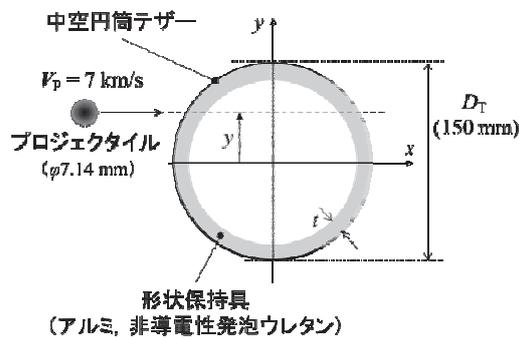


図1 中空円筒ターゲットの構成図

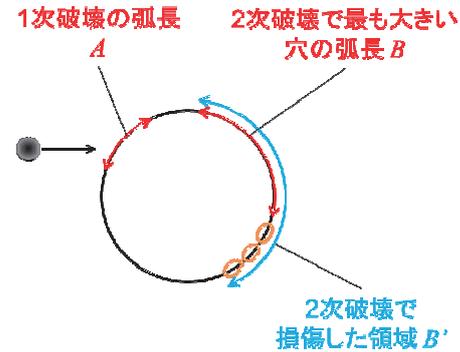


図2 損傷の定義図

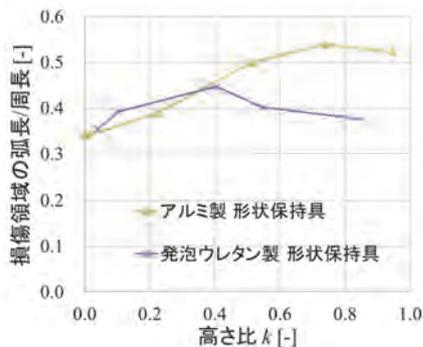


図3 損傷領域の弧長と周長の比較図

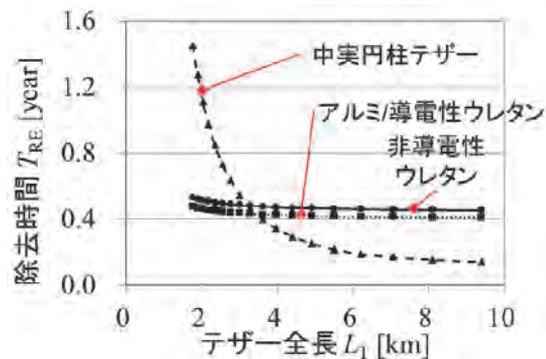


図4 テザー全長による除去時間比較

#### 4. まとめと今後の課題

テザーへのデブリ衝突を模擬した衝突実験を実施し、形状保持具の違いにより損傷が変化することがわかった。形状保持具の材質が除去時間などにおよ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)

[1] M. Fujiwara, H. Tomizaki, S. Hasegawa, K. Ohtani and K. Makihara: Damage Assessment for Electrodynamic Tape Tether Against Space Debris Impact, *Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan*, 19 (2021), pp. 34-41, doi: 10.2322/tastj.19.34.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] M. Suzuki, R. Kobayashi, N. Karasawa, D. Morimoto, K. Ohtani, K. Otsuka and K. Makihara: Shape Keepers of Hollow Cylindrical Tethers for Space Debris Removal, *Proceedings of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-52, pp. 115-116.

[3] R. Kobayashi, M. Suzuki, N. Karasawa, D. Morimoto, K. Otsuka and K. Makihara: Penetration Evaluation of Inflatable Space Structure with Heat Curing at Hypervelocity Impact, *Proceedings of the Eighteen International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2021), OS25-53, pp. 832-833.

2) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J21I041
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	2021.4～2022.3
継続年数	2年目

**ふく射熱遮蔽機能を有する消防装置の開発**  
**Development of thermal barrier fire extinguishing devices**

江目 宏樹\*†, 岡島 淳之介\*\*††, 古川 琢磨\*\*\*  
 小野 泉帆\*, 矢野 雅之\*, 鷹木 勇人\*, 海野 嵩史\*, 佐藤 弘武\*, 柴垣 朱璃\*, 築瀬 冴映\*  
 \*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

本研究では、火災現場において火炎及び加熱壁面から放射され、延焼や火傷等の原因となっている熱ふく射を遮蔽できる消防装置の確立を目的とする。本研究の最適化水滴ミストによるふく射遮蔽を消防車両の自衛噴霧に応用することを検討し、噴霧による「水の節約」と「ふく射遮蔽」を同時に達成する技術の確立を目指す。将来的には、消防職員の可搬自衛噴霧装置など、広く消防職員の命・安全を守ることでできる技術への応用を目指す。

火災現場のような高温場において、「ふく射伝熱」は重要な伝熱要素となる。目に見える炎に加え、目に見えない熱ふく射も消火活動において多大な影響を持つ。この熱ふく射による延焼や火傷等を防ぐ消防設備の実現が望まれている。林野火災などの大規模火災ではふく射による延焼が支配的となり、本研究成果は特殊災害にも貢献可能である。

その研究過程で消防職員と意見交換を行った。「これがふく射による火傷です」、「先日の火災で車両が溶けました」等、熱ふく射の対策の確立・社会実装に対して多数の要望を得た。特に消防設備が充足ではない地方の消防署では消防車両を安定的に確保するため、消防車両の自衛噴霧の高機能化が急務である。

本研究では、これまで散水性能に特化し、設計されてきた消防設備において、ふく射遮蔽を議論するならば、水量の少ないミスト層のほうが、水量の多い水膜よりも、ふく射遮蔽性能が高いというパラダイムシフトを示している点に新規性及び革新性がある。現状の消防車両の自衛噴霧は、噴霧粒径が大きく、広範囲に水をかけ車両を冷却するには有用だが、ふく射遮蔽には寄与しない。ふく射遮蔽機能を有することで自衛噴霧の高機能化が可能になる。

## 2. 研究成果の内容

本研究ではミストの水粒子直径は  $2\ \mu\text{m}$  又は  $10\ \mu\text{m}$  で一定とし、対流-ふく射の複合伝熱解析を行った。解析モデルを図1に示す。解析領域のアスペクト比は  $x:y:z=4:1:4$  に設定されており、 $x$ 及び $z$ 方向は周期境界条件が適用されている。下部の加熱壁温度  $T_h$ は  $1200\text{K}$ 、上部の冷却壁温度  $T_c$ は  $300\text{K}$  に一定に保たれている。解析領域内には吸収-散乱性媒体であるミストが一様分散しており、蒸発は考慮しない。また、計算コスト削減のため、Plank-mean approximation (PMA)により黒体エネルギーが均等になるように4バンドに分割されたウォーターミストのスペクトル特性を使用した。

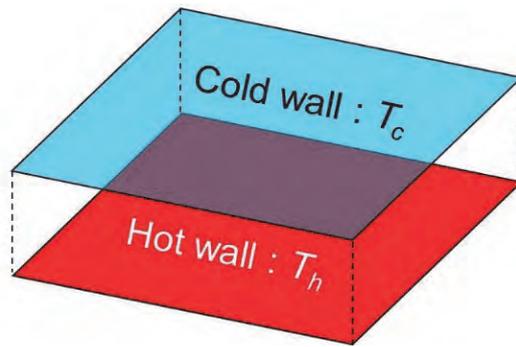


図 1：解析モデル

計算結果として、冷却壁近郊での Nusselt 数を Table 1 に示す。ふく射熱伝達特性は水粒子直径が  $2\ \mu\text{m}$  であるミストの方が、ミストがない系と比べて約 27% 熱ふく射遮蔽に貢献している。ふく射熱抑制の要因の 1 つとして水粒子の異方性散乱特性が挙げられる。粒子の散乱特性は粒子が大きいほど前方散乱成分が支配的となり、ふく射熱遮蔽に寄与しない。一方、水粒子直径  $2\ \mu\text{m}$  のミストを用いた系の対流熱伝達特性はミストのない系と比べて 2 倍以上促進されている。ふく射 Nusselt 数は減衰係数と幾何学的距離の積で表される光学厚さの増加に伴い減少傾向を示すのに対し、対流 Nusselt 数は対流伝熱による影響が大きいレイリー数において光学厚さの増加に伴い増加傾向を示すことが知られている。ウォーターミストの光学厚さを検証したところ、高温場で支配的となる近赤外線領域での光学厚さの違いが大きく、本研究ではミストのふく射熱吸収によって駆動される自然対流が対流熱伝達促進の要因であると考えられる。

Table 1 Nusselt number at the cold wall.

Condition	$Nu_{conv}$	$Nu_{rad}$	$Nu_{conv} + Nu_{rad}$
No mist	$1.55 \times 10^2$ (100%)	$2.02 \times 10^4$ (100%)	$2.04 \times 10^4$ (100%)
Mist ( $d_{p,w} = 2.0$ )	$3.65 \times 10^2$ (235%)	$1.47 \times 10^4$ (73%)	$1.51 \times 10^4$ (74%)
Mist ( $d_{p,w} = 10$ )	$3.34 \times 10^2$ (215%)	$1.69 \times 10^4$ (83%)	$1.72 \times 10^4$ (84%)

### 3. 研究目標の達成状況

本研究は、対流・ふく射の複合伝熱解析を行い、ウォーターミストが火災乱流場に与える影響について評価した。ウォーターミストを用いた消防装置開発における実用環境下に近い場合のふく射伝熱現象に関する理解が深まった。これらの知見を用いて、可搬自衛噴霧装置や消火ホースなど、消防職員の命を守る技術の開発に貢献できる。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では乱流自然対流の熱伝達特性におけるふく射熱伝達の役割を明らかにするために、OpenFOAM による吸収・非等方散乱性媒体であるミストを含む対流・ふく射の複合解析を行った。解析結果より、ふく射物性の違いは高温乱流場における対流・ふく射熱伝達特性に影響を及ぼすことが示され、これらの要因が光学厚さ・前方散乱強度によるものである可能性を示した。

本研究では、現状、水滴の蒸発の影響を無視している。そこで今後、周囲環境からの伝熱のミスト層への影響の把握のため、水滴の経時変化に対するスペクトル応答評価を行う。加

熱下のミスト層のふく射遮蔽性能の経時変化を FTIR によるスペクトル透過率測定により、直接評価する。また、ミスト全体の蒸発モデルの実装に先駆け、単一水粒子の蒸発過程と共に、蒸発過程における水粒子のふく射特性の変化を再現できるコードを実装する。ふく射伝熱を考慮した単一水粒子の蒸発過程に関する知見を得た後、ミスト全体の蒸発モデルの実装を目指す。

## 5. 研究成果

### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

- [1] H. Gonome, Y. Takagi, T. Nagao, and M. Ono: Effect of soot on thermal radiation shielding performance of water mist, *Fire Safety Journal*, Vol. 123, (2021), p. 103363 (8 pages), <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103363>.
- [2] 江目宏樹, 鷹木勇人, 長尾太一, 小野泉帆, 古川琢磨, 守谷修一, 岡島淳之介: 火災現場におけるふく射熱伝達-ウォーターミストによるふく射熱遮蔽-, *エアロゾル研究*, Vol. 36, (2021), pp. 170-175, <https://doi.org/10.11203/jar.36.170>.

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] 江目宏樹: 散乱性媒体によるふく射制御, 山形化学工学懇話会講演会, 山形, (2021).
- [4] 鷹木勇人, 古川琢磨, 江目宏樹: 火災流動場の能動的制御に向けた散乱性媒体の熱対流解析, 第 58 回日本伝熱シンポジウム, Online, (2021), BPA1401 (1 pages).
- [5] 鷹木勇人, 古川琢磨, 岡島淳之介, 江目宏樹: ウォーターミストによる乱流場制御の検討, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2021, Online, (2021), (5 pages).
- [6] H. Gonome, Y. Takagi, T. Kogawa, and J. Okajima: Radiation and convection coupling calculation for development of thermal barrier fire extinguishing devices, *Proceedings of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Online, (2021), CRF-1, pp. 2-3.
- [7] Y. Takagi, T. Kogawa, and H. Gonome: Active Control of Thermal-Flow Field by Thermal Radiation in Participating Medium, *Proceedings of the 18th International Conference on Flow Dynamics*, Online, (2021), pp. 819-820.

### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J21I043
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## Development of pressure measurement method in laser-cavitation bubbles

Takehiko Sato\*†, Mohamed Farhat\*\*††  
 Kiyonobu Ohtani\*, Siwei Liu\*, Tomoki Nakajima\*, Kaito Nitto\*\*\*  
 \*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

A mechanism of a cavity formation on a plate in high speed water flow has not enough cleared, though there are plenty of cavitation researches. We aim at measuring an internal pressure in laser-induced cavitation bubbles using discharge.

### 2. Details of program implement

Using a constructed experimental setup and pressure estimation method until the last year, we measured the internal pressure of the cavitation bubbles.

Figure 1 shows the estimated pressure at maximum radius of the primary bubble against the electrode gap. The inside pressure at the maximum radius  $p_{\max}$  which is estimated by the adiabatic change shown in the eq. (1) does not vary much against the gap distances and takes an almost constant value.

$$pV^\gamma = \text{const.} \quad (1)$$

When the applied voltage was 1.5 kV, the average value of the estimated bubble pressure at the maximum diameter was  $0.39 \times 10^5$  [Pa], and when it was 2.0 kV, it was  $0.40 \times 10^5$  [Pa]. It was also shown that the average values at the two applied voltages were almost equal, and that the pressure at the maximum diameter of the bubbles was not affected by the applied voltage at the time of discharge. However, the estimated pressures are larger than those used in simulations in previous studies.

From the above, assuming that the pressure at which the bubble reaches the maximum diameter is  $0.39 \times 10^5$  [Pa], the pressure inside the bubble against the volume ratio of maximum volume  $V_{\max}$  and the growing bubble volume  $V_t$  at arbitrary time, ( $V_{\max}/V_t$ ) can be expressed by eq. (2) derived from eq. (1).

$$p_t = 0.39 \times \left(\frac{V_{\max}}{V_t}\right)^\gamma \quad [\times 10^5 \text{ Pa}] \quad (2)$$

Therefore, the pressure  $p_t$  with respect to the non-dimensional time  $t$  was obtained

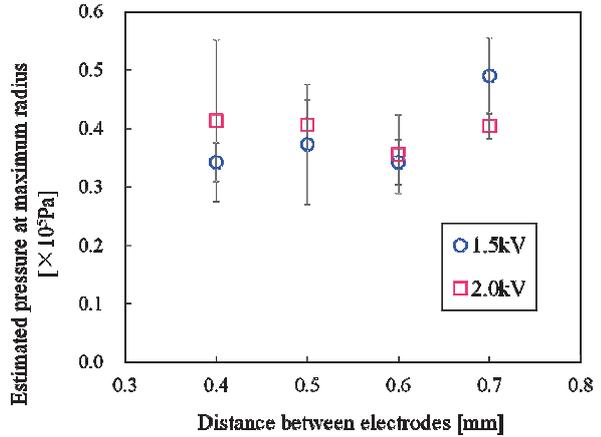


Fig. 1 The ratio of the bubble radii at the breakdown and the maximum of the primary bubble against the electric field strength.

using the non-dimensional bubble radius and the Rayleigh-Plesset equation. The obtained results are shown in Fig. 3. The pressure  $p_t$  shown as circles against the calculated pressure from the pressure at maximum volume shown as a dotted line show a good agreement.

$$p_t = 0.39 \times \left(\frac{V_{max}}{V_t}\right)^{\gamma} [\times 10^5 \text{ Pa}] \quad (2)$$

Therefore, the pressure  $p_t$  with respect to the non-dimensional time  $t$  was obtained using the non-dimensional bubble radius and the Rayleigh-Plesset equation. The obtained results are shown in Fig. 2. The pressure  $p_t$  shown as circles against the calculated pressure from the pressure at maximum volume shown as a dotted line show a good agreement.

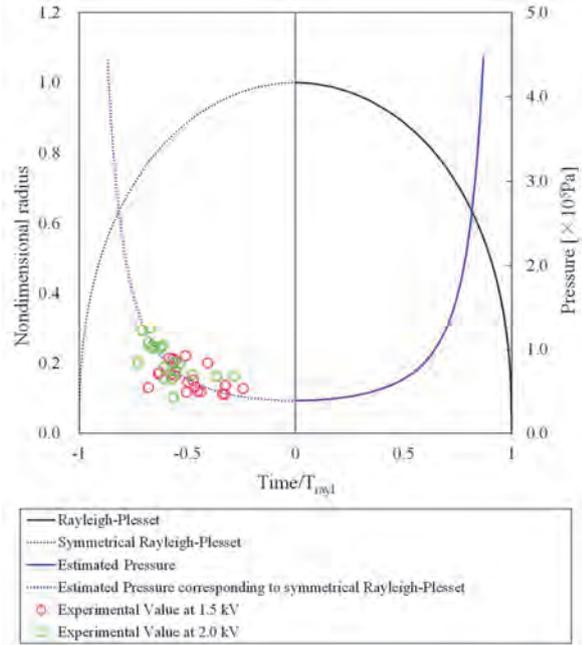


Fig. 2 Estimated pressure corresponding to the nondimensional bubble radius against the nondimensional time (Rayleigh-time) The symbols of circles colored in red is 1.5 kV and in green is 2.0 kV.

### 3. Achievements

In this study, we succeeded in estimating the internal pressure of the laser-induced cavitation bubble. The pressure estimated in this study shows a relatively high pressure,  $0.39 \times 10^5$  Pa. This result suggests that the hypothesis of the water vapor pressure in the bubble which has been used in common is not correct.

### 4. Summaries and future plans

We could obtain the internal pressure in the cavitation bubble. However the result is different from the previous research. We will improve this method and try to measure the pressure more precisely.

### 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. Uehara, S. Kamata, T. Nakajima, Y. Iga, S. Kanazawa, M. Farhat, and T. Sato: Pressure Measurement in Laser-Cavitation Bubbles, *The 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2021)*, オンライン開催, (2021), Presentation No. CRF-79.

[2] T. Sato, S. Uehara, R. Kumagai, T. Miyahara, M. Oizumi, T. Nakatani, S. Ochiai, T. Miyazaki, H. Fujita, S. Kanazawa, K. Ohtani, A. Komiya, T. Kaneko, T. Nakajima, M. Tinguely, and M. Farhat: Formation and Measurement of Plasma Fine Bubbles,

*12th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-12)*, オンライン開催, (2021), Presentation No. O11-1.  
(Keynote Lecture)

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

Project code	J21I044
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

## Correlation between oxygen ion conductivity and GBs in solid oxide electrolyte membrane

Takashi Tokumasu\*†, Jeongmin Ahn\*\*††, and Hiroki Nagashima\*\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

\*\*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University,

\*\*\*Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

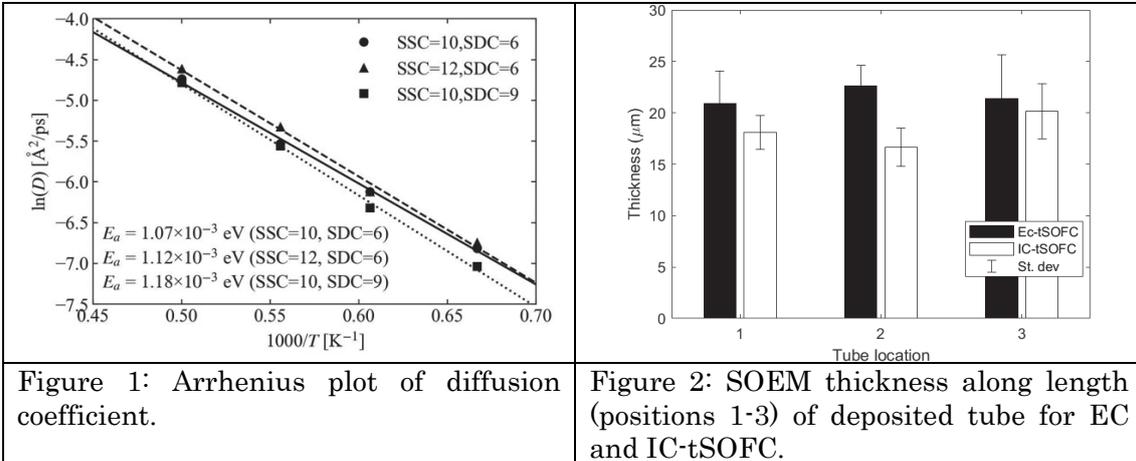
### 1. Purpose of the project

The purpose of this collaborative research is enhancing of the oxygen ion conductivity in solid oxide electrolyte membrane (SOEM). To achieve the purpose, we focus on nano-thin film membrane and nanocrystalline in the membrane. The objective is clarifying the correlation between the conductivity and grain boundaries in the membrane by experimental and molecular simulation techniques. Based on the clarified correlation, we suggest a new concept of SOEM which has high ion conductivity.

### 2. Details of program implement

Regarding the simulation analysis, we have constructed a dual-phase (DP) EM model, which consist of  $\text{SrSc}_{0.1}\text{Co}_{0.9}\text{O}_{3-\delta}$  (SSC) having the perovskite structure and  $\text{Sm}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_{2-\delta}$  (SDC) having the fluorite structure for molecular dynamics (MD) simulation. The diffusion coefficients of oxygen ion of constructed DPEM model were analyzed by changing the temperature and gain size (see Figure 1). In this figure, the number after ‘‘SSC’’ or ‘‘SDC’’ represents the number of unit-cells in the DPEM model. Moreover, we computed the activation energy for the diffusion in the DPEM based on the Arrhenius relation. As a result, we found that the diffusion coefficient varies with grain size: although the diffusion coefficient increases with increase of SSC’s grain size, the diffusion coefficient decreases with increase of SDC’s grain size. On the other hand, the activation energy increases with increase of grain size of both SSC and SDC.

Experimental work focused on developing efficient techniques to deposit uniform,



thin SOEMs for a wide variety of system geometries. The fill-coat method, used to deposit SOEMs within a tubular support was shown to produce a sufficiently thin film with less thickness variation than the standard dip-coat method used to deposit SOEMs on the outside of tubular supports (see Figure 2). Within solid oxide fuel cell (SOFC) applications, this method allows for the creation of internal cathode tubular SOFCs (IC-tSOFCs) which are well suited to be integrated into a variety of fuel containing environments including furnaces, boilers, and other combustion chambers.

### 3. Achievements

As for the simulation analysis, we clarified that how the diffusion coefficient of oxygen ion in DPEM changes with the grain sizes by using the constructed MD simulation model. Experimentally, ultrathin SOEMs were successfully deposited inside of tubular supports, eliminating current geometric limitations.

### 4. Summaries and future plans

Regarding the simulation analysis, we constructed MD simulation models of DPEM and clarified how the grain sizes of both SSC and SDC effects on the diffusion coefficient of oxygen ion in DPEM. For experimental progress, we deposited and characterized ultrathin SOEMs using novel manufacturing techniques which in the future will include wider material selection and multilayered films.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
[1] A.R. Hartwell, T.S. Welles, and J. Ahn “The anode supported internal cathode tubular solid oxide fuel cell: Novel production of a cell geometry for combined heat and power systems”, *International Journal of Hydrogen Energy*, (2021), 37429-37439, 46(75).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)  
[2] H. Nagashima, T. Ijichi, J. Ahn, and T. Tokumasu “Correlation between oxygen ion conductivity and GBs in solid oxide electrolyte membrane”, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, CRF-23, 2021.
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent) Not applicable  
  
(Award) Not applicable  
  
(Press release) Not applicable

Project code	J21I045
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

## Design and optimization of multidirectional wings of the aero-train under the effect of static aeroelasticity

Chenguang Lai\*†, Shigeru Obayashi\*\*††, Yuting Zhou\*\*\*, Guangtao Zhai\*, Qin Yu\* and Zhihua Huang\*

\* Chongqing Institute of Automobile, Chongqing University of Technology

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\* Institute of Chemical Engineering, Chongqing University of Technology

†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

Characteristics of the generation and propagation of aerodynamic noise are unique to conventional ground vehicles or aircraft due to the wing-in-ground (WIG) phenomenon. This study numerically examines the aeroacoustic characteristics of a multi-directional wing under the WIG effect with different values of clearance. The flow field was simulated by using a large eddy simulation for six groups of wings with different clearances and one group of wings in free space, at a freestream velocity of 0.3 Ma and an angle of attack of 5°. Acoustic simulations were carried out for each condition by using Möhring's analogy and the acoustic analysis was based on details of the flow field. To focus on the characteristics of the flow field of a multi-directional wing in the presence of the wing-in-ground effect and as well as those of the generation and propagation of aerodynamic noise caused by such flow, the annular wing of the aero-train was extracted and a separate computational domain was established for it. Its specific geometrical parameters are shown in Fig. 1 and Table 1.

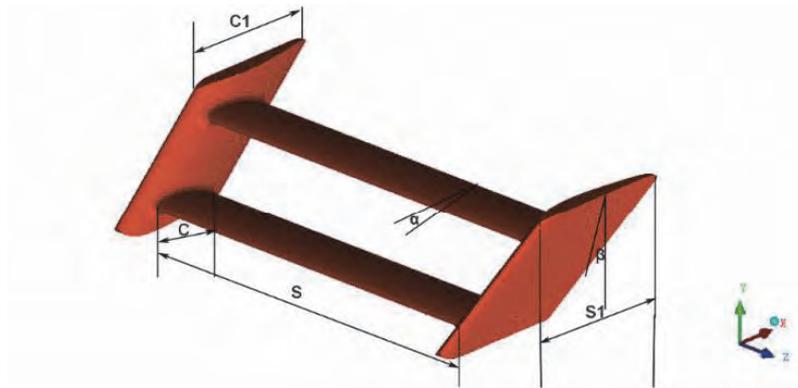


Fig. 1. The geometrical details of the multi-directional wing used for the next-generation aerotrain.

Table 1. Geometric parameters of multi-directional wing

Type	Symbol	Quantities
Main wing chord	C	100 mm
Main wing span	S	445 mm
Side wing chord	C1	170 mm
Side wing span	S1	195 mm
Angle of attack	$\alpha$	5°
Angle of inclination	$\beta$	5°

The LES turbulence model was used to capture fine details of the flow field of disturbance and its characteristics under the WIG effect, and the core region was refined such that the number of meshes in it accounted for 79% of the total number of meshes.

### 3. Achievements

A multi-vortex system was generated at the trailing edge of the wing when the clearance was lower than 0.2 C. It consisted of an oscillating attached vortex that expanded and shrank with continuous changes in energy, and two periodically shedding vortices were formed that generated a strong wall-bound vortex street downstream of the wing after shedding (Fig. 2 and 3). An analytical approach was used to analyze different dominant frequencies in each region of the sound field.

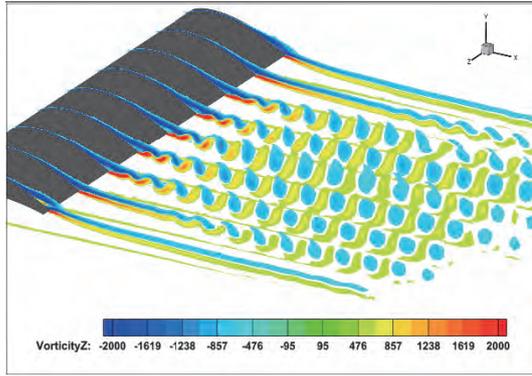


Fig. 2: Vorticity contours at different spanwise locations from -2000 (blue) to 2000 (red).

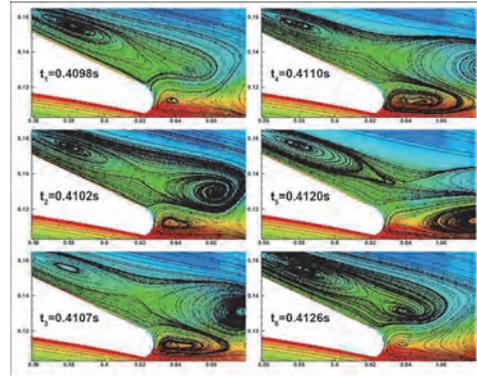


Fig. 3: Periodic formation, energy transfer, and shedding of the multi-vortex-system.

A relatively high-frequency noise tended to propagate to the upstream region rather than downstream, especially when  $H/C < 0.4$ . As the ground clearance gradually increased, the dominant region of low-frequency noise (approximately 80 Hz) continued to expand from downstream to almost the entire space. The multi-directional wing itself led to the concentration of acoustic energy, which caused signals with shorter wavelengths to be concentrated during upward propagation.

#### 4. Summaries and future plans

different intensities of the WIG effect led to remarkable differences in the characteristic frequency of aerodynamic noise induced by the multi-directional wing. The characteristic frequencies of aerodynamic noise of the multi-directional wing with a low clearance (clearance  $\leq 0.2 C$ ) were mainly caused by the wall-bound vortex street while those at a high clearance (clearance  $\geq 0.4 C$ ) were mainly caused by vortices on the wingtip.

The wall-bound vortex street was generated when the ground clearance was too low, leading to strong aerodynamic noise. Future research needs to consider control of the area of flow separation as well as the suppression of the WBVS in case of low clearance in order to control intense aerodynamic noise. The advantage of the high lift-to-drag ratio due to the WIG effect was achieved here through high pressure in the GET but this also caused intense noise. The two need to be balanced when designing vehicles that use the WIG effect.

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] LAI Chenguang, FU Hang, LING Zhiwei, et al. Large Eddy Simulation of Plasma Actuation to Control Flow Around a Cylinder [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2021, 35 (8): 81 – 89, doi: 10. 3969/j. issn. 1674-8425 (z). 2021. 08. 011.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [2] C. Lai, Z. Huang, S. Feng, Y. Li, Q. Yu, and S. Obayashi: Aerodynamic Drag Optimization of CAERI Aero Model based on P\_B Experimental Design, *Proceedings*

*of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai (2021), CRF 61.*

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

課題番号	J21I047
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4 ~2022.3
継続年数	1 年目 (発展)

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\*†, 藤田 昂志\*, 四方 一真\*

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°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

これまでの公募共同研究において、感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) 計測技術の一つとして、モーションキャプチャ法により遷音速自由飛行する球表面の圧力分布を可視化した。ただし、その圧力分布画像は SN 比が十分とは言えず課題が残った。一つは 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) 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。この実現のために、今年度は、飛行中のあらゆる姿勢に対応できるリファレンス画像自動取得システムの開発と励起光源の空間的な強度分布をシミュレーションし、計測結果の不確かさを算出するソフトウェアの開発を行うこととした。

### 3. 研究目標の達成状況

図 1 にリファレンス画像自動取得システムの外観を示す。また図 2 に円柱模型を Yaw・Pitch・Roll に回転させた場合のリファレンス画像の一例を示す。そして、実際に模型を遷音速自由飛行させた場合に取得した画像群を図 3 に示す。リファレンス画像は 1000 枚程度用意したが、完全にラン画像とリファレンス画像が一致する結果はない。そのため、ラン画像と比較的姿勢の近いリファレンス画像を選択し、模型に付けてあるマーカーを利用し、画像変換を行った。その得ら

れた画像を用いて、圧力分布画像を算出した。露光時間が  $2 \mu\text{s}$  の圧力分布画像は SN 比 7 程度の結果となっているが、それ以外の結果に関しては SN 比 10 以上の圧力分布画像を取得することに成功した。ただし、SN 比の定義は模型側面の中央周辺の平均発光強度とその標準偏差の比とする。



図 1. リファレンス画像自動取得システム

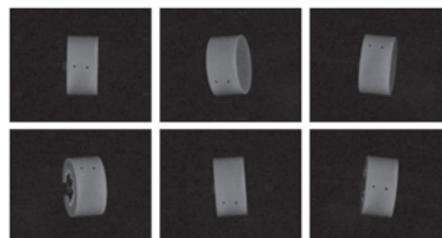


図 2. 様々な姿勢におけるリファレンス画像

Exposure time	$2 \mu\text{s}$	$3 \mu\text{s}$	$5 \mu\text{s}$
Picture blur	0.8 mm (3 pix)	1.2 mm (4 pix)	2.0 mm (7 pix)
Raw run image			
Misalignment between run & reference			
Pressure distribution image			

図 3. 自由飛行する円柱の圧力分布計測結果

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、遷音速で飛行する大気圏再突入カプセル表面の圧力分布を計測する技術の開発を行った。特にこれまで SN 比が不十分だった問題に対し、本研究では革新的な計測技術を提案した。そして、リファレンス画像自動取得システムを導入し、実際に円柱模型の表面圧力分布計測を行った結果、SN 比の良い圧力分布画像の取得に成功した。

ただし現状では、取得した圧力分布における不確かさが評価できていない。今後は、励起光源の空間的な強度分布をシミュレーションし、それらが計測の不確かさに与える影響を評価する。また、本研究で開発したリファレンス画像自動取得システムに関しても、回転だけでなく平行移動も可動なシステムへ改善し、より広範囲な条件でリファレンス画像を取得する。そして、深層学習などの画像解析技術を用いることにより、ラン画像とリファレンス画像のマッチング精度を向上させることとする。

## 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] 四方一真，田中直樹，高橋幸一，小川俊広，大谷清伸，藤田昂志，永井大樹，山田和彦：遷音速自由飛行する次世代再突入カプセルの流れ場と飛行特性，第 53 回流体力学講演会，2021 年 6 月
- [2] 四方一真，高橋幸一，小川俊広，大谷清伸，藤田昂志，永井大樹，山田和彦：自由飛行する再突入カプセルの空力特性とその流れ場，第 65 回宇宙科学技術連合講演会論文集 2021 年 11 月
- [3] 細野陽太，四方一真，小川俊広，大谷清伸，藤田昂志，永井大樹，山田和彦：バリステティックレンジを用いた深宇宙探査用サンプルリターンカプセルの空力特性とその流れ場，令和 3 年度宇宙航行の力学シンポジウム，2021 年 12 月.
- [4] 四方一真，田中直樹，高橋幸一，小川俊広，大谷清伸，藤田昂志，永井大樹，山田和彦：遷音速で自由飛行する物体表面の革新的圧力分布計測技術の研究，日本機械学会東北支部 第 57 回総会・講演会，2022 年 3 月

### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）

- [1] 四方一真，第 53 回流体力学講演会，日本航空宇宙学会優秀講演賞，“遷音速自由飛行する次世代再突入 カプセルの流れ場と飛行特性”，2021 年 8 月 3 日.
- [2] 四方一真，第 57 期東北区支部講演会，日本機械学会東北支部独創研究学生賞，“遷音速で自由飛行する物体表面の革新的圧力分布計測技術の研究”2022 年 3 月 11 日.

（マスコミ発表）なし

課題番号	J21I048
区分	一般共同研究
課題分野	人・物質マルチスケールモビリティ分野
研究期間	2021.4～2022.3
継続年数	3年目

**データ同化による宇宙機熱システムの高精度推定手法の確立**  
**Establishment of high-accuracy analysis method of spacecraft thermal system**  
**using data assimilation**

永井 大樹\*†  
田中 寛人\*  
三坂 孝志\*\*††

\*東北大学流体科学研究所, \*\*産業技術総合研究所インダストリアル CPS 研究センター

†申請者, ††所外対応研究者

### 1. 研究目的

本研究は熱解析にデータ同化技術を適用し、その解析精度を飛躍的に向上させるものである。宇宙機は運用に際して厳しい熱環境に晒されるため、搭載している全ての機器がその許容範囲内で運用される必要がある。さらに姿勢制御や搭載機器の ON/OFF により生じる詳細な温度変化が科学機器の観測精度に及ぼす影響や異常診断の観点から、熱解析による詳細な温度分布の予測が必要となる。しかし、解析モデルには接触熱コンダクタンス等の不確定パラメータが多数含まれており、宇宙機システム全体の伝熱状態を完璧にモデル化することは極めて難しい。さらに、深宇宙探査機等ではテレメトリで得られる機体の温度情報が極めて少ないことが問題となる。

以上のような制約の中で宇宙機の状態を推定するために、本研究ではデータ同化をはじめとするデータ駆動科学を熱解析に適用し、限られた温度データから機体の伝熱状態を推定する手法を確立することを研究の目的とする。

### 2. 研究成果の内容

昨年度までは温度データから定量的に熱コンダクタンス等のモデル内パラメータを推定するために、データ同化や人工ニューラル(Artificial Neural Network, ANN)を用いてシステムの温度データからモデル内部の伝熱パラメータを推定することに成功している。ただし、温度からモデル内の熱コンダクタンスを推定できることが示されたものの、推定精度に多大な影響を及ぼす温度センサ配置については十分に議論されていない。

そこで、今年度は ANN による熱コンダクタンス推定精度と観測点配置の関係性を調査する。

### 3. 研究目標の達成状況

本研究で用いる疑似的な小型衛星の熱数学モデルを図 1 に示す。衛星は 1 辺が 50cm のパネルに覆われており、内部に発熱機器を持つデッキが 3 枚搭載されている。デッキは+Y パネルと+Z パネルに熱結合を持っており、デッキでの発熱はパネルを通じて宇宙空間に放熱される。ここで、赤色で示された伝熱経路 Path1～4 の熱コンダクタンスを推定対象とする。

本研究では ANN を用いて温度と熱コンダクタンスの関係を模擬し、温度データから熱コンダクタンスを推定するアルゴリズムを用いる。その際に、システムに線形的な微小擾乱を仮定し、

その発展モードを調べることで複数の推定パラメータの影響を調査することとした。図 2 に熱コンダクタンス推定の流れを示す。

ANN を用いて 4 点の温度観測から Path 1~4 の熱コンダクタンスを推定した結果を示す。図 3 はその一例であり、Deck 3 つに加えて+Y Panel の温度を用いた場合の推定結果である。このように 126 組の全センサ配置を用いて推定を行い、その際の推定誤差の平均値とセンサ配置の影響度をプロットしたものを図 4 に示す。これより、センサ配置の影響度が大きくなるにつれて推定誤差が小さくなることが分かった。

#### 4. まとめと今後の課題

本研究は ANN を用いた宇宙機熱システムの状態推定を目的とし、微小擾乱モードによるセンサ配置の評価を行った。その結果、擾乱モードを用いた事前評価により、予め推定への影響度が大きくなるようにセンサを配置することで推定精度を改善できることが分かった。一方で、擾乱モードのみでは推定精度を完全に予測することは難しい。従って、熱システムの状態推定に最適なセンサ配置を決定するために、今後はセンサの組合せを加味した評価方法が求められる。

6/11

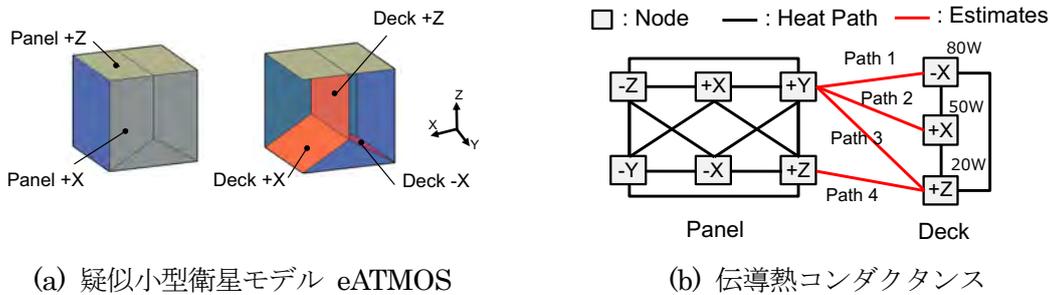


図 1 熱数学モデル

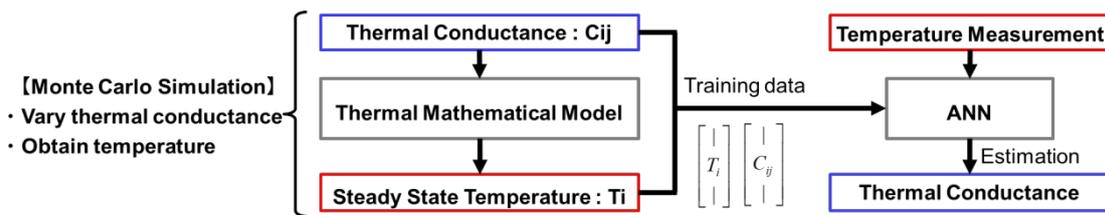


図 2 熱コンダクタンス推定結果

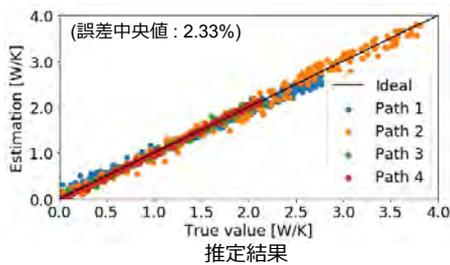


図 3 熱コンダクタンスを推定結果

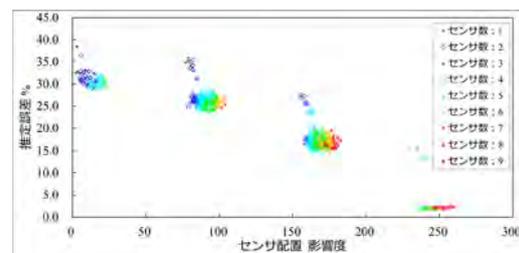


図 4 推定誤差の平均値とセンサ配置の影響度

## 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] 田中寛人，三坂孝志，藤田昂志，永井大樹，「アンサンブルカルマンフィルタを基盤とした新たな伝熱状態推定手法の提案」，日本機械学会論文集，日本機械学会論文集 87(898) 21-00010 2021.

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] Hiroto Tanaka, Koji Fujita, Hiroki Nagai: Development of an Advanced Thermal Mathematical Model Construction Method for Spacecraft using Artificial Neural Network, *50th International Conference on Environmental Systems*, Online, (2021), ICES-2021-361.
- [3] Hiroto Tanaka, Hiroki Nagai: Thermal state estimation via artificial neural network for spacecraft systems, *18<sup>th</sup> International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2021), OS20-62.
- [4] Hiroki Nagai, Hiroto Tanaka, Takashi Misaka: Establishment of High-accuracy Analysis Method of Spacecraft Thermal System Using Data Assimilation (3), *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-36.
- [5] 田中寛人，永井大樹，藤田昂志，人工ニューラルネットワークを用いた熱システム状態推定におけるセンサ配置評価，日本機械学会 2021 年度年次大会，(2021.9).

### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project code	J21I049
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

## Active Control of High-speed Boundary Layers

Adrian Sescu\*†, Mohammed Afsar\*\*, Shanti Bhushan\*\*\*, Yuji Hattori\*\*\*\*††, Makoto Hirota\*\*\*\*

\*Department of Aerospace Engineering, Mississippi State University,

\*\*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Strathclyde,

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Mississippi State University,

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

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The main objectives of this project are to: i) study boundary layer streak initiation and development in HBLs (both along at and concave surfaces); ii) establish the framework of active control in high-speed boundary layers on at and curved surfaces; iii) investigate theoretically and numerically the viability of active control via absorptive coatings, wall cooling/heating, or gas injection in HBLs.

### 2. Details of program implement

Progress has been made on the derivation and testing of the adjoint boundary region equations. We studied the effect of the wall transpiration location along the streamwise direction: figure 1 shows results from the optimal control applied to a high-speed boundary layer at Mach numbers 4, 5 and 6. It shows that more energy reduction can be achieved if the wall transpiration starts more upstream, and this may be explained considering the amplitude of disturbances which is smaller in the upstream.

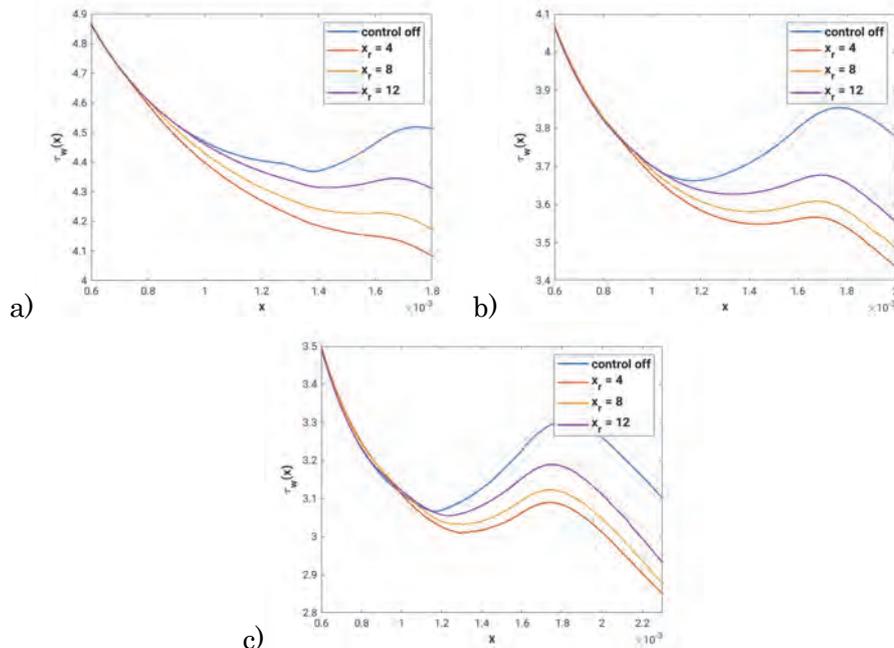


Figure 1: The effect of wall transpiration location on the vortex energy: a) Ma=4; b)

M=5; c) M=6.

In figure 2, contours of the transpiration velocity at the wall reveals variations of this velocity in the spanwise direction, according to which the low- and high-speed streaks in the boundary layer respond.

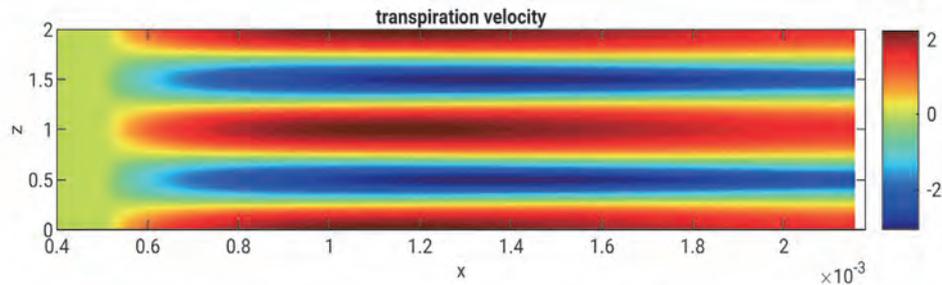


Figure 2: Transpiration velocity distribution at the wall.

### 3. Achievements

An optimal control approach based on the adjoint equations derived in the previous year has been tested for different Mach numbers, in supersonic and hypersonic regimes. It was shown that the control algorithm was able to reduce the energy of the vortices and the wall shear stresses for all Mach numbers. However, the reduction was not as significant as in the incompressible regime, and this can be explained by the compressibility effects (high variations of density and temperature). The effect of wall transpiration and wall cooling on streamwise vortices and the associated streaks was further investigated by extending the parameter space. It was shown that BRE can be an efficient and accurate model able to predict streamwise vortices that evolve in high-speed boundary layers.

### 4. Summaries and future plans

While the project reached the third year, we plan to extend our research to cover unsteady boundary layer flows, and extend the analysis to more realistic test cases, such as the flow over a wing or a blade of a turbomachinery. We also plan to incorporate other forms of actuation in our control algorithm, such as wall heating, or plasma actuation.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] O. Es-Sahli, A. Sescu, M.Z. Afsar, Y. Hattori, Y. (2021) Investigation of Görtler vortices in high-speed boundary layers via an efficient numerical solution to the non-linear boundary region equations, *Theoretical and Computational Fluids Dynamics*, <https://doi.org/10.1007/s00162-021-00576-w>.
  - [2] O. Es-Sahli, A. Sescu, M.Z. Afsar, Y. Hattori & M. Hirota (2021) A compressible boundary layer optimal control approach using nonlinear boundary region equations, *AIAA Paper 2021-2945*, *AIAA Aviation Forum*, Virtual Event, [doi.org/10.2514/6.2021-0853](https://doi.org/10.2514/6.2021-0853).
  - [3] Blake, J., Sescu, A., Thompson, D. and Hattori, Y. (2022) A Coupled LES-Synthetic Turbulence Method for Jet Noise Prediction, *Aerospace*.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [4] O. Es-Sahli, A. Sescu, M.Z. Afsar, Y. Hattori & M. Hirota (2021) Control of Gortler vortices in high-speed boundary layer flows using nonlinear boundary region equations, *Eighteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan (ICFD2021).

Project code	J21I050
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

## Instability and Wave Interactions in Helical Vortices

Yuji Hattori\*†, Ivan Delbende\*\*††  
Maurice Rossi\*\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*LIMSI

\*\*\*Universite de Paris VI

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The development of wind turbine farms raises the problem of wake/turbine interaction and encourages in-depth studies on the vortices that develop behind rotors. These vortices produced at the blade tips and roots have a helical shape and develop instabilities under the influence of the air-stream fluctuations. Theoretical studies predict that helical vortices are prone to long-wave instabilities and also to two types of short-wavelength instabilities that affect vortex cores: the elliptic instability which is a resonance between two waves and the elliptical deformation of streamlines (Kerswell 2002), and the curvature instability which involves two waves and the deformation induced by vortex curvature (Fukumoto & Hattori 2005). This project aims at simulating and understanding the linear and nonlinear growth of both types of instabilities in idealized helical vortex configurations, since they probably cause the eventual disintegration of the vortex structure in actual rotor wakes, and thus favour wake recovery.

### 2. Details of program implement

#### 2.1 Time evolution of inviscid invariants and other basic quantities

In order to evaluate the parameters characterizing helical vortices accurately, time evolution of inviscid invariants, which include circulation, momentum and angular momentum, has been investigated in detail. They are calculated using the formulas derived by Selcuk et al. (2017). Figure 1 shows time evolution of momentum and angular momentum; each of them are evaluated by two equations of different expressions and the results coincide within small errors. It confirms the high accuracy of the numerical method.

#### 2.2 Comparison of mode structures between helical and three-dimensional simulations

At IFS, direct numerical simulation has been performed by solving the three-dimensional Navier-Stokes equations in a cylindrical coordinate system, aiming at nonlinear time evolution of disturbed helical vortices. At LIMSI, on the other hand, helical symmetry has been assumed to reduce the numerical cost from three dimensions to two dimensions; this method can be applied to base flows and linear stability analysis. Comparison between the results obtained at the two sides has been performed in detail. It was confirmed that the mode structures and the growth rate obtained at the two sides are in good agreement.

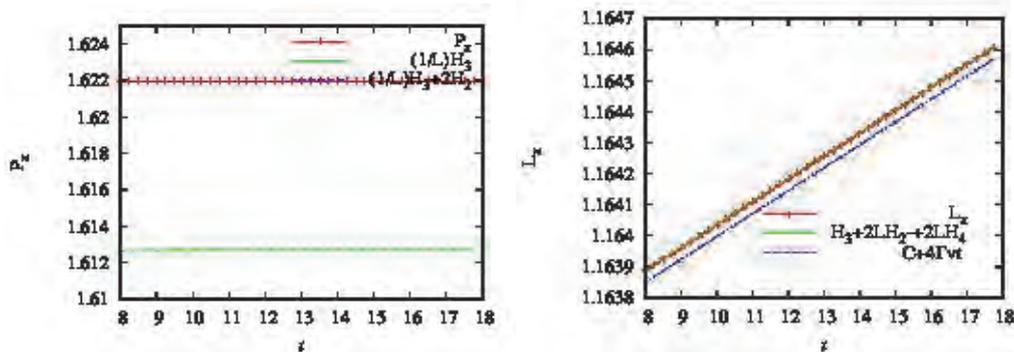


Figure 1 : Time evolution of momentum and angular momentum.

### 2.3 Symmetry breaking by torsion

One of the most important differences between the vortex rings and the helical vortices is that the helical vortices are subjected to torsion in addition to curvature of the vortex tubes. Torsion breaks symmetry between left-handed and right-handed helical vortices, or equivalently, positive and negative axial flows. The growth rates and the wavenumber ranges of the unstable modes are different between positive and negative axial flows. This is confirmed by numerical stability analysis; it will be compared to theoretical prediction in the next project.

### 3. Achievements

Our final goal is to explore mechanism of turbulent transition of helical vortices. The results should contribute to prediction of the wake flow in the wind farm and establishing a method for real-time prediction of the electric power and optimization of the wind rotor placement. This year we performed DNS of helical vortices and confirmed the accuracy of the numerical methods both at IFS and at LIMSI. The project has achieved this year's objectives.

### 4. Summaries and future plans

We have performed direct numerical simulation of helical vortices. Some fundamental properties of the helical vortices have been checked to ensure the accuracy of the present method. Symmetry breaking due to torsion was shown to occur.

The future plans include:

- To clarify how the nonlinear dynamics leading to turbulent transition depend on the parameters of the base flow and the types of disturbances;
- To explore the properties of the flows after turbulent transition.

### 5. Research results

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

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

[1] Yuji Hattori, Ivan Delbende, Maurice Rossi, "Instability and Wave Interactions in Helical Vortices," *21st International Symposium on Advanced Fluid Information* (2021).

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

Project code	J21I051
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## Numerical Simulation of a Thermal Plasma Reactor for the Wastes to Energy

Sooseok Choi\*†, Hidemasa Takana\*\*††

\*Dept. Nuclear and Energy Eng., Jeju National University, Republic of Korea

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The energy consumption and the waste generation are increasing at the same time with the development of human beings. Although wastes such as plastics causes the environmental problem, they can be used as the energy source with a proper treatment. In the present work, the numerical analysis on the thermal plasma system is conducted to utilized wastes as the alternative fuel. The integrated supercomputing system at the IFS is used for an efficient numerical analysis to find out the optimal operating and design condition for the plasma system.

In the 3rd year, the comparison between simulation results in IFS and experimental results in Jeju will be compared to examine the waste treat mechanism in thermal plasma.

### 2. Details of program implement

In the present work, we carried out a numerical simulation for the multiple DC thermal torch system, which improves the treatment capacity of alternative waste fuels by using the magnetohydrodynamics (MHD) and computational fluid dynamics (CFD) code. Through the analysis of the thermal flow characteristics, we optimized the design and operating conditions of the combustion system using alternative waste plastics.

The combustion with multiple thermal plasma jets consists of combustion air and waste inlets, sixteen DC plasma torches, and a system outlet connected to the cement production process, as shown in Figure 1. DC plasma torches are injected into the space (eight torches on each side at 150 mm intervals) where the waste is burned on both sides. The numerical conditions are summarized in Table 1. Nitrogen was used as the plasma forming gas of the plasma at a flow rate of 110 L/min. We numerically analyzed the thermal flow inside the chamber by adjusting the air temperature, torch injection angle, and chamber width. The calculated arc voltage at a fixed current of 110 A was 216 V.

In the numerical results, the temperature contour and profiles at the center of the chamber in accordance with its width adjustment was indicated in Figure 2. In a chamber of 400 mm width, the maximum and minimum temperatures were approximately 1,300 and 800 K, respectively, whereas for a 500 mm width, the maximum temperature was 900 K. It was confirmed that an increase in the chamber width over 500 mm did not uniformly form a relatively high temperature over 800 K at its center. However, for a 400 mm width, a temperature of 800 K was widely distributed to the chamber exit.

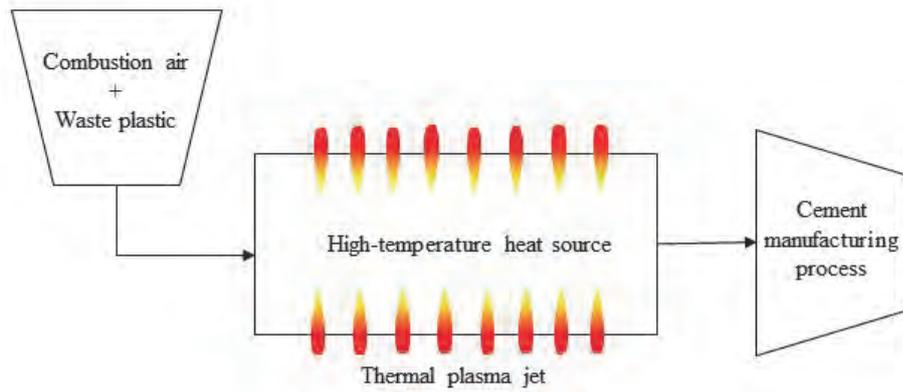


Figure 1 : Schematic of the combustion system with thermal plasma jets for the cement manufacturing process.

Table 1 : Numerical conditions for the waste combustion chamber with multiple DC plasma torches.

Gas flow rate [L/min]	N <sub>2</sub> 110
Chamber width [mm]	400, 500
Torch injection angle [°]	20, 30
Combustion air temperature [K]	300, 1000
Current [A]	110
Calculated arc voltage [V]	216

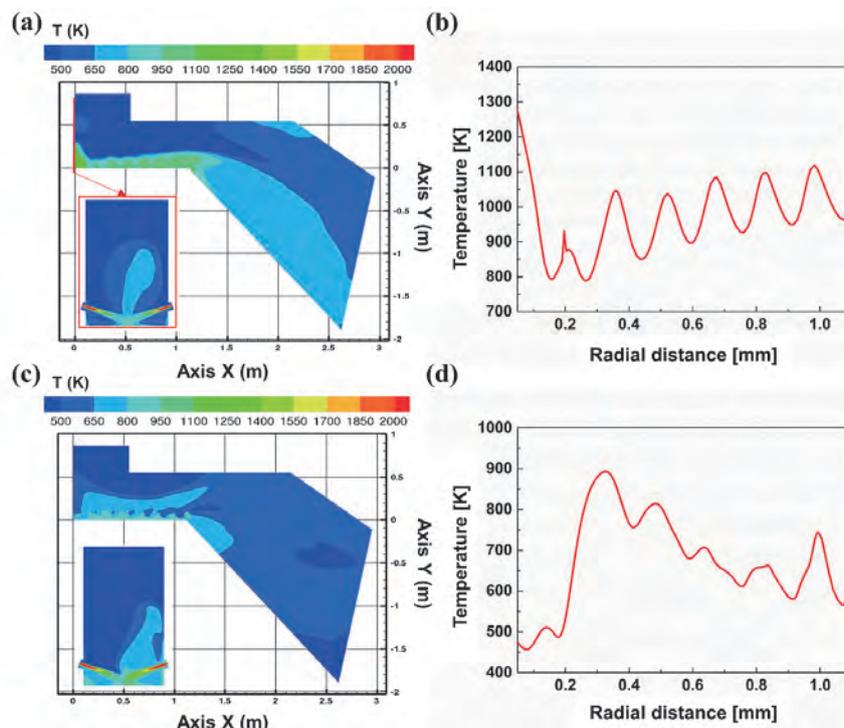


Figure 2 : Numerical analysis of the chamber region for the condition fixed at 20° and 300 K: (a, b) temperature contour and profile for a 400 mm width and (c, d) temperature contour and profile for a 500 mm width.

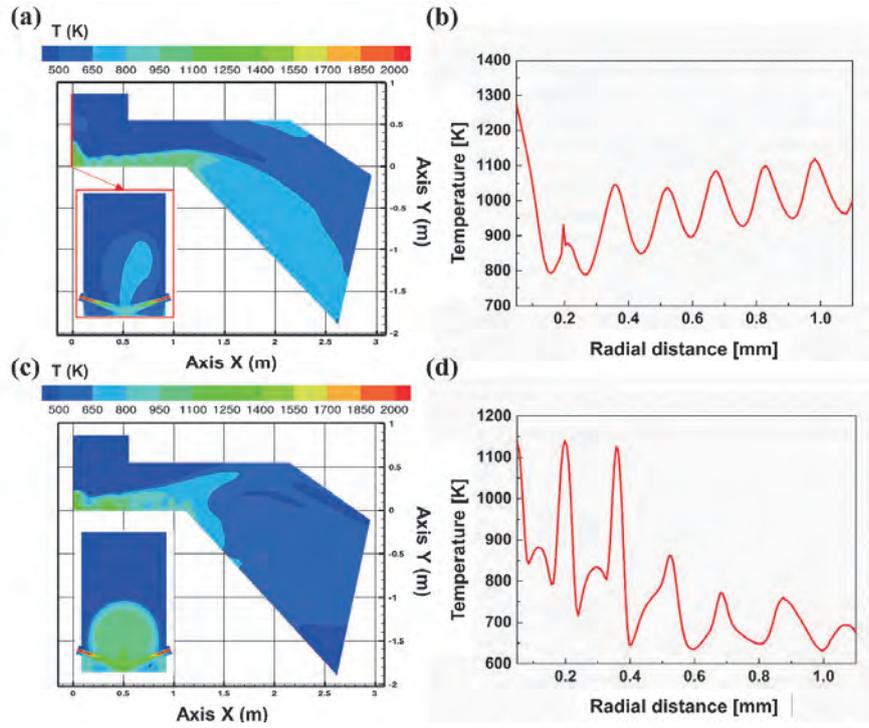


Figure 3 : Numerical analysis results of the chamber region for the condition fixed at 400 mm and 300 K: (a, b) temperature contour and profile for a 20° injection angle and (c, d) temperature contour and profile for a 30° injection angle.

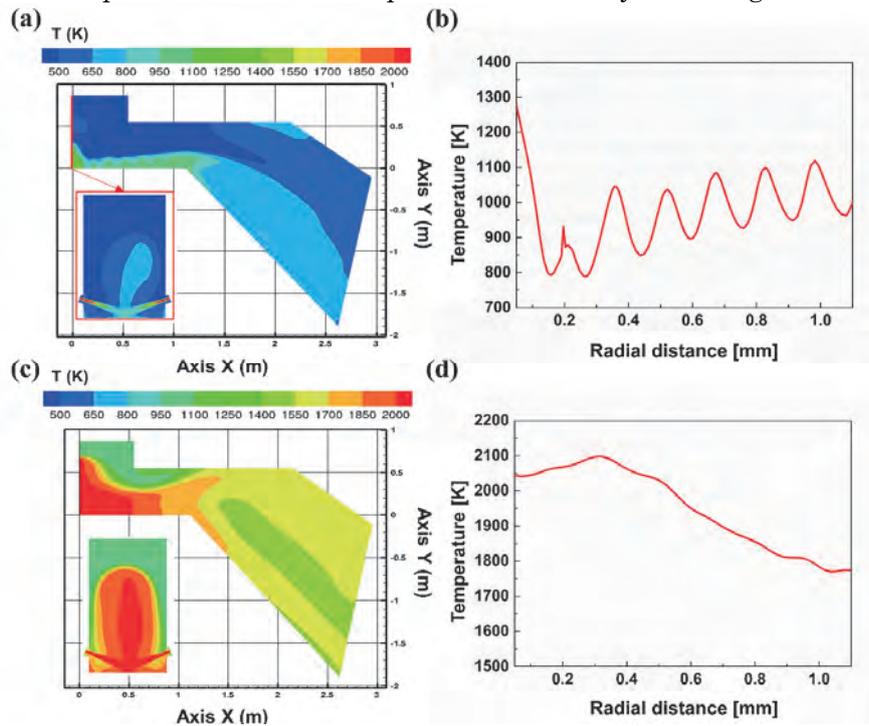


Figure 4 : Numerical analysis results of the chamber region for the condition fixed at 400 mm and 20° : (a, b) temperature contour and profile for a 300 K combustion air temperature and (c, d) temperature contour and profile for a 1,000 K combustion air temperature

The injection angle was 20° and 30° at fixed conditions of a 400 mm chamber width, and 300 K combustion air temperature, as shown in Figure 3. It was identified that a

relatively low temperature from 600–1,100 K was formed for a 30° injection angle of the plasma torch, and the temperature variation was significant at the position of torch injection.

Figure 4 shows the simulation results according to the changing temperature of combustion air, and this simulation was performed at fixed conditions for a 400 mm chamber width and a 20° injection angle. The increase in combustion air temperature causes the improvement in temperature at the center of the chamber. It was revealed that the increase in combustion air temperature forms a uniform temperature distribution, which provides a conducive combustion environment for alternative waste fuels.

### 3. Achievements

The results of the second-year collaborative research were presented at the 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2021) on Oct. 27, 2021.

And a research paper with these results was published in *Applied Science and Convergence Technology* 30(6), 172-175, 2021.

We got the best poster award from the 62nd Winter Annual Conference of the Korean Vacuum Society in the domestic conference.

### 4. Summaries and future plans

The thermal flow characteristics inside the waste combustion chamber were numerically analyzed in accordance with adjusting the chamber width, injection angle of the torch, and combustion air temperature. As a result, the temperature in the range of 1,600–2,200 K was widely distributed at the center of the chamber. The optimized conditions are as follows: 400 mm chamber width, 20° injection angle, and 1,000 K combustion air temperature. Therefore, the comparison between simulation results in IFS and experimental results in Jeju will be compared to examine the waste treat mechanism in thermal plasma.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] H. Y. Ko, D. H. Shin, J. H. Oh, H. Kang, D. E. Choi, S. Choi: Numerical simulation of thermal flow characteristics in plasma reactor for rotten citrus fruits drying, *Applied Science and Convergence Technology*, 30(3), 70-73 (4 pages), doi:/10.5757/ASCT.2021.30.3.70.
  - [2] J. H. Oh, S. H. Gwon, T. H. Kim, J. Y. Sun, S. Choi: Synthesis of titanium boride nanoparticles and fabrication of flexible material for radiation shielding, *Current Applied Physics*, 31, 151-157 (7 pages), doi:/10.1016/j.cap.2021.08.009.
  - [3] H. Kang, J. H. Oh, E. Choi, H. Takana, S. Choi: Numerical analysis of thermal flow characteristics inside waste combustion chamber with multiple thermal plasma jets, *Applied Science Convergence Technology*, 31(6), 172-175 (4 pages), doi:/10.5757/ASCT.2021.30.6.172.
  - [4] J. H. Oh, M. Kim, S. H. Hong, T. H. Kim, S. Choi: Facile synthesis of cubic boron nitride nanoparticles from amorphous boron by triple thermal plasma jets at atmospheric pressure, *Advanced Powder Technology*, 33, 103400 (8 pages), doi:/10.1016/j.appt.2021.103400.
  - [5] J. H. Oh, H. Y. Ko, S. Yang, S. Choi: Thermal plasma synthesis of metal-boride nanoparticles as a functional material for gamma-ray shielding, *Applied Science Convergence Technology*, 31(1), 15-18 (4 pages), doi:/0.5757/ASCT.2022.31.1.15.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

- [6] J. H. Oh, Y. H. Lee, H. Kang, T. H. Kim, H. Takana, S. Choi: Numerical simulation and optical emission spectrometry for multiple thermal plasma jet, *Proceedings of Eighteenth International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, OS5-6, pp.261–262.
- [7] H. Kang, J. H. Oh, D. Choi, Hidemasa Takana, S. Choi: Numerical analysis on plasma torches and thermal plasma reactor for waste treatment, *Proceedings of Eighteenth International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, CRF-7.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award)

Best Poster Award, “Numerical study for thermal flow inside waste combustion reactor using multiple thermal plasma”, February 17, 2022, The Korean Vacuum Society.

(Press release) Not applicable.

課題番号	J21I052
区分	一般公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	1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解

Comprehensive study on two-phase thermo-fluid phenomena in a cryogenic loop heat pipe

小田切 公秀\*†, 永井 大樹\*\*††

小川 博之\*, 常 新雨\*\*

\*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

†申請者, ††所内対応教員

#### 1. 研究目的

将来の宇宙科学衛星および深宇宙探査機において、観測機器の高性能化や低リソース環境での設計成立要求の高まりを背景に、より高効率な極低温熱制御デバイスが求められている。本研究では、蒸発と凝縮を利用することで高効率に熱輸送が可能な極低温ループヒートパイプ(Cryogenic Loop Heat Pipe, CLHP)に着目する。CLHPは無電力で長距離熱輸送が可能という宇宙機にとって魅力的な特長を有する。しかし、(1)起動時の沸騰現象、(2)蒸発部および凝縮部における気液界面挙動・熱伝達様式の理解が不十分であることに起因し、設計理論が未確立であることが課題である。そこで本研究では、CLHPの蒸発部および凝縮部の流動可視化と数値解析によって、内部の気液二相熱流動現象を明らかにすることを目的とする。最終的には宇宙機応用に必要不可欠なCLHP設計理論を確立することを目指す。

#### 2. 研究成果の内容

今年度は、まず昨年度に構築した熱流動数値計算モデルに基づいてCLHPプロトタイプを設計・製作した。図1にCLHPの蒸発器および補償室(CC)、装置外観図を示す。本CLHPは熱輸送距離が2.0mあり、蒸発器が凝縮器よりも低いボトムヒート姿勢にて動作可能なセットアップである。蒸発器内部の多孔質ウィックには細孔半径1.0 $\mu\text{m}$ のステンレス多孔質体を用いた。流体科学研究所永井研究室所有の小型極低温熱真空試験チャンバを用いて初期動作試験を実施した。図1に温度プロファイルを示す。実験の結果、起動実証に成功し、輸送距離2.0m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、プロトタイプの知見に基づいて、実機応用を想定したマルチエバポレータ型CLHPの設計・構築に取り組んだ。

#### 3. 研究目標の達成状況

今年度は、CLHPプロトタイプの動作実証に成功し、輸送距離2.0mの条件において、最大6.5 Wの熱輸送性能を達成した。熱流動モデルでの予測性能は最大17.5 Wであり、大きな差異を有する結果となった一方で、その要因が実験装置の断熱条件と、凝縮部における接触熱コンダクタンス条件に起因することを明らかにできた。起動実証に成功したこと、モデルとの差異の要因の分析が進んでいることから、本研究期間における目標はおおむね達成できたと考えられる。

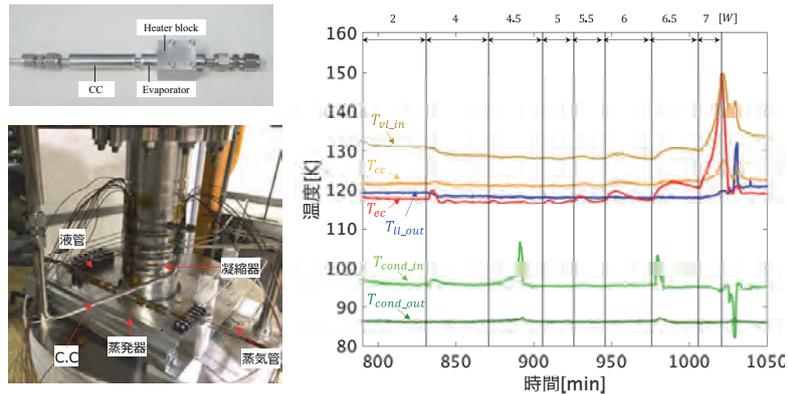


図1：CLHP プロトタイプ外観および動作実証試験温度プロファイル

#### 4. まとめと今後の課題

今年度の研究でCLHP プロトタイプの動作実証に成功し、さらに試験条件の課題を抽出できた。今後は抽出課題を解決すると同時に、本CLHPの知見を活かしたマルチエバポレータ型CLHPの動作実証と数値計算モデル検証、凝縮器および補償室内部の気液二相熱流動の可視観察装置の構築に取り組む。

#### 5. 研究成果

##### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

- [1] X. Chang, T. Adachi, K. Odagiri, H. Ogawa, and H. Nagai: Development of cryogenic loop heat pipe for deep space mission, *Proceedings of 50<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems*, Online, (2021)

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] 常新雨, 小田切公秀, 安達拓矢, 小川博之, 永井大樹: 宇宙機用極低温ループヒートパイプの設計試作とその評価, 第58回日本伝熱シンポジウム, オンライン, (2021)
- [3] 小田切公秀, 常新雨, 永井大樹, 小川博之: 宇宙用マルチエバポレータ型極低温ループヒートパイプの設計検討, 令和3年度宇宙航行の力学シンポジウム, オンライン, (2021)
- [4] 横内岳史, 常新雨, 小田切公秀, 長野方星, 小川博之, 永井大樹: 重力アシスト型極低温ループヒートパイプの起動試験, 令和3年度宇宙航行の力学シンポジウム, オンライン, (2021)
- [5] 秋月祐樹, 平田大, 小田切公秀, 小川博之: 極低温キャピラリーポンプループの概念検討, 令和3年度宇宙航行の力学シンポジウム, オンライン, (2021)
- [6] 小田切公秀, 西城大, 秋月祐樹, 澤田健一郎, 金城富宏, 篠崎慶亮, 小川博之, 上野藍, 長野方星, 常新雨, 永井大樹: 将来の宇宙科学ミッションに向けた極低温熱制御デバイスの研究, 第22回宇宙科学シンポジウム, オンライン, (2022)
- [7] K. Odagiri, M. Saijo, K. Sawada, T. Kinjo, Y. Akizuki, K. Shinozaki, H. Ogawa, H. Nagano, X. Chang, and H. Nagai: Development of a thermal-vacuum chamber for study on cryogenic heat transfer device, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2021)

##### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

- （特許）蒸発器用ウィック及び蒸発器用ウィックの製造方法, 小田切公秀, 小川博之, 常新雨, 永井大樹, 長野方星, 2021.11.9, 出願(特願2021-182503)
- （受賞）なし,（マスコミ発表）なし

Project code	J21I054
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## Numerical study on transonic flow characteristics over return capsules

Bok Jik Lee\*†, Hiroki Nagai\*\*††

Michiko Furudate\*\*\*, Seoem Han\*\*\*\*, Yoonsik Park\*\*\*\*, Kazuma Yomo\*\*\*\*\*

\*Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\*Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

\*\*\*\*Department of Aerospace Engineering, Seoul National University

\*\*\*\*\*Dept. of Aerospace Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Several sphere-cone capsule bodies for sample return have been used for the re-entry to earth from space. One of the problems is that these capsules undergo oscillation in the transonic regime, which may cause the failure of the return operation. In this project, the transient flow characteristics over these capsules are investigated using numerical simulations to shed light on the underlying mechanism of the oscillation.

### 2. Details of program implement

To analyze the transonic flow characteristics over return capsules, three-dimensional simulations over the Hayabusa capsule 3 mm model at Mach 1.05 were conducted. To describe turbulence, the Spalart-Allmaras DES model was used. To solve the compressible Navier-Stokes equations, an open-source density-based compressible flow solver was used. The characteristics of the flow field around the capsule were investigated using instantaneous flow fields.

Simulated flow fields showed that the recompression shock wave moved back and forth at a Strouhal number of  $O(0.01)$ . Figure 1 shows the time-series variation of the recompression shock wave position. The recompression shock wave fluctuated with a period of 580  $\mu\text{s}$ , which can be converted as  $St \approx 0.014$ . The result was similar to the fluctuation of a recompression shock wave at  $St = O(0.01)$  investigated using DMD analysis in a ballistic range test. (H.Kiritani et al., *AIAA SciTech 2020 Forum*, 2020)

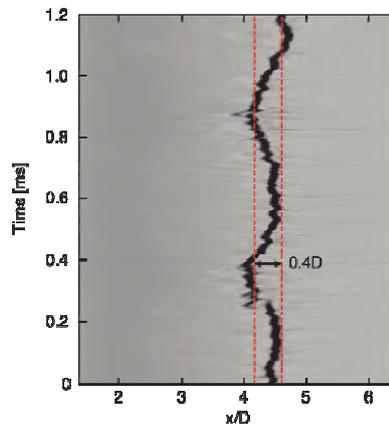


Figure 1: Time-series variation of the recompression shock wave

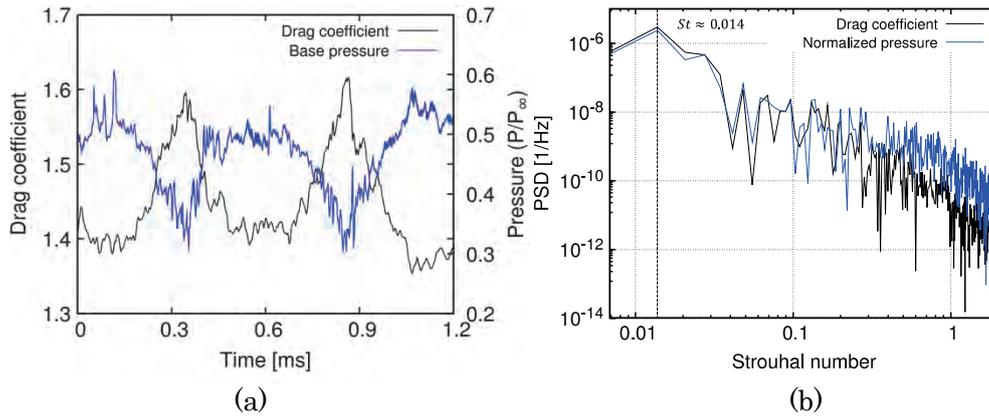


Figure 2: (a) Time history of the drag coefficient and normalized pressure on the center point of the capsule base; (b) PSD of fluctuations in the drag coefficient and normalized base pressure

Figure 2(a) depicts the time history of the drag coefficient and normalized pressure on the center point of the capsule base. When the recompression shock wave moved upstream, the drag coefficient decreased and the base pressure increased. Contrary, when the recompression shock wave moved downstream, the drag coefficient increased and the base pressure decreased. Low-frequency oscillations were the main factor that determined the fluctuation of the drag coefficient and the base pressure. Figure 2(b) depicts frequency distributions of the drag coefficient and base pressure. For both parameters, a frequency peak of  $St \approx 0.014$  was observed, which is identical to the frequency of oscillation of the recompression shock wave. Therefore, the fluctuation of the recompression shock wave had a dominant effect on fluctuations of the drag coefficient and base pressure.

### 3. Achievements

The flow structures behind the capsule model were analyzed with respect to the relocation direction of the recompression shock wave. The interrelation among the flow structure, base pressure, and fluctuation of the recompression shock wave was established.

### 4. Summaries and future plans

The interactions between the recompression shock wave, local shock wave, and free shear layer caused the capsule's base pressure fluctuations which greatly affect the dynamic instability. In future work, 6-DoF (Degree of Freedom) numerical simulations over return capsules will be conducted to analyze the mechanism of the dynamic instability.

### 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. Han, B. J. Lee, M. A. Furudate, K. Yomo, H. Nagai: Numerical Study on Transonic Flow Characteristics over Return Capsules, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-38, pp. 76-77.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

Project code	J21I055
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

## Exploration of Novel Combined Internal Combustion Engine and Solid Oxide Fuel System for Power Generation and Emission Control

Jeongmin Ahn\*†, 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

Integrating a solid oxide fuel cell (SOFC) stack in the exhaust system downstream of an internal combustion engine to develop a highly efficient combined electrochemical and thermal power generation system. The proposed system allows for increased thermal efficiency while maintaining low emission byproducts.

The purpose of this research is to enhance the conversion of chemical energy within a liquid hydrocarbon-based fuel into mechanical and electrical power of an internal combustion engine by integrating it with a SOFC system. The SOFCs provide an added benefit of simultaneously converting the chemical energy of the syngas produced by the combustion engine into electrical power while significantly reducing harmful emission byproducts.

The project seeks to develop an in-lab hybrid engine setup fully integrated with a stack of SOFCs. Experimental investigation will consist of a multi-pronged approach. The first task is to develop a suitable internal combustion engine simulation model, capable of numerically investigating the combustion properties and exhaust concentrations of multiple hydrocarbon fuels and ignition methods. The second task will be to verify the combustion model by experimentally investigating the combustion characteristics, chemical composition, and temperature profile in the exhaust of existing engines, tuned to operate at varying equivalence ratios. The model validation will be followed by a feasibility study into SOFC operation on model exhaust, utilizing benchtop flow meters. The complete integrated system may then be tested for the durability of simultaneous electrical power generation and emission reduction, including a longevity study to verify the SOFC's resiliency to coking in the combined system.

### 2. Details of program implement

In recent years, increasing concern surrounding limited fossil fuel resources and global climate change have led the automotive industry to push towards sustainability. The need for increased sustainable energy systems has created largely two cooperative movements: 1) technologies that are considered renewable or more environmentally friendly and 2) higher efficiency. In order to achieve increased efficiency and reduced pollutant emission, the remaining chemical energy in the exhaust must be transformed into usable energy. A SOFC stack is therefore integrated into the exhaust system of a traditional internal combustion engine. A SOFC stack would eliminate the need to maintain stoichiometric exhaust conditions and would allow the recovery of any remaining chemical energy in the exhaust stream. Due to the fuel flexibility of SOFCs; methanol, nitromethane, gasoline, diesel, or jet fuel mixtures could be used to operate the suggested integrated fuel cell energy system if it makes it to mainstream production.

In order to explore the broad applicability of such a system, a methanol/nitromethane fuel was studied in addition to the previously investigated conventional diesel fuel as proof-of-concept validation.

Previously, the concept of power generation from the modeled syngas created from the rapid compression of diesel fuel had been demonstrated. A micro-tubular SOFC (mT-SOFC) was tested in model syngas, of rapid diesel compression, resulting in high power densities ( $\sim 730 \text{ mW/cm}^2$ ).

The model was then adapted, demonstrating broad applicability, to examine the possibility of utilizing a two stroke, glow-ignited, nitromethane and methanol-based combustion engine, for use on a small unmanned aerial vehicle (UAV). Utilizing the Chemkin-Pro v19.0 AURORA simulation tool, an adiabatic transient engine simulation was used to discover theoretical syngas generation results for fuel mixtures of 30/70, 40/60, 50/50, 60/40 and 70/30 methanol/nitromethane by volume.

The experimental group, led by Dr. Jeongmin Ahn, focuses on exploring the effectiveness of the combined fuel cell and combustion engine energy system on varying hydrocarbon fuels, with the goal of creating a highly efficient, compact, and adaptable power generation system. The modeling group, led by Dr. Hisashi Nakamura, focuses on developing computer simulation combustion models to match the experimental results of combustion testing on varying hydrocarbon fuels.

### 3. Achievements

Figure 1, below, demonstrates the results of the simulation for varying nitromethane and methanol fuels.

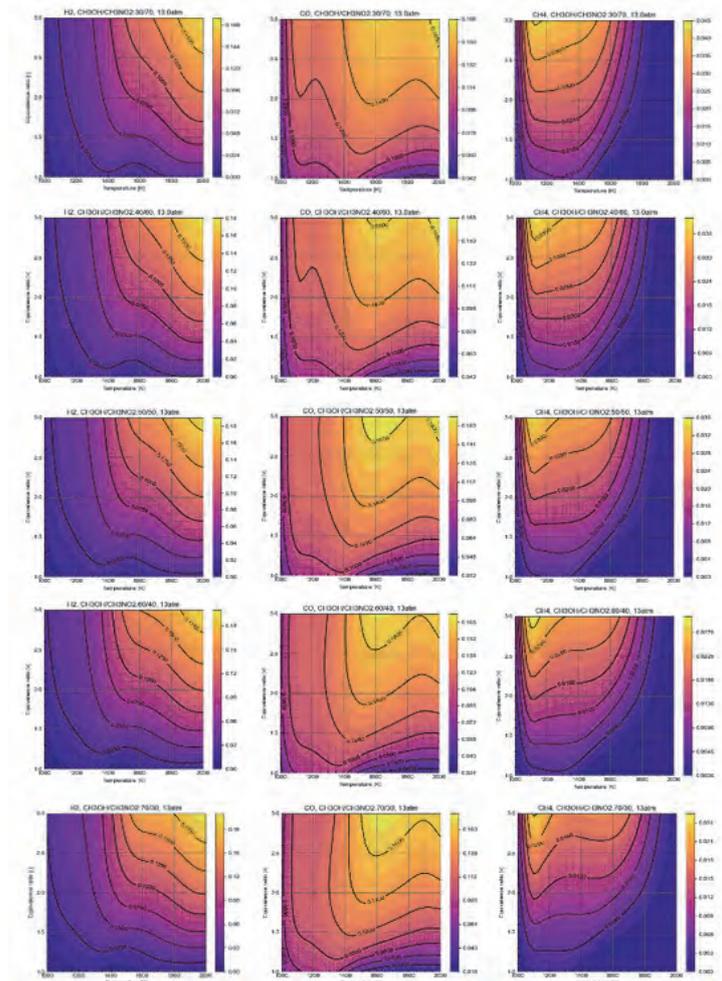


Figure 1: Syngas Generation Simulation Results Across Several Fuel Compositions.

The syngas simulation results were then verified experimentally via gas chromatography for an in-lab engine operating on a mixture of 70 % methanol and 30 % nitromethane by volume, Table 1.

Table 1: Exhaust Composition Analysis by Gas Chromatography.

Exhaust Composition Analysis	
Chemical Species	Percentage (%)
H <sub>2</sub>	6.262
CH <sub>4</sub>	5.916
N <sub>2</sub>	38.421
O <sub>2</sub>	5.624
CO	5.371
CO <sub>2</sub>	29.029
<b>Total Syngas</b>	<b>17.550</b>

As seen in Table 1, the experimental exhaust contained 6.3 % H<sub>2</sub>, 5.4 % CO, and 5.4 % CH<sub>4</sub>, for a total of 17.55 % useable syngas. This considerable percentage of syngas indicates that the exhaust gas can be directly utilized by the SOFC as a fuel source.

In an attempt to optimize the results displayed above, it is favorable to utilize the fuel mixture that produces the largest quantity of overall syngas for optimal SOFC performance. Referring to the combustion simulation results of Fig. 1, the fuel mixture of 60/40 by volume methanol/nitromethane produces the highest quantity of total syngas at the assumed engine conditions of 1750 K and an equivalence ratio of 1.6.

Therefore, it is possible to create a model combustion exhaust that represents the products of the engine operating on liquid 60/40 methanol/nitromethane fuel using tabletop flowmeters of H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>. A model exhaust was created for both the anticipated average engine operating condition, with an equivalence ratio of 1.6, and the maximum realistic engine operation condition according to the upper flammability limit, with an equivalence ratio of 2.5. Fig. 2 displays the open circuit voltage (OCV) and power density of the SOFC operating on the base condition model exhaust across a range of temperature values. The SOFC reached peak power density of ~475 mW/cm<sup>2</sup> at a furnace temperature of 850 °C.

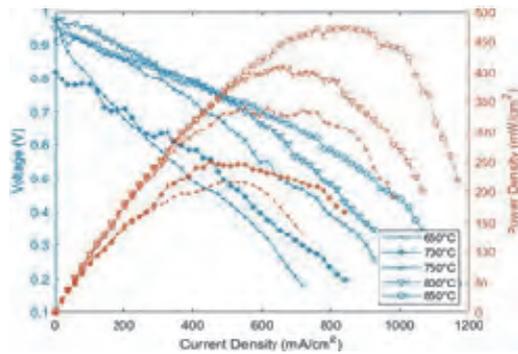


Figure 2 Polarization and Power Curves for Ni YSZ-LSM SOFC for an Equivalence Ratio of 1.6.

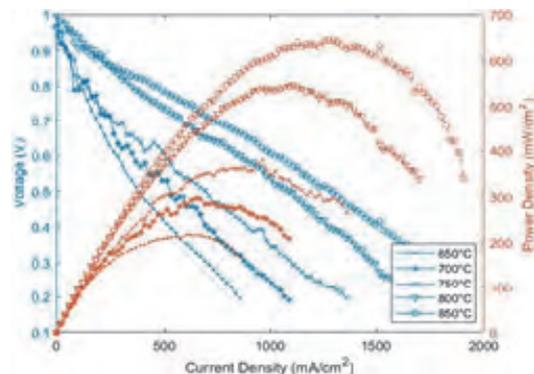


Figure 3: Polarization and Power Curves for Ni YSZ-LSM SOFC for an Equivalence Ratio of 2.5.

Similarly, Fig. 3 displays the OCV and power density of the SOFC operating on the maximum fuel rich condition, equivalence ratio of 2.5, model exhaust across a range of temperature values. For the model exhaust following the maximum fuel rich burn conditions, the SOFC reached peak power density of ~650 mW/cm<sup>2</sup> at 850 °C. Again, as the temperature departs from 850 °C, the peak power density decreases.

#### 4. Summaries and future plans

The results shown above suggest that a combined internal combustion engine and SOFC hybrid power system for a UAV is feasible. Gas chromatography (GC) results find that the engine exhaust contains 6.3 % H<sub>2</sub>, 5.4 % CO, and 5.9 % CH<sub>4</sub>. This result both confirms the findings from the AURORA based combustion simulation and proves that the engine exhaust can be immediately utilized by the SOFC as a fuel source. The combustion simulation results led to a 60/40 mixture of methanol/nitromethane to be chosen, as it produced the most overall syngas. Using tabletop exhaust modeled after the expected products of the 60/40 methanol/nitromethane fuel, with equivalence ratios of 1.6 and 2.5, peak power densities were ~475 mW/cm<sup>2</sup> and ~650 mW/cm<sup>2</sup>, respectfully. Since liquid fuel is much more energy dense than lithium polymer batteries, the above results suggest that an extended UAV range and endurance is possible by using the hybrid system.

Future study will focus on the optimization and increased efficiency of the proposed system. Simulations will be expanded to include multiple hydrocarbon-based fuels, including, but not limited to, diesel, gasoline, jet fuel, etc., for multiple ignition methods. Experimental work will initially focus on verifying, validating, and correcting the newly developed models. Simulation models may then be leveraged to predict ideal operating conditions for sufficient syngas generation. The simulated results may first be investigated through mixed bench top model exhaust, prior to developing a completed system.

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [1] Thomas S. Welles, Benjamin Akih-Kumgeh, Hisashi Nakamura, and Jeongmin Ahn: Exploration of Novel Combined Compression-Ignition Combustion Engine and Solid Oxide Fuel System for Power Generation and Emission Control, *Proceedings of the Eighteenth Int. Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, J21 | 055 Nov. (2021).
- [2] Alexander Metcalf, Thomas S. Welles, and Jeongmin Ahn: Investigation of a Hybrid Powertrain Utilizing Solid Oxide Fuel Cells and Internal Combustion Engine for Unmanned Aerial Vehicles, *Proceedings of the AIAA* Aug. (2021).
- [3] Alexander Metcalf, Thomas S. Welles, Yuki Murakami, Hisashi Nakamura, and Jeongmin Ahn, “Powering an Unmanned Aerial Vehicle With an Internal Combustion Engine and Solid Oxide Fuel Cell Hybrid Powertrain”, *ASME Conference Proceedings, POWER2022-86357* Jan. (2022).

課題番号	J21I056
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4～2022.3
継続年数	1年目

プレノプティック光学系による高速飛しょう体周囲の流れ場可視化計測  
Flow visualization of a high-speed projectile with plenoptic optic

水書 稔治\*†, 大谷 清志\*\*††

\*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の3次元解析は、次世代静粛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。高速飛しょう体周囲で発生する流れ場の3次元解析は、測定対象物が固定された風洞試験では多くの研究事例があるが、自由飛行体に対しては、寡聞である。これは、流れ場の3次元計測に際して、複数の視野による同時撮影が必要であることが理由である。本研究では、測定部の光線情報をひとつの画像素子で記録可能なプレノプティック光学系を利用し、ひとつの画像記録装置で撮影することで高速飛しょう体周囲の流れ場の3次元再構築の実現を試みるのが目的である。

2. 研究成果の内容

弾道飛行実験装置測定部を通過する超音速飛しょう体周囲の流れ場の可視化計測のために構成したハイブリッド型点回折干渉計 (PDI) の光学系、および超音速飛しょう体として射出した球模型 (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>) ならびにサボを図 1 に示す。ハイブリッド型点回折干渉計は、光源を全固体レーザー (波長 532 nm, 最大 2 W) を光源とし、点回折干渉計と Mach-Zehnder 干渉計を組み合わせた光学系を構成している。このため、点回折干渉計では困難な有限幅干渉縞を半透明鏡 (図中 MH) を調節することで、発生可能である。球模型は、射出 Mach 数 (ノミナル) は、1.2 とした。画像の記録は、高速度ビデオカメラ (1280 pix. × 768 pix., 200,000 fps, ナック社製 ASC-1 M60) を利用し、模型のマズル射出をレーザーカット法で検知し、撮影開始のトリガ信号とした。

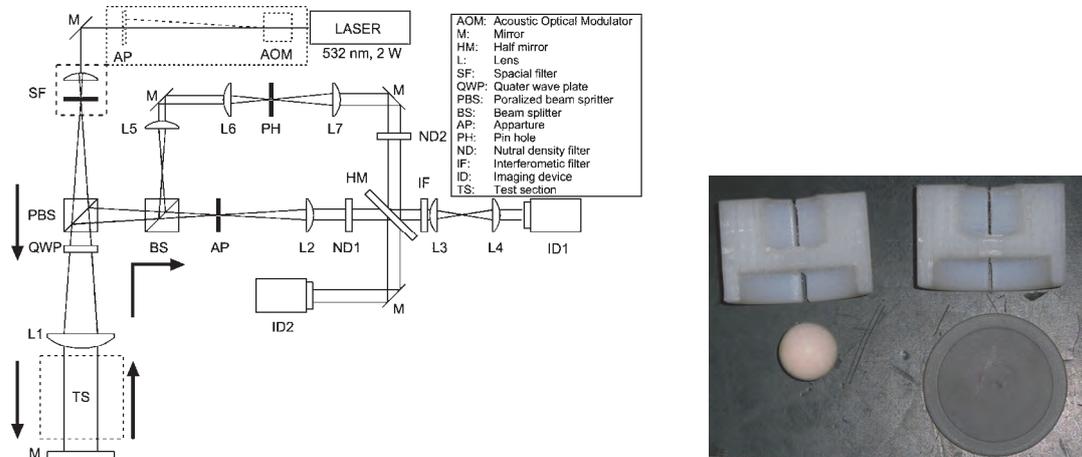


図 1: ハイブリッド型点回折干渉計光学系 (左) と球体模型およびサボ (左)

ハイブリッド型 PDI で可視化計測した飛行 Mach 数 1.2 の球模型周囲の流れ場の無限幅干渉縞 (図 2 左) と有限幅干渉縞 (図 2 右) を示す。当該年度の実験では、弾道飛行実験装置にうよる球模型の弾道安定性が一定に保つことができず、測定部中央を通過した計測が達成できていない。そのため、干渉縞画像は取得できたものの、定量的な流れ場解析が未達成となった。また、干渉縞も迷光による不要な干渉縞が多く映り込み、ノイズの多い干渉縞画像となった。球模型の弾道安定化と迷光の軽減が不可欠な結果となった。

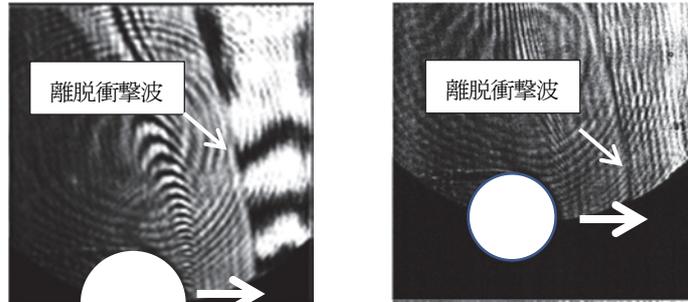


図 2 : 飛行 Mach 数 1.2 の球模型周囲の流れ場の可視化結果 (左 : 無限幅干渉縞, 右 : 有限幅干渉縞)

### 3. 研究目標の達成状況

今年度の研究目標として、測定部の光線情報を一度の計測で取得可能な可視化計測法を用いた自由飛しょう体周囲の流れ場計測の初研究事例、とした。超音速飛しょう体周囲の流れ場の干渉縞計測は達成したが、球模型の飛行弾道の安定が達成できず、定量的解析に至っていない。

### 4. まとめと今後の課題

超音速飛しょう体周りの流れ場の定量的可視化計測を点回折干渉計で行うことを目的として、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。無限幅および有限幅干渉縞を発生させ、計測した結果、以下を得た。

- 比較画像としてのシャドウグラフ法による画像取得に成功した。
- シャドウグラフ法撮影では、模型通過位置が弾道軸から数 cm 上方にそれた。
- シャドウグラフ法と PDI による空間分解能は、0.11~0.12 mm/pix. となった。
- 模型の一部が視野外を飛行したが、無限幅および有限幅干渉縞の取得に成功した。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

該当無し

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Wang, F., Aoyama, D., Mizukaki, T., and Ohtani, K., "Three-dimensional visualization of shock waves using background-oriented schlieren with light field technique," *AFI2021*, Sendai, Miyagi, CRF-53, 2021

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許)

該当無し

(受賞)

該当無し

(マスコミ発表)

該当無し

課題番号	J21I057
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	2021.4~2022.3
継続年数	2年目

**中枢創薬のための三次元ヒト血液脳関門チップの開発**  
**3D Human Blood-Brain Barrier Chip for CNS Drug Development**

立川 正憲\*†, 稲垣 舞\*, 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

全身の臓器には、各組織に特異的な血管網が構築され、その血管透過性は、血流を介するがんの転移、及び治療薬開発における薬物の組織への送達性を決定づける重要な因子となっている。脳では、血管内皮細胞同士が密着結合した血液脳関門（Blood-Brain Barrier, BBB）が形成されることで、主に **paracellular** 経路の血管透過性が著しく制限されており、試験管レベルで効果が示された薬物でも、実際に脳組織に届かない要因となる。そのため、創薬初期段階において、薬物が BBB を透過し脳内の標的細胞に届くかを精度よく評価可能なヒト *in vitro* BBB モデルを開発することは、中枢薬開発における喫緊の課題である。昨年度は、マイクロ流路デバイスを用い、灌流性を有する 3 次元脳血管網の構築を達成することができた。しかし、構築された血管網の内径は、*in vivo* 脳微小血管網と比較して太く、*in vivo* BBB 模倣性について評価していく必要があった。そこで本年度では、形態学的に *in vivo* 脳微小血管網に近い細胞培養条件を確立し、さらには構築した 3 次元ヒト BBB チップを用い、高分子医薬のキャリアーとして注目されている細胞外小胞（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

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生体模擬チップを用いて、その内部のマイクロサイズの流路内に三次元のヒト脳微小脳血管網を構築し、BBB 形成と細胞の混合比率の法則性を見出し、形態学的に *in vivo* 脳微小脳血管網に近い条件を決定した。さらに、核酸やタンパク質を内包することから高分子医薬のキャリアーとして注目されている細胞外小胞のヒト 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、最新データの議論を行い、研究推進を図り、令和 3 年 12 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 3 年 4 月～令和 4 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。

- ① **ヒト BBB 模擬チップの構築**: マイクロ流体デバイス上に、ヒト脳血管内皮細胞（HBMEC）、アストロサイト、ペリサイトを混合播種し、間質流を発生させた状態で約 7 日間培養することで、3 次元ヒト脳微小脳血管網を構築した。構築された血管の内径と播種する総細胞数の間において負の相関が、さらには血管内径と総細胞数に対する HBMEC の割合との間には正の相関が示され、*in vivo* 脳微小血管の直径に最も近い培養条件を決定した。

- ② 細胞外小胞のヒト BBB 透過性評価：胎盤栄養膜モデル細胞の培養上清から、超遠心法によって細胞外小胞を単離し、PKH67 によって蛍光標識した。蛍光標識した胎盤由来細胞外小胞溶液を、3 次元ヒト脳微小血管網に灌流させ、6 時間インキュベートしたところ、レクチンの赤色蛍光が示す血管壁のみならず、血管内外においても、細胞外小胞由来の緑色シグナルが検出された (図 1)。以上の結果から、構築した脳微小血管網モデルは、細胞外小胞の BBB 透過を可視化するのに有用であることが実証された。今後は、細胞外小胞の BBB 透過性のみならず、その内包物である核酸医薬やタンパク質医薬の脳細胞送達性を評価するために、蛍光標識した核酸 siRNA を内包した人工エクソソームを作製し、核酸 siRNA の脳細胞到達性を、3 次元ヒト BBB チップを用いて評価することを目指す。

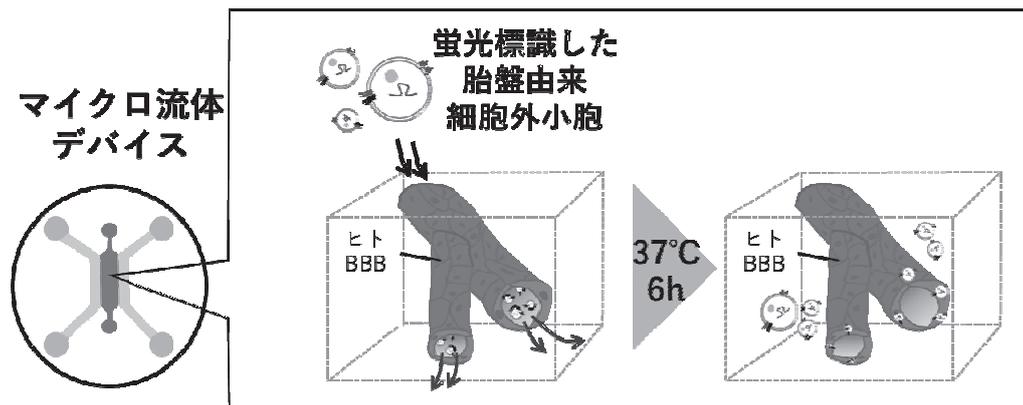


図 1：3 次元ヒト脳微小血管網における胎盤細胞由来細胞外小胞の血管透過性評価実験

### 3. 研究目標の達成状況

3 次元脳微小血管網の形成と細胞の混合比率の法則性を見出し、形態学的に *in vivo* 脳微小血管網に近い条件を決定することができた。さらに、構築した 3 次元ヒト BBB チップが、細胞外小胞のヒト BBB 透過性を可視化できる評価系として有用であることが示された。既知の薬物の透過性評価について現在検討を行っており、機能的品質が保証された BBB 評価系の実現は今後の課題とする。

### 4. まとめと今後の課題

ヒトの BBB の機能を再現する 3 次元微小脳血管網を構築し、構築した 3 次元ヒト BBB チップが細胞外小胞の血管透過性評価に有用であることを実証した。薬物の透過性評価を行い、既知の薬物のヒト BBB 透過性を反映することを示し、構築した三次元ヒト微小脳血管網の *in vivo* BBB 模倣性について評価していく必要がある。

### 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] M. Sato, M. Inagaki, Y. Sakamaki, K. Funamoto, M. Tachikawa: Reconstruction of 3D Human Brain Microvasculature on a Chip using Brain Endothelial Cells, Astrocytes and Pericytes, *Eighteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2021), OS11-20 (オンライン)

- [2] Y. Sakamaki, M. Inagaki, M. Sato, K. Funamoto, M. Tachikawa: Reconstruction of Perfusible Human 3D Microvasculature on a Chip as an Evaluation Model of Cancer Cell Extravasation and Drug Transport, *AFI-2021*, Sendai, (2021), CRF-74 (オンライン)
- [3] 立川正憲, 稲垣舞: ヒト血液脳関門における細胞外小胞輸送システムの多様性と特異性, 日本薬学会第 142 年会, 名古屋, (2022), S50-2 (シンポジウム講演, オンライン)
- [4] 立川正憲: 定量プロテオミクスが拓いた脳関門物流システム・Brain Barrier Logistics-解明研究, 第 14 回日本薬物動態学会ショートコース (セッション 3 Brain Delivery & Omics), 高崎, (2021), SC-6 (シンポジウム講演, オンライン発表)
- [5] 立川正憲: A quantitative proteomics-based study to clarify a role of the blood-brain barrier as the interface between central nervous system and peripheral immune system. (定量プロテオミクス解析から見えてきた中枢-免疫インターフェースとしての血液脳関門の役割), 第 44 回日本神経科学会, 神戸, (2021), 2S03m-01 (シンポジウム講演, オンライン発表)
- [6] 佐藤桃子, 稲垣舞, 酒卷祐花, 船本健一, 立川正憲: マイクロ流体デバイスを用いた三次元ヒト脳微小血管網の構築, 日本薬学会第 142 年会, 名古屋, (2022), 26C-pm01S (口頭発表, オンライン)
- [7] 酒卷祐花, 稲垣舞, 佐藤桃子, 船本健一, 立川正憲: マイクロ流体デバイスを用いた灌流性を有する三次元ヒト微小血管網の再構築, 日本薬剤学会第 36 年会, 徳島, (2021), P-053 (ポスター発表, オンライン)

### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許)

なし

(受賞)

- [1] 佐藤桃子: 第 10 回徳島新聞生命科学分野研究支援金, 公益財団法人徳島新聞社会文化事業団

(マスコミ発表)

なし

課題番号	J21I059
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	2021.4～2022.3
継続年数	1年目

## サウナ室等の高温環境下における人体皮膚表面の相変化伝熱現象の調査

古川 琢磨\*†, 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、健康増進とストレス解消の目的のため、サウナ室での繰り返し入浴が注目されている。繰り返し入浴では、室温が 80~90 度のサウナ室と水温が 10~20 度の水風呂で相互入浴を行う。そのため、繰り返し入浴時の人体周辺の温度変化は極めて大きい。人体周辺の急激な温度変化は高齢者のヒートショックの発生要因であることが指摘されている。ヒートショック防止のためには、入浴時の人体深部温度及び表面温度の環境変化を定量的に把握し最適な入浴時間および入浴方法を提案する必要がある。しかしながら、サウナ室内部のような極限高温環境下では人体皮膚表面での発汗や水蒸気の凝縮など複雑な相変化伝熱現象が発生しており、本現象を定量的に評価可能な伝熱モデルは提案されていない。そこで本研究では、サウナ室等の高温環境下における人体皮膚表面の新たな相変化伝熱モデルを提案し、サウナ繰り返し入浴時における人体内外部の伝熱現象の定量的な理解を目的とする。

### 2. 研究成果の内容

本研究期間中では、従来の生体温熱モデルによる人体生理反応の予測可能性を評価するために、八戸市内にあるサウナでの実地試験との比較を行った。実地試験では無線カプセル温度計及び、ウェアラブル腕が温度計を用いて深部温度、皮膚温度の測定を行った。また本実験の測定にあたり、八戸工業高等専門学校倫理委員会にて本実験の許諾を取っている。従来の生体温熱モデルには Gagge らによって提案されたモデルを用いた。図 1 にサウナ入浴中における生体温熱モデルによる解析結果と実験結果の比較を示す。図に示されるように、Gagge モデルの予測結果 (Case1) は実験結果より過剰に温度を予測することが明らかとなった。これはサウナ室内部の環境が従来モデルに適用不可能であることを示している。Gagge モデルには経験則的に取得されているモデルパラメータがある。これらパラメータを別途変更したモデルでの温度値の比較結果も図 1 に Case2, Case3 として併記する。図に示されるようにモデルパラメータを調整する時、予測温度は実験結果に漸近することが明らかとなった。以上の結果からサウナ入浴に適したモデルパラメータの調整の必要性が明らかとなった。また Gagge モデルでは発汗が著しく激しい状況では、皮膚不周辺の相変化現象は拡散律束によって記述されている。この相変化は周囲との熱伝達率に相似する仮定が施されており、今後のモデル向上のためには相変化現象の厳密なモデリングが必要であると考えられる。

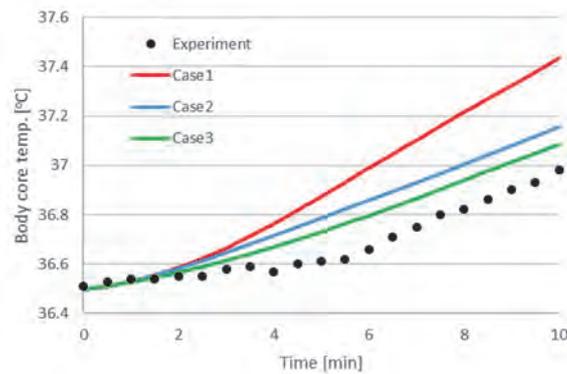


図1：サウナ入浴時における人体深部温度の実験結果との比較，Case1はモデルパラメータのデフォルト値，Case2，Case3はモデルパラメータ調整後の温度分布を示す。

### 3. 研究目標の達成状況

申請書では，サウナ繰り返し入浴の人体深部温度，皮膚温度を予測可能な生体温熱モデルの提案を目的としていた．本研究期間中では，従来の生体温熱モデルではモデルパラメータの不確実性による予測性能の低下を見出すことができた．

### 4. まとめと今後の課題

今後は被験者の繰り返し入浴状況のデータを増やして，モデル精度の向上を図っていく．サウナ室内部の実地試験からサウナ繰り返し入浴において深部温度が皮膚温度と比較して2~3分程度の時間誤差が生じることが明らかとなった．この時間遅れは従来の生体温熱モデルでは予測することは不可能であり，モデルの根本的な改善が必要であると考えられる．具体的には深部，皮膚に中間層を設定したモデルの使用が必要であると考えられる．

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] T. Kogawa, N. Osaka, H. Ishibashi, J. Okajima, Study of Heat Transfer Problem of Human Bathing in Sauna Room, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-2.

#### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（受賞）日本サウナ学会第一回奨励賞，2021年11月

（マスコミ発表）東奥日報，安全・快適なサウナ探る，2021. 11.8

Project code	J21I061
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## Modelling Core Scale: Investigation of Multiscale porosity using 3D printed micromodels

Anna Suzuki\*†, Julien Maes\*\*††  
Alexandros Patsoukis-Dimou\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Institute for GeoEnergy Engineering, Heriot-Watt University

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Sustainable low-carbon energy production is one of the main challenges that society is facing today. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has stated that negative emissions via carbon capture and storage is necessary to mitigate the dangerous effects of global climate change. However, these underground storage reservoirs are composed of porous rock (matrix) that are highly non-uniform structures with intricately connected pores of varying shapes and sizes. Furthermore, these rock matrices are often riddled with networks of cracks that allow fluids to move at extremely high speed through the reservoir and possibly leak out, which would undermine CO<sub>2</sub> storage efforts. We must thus be able to predict these fluid movements in order to ensure permanent storage of CO<sub>2</sub>. When there is only water present in the reservoir our predictions of this fluid movement are highly accurate. However, when CO<sub>2</sub> is introduced, the two fluids (water and CO<sub>2</sub>) have different densities that change as a function of depth making the interaction between CO<sub>2</sub> density, movement of CO<sub>2</sub>, and the fracture network very difficult to predict. We will use a combination of new 3D printing technology, advanced visual experiments, and state-of-the-art simulations to tackle this challenge. We have three key objectives: (1) to design a variety of 3D printed models of rock matrix with fractures of many different shapes and sizes; (2) to perform a series of experiments where water and gas or analogue fluid is injected into the printed models and the displacement of each fluid through fractures and rock matrix is recorded; (3) to compare these images to the predictions of our simulations to ascertain the scenarios in which our predictions are correct (or incorrect). The results from this project will then be used inform simulation development and improve our future predictive capacity and thus the likelihood of successful outcomes of CO<sub>2</sub> storage projects around the world.

### 2. Details of program implement

Each of the three objectives outlined above will be addressed in this research programme, which is divided into three tasks:

#### Task 1

We will use the expertise developed at the Institute of GeoEnergy Engineering (IGE) during an EPSRC-funded project (total value £587k) to create microfluidic devices representing two-scale porosity structures. We will also use the expertise developed at the Institute of Fluid Sciences (IFS) to manufacture complex 3D fracture networks (Suzuki et al., 2017). Micromodels consisting of monodisperse disc-packing (Mehmani et al., 2017) with pore sizes between 50 and 300 microns will be printed using the Form2

3D printer at IGE, and a superimposed fracture network with aperture between 50 and 1000 microns will be printed with the AGILISTA 3D printer at IFS.

#### Task 2

These custom 3D printed micromodels will then be used for multiphase flow experiments. By varying the structure of the matrix and the fracture size and shape, and by changing the injection from matrix to fracture and from fracture to matrix, we can investigate their impact on the fluid movement through the model. The results of these experiments can then be compared with numerical simulation.

#### Task 3

The simulations will be conducted using an open source simulation toolbox. An existing numerical approach (Soulaine 2019) will be used and compare with the experimental results. This approach can be used to simulate flow between rock matrix and fracture; However, several parameters must be tuned (i.e. contact angle between fluid/fluid and fracture/matrix interfaces, capillary pressure within the matrix). This tuning is always undesirable because it does not use the underlying fundamental physics to predict the fluid movement. However, once the match between experiments and simulation is successful, analysis can be done in order to further understand these interactions and then develop a simulator where those parameters will not have to be tuned and the simulation will predict the experimental output using fundamental physics.

### 3. Achievements

#### a. Dissolution of a trapped CO<sub>2</sub> bubble

In order to generate micromodels for our studies the Formlabs Form 2 stereolithography printer was used. Formlabs Form 2 works by solidifying layers of liquid resin to generate a solid structure. to investigate dissolution of a single trapped CO<sub>2</sub> bubble we created a micromodel geometry consisting of a single channel of 1 mm width and a 2 mm height -1 mm width cavity where the CO<sub>2</sub> bubble was trapped. After the micromodel was generated, it was inserted and sealed in our experimental cell where it was firstly fully saturated with CO<sub>2</sub> and then water is injected with a constant flowrate of 0.5 ml/min, and the dissolution of the trapped CO<sub>2</sub> bubble in the cavity was observed.

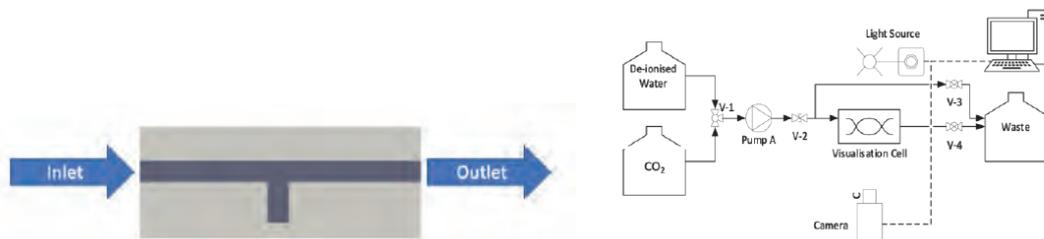


Fig. 1 (a) Cavity micromodel design (Flow path (blue) solid walls (gray)) and (b) experimental setup for CO<sub>2</sub> dissolution experiment.

The ability to generate simple pore like geometries like a single channel with a cavity and the ability to observe pore-scale processes like CO<sub>2</sub> dissolution of a single bubble can be seen in Fig 2. From the images acquired we can observe two different dissolution regimes, an advection dominated regime when the bubble is still close to the channel where the water flow is occurring, and a diffusion dominated regime when the bubble has shrunk significantly and is no longer affected by advective flow from the water inside the channel.

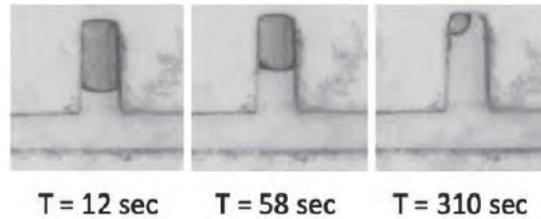


Fig. 2 Dissolution of a trapped CO<sub>2</sub> bubble under constant water injection.

We then created a micromodel geometry to investigate species transport, which consists of a matrix generated by placing beads and superimposing a fracture geometry downloaded from the digital rock portal. (<https://www.digitalrockportal.org/projects/195>).

The pore-throat sizes within the matrix are 0.2 mm, while the minimum aperture inside the fracture is set to be 4 mm. The overall size of the domain is 100x100 mm.

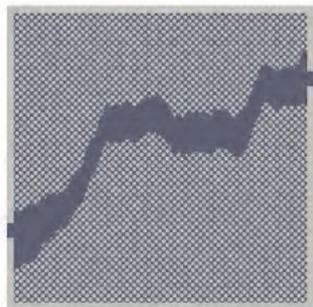


Fig. 3 Fracture micromodel design. Flow path (blue) solid walls (gray).

After the micromodels have been designed and printed, they were inserted and sealed in an experimental cell. The micromodel was firstly saturated with distilled water. Then water with red dye was injected at constant flowrate of 0.08 ml/min and the transport of dye within the domain was observed.

The 3D printing allows for generating a multiscale geometry including matrix and fracture features and observing with a high-resolution camera species transport inside the system. Fig. 4 shows the result of injecting distilled water with dye in an already water saturated system. We can observe the faster propagation inside the high velocity path of the fracture compared to the matrix.

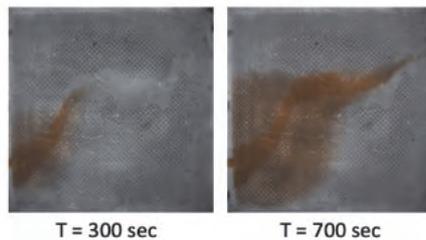


Fig. 4 Propagation of red dye inside the 3D printed fractured geometry.

Achievements level for “expected result”

- Task 1: Create microfluidic devices 100 %
- Task 2: Multiphase flow experiments 100 %
- Task 3: Numerical simulation 80 %

- Writing paper 50 %

#### 4. Summaries and future plans

We have demonstrated the ability to generate micromodel geometries using 3D printing technology. We have shown how current and affordable 3D printing technology can be used to investigate fluid flow processes relevant to subsurface processes like dissolution of CO<sub>2</sub> and fluid flow through fractured porous media.

The project is expected to result in two main deliverable: (1) a series of flow experiments with high resolution images representing various scenario where water and gas and/or analogue fluid are flowed through 3D printed models of rock matrix with fractures of many different shapes and sizes and (2) a series of numerical simulations with direct comparison with the experimental data. The results from this project will help us to better understand the shortfalls of current simulation techniques and improve their accuracy.

#### 5. Research results

##### 1) Journal

Not applicable

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

[1] A. Patsoukis Dimou, A. Suzuki, H. Mense, J. Maes, and S. Geiger, “3D printing-based microfluidics for geosciences”, *Proc. 18th International Conference on Flow Dynamics*, (2021).

[2] J. Maes and A. Suzuki: Modelling core scale: Investigation of multiscale porosity using 3D printed micromodels, *Proc. the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information* (2021).

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

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release) Not applicable

Project code	J21I062
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

Data-driven Modeling of Flow in Complex Structures:  
Flow Modeling of Microbially Induced Carbonate Precipitation

Anna Suzuki\*†, James Minto\*\*††

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Civil & Environmental Engineering, University of Strathclyde, UK

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

For subsurface energy resource development (e.g. geothermal energy, thermal energy storage, compressed air and hydrogen storage), it is necessary to understand both fluid flow through rock fractures, and how fluid flow pathways evolve over time. Reasons for evolving flow pathways include fine particle migration, chemical reactions that can enhance or close off preferential flow paths, and the effects of microorganisms that produce biofilms and accelerate biogeochemical processes.

In this project, we build on earlier work in which complex fracture networks were 3D printed and used in lab-scale experiments to validate fracture flow models, and extend this to include a biogeochemical process named Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) whereby live bacteria are used to control and accelerate the precipitation of calcium carbonate within the 3D printed fracture networks. Alteration to the fracture network is tracked with X-ray CT, and numerical flow modelling is used to understand how these structural changes affect flow paths.

MICP has been proposed for numerous engineering applications such as sealing fractures in the rock around a radioactive waste disposal facility [1], sealing cracks in cement around carbon capture and storage injection points [2,3], and remediation of cracked infrastructure [4]. Yet, to date, studies on MICP in fractures have focused on single planar fractures and not on complex fracture networks. Our research aims to fill this gap and also serve as a more general test-case for improving flow modelling of evolving fracture networks.

### 2. Details of program implement

Three different 3D printed complex fracture networks were designed and printed at Tohoku University by Anna Suzuki and sent to James Minto at the University of Strathclyde where X-ray CT and MICP experiments were carried out. Flow modelling was carried out on the IFS supercomputer system using OpenFOAM v7.

The fracture networks (shown in figures 1, 2 and 3) each have different properties: uniform thin fractures, uniform thick fractures, and a range of thin and thick fractures and are hereafter referred to as the Thin, Thick and Variable fracture network.

The research tasks were to:

- 1) Characterise flow in each of the fracture networks both experimentally and numerically.
- 2) Use MICP to precipitate calcium carbonate within the fracture networks and

- evaluate changes to flow paths through X-ray CT and flow modelling.
- 3) Determine effectiveness and limitations of current MICP treatment strategies (developed for single planar fractures) in sealing complex fracture networks.
  - 4) Understand the effect of gravity and density separation between the MICP treatment solutions (the bacterial are injected first, followed by a considerably denser urea/CaCl<sub>2</sub> solution).
  - 5) Propose new MICP treatment strategies for complex fracture networks and evaluate their effectiveness.
  - 6) Improve and update existing fracture flow modelling capabilities [5] through use of the IFS supercomputing system.

### 3. Achievements

All fracture networks were X-ray CT scanned at a resolution of 60  $\mu\text{m}$  which provides the ‘as-printed’ geometry (including the configuration of the inlet and outlet ports) and serves as the basis for the numerical flow modelling. Figure 1 shows results of a simulated tracer breakthrough experiment for the Variable Fracture.

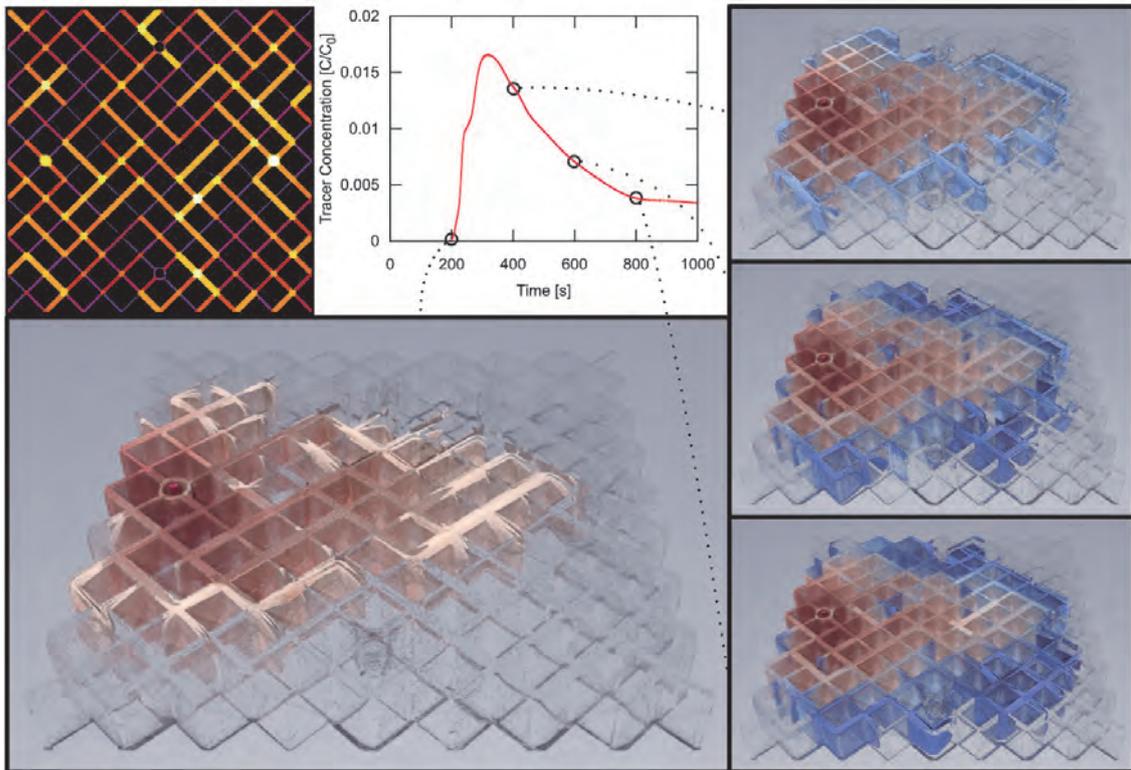


Figure 1: Variable aperture fracture. Top left: fracture aperture distribution, determined from X-ray CT scan. Top middle: tracer breakthrough profile (i.e. concentration of tracer at outlet) simulated with custom OpenFOAM solver. Bottom and right inserts: tracer time-to-arrival with short times (i.e. rapid transport) shown in red and long arrival times shown in blue. Areas of the fracture network where tracer does not arrive within 1000 seconds are rendered transparent.

The Thin fracture network has been used to evaluate a standard MICP treatment cycle where 1 pore volume of ureolytically active bacteria are injected, allowed to attach to the fracture sides with a no-flow period, then a high concentration urea/CaCl<sub>2</sub> solution is injected. This is referred to as a ‘treatment cycle’ and nine treatment cycles were performed with X-ray CT scanning after 1, 7 and 9 cycles. Results indicate that permeability reduction due to MICP was mostly associated with blocking the inlet and

outlet ports. While there was  $\text{CaCO}_3$  precipitation throughout the fracture network, large areas have minimal precipitation due to density separation of the reacting fluids and the formation of preferential flow paths. This suggests there may be challenges in creating a long-lasting and low permeability seal in fracture networks when using the standard treatment method.

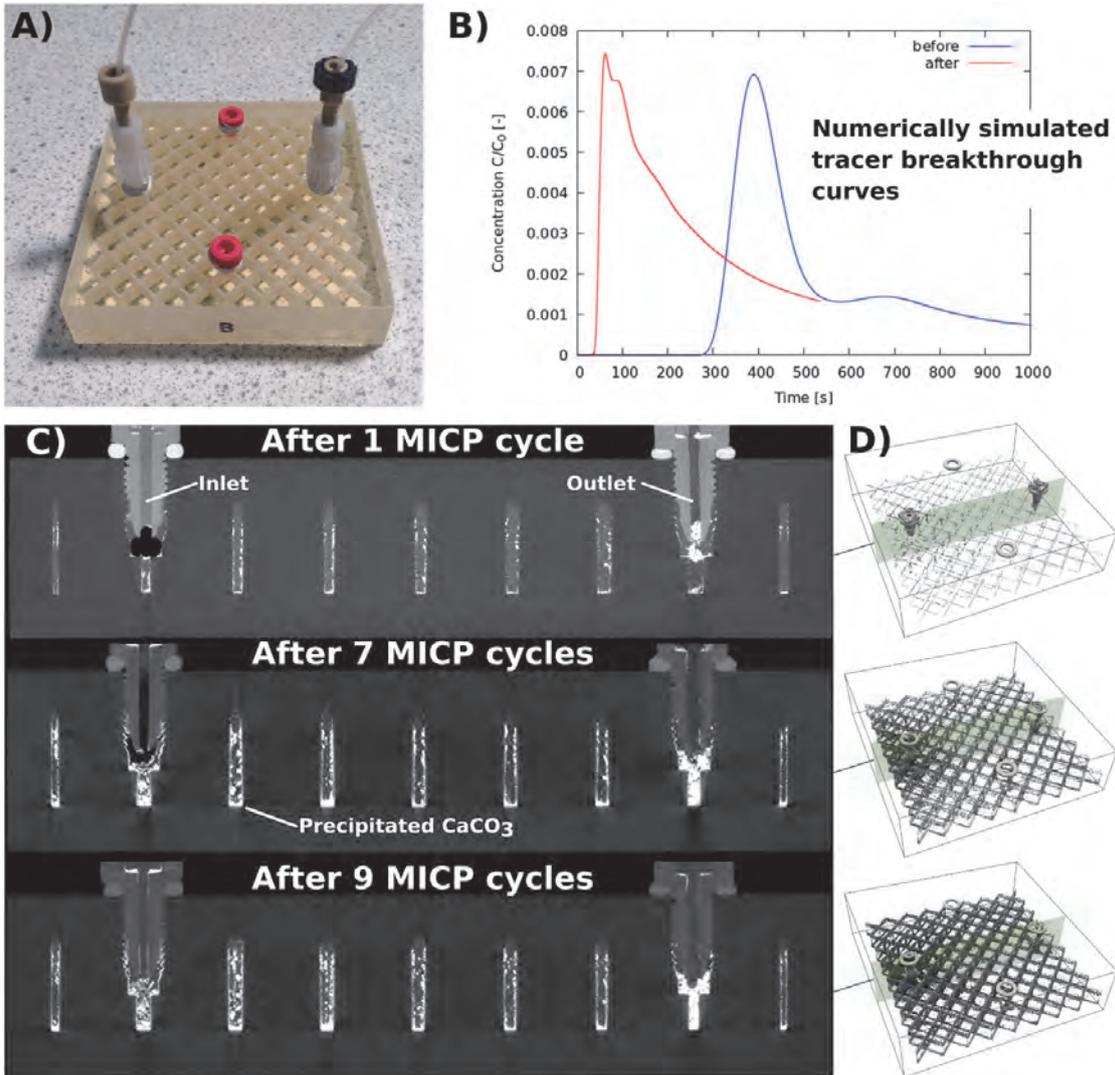


Figure 2: A) 3D printed Thin fracture network with inlet and outlet ports. B) Simulated tracer breakthrough curves before treatment and after 9 treatment cycles. C) Cross-sections through the X-CT data showing fracture geometry with low density materials (air) shown in black, high density materials ( $\text{CaCO}_3$ ) shown as white, and mid-density materials (water, plastic) shown as grey. D) 3D renderings showing spatial distribution of microbially precipitated  $\text{CaCO}_3$ .

An alternative treatment method was trialed in the Thick fracture network: bacteria was mixed with urea and  $\text{CaCl}_2$  in a beaker for 24 hrs to create a particle suspension containing live bacteria and small  $\text{CaCO}_3$  crystals. This particle suspension was injected into the Thick fracture network at a high flow rate, followed by a slow injection of urea/ $\text{CaCl}_2$  over one week. The aim was to quickly fill much of the fracture pore space with unconsolidated  $\text{CaCO}_3$  slurry that would then become cemented by further microbial activity. This treatment was repeated twice before X-ray CT scanning and initial results looks promising for achieving a denser seal and making more efficient use

of reagents.

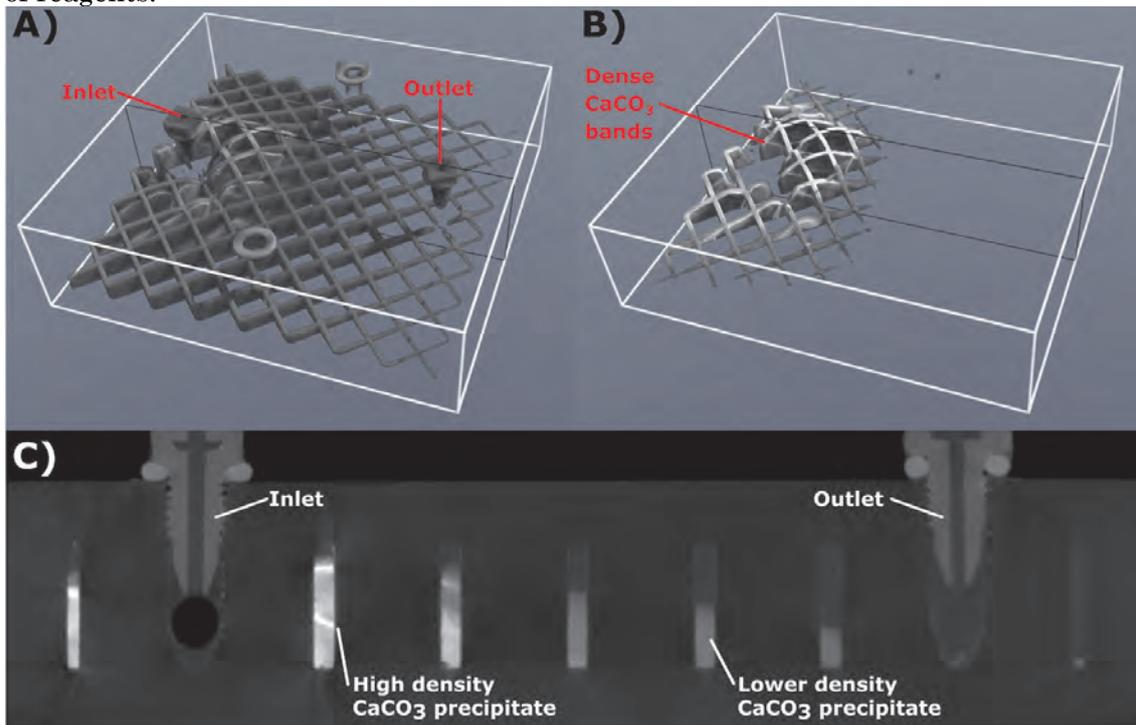


Figure 3: A) Distribution of  $\text{CaCO}_3$  slurry after second injection. B) Distribution of high density  $\text{CaCO}_3$  slurry. C) Cross-sections through the X-CT data showing bands of high density  $\text{CaCO}_3$  that form during the 1 week static reaction period.

Achievements level for “expected result”

- (1) Structure-controlled flow experiment and numerical simulation using 3D printer
  - 2D fracture networks (Thin, Thick and Variable fracture network): 100 %
  - 3D fracture networks: planned in 2022
- (2) Quantification of complex crack structure by persistent homology
  - 3D printed design: 100 %
  - $\text{CaCO}_3$  precipitation: planned in 2022

#### 4. Summaries and future plans

This pilot data shows promise for an improved MICP treatment strategy that will work in realistic fracture networks. Experiments will be repeated in a 4<sup>th</sup> fracture network that has been extensively characterized by Anna Suzuki both experimentally and through modelling on the IFS supercomputer.

Next steps will involve using a persistent homology approach to flow modelling to identify how changes in fracture topology influence fracture flow, and directly modelling how MICP influences thermal properties of the fracture network.

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
[1] A. Suzuki, M. Miyazawa, J. M. Minto, T. Tsuji, I. Obayashi, Y. Hiraoka, and T. Ito: Flow estimation solely from image data through persistent homology analysis, *Scientific Reports*, 11 (2021), 17948.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[2] A. Suzuki and J. Minto: Data-driven modelling of flow in complex structures, *Proc. the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2021).

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable

(Award) Not applicable

(Press release)

[1] 東北大学プレスリリース・研究成果 HP, 複雑な構造の"かたち"から"ながれ"を直接予測  
岩石内の流体流動をトポロジーによって読み解く, 2021.9.22,  
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/09/press20210922-01-flow.html>

[2] 子供の科学 2021 年 12 月号, “岩石内の水の流れがトポロジーで解ける!”, 2021. 11. 10

[3] 日刊工業新聞, 2021. 9. 24

[4] JSTnews, さきがける科学人, 2021. 9. 1

References:

[1] J. M. Minto, E. MacLachlan, G. El Mountassir, and R. J. Lunn: Rock fracture grouting with microbially induced carbonate precipitation, *Water Resources Research*, vol. 52, no. 11, (2016) pp. 8827–8844. <https://doi.org/10.1002/2016WR018884>

[2] J. M. Minto, F. F. Hingerl, S. M. Benson, and R. J. Lunn: X-ray CT and multiphase flow characterization of a ‘bio-grouted’ sandstone core: the effect of dissolution on seal longevity, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 64, (2017) pp. 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.07.007>

[3] C. M. Kirkland et al.: Visualizing MICP with X-ray  $\mu$ -CT to enhance cement defect sealing, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 86, no. April, (2019) pp. 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.04.019>

[4] R. Cardoso et al.: The influence of stone joints width and roughness on the efficiency of biocementation sealing, *Construction & Building Materials*, vol. 283, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122743>

[5] A. Suzuki, J. M. Minto, N. Watanabe, K. Li, and R. N. Horne: Contributions of 3D Printed Fracture Networks to Development of Flow and Transport Models, *Transport in Porous Media*, vol. 129, no. 2, (2019). <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1154-7>

[6] A. Suzuki et al., “Flow estimation solely from image data through persistent homology analysis,” *Sci. Rep.*, 2021.

Project code	J21I063
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## Geothermal Onsen Seminar

Anna Suzuki\*†, Roland N, Horne\*\*††  
 Ayaka Abe\*\*, Yuran Zhang\*\*, Halldora Gudmundsdottir\*\*  
 \*Institute of Fluid Science, Tohoku University  
 \*\*Energy Resources Engineering, Stanford University  
 †Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Geothermal development requires comprehensive understanding of fluid flow in reservoirs by evaluating from various viewpoints. In this seminar, we will introduce our recent research related to hydraulic, thermal, mechanical, and seismological perspective and discuss technologies and social acceptance required for sustainable geothermal development.

### 2. Details of program implement

We have used the international collaboration research to hold a Geothermal Onsen seminar every year for three years. By including the tour of the hot spring area in Japan and the heat utilization facilities, it was a chance to convey a great potential to overseas. In this confessional research collaboration, we would like to organize a similar seminar once a year to discuss technologies that could actually be performed in the hot spring area in Japan.

### 3. Achievements

By making strong connections with the geothermal group at Stanford University, which has driven geothermal development around the world for a long time, we hope to make it easier for students and other people who graduate there to get involved in geothermal development in Japan. In particular, geothermal researchers tend to take a large-scale perspective, but the use of hot springs is also a great use of geothermal energy, and I think it is of great value to spread the way of using geothermal resources to all over the world. In addition, from the perspective of overseas researchers, I would like to think about breakthroughs that can overcome the decline of hot spring areas in Japan and promote geothermal development research with a win-win relationship.

### 4. Summaries and future plans

Due to the COVID-19, we were not able to get together, so we returned all the funds.

### 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	J21I064
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## Evaluation of Defects in CFRP Material Based on High Frequency Eddy Current Testing Method

Zhenmao Chen\*†, Tetsuya Uchimoto \*\*††

Shejuan Xie\*, Wei Guo\*, Yali Du\*, Hong-En Chen\*, Toshiyuki Takagi \*\*

\*School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China

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

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Based on the high frequency eddy current testing (ECT) systems and numerical simulation codes of both sides, the aim of this collaboration project is to develop numerical methods and codes for forward and inverse analysis of ECT signals due to defect in a carbon fiber reinforced polymer (CFRP) material of anisotropic electric property and to experimentally evaluate the feasibility of the high frequency ECT technique for quantitative NDT of the CFRP structures.

### 2. Details of program implement

In this FY year's project, a hybrid numerical scheme for reconstruction of defect profile from high frequency ECT signals is proposed, implemented and validated with both the simulated and measured signals for cracks in a specimen of CFRP plate in order to quantitatively evaluate the defects in a typical CFRP structure. At first, a hybrid inversion scheme based on the conjugate gradient optimization method and the genetic algorithm is developed based on the fast forward solver for ECT signals due to defect in the anisotropic CFRP plate. Second, CFRP test-pieces with artificial defects is designed and fabricated and a high frequency ECT system is established with a home-made high frequency ECT probe, a bridge circuit and a high frequency lock-in amplifier. Third, both the simulated and the measured ECT signals due to artificial defects in the CFRP test-pieces are adopted to reconstruct the profile of the defects of different size. A good agreement between the true and the reconstructed defect sizes revealed that the hybrid inversion scheme of both the deterministic and the stochastic optimization method is more efficient for sizing defects in the CFRP plate from high frequency ECT signals compared with both the independent inversion method.

For ECT inversion, the defect profile parameters can be obtained by solving an optimization problem to find the best parameter values minimizing the objective function. The key procedure of the Conjugate Gradient (CG) method in deterministic optimization category to solve the optimization problem is to use a model based iteration scheme. The CG can give fast convergence but may be not convergent to true value because of the local minimum problem. On the other hand, the Genetic Algorithm (GA) of stochastic category solves optimization problem by updating the population of randomly generated individuals generation by generation through crossover and mutation. GA gives solution of global minimum but needs a lot of forward simulations, i.e. huge computational burden. To take advantage of both the GA and the CG method, a hybrid inversion scheme is proposed in this work by taking the results of GA at proper

generation as initial value of CG. The major process of the hybrid inversion scheme to reconstruct the crack in CFRP material consists of the following 3 steps, i.e., 1) Obtain  $\{b_{GA}^*\}$  from  $\{z^{exp}\}$  with the GA method; 2) Choose the initial solution of CG as  $\{b\}=\{b_{GA}^*\}$ ; 3) Get the final solution of  $\{b^*\}$  with the CG algorithm.

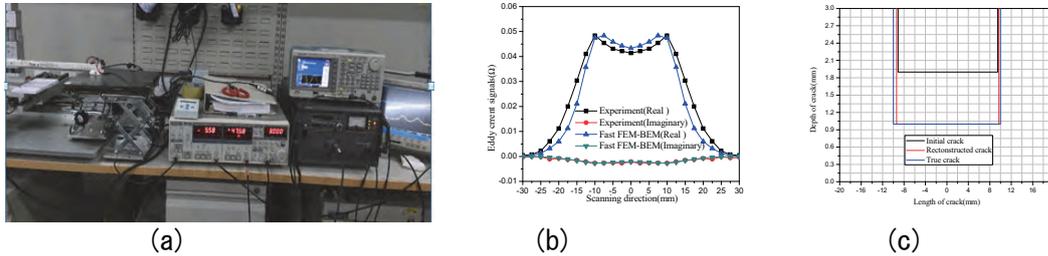


Figure 1 (a) High frequency ECT system, (b) Comparison of measured and simulated signals, (c) Defect profile reconstruction results

### 3. Achievements

A high frequency ECT system is set up to prove the validity of the new inversion scheme. A photo of the testing system is shown in Fig.1(a). Fig.1(b) gives a comparison of the measured and the simulated ECT signals of the same defect which reveals the validity of both the testing system and the forward solver. From the measured ECT signals, two cracks in the CFRP test-piece plate are reconstructed with the new inversion scheme. The reconstructed crack profile of the new inversion method is  $\{-9.4, 9.7, 2.0\}$  for the crack A (see Fig.1(c)), and the true crack depth of 1.5 mm was reconstructed as 1.4 mm and the 20 mm crack length was exactly reconstructed for the crack B. Both cracks were properly reconstructed with satisfied accuracy by using the new hybrid inversion scheme.

### 4. Summaries and future plans

In this year's project, a hybrid numerical method and corresponding code were developed for sizing the fiber broken defect in CFRP material from the high frequency ECT signals by using a numerical model of a crack in anisotropic plate. The validity of the new scheme was proved by using both the simulated and experimental signals for slit cracks and laboratory environment. As future work, the validity and efficiency of the fast forward and hybrid inversion scheme developed in this project will be further investigated by using more realistic defect in CFRP plate and considering the noise of environment such as that due to the probe wobbling and the specimen curvature.

### 5. Research results (\*reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - \*[1] Q Yang, S Xie, K He, Y-E Chen, Z Chen, T Uchimoto, T Takagi, A novel circumferential eccentric eddy current probe and its application for defect detection of small-diameter tubes, *Sensors and Actuators A*, Vol.331 (2021), 113023(11 pages, 10.1016/j.sna.2021.113023).
  - [2] M. He, P. Shi, S. Xie, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi, A numerical simulation method of nonlinear magnetic flux leakage testing signals for nondestructive evaluation of plastic deformation in a ferromagnetic material, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.155(2021), 107670(12 pages, 10.1016/j.ymsp.2021.107670).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

[3] W\_Guo, S\_Xie, Z\_Chen, Y\_Du, T Takagi, T Uchimoto, Evaluation of Defects in CFRP Plates Based on High Frequency Current Testing, *Proc. 11th Int. Symp. on Advanced Fluid Information (AFI2021)*, CFR-30, Sendai, 1-2, 2021.

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

Project code	J21I065
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## Detecting and locating microseismic events at Groningen as a natural laboratory for understanding induced seismicity mechanisms

Norimitsu Nakata\*†, Yusuke Mukuhira\*\*††, Sun Jingyi\*\*

\*Earth, Atmosphere and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Induced seismicity has been a hot topic for at least a decade and intensively studied their mechanisms, relation with human activities, and hazard mitigation. The Groningen gas field at the Netherlands has a history of gas production and geophysical data observation including seismic, geodesy, and borehole measurements. Here, we propose to mainly use seismic datasets to detect and locate small earthquake events, which is key to obtain comprehensive view of the mechanisms of induced seismicity related to existing faults and injected/produced fluid. From continuous seismic data, detecting small events that have comparable energy to background noise is not trivial. Finding the location of their hypocenter is also problematic. The Groningen site has very dense borehole network (60 boreholes in a 40x60 km<sup>2</sup> area), and application of our developed processing techniques to such datasets can potentially provide much higher accuracy for detection and location. With the detected events, we can visualize the subsurface dynamics related to human activities and seismicity, which strengths the security and reliability of subsurface fluid resource production and operation.

### 2. Details of program implement

We introduced the new signal processing method to detect the S-wave arrival. The standard spectral matrix (SPM) analysis can catch the feature of linear particle motion at P-wave arrival, but cannot evaluate the particle motion of S-wave arrival, which is ellipsoidal shape and shows the perpendicularity to the direction of P-wave arrival direction.

We have developed the new signal processing method called extended SPM by introducing delay coordinates. Extended SPM matrix is 2-rank Hermitian matrix and we can conduct eigen-decomposition on extended SPM matrix to divide the S-wave particle motion features and other two bases. First complex eigen value and vector can be used to evaluate the shape of particle motion and perpendicularity to the P-wave arrival direction.

We implemented these signal processing method and evaluated the performance with synthetic signals and real microseismic waveforms from the Groningen gas field, Netherland. Our method successfully detected the S-wave arrivals and provide P-S travel time, which conventional amplitude basis method was not able to detect. The result of P-S travel time at several seismic stations shows the reasonable value as P-S travel times slightly decrease with the depth of the stations (Figure 1).

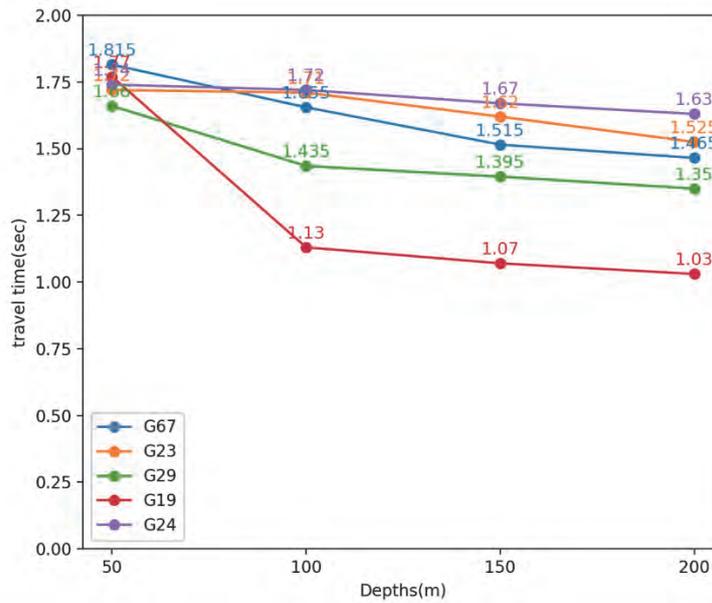


Figure 1 : P-S travel time results of low SNR event detected by our method at all stations. Note that conventional STA/LTA cannot detect S-wave arrival.

### 3. Achievements

We newly developed the method to detect the S-wave arrival of low SNR events associated with P-wave arrival. The P-S travel time provided by our method is the necessary information to locate the hypocenter of low SNR event which is extremely important to characterize the physical phenomena in the reservoir.

### 4. Summaries and future plans

We have extended our SPM analysis by introducing delay coordinates and proposed as extended SPM analysis, which can evaluate the flatter and two dimensional particle motion at S-wave arrival. We will apply the result of P- and S- wave arrival detection results as P-S travel time to hypocenter determination process.

### 5. Research results

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

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

[1] Sun, J., S., Mukuhira, Y., Nakata, N., Detection of S-wave Arrival of Low SNR Event using Polarization, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-13, pp. 30-32.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)  
Not applicable

(Award)  
Not applicable

(Press release)  
Not applicable

課題番号	J21I066
区分	一般公募共同研究
課題分野	基礎分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

## Unsteady Aerodynamics of Axially Oriented Low Fineness Ratio Cylinders

Colin Britcher\*†, 大林 茂\*\*††

\*Old Dominion University, \*\*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

鈍頭物体 (Bluff Body) は非流線形状の物体を指し, 物体前縁から剥離した流れが大規模で複雑な後流構造を形成することが知られており, 流体力学の現象としても重要である[1, 2].

鈍頭物体の形状を決定するパラメータの1つに細長比がある. 細長比とは円柱の場合, 直径  $D$  と長さ  $L$  の比を示し, 長方形の場合は幅  $W$  と長さ  $L$  の比を示す. 細長比などの物体の形状を決めるパラメータを系統的に変化させると, その物体の空力特性も大きく変化することが知られている. 中口らは矩形 2 次元柱の細長比と抵抗係数の関係について調査を行い, 抵抗係数が極大値を示す細長比の存在を報告した[3].

鈍頭物体の1つである円柱に関しては, 多くの研究事例が存在する. その中の1つ, 気流に平行に支持された円柱の 3 次元流れに関する細長比と抵抗係数の関係は Roberson らがスティング支持で実験的に調査している[4]. しかし円柱の場合, 前縁で剥離した流れが物体後流で逆流領域や 3 次元的な渦構造を形成することから, 支持装置との干渉により気流の非対称性や渦崩壊などを引き起こし, 空気力計測に影響を及ぼしていると考えられる. したがって, 正確な空気力を計測するためには支持干渉の影響を受けることなく非接触で計測が実施できる実験装置が必要とされる.

支持干渉のない実験装置の1つとして挙げられるのが, 磁力支持天秤装置 (Magnetic Suspension and Balance System : MSBS) である. MSBS は磁気力によって模型を浮揚させ, 模型の位置・姿勢角を多自由度制御することが可能である. また, 制御電流値から空気力を非接触で得ることができる. MSBS を用いた円柱の抵抗係数および背圧係数の計測は, 過去に澤田らや樋口らによって行われている[5-9].

物体の空力特性を調査・評価する手段は主に, 風洞試験と数値流体力学 (CFD) の2つである. このうち風洞試験では, 阻塞効果 (Blockage Effect) という現象が知られている[10]. 阻塞効果には, solid blockage effect (模型阻塞効果) と wake blockage effect (伴流阻塞効果) の2種類がある. 風洞試験では, 個体壁に囲まれた流路内に対象となる模型を設置する. すると模型前面投影面積の分だけ流路の有効断面積が減少するため, 連続の法則を満たす超音速流れの性質により流れが加速するが, これを solid blockage effect という. 一方で模型の後方に wake が生じ, その外側の流れが増速し solid blockage effect と同様の現象が起こるが, これを wake blockage effect という. この阻塞効果により, 模型に作用する空気力計測に影響を及ぼすことがある. 大気中を飛行する飛行機や, 大気中を落下する物体などの空力特性を推定・評価する際には, 阻塞効果を考慮することが重要である. 模型を小さくすれば阻塞効果は無視できるが, この場合レイノルズ数が小さくなり必要とする流れ場にならな

いこともある。実際の流れ場を得るためには、模型を大きくすることでより大きなレイノルズ数を得る必要があるが、このような場合に阻塞効果が顕著になることがある。

これまで阻塞効果に関する研究は数々実施されてきたが、その代表的なものの 1 つに Maskell の研究がある[11]。Maskell は、先行研究により得られたいくつかの実験的事実を基にした複数の仮定を用いて、鈍頭物体の wake blockage 補正の理論を構築した。この Maskell の理論は、特に失速時における高迎角条件下での壁干渉評価に応用されている。近年、東北大学所有の 1-m MSBS で行われる鈍頭物体の風洞試験結果に対しては、この Maskell による阻塞効果の修正法が用いられている。一方で solid blockage 補正に関しては、Lock[12]、Thompson[13]らによる研究事例がある。また磁力支持天秤装置を用いた阻塞効果に関する研究事例としては、澤田らが細長比 4.0 の円柱を複数試験し、大きな体積を有する円柱の阻塞効果に対する新たな補正法を提唱した研究がある[14]。しかしながら、支持干渉を排除した状態で空気力計測が可能となる磁力支持天秤装置を用いた阻塞効果に関する研究は、この澤田らの例を除けばほとんど見当たらない。

そこで 3 年目となる本研究では、東北大学流体科学研究所所有の 1-m 磁力支持天秤装置を用いて、阻塞率を種々の値に変化させた際の円柱の阻塞効果について調査・考察することを目的とした。またその際、wake blockage 補正法として代表的な Maskell の理論の適用可能性についても考察した。

## 2. 研究成果の内容

本研究には、東北大学流体科学研究所が所有する低乱熱伝達風洞 (Low-Turbulence Wind Tunnel, LTWT) を使用した。低乱熱伝達風洞は単路回流型であり、測定部は正八角形、対辺距離は 1.01m である。MSBS 取り付け時の風速は 5 m/s~70 m/s である。

本研究では、種々の阻塞率で試験を実施するため、断面直径 85 mm, 200 mm, 250 mm の 3 つの円柱模型を使用した。ここではそれらの模型のうち、断面直径 200mm の模型の構造を、Fig. 1 に示す。これらの模型はすべて細長比を 2.0 に固定し、断面直径と長さを変えることで 3 種類の閉塞率を実現した。ここで 3 つの模型のうち、断面直径 200 mm の円柱模型の実験結果については、同じ 1-m MSBS を用いて過去に野々村らが実施した試験の結果を引用した[15]。Table 1 にそれぞれの模型の諸元を示す。ここで、 $L/D$  は細長比、 $D$  は模型の断面直径、 $L$  は模型の一樣流方向長さ、 $S$  は模型の一樣流方向に垂直な断面積、 $C$  は低乱熱伝達風洞の通風断面積、したがって  $S/C$  は閉塞率を示す。模型の断面直径は、レイノルズ数、閉塞率、実現できる模型の最小長さ等を考慮して決定した。風洞閉塞率は小さいもので 1% を切り、大きいもので約 5.8% に至る。また模型に内挿したネオジム磁石の諸元を Table 2 に示しており、Table 2 における磁石番号は、Table 1 における模型番号に対応する模型に内挿したことを示す。

Table 1 模型の諸元

No.	$L/D$	$D$ [mm]	$L$ [mm]	$S/C$ [%]
1	2.0	85	170	0.671
2 [15]	2.0	200	400	3.72
3	2.0	250	500	5.81

Table 2 ネオジム磁石の諸元

No.	グレード	$D$ [mm]	$L$ [mm]
1	N55	50	60
2 [15]	N54	100	100
3	N54	65	260

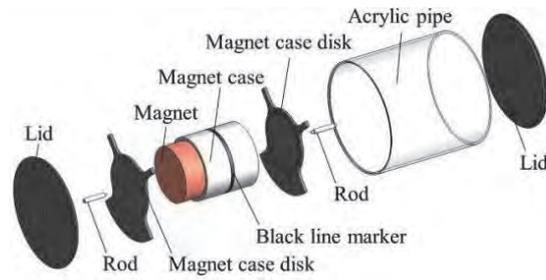


Fig. 1 模型の構造 [15]

本試験における実験条件を、Table 3 に示す。風速は 1-m MSBS における先行研究のレイノルズ数と合わせるように設定した。

Table 3 試験条件

	No. 1	No. 2	No. 3
細長比		2.0	
レイノルズ数		$1.0 \times 10^5, 1.3 \times 10^5$	
迎角 [deg]		0	
閉塞率 [%]	0.671	3.72	5.81
サンプル点数		8192	

Table. 4 には、レイノルズ数  $Re = 1.0 \times 10^5$  における本試験および野々村らの実験により得られた抵抗係数を示す。Table. 4 から、閉塞率が大きくなるほど抵抗係数が大きくなる事が分かる。

Table 4 抵抗係数

No.	$D$ [mm]	$SC$ [%]	$C_D$
1	85	0.671	0.779
2 [15]	200	3.72	0.863
3	250	5.81	0.919

Fig. 2 には、本研究で得られた結果を用いて作成した、レイノルズ数  $Re = 1.0 \times 10^5$  における  $C_D SC$  と  $C_D$  の関係を示す。Fig. 2 における近似直線は、最小二乗法を用いて算出したものである。また Table 5 には、本研究において得られたレイノルズ数  $Re = 1.0 \times 10^5$  における Blockage Factor を示す。

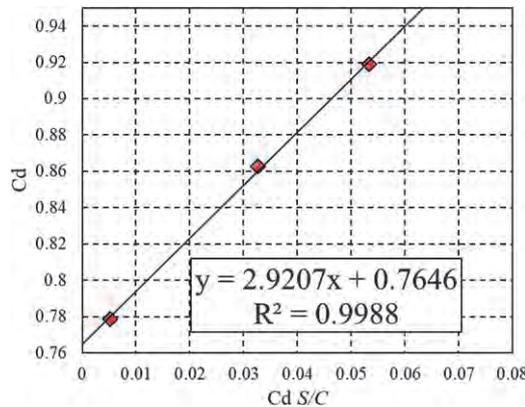


Fig. 2  $C_D S/C$ と $C_D$ の関係

Table 5 Blockage Factor

$C_{D,corr}$	$\varepsilon$	$C_{D,corr}$	$C_{D,corr}$	$\varepsilon$
2.921		0.7646	0.7605	3.820

本研究結果では、Maskell [11] の提唱する Blockage Factor である  $\varepsilon = 2.5$  を大きく上回る値となった。細長比 2.0 の円柱の blockage Factor については、Maskell が実験的に得た blockage Factor である  $\varepsilon = 2.5 \pm 0.25$  の範囲から大きなずれを生じる結果となった。この結果は、JAXA 60cm 磁力支持天秤装置を用いて澤田らにより実施された細長比 4.0 円柱の風洞試験結果と同じ傾向を示した[14]。細長比 2.0 の円柱は、物体後流で再付着が生じると考えられており、Maskell の理論の仮定とは異なっていることが原因の 1 つとして考えられる。そこで抵抗係数  $C_D$  および  $C_D S/C$  (wake blockage parameter) から  $C_{D,corr}$  を算出する方法は適用できないと考えられるため、抵抗係数  $C_D$  および阻塞率  $S/C$  の関係から、新たに  $C_{D,corr} = 0.7605$  を算出した。これ以降の考察においては、この値を  $C_{D,corr}$  であるとする。

Maskell の blockage 補正は、模型後流に生じる wake による見かけ上の流路の阻塞である wake blockage の補正に焦点を当てている。これまでの 1-m MSBS における鈍頭物体の風洞試験結果に対しては、円柱形状については Maskell の blockage factor  $\varepsilon = 2.5$  を用いて blockage 補正が行われてきた[15]が、個体壁測定部内の模型の存在により流路が狭まり、亜音速流れの性質により流れが加速する solid blockage についても考慮が必要であると考えられるため、以下では solid blockage 補正について考察する。

3次元流れにおける solid blockage 補正については、様々な方法が提案されている。Lock は、風洞の一様流方向に沿った回転体の solid blockage factor を提唱した[12]。また Thompson は、2次元翼型、回転体、有限翼などの solid blockage factor を提唱した[13]。本研究では Lock により提唱されている方法を用いる。

Fig. 3 には、No.1~No.3 の各模型についてレイノルズ数と blockage 補正後の抵抗係数の関係を示す。ここで、 $C_d$  は、blockage 補正前の抵抗係数、 $C_d$  (Maskell) は、Maskell の wake blockage 補正のみ行った後の抵抗係数、 $C_d$  (Lock) は、Lock の solid blockage 補正のみ行った後の抵抗係数、 $C_d$  (combined) は、Maskell の wake blockage 補正および Lock の solid blockage 補正の両方を行った後の抵抗係数を示す。

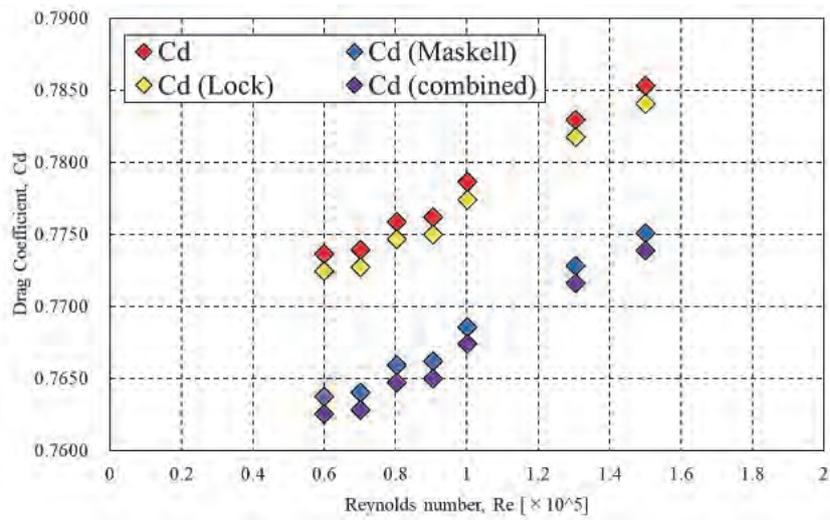


Fig. 3 (a) レイノルズ数と抵抗係数の関係\_(No.1)

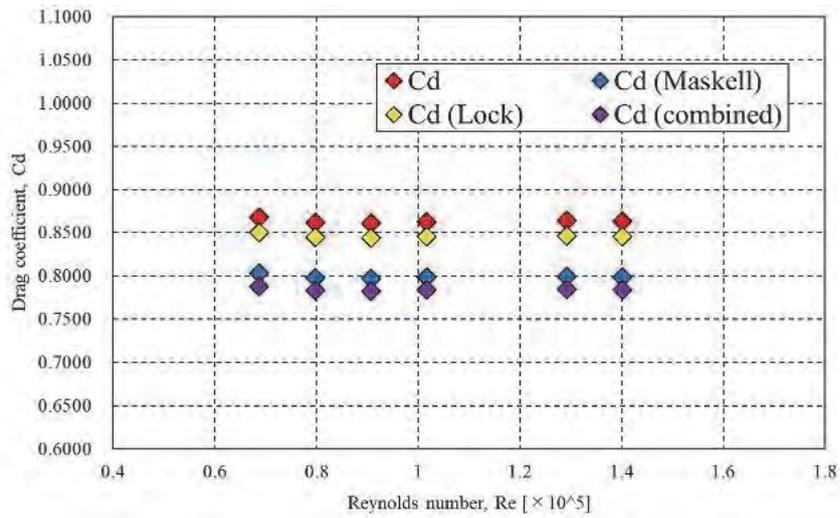


Fig. 3 (b) レイノルズ数と抵抗係数の関係\_(No.2)

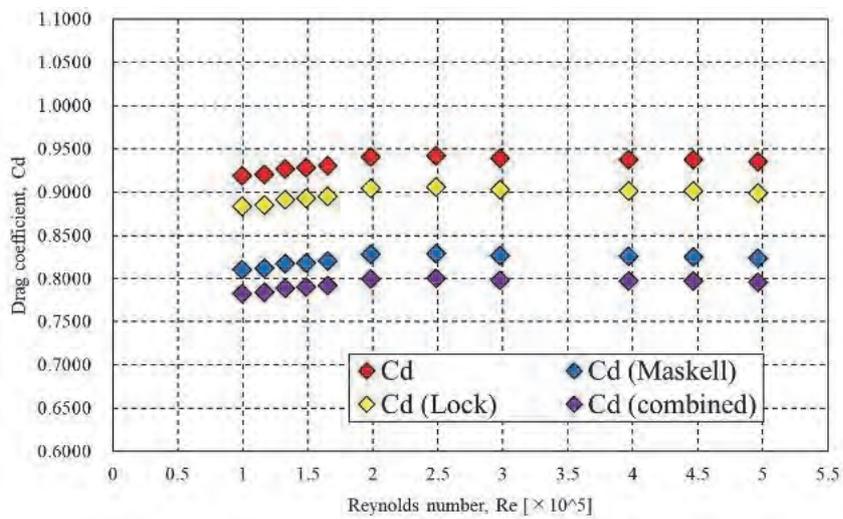


Fig. 3 (c) レイノルズ数と抵抗係数の関係\_(No.3)

Fig. 3 から、レイノルズ数  $Re=1.0 \times 10^5$  における solid blockage 補正および wake blockage 補正の両方の blockage 補正を行った場合の抵抗係数は、Table 2 に示す  $C_{D,corr}$  に最も近い値を示すことが分かる。 $C_{D,corr}$  は無限に広がる一様流中における抵抗係数と考えられるため、本研究における blockage 補正は正常に機能していると考えられる。また本誌には掲載していないが、その他のレイノルズ数についても、同様の傾向を示した。一方でいずれの補正結果についても、完全には  $C_{D,corr}$  と一致しておらず、特に阻塞率が大きい模型ほど  $C_{D,corr}$  に対する補正量が不足していることが分かる。この原因としては、模型の細長比だけではなく、模型自体の長さや体積が影響している可能性が否定できないが、未だ詳細な原因究明には至っていない。

以上の結果から、物体前縁から剥離した流れが後流において再付着を生じる円柱については、solid blockage 補正のみ、あるいはこれまで 1-m MSBS で行われてきた円柱の風洞試験の際に用いられてきた Maskell の wake blockage 補正のみでは不足していると考えられる。したがって blockage 補正を適切に行うためには、少なくとも solid blockage 補正および wake blockage 補正の両方の補正を行うことが必要であると考えられる。補正量の不足については、その他にどのような要因が関係しているかは今後より詳細に研究を進める必要がある。

#### 参考文献

- [1] E. Berger, D. Scholtz, M. Schumm, “Coherent Vortex Structures in the Wake of a Sphere and a Circular Disk at Rest and Under Forced Vibrations”, *Journal of Fluids and Structures*, 4, pp. 231-257, 1990
- [2] 小林敏雄, “Bluff Body に作用する流体力”, 生産研究, 24 巻, 1 号, 1972
- [3] 中口博, 橋本喜久裕, 武藤真理, “矩形断面の柱の抗力に関する一実験”, 日本航空宇宙学会誌 16, pp.1-5, 1968
- [4] John A. Roberson, Chi Yu Lin, G. Scott Rutherford, Marvin D. Stine, “Turbulence effect on drag of sharp-edged bodies”, *J. Hydraulics Division*, 1187-1203, 1972
- [5] 澤田秀夫, 国益徹也, 須田信一, 御簾納徹, 樋口博, “気流に平行な円柱の背圧と細長比の関係”, 第 37 回流体力学講演会, 2005
- [6] 澤田秀夫, 国益徹也, 須田信一, 御簾納徹, 樋口博, “細長比 1.27 から細長比 1.79 までの気流に平行な円柱の抵抗と背圧”, 日本風工学会論文集, Vol.32, No.3, pp.113-116, 2008
- [7] 澤田秀夫, 樋口博, 加藤裕之, 国益徹也, “磁力支持風洞における円柱の非接触計測”, 日本風工学会論文集, Vol.33, No.3, pp.115-120, 2008
- [8] 澤田秀夫, 樋口博, 国益徹也, 須田信一, “気流に平行に磁力支持された円柱の抵抗係数”, 日本風工学会論文集, Vol.29, No.4, pp.55-62, 2004
- [9] H. Higuchi, H. Sawada, H. Kato, “Sting-free measurements on a magnetically supported right circular cylinder aligned with the free stream”, *J. Fluid Mech*, vol.596, pp.49-72, 2008
- [10] 進藤章二郎, 低速風洞実験法, コロナ社, pp. 5-7, 70-71, 1992.

- [11] E. C. Maskell, “A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wing in a closed Wind Tunnel”, R&M, No.3400, ARC, 1965
- [12] C. N. H. Lock, “The Interference of a Wind Tunnel on an Symmetrical Body”, Reports and Memoranda, No. 1275, 1929
- [13] C. R. Pankhurst, and W. D. Holder, “Wind- Tunnel Technique”, Pitman, London, pp. 327-348, 1952
- [14] H. Sawada, H. Sugiura, R. Konomi, “An Experimental Study about the Blockage Effects on Circular Cylinders Aligned with Uniform Flow”, Eighth International Conference on Flow Dynamics, 2011
- [15] T. Nonomura, K. Sato, K. Fukata, H. Nagaike, H. Okuizumi, Y. Konishi, K. Asai, H. Sawada, “Effect of fineness ratios of 0.75-2.0 on aerodynamic drag of freestream-aligned cylinders measured using a magnetic suspension and balance system”, Experiments in Fluids, 2018
- [16] K. Batchelor, “Interference on Wings, Bodies and Airscrews in a Closed Tunnel of Octagonal Section”, Australian Council for Aeronautics. 5, 1944

### 3. 研究目標の達成状況

当初予定よりも成果をあげることができた。

### 4. まとめと今後の課題

3年間の公募共同研究で、気流中に並行に支持された低細長比の円柱周りの流れ場について、その詳細を明らかにし、また風洞の阻塞効果についても研究を行うことができ、当初予定よりも成果をあげることができた。これらの成果の journal 論文が残された課題である。

### 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] Masahide Kuwata, Yoshiaki Abe, Sho Yokota, Taku Nonomura, Hideo Sawada, Aiko Yakeno, Keisuke Asai, and Shigeru Obayashi: Flow characteristics around extremely low fineness-ratio circular cylinders, *Physical Review Fluids*, Vol.6, No.5, pp.1-14, (2021.5.27). IF: 2.537

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] R. Makino, Y. Wajima, M. Horiguchi, H. Okuizumi, K. Asai, S. Obayashi: Measurements of Aerodynamic Characteristics of Square-Cylinder Models with Low Fineness Ratio Using 1.0-m Magnetic Suspension and Balance System, *ICFD2021*, (2021.10.29).
- [3] H. Okuizumi, H. Sawada, Y. Konishi, S. Obayashi, K. Asai: Position Sensing Method for Rotating Sphere in 1-m Magnetic Suspension and Balance System, *ICFD2021*, (2021.10.29).

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（受賞）日本機械学会流体工学部門賞受賞(2021.11.9)

Project code	J21I067
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

Novel insights into the co-combustion of carbonyl compounds and hydrocarbon fuels

Denis Knyazkov\*†, Hisashi Nakamura\*\*††  
Artem Dmitriev\*, Ksenia Osipova\*

\*Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

To develop a predictive chemical kinetic model describing interaction between surrogate fossil fuel and different structurally isomeric carbonyl compounds (aldehydes and ketones). This model will help in optimal selection of oxygenated additives to conventional fuels. The work involves both theoretical and experimental parts to provide the best reliance.

### 2. Details of program implement

n-Heptane/toluene (7:3 by volume of liquids) mixture was chosen as a surrogate model of a typical fossil fuel. The structure of a fuel-rich n-heptane/toluene/O<sub>2</sub>/Ar burner-stabilized flames was studied earlier, and thus this flame was chosen as a base flame in this work. The effect of propanal and acetone additive (15% in mole basis to fuel) on the oxidation and combustion products is studied in the current work experimentally and numerically.

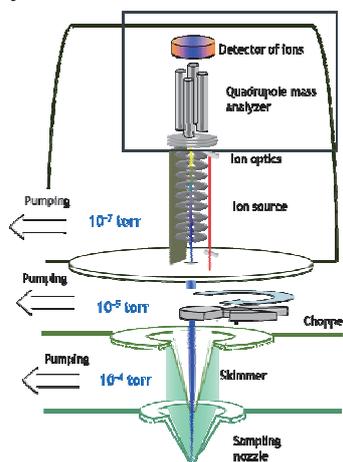


Figure 1 : Schematic of flame sampling molecular beam mass spectrometric setup for flame examination.

Flame sampling molecular beam mass spectrometry (schematic of the setup is shown in Fig. 1) was used for measurements of mole fraction profiles of reactants, intermediate and major products of high temperature oxidation in fuel-rich ( $\phi=1.6$ ) premixed laminar burner-stabilized flames fuelled by n-heptane/toluene/acetone (or propanal) at atmospheric pressure (in Novosibirsk).

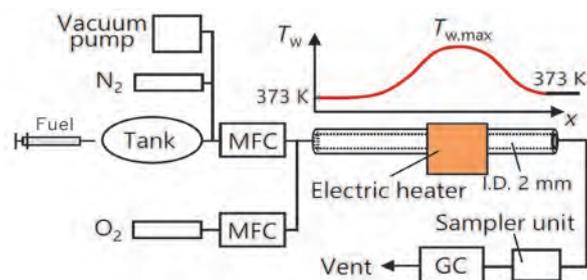


Figure 2 : Experimental setup for studies of low-temperature oxidation processes in the microflow reactor.

Oxidation products of the similar fuels in the temperature range from 800 to 1100 K in a microflow reactor with a controlled temperature profile were measured using gas-chromatography technique (in Sendai). The schematic of the experimental setup is provided in Fig. 2. Numerical simulation of the experimental data was performed using detailed chemical kinetic mechanisms available in literature for combustion and oxidation of n-heptane/toluene mixtures and acetone and propanal.

### 3. Achievements

Ten flames in total are investigated with different content of the oxygenates in the fuel mixture: 0% (base flame), 2.5%, 5%, 10%, and 20%. Experimental data on the chemical speciation of the flames of n-heptane/toluene with and without acetone(propanal) have demonstrated that addition of propanal or acetone reduces the peak mole fractions of such intermediates, like benzene, phenol, and ethyl benzene in the flame. Figure 3 exemplarily shows a comparison of the effect of propanal and acetone on the peak mole fraction of benzene. The signals corresponding to the peak mole fraction of this intermediate are normalized to its value in the base n-heptane/toluene flame. As seen from the figure, both oxygenates are similar in their effectiveness of the reduction of benzene mole fraction. Noteworthy that the effect is not linear with the increasing the content of oxygenate in fuel. When the additive loading is small (~2% in fuel) a nearly 15% reduction of benzene is observed. However, further behavior of the curves exhibits a saturation effect. This clearly demonstrates that the oxygenates studied act not only as diluents of the “sooting” fuel with a “non-sooting” stuff, but have a chemical influence.

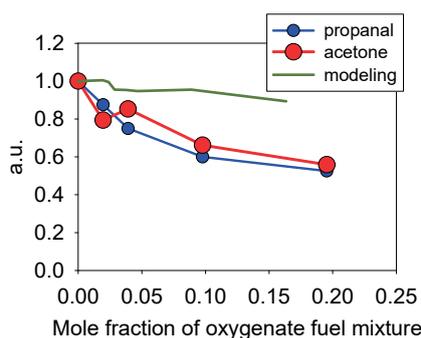


Figure 3 : Relative influence of propanal and acetone additives to fuel on the peak mole fraction of benzene in the flame of n-heptane/toluene mixture.

The modeling curves for the flame with acetone addition obtained with the detailed mechanism described above also are exemplarily plotted in Fig. 3. As one can see, the calculations demonstrate a fairly slight decrease in the peak mole fraction of benzene, particularly, when 17% of acetone are added to fuel, only less than ~10% reduction of benzene mole fraction is observed. Obviously, the influence of the oxygenates is

associated with their effect on the pool of radicals (basically, H, O, OH) in the flame. Most likely, in the mechanism used, the fuel specific reaction pathways require a more careful consideration to improve the agreement with the experimental data.

Although acetone and propanal have similar effectiveness as soot formation suppressants in the flame, the experimental data obtained using the microflow reactor demonstrate that acetone exhibits a slightly higher effect on the mole fractions of light hydrocarbons than propanal. This is demonstrated exemplarily in Fig. 4, which shows the mole fractions of ethylene and acetylene measured at the microflow reactor outlet at different maximum temperatures of the reactor. As seen clearly, at 1000 K the lower mole fractions of ethylene and acetylene are observed, when acetone is added as compared to propanal additive. Most likely this is associated with the influence of these oxygenates on the ethyl and methyl radicals in the reactor. Particularly, when propanal is added higher concentrations of the chain carrier  $C_2H_5$  are expected, while higher mole fraction of methyl radical, inhibitor on the fuel reactivity, is produced when acetone is present in the mixture. Nevertheless, further study of the effect of the structure of the parent oxygenated additive on the low temperature oxidation of fossil fuel surrogate is needed.

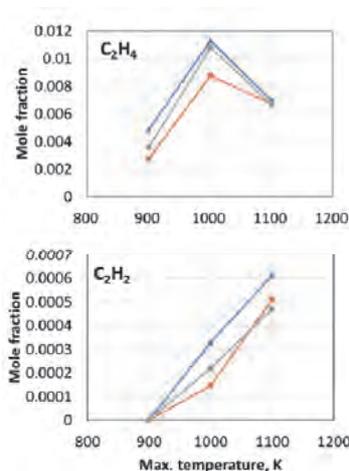


Figure 4 : Mole fractions of ethylene and acetylene measured at the microflow reactor outlet at different maximum temperatures of the reactor.

#### 4. Summaries and future plans

The study clearly demonstrates that the isomeric additives examined in this work are equally effective in flame conditions in their influence on the production of intermediates taking part in soot formation; however their effect in low temperature oxidation conditions on the composition of final products is different. This indicates that the structure of the parent oxygenate is of importance when searching effective oxygenated soot reduction additives to transportation fuels. Therefore, further research is needed to improve the prediction ability of the kinetic models for blended fossil fuels and oxygenates.

#### 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] [Artem Dmitriev](#), Keisuke Kanayama, [Ksenia Osipova](#), Shintaro Takahashi, [Andrey Shmakov](#), Takuya Tezuka, [Denis Knyazkov](#), Hisashi Nakamura, Kaoru Maruta:

Isomer-specific influence on kinetics of oxidation and combustion of n-heptane/toluene/propanal and n-heptane/toluene/acetone mixture, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021)*, CRF-68 (2021.10.29)

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J21I068
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility of humans and materials
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

Multifunctional hybrid filaments comprising aligned nanocellulose and carbon nanotubes synthesized by a field-assisted flow focusing method

Anthony B. Dichiara\*†, Hidemasa Takana\*\*††

\*Bioresource Science & Engineering, University of Washington

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

This project aims to control the nanostructure of macroscale filaments by combining the hydrodynamic orientation and electric-field alignment of cellulose nanofibrils and single-wall carbon nanotubes for multifunctional sensing applications.

#### 2. Details of program implement

Due to COVID-19 restrictions, there has not been any travel or in-person meetings between the research team and the annual ICFD conference was attended remotely. To move the project forward, Zoom meetings were organized on a monthly basis and specific tasks were assigned to the different members, with the Japanese team focusing on sample preparation and the US team in charge of sample characterization and testing. Cellulose nanofibrils (CNFs) and single-wall carbon nanotubes (SWCNT) with specific characteristics were prepared at the University of Washington (UW) and shipped to Tohoku University, where they were used to produce filament nanocomposites based on the procedure established by Heather G. Wise, a UW PhD student, during the first year of the project. As-prepared filaments were then shipped back to the UW for further analysis of their structural, electrical and sensing properties, while mechanical testing was conducted at Tohoku University. The research outcomes were presented at the virtual ICFD symposium.

#### 3. Achievements

Nanocellulose filaments with up to 50 wt% SWCNTs were produced with and without application of an external electric field (100 V). As-prepared filament nanocomposites were mounted on a glass slide using silver paste for the characterization of their electrical properties. Ohmic contacts were revealed from the linear trend that emerged from the current-voltage curve. Filaments formed under an applied voltage of 100 V exhibited a 26 % reduction in resistance than their counterparts prepared in the absence of external electric field.

#### 4. Summaries and future plans

In summary, this project reports, for the first time, the continuous production of strong nanocellulose filaments comprising large quantities of highly-oriented SWCNTs. The nanoparticle characteristics were tailored to improve interfacial interactions between CNFs and SWCNTs during filament processing, which yielded remarkable mechanical properties and resistive sensing performance through alignment control of CNFs. This alignment not only directly benefits the mechanical

performance, but the conductivity is also significantly increased through intentional junctions created from the SWNT alignment. This increased conductivity from alignment also translates to a higher sensitivity and a better performance overall creating sustainable multifunctional composite filament.

The project members are currently preparing a manuscript to summarize the research outcomes. The potential of filament nanocomposites as energy generators based on a transpiration driven electrokinetic mechanism was well explored during the 3<sup>rd</sup> year of the project.

#### 5. Research results (\* reprint included)

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

- [1] 福森 賢, 高奈秀匡: 「伸長流動場を用いたナノ繊維配向に与える流路形状効果」, 混相流, Vol. 35, No. 1, pp. 134-141, (2021).
- [2] 高奈秀匡: 「セルロースナノファイバーを原料とするセルロース単繊維の高強度・高靱性化」, 油空圧技術, Vol. 60, No. 7 (2021), pp. 1-5.

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

- [3] A.B. Dichiara, H.G. Wise, H. Takana: Multifunctional Hybrid Filaments Comprising Aligned Nanocellulose and Carbon Nanotubes Synthesized by a Field-assisted Flow Focusing Method, *Proceedings of 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-20, pp. 46-47.
- [4] H.G. Wise, H. Takana, A.B. Dichiara: Multifunctional Hybrid Filaments Comprising Aligned Nanocellulose and Carbon Nanotubes Synthesized by a Field-assisted Flow Focusing Method, *Proceedings of 18th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2021), OS5-16, pp. 285-286.
- [5] H. Takana and S. Fukumori: Effect of Flow-Focusing Channel Geometry on Field-Assisted Alignment of Cellulose Nanofibrils, *Proceedings of 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), OS22-3, pp. 197-198.

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

- [1] 野口 徹 監修, 高奈秀匡 他 37 名: 「ナノカーボン・ナノセルロースの分散・配向制御技術 第II編 第11章 交流電場と流動場を組み合わせた CNF 配向法」, pp. 242-252, シーエムシー出版, ISBN 978-4-7813-1628-4, (2021).

Project code	J21I071
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

## Hybrid nanomaterials reinforcement in biolubricants

Rizky Ruliandini\*†, Nasruddin Yusuf Rodjali\*††  
Takashi Tokumasu\*\*

\*Faculty of Engineering, Universitas Indonesia

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

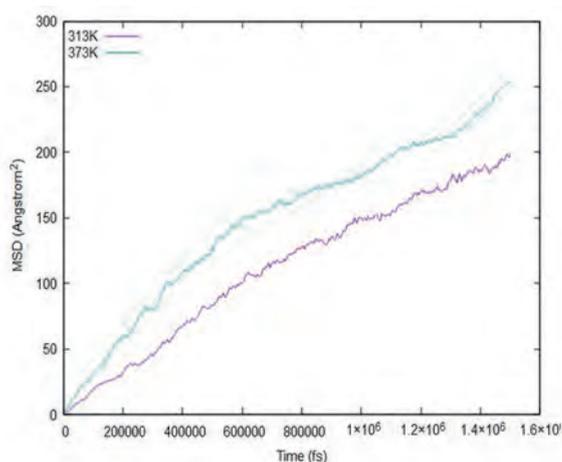
†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Visualizing the hybridization process of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mxene using molecular dynamics simulation and figure out the 'synergy effect' of hybrid nanomaterials and its impact on thermophysical properties of bio-lubricant.

### 2. Details of program implement

Performing molecular dynamic simulations, some softwares are open source that can be downloaded free of charge. As for hardware, most input files are run using the Institute Fluid Science's (IFS) supercomputer facilities under Tohoku University, Japan. The research supervisions were arranged either via emails or virtual meeting. Some of the results are shown below:



D (Å <sup>2</sup> /fs)	
313 K	0.000142045
373 K	0.000145906

Figure 1 : Effects of temperature on diffusion.

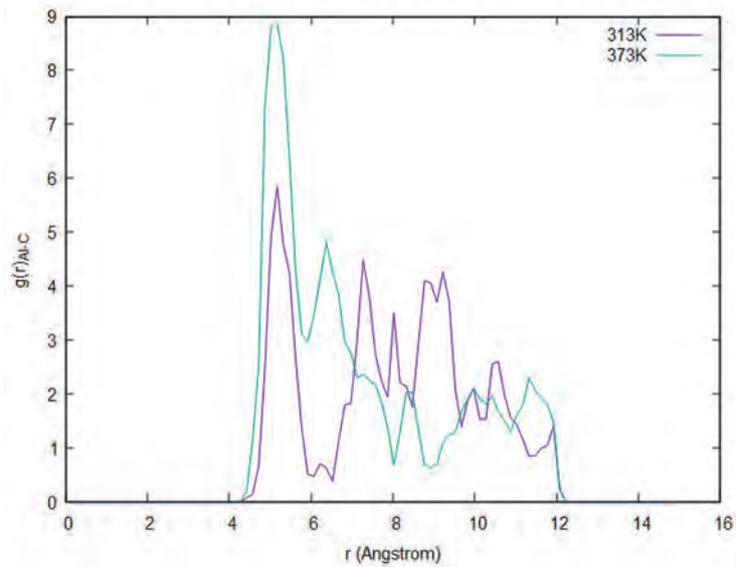


Figure 2: RDF curve at different temperatures

### 3. Achievements

This research is expected to have this following achievement:

1. Reveal the mechanism of MXene-Alumina hybridization process

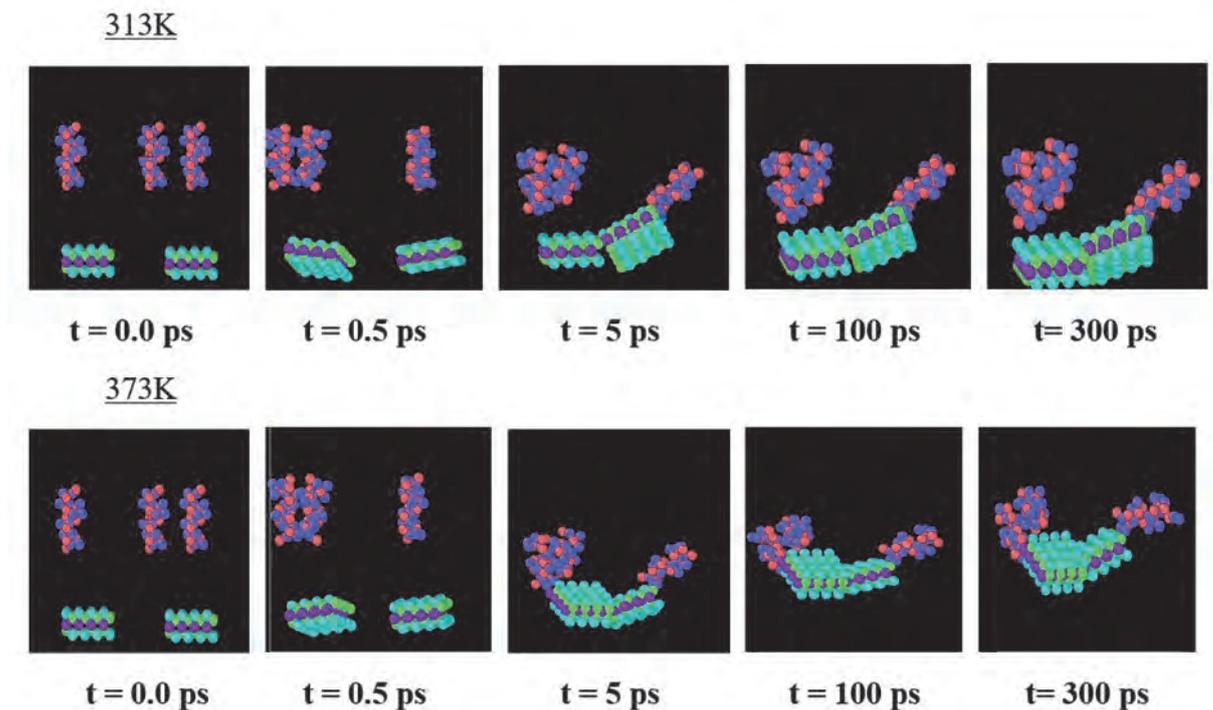


Figure 3: Visualization at T = 313K and 373K

2. Contributes the newest development in hybrid nanomaterials
3. International publication in reputable journal and conference

### 4. Summaries and future plans

In the HYBRID system at high temperatures MXene managed to attract all alumina

molecules and attached entirely on the MXene sheet surface. The presence of Alumina molecules makes MXene much more reactive, MXene takes a very short time to interact with each other. Correspondingly with alumina molecules behavior that tend to aggregate directly in a much shorter time.

Through visualization of molecular dynamics and other parameters such as diffusion coefficients, the stability of MXene/Alumina in POME based bio-lubricants has been successfully predicted. Through the RDF curve of behavior between MXene molecules, MXene molecules with POME and their response to other nanomaterials of different dimensions have also been identified.

The future plans, the thermophysical properties of the suspensions need to be more investigated. In the mean time the thermal conductivities are only for 0.1wt% of MXene/Alumina

Tabel 1. Predicted thermal conductivity

	<b>313K</b>	<b>333K</b>	<b>353K</b>	<b>373K</b>
<b>Thermal Conductivity (W/m.K)</b>	37.3	19.677	12.088	11.972

## 5. Research results

Not applicable

課題番号	J21I072
区分	一般公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	1年目

**極超音速飛翔体上の圧力場計測を目指した新型感圧塗料の開発**  
**Development of Pressure-Sensitive Paint for Realizing Pressure Field Measurement on Hypersonic Projectiles**

沼田 大樹\*†, 大谷 清伸\*\*††

\*東海大学工学部航空宇宙学科航空宇宙学専攻, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

現状において、自由飛行する物体上周りの流体现象を明らかにしようとした場合、シャドウグラフ法やシュリーレン法などの手法を用いるのが主流となっている。そのような中、Background-Oriented Schlieren 法 (BOS 法) や感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) 計測手法などの新たな技術による飛翔物体流れの解明の試みが近年試みられつつあり、点回折干渉法 (Point-Diffraction Interferometer, PDI) 等も含め、様々な計測手法のバリステックレンジ試験への適用、およびその方法論の確立を目指した研究が日々進められている。そのような中、本研究では極超音速飛翔体周りの流れに着目した。主に二段式軽ガス銃で射出される極超音速飛翔体については、試験部内を通過する時間が極めて短く、超音速、もしくは亜音速といった、比較的速度の低い領域における飛翔体計測試験に比べ、流体现象を観察し計測することの可能な時間が極めて短い。そのため、用いる計測手法には、上述の特徴に伴う様々な厳しい制約事項が付きまとう事となる。

これらを踏まえ、本研究では、極超音速飛行体上の圧力場計測手法の開発に着目し、PSP 計測技術をベースとした技術開発を目指すこととした。まず、従来、移動物体や自由飛行体上の圧力場計測に用いられていた非定常二色発光型感圧塗料を改良することとし、時間応答と発光強度を大幅に向上させることを目的とした。また、改良した感圧塗料を用いて、バリステックレンジで射出した極超音速飛行体上の圧力場計測を行い、開発した計測手法の有効性の実証も目指した。

## 2. 研究成果の内容

本研究では、極超音速飛翔体上の圧力場計測を目的とした PSP 技術の開発を目指している。それを踏まえ、本年度は、現状で最も速い時間応答特性を有する、陽極酸化型 PSP の一種である超高速応答型 PSP の発光強度その他の特性改善を通じて、目的の性能を有する PSP の開発を目指した。

まず、超高速応答型 PSP において、色素吸着条件を改善することで発光強度の向上を試みた。本年度実施した条件においては特に色素吸着時間に着目しており、従来までの超高速応答型 PSP の吸着条件からの最適化を試みた。結果として、従来までは増光を目的としたイメージインテンシファイア等を用いた計測が中心であった衝撃波現象の感圧塗料計測において、カメラと光学フィルタのみでの衝撃波現象の明瞭な可視化に成功した [研究成果 2]。図 1 に、傾斜 30° の楔模型に入射した衝撃波の反射現象に関する可視化結果を示す。図は

1 枚のみ示しているが、実際は高速度カメラにより 10  $\mu$  秒ごとに撮影を行っており、本画像はその中の 1 枚となる。また、本計測の露光時間は 2  $\mu$  秒である。図より、衝撃波面や衝撃波通過後の圧力上昇等が、明瞭に捉えられているのがわかる。また、計測された圧力値についても衝撃波理論から予測される値とおおむね一致しており、定量性も確保されていることを確認した。



図 1：衝撃波の反射現象の可視化（入射角 30°， $M_s = 1.5$ ）

### 3. 研究目標の達成状況

本年度においては、コロナ禍によりバリスティックレンジを用いた試験の機会が得られず、本来想定していた極超音速飛翔体に対する PSP 計測手法を適用するにあたっての課題点抽出等を目的とした試験が遂行できなかった。そのため、PSP 開発についても限定的な範囲にとどめざるを得なかったため、本来の想定より達成度は低い状況であった。

### 4. まとめと今後の課題

結果は限定的ながらも、目的のために利用可能な PSP の開発方針は概ね定まった。以後はバリスティックレンジ試験を通じた問題点把握も行い、更なる PSP の改良を目指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] D. Numata and K. Ohtani: Basic Research on the Surface Pressure Measurement Method for Hypersonic Projectiles Using Unsteady PSP, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-54.

[2] 岡本和也, 沼田大樹: 超高速応答型感圧塗料を用いた衝撃波現象の可視化に関する研究, 2021 年度衝撃波シンポジウム, (2021), P-15.

#### 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	J21I073
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

## Evaluation of Natural Convection Flow under Spatiotemporally Variable Thermal 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 a temporally evolving natural convection boundary layer (NCBL) adjacent to a vertical isothermal wall (Prandtl number:  $Pr = 0.71$ ). This study aims to lay the foundations for future improvements in energy technology by improving our ability to predict and control the behavior of vertical NCBLs. For the first time, we examine this convective flow, using a large scale direct numerical simulation, in the transitional and fully turbulent flow at very high Rayleigh number regimes to obtain a detailed understanding of the flow structure of very high Rayleigh number NCBLs.

### 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 in a  $3125 \times 1000 \times 3125$  cartesian grid. Preliminary results are obtained up to Grashof number  $Gr = 1.2 \times 10^8$  where the flow is turbulent enough to demonstrate the characteristics of a turbulent boundary layer. The outer bulk flow of the turbulent NCBL is well described by an integral model. The profile coefficients for the integral are  $Gr$ -independent for our DNS data presented, indicating the plume-like region is self-similar. With this self-similar integral model, characteristic scales for the plume-like region are analytically obtained in terms of power-laws. The power-law solution for the characteristic scales also reveals new insights to the  $Nu-Gr$  correlation shown in Fig. 1, since the wall heat flux is directly linked to those scales. Using these characteristic scales, the wall heat transfer is found to follow a 0.381-power-law, which is shown to be consistent with the ultimate heat transfer in the sense of Grossmann & Lohse (2011) subjected to a logarithmic correction due to the near-wall boundary layer. The logarithmic-correction term, however, is shown to slowly approaching some constant with increasing  $Gr$ . This suggests that the profile coefficients are slowly varying over large Grashof number range. At asymptotically high  $Gr$ , the logarithmic correction term would become  $Gr$ , independent and the Nusselt number is thought to follow a  $\frac{1}{2}$ -power-law (ultimate heat transfer) as in the homogeneous Rayleigh—Benard convection. By modelling the near-wall buoyancy force, we also show that the wall shear stress would scale with the bulk velocity with a skin friction coefficient (fully depend on the profile coefficients) and a buoyancy adjustment. Such results suggest that although both the profile coefficients and the skin friction coefficient are approximately constant in the current Grashof number range, they are indeed slowly varying quantities over a large range of Grashof number. We believe the  $Gr$ -dependence for the profile coefficients can be achieved by

another year of HPC support.

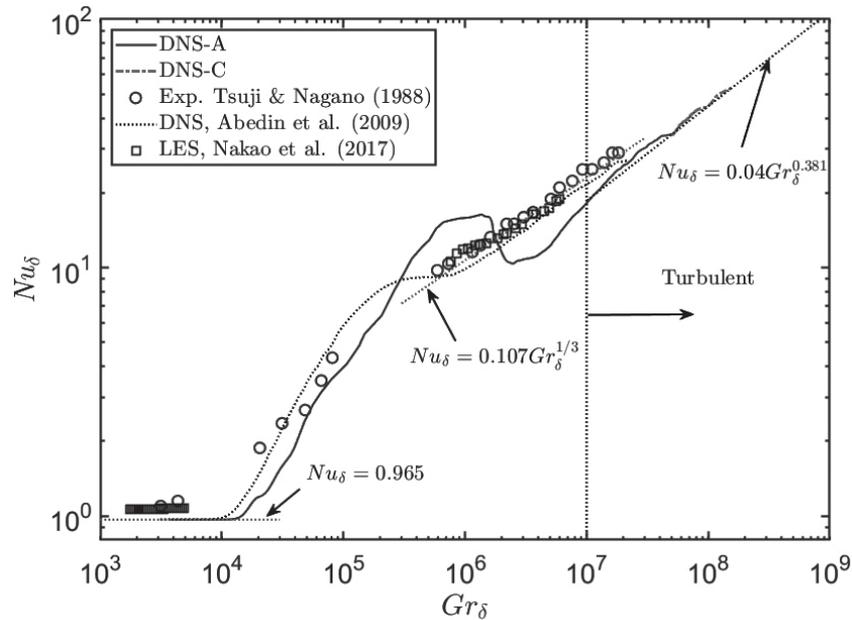


Figure 1 : Temporal development of the Nusselt number.

### 3. Achievements

At current stage, the achievement level can be evaluated at 90%. We have one paper published in the Journal of Fluid Mechanics, and one preliminary draft for the International Journal of Heat and Mass Transfer in preparation. As mentioned above, we will continue the simulation to achieve a higher Gr so that a more detailed description of the turbulent boundary layer structure can be obtained.

### 4. Summaries and future plans

The ongoing analysis on the turbulence statistics aims to report second-order statistics as well as the turbulent kinetic energy budget for the flow. The study of the turbulence statistics will lead to a better understanding of multiple features of the turbulent boundary layer and establish a benchmark for the future studies.

### 5. Research results

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

[1] J. Ke, N. Williamson, S.W. Armfield, A. Komiya and S.E. Norris: High Grashof number turbulent natural convection on an infinite vertical wall, *J. Fluid Mech.*, 929 (2021), A15, doi: 10.1017/jfm.2021.839.

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

[2] J. Ke, N. Williamson, S.W. Armfield and A. Komiya, Turbulence Statistics in a Temporally Evolving Turbulent Natural Convection Boundary Layer, *Proceedings of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-9, pp.19-23.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) (Award) (Press release) Not Applicable

Project code	J21I074
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st 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

With technical advances in image segmentation, design optimisation, and computational fluid dynamics, we seek to identify the optimal shape of arteriovenous shunts with the best haemodynamic performance to reduce the probability of post-treatment arterial occlusion or stenosis.

### 2. Details of program implement

According to published studies, the branch angles of arteriovenous fistula (AVF) were reported as an influential factor for the growth and development of the corresponding blood vessel. Results of these studies reported an occurrence of abnormal flow and wall shear stress (WSS) distributions [1,2]. However, most of the published studies considered only AVF models with acute anastomosis angles, while the obtuse anastomosis angles been rarely discussed. Thus, to bridge this lack of information, geometries with a series of angles were created and studied in this project to evaluate the angle impacts on the disturbed flow and key haemodynamic parameters like the distribution of WSS.

A series of AVF models with different angles were established in this project (see Figure 1), which was respectively discretised into about three million elements for CFD analysis using a commercial software (Ansys CFX, Ansys Inc., USA). The simulations were performed on the Integrated Supercomputation System at Institute of Fluid Science, Tohoku University. Transient boundary conditions were applied at the proximal artery and vein outlet respectively at 231 ml/min and 173 ml/min. Time averaged WSS (TAWSS) and vorticity (TAV) were calculated then for the assessment of haemodynamic impacts by the angle of AVF. Velocity streamlines and TAWSS are displayed in Figure 2 for AVF angles at 42° and 160°, showing a lower TAWSS of obtuse angle comparing to the acute angle.

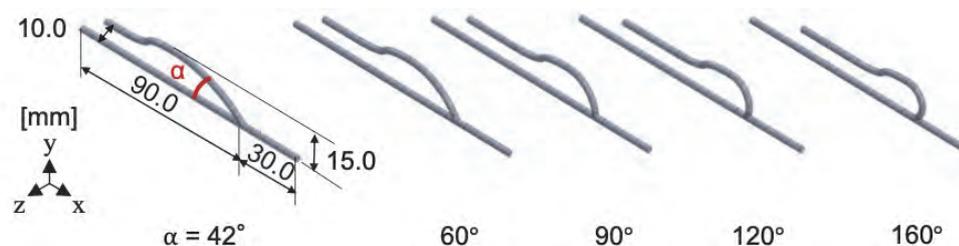


Figure 1 : ACF model with different angles.

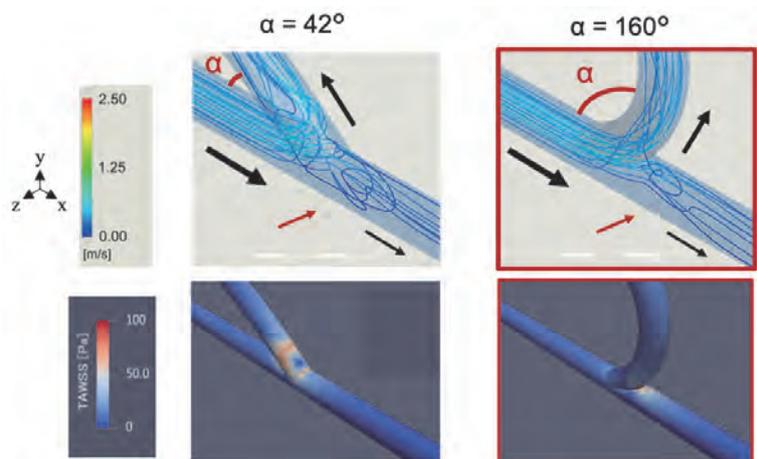


Figure 2 : Comparison of velocity streamlines and TAWSS between AVF models with the angle of 42° and 160 °.

### 3. Achievements

Flow behaviours of AVF models were studied through the use of CFD analysis, from which the differences in TAWSS between models with different morphological features indicates that the obtuse angle may produce a beneficial environment for the development of AVF.

### 4. Summaries and future plans

Haemodynamic differences affected by the angle of AVF have been obtained through this project, based on which we plan to further investigate the impacts by other morphological features to obtain a more comprehensive understanding of morphological effects on the development of AVF.

### 5. Research results

#### 1) Peer-reviewed journal articles

- [1] Zhang M, Tupin S, Li Y and Ohta M (2021) Association Between Aneurysmal Haemodynamics and Device Microstructural Characteristics After Flow-Diversion Treatments With Dual Stents of Different Sizes: A Numerical Study. *Front. Physiol.* 12:663668. doi: 10.3389/fphys.2021.663668
- [2] Li Y, Zhang M, Tupin S, Mitsuzuka K, Nakayama T, Anzai H and Ohta M (2021) Flush Flow Behaviour Affected by the Morphology of Intravascular Endoscope: A Numerical Simulation and Experimental Study. *Front. Physiol.* 12:733767. doi: 10.3389/fphys.2021.733767

#### 2) International conference:

- [3] Takeda K., Anzai H., Zhang M., Wang H., Kajiyama A., and Ohta M., “Assessing of the relationship between WSS and TAV for disturbed flow on the geometry of AVF for hemodialysis”, *the 18<sup>th</sup> International Conference on Flow Dynamics*, 2021.
- [4] Li Y., Zhang M., Ohta M., “Simulation of aneurysmal haemodynamic after flow-diversion treatment: modelling the flow-diverting stent as a porous medium”, *the 18<sup>th</sup> International Conference on Flow Dynamics*, 2021.

### 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	J21I076
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

## Active Control of Natural Convection for Efficient Ventilation by Low Energy

Atsuki Komiya\*†, Victoria Timchenko\*\*††  
 \*Institute of Fluid Science, Tohoku University  
 \*\*The University of New South Wales  
 †Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

In this study, we visualize the flow pattern in laminar natural convection below the critical Rayleigh number and evaluate how small changes in the local temperature and flow fields contribute to convective heat transfer enhancement, thereby improving the efficiency of indoor ventilation using heat transfer enhancement by large-scale natural convection. Numerical calculations of three-dimensional flow fields and visualization experiments of large-scale natural convection using a large interferometer are conducted to visualize the temperature boundary layer at high spatial and temporal resolution and to evaluate the effect of moderate stimulation on laminar natural convection.

### 2. Details of program implement

Numerical visualization of temperature boundary layer fluctuations on the heating wall was performed to qualitatively evaluate the temperature boundary layer fluctuations caused by the impinging jet. The visualization results showed that, as the Reynolds number was increased, unstable waves were generated on the entire heating wall at  $Re=100$ . The unstable waves converged at  $Re=150$ , slightly appeared at  $Re=250$ , and converged again when  $Re=350$  was increased. The stagnation of the temperature boundary layer was observed near the buoyancy region below the impact surface, indicating that heat transfer was decreased. In the case of  $Re=350$ , however, the forced convection flow is sufficiently strong that no stagnation occurs near the impact surface, and a wedge-shaped temperature boundary layer was formed. In the case of  $Re=100$ , periodic fluctuations in the temperature boundary layer were observed, which may be due to an imbalance between buoyancy and jet inertial forces.

Following the qualitative evaluation by visualization, the local Nusselt number distribution on the heated wall was plotted to quantitatively evaluate the temperature boundary layer variation. The local heat transfer coefficient was derived using the 3rd kind boundary condition. Figure 1 shows the local Nusselt number distribution on the heated wall. The results of the natural convection analysis in this study are in close agreement with the results of Tsuji et al. In the case of heat transfer enhancement by impinging jets, for low flow rates such as  $Re=100$  and 150, the local Nusselt number decreased below the jet impact point due to the opposing buoyancy and momentum of the jet, and increased above the jet impact point due to the auxiliary momentum of the jet. In addition, the peak of the local Nusselt number increased as the Reynolds number increased, from above the jet impact point to closer to the jet impact point. Furthermore, for  $Re=350$ , the local Nusselt number behaves like a wedge flow, or Hiemenz flow, due to the stronger

forced convective momentum compared to the buoyancy of natural convection. The zonal area in Figure 1 represents the population standard deviation by time averaging over 300 s of the unsteady computation. The zonal region indicates that the largest time variation of the local Nusselt number is for  $Re = 100$ . The local Nusselt number increases more rapidly after  $y = 533\text{mm}$  (Rayleigh number  $= 2.66 \times 10^8$ ) for jets impinging at  $Re = 100$  than for other conditions.

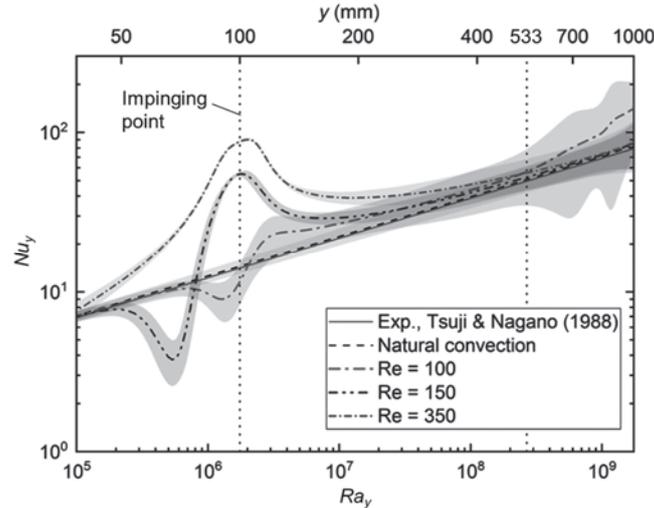


Figure 1 : Local Nusselt number as a function of Rayleigh number along the heated wall natural convection and three Reynolds numbers for the impinging jet.

### 3. Achievements

At current stage, the achievement level can be evaluated at 80%. We have one paper published in the Physical Review Fluids. As mentioned above, we evaluated the effect of moderate stimulation on laminar natural convection. We will continue the simulation and experiment to deeply understand the heat transfer enhancement method using a natural convection.

### 4. Summaries and future plans

Numerical and experimental studies on heat transfer enhancement using natural convection have been conducted in this study. We have identified the conditions under which the average heat transfer coefficient can be increased with a slight stimulus. We will continue to search for the best condition in the future.

### 5. Research results

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

[1] N. Ogasawara, J.F. Torres, Y. Kanda, T. Kogawa and A. Komiya: Resonance-driven heat transfer enhancement in a natural convection boundary layer perturbed by a moderate impinging jet, *Phys. Rev. Fluids*, 6 (2021), L061501, doi: 10.1103/PhysRevFluids.6.L061501

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

[2] N. Ogasawara, J.F. Torres, Y. Kanda, T. Kogawa and A. Komiya, Enhancement of Natural Convective Heat Transfer by Resonance Effect Induced by a Moderate Impinging jet, *Proceedings of the 58th National Heat Transfer Symposium of Japan*, Koriyama, (2021), B324.

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

(Patent) (Award) (Press release) Not Applicable

課題番号	J21I077
区分	一般公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

プラズマ-生体界面における活性種挙動の数値動力学的検証  
Numerical molecular analysis of reactive species behavior between discharge plasma and biological surface

内田 諭<sup>\*†</sup>, 佐藤 岳彦<sup>\*\*††</sup>  
\*東京都立大学, \*\*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、大気圧非平衡プラズマの生体応用が進められており、う蝕殺菌、早期止血、アポトーシス誘導、細胞再生、遺伝子導入といった医療効果が確認されている。現在のところ、放電活性種と細胞内分子の相互作用が主要因であることは実験的に示されているが、細胞膜を通過して直接的に機能変化を起こすのか、表面反応での間接的刺激により誘起される結果なのか、その機序は十分に理解されていない。プラズマ医療技術に対する客観的評価において、上記のような細胞動態メカニズムを理論的かつ定量的に明示することが必須である。

本応募研究課題では、細胞膜分子との酸化反応および細胞膜内の拡散輸送を考慮した放電活性種の膜透過挙動を量子化学計算および古典分子動力学法を併用して階層的にモデル化するとともに、膜中部位に対する反応速度定数および局所拡散係数から各活性種の膜浸透分布を導出して、細胞動態制御におけるプラズマ照射量の閾値条件を特定する。

## 2. 研究成果の内容

放電プラズマの流体近似計算と生体細胞の等価回路を併用した統合的モデリングを行い、大気圧グロー放電による細胞各部位での電圧および電流の経時変化を検証した。本解析から、細胞膜に掛かる最大電圧が 2.5 mV、最大電流 7 nA がとなることが数値的に示された。

また、プラズマ照射により水中電荷（イオン）密度が3倍程度に増加した場合の生体膜近傍における電気二重層の形成過程を模擬し、電荷密度分布を導出した（図1）。

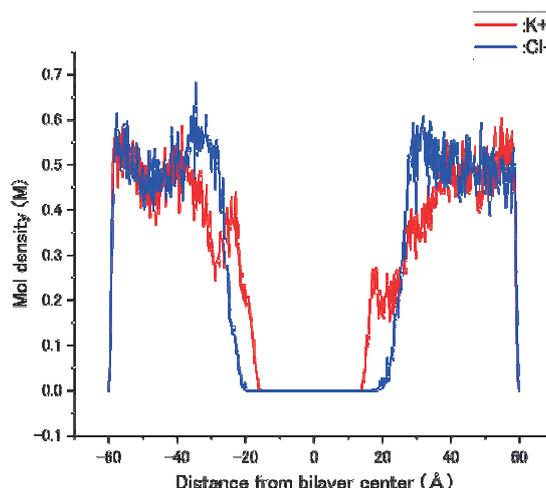


図1：細胞膜近傍の電荷（イオン）密度分布

### 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がほぼ完成した。また、電荷重畳過程の解析を定量的に実施できたことから、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、より実際のな並列高速計算による大規模膜解析の検証も実施できた。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、生体膜内における放電活性種の力学的挙動について、放電プラズマと生体膜のモデル構築および高速並列計算による長時間の膜挙動解析の工程がほぼ完成し、詳細な細胞部位の電圧・電流や電荷重畳効果を模擬することができた。今後、これらの成果を早急に論文等にまとめて、幅広い公開を行っていく。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] Shota Yamauchi, Yuta Iwata, Ippei Yagi, Satoshi Uchida, "Analysis of Electrical Characteristics of Living Cells Exposed by Cold Atmospheric Plasma using the Equivalent Circuit Model," *74th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2021)*, GT61.00026 (2021).

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] Yuta Iwata, Shota Yamauchi, Yuya Oishi, Ippei Yagi, Satoshi Uchida, Takehiko Sato "Numerical Simulations of Membrane Deformation Induced by Cold Atmospheric Plasma with Circuit Analysis and Molecular Dynamics," *The Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021)*, CRF-21 (2021).
- [3] 内田 諭, 「プラズマ-生体間の電荷・電界による膜機能制御の分子計算評価」, 第 37 回九州・山口プラズマ研究会, 佐世保, 長崎 (2021).
- [4] 内田 諭, 八木 一平, 佐藤 岳彦, 「電界下におけるプラズマ誘起種の膜透過性の分子動力学解析」, 第 31 回日本 MRS 年次大会, 横浜, 神奈川+オンライン (Zoom), H-I14-002 (2021).
- [5] 岩田 優太, 山内 翔太, 八木 一平, 立花 孝介, 小田 昭紀, 佐藤 岳彦, 内田 諭, 「電界と電荷による活性酸素種の生体膜透過特性の変化」, 第 69 回応用物理学会春季講演会講演予稿集, オンライン (Zoom), 25p-E105-1, 07-092 (2022).
- [6] 山内 翔太, 岩田 優太, 八木 一平, 内田 諭, 「大気圧プラズマ照射によるがん細胞への電気的作用の数値解析」, 第 69 回応用物理学会春季講演会講演予稿集, オンライン (Zoom) 25p-E105-1, 07-092 (2022).

#### 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	J21I078
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	2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\*\*††, 岩崎 大晟\*\*\*, 大高 峻\*\*\*  
 内一 哲哉\*\*, 三木 寛之\*\*  
 \*信州大学工学部, \*\*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**

電気電子デバイスやエレクトロニクス機器の発展やセンサ用として、導電性高分子材料のニーズが高まっているが導電特性が明らかになっていない。例えば、高分子材料の縦弾性係数が高いことから、カーボンナノチューブ同士が接触したり近づいたりするほど大きく変形しないため「パーコレーション理論」や「トンネル効果」のみで導電性を説明することができない。従って、導電性材料を分散させた複合材料に関しては、垂直荷重を負荷させた場合において最適な導電性を発現させるための材料設計の研究が不十分である。

本研究では、気相成長炭素繊維（VGCF）分散樹脂基複合材料の導電特性の解明を目的としている。具体的には、VGCFを樹脂中に均一または不均一に分散させた複合材料において、導電性を発現するVGCFの条件を明らかにする。ここでは、まずシリコン中にVGCFを均一分散させることにより、積極的に導電経路を形成させる「パーコレーション理論」に基づく導電性材料を作製し評価することとした。

**2. 研究成果の内容**

本研究では、シリコン(信越化学工業株式会社, KE-1300T)とVGCF(昭和電工株式会社)を使用した。表1にシリコンとVGCFの物性値を示す。表1よりシリコンは非常に高い体積抵抗率であり絶縁体である。対して、VGCFの体積抵抗率は導電性の高い材料であることがいえる。図1(a)にシリコンモノマーの外観写真を示す。図1(a)よりシリコンモノマーは半透明の液状である。図1(b)にVGCFのSEM像を示す。図1(b)よりVGCFは短繊維状であり、繊維長は8 $\mu$ m, 繊維径は150nmである。液状のシリコンモノマー、硬化剤および希釈剤を質量比で45:5:50となるように混合した。混合した液体にVGCFを添加し、自転・公転真空ミキサーにより混練した。図3に原料混合の模式図を示す。VGCFの添加量は、体積比でVf=3.0, 3.5, 4.0, 5.0, 6.0, 9.0vol. %と変化させた。その後、金型に流し込み、恒温器内で40 $^{\circ}$ C, 4h保持し、固化した。作製したSilicone/VGCFは15 $\times$ 10 $\times$ 3mmのブロック状である。

VGCF含有量と垂直荷重を3N負荷したときの電圧の変化量dV(Pn=3.0N)の関係を図2に示す。図2より、VGCF含有量が増加するほど、垂直荷重を3N負荷したときの電圧の変化量dV(Pn=3.0N)は増加した。このことから、Silicone/VGCFをセンサに使用する場合、VGCF含有量が増加するほど、定格出力が高くなり、感度の向上が見込まれる。

表 1：シリコンと VGCF の物性値

	Silicone	VGCF
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.09	2.1
Volume resistance value (Ω·cm)	>10 <sup>15</sup>	1.0×10 <sup>-4</sup>



(a) シリコンゴム



(b) VGCF の SEM 像

図 1：シリコンゴム（モノマー）および VGCF の SEM 像

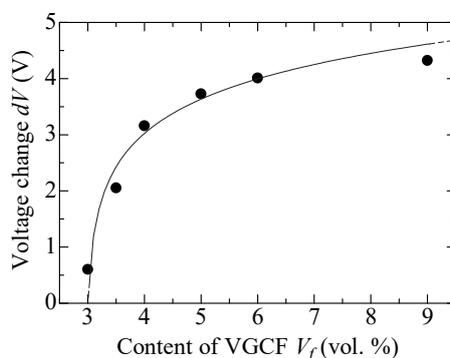


図 2：VGCF 含有量と垂直荷重を 3N 負荷したときの電圧の変化量の関係

### 3. 研究目標の達成状況

VGCF を均一分散させた材料を開発することが可能であることから 30%の達成度である。

### 4. まとめと今後の課題

本研究の結果により、VGCF の含有量が高い材料を作製することで積極的に導電経路を作製し、低荷重でも電圧の変化量が大きい（感度が良い）センサ用の導電性材料を開発することができたと考えられる。今後、その導電経路やトンネル効果などの評価について SEM などを用いて観察する必要がある。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] N. Nakayama, O. Shun, T. Iwasaki, N. Teruhiko, S. TAKEDA, H. Miki: Conductive mechanism of carbon nanotube dispersed resin based composite materials, *ICFD2021*, Sendai, (2021), CRF-29.

[2] 大高 峻, 中山 昇: カーボンナノファイバー分散ゴム基複合材料の電気的特性, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021 in Osaka, (2021), pp. 100-101.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）なし

Project code	J21I079
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

## Studying Structure–Property Relations for Organic Materials using Machine Learning

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, 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

SOM provides a data mining technique which helps to visualize high dimensional data, e.g., various thermophysical properties of liquid species in the present case, in a low dimensional space, typically a two-dimensional space with maintaining proximity between data.

For the input data in the present analysis, 27 organic liquid substances were employed. Also, the following eight thermophysical properties were chosen: mass density, specific heat at constant pressure, melting point, boiling point, saturated vapor pressure, surface tension, viscosity, and thermal conductivity. The map size of SOM was 15×15. The data analysis codes were implemented using python language with the SOMPY package.

The tested 27 liquids were modeled for MD simulation. The GAFF (general AMBER force field) was assigned for all the substances. Each simulation system was relaxed under the NPT ensemble at a temperature of 300 K and a pressure of 1 atm. A production run for the radial distribution function (RDF) calculation was performed for 2 ns under the NVT ensemble. All these MD simulations have been performed on super computer, AFI-NITY at the Institute of Fluid science, Tohoku University.

### 3. Achievements

The SOM analysis result is shown in Fig. 1 for 27 liquids substances only with 8 thermophysical properties. As a result, it can be found that the clusters are mostly classified according to the structural features like functional group of the molecules. Meanwhile, when the molecular-scale structure, i.e., the RDF peak height of a first

adsorption shell between carbon-carbon atom pair in the present study, is added as an extra property of input data, the overall SOM structure is not so changed (the result is omitted here).

In order to correlate structural information with thermophysical properties, we took the difference between the RDF peak height and each property. The absolute value of this difference is shown in Fig. 2. As a result, high correlations were found for specific heat at the constant pressure, vapor pressure, surface tension, and thermal conductivity in a wide range of liquid substances. Therefore, we can conclude that this analysis can enable us to find the correlation between molecular-scale information with macroscopic thermophysical properties.

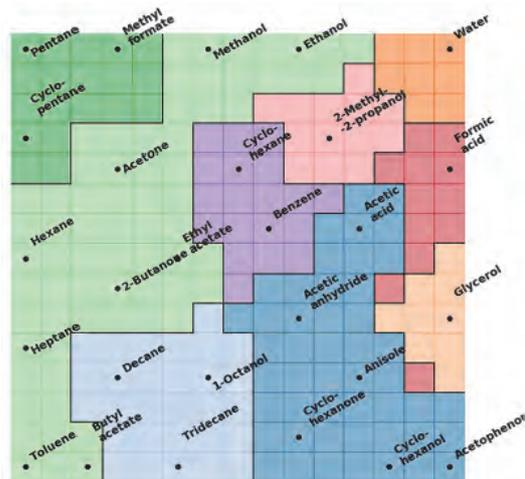


Figure 1: SOM result for 27 liquid substances only with 8 thermophysical properties.

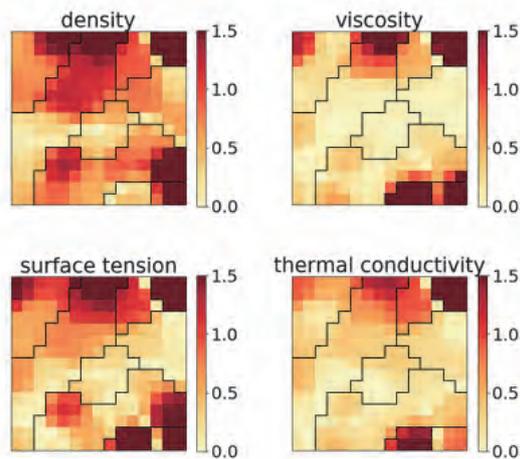


Figure 2: Absolute value of the difference between the RDF peak height and four selected thermophysical properties projected on SOM.

#### 4. Summaries and future plans

In the present study, we performed SOM analysis for liquid substances with various thermophysical properties. An additional input of molecular-scale structure was given as input data. We demonstrated the possibility to find the underlying correlation between structure and property by using the presented analysis. As for the next step, the unsupervised machine learning method of self-organizing map combined with supervised learning techniques such as artificial neural networks for prediction of thermophysical properties will be applied to unravel clear global structure-property correlations.

#### 5. Research results

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

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

[1] G. Kikugawa, Y. Kawamoto and H.K. Chilukoti: Self-Organizing Map for Clarifying Relationship between the Molecular Structure and Thermophysical Properties, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-17, pp. 40-41.

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

Project code	J21I080
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## An innovative Method of Generating Plasma Microbubbles in Flowing Water

Jong-Shinn Wu\*†, Takehiko Sato\*\*††  
 Mu-Chien Wu\*, Po-Shien Chiu\*  
 \*National Chiao Tung University  
 \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University,  
 †Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

We aim at following research topics in this study.

- (1) To measure the absolute concentration of some specific reactive species in water.
- (2) To set up an experiment combining ultra-high-speed camera and laser sheet to visualize the plasma microbubble motion.
- (3) To develop a method to analyze the microbubble size distribution and the microbubble density in water.

### 2. Details of program implement

This year, as shown in Fig. 1, a comparison of the chemical property results of PAMB and PAW obtained in the previous year was used to discuss the mechanism that promotes the dissolution of reactive chemical species. Figure 1 shows the pH values and conductivities of PAW water and PAMBs water with different treatment times [1]. The pH value of PAMBs treatment is slightly lower than PAW treatment which means more reactive nitrogen species such as NO, NO<sub>2</sub> and NO<sub>3</sub> would dissolve into water in the form of nitric acid and nitrous acid. Since a lower pH value in the PAMBs case was observed, more protons would exist as expected, which caused the conductivities of the PAMBs jet slightly higher than those of the PAW treatment. Figure 2 shows the concentrations of nitrite and ozone of the PAW and the PAMBs cases with different treatment times. It is shown that the dissolution concentrations of these activated gases (nitrite and ozone) of the PAMBs case are nearly twice as those of the PAW case at all treatment times, mainly because the RONS generated by air plasma were encapsulated by the microbubbles in

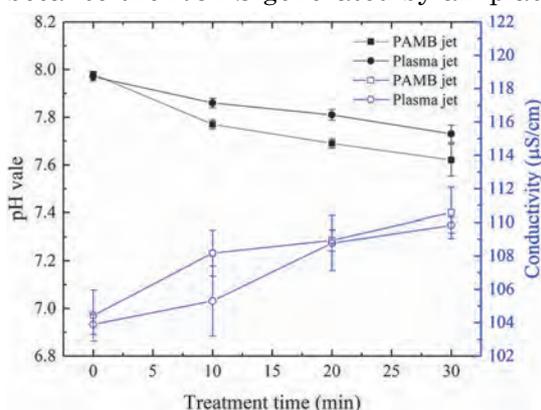


Fig. 1 pH values and conductivities of PAW water and PAMBs water with different treatment times\*.

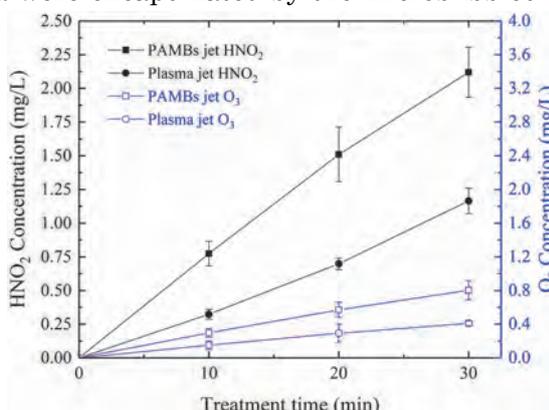


Fig. 2 The concentration of nitrite and ozone treated by plasma jet and PAMBs jet as a function of treatment time\*.

the water.

\*Mu-Chien Wu, Satoshi Uehara, Jong-Shinn Wu, YunChen Xiao, Tomoki Nakajima and Takehiko Sato, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 53, (2020), 485201.

### 3. Achievements

We measured the chemical characteristics of PAMBs and verified the increase of dissolved nitrogen oxides gas concentration compared with the PAW device. A new method for smaller bubble generation using mesh was developed and it is expected to apply for wider applications.

### 4. Summaries and future plans

We will verify the efficiency of sterilization by PAMBs and develop an advanced method for generation of ultrafine bubbles based on the results obtained in this year.

### 5. Research results

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

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

[1] M.-C. Wu, S. Uehara, T. Nakajima, T. Sato, and J.-S. Wu: An Innovative Method of Generating Plasma Microbubbles in Flowing Water, *The 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021)*, オンライン開催, (2021), Presentation No. CRF-80.

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

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

Project code	J21I081
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## Individual effects of plasma-generated electrical field, short-life species, and long-life species on cell

Po-Chien Chien\*, Chia-Hsing Chang\*\*, Takehiko Sato\*\*††, Yun-Chien Cheng\*†

\*Department of Mechanical Engineering, National Chiao Tung University,

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

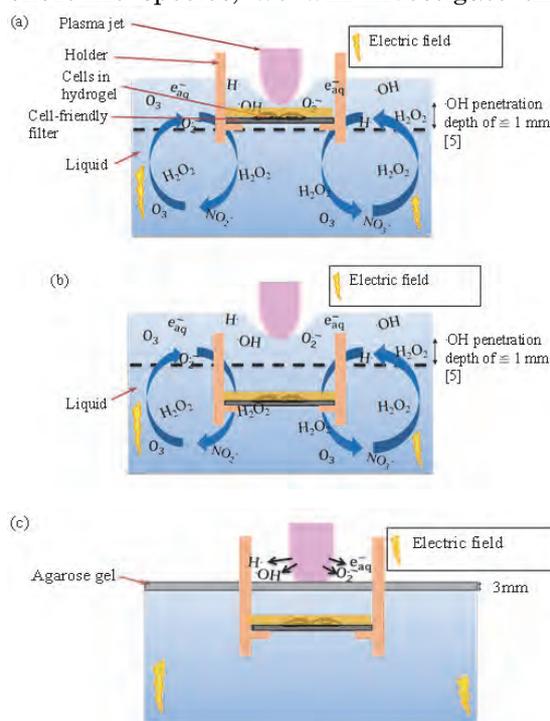
†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The purpose of this research is to investigate the effects of atmospheric-pressure cold plasma (APCP) generated electrical field, short-life species and long-life species on cancer cells. We believe that the study of the electric-field effect on cells by the Prof. Sato group (Tohoku University) and the effects of plasma-generated RONS on cells studied by our group will perfectly accomplish the project goals.

### 2. Details of program implement

Recently, some studies have shown that plasma treatments can eliminate the tumors in vivo or selectively kill cancer cells, but the mechanism is still not clear yet. To investigate the key factor which can induce cancer cells apoptosis, we treat cells with three main factors of plasma, including electric field, short-life species and long-life species. Our experimental setup is shown in Fig.1. Short-life species have limited penetration thickness due to their life-span. Therefore, in order to treat cells with short-life species, we will investigate the penetration thickness of short-life species,



which we defined as  $\tau$ . When the distance between cells and surface is less than  $\tau$ , the cell will be treated by short-life, long-life species and electric field, as shown in Fig.1 (a). When the distance is large than  $\tau$ , the cell will be treated by long-life species and electric field, as shown in Fig.1 (b). Fig.1 (c) shows an experimental setup which is used to investigate the effects of electric field. Reactive species cannot penetrate agarose gel and the agarose gel with proper electrical permittivity will not change the electrical field inside the PBS. Hence, adding an agarose gel on PBS surface can treat the cells with the plasma electrical field only. By comparing these three experiments, we can get which factors have the most significant impact on the cancer cells.

Figure 1 : Illustration of the experimental setup. (a) Controlling the distance between

the cells and plasma–liquid interface within the penetration depth of the short-lived species, making the cells treated with short-lived RONS, long-lived RONS, and an electric field generated by the plasma. (b) Cells were placed beyond the penetration depth of the short-lived species, so the cells were treated with long-lived RONS and an electric field. (c) By adding PBS-agarose gel, the RONS could not enter the liquid and the cells were treated with the electric field only.

### 3. Achievements

We built an experimental setup, which was used to investigate the effects of plasma-generated electric field, short-life species, and long-life species on cell. The maximum penetration depth of  $\cdot\text{OH}$  is about 0.6mm. Agarose gel can block reactive species passing through and will not change the voltage inside the liquid. The electrical field does not change significantly after adding PBS agarose jet (Fig. 2) The cell viability at difference treatment depth is shown in Fig. 3.

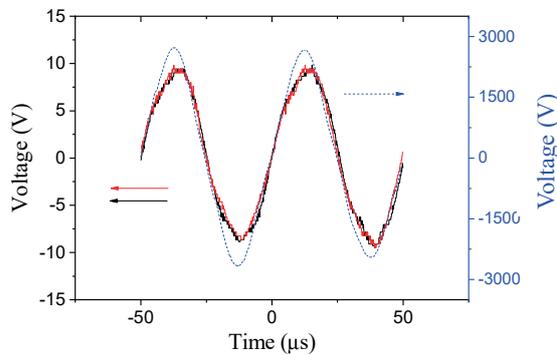


Figure 2: Voltage difference in the PBS solution without the PBS-agarose gel (black line); voltage difference in the PBS with the PBS-agarose gel (red line); voltage applied to the plasma source (blue dashed line).

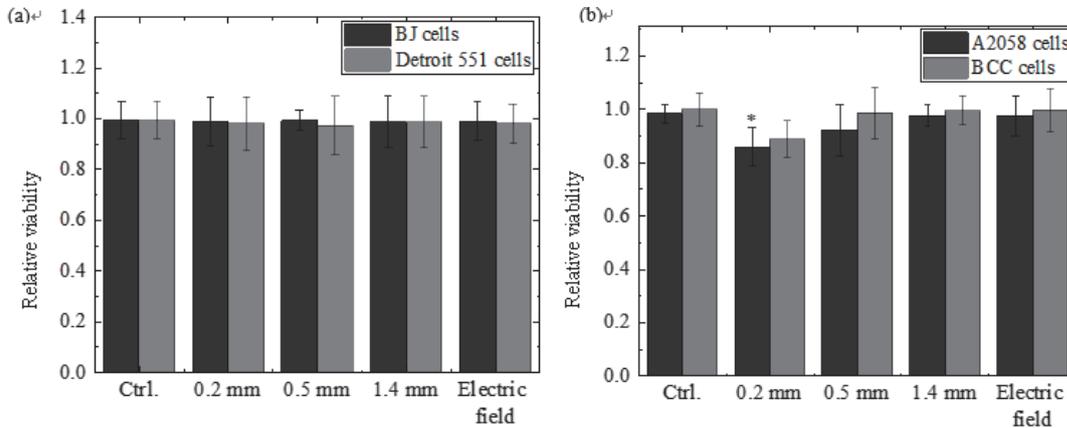


Fig. 3: Cell viability of normal skin cells (a) and cancer cells (b) after the treatments via plasma and the electric field. The distances between the cells and plasma–liquid interface for the plasma treatments were 0.2, 0.5, and 1.4 mm. Data shown is the mean and SD ( $n = 3$ ). \* $P < 0.05$  (Student's  $t$  test).

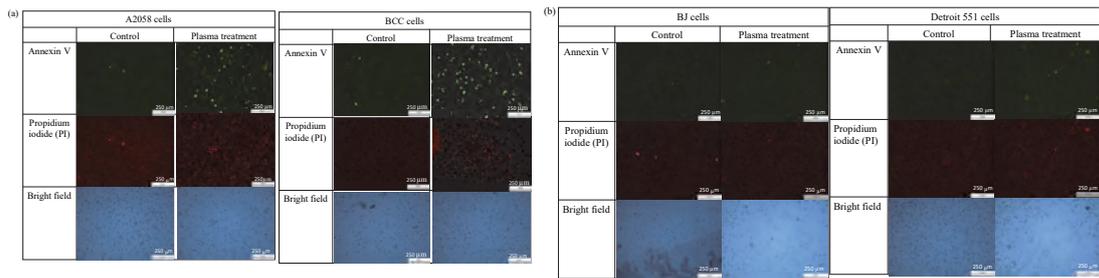


Figure 4: Annexin V and PI dual labeling of the skin cancer cells (a) and normal cells (b) treated with plasma exposure at a depth of 0.2 mm. The staining of Annexin V and PI increased significantly in the cancer cells but not in the normal cells, indicating that the short-lived RONS generated by the plasma triggered cell apoptosis of the cancer cells but not the normal cells.

#### 4. Summaries and future plans

Our results showed that short life RONS inhibits skin cancer cells, but not healthy skin cells. Besides, electrical field shows no significant influence on cells. We will further use Annexin V and PI to observe the cell apoptosis and death.

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] P. Chien, C. Chen, Y. Cheng, T. Sato, R. Zhang: “Selective inhibition of melanoma and basal cell carcinoma cells by short-lived species, long-lived species, and electric fields generated from cold plasma”, *Journal of Applied Physics*, 129, 163302, 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0041218>
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [2] P. Chien, C. Chen, T. Sato, Y. Cheng: The Effects of Atmospheric-Pressure Cold Plasma Generated Short-Life Species and Long-Life Species on Skin Cells, *ISPlasma*, Nagoya, (2021).
- 3) Patent, award, press release etc.
 

Not applicable

Project code	J21I082
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st 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

High-speed flows of gas mixed with solid particles are often observed in the various engineering applications as well as in the natural phenomena. Our long-term objective of this study is focused on addressing the interaction between high-speed flow and solid particles. More specifically, the particle acceleration, shock wave formation due to particles, interaction between multiple shock waves, and the impact of flow conditions and particle properties on the interaction are studied.

#### 2. Details of program implement

The experimental part of the study is conducted at Michigan Technological University (MTU). The Atmospheric Shock Facility at MTU is unique in that a modified Split-Hopkinson Pressure Bar actuated by a high-speed servo valve is used to generate shock waves. The advantage of using a Split-Hopkinson Pressure Bar as driver section is that a fast acting piston that replaces the diaphragm used in conventional shock tubes, which allows for a quick reload and a safer operation. Figure 1 shows the schematic of the shock tube. Compression wave propagates and accelerated flow is discharged from the opening in right hand side to the atmosphere.

The shock tube has been designed to accommodate different particle loading chambers at the gas exit which allows to study different gas-particle concentration ratios as well as different particle size distribution. The shock tube has been used to study expanding supersonic jets of dry nitrogen and with a variety of particle sizes.

Shock waves are visualized using shadowgraph, and the wave propagation and particle motions are captured high-speed camera image. The optical system used in this study is illustrated in Figure 2.

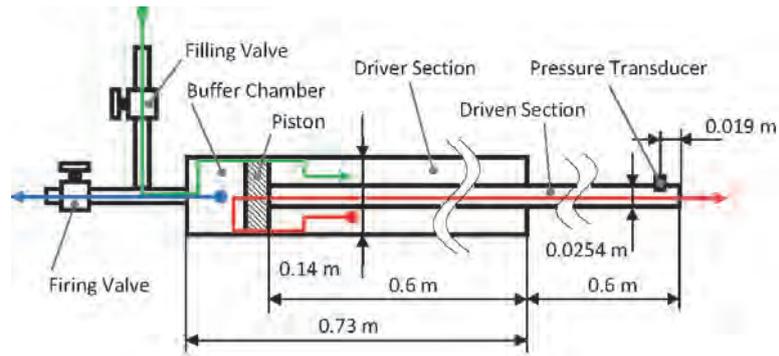


Figure 1: Schematic of Split-Hopkinson Pressure Bar shock tube.

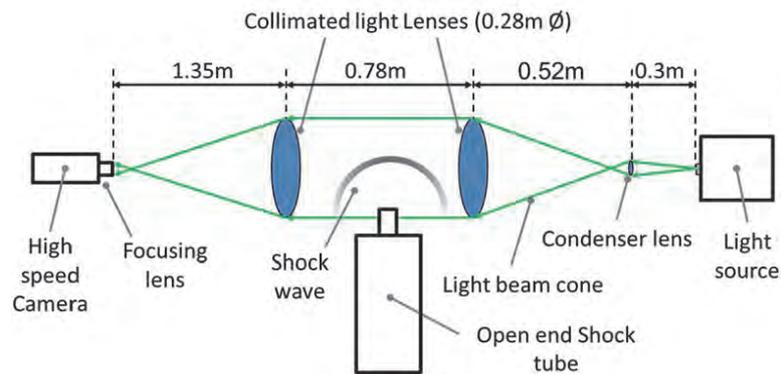


Figure 2: Schematic of the optical system used in this study.

In this research, we plan to carry out a supplementary analysis by a computational simulation. Regarding the behavior of particles in a high-speed flow, we will start by simulating the flow around the stationary particles, and then examine the case where the particles move under the influence of the movement of the surrounding flow.

### 3. Achievements

Three specific tasks were originally set for this single year project. They are

- (1) Single particle dynamics in different air jet conditions
- (2) Impact of particle size of a single particle on the flow field
- (3) Interaction of multiple particles and jet structures.

The shock tube facility, however, had to move from the original location at MTU to another laboratory space during the period of the project, and it caused the unexpected delay to the progress of the project. Very recently the shock tube returned functional, and calibration is being carried out. Recovery plan for this delay is provided in the next section.

Regarding the computational study, the Volume Penetration method, which simulates the wall surface by body force, was successfully implemented in the in-house solver of the structured grid, and obtained a preliminary result in Figure 3

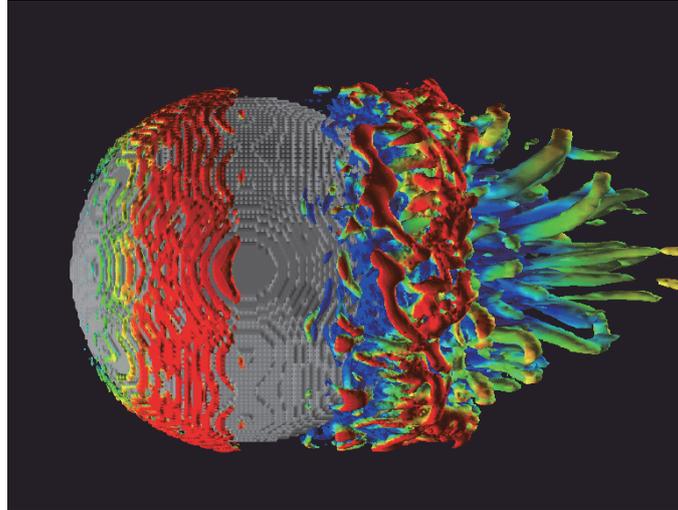


Figure 3: Preliminary result of the high-speed flow simulation around a stationary particle.

#### 4. Summaries and future plans

Now the shock tube is returned to the working condition, and calibration of the shock tube and related sensors, setup of the optical system will be completed soon. The project is continued to the second year. Therefore, the tasks set for the first year will be completed in two to three months (by July 2022), and then the tasks for the second year (study about the interaction between multiple particles) will be started.

#### 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, A. Yakeno, S. Alam, and S. Hamada: Study of Shock Wave-Particles Interaction, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021).
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

Project code	J21I083
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility of human and materials
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

## Design and Simulation of Nanopillar-Embedded MOSFETs

Yiming Li\*†, Seiji Samukawa\*\*††

\*Department of Electrical and Computer Engineering, National Yang Ming Chiao Tung University

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

In recent years, the development of a smart society due to advances with intelligent communications has led to a greater demand for advance nano-devices. The thermal influence appearing in nano-electronic operations is increasing as the integration density of integrated circuits increases. In this work, we for the first time study the thermal conductivity of well-aligned silicon (Si) nanopillars (NPs) structures embedded in silicon-germanium (SiGe) matrix of a MOSFET.

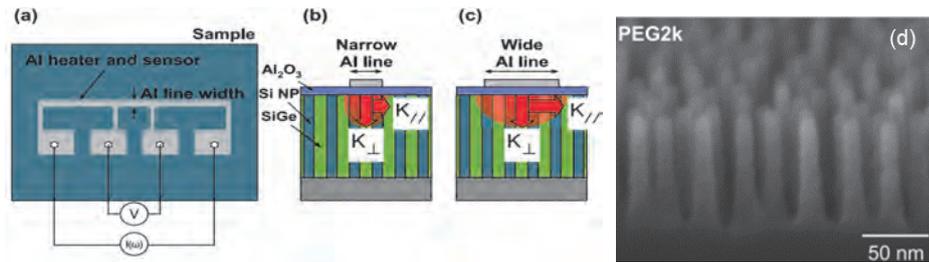


Figure 1 : Schematic plots of (a) the measurement setting, (b) the narrow Al line, and (c) the wide Al line. (d) A SEM cross-sectional image of the fabricated sample.

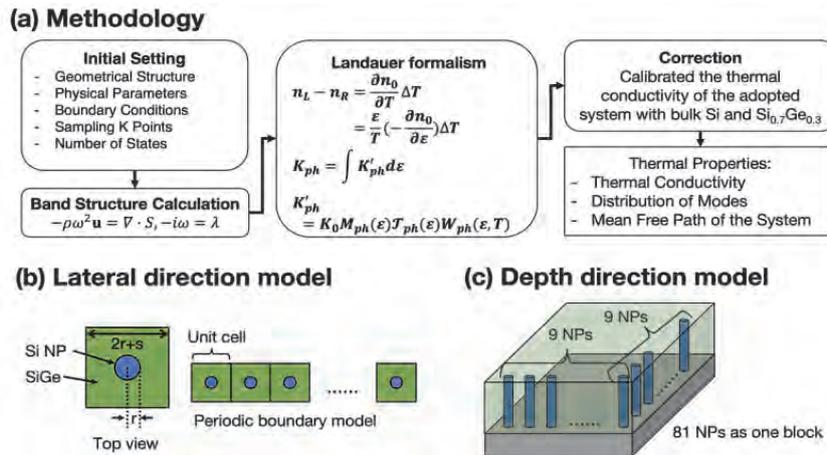


Figure 2 : (a) A simulation flow of anisotropic thermal conductivity and the constructed simulation model in the (b) lateral and (c) vertical directions.

### 2. Details of program implement

Experimentally, the anisotropic thermal conductivity is measured using the

3-omega method, as shown in Fig. 1(a). As shown in Figs. 1(b) and (c), the lateral direction of the thermal conductivity is important for considering electron-phonon scatterings through the channel region in MOSFETs. For numerical simulation, thermal conductivity in bulk and lateral directions is simulated by the Landauer approach, as shown in Fig. 2. We model the structure of Si NPs with reference to the average height and pitch of the actual Si NPs from SEM images. For the lateral direction, we utilize a periodical boundary condition from the top-view model of Si NPs, as shown in Fig. 2(b). In this study, the structure of Si NP is fabricated to a large area of  $30 \times 30 \text{ mm}^2$ . To model the real structure (see Fig. 1(d)), the density of Si NPs is in the range of  $10^{10} - 10^{11}/\text{cm}^2$ . Thus, the lateral direction of the thermal conductivity is simulated by setting the periodic structure of Si NPs entirely. For the vertical direction, a  $9 \times 9$  symmetric matrix is used, as shown in Fig. 2(c).

### 3. Achievements

Figure 3 shows the thermal conductivity with error bars in the (a) vertical and (b) lateral directions for all Si NPs/ $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  composite film samples measured by the 3-omega method as well as the numerical simulation results. For the vertical direction, the thermal conductivity is increased from 2.1 to 2.8 W/m/K when the gap is increased from 13 to 47 nm. The reduction of thermal conductivity is due to the interface scattering effect. For the size effect, the mean-free path (MFP) of the phonon to vertical direction is the same with the case of the height of composite film at 100 nm. Under this condition, prior studies have indicated that it should decrease to 30% of the thermal conductivity of  $\sim 50 \text{ W/m/K}$  due to the volume ratio between Si and Ge, but our results show that the thermal conductivity reduction is 10 times larger than that of the volume ratio. Notably, all Si NPs possess anisotropic thermal conductivity. The thermal conductivity in the lateral direction is decreased to 25% which is less than that in the vertical direction. According to the aforementioned discussion, the lateral phonon transport can be sufficiently scattered by the interface between Si NPs due to the longer MFP of the phonon accumulation; thus, the thermal conductivity decreases significantly. The thermal conductivity can also be controlled by increasing the gap of Si NPs because the volume of the  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  increases with decreasing the density of Si NPs. As shown in Fig. 3, we estimate the thermal conductivity from the MFP of the bulk material and characteristic length for internal scattering process. All calculated thermal conductivities are in a good agreement with the experimentally measured results. The average separation and standard deviation of the distribution of the 12/13 sample is 25 and 5 nm, as listed in Table 1. In summary, a low thermal accumulation, i.e., a sparse density of states in phonons, enables easy scattering due to the phonon accumulation of MFP.

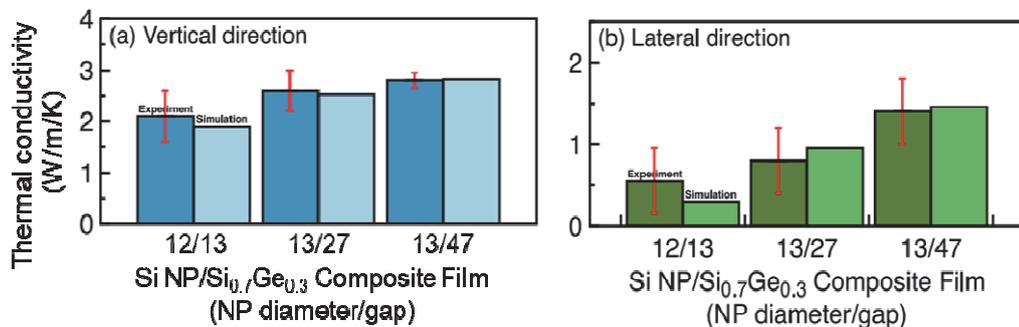


Figure 3: The experimentally measured and numerically simulated thermal conductivity in (a) the vertical and (b) the lateral directions for all Si NPs embedded in the matrix of  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ . The composite film samples are measured using a 3-omega method, as shown in Fig. 1. Notably, the simulation results of anisotropic thermal

conductivity are drawn along with each experimental result, where the red error bars indicate the deviation of experimental results.

Table 1 : A list of the diameter, average separation (pitch), standard deviation, and density of Si NPs.

Sample name	Diameter [nm]	Separation [nm]	Standard Deviation [nm]	Density [ $/\text{cm}^2$ ]
12/13	12	25	5	$1.8 \times 10^{11}$
13/27	13	40	8	0.68
13/47	13	60	12	0.34

#### 4. Summaries and future plans

We have studied the thermal conductivity of well-aligned Si NPs/Si<sub>0.7</sub>Ge<sub>0.3</sub> composite film by changing the gap of Si NPs from 13 to 47 nm. Phonon transport behavior through thermal conductivity has been investigated by the 3-omega method and Landauer approach. Results showed that our Si NPs/Si<sub>0.7</sub>Ge<sub>0.3</sub> composite film has a 1/100 times lower thermal conductivity than that of Si bulk owing to controlling the phonon transports in the lateral direction. This study reports a promising solution to heat damage for emerging MOSFET devices.

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] Hsiang Chang, Cheng-Hung Hsieh, Shi-Peng Cheng, Yiming Li, Seiji Samukawa, Tzong-Lin Wu, Zuo-Min Tsai: A 0.6-dB Low Loss and 3-165 GHz Wideband Phase Difference Sub-THz Coupler in 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Early Access (2022), 4pp.
  - [2] Beibei Ge, Daisuke Ohori, Yi-Ho Chen, Takuya Ozaki, Kazuhiko Endo, Yiming Li, Jenn-Hwan Tarng, and Seiji Samukawa: Room-temperature and high-quality HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> gate stacked film grown by neutral beam enhanced atomic layer deposition, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol. 40 (2022), 022405 (8pp).
  - [3] Shu-Wei Chang, Tsung-Han Lu, Cong-Yi Yang, Cheng-Jui Yeh, Min-Kun Huang, Ching-Fan Meng, Po-Jen Chen, Ting-Hsuan Chang, Yan-Shiuan Chang, Jhe-Wei Jhu, Tzu-Chieh Hong, Chu-Chu Ke, Xin-Ren Yu, Wen-Hsiang Lu, Mohammed Aftab Baig, Ta-Chun Cho, Po-Jung Sung, Chun-Jung Su, Fu-Kuo Hsueh, Bo-Yuan Chen, Hsin-Hui Hu, Chien-Ting Wu, Kun-Lin Lin, William Cheng-Yu Ma, Darsen D. Lu, Kuo-Hsing Kao, Yao-Jen Lee, Cheng-Li Lin, Kun-Ping Huang, Kun-Ming Chen, Yiming Li, Seiji Samukawa, Tien-Sheng Chao, Guo-Wei Huang, Wen-Fa Wu, Wen-Hsi Lee, Jiun-Yun Li, Jia-Min Shieh, Jenn-Hwan Tarng, Yeong-Her Wang, and Wen-Kuan Yeh: First Demonstration of Heterogeneous IGZO/Si CFET Monolithic 3-D Integration With Dual Work Function Gate for Ultralow-Power SRAM and RF Applications, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 69 (2022), pp. 2101-2107.
  - [4] Daisuke Ohori, Min-Hui Chuang, Asahi Sato, Sou Takeuchi, Masayuki Murata, Atsushi Yamamoto, Ming-Yi Lee, Kazuhiko Endo, Yiming Li, Jenn-Hwan Tarng, Yao-Jen Lee, and Seiji Samukawa: Management of Phonon Transport in Lateral Direction for Gap-Controlled Si Nanopillar/SiGe Interlayer Composite Materials, *IEEE Open Journal of Nanotechnology*, Vol. 2 (2021), pp. 148-152.
  - [5] An-Chen Liu, Konthoujam James Singh, Yu-Ming Huang, Tanveer Ahmed, Fang-Jyun Liou, Yu-Hau Liou, Chao-Cheng Ting, Chien-Chung Lin, Yiming Li, Seiji Samukawa, and Hao-Chung Kuo: Increase in the Efficiency of III-Nitride Micro-LEDs: Atomic-Layer Deposition and Etching, *IEEE Nanotechnology Magazine*, Vol. 15 (2021), pp.18-34.

- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [6] Tzu-Chieh Hong, Chun-Jung Su, Yao-Jen Lee, Yiming Li, Seiji Samukawa, and Tien-Sheng Chao: Investigation on Polarization and Trapping Dominated Reliability for Ferroelectric HfZrOx Ge FinFET Inverters, *Electron Devices Technology and Manufacturing (EDTM)*, (2022), pp. 241-243.
- [7] S.-W. Chang, T.-H. Lu, C.-Y. Yang, C.-J. Yeh, M.-K. Huang, C.-F. Meng, P.-J. Chen, T.-H. Chang, Y.-S. Chang, J.-W. Jhu, T.-Z. Hong, C.-C. Ke, X.-R. Yu, W.-H. Lu, M. A. Baig, T.-C. Cho, P.-J. Sung, C.-J. Su, F.-K. Hsueh, B.-Y. Chen, H.-H. Hu, C.-T. Wu, K.-L. Lin, W.-C.-Y. Ma, D.-D. Lu, K.-H. Kao, Y.-J. Lee, C.-L. Lin, K.-P. Huang, K.-M. Chen, Y. Li, S. Samukawa, T.-S. Chao, G.-W. Huang, W.-F. Wu, W.-H. Lee, J.-Y. Li, J.-M. Shieh, J.-H. Tarng, Y.-H. Wang, W.-K. Yeh: First Demonstration of Heterogeneous IGZO/Si CFET Monolithic 3D Integration with Dual Workfunction Gate for Ultra Low-power SRAM and RF Applications, *Technical Digest. IEEE International Electron Devices Meeting*, (2021), pp. 733-736.
- [8] Min-Hui Chuang, Ming-Yi Lee, Daisuke Ohori, Yiming Li, and Seiji Samukawa: Electronic Structure of Si Nanopillars Embedded in SiGe Matrix, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2021), pp. 71-72.
- [9] Seiji Samukawa, Yiming Li, and Teruhisa Ishida: Surface wettability control of nanopillar array structures fabricated by bio-template ultimate top-down processes, *Association of Asia-Pacific Physical Societies*, (2021), AB-PL9 (1pp).
- [10] Daisuke Ohori, Masayuki Murata, Atsushi Yamamoto, Kazuhiko Endo, Min-Hui Chuang, Ming-Yi Lee, Yiming Li, Jenn-Hwan Tarng, Yao-Jen Lee, Seiji Samukawa: Si Nanopillar/SiGe Composite Structure for Thermally Managed Nano-devices, *IEEE 21<sup>st</sup> International Conference on Nanotechnology (NANO)*, 2021, pp. 199-202.
- [11] Sou Takeuchi, Daisuke Ohori, Teruhisa Ishida, Mami Tanaka, Masahiro Sota, Yiming Li, Jenn-Hwan Tarng, Kazuhiko Endo, and Seiji Samukawa, "Surface wettability of nanopillar array structures fabricated by bio-template ultimate top-down processes, *IEEE 21<sup>st</sup> International Conference on Nanotechnology (NANO)*, (2021), pp. 203-206.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

Project code	J21I086
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

### The Dynamic Behavior of Marine Ecosystems in the Complex flows

Evgeniy Dats\*†, Sergei Minaev\*, Vladimir Gubernov\*\*, Taisia Mirhoshnichenko\*\*,  
Junnosuke Okajima\*\*\*††

\*Institute of Applied Mathematics, Far East Branch of Russian Academy of Science

\*\*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Science

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

†Applicant, ††IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

The goal of the project is to perform fundamental research, which allows understanding the mechanisms of interaction of ecosystems with turbulent motion of the environment, which will improve the accuracy of productivity forecasts and the assessment of marine bio-resources, in particular, populations of plankton. In this study, using the “predator-prey” model as an example, we introduce the concept of the normal propagation speed of the population front, which depends on the problem parameters such as the diffusion coefficients, the plankton growth rates, the mortality and the predation rates. Using numerical modeling, the features of the populations front propagation in a system with diffusion instability are investigated, the propagation velocities of the population’s front with sporadic structure are determined, and the regularities are revealed that make it possible to estimate the propagation velocities for a given set of problem parameters.

#### 2. Details of program implement

All project participants were engaged in numerical modeling related to the subject of the project. In 2021, we had web-based meetings to discuss the results and future direction. The online meetings were held 4 times (22 May, 15 June, 9 September, 25 December 2020).

#### 3. Achievements

A piecewise linear model of phytoplankton growth in the presence of a convective flow has been proposed in the project. The model, in one-dimensional formulation, admits a stable autowave solution, propagating with a certain critical minimum velocity. The main purpose of the work is to study the features of the phytoplankton front propagation in the presence of vortex flow. The vortex flow represents chain of two-dimensional vortices described by the Taylor-Green solution. There different regimes of wave propagation were revealed depending on the intensity of the vortex flow and the model parameters. It was shown that front propagation dynamics in vortex flow described by proposed piecewise linear model qualitatively the same as that described by nonlinear Fisher-KPP model.

#### 4. Summaries and future plans

A piecewise linear model of phytoplankton growth that allows analytical solutions has been proposed in the paper. The model, associating the temporal change in the concentration of phytoplankton and nutrients in the channel, takes into account the main factors influencing the birth, extinction, and the features of phytoplankton propagation in the presence of a medium flow. The model admits a stable autowave solution propagating with a certain critical minimum velocity  $u_{\min}$ . In this sense our model is similar to the Fisher-KPP model. However, it has an essential new feature, compared to the latter, due to the presence of the second equation. It has been numerically shown in one-dimensional approach that in unperturbed medium a phytoplankton wave propagating with a speed  $u > u_{\min}$  tends to a stable state with a speed of  $u_{\min}$ .

The dynamics of phytoplankton is studied in a chain of two-dimensional vortices described by the Taylor-Green solution as an approximation of the influence of turbulence. It has been shown that there are three different regimes of propagation of the population wave, depending on the intensity of the vortex flow field. In the case of a low intensity of the vortex flow, the wave of phytoplankton colony propagates smoothly. Middle-intensity vortex flows leads to zigzag regime of wave behavior, and the high-intensity ones impart a jump-like character to phytoplankton movement.

The influence of the model parameters on the phytoplankton dynamics has been studied. Namely, it has been found that with equal high-intensity vortex flows, the phytoplankton propagation velocity is higher in channels with larger vortices. An increase in the diffusion coefficient leads to a smearing of the front and an acceleration of the wave propagation. However, no further increase in the overall velocity occurs when diffusion rate reaches a certain value. The diffusion of phytoplankton has little effect on the wave dynamics of phytoplankton in the channel in comparison with the diffusion of nutrients.

The comparison of the solution obtained by calculating the considered two-dimensional model with the solution of the Fisher-KPP equation is carried out.

## 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] T. Miroshnichenko, V. Gubernov, S. Minaev, V. Mislayvskii, and J. Okajima: Piecewise Linear Model of Phytoplankton Wave Propagation in Periodical Vortex Flow, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, Vol. 82, No. 3, (2022), pp. 294-312, doi: 110.1137/21M1405861
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [2] E. Dats, S. Minaev, V. Gubernov and J. Okajima: The Normal Velocity of the Population Front in the “Predator-Prey” Model, *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2021)*, Sendai, (2021).

課題番号	J21I088
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	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

**火星大気突入カプセル周り流れの数値解析**  
Numerical simulation of flowfields over Mars entry capsules

Michiko Furudate\*†, Minji Jo\*, Bok Jik Lee\*\*,

Kazuma Yomo\*\*\*, Yudai Hamashima\*\*\*, Hiroki Nagai\*\*\*\*††

\*Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, South Korea

\*\*Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University, South Korea

\*\*\*Dept. of Aerospace Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

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

†Applicant, ††IFS responsible member

## 1. 研究目的

現在、火星の低層大気中を飛行し様々な観測を行う火星飛行機の研究開発が JAXA や東北大学流体科学研究所を中心に進められている。この飛行機を火星の低層大気や地表まで運搬するためには、機体を収納したカプセルを極超音速で火星大気に突入させる必要がある。一般に惑星大気突入カプセルは空力加熱からの防御や空力性能の観点から頂角の大きな鈍頭円錐をしているが、火星飛行機を搭載するためにより最適なカプセル形状について検討する必要がある。

最適な火星大気突入カプセルの設計には、突入軌道にそった精度が良い熱流束や空力係数のデータが必要である。そのためには、熱励起や化学反応など的高温実在気体効果を考慮しての CFD 計算が必須であるが、通常このような CFD には長い計算時間が必要である。一方、極超音速流中の空力係数に良い近似を与えるニュートニアン法は短い時間での計算が可能であるが、高温実在気体効果が著しい条件では精度が低いという問題点がある。そこで本研究では、高温実在気体効果を考慮した CFD 計算の結果を利用してニュートニアン法を改良し、より簡単にかつ精度が良い熱流束や空力係数予測法の構築し、突入軌道上の飛行条件に対しての突入カプセル表面への熱流束や空力係数が算出できる計算方法の構築を目指す。

## 2. 研究成果の内容

### 2-1. 火星大気中を飛行するカプセル周りの流れの熱化学非平衡CFD解析

まず、 $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{C}$  および  $e^-$  の 7 化学種を考慮し、火星大気中を飛行するカプセル形状としてノーズ半径 0.8m, 円錐部の半頂角 70度, ベース半径 1m の sphere-cone に対して、軸対称流れ CFD 解析を行った。流れの熱化学非平衡を考慮するために、2 温度モデルを用いた。また、ニュートニアン解析の結果と比較するため、非粘性流を仮定した。気体は  $\text{CO}_2$  100% のとし、表 1 に示す 4 つの流れ条件に対して計算を行った。この計算によって得られた、淀み流線に沿った温度分布、全モル密度分布、圧力分布を図 1 に示す。ケース 1, 2 および 3 では、衝撃

波のすぐ背後で流れ場は熱化学非平衡であり並進温度と振動温度に大きな違いがみられるが、壁に近いところでは熱平衡に近づいている。ここでは図を示さないが、ケース1では90%以上、ケース2では約60%、ケース3では約40%のCO<sub>2</sub>の乖離が認められた。ケース4では、衝撃波背後から壁まで低い振動温度が維持されており、また、CO<sub>2</sub>の乖離はほぼ起こっていないことから、熱化学的に凍結した流れであると判断できる。

## 2-2. 化学反応を伴う衝撃波背後の二酸化炭素流の準1次元解析

次に、2-1のCFD解析で考慮したのと同じ化学種と化学反応モデルを用い、衝撃波背後の流れの準1次元解析を、表1の流れ条件に対して行った。このとき、流れ場の温度として並進温度のみを考慮した。この計算で得られた、衝撃波からの距離に対する温度分布、全モル密度分布、圧力分布を図2に示す。どのケースにおいても並進温度は衝撃波背後で高く、その下流では化学反応によって温度が下がり、平衡状態に近づいている。下流での温度は、2-1のCFD解析で得られた流れ場の壁付近の温度と大体一致する。全モル密度分布、および、圧力分布においても、平衡状態になるまでの衝撃波からの距離がCFD解析よりも短い、CFD解析での壁付近の全モル密度や圧力の値と同等の値が得られた。

Table 1 Freestream conditions

Case	$V_\infty$ [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$M_\infty$
1	6882	$8.755 \times 10^{-6}$	24.43
2	4516	$7.817 \times 10^{-5}$	16.03
3	4072	$1.635 \times 10^{-5}$	14.45
4	4072	$1.635 \times 10^{-6}$	14.45

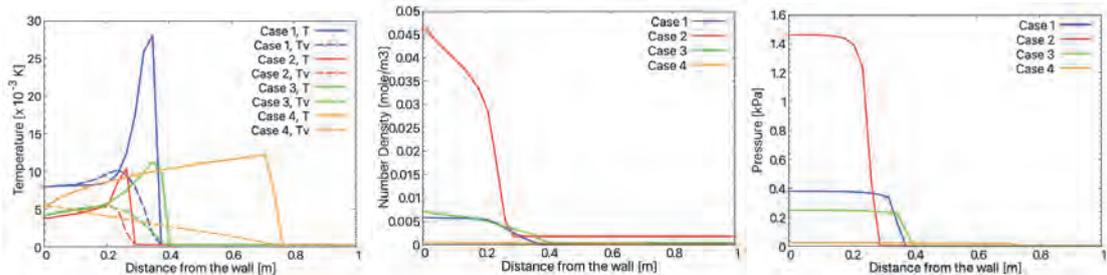


Fig.1 Temperature, total number density and pressure distributions along the stagnation streamline calculated by CFD.

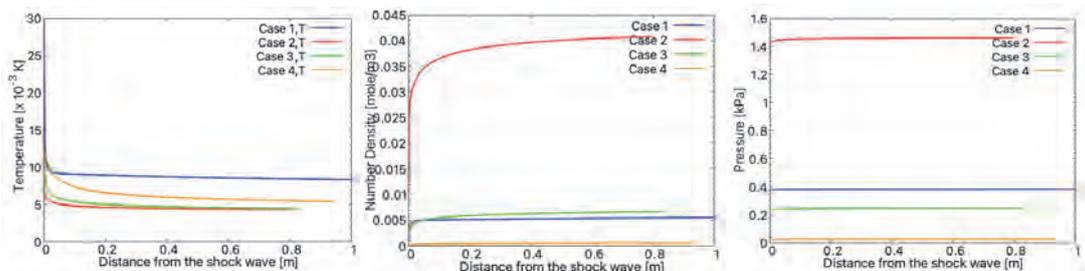


Fig.2 Temperature, total number density and pressure distributions behind the shock wave calculated by a quasi-1D code.

Table 2 Comparisons of predicted drag coefficients

Case	CFD	Modified Newtonian		Present
		$\gamma=1.4$ (%error)	$\gamma=1.158$ (%error)	
1	1.7206	1.6312 (-5.20)	1.7113 (-0.54)	1.7024 (-0.95)
2	1.7670	1.6296 (-7.78)	1.7096 (-3.25)	1.6988 (-3.86)
3	1.7318	1.6289 (-5.64)	1.7089 (-1.32)	1.6864 (-2.62)
4	1.6612	1.6289 (-1.94)	1.7089 (2.81)	1.6754 (0.85)

### 2-3. 準1次元流れ解析結果を利用したニュートニアン解析

ニュートニアンによる空力係数予測は、一般に物体表面と流れの角度を  $\theta$  として、

$$C_p = C_{p0} \sin^2 \theta \quad (1)$$

で求められる。ここで  $C_{p0}$  は、衝撃波背後での分子の乖離を考慮した修正係数で

$$C_{p0} \approx \frac{2}{\gamma M_\infty^2} \left\{ \left[ \frac{(\gamma+1)^2 M_\infty^2}{4\gamma M_\infty^2 - 2(\gamma-1)} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left[ \frac{1-\gamma+2\gamma M_\infty^2}{\gamma+1} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

で表されるとされる。本研究では、この修正係数を準1次元解析結果から

$$C_{p0} = \frac{p_0}{p_{0\infty}} = \frac{p + \rho V^2}{p_\infty + \rho_\infty V_\infty^2} \quad (3)$$

として求めた。ここで  $p_0$  は流れ場全圧で、準1次元解析で得られた流れ場が大体平衡状態に達した時の静圧、密度、速度から求めた。表2に、2-1でCFD解析を行った sphere-cone 形状の抗力係数に対し、本研究の修正係数を用いて得られた値を、CFD解析結果、および、式(2)の修正係数を用いて得られた値と比較している。式(2)の修正係数には、分子の並進運動と回転運動を考慮した場合の比熱比1.4と、それに振動運動を加えて考慮した場合の比熱比1.158を用いて、比較を行った。式(2)の修正係数を比熱比1.4で計算した場合の抗力係数は、熱化学凍結流であるケース4の場合にCFDの値を比較的良く再現したが、それ以外のケースでは5%以上の誤差が見られた。また、式(2)に比熱比1.158を用いた場合は、90%のCO<sub>2</sub>の乖離し平衡流に近いと考えられるケース1の場合にCFDの値を1%以下の誤差で良く再現した。非平衡流であるケース2、3では誤差が大きくなるが、比熱比1.4を用いた場合よりも誤差は小さかった。しかし、熱化学凍結流であるケース4では、比熱比1.4を用いた場合より大きな誤差となった。準1次元流れ解析結果を利用した式(3)の修正係数を用いた時には、平衡流に近いケース1および熱化学凍結流であるケース4に対して、CFDの値を良く再現した。しかし、ケース2、3の非平衡流に対しては3%程度の誤差が見られた。これは今回の準1次元流れ解析では、熱非平衡を考慮していないためではないかと考えられる。

今後、熱非平衡を考慮した準1次元流れ解析を行い、その結果を用いた修正ニュートニアン法について同様の検証を行う予定である。

### 3. 研究目標の達成状況

ニュートニアン法を改良し、より簡単にかつ精度が良い空力係数予測ツールの構築方法を確立した。

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、熱励起や化学反応などの高温実在気体効果を考慮しての CFD 計算により空力係数予測を行い、熱化学過程を適切に記述する熱化学モデルが必要であることが再確認された。

今後の研究では、高温実在気体効果を考慮した**衝撃波背後流の準 1 次元解析結果**をデータベース化して、ニュートニアン法を改良し、より簡単にかつ精度が良い熱流束や空力係数予測法の構築し、突入軌道上の飛行条件に対しての突入カプセル表面への熱流束や空力係数の算出法を探索する予定である。

#### 5. 研究成果

##### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] M. Furudate, M. Jo, Bok Jik Lee, K. Yomo, Y. Hamashima and H. Nagai: Numerical simulation of flowfield over Mars entry capsules”, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-39, pp. 85-86.

##### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J21I089
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## New Parameterization Methods for Uncertainty Quantification of Geothermal Reservoir Models

Elvar K. Bjarkason\*, Ruanui Nicholson\*\*††, Oliver J. Maclaren\*\*, Anna Suzuki\*†

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Department of Engineering Science, The University of Auckland

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

This study is aimed at developing a better understanding of what types of parameterization schemes are suitable for geothermal reservoir modeling. The objective of the project is to develop and test novel and useful parameterization methods for reservoir models used to describe high-enthalpy geothermal systems. Parameterization schemes currently used in the geothermal industry are commonly too restrictive to provide a good representation of geothermal reservoirs. Applying current industry standard schemes to uncertainty quantification of a geothermal reservoir can, therefore, result in biased estimates with underestimated model uncertainty. We target developing parameterization schemes which can better characterize geothermal reservoirs and more accurately estimate the model uncertainty. Our focus has been on developing parameterization schemes for use along with ensemble-based uncertainty estimation methods. We especially target more flexible schemes for describing the energy sources that feed geothermal reservoirs.

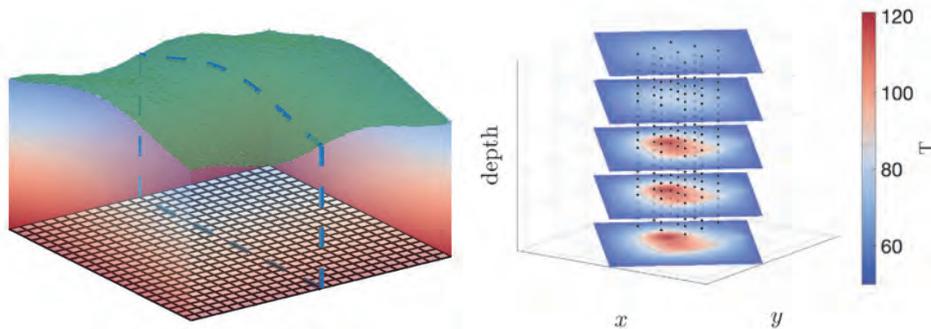


Figure 1 : (Left) Model domain for a geothermal system, where the local topography defines the top of the model. Geothermal fluid and heat are supplied to the system through the bottom boundary. (Right) Model temperatures [°C] along horizontal slices, and observation wells (dotted lines).

### 2. Details of program implement

In the first year of this project, we developed and proposed new parameterization schemes for the main parameters that are of interest in geothermal models (Fig. 1). Our approaches include ways of representing parameters for formation permeabilities and porosities, and bottom boundary conditions controlling the upflow of geothermal energy inside the Earth. Importantly, our schemes allow us to assign

prior knowledge in a flexible way for many model parameters. Thus, our expectations are that those schemes can be more adaptable and facilitate more reliable uncertainty quantification than schemes currently used in the geothermal industry. For the second year, we looked at demonstrating the applicability of our methods when it comes to applying them to uncertainty quantification of geothermal models.

Our focus was on testing our flexible prior parameter schemes for bottom boundary conditions used in geothermal models. Those schemes use Gaussian priors and additional thresholding to generate parameter samples having features which resemble what we might expect for geothermal settings. To evaluate those methods, we constructed simple test cases mimicking key features of current state-of-the-art geothermal models. To reduce the computational burden of our initial trials, we considered 3D steady-state heat conduction models as computationally cheap proxies for the high-enthalpy, convective geothermal reservoir models of interest. Using such proxy models, we established that in its most basic form our bottom boundary flux scheme can provide posterior flux samples that compare well with bottom boundary flux regions from a state-of-the-art model used to describe the Wairakei geothermal field in New Zealand (Fig. 2). The basic approach is less suited to cases with clear linear flux regions associated with (sub)vertical permeable faults. However, modifications to the basic scheme that incorporate additional assumptions or prior knowledge, such as the (likely) locations of permeable fracture zones, can provide better results (Fig. 3).

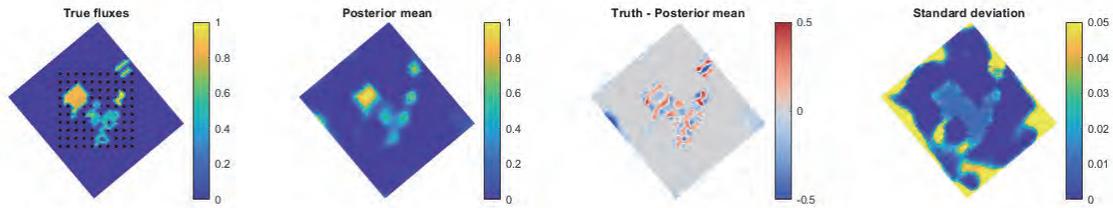


Figure 2 : Test results where the true boundary fluxes (normalized) are based on the Wairakei field. Also shown are the estimated posterior mean, the difference between the true fluxes and the posterior mean, and the standard deviation of the posterior samples.

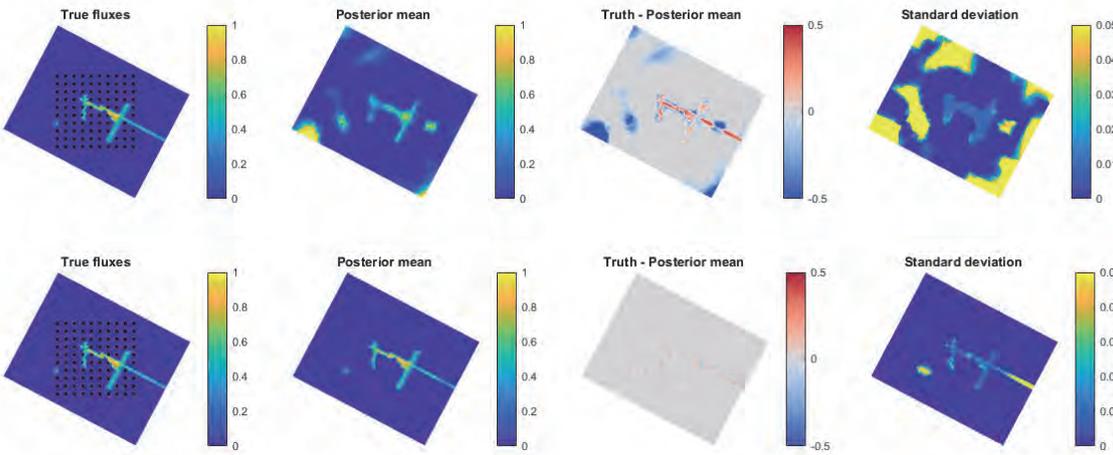


Figure 3 : Test case based on the Montserrat field. The top row shows results for the basic parameter scheme. The bottom row provides results for a variant with additional knowledge of the locations of the permeable fracture zones.

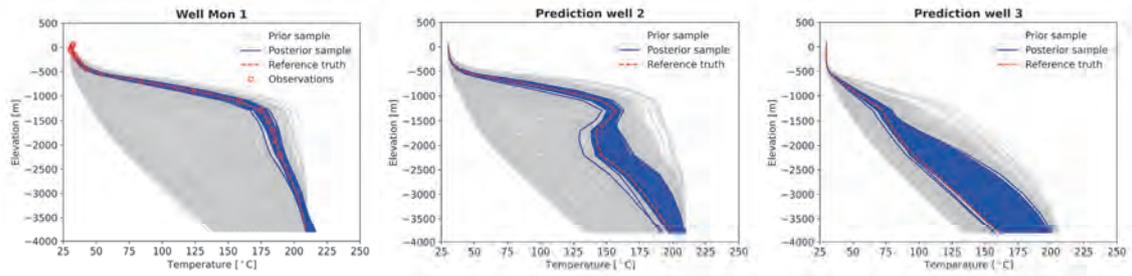


Figure 4 : Ensemble posterior temperature predictions compared with the steady-state temperature observations for observation well Mon 1 in the Montserrat geothermal field and the reference model temperatures at two prediction wells.

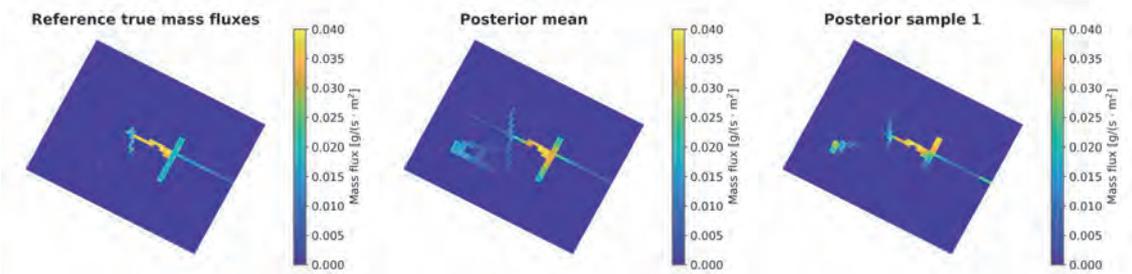


Figure 5 : Estimation results for the bottom boundary mass-fluxes of the convective Montserrat model compared with the reference true fluxes.

After our preliminary tests using the proxy models, we applied our bottom boundary parameter schemes to realistic and more computationally demanding high-temperature, convective geothermal reservoir models based on the Montserrat geothermal field. The results indicate that our schemes can provide reasonable estimates and error bounds for bottom boundary mass-fluxes appearing in a realistic geothermal model (Figs. 4 and 5).

### 3. Achievements

We have developed a better understanding of what types of parameterization schemes are suitable for geothermal reservoir modeling by carrying out uncertainty quantification experiments that showcase our bottom boundary parameter representation schemes. Our results suggest that the proposed bottom boundary parameterization approach may be adaptable enough to represent features that are representative of mass fluxes present in geothermal systems. Additionally, the results indicate that the proposed schemes may help to mitigate underestimation of model uncertainty.

### 4. Summaries and future plans

The results indicate that our parameter schemes can provide improved flexibility over standard parameterization schemes used for bottom boundary conditions in geothermal models. Furthermore, the proposed parameter schemes appear to be flexible and reliable enough to provide good estimates of model uncertainty. Before extending our work further, we plan to wrap up our current journal manuscripts that are under preparation but behind schedule. This includes completing our tests using a more computationally demanding air-water reservoir model. Currently, the results for the air-water model are inconclusive since it commonly results in simulation runs that have issues converging, which is problematic when carrying out the data assimilation.

5. Research results

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

[1] E.K. Bjarkason, O.J. Maclaren, J.P. O'Sullivan, M.J. O'Sullivan, A. Suzuki and R. Nicholson: Testing Spatially Flexible Bottom Boundary Parameter Schemes and Priors for Geothermal Reservoir Models, *Proceedings of the 43rd New Zealand Geothermal Workshop*, Wellington, New Zealand, (2021), 9 pages.

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

[2] E.K. Bjarkason, R. Nicholson, O.J. Maclaren and A. Suzuki: Verification of Novel Parameterization Methods for Uncertainty Quantification of Geothermal Reservoir Models, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-16, 3 pages.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J21I090
区分	一般共同研究
課題分野	人・物質マルチスケールモビリティ分野
研究期間	2021.4～2022.3
継続年数	1年目（発展）

既存空港を利用した那覇空港を拠点とした際の離島や都市部を結ぶ飛行車両の実現性の検討  
 Feasibility study of an air transportation system with flying vehicle among isolated islands  
 and major cities around Naha airport using existing airports

森澤 征一郎<sup>†</sup>, 坂井 玲太郎<sup>\*\*</sup>, 菊地 亮太<sup>\*\*\*</sup>, 兼久 勇人<sup>\*</sup>, 大林 茂<sup>\*\*\*\*††</sup>  
<sup>\*</sup>沖縄工業高等専門学校, <sup>\*\*</sup>宇宙航空研究開発機構, <sup>\*\*\*</sup>京都大学,  
<sup>\*\*\*\*</sup>東北大学流体科学研究所  
<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>所内対応教員

## 1. 研究目的

那覇空港は日本本土とアジア諸国の中間地点に位置し、日本含むアジア主要都市を迅速に結びつけるリージョナルハブとして期待されるとともに、沖縄県内の離島を結ぶ中継地点でもある。この離島間では、100席以下の小型航空機で2地点を結ぶ通勤航空会社が存在し、重要な移動手段となる。その際、台風などの悪天候で船舶が就航できないときには緊急輸送となる。しかし、離島間の航空路線は小規模かつ需要に限られるため、座席当たりの運航コストが高く、構造的に採算性が低く、路線の維持や確保を図ることが課題となっている。一方、近年では新たな移動手段として空飛ぶクルマなどの飛行車両に非常に多くの期待が集まり、離島間での移動手段としても検討が進められている。本研究では、航空機が那覇空港に離発着する際に悪天候の影響を調査し、今後の緊急輸送に役立てるとともに、飛行車両を投入した際の離島間輸送に対する利点・欠点を明らかにすることを目的とする。そのために、本年度は、台風の有無による那覇空港に着陸する航空機の航空路、及び飛行高度・対地速度の違いを調査するとともに、飛行車両の機体成立検討に向けた機体形状のサイジングを実施する。

## 2. 研究成果の内容

初めに、台風の有無による那覇空港に航空機が着陸する際の航空路、及び飛行高度・対地速度の違いを分析する。なお、対象とした機種は沖縄県外や県内離島への航空路線が就航している Boeing 737-400 である。図1に9月17日15時時点での2015年（台風の発生なし）と2016年（台風の発生あり）の風速の等高線を示し、図2に2015年及び2016年に那覇空港を着陸する際の航空路を示す。その結果、台風が沖縄本島に接近した2016年では航空路が南西諸島側で大きくばらついている。また、那覇空港への着陸は南側から行っているが、2016年では那覇空港に着陸する航空路は那覇空港への北側から進入している。さらに、石垣島へ着陸する航空路が存在せず、この結果は台風16号の中心が石垣島にあるため欠便になったと考えられる。

さらに、図3に2015年及び2016年に那覇空港を着陸した際の対地速度と飛行高度の時系列変化を示す。2016年での対地速度は2015年に比べてばらつきが少なく勾配の変化が小さい。これらは、台風の強風による機体に及ぼす影響を軽減させるために高度を低くし、対地速度の変化を小さくして緩やかに着陸を行ったと考えられる。また図6(b)より、180s前後で離陸時での対地速度の勾配に変化が見られるといった特徴も確認することが出来た。



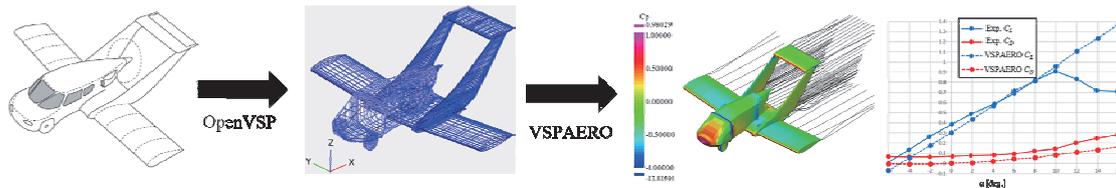


図4：OpenVSPによる機体形状モデリングと性能評価の手順

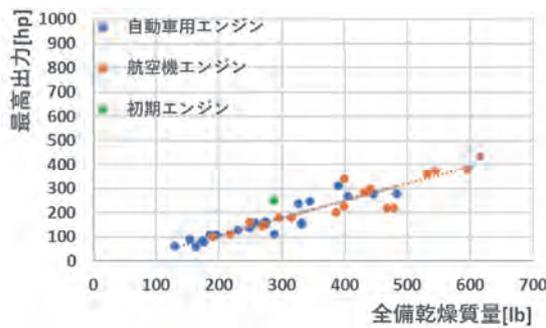


図5：エンジン性能の評価

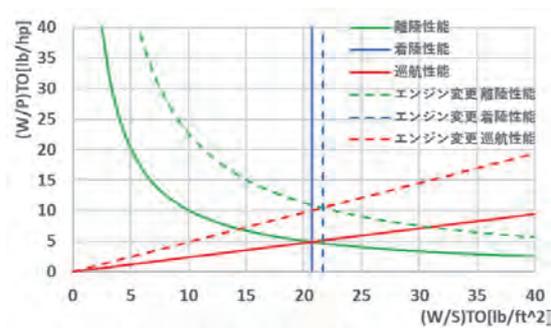


図6：機体性能のサイジング結果

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は航空機が那覇空港に離発着する際に悪天候の影響を調査し、台風の有無による航空路、対地速度、及び高度の違いを導くとともに、飛行車両の機体成立検討に向けた機体形状のサイジングを実施した。加えて、本テーマを派生した内容で科研費（若手）を獲得するなど研究目的を達成する成果を得ている。しかし、昨年度に続き、本年度もコロナ禍による影響を受け、申請者の所属機関で連携している地元エアラインと議論や意見交換を十分行うことが出来なかった。この点は来年度以降も継続していく予定である。

[達成度：95%]

### 4. まとめと今後の課題

本研究は、昨年度採択されたリーダーシップ共同研究を発展させ、台風の有無による那覇空港に航空機が着陸する際の航空路、及び飛行高度・対地速度の違いを分析とともに飛行車両の機体成立検討に向けた機体形状のサイジングを実施した。

その結果、航空機の運航状況の分析では、台風が沖縄本島に接近したときとそうでないときの那覇空港へ着陸する航空路が顕著に異なるとともに、台風の強風による機体に及ぼす影響を軽減させるために高度を低くし、対地速度の変化を小さくして緩やかに着陸していることがわかった。一方で、気象要因による運航制約条件の精緻化するためにはこれらの特徴と運航状況遅延や欠便状況について検討が必要である。

また、機体形状のサイジングではエンジン性能変更前より翼面荷重( $W/S$ )<sub>TO</sub>、パワー荷重( $W/P$ )<sub>TO</sub>ともに大きくなるとともに、離島間を飛行する航続距離を十分にカバーできることがわかった。一方で、空力設計を行う上で必要な有害抗力や最大揚力係数などの予測精度を詳細に議論する必要がある。今後は、ナビエ・ストークス方程式による高忠実な空力シミュレーションや風洞実験を通してより詳細な空力設計に取り組む。

### 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] H. Kaneku, D. Yamabata and S. Morizawa: Study on Sizing Method on a Roadable Aircraft using OpenVSP, *Eighteenth International Conference on Flow Dynamics*, (2021), OS20-27.
- [2] S. Morizawa, R. Sakai, R. Kikuchi, H. Kaneku, and S. Obayashi: Realization of a roadable aircraft to connect Okinawa's remote islands, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2021), CFR-58.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

Project code	J21I091
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

## Construction of Flutter Boundary in Aeroelasticity via Advanced Machine Learning Models

Pramudita Satria Palar\*†, Koji Shimoyama\*\*††  
 Muhammad Faiz Izzaturahman\*, Lavi Rizki Zuhail\*\*

\*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

Development of advanced machine learning models is necessary to cope with contemporary challenges in data-driven modeling for aerospace engineering applications. One example is the modeling of flutter boundary in aeroelasticity, which is plagued by nonlinear response surface and computationally expensive simulation. Furthermore, providing uncertainty estimates is also important so to inform engineers on how accurate the prediction is. This research developed modifications of existing machine learning models so as to handle complex aerospace design problems more efficiently.

### 2. Details of program implement

With the rising trend in hierarchical models, Deep Gaussian Processes (DGP) has introduced itself competitive amongst its counterparts by offering a probabilistic framework for deep learning based on the Gaussian Process Regression (GPR). The present study considers the task of surrogate modeling and uncertainty quantification with DGP on three problems with discontinuous like features. Our study investigates the predictive power of DGP for solving aerospace engineering problems, including shock-dominated flow and fluid structure interaction problems, which are frequently plagued by nonstationary response surfaces (see Fig. 1)

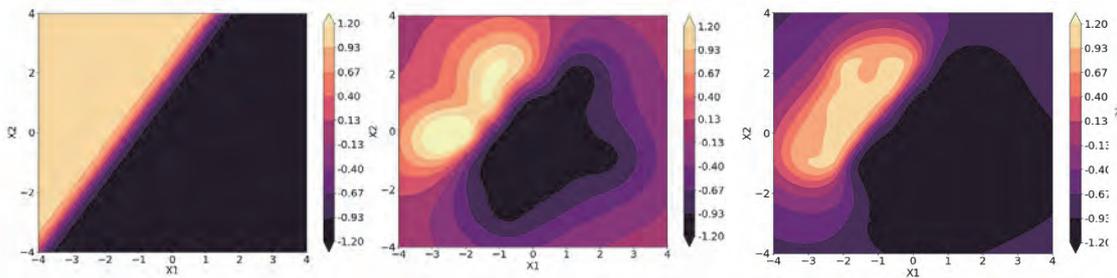


Figure 1 : Comparison of the true discontinuous function (leftmost), GPR (middle), and DGP (rightmost); the latter approximates the true function better than GPR.

### 3. Achievements

The DGP model is expected to be better than the conventional GPR, which is why we

performed experiments on a set of engineering problems (including Isogai problem, transonic airfoil, and wind turbine case). All cases are highly nonlinear and suitable for test problems. Fig. 2 shows one application example, in which we tried to predict the nonlinear surface of pressure coefficient. It can be seen in Fig. 2 that DGP yields a model with lower approximation error than the GPR. Such a characteristic is important if we want to apply the proposed method for nonlinear problems, including flutter boundary estimation. Besides, the developed multi-fidelity GP with composite kernel proved to be highly useful in making ease the process of kernel selection.

#### 4. Summaries and future plans

The proposed methods are capable of capturing nonlinear and complex response surfaces in aerospace engineering problems. On the other hand, the composite kernel-based multi-fidelity GP successfully yields better accuracy than the single-kernel counterparts. Our plan in the near future is to apply the developed methods for problems with higher input dimensionality.

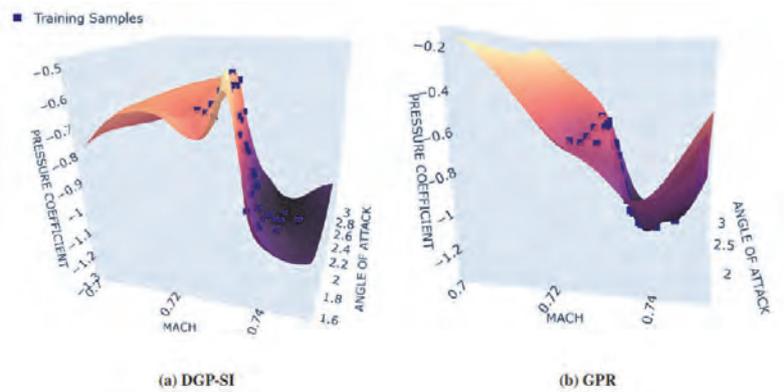


Figure 2 : Comparison of DGP and GPR on a benchmark aerodynamic problem. DGP successfully captures the nonlinear surface.

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable
  - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [1] Pramudita Satria Palar, Lucia Parussini, Luigi Bregant, Koji Shimoyama, Muhammad Faiz Izzaturrahman, Febrian Ahmad Baehaqi, Lavi Rizki Zuhail: Composite Kernel Functions for Surrogate Modeling using Recursive Multi-Fidelity Kriging, *Proceedings of the AIAA Scitech 2022 Forum*, San Diego-Hybrid (2022), pp. 0506.
- [2] Muhammad F. Izzaturrahman Pramudita Satria Palar, Lavi Rizki Zuhail, and Koji Shimoyama: Modeling Non-stationarity with Deep Gaussian Process, Applications in Aerospace Engineering, *Proceedings of the AIAA Scitech 2022 Forum*, San Diego-Hybrid (2022), pp. 1096.

課題番号	J21I092
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	2021.4～2022.3
継続年数	1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\*\*††  
\*東京都立大学, \*\*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

宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA)の宇宙科学研究所(Institute of Space and Astronautical Science: ISAS)に設置されている火星探査航空機リサーチグループでは、火星大気を利用した航空探査を目指した機体の研究開発を行っている。このRGはじめ、世界的にもその概念が検討されている火星探査航空機の多くではプロペラ推進が用いられることが想定されているが、プロペラが生み出す流れ(プロペラ後流)と翼など機体本体との干渉により、自身の翼性能や構造成立性に影響を与えることを考慮した設計を行う必要がある。特に、火星大気は低密度、低温であることから、地球大気を飛ぶ小型無人機に比べて低レイノルズ数、高マッハ数環境となり、風洞実験による現象追跡が難しいことから、数値計算の援用が有望である。

そこで本研究では、プロペラ後流を伴う火星探査航空機周りの空力や舵効きに基づく動特性に関わる知見の獲得を目的とする。この達成により、空力・推進・構造を統合した実機丸ごとシミュレーションによる設計検討技法を確立する。

## 2. 研究成果の内容

低レイノルズ数領域で火星飛行機にプロペラ後流が及ぼす影響について調査をするため、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)を用いた。プロペラ後流を直接プロペラの運動により模擬する計算は概念検討の段階では高コストであると判断されたため、本研究では体積力モデリング(Body Force Modeling: BFM)によりプロペラ後流をモデル化したActuator Disk Model(ADM)を適用した。

これらの計算手法を援用し、主翼前縁のプロペラ設置位置による、水平尾翼による縦安定性とエレベータ舵効きに関するパラメトリックスタディを実施した。調査対象の形状として、第1図に示す通り無推力の大気球試験機MABE-2に仮にプロペラを装用したものを仮定した。プロペラ設置位置は主翼スパン50%位置の前縁側と後縁側である。主流速度は61.7m/sで火星飛行機の巡航飛行を想定し、主翼コード長基準でレイノルズ数30,000、マッハ数0.2とする。火星飛行機の機体重量を支える揚力係数0.63で空力評価を行った。推力は1.71 N、トルクは0.725Nm、回転数は1秒当たり37.1回転、プロペラ進行率は $J=2.12$ となり、プロペラ回転方向は翼端渦と逆向きである。

図2に各迎角におけるピッチングモーメント係数 $C_M$ を示す。プロペラ後流がある方が頭

下げ方向にピッチングモーメントが大きくなり、プロペラ後縁配置の場合に頭下げ方向のピッチングモーメントが最大となった。これは、前縁配置ではプロペラ後流が主翼に干渉してから尾翼に流れ込むが、後縁配置では直接尾翼に流れ込むことが原因と考えられる。これにより、図3に示すように後縁配置の方が水平尾翼上面で流れが加速され、上面と下面での圧力差が大きくなり、前縁配置よりも大きなピッチングモーメントが発生したものと考えられる。さらに、迎角減少に伴って頭下げ方向にピッチングモーメントが増加した。本検討では、巡航  $C_L$  で評価しているため、巡航飛行状態でトリムを取る方法のひとつとして、エレベータを頭上げ方向により大きく舵角を取ることや、設置角度を変更することが考えられる。

図4に  $\delta e=0^\circ$  のときの  $C_M$  との差分を取った  $\Delta C_M$  を示す。プロペラ後流がある方がない場合に比べて  $\Delta C_M$  が大きい。特に、プロペラ後縁配置のとき  $\Delta C_M$  が最大であった。これはエレベータを切ったとき、図5に示すように後縁配置では前縁配置よりも水平尾翼上面の正圧領域の増加が大きくなるのが原因だと考えられる。

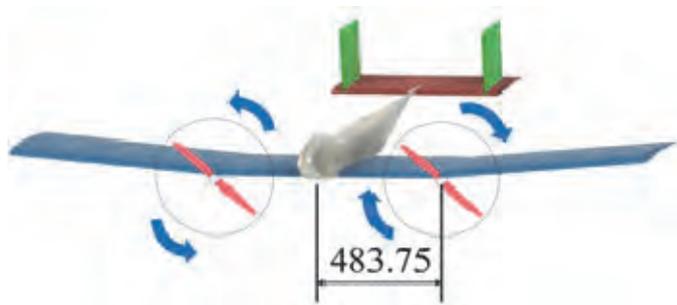


図1：推進系付火星探査航空機モデル

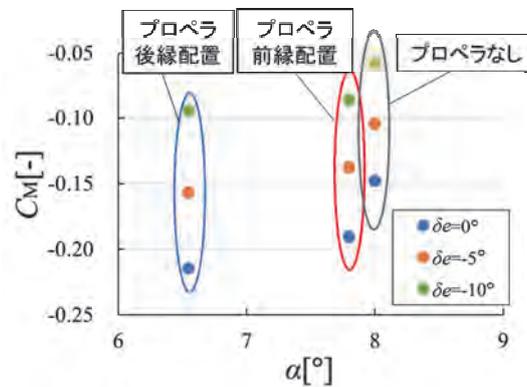


図2：プロペラ配置とエレベータ舵角ごとのピッチングモーメント係数の比較

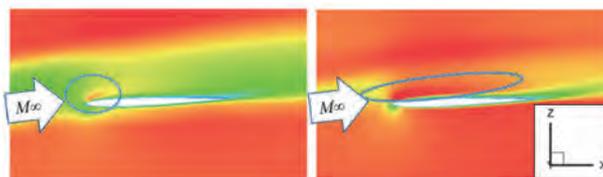


図3：水平尾翼ハーフスパン位置での空間速度分布。(左) プロペラ前縁配置, (右) プロペラ後縁配置。

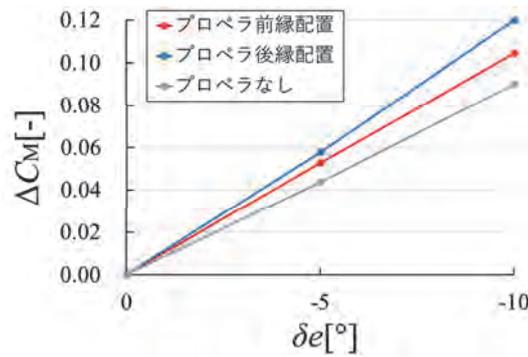


図4：エレベータ舵角  $\delta e$  に対する，ピッチングモーメントの増分  $\Delta C_M$ .

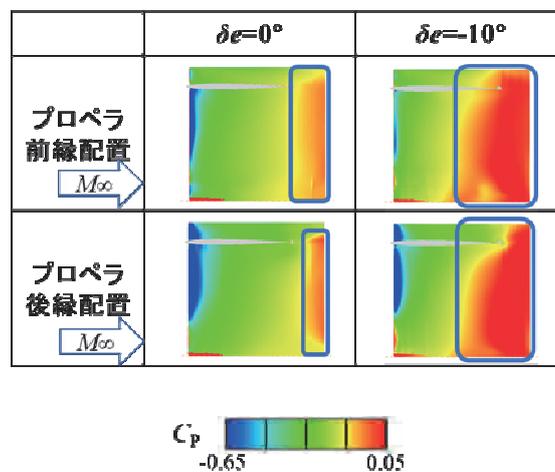


図5： $\delta e=0^\circ$ のときの  $C_M$  との差分，水平尾翼上面の表面  $C_p$  分布

### 3. 研究目標の達成状況

本申請研究において予想される成果を次の通りに挙げた。

- ① プロペラ後流を考慮した空力特性・データベースの取得
- ② エレベータ舵効きへのプロペラ後流への影響に関する知見
- ③ 運動特性に関する知見の獲得

項目①に関して，主翼や水平尾翼への影響性を中心に調査を行い，プロペラの統合位置の影響も含めて知識化することができた。運動計算に必要な空力データベースについては，さらに補完の余地があるが，適切な計算格子，計算モデルに関する知見は得ることができており，それらを活かして次年度課題の中で継続して実施する。②は無推力である MABE-2 に対して，新たな空力的な知見であり，MABE-2 による大気球試験後の，推力付き火星探査航空機概念を検討するための研究開発の進展に貢献できるものと期待している。③は，空力 - 飛行連成などの計算ツールは開発済みであることから，空力データベースの充足を図ったうえで，次年度課題の中で実施する。

### 4. まとめと今後の課題

申請研究では2021年度中，プロペラ後流の火星探査航空機のエレベータへの影響を調査した。

その結果、プロペラを統合した際は頭下げ方向のピッチングモーメントが大きくなり、プロペラ後縁配置で最大となることが分かった。また、プロペラを後縁に統合した際に舵効きが大きくなることも分かった。今後は、他のエレベータ舵角についても同様の調査を行った後、空力データベースを充足し、飛行経路の最適設計を行う。

## 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] Nakamura, H., Horie, S., Kanazaki, M., Fujita., K., and Nagai, H., “Numerical Investigation: Influence of Propeller Wake on Mars Exploration Airplane’s Stability,” *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information (AIFI-2021)*, CRF-40, Online, October 27, 2021.

[2] 中村晴香, 堀江史郎, 金崎雅博, 藤田昂志, 永井大樹, 「火星探査航空機縦安定性へのプロペラ後流の影響」, 令和3年度 宇宙航行の力学シンポジウム, オンライン, 2021年12月.

[3] 金崎 雅博, 谷口 翔太, 堀江 史郎, 安養寺 正之, 岡本 正人, 藤田 昂志, 永井 大樹, 大山 聖, 「MABE-2の空力計測結果と飛行試験を支えた空力技術」, 4B04, 第65回宇宙科学技術連合講演会, virtual, 2021年11月.

### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J21I093
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

Thermal conductivity reduction and carrier concentration optimization for development of nanocomposite materials with enhanced thermoelectric figure of merit

Vladimir Khovaylo\*†, Hiroyuki Miki\*\*††,  
Tetsuya Uchimoto\*\*, Sho Takeda\*\*, Sergey Taskaev\*\*\*, Marina Seredina\*,  
Evgeniya Chernyshova\*, Aleksandra Ivanova\*, Aleksandra Khanina\*  
\*National University of Science and Technology “MISiS”  
\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University  
\*\*\*Chelyabinsk State University  
†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Purpose of the project in 2021 was to synthesize novel stoichiometry of semiconducting Heusler-based alloys and related compounds for thermoelectric power generation via various synthesis techniques and to enhance their thermoelectric properties via thermal conductivity reduction and carrier concentration optimization by means of compositional engineering, varying valence electron count, and nanostructuring.

### 2. Details of program implement

Polycrystalline samples of double half-Heusler compounds  $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$  and  $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$  were successfully synthesized by arc melting and melt spinning techniques and consolidated by spark plasma sintering method. Structure of the prepared samples was examined by X-ray diffraction and scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray analysis. Thermal diffusivity was measured by a flash diffusivity method (LFA 457 MicroFlash, Netzsch, Germany) from 300 to 873 K under an Argon flow. The thermal conductivity  $\kappa_{\text{tot}}$  was calculated from the thermal diffusivity measurements  $D$ , the specific heat  $C_p$ , and the density  $d$ , following the equation:  $\kappa_{\text{tot}} = D \cdot C_p \cdot d$ . The specific heat capacity,  $C_p$ , was calculated theoretically using the Debye model, and the volume bulk density,  $d$ , was obtained by the method of Archimedes. The electrical conductivity  $\sigma$ , and the Seebeck coefficient  $S$ , were measured in a temperature range from 300 to 900 K via the standard four-probe and differential methods, respectively, using a laboratory-made system (Cryotel, Russia) in  $\text{He}_2$  atmosphere.

### 3. Achievements

Typical XRD pattern obtained for the studied samples at room temperature is presented in Fig. 1 for the case of  $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$ . All of the diffraction peaks are well indexed to the dominant compound of  $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$ , exhibiting a cubic crystal structure within the space group (F-43m) with a lattice parameter of 6.055 Å. The good indexicality and sharpness of the peaks indicate the homogeneity sample and its consistency of fine grains, which affects the samples' thermal conductivity.

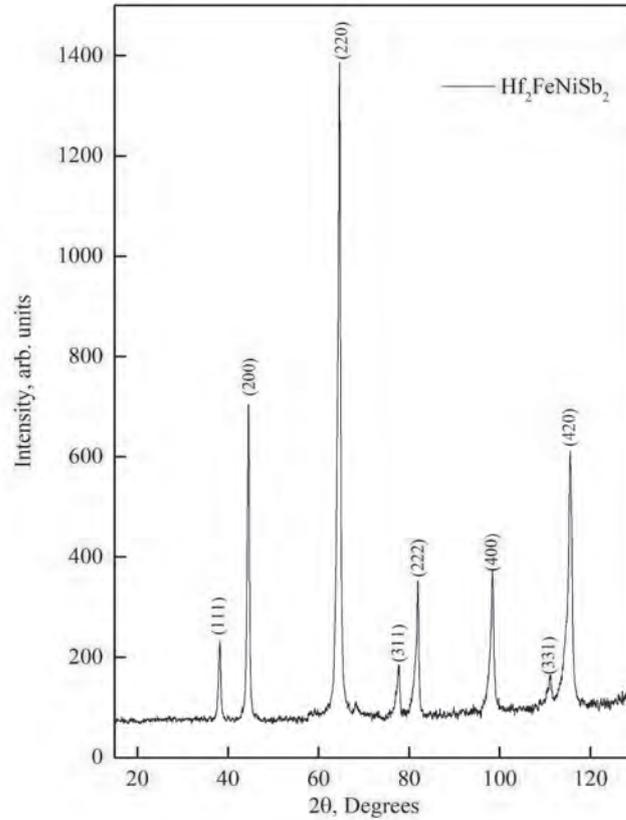


Figure 1: Powder X-ray diffraction patterns of  $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$

The electrical conductivity gradually increases with increasing temperature, till 650 K, for both samples due to their semiconducting nature. As the temperature increases beyond 650 K, the electrical conductivity increases more rapidly and reaches maximum values of  $9097$  and  $5240 \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  for  $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$  and  $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$ , respectively, at 873K, which falls in line with the experimental results for  $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$  which was reported previously.

Behavior of the Seebeck coefficient shows (Fig.3) that both the samples are *p*-type semiconductors. Initially, the Seebeck coefficient increases with increasing temperature, reaches a maximum, and then steeply decreases. This particular behavior arises from the majority carrier (holes) which are responsible for the increase of the Seebeck coefficient up to specific temperature. When this temperature is reached, the minority carriers (electrons) start to play dominant role at higher temperature, which result in the observed reduction of *S*. The Seebeck coefficient maximum values were obtained for  $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$  and  $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$  as  $228$  and  $293 \mu\text{V/K}$  at  $675$  and  $575\text{K}$ , respectively.

The room temperature thermal conductivity is as high as  $5.82$  and  $7.95 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  for  $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$  and  $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$ , respectively. These obtained values indicate that the compounds have lower intrinsic thermal conductivity than  $\text{TiCoSb}$  half Heusler alloy because of the smaller group velocity phonons and the disordered scattering by Fe/Ni. The lattice thermal conductivity  $\kappa_L$  was obtained by subtracting the carrier thermal conductivity ( $\kappa_e = L\sigma T$ ) from the total thermal conductivity. The room temperature  $\kappa_L$  of

$\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$  and  $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$  are  $5.78$  and  $7.93 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , respectively, i.e., is of about one-third of that of  $\text{TiCoSb}$  ( $18.7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), indicating the decrease in the total thermal conductivity mainly comes from the lattice thermal conductivity contribution.

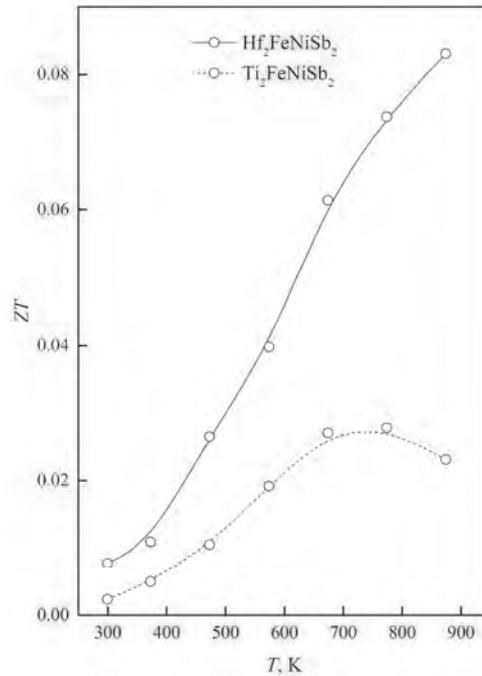


Figure 2: Temperature dependence of the thermoelectric figure of merit,  $ZT$ , for  $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$  and  $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$  samples.

The thermoelectric figure of merit for the samples under investigation is shown in Fig.2. Due to rather a low electrical conductivity, and rather a high thermal conductivity, the thermoelectric figure of merit of  $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$  and  $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$  reaches only 0.082 and 0.027, respectively, at 874K. These low  $ZT$  values could be increased by introducing substitutional dopants to compounds in further investigations.

#### 4. Summaries and future plans

An investigation of the thermoelectric properties of double half Heusler  $\text{Hf}_2\text{FeNiSb}_2$  and  $\text{Ti}_2\text{FeNiSb}_2$ , prepared by melt spinning method was carried out. The obtained samples exhibit the p-type semiconductor behavior as indicated from the positive sign of the Seebeck coefficient. The prepared compounds owe lower intrinsic thermal conductivity compared to  $\text{TiCoSb}$  half-Heusler alloy, attributed to the smaller group velocity phonons and the disordered scattering by Fe/Ni. However, the thermal conductivity values have to be further reduced, e.g., by doping of the parent alloys with substitutional elements like Sn, and In, in order to enhance phonon disorder scatterings and improve electrical properties.

#### 5. Research results (\* reprint included)

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

\*[1] E.M. Elsehly, A. El-Khouly, Mohamed Asran Hassan, A.P. Novitskii, D.Yu. Karpenkov, D.S. Pashkova, N.G. Chechenin, T. Uchimoto, H. Miki, Yu.N. Parkhomenko, and V. Khovaylo: Influence of carbon nanotubes on thermoelectric properties of  $p$  and  $n$ -type Heusler alloys, *Semiconductors*, 56, (2022), doi: 10.21883/FTP.2022.02.51955.28.

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	J21I094
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

Prediction and design methodology of axisymmetric shock reflection  
in supersonic flow

Hideaki Ogawa\*†, Chihiro Fujio\*, Masanobu Matsunaga\*,  
Yoshitaka Higa\*\*, Taro Handa\*\*, Kiyonobu Ohtani\*\*\*††

\*Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu 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 engineering applications including supersonic air intakes and nozzles. Mach reflection comprising an incident shock, a reflected shock and a Mach stem (disk) occurs at the centreline, 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 disk, 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 disk, 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. 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

The research is to be undertaken in a multidirectional approach combining experiment, computation and theory; (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 are measured using state-of-the-art laser diagnostics techniques; (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 (BL) into account; and (c) Theoretical analysis based on the curved shock and Guderley singularity theories along with the method of characteristics is to be conducted to enable formulation of the Mach reflection configuration for given inflow condition and intake/nozzle geometries.

### 3. Achievements

The effects of viscosity and presence of a perpendicular wall behind the trailing edge on the axisymmetric shock structure have been investigated numerically for the supersonic flowfields in ring wedge intakes in  $M_\infty = 2.5$  freestream (Fig. 1).

Figure 2 compares the viscous flowfield for the intake geometry modified via viscous correction with the case with slip wall. This signifies that the shock structure without boundary layer have been reproduced owing to viscous correction even in the presence of BL caused by viscosity.

The viscous flowfields with / without of a ring base compared in Fig. 3 indicate the Mach stem located farther upstream in the case with a base. This is attributed to the existence of base flow following rapid expansion at the trailing edge of the ring, as the BL growth on the inner wall must be the same between the two cases.

### 4. Summaries and future plans

Insights have been gained into the effects of viscosity and presence of a base on the flowfields as well as the effectiveness of viscous correction. The results are described in Ref. [2].

Future plans include the development of the prediction method for centreline shock reflection by coupling analytical approaches and shock theories in conjunction with further numerical investigation as well as experimental approaches using advanced flow measurement techniques such as molecular tagging velocimetry and flow visualisation in the supersonic wind tunnel and the IFS ballistic range to be conducted for verification.

### 5. Research results

#### 1) Journal

[1] C. Fujio and H. Ogawa: Physical insight into axisymmetric scramjet intake design via multi-objective design optimization using surrogate-assisted evolutionary algorithms, *Aerosp. Sci. Technol.*, Vol. 113 (2021), 106676 (14 pages), doi: 10.1016/j.ast.2021.106676

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

[2] H. Ogawa, C. Fujio, M. Matsunaga, Y. Higa, T. Handa, and K. Ohtani: Investigation on Viscous and Base Effects in Supersonic Ring Wedge Intake Flowfield, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-55, pp. 120-121.

[3] 松長真宣, 藤尾秩寛, 小川秀朗, 比嘉良貴, 半田太郎: 遺伝的アルゴリズムによる超音速風洞ノズルの形状最適化, 日本航空宇宙学会西部支部講演会 2021, オンライン, (2021), JSASS-2021-S011.

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

Not applicable.

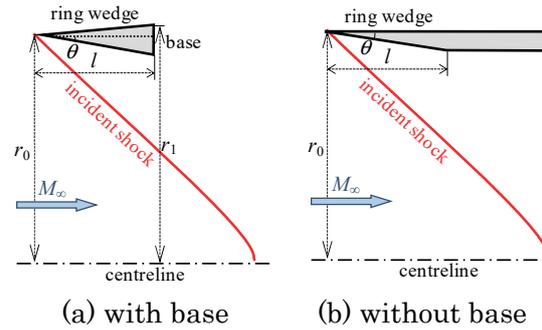


Figure 1 : Schematic of ring wedge configurations

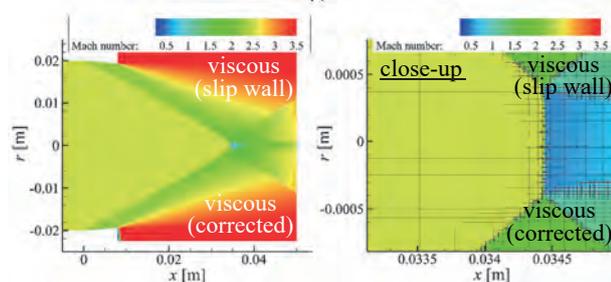


Figure 2: Comparison of inviscid and viscous flowfields after viscous correction

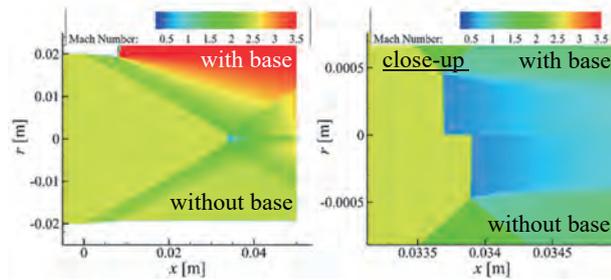


Figure 3: Flowfields with/without ring base (viscous regime)

課題番号	J21I095
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	1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

宮内 優<sup>††</sup>, 船本 健一<sup>\*\*††</sup>, 二階堂 正隆<sup>\*\*</sup>, 菅原 竜志<sup>\*\*</sup>, 津田 晋吾<sup>\*\*</sup>

\*宮崎大学工学教育研究部, \*\*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

血流動態と血管疾患の関連性については、これまでの研究で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大動脈の動脈瘤を対象に、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、(i) 左心室内の血流場到大動脈二尖弁が及ぼす影響の解明と、(ii) 血管壁の物質透過係数を推定するデータ同化法の提案を行った。

### 2. 研究成果の内容

#### (i) 左心室内の血流場到大動脈二尖弁が及ぼす影響の解明

大動脈弁に三尖弁(TAV)または二尖弁(BAV)を有する2つの左心室モデルを構築し、血流解析を行った。得られた計算結果を比較することで、二尖弁が左心室内の血流場に与える影響について調べた。ここで、各大動脈弁形状は臨床における知見を参考に、三尖弁の弁口は面積  $4.2 \text{ cm}^2$  の三角形に近い形状、二尖弁の弁口は面積  $1.84 \text{ cm}^2$  の楕円形に近い形状とした。それ以外の左心室の形状や左心室壁の動きは先行研究 (Yamada, et al., J. Biomech Sci Eng., 2018; Miyauchi, et al., AIP Adv., 2019) と同様に設定した。流体解析には熱流体解析ソフトウェア (Fluent 17.2, ANSYS, USA) を用いた。

計算結果の一例として、収縮期における左心室内の速度分布と、血流停滞を表すパラメータである relative residence time (RRT)の分布を図1に示す。図より、二尖弁モデルの方が三尖弁モデルより大動脈弁口を通過する拍出速度が大きいことが確認できる。この速度の違いは、両弁の弁口面積の違いによることに起因していると考えられる。また、RRTに関しては、二尖弁モデルの方が三尖弁モデルよりも心尖部においてRRTが高くなっている。このことより、二尖弁をもつ左心室の方がその心尖部において血流が停滞しやすく、血栓形成などの疾患を発症するリスクが高まることを示唆する結果が得られた。

#### (ii) 血管壁の透過性を推定するデータ同化法の提案

液体中の物質の濃度分布を表す方程式を拘束条件に、計測データと計算結果の差が最小となるような物質透過係数の値を推定するデータ同化法を定式化し、実装した。拘束条件付きの最小化問題の解法として、Lagrange 未定乗数法を採用した。液体中の物質の濃度分布を表す方程式には、実装の容易さから定常拡散方程式を用いた。拡散方程式を弱形式化し、境

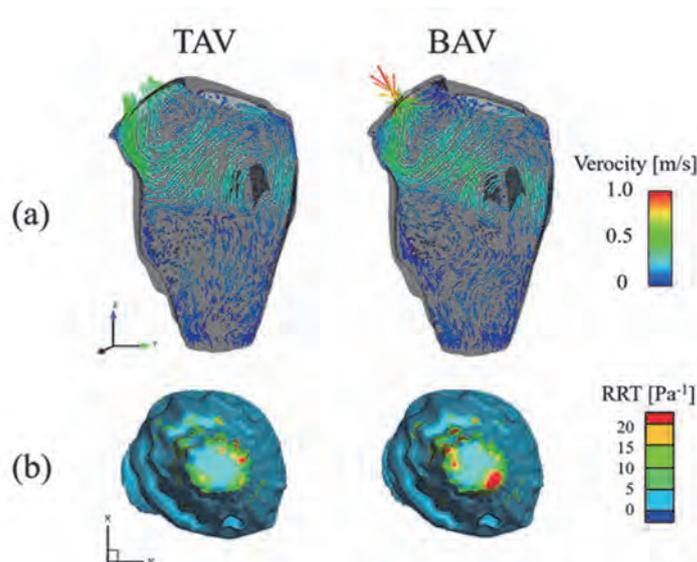


図1 シミュレーション結果. (a) 収縮期における速度分布, (b) RRT 分布.

界積分項に拡散によって血管壁を通過する物質透過条件式を組み込んだ. 有限要素法で方程式を離散化し, その非線形代数方程式の解法には Newton-Raphson 法を適用した. 既知の透過係数を与えた濃度分布の数値解を計測データとして用いた 1 次元の検証問題を通して, 今回提案した血管壁の透過係数を推定するデータ同化法が妥当であることを確認した.

### 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, 大動脈弁に三尖弁または二尖弁を有する 2 つの左心室モデルを用いて得られた結果を比較し, 二尖弁の場合に拍出速度が大きく, 血流停滞の度合いが高くなることを明らかにした. 今後は, 異なる開口形状を有する二尖弁モデルを作成して解析を行い, 形状の違いによる左心室内の血流場への影響を調べる. 血管壁の物質透過性を推定するデータ同化法に関する研究では, 定式化と 1 次元の検証問題による提案手法の妥当性の調査を行った. 今後は, 空間解像度や計測データの補間方法が物質透過性の推定精度に与える影響について詳しく調べる.

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] S. Miyauchi, S. Kosaka, T. Hayase, K. Funamoto: Numerical Analysis of a Blood Flow in the Left Ventricle-Aorta System, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-75, pp. 159-160.

[2] 津田晋吾, 宮内優, 船本健一: 大動脈二尖弁による左心室内血流場の変化に関する解析, 日本機械学会第 32 回バイオフィロントニア講演会講演論文集, No. 21-103, (2022), 2C12.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J21I098
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

Towards Next Generation CFD Models of Intracranial Aneurysm (NX-CFD): In-vitro validation studies and in-silico benchmarking of intracranial transitional flow

Khalid M. Saqr<sup>\*†</sup>, Makoto Ohta<sup>\*\*††</sup>  
Simon Tupin<sup>\*\*</sup>

\* Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

- 1- To determine the criteria for transition to turbulence in cerebral aneurysm
- 2- To develop open source CFD solver for transitional flow in cerebral aneurysm

### 2. Details of program implement

Recent research findings confirmed the existence of transitional flow in cerebral aneurysm. Transitional flow is linked to aneurysm formation and rupture via pro-inflammatory responses of endothelial cells. The characteristics of transitional flow, and its relationship with arterial geometry and aneurysm morphology is unknown until the present day. Current CFD models and methods are not sufficient to study the transitional flow in aneurysm and link it with clinical and biological implications. This project aims at conducting in-vitro and in-silico investigations of transitional flow in cerebral aneurysms of different sizes and morphologies. The in-vitro study will be conducted using PIV and silicone models. The in-silico study will be conducted using the open source CFD package OpenFOAM.

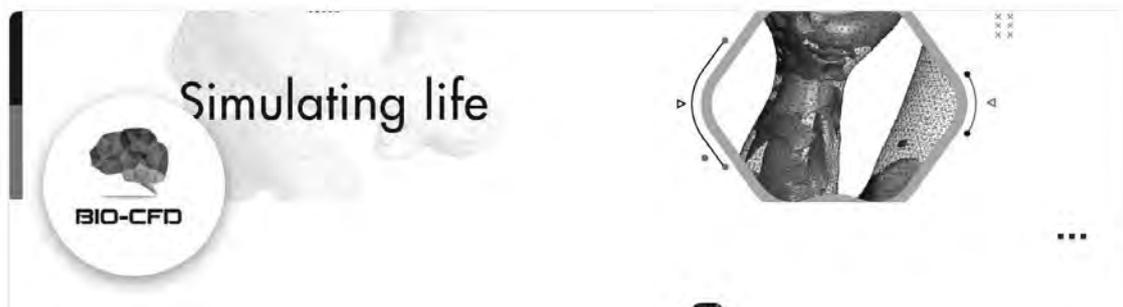


Figure 1 : The venture business company operated by K. M. Saqr

### 3. Achievements

Sufficient Results

### 4. Summaries and future plans

Using the results and knowledge of endovascular treatment and the CFD efficacy to the

treatment diagnosis, we would like to operate a venture business company. Now, it is just started. Figure 1 shows an advertisement of company. Bio-CFD is the world's first Computational Fluid Dynamics (CFD) platform for medicine and life sciences.

The platform is designed to empower personalized medicine, surgical simulations and customized drug delivery systems. Its technology is optimized for patient-specific simulations with clinically-relevant reporting capabilities. Bio-CFD empowers clinicians and biomedical engineers who need CFD simulations in numerous areas such as vascular medicine and devices and reparatory infection control.

## 5. Research results

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

[1] S. TUPIN, K. Takase, and M. Ohta: Experimental analysis of pressure and flow alterations during and after insertion of a Multilayer Flow Modulator into an AAA model with incorporated branch, *Cardio Vascular and Interventional Radiology*, 44(8) (2021), pp. 1251-1259, doi: 10.1007/s00270-021-02835-z

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

[2] S. Tupin, M. Zhang, Y. Li, and M Ohta: Dual-Stent Microstructural Characteristics and their Impact on Intra-Aneurysmal Haemodynamics, *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Flow Dynamics - ICFD 2021*, Sendai, (2021) OS14-1, pp. 558-559

[3] M. Ohta: Computer simulation, flow chamber and biomodel for development of medical devices, *UTM-IFS 3rd International Biofluid Symposium 2021*, Sendai, (2021)

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

Venture Business Company. BIO-CFD  
<https://bio-cfd.com/posts/343>

Project code	J21I099
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

Application of core-based inversion to reconstruct stress field  
in an underground geoscience laboratory

Takatoshi Ito\*†, Xiaodong Ma\*\*††, Yusuke Mukuhira\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Department of Earth Sciences, ETH Zürich

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

We have developed the novel in-situ stress estimation method called diametrical core deformation analysis (DCDA) by measuring the asymmetric variation of rock core diameter which cut out from at the study depth. In a laboratory experiment and several field case studies, DCDA showed reasonable performance to demonstrate its validity. Then, we are expanding the DCDA application not only to estimate the differential stress but also to estimate the magnitude of each horizontal stresses. However, we need more application validation of the DCDA method to the rock core from greater depth where rock is subject to significant differential stress. The acquisition of rock core from greater depth is not easy due to the cost and difficulty of core-drilling. So, the application of the DCDA method to real field scale has been limited due to difficulty to access the core from greater depth.

So we need to apply DCDA to more field applications to demonstrate its validity and feasibility, by comparison, the result from other methods. We have started the collaboration with the project Deep Underground Geoscience Laboratory (DUGLab) in the Swiss central Alps, which is operated by ETH Zurich and the Swiss competence center for energy research - supply of energy (SCCER-SoE). Multidisciplinary measurement, experiment, and study are planned in this project for mainly geothermal and also for better understanding of induced seismicity associated with fluid injection. Application of DCDA to the rock core samples from this project will provide stress profile along the borehole and the heterogeneity of the differential stress. So, another objective is to contributing DUGLab by providing the in situ stress estimation with the DCDA method and to contribute a comprehensive understanding of the stress field around the Bedretto underground laboratory.

2. Details of program implement

In addition to the measurement result by Dr. Ma during his visit to ifs in 1st year of this project, we performed the DCDA measurement for same rock core samples. We also measured the anisotropy of elastic wave velocity in rock mass sample. Then, we confirmed the rock core sample is subject to the spiral move of drill bit and there is significant anisotropy in elasticity in our rock core sample (Fig. 1).

We will compile all measurement result of DCDA and invert the in-situ stress considering anisotropy in elasticity. Then, we estimate the differential stress and orientation of maximum stress at the different core retrieval depth. In a DUGLab project, Dr. Ma and his colleagues estimate stress magnitude referring to the minimum principal stress in borehole coordinate and overburden. Finally, we compare the result of stress estimation by the conventional method of borehole breakout

analysis and discuss the validity of the DCDA method.

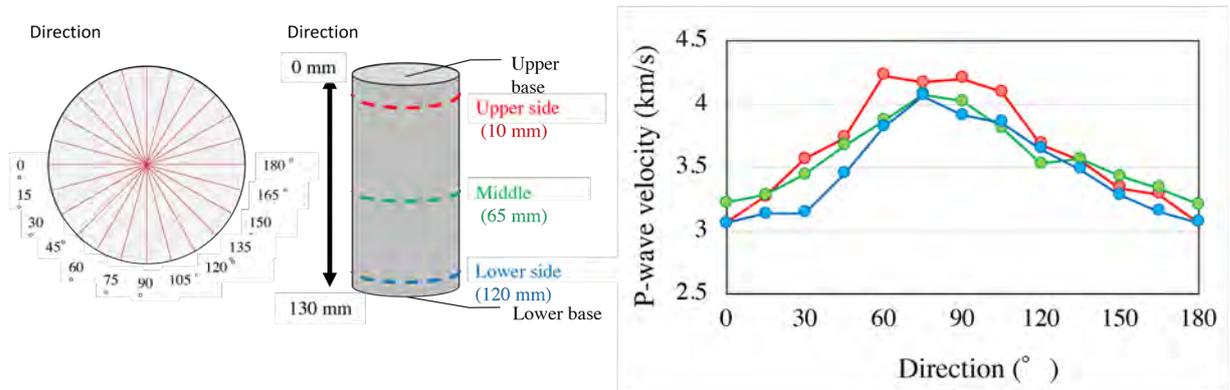


Figure 1 : Left) Measurement setting of P-wave velocity measurement on rock core sample. Left: measurement increment in diametrical direction. Measurement locations on rock core samples. Right) Measurement setting of P-wave velocity measurement on rock core sample (CB1\_1). Left: measurement increment in diametrical direction. Measurement locations on rock core samples.

### 3. Achievements

We have measured result of DCDA method on the rock cores from the Bedretto underground laboratory site in the Swiss Alps, where conventional in situ stress measurement was conducted. In addition, we measured the anisotropy of the elastic wave velocity. We evaluated the anisotropy of elastic parameter of rock sample which can cause unfavorable artifact in DCDA stress inversion. We will inverse the in-situ stress by DCDA theory and compare the result of stress estimation by conventional methods, then validate the feasibility of DCDA in field scale.

### 4. Summaries and future plans

We conducted the P-wave velocity measurement to evaluate the anisotropy in elastic parameter and compared to the estimates of in-situ stress direction by DCDA method. The anisotropy in elastic parameter is variable in respect to the depth and not negligible. However, it would not much affect the in-situ stress inversion by DCDA.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.  
(included international conference without peer review)  
[1] X. Ma, Y. Mukuhira, T. Ito, Application of core-based inversion to reconstruct stress field in an underground geoscience laboratory, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-11, pp. 26-27.
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent)  
Not applicable  
  
(Award)  
Not applicable

(Press release)

Not applicable

(External grant)

Our proposal about this collaboration to Bridging Grants with China, Japan, South Korea and the ASEAN region 2020 has been accepted by ETH (the total grant sum of CHF 25000.00).

(Project number: BG 07-072020, “Integrated in situ & ex situ stress measurements at the Bedretto Lab - opportunities for geothermal reservoir developments”).

課題番号	J21I100
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4 ~2022.3
継続年数	2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\*\*, Hitomi Anzai\*\*, Nadia Shafii\*\*\*, and Makoto Ohta\*\*††

\*Graduate School of Engineering, Chiba University

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\*Faculty of health and cardiovascular engineering, Universiti Teknologi Malaysia

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Research Objective

In the present study, we examined the effect of wall property on frequency characteristics in a patient-specific middle cerebral aneurysm using *in vitro* PIV. The effect of elastic wall on flow instability was examined in comparison with that of rigid wall.

### 2. Content of Research Result

Cerebral aneurysm models with rigid wall have been extensively simulated by computational fluid dynamics (CFD) [1]. Several groups have also attempted to calculate elastic cerebral aneurysm models using fluid-structure interaction to assess the hemodynamics that occur inside cerebral aneurysms, including hemodynamic stress for ruptured and unruptured aneurysms.

Hemodynamic factors, such as wall shear stress and flow instability, are known as risk indicators for aneurysm progression and rupture. However, few experimental approaches were carried out for the elastic wall model [2-6]. We fabricated a thin-walled elastic phantom model a full-scale patient-specific aneurysm at the apex of the bifurcation in the middle cerebral artery (MCA). One purpose of this study was to determine the effects of wall property on flow instability within a patient-specific cerebral aneurysm [3]. (2021 ICFD, Oct 29<sup>th</sup>)

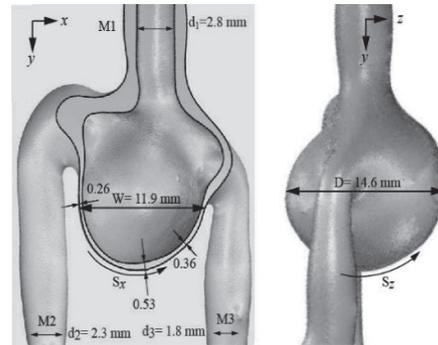


Fig.1 Morphology of cerebral phantom model

### 3. Achievement Progress of Research Objective

We noticed the effect of elasticity on flow instability. Globally, the wall elasticity suppressing the kinetic energy cascade 10-fold smaller than that in rigid model was clarified experimentally at four typical points within aneurysm (Fig. 2) [3]. In particular, there was a difference in the flow instability between the elastic and rigid models (Fig. 2).

As shown in Fig. 2(a), KEC at point C immediately downstream from the separating flow after collision decreased simply and steeper in the elastic model compared with that in the rigid model (from  $15$  to  $10^2$  Hz), which KEC is attenuated at  $10^{-8}$  and  $10^{-7}$  in the elastic and rigid models, respectively. Similar trends were also observed at another two points A and S except for point M.

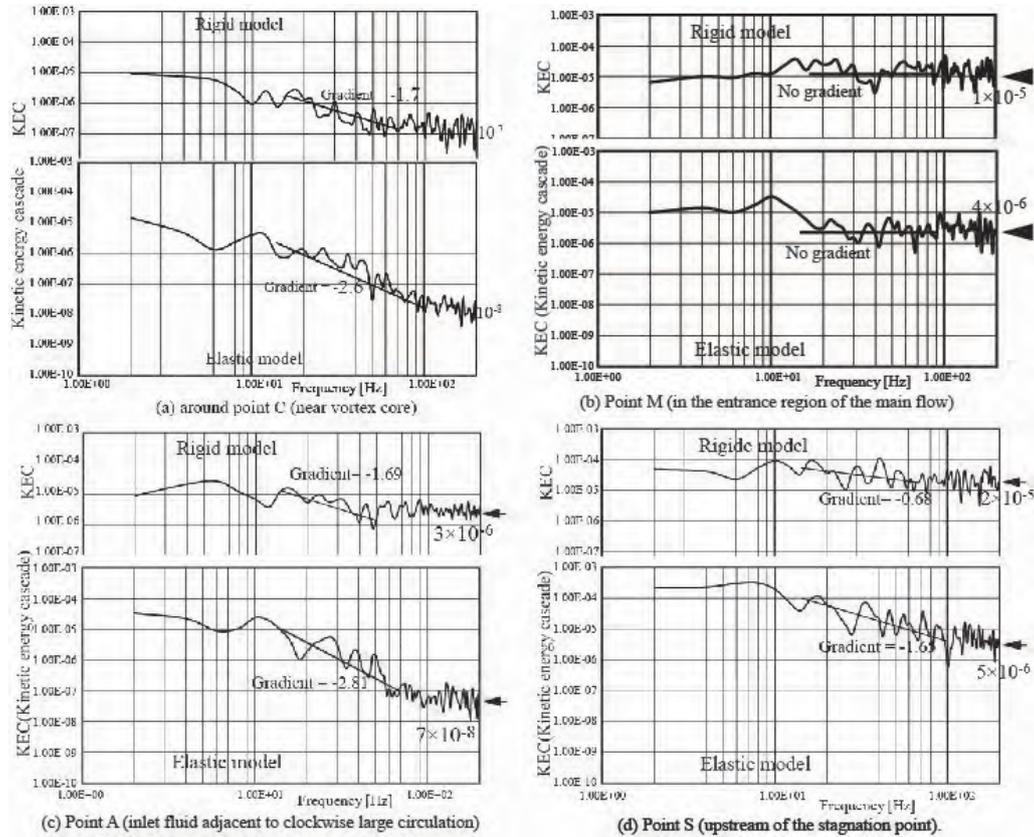


Fig. 2 Comparison of the flow instability of the elastic with rigid models at four typical points.

#### 4. Summary and Next Topic

We fabricated a thin-walled elastic phantom model of a full-scale patient-specific aneurysm at the apex of the bifurcation of the MCA. In the low-frequency range ( $<10^2$  Hz), the KEC gradient decrease in the elastic model is larger than that in rigid model. In the high frequency range ( $>10^2$  Hz), the KEC in the elastic model is attenuated 10-fold less than that in the rigid model. In future, the flow stability is globally clarified, and furthermore is denoted the tensile effect at the median plane and the perpendicular plane to median plane inside bottom wall of aneurysm.

#### 5. Research Achievement

##### 1) Academic Journal with Review

[1] Yamazaki T., Tanaka G., Yamaguchi R., Okazaki Y., Anzai H., Ishida F., Ohta M.: Numerical Simulation of Flow Behavior in Basilar Bifurcation Aneurysms Based on 4-Dimensional Computed Tomography Angiography, *World Journal of Mechanics*, 2021, 11, 71-82. DOI: 10.4236/wjm.2021.114006

##### 2) International & Domestic Conference, etc

[2] Yamaguchi R., Shafii N., Osman K., Saito A., Tanaka G., Ohta M.: Frequency

characteristics of elastic patient-specific aneurysm model, *SB3C*, 2021, 111B.

- [3] Tanaka G., Yamaguchi R., Ikeya N., Shafii N., Anzai H., Osman K., Ohta M.: Effect of Wall Property on Frequency Characteristics of Full-Scale Cerebral Aneurysm Model, *AFI2021*, Sendai, 2021, Nov, 29, CRF-77.
  - [4] Yamaguchi R.: Interesting phenomena in elastic cerebral aneurysm and notification in PIV measurement, *3<sup>rd</sup> Int Biofluid Symposium 2021*, Malaysia, 2021, p.11.
  - [5] Yamaguchi R., Shafii N., M. Ohta: Effect of wall property on flow instability of patient-specific middle, *AP Biomech*, Kyoto, 2021, PP1-21.
- 3) ETC (Patent, Award, Media announcement) Not applicable.



## **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	J21R001
Classification	International Multiple Collaborative Research
Subject area	Health, welfare and medical cares
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

### Endovascular stent and vessel remodeling

Aike Qiao\*†, Makoto Ohta\*\*\*\*††  
 Hanbing Zhang\*, Shiliang Chen\*, Yu Zhang\*  
 Hongfang Song\*\*, Wenyu Fu\*\*\*, Hitomi Anzai\*\*\*\*

\*Faculty of Environment and Life, Beijing University of Technology,  
 \*\*School of Biomedical Engineering, Capital Medical University,  
 \*\*\*College of Robotics, Beijing Union University,  
 \*\*\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University  
 †Applicant, ††IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

The geometry and material properties of the absorbable stent may change during the degradation process. Understanding the service performance of degradable stents is essential to improve its therapeutic efficacy and reduce the occurrence of adverse events. In this project, based on the principle of continuous damage mechanics, a dynamic degradation algorithm was proposed to set material properties and corrosion properties for individual elements while considering uniform corrosion, stress cracking corrosion and pitting corrosion. The morphological and mechanical properties of stents during degradation were analyzed by finite element method.

#### 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 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2021). The detailed research results are described as follows:

As shown in Fig. 1, for the case that the corrosion rate was not set to vary dynamically with the number of exposed faces of the element, the stent struts became thinner due to the exposed surfaces of the stents were peeled off simultaneously. For the case that the corrosion rate was set to vary dynamically with the number of exposed faces of the element, the elements located at the edges with more exposed surfaces of the stent degraded first, and the originally square stent cross-section first became rounded, and then became thinner. This phenomenon was closer to the real degradation.

As shown in Fig. 2, stent degradation was divided into three stages in both cases. In the first stage, the inside corolla of the stent with high tensile stress degraded first. Stress corrosion was dominant at this stage, which accounted for more than 80% of the total damage of the element. In the second stage, the deleted elements in the first stage resulted in more non-exposed elements exposed to the corrosive environment, and the stent struts gradually became thinner under the action of uniform corrosion. In the third stage, the stent fractured when the strength of the stent was reduced insufficiently so as not to resist the load, and the fracture region

was located at the connection between the corolla of the stent and the connecting struts.

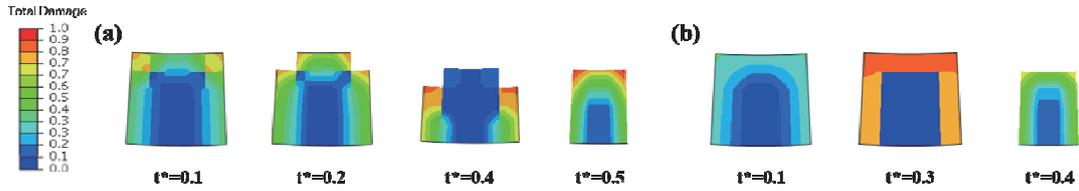


Fig.1 Changes in stent cross-section. (a) Corrosion rate was adjusted by the number of exposed faces of the element, (b) Corrosion rate wasn't adjusted by the number of exposed faces of the element

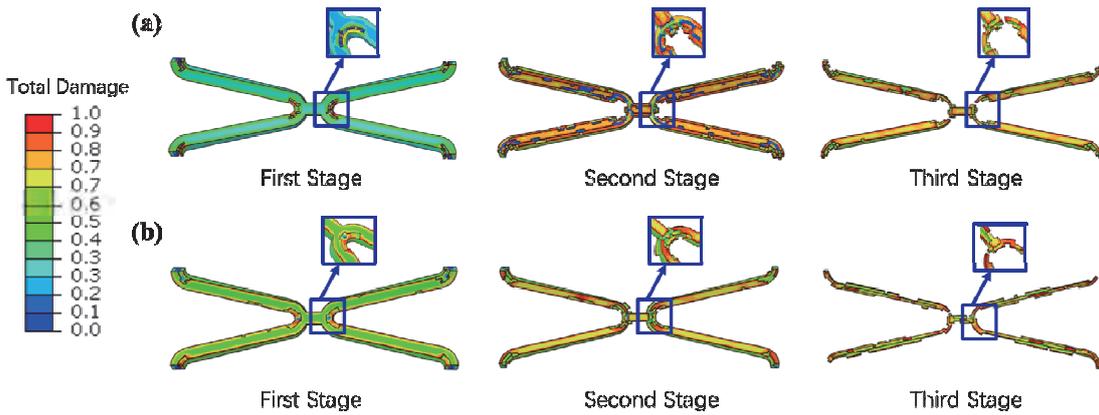


Fig.2 Stent degradation process. (a) Dynamic changes of stress corrosion threshold, (b) No dynamic changes of stress corrosion threshold

By comparing the two settings of whether the dynamic change of the stress threshold or not, for the case without dynamic change of stress threshold mainly showed the uniform thinning of the stent struts. The change of the stress corrosion threshold made the tensile stress of more elements reach the stress corrosion threshold, and mainly showed the fracture at the corolla of the stent. It would speed up the fracture time of the stent by 30% and reduced the mass loss by 25% when the stent fractured (Fig. 3). It is the key breakthrough in optimizing the degradation model of the stent.

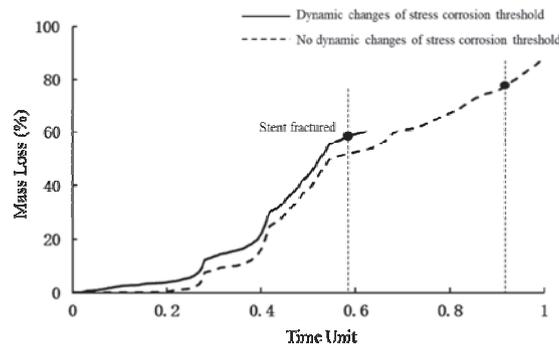


Fig. 3 Mass loss of the stent during degradation

### 3. Achievements

A dynamic degradation algorithm was proposed which could simulate the nonuniform degradation process by identifying and updating the corrosion properties of the element during the degradation process. The stent degradation

process was tested via the finite element method and the simulation results suggested that element degradation rate was adjusted by the number of exposed faces made results closer to reality and dynamic changes of stress corrosion threshold could accelerate the degradation of stents. The algorithm and results demonstrated the necessity of setting corrosion properties and material properties for independent elements in stent degradation model.

#### 4. Summaries and future plans

The reconstruction of the blood vessel should be considered. Establishing a coupled model of stent degradation and vascular reconstruction is essential to predict the therapeutic effect of degradable stents. These analyses are reserved for future studies.

#### 5. Research results

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

[1] S. Chen, H. Zhang, Q. Hou, A. Qiao. Multiscale Modelling of Vascular Remodeling Included by Wall Shear Stress. *Frontiers in physiology*, 12(2022): 808999.

[2] S. Wang, D. Wu, G. Li, K. Peng, Y. Mu, M. Ohta, H. Anzai, A. Qiao. Finite element analysis of the mechanical performance of a zinc alloy stent with the tenon-and-mortise structure. *Technology and Health Care*. 2022;30(2):351-359. doi: 10.3233/THC-212905

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

[3] Hanbing Zhang, Shiliang Chen, Yu Zhang, Aike Qiao, Hongfang Song, Wenyu Fu, Hitomi Anzai, Makoto Ohta: Algorithm for Mimicking Dynamic Corrosion Procedure of Biodegradable Stents. *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021).

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

Not applicable.

Project code	J21R002
Classification	International Multiple Collaborative Research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

An electrically efficient self-sustained microcombustion/flame-assisted fuel cell (FFC) system

Jeongmin Ahn\*†, Kaoru Maruta\*\*†, Ryan Milcarek\*\*\*

\*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\*School for Engineering of Matter, Transport and Energy, Arizona State University

†Applicant, ††IFS responsible member

## 1. Purpose of the project

During the IFS Collaborative Research Project from 2020 to 2021, the project focused on chemical and electrochemical reactions from various hydrocarbon fuels as potential fuels of a microcombustion based flame-assisted fuel cell (FFC) power and heat cogeneration system. Work from the IFS Collaboration has been published in high impact journal papers in 2019, 2020 and a recent paper in 2022 [1]. Illustrating the potential in microcombustion based FFC, the next step in the field has been to focus on developing a FFC-based combined heat and power (CHP) system that can operate for extended periods of time while maintaining high electrically efficiency. Current FFC research has only operated microcombustion based FFCs for a couple of hours. Further research is warranted into the long-term stability and performance of FFCs to develop towards a FFC based CHP system. To conduct this research, this project utilized the Syracuse University-Arizona State University-Tohoku University collaboration. In this work, a microcombustion based FFC system utilizing n-butane was investigated for extended period of operation for further research advancements in micro-FFC based CHP applications.

## 2. Details of program implement

Microcombustion characterization of n-butane/air was first performed to identify the optimal operating conditions to generate the most synthesis gas production while avoiding soot formation. Once operating conditions were determined, two FFC cells were manufactured, each with a different cathode material, and tested in the n-butane/air microcombustion exhaust. Polarization curves and power density curves were taken to characterize the performance of the FFCs. One of the main objectives of the project was to investigate the stability of the FFCs being fed with microcombustion exhaust. To accomplish this, a galvanostatic test was performed at an equivalence ratio of 1.5 and a current density of 250 mA.cm<sup>-2</sup>. After 24 hours of testing, a polarization curve and a potentiostatic impedance test was conducted to monitor the performance of the cell over time. The power density degradation of one of the FFC tested is shown in Fig. 1 below. To help deconvolute the potentiostatic test results, a distribution of relaxation times (DRT) analysis was performed using DRTtools. A detailed analysis on all the obtained results were performed and plotted to provide better visualization of the results.

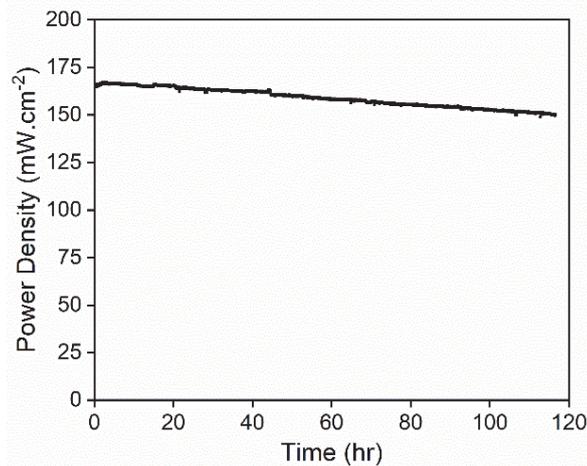


Figure 1: Long term stability test of a mT-FFC utilizing *n*-butane/air microcombustion exhaust at an equivalence ratio of 1.5 and constant current density of 250 mA.cm<sup>-2</sup>.

### 3. Achievements

Utilizing *n*-butane/air microcombustion, the FFCs operated over 100 hours of continual testing with minimum voltage degradation without any catalysts or additional fuel reformer. Specifically, one of the FFCs operated over 288 hours with a voltage degradation of 0.34 mV.h<sup>-1</sup>, one of the lowest degradation rates recorded in SOFC operation with *n*-butane. High power density was achieved as well, with a max power density of 317 mW.cm<sup>-2</sup>. Fuel utilization of up to 53% was achieved with an electrical efficiency calculated to be 17.4%.

### 4. Summaries and future plans

Operation of a FFC utilizing *n*-butane/air microcombustion exhaust was demonstrated to operate for over 200 hours with minimal voltage degradation. High fuel utilization and electrical efficiency were achieved with no signs of carbon deposition found on the anode surface. The results of this years' work was published in an international peer reviewed journal, *Energy Conversion and Management*.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] B. B. Skabelund, H. Nakamura, T. Tezuka, K. Maruta, J. Ahn, and R. J. Milcarek: Thermal Partial Oxidation of *n*-Butane in a Micro-flow Reactor and Solid Oxide Fuel Cell Stability Assessment, *Energy Conversion and Management*, 254 (2022), pp. 115222.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 

Not applicable.

Project code	J21R003
Classification	International Multiple Collaborative Research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

Modeling on boiling and bubble dynamics induced by laser emitted from optical fiber

Junnosuke Okajima<sup>\*,\*\*†</sup>, Roman Fursenko<sup>\*\*\*††</sup>  
Sergey Mokrin<sup>\*\*\*\*</sup>, Vladimir Gubernov<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Sergey Minaev<sup>\*\*,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Institute of Fluid Science, Tohoku University

<sup>\*\*</sup>Institute for Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia

<sup>\*\*\*</sup>Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

<sup>\*\*\*\*</sup>Engineering School, Far-Eastern Federal University

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>†</sup>Applicant, <sup>††</sup>Non-IFS responsible member

## 1. Purpose of the project

Laser thermal therapy has been attracted because of its low invasiveness and good controllability. For example, laser heating was applied to local intensive heating by combining the gold nanorod (Okuno et al., *J. Contr. Release*, 2013). Besides, it has been proposed that the jet of high-temperature fluid is used to coagulate or remove an affected area and the jet is formed by bubble dynamics induced by laser in the biological fluid around the optical fiber. Chudnovskii et al. (*Int. J. Heat Mass Trans.*, 2020) confirmed the phenomenon that a vapor bubble was generated by the local heating by laser, and a jet was formed by the condensation of a vapor bubble in subcooled liquid.

This project aims to model the boiling process and bubble dynamics, such as growth, interface instability, and collapse, which are induced by the laser emitted by optical fiber inserted in the liquid. Through the modeling of bubble dynamics induced thermally, the thermal effect on the collapse of the cavitation bubble will be clarified. The practical results of the project will facilitate the appearance of a breakthrough in laser-tissue cutting that can be realized in practice by surgeons in the future.

The submerged jet is generated by intensive local heating through an optical fiber using for laser radiation transmission. Since the diameter of the quartz core of optical fibers, which are commonly used in surgery, is 100 - 600  $\mu\text{m}$ , the intensity of the laser radiation at the output of the optical fiber allows the generation of large heat flux. For example, with a low radiation power of 1 W and 50% converted to heat, the heat flux at the end of an optical fiber with a diameter of 400  $\mu\text{m}$  can reach 400 W /  $\text{cm}^2$ . When the laser is emitted in the liquid, the vapor bubble is formed near the tip of the fiber. The bubble expands by absorbing the heat from the superheated liquid. After all stored energy in the liquid is absorbed, the bubble is cooled by the surrounding liquid and starts to contract by condensation. During the contraction process, the flow field toward the tip of the fiber is formed, and, finally, the jet is generated. The strength of the jet should be determined by the thermal and geometrical conditions. We will reveal the thermal-fluidic interfacial phenomena and the dominant factor of jet formation.

## 2. Details of program implement

To model this complex phenomenon, we will approach it from different directions. Dr. Gubernov in Lebedev Physical Institute RAS will model this phenomenon theoretically. Dr. Fursenko in ITAM SB RAS will take in lead in the computational modeling of interface instability. Prof. Okajima in Tohoku Univ will model the thermal effect in bubble dynamics. Dr. Mokrin in FEFU will experiment with the validation of the modeling. Prof. Minaev and his group in IAM FEB RAS will implement the model in the numerical simulation.

In 2021, we had web-based meetings to discuss the results and future direction. The online meetings were held 4 times (6 April, 23 April, 20 May, 27 September, and 26 October, 2021). Additionally, although the situation was under the COVID-19 pandemic, Prof. Okajima visited IAM FEB RAS, Far-Eastern Federal University in Vladivostok and Lebedev Physical Institute in Moscow to discuss this collaborative research and visit the experimental room and computational system for this project in Russia.

Furthermore, we organized two international workshops “Theory, experiments and numerical modeling of reaction-diffusion systems in applications for biotechnology, biomedicine and energy production” (1<sup>st</sup> workshop: Oct 12-16, 2020, 2<sup>nd</sup> workshop: Sept. 27- Oct. 1, 2021) and one organized session “Flow Dynamics of Diffusion-reactive and Phase Transition Systems” in 18<sup>th</sup> International Conference on Flow Dynamics. Our achievement was also reported in one of the important conference in Russia, “Science of Future”[2].

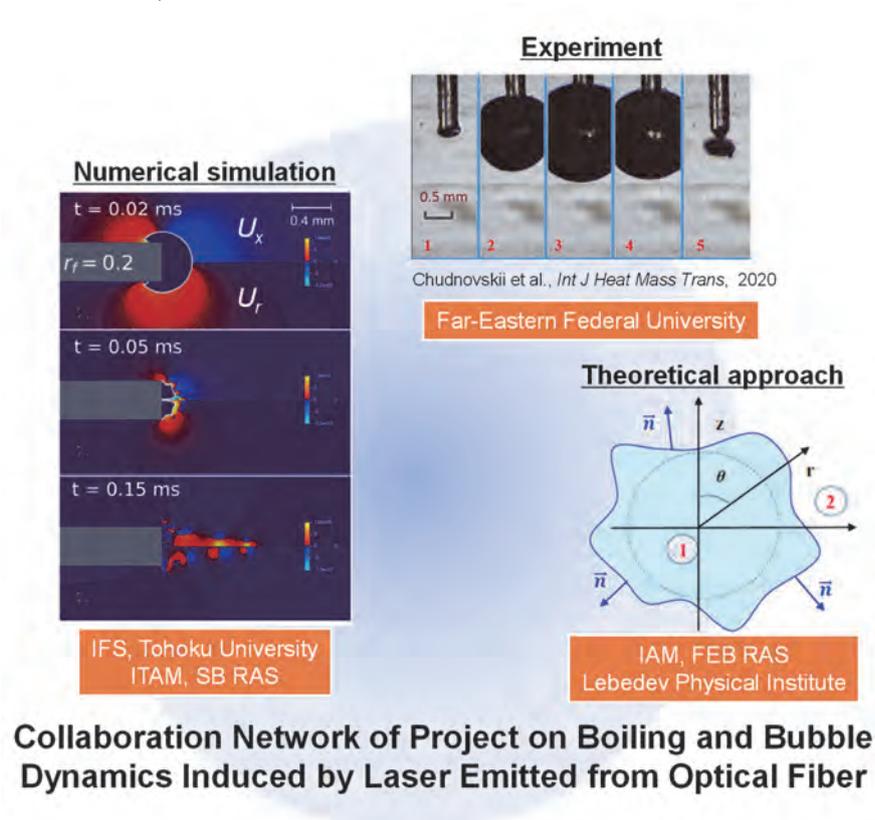


Figure 1 : Framework of collaboration research

### 3. Achievements

In the 1st year, we focused on the mechanisms of jet formation. Figure 2 and 3 describes the mechanism of jet formation explained last year. It is shown that symmetry breaking is a necessary condition for jet formation. When the bubble shrinks, the flow toward the tip of the optical fiber is formed. The flow deforms the bubble into a cylindrical shape. This deformation induces the collision of flow in a radial direction. This collision generates the jet forward. As a result of collision and jet formation, the vortex is formed at the tip of the deformed bubble, and it grows larger. The jet velocity is maximal at the moment of its formation and monotonically decreases with time. Besides, the jet velocity depends on the fiber radius. The maximal jet intensity is reached at a certain finite value of the fiber thickness which depends on the initial vapor bubble radius. Water jet velocity is also directly correlated with the rate of gas bubble volume reduction.

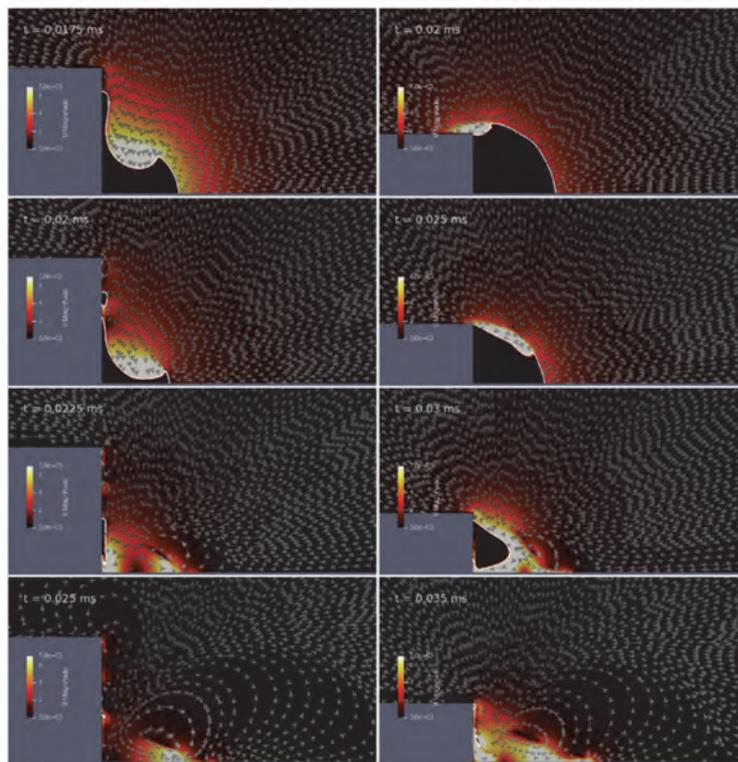


Figure 2: Water velocity magnitude and streamlines:  $r_{ini} = 0.2$  mm and  $r_f = 0.2$  mm (left) and  $r_f = 0.1$  mm (right) [R. V. Fursenko, V. M. Chudnovskii, S. S. Minaev and J. Okajima: Mechanism of high velocity jet formation after a gas bubble collapse near the micro fiber immersed in a liquid, Int. J. Heat Mass Trans., 163 (2020), 120420]

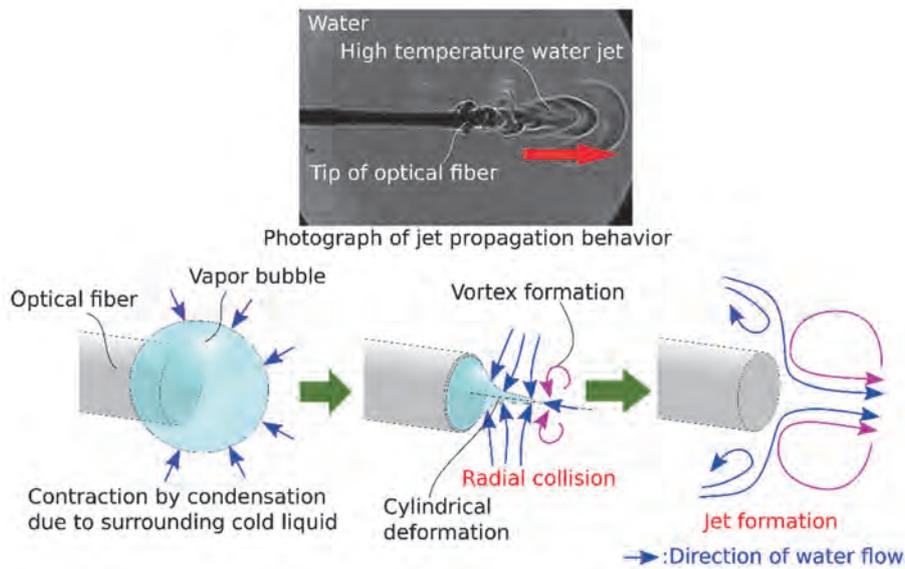


Figure 3: Schematic of the jet formation mechanism [Tohoku University Global Site, Revealing the Reason Behind Jet Formation at the Tip of Laser Optical Fiber, 2020. 10. 9.]

To clarify the process of bubble expansion-contraction, the whole step of bubble growth by evaporation and condensation was simulated. The bubble collapse was simulated by the volume of fluid (VOF) method with phase change. Phase change was driven by the temperature difference at the liquid-vapor interface and heat release/consumption was included in the energy conservation equation. As shown in Fig. 4, the initial vapor bubble was located at the tip of the fiber. Initial temperature distribution was set to assume the existence of superheated liquid layer by laser heating. The vapor bubble grows by absorbing that heat, and after reaching the maximum size, vapor bubble shrinks and collapses by condensation in subcooled liquid.

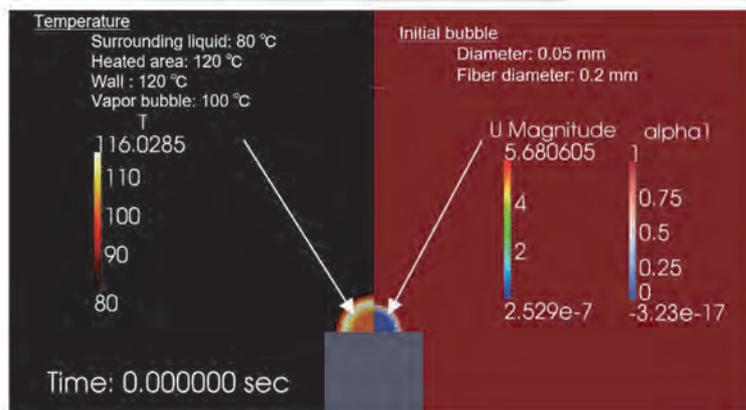


Figure 4: Schematic of initial bubble and temperature conditions

Figure 5 shows the calculation results and comparison with the experimental image. This simulation was qualitatively like the bubble behavior in the experiment. In the left image of Fig. 5, the bubble shape just before the departure looked similar, especially near the fiber wall. The bubble lifted off and transported upward by the longitudinal jet and shrinking. Even in this small initial bubble, the hot jet was observed in the simulation.

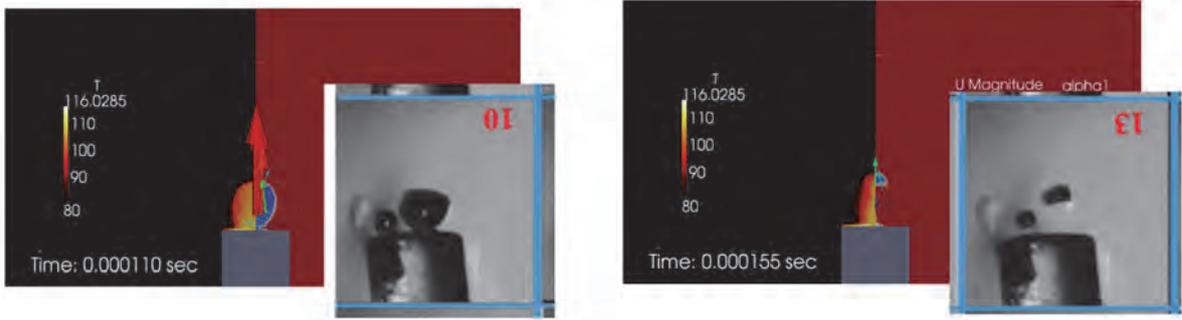


Figure 5: Calculation results and comparison with the experimental image

Next, we discussed the direction control of the liquid jet. We prepared the experimental system as shown in Fig. 6. The experimental system consists of the fiber laser (maximum power 7W, wavelength  $0.97\mu\text{m}$ ), High-speed camera (Photron Fastcam SA-Z), and the LED light source.

In Fig. 7, an optical fiber installed on the horizontal side is placed so that a bubble growing near the end of the vertically installed optical fiber covers its tip as well. The bubble thus covers both ends of two perpendicular optical fibers during its expansion. When a bubble collapses, bridges are formed on its surface near each of the two ends (frame 8 of Fig. 7) and two jets that add up. In addition, two submerged jets are formed, directed in opposite directions along axes coinciding with the diagonal from the fiber intersection optical axes (Fig. 7, frames 9-12). Hence, by using the second fiber, the direction of the jets can be rotated by  $45^\circ$  relative to the one shown in Figure 7. In frames 9-12 of Fig. 7, two jets pointing along the diagonal between the directions of the perpendicular fiber are detected, i.e., at an angle of approximately  $45^\circ$  to each of the fibers. These jets, in turn, are the result of adding two jets directed from the end of the fiber. The average velocity of the resulting submerged jet directed forward from the fiber ends, determined from the frames in Fig. 7, is  $5.4 \pm 0.5$  m/s. The average velocity of the second jet moving in the opposite direction is much less and equal to  $0.01 \pm 0.01$  m/s.



Figure 6: Experimental system to observe bubble dynamics around the optical fiber

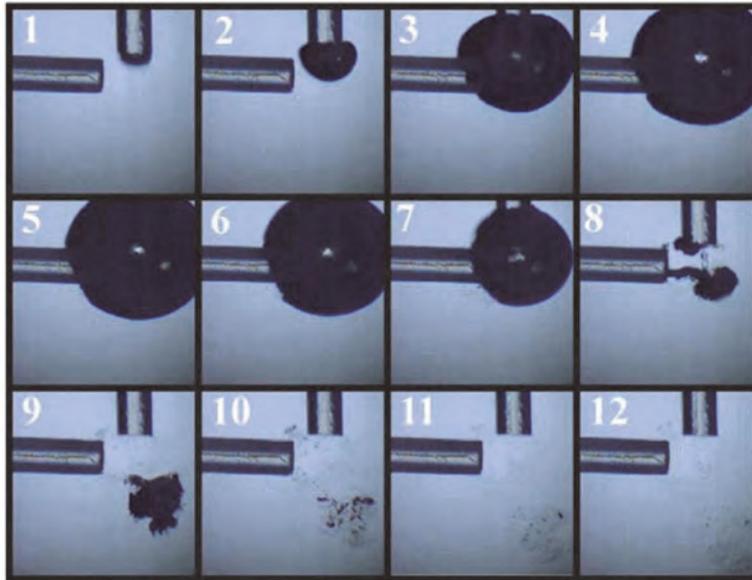


Figure 7: Direction control of hot jet by using two optical fibers [published in Ref. 1]

Additionally, we studied the propagation of hot liquid jet generated by local laser heating inside of finite volume. Experimental study was conducted for various values of laser power from 0.5W to 7 W. The results of shadowgraph experiments are shown in Fig. 8.

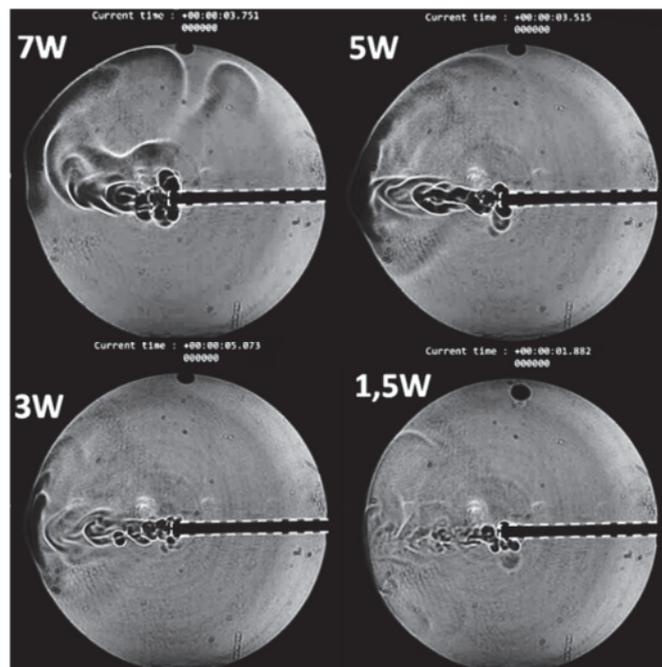


Fig. 8 Direct photos of hot liquid jet propagating inside of cuvette obtained for various values of laser power.

It was found that decreasing of laser power leads to increasing of liquid jet. Besides that, faster jet has lower temperature. This information could be very useful for the laser surgery operations related with cyst treatment.

We also suggested the mathematical model describing the hot liquid jet propagation. Model is based on Navier-Stokes and energy equations which include heat transfer and friction between liquid and cuvette walls. This model does not consider the gas phase and compressibility of media.

The comparison of numerical results and experiment are presented below in Fig. 9. As can be seen from Fig. 9, results of numerical simulation are in good qualitative agreements with experiment.

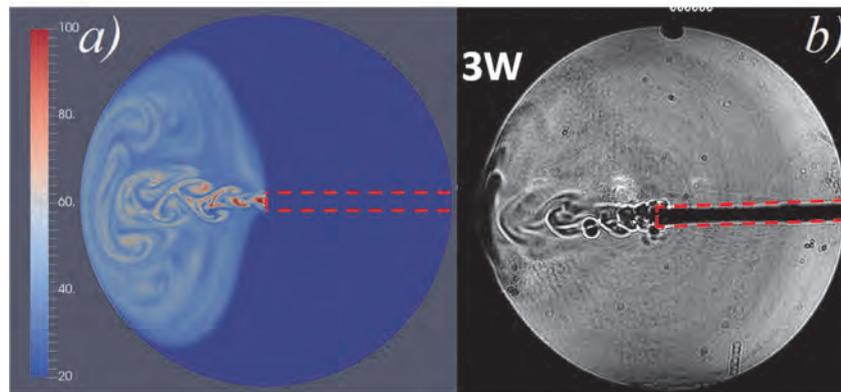


Fig. 9 Hot liquid jet propagation. a) 2D temperature field, b) experimental result

#### 4. Summaries and future plans

Through the numerical simulation of the condensation process of the vapor bubble, the main mechanism of jet formation was described. When the bubble shrinks, the flow toward the tip of the optical fiber is formed. The flow deforms the bubble into a cylindrical shape. This deformation induces the collision of flow in a radial direction. This collision generates the jet forward. To enhance the jet velocity, the size of the initial bubble and the relationship between it and fiber radius become an important factor.

To investigate the bubble formation process, the experimental system was constructed, and the observation of the phenomena has been started. In the experiment, the relationship between the heating condition of the laser and the actual jet velocity will be evaluated.

We simulated the whole process of bubble dynamics containing the evaporation and condensation process and compare it with the experimental image. In addition, we demonstrated the direction control of hot water jet by using two optical fibers.

Through the modeling of bubble dynamics induced thermally, thermal effect on the collapse of the cavitation bubble will be clarified. Additionally, this model should be related to the bubble dynamics and heat transfer of subcooled boiling. Furthermore, the practical results of the project will facilitate the appearance of a breakthrough in laser-tissue cutting that can be realized in practice by surgeons in the future.

#### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] V. M. Chudnovskii, M. A. Guzey, V. I. Yusupov, R. V. Fursenko, J. Okajima: Study of methods for controlling direction and velocity of liquid jets formed during subcooled boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 173 (2021), p. 121250, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121250.

- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.  
(included international conference without peer review)
- [2] J. Okajima: Interface dynamics appearing in application for biotechnology, biomedicine and energy production, *Science of the Future* (invited lecture, Moscow, Russia), 2021.11.18.
  - [3] J. Okajima: Dynamics behavior of phase change in high-speed flow with intensive heating, *Dynamics of the Reaction-Diffusion Systems* (invited lecture, Moscow, Russia), 2021.11.19.
  - [4] J. Okajima, R. V. Fursenko, S. Mokrin, V. Gubernoy, S. Minaey: Modeling on Boiling and Bubble Dynamics Induced by Laser Emitted from Optical Fiber, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2021) CRF-4.
  - [5] R. V. Fursenko, V. M. Chudnovskii, S. Minaey, J. Okajima: Numerical Simulations of Jet Formation Induced by Gas Bubble Collapse Near the Micro Fiber Immersed in a Liquid, *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Flow Dynamics*, (2021), pp. 676-678.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

Project code	J21R004
Classification	International Multiple Collaborative Research Project
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

An efficient algorithm of inlet turbulence generation for cross-platform-based parallel computation and its application for flows

Yoshiaki Abe\*†, Peter E. Vincent\*\*††  
 Freddie D. Witherden\*\*\*, Brian C. Vermeire\*\*\*\*, Kazuhiko Komatsu\*\*\*\*\*,  
 Kozo Fujii\*\*\*\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Department of Aeronautics, Imperial College London

\*\*\*Department of Ocean Engineering, Texas A&M University

\*\*\*\*Department of Aerospace Engineering, Concordia University

\*\*\*\*\*Cyberscience Center, Tohoku University

\*\*\*\*\*Department of Informatics, Tokyo University of Science

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

## 1. Purpose of the project

This project aims at developing an efficient algorithm of inlet turbulence generation for cross-platform-based parallel computation. The research is based on PyFR ([www.pyfr.org](http://www.pyfr.org)), a high-order accurate Python-based computational flow solver. The High-fidelity scale resolving simulations of flow over a low-pressure turbine blade was also targeted using high-order flux-reconstruction (FR) schemes. In the simulation, the blade was mounted in a linear cascade with expanding end walls. The fifth-order accurate simulation at a chord-based Reynolds number of 90,000 will be formulated with laminar and turbulent inflow conditions on a mesh with over 2 billion solution points. Specifically, we will investigate differences between flow characteristics with laminar and turbulent inflow conditions, comparing with experimental data. Furthermore, the implementation of the solver to vector architecture (NEC SX-Aurora) has been attempted to demonstrate the capability of high-order FR schemes on vector machines and cross-platform portability of the solver.

## 2. Details of program implement

The project was mainly performed by Tohoku University and Imperial College London with the support from Texas A&M and Concordia University. The primary goal is to develop the inlet turbulence generation algorithm for a cross-platform-based parallel computation, and the subsequent objective is a demonstration of the inlet turbulence generation algorithm to the flows over a low-pressure turbine blade and demonstration of the performance on new vector architecture to show a portability of the solver. In this report, we start from the conditions for the flow simulation, and then explain the details of inlet turbulence generation including its algorithm and performance test. Then, results of flow simulations over the low-pressure turbine blade will be presented. Finally, the implementation of the FR scheme on vector architecture (NEC SX-Aurora) and its performance will be reported.

## 3. Achievements

### 3-1 Flow conditions

This study focuses on scale resolving flow simulations over a highly loaded

low-pressure turbine blade. The blade is mounted in a linear turbine cascade bounded by diverging end walls in the experiment. Specifically, this study focuses on single blade including end walls and assumes a periodic condition in the pitch-wise (vertical) direction. In the remainder of this report, subscripts 1 and 2 stand for values at the inlet and outlet plane. All the variables are normalized by blade chord length and total pressure at the outlet. We also assume  $c_{pT_t} = \gamma/(\gamma - 1)RT_t = 3.5$  and  $\rho_t = 1.0$  as a stagnation state, where  $\gamma = 1.4$  is used. Inflow and outflow angles (normal to the radial direction at the centerline) are  $\beta_1 = 131.0$  and  $\beta_2 = 25.0$ . Inlet and outlet Mach number is 0.3857 and 0.5543, respectively. A blade-chord-based Reynolds number is 90,000. The other inlet and outlet variables are derived from isentropic relations.

### 3-2 Domain and mesh

The computational domain and mesh are shown in Fig. 1. The inlet and outlet planes correspond to left and right boundaries of Fig. 1 (i.e., 0.92 and 0.78 time chord length upstream and downstream of the blade), respectively. The mesh is periodic in the pitch-wise (vertical) direction and prismatic in the span-wise direction. Both sides of the blade are bounded by end walls which are diverging in the downstream direction. The mesh consists of 19,560,000 hexahedral elements defined by a second-order shape function, which was generated using Gmsh.

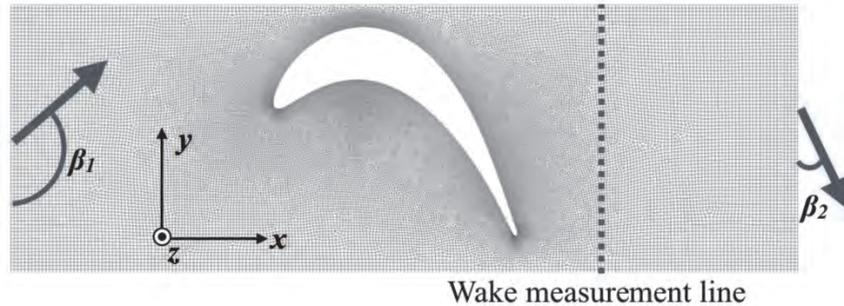


Figure 1 : Computational domain and mesh

### 3-3 Boundary conditions

The wall boundary condition is a no-slip adiabatic condition, which is applied to the blade surface and end wall surfaces. The outlet condition is a non-reflecting characteristic boundary condition based on Riemann invariant. The characteristic boundary condition does not explicitly enforce a static pressure, and thus a preliminary simulation was conducted with a pressure controller which adjusts the outlet pressure to match the experimental results. The corrected characteristic boundary condition (with pressure correction) is then applied in the physics simulation. In the pitch-wise direction, a periodic boundary condition is imposed.

Next, a laminar inlet condition is described. The inlet plane is bounded by end walls at  $z = \pm hz = \pm 1.14391$ . In this study, a Blasius boundary layer is assumed near the end walls, which is approximated by hyperbolic tangent function of the velocity magnitude according to Eq. (2) in [4]. Therefore, the inlet boundary condition is imposed as a total pressure profile as:

$$p_{t,\pm} = p \left\{ c_P T_t / \left[ c_P T_t - \frac{1}{2} u_2^2 \left\{ \tanh \left( \frac{\eta_{ref} a_{bl} (h_z \pm z)}{\delta_{bl}} \right)^{n_{bl}} \right\}^{2/n_{bl}} \right] \right\}^{\gamma/(\gamma-1)}, \quad (1)$$

$$p_{t,mid} = p \left\{ c_P T_t / \left[ c_P T_t - \frac{1}{2} u_2^2 \right] \right\}^{\gamma/(\gamma-1)}, \quad (2)$$

$$p_t = p_{t,+} + p_{t,-} - p_{t,mid}. \quad (3)$$

Note that  $c_{PT_t}$  is a constant ( $= 3.5$ );  $z$  is a spanwise coordinate ( $-h_z \leq z \leq h_z$ );  $\eta_{ref}$  corresponds to 99% thickness of the boundary layer profile approximated by  $[\tanh\{(a_{bl} \eta)^{n_{bl}}\}]^{1/n_{bl}}$ , where  $\eta$  is a distance from the wall.

Finally, a turbulent inlet condition is introduced, based on the digital filter (DF) technique of Klein et al. [5,7]. The algorithm follows [6], which requires the integral length scale in each direction ( $I_x, I_y, I_z$ ), the Lagrangian time scale ( $\tau = I_x/U$  where  $U$  is the mean inlet streamwise velocity), and the prescribed Reynolds stress profile. The integral length scale and the Lagrangian time scale is estimated from the wake region in the laminar inlet simulation. The Reynolds stress profile is assumed as a function of  $z$  (spanwise coordinate), which has a form of :

$$R_{ij} = c_{ij} (\tanh [a_{ij} (z - h_z)] + \tanh [a_{ij} (h_z - z)] - 1) (z^4 + b_{ij}), \quad (4)$$

where  $R_{ij}$  are parameters to be adjusted. These parameters are adjusted such that  $R_{ij}$  corresponds to the experimental profile. Specifically,  $R_{ij}$  is designed to have a turbulent intensity of 6% as a peak value in the vicinity of the end walls and 4% as a flat value around the centerline in the inlet plane. As such, the random velocity field is obtained, which is then superimposed on the laminar velocity profile as a ghost state of the Riemann solver in the boundary condition kernel. The code implementation of the velocity fluctuation will be described later. Next, a density fluctuation is introduced by the strong Reynolds analogy (SRA). The original idea is that the total temperature fluctuation is negligible in the sense of its Favre mean. More specifically, only the terms that are linear in the fluctuation are retained, which leads to:

$$c_P T_t'' = c_P T'' + u_1 u_e'', \quad (5)$$

where  $u_e''$  is a fluctuation of the velocity component in the inflow angle.  $u_1$  stands for the inlet velocity condition that was defined before. Equation (5) leads to:

$$\frac{\rho''}{\rho_1} = -\frac{T''}{T_1} = (\gamma - 1) Ma^2 \frac{u_e''}{u_1}, \quad (6)$$

### 3-4 Flow solver, numerical schemes, and simulation procedure

Throughout this study, we adopt PyFR [2] to solve flows over the low-pressure turbine blade. PyFR solves the compressible Navier–Stokes equations using the FR scheme first proposed by [3]. PyFR is a Python based implementation of the FR approach. It is designed to be compact, efficient, and platform portable. PyFR is capable of operating on high performance computing clusters utilising distributed memory parallelism. All Message Passing Interface (MPI) functionality is implemented at the Python level through the mpi4py wrapper. To enhance the scalability of the code care

has been taken to ensure that all requests are persistent, point-to-point and non-blocking. Further, the format of data that is shared between ranks has been made back-end independent. It is therefore possible to deploy PyFR on heterogeneous clusters consisting of both conventional CPUs and accelerators.

### 3-5 Inlet turbulence generation algorithm

As explained in the previous section, the flow solver is mainly written in Python and partly by Mako templating engine as a kernel that generates a CUDA code for GPU computations. In this section, we describe two different implementations of the velocity fluctuation. The algorithm basically follows Touber and Sandham [6]. Let us assume that the inlet plane exists in  $y_{min} \leq y \leq y_{max}$  and  $z_{min} \leq z \leq z_{max}$ . The integral length scales in the inlet plane are given as  $I_y$  and  $I_z$ , and the Lagrangian time scale is defined as  $\tau = I_x / U$ . Figure 3 (left side) shows a pressure loss at the wake region, where red and blue lines are of simulation with and without turbulence inlet. The experimental results contain turbulence inlet with different levels (2 and 4 % turbulent intensity), and thus, the simulation result with inlet turbulence is close to experimental results than that without inlet turbulence. The comparison of isentropic Mach number on the mid-span blade surface is shown in the right side of Fig. 3, which also shows a good agreement between the simulation with inlet turbulence and experimental result. It is also interesting that this discrepancy between turbulent and laminar inlet simulations is clear in the  $Re=90k$  case as shown in Fig. 3, while the laminar inlet simulation agrees well with experiments in the  $Re=200k$  case although it is not shown in this report. The results indicate that the inlet turbulence has a significant effect on performing a realistic simulation at least in the case of  $Re=90k$  as the most of experimental results suffers from inlet turbulence. The relevant result has been published from international journal [Research result 1].

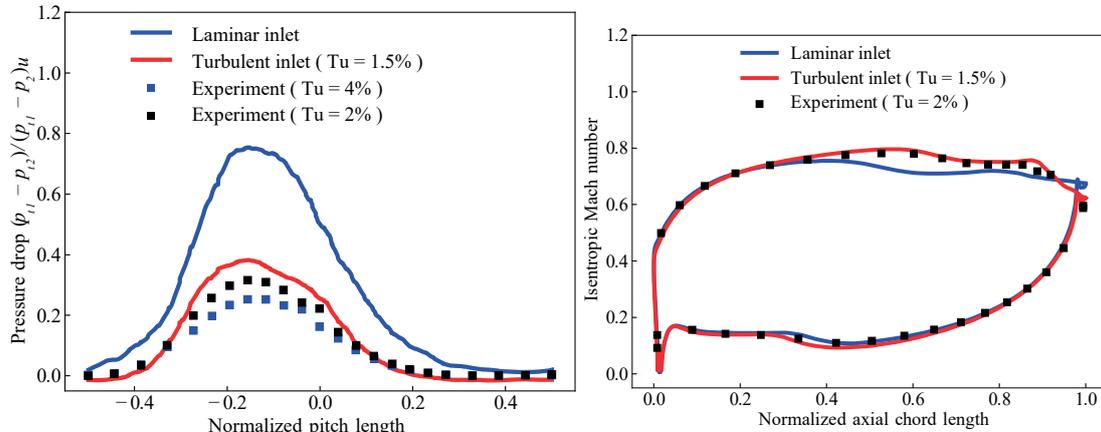


Figure 3 : Pressure drop in the wake (left) and isentropic Mach number on the blade surface (right).

### 3-6 Performance on vector architecture

Based on the discussion above, we have attempted to implement the present solver on vector architecture, i.e., NEC SX-Aurora, and demonstrate its performance compared with that using GPUs. First, the code implementation for the purpose of vectorization on SX-Aurora will be briefly explained. In the PyFR solver, each kernel, e.g., inviscid/viscous flux calculation, is generated during the computation (run-time compile). The left side of Fig. 4 shows a part of the source code that generates a common structure of the kernel source, where the left side is a straightforward implementation of a directives (“pragma \_NEC ivdep”) for SX-Aurora. After compiling the kernel with the NEC compiler, it turned out that the present code was not fully vectorized due to the dependency of loop length on SOA\_SZ , i.e., the size of a structure of array, and thus, the performance is significantly degraded. The code structure was then reconsidered, and it

is replaced by the simpler one in the right side of Fig. 4, which achieves fully vectorized kernels. The similar tuning was carefully performed on the other part including Mako template for the inviscid/viscous flux functions.

```

# -*- coding: utf-8 -*-
from pyfr.backends.base.generator import BaseKernelGenerator
class VecKernelGenerator(BaseKernelGenerator):
    def render(self):
        if self.ndim == 1:
            inner = '''
                int cb, ce;
                loop_sched_id(nx, align, sch, sw);
                int nci = (ce - cb) / SOA_SZ * SOA_SZ;
                for (int _xi = cb; _xi < ce + nci; _xi += SOA_SZ)
                {{
                    #pragma NEC ivdep
                    for (int _xj = 0; _xj < SOA_SZ; _xj++)
                    {{
                        {body}
                    }}
                }}
                for (int _xi = cb + nci; _xj = 0; _xj < ce - _xi; _xj++)
                {{
                    {body}
                }}
            '''.format(body=self.body)

# -*- coding: utf-8 -*-
from pyfr.backends.base.generator import BaseKernelGenerator
class VecKernelGenerator(BaseKernelGenerator):
    def render(self):
        if self.ndim == 1:
            inner = '''
                int cb, ce;
                loop_sched_id(nx, align, sch, sw);
                #pragma NEC ivdep
                for (int _xi = cb; _xi < ce; _xi++)
                {{
                    {body}
                }}
            '''.format(body=self.body)

```

Figure 4 : Example of the code change in PyFR for fully vectorizable code on NEC SX-Aurora

Figure 5 shows a time per DOF per right hand side evaluation for a Taylor-Green vortex simulation on an NVIDIA TitanV GPU and NEC SX-Aurora. We have tested a different set of SoA size and OMP\_NUM\_THREADS for original and vectorized PyFR with the order of polynomials p3-p5. The total DOF (number of solution points) was set to be around 8 million, which corresponds to DOF of 40 million in terms of entire 5 variables, and the time integral scheme was RK45 (5 stages). The first line shows results of GPU (NVIDIA TitanV) which ranges between 0.52 and 0.83 for different polynomial orders. The present values are comparable to those reported in [8]. The second line shows the results of a straightforward implementation without vectorization, which shows significantly (100 times) slower result than GPU. We have then changed the code as explained above, and get a 10 times speed-up from the original implementation in the third line. Furthermore, the SoA size and OMP\_NUM\_THREADS were also tuned, and finally the time of  $t=1.67$  with p4 had been achieved. However, the speed was still slower than GPU ( $t=0.57$ ), and thus, we have further investigated the implementation this year. Consequently, the number of queues for calling kernel has been changed to single queue after a drastic change of the entire structure of the code. Then, we have achieved three times speed-up, i.e.,  $t=0.71$ , as in the last line of Fig. 5, which is sufficiently comparable to the existent GPU (Titan V) performance ( $t=0.57$ ). Finally, the new PyFR code was tested on large scale VE system (AOBA at Tohoku University) and the strong scaling upto 576VEs has been investigated. The result is shown in Fig. 6, which is not perfectly scalable, but the performance is considered sufficient for practical simulation with a large number of parallelization of VE.

Hardware	VEO API	PyFR version	SoA size	OMP_NUM_THREADS	MPI (number of VE)	p=3	p=4	p=5
Titan V	N/A				N/A	0.52	0.57	0.83
Aurora	VEO	First veo version	512	1	1	99.14	61.41	54.33
		Vectorized intcflux/tflux	512	1	1	10.42	6.53	7.30
			8	1	1	8.18	4.60	5.27
				6	1	3.31	1.67	1.98
AVEO		First veo version	8	1	1	118.01	72.58	62.36
		Vectorized intcflux/tflux	8	1	1	6.86	2.70	2.94
			8	8	1		0.71	

Figure 5 : Time ( $10^{-9}$  s) per DOF per right hand side evaluation for a Taylor-Green

vortex simulation on an NVIDIA TitanV GPU and NEC SX-Aurora

VEs strong scaling (MPI-OpenMP hybrid: OMP\_NUM\_THREADS=8,  
1 process / 1 VE with 8 cores)

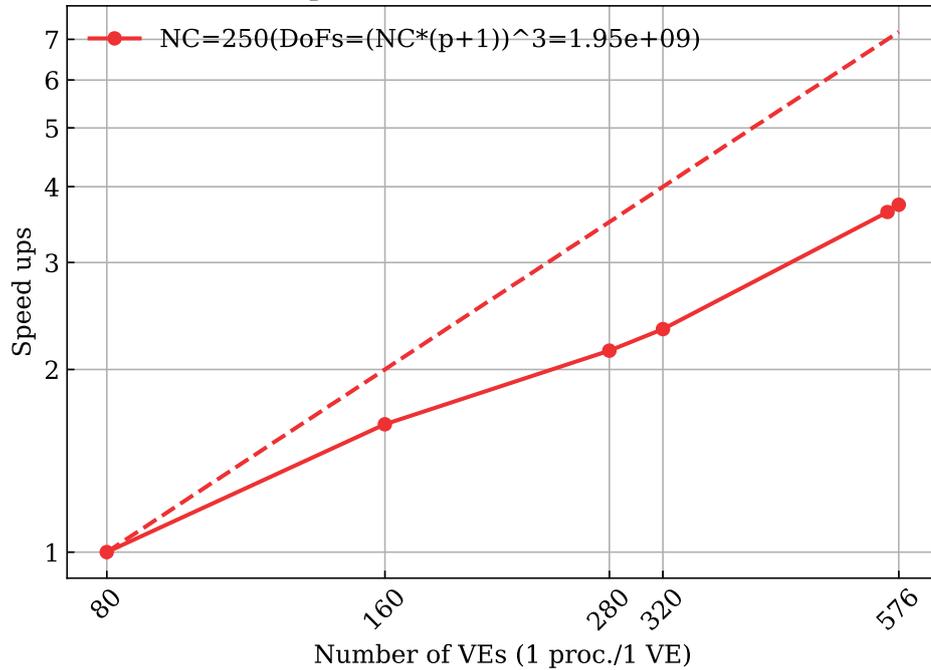


Figure 6 : Strong scaling of PyFR on NEC SX-Aurora (AOBA at Tohoku University)

#### 4. Summaries

This project developed an inlet turbulence generation algorithm for a cross platform based parallel computation, and the algorithm was demonstrated to simulate flows over the low-pressure turbine blade. In this report, we started from the conditions for the flow simulation, and then explained the details of inlet turbulence generation including its algorithm and performance test. The results of flow simulations over the low-pressure turbine blade shows that the effect of turbulence is significant in the prediction of wake expansion behind the blade in the present  $Re=90k$  case. Furthermore, the implementation of the FR scheme on vector architecture (NEC SX-Aurora) has been tested, and its performance were investigated. The results are promising in that the fully vectorized code was obtained by a series of tuning, and 150 times speed-up has been achieved. The strong scaling has been also shown with 576VEs at AOBA of Tohoku University, which is considered sufficiently efficient for practical computation with a large number of partitions.

[1] P. E. Vincent, A. S. Iyer, F. D. Witherden, B. C. Vermeire, Y. Abe, Ralf-Dietmar Baier and A. Jameson, ICOSAHOM2018, 9 Jul 2018.

[2] F. D. Witherden, A. M. Farrington, and P. E. Vincent, CPC, 185 (11), pp.3028- 3040, (2014).

[3] H. T. Huynh, AIAA-2007- 4079.

[4] O. Savas, Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., 17 (10), pp.3772-3775, (2012).

M. Klein, A. Sadiki, and J. Janicka, J. Comput. Phys., 186, pp.652- 665 (2003)

[5] Emile Toubert and Neil D. Sandham, Theor. Comput. Fluid Dyn., 23, pp.79-107 (2009)

[6] Z. T. Xie and I. P. Castro, Flow Turbul. Combust., 81, (3), pp.449-470 (2008)

[7] S. E. Guarini, R. D. Moser, K. Shariff, and A. Wray, J. Fluid Mech., 414, pp.1-33

(2000)

[8] J. Romero, J. Crabill, J.E. Watkins et al. / *Computer Physics Communications* 250 (2020) 107169

5 Research results (\* reprint included)

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

[1] Arvind S. Iyer, Yoshiaki Abe, Brian C. Vermeire, Patrick Bechlars, Ralf D. Baier, Antony Jameson, Freddie D. Witherden, and Peter E. Vincent, “High-order accurate direct numerical simulations of flow over a MTU-T161 low pressure turbine blade,” *Computers & Fluids* Vol.226, 104989, (2021), doi: 10.1016/j.compfluid.2021.104989

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

## **2. 研究成果報告書**

### **<萌芽公募共同研究>**



課題番号	J21H001
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	2021.4～2022.3
継続年数	2年目

**小鳥型高性能飛行ロボットの開発**  
**Development of a small birdlike high-performance flying robot**

石出 忠輝<sup>\*†</sup>, 大林 茂<sup>\*\*††</sup>  
 新井 太一朗<sup>\*\*\*</sup>, 岡田 陽平<sup>\*\*\*</sup>, 下山 幸治<sup>\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>木更津高専機械工学科, <sup>\*\*</sup>東北大学流体科学研究所  
<sup>\*\*\*</sup>木更津高専専攻科機械・電子システム工学専攻  
<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>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採り入れた羽ばたき翼模型を製作し、空力特性を調査する。さらに空気力と PIV の同時計測を行い、揚力及び抗力の時間変化と主翼まわりに生じる 3 次元剥離渦構造のパターン変化との関連性を調査する。

## 2. 研究成果の内容

### 2.1 フェザリング運動のヒービング運動に対する最適な位相差の導出

本研究では第 1 段階として、ヒービング運動一周期におけるフェザリング運動位相差及び角度の目標値を算出した。前提条件として、一様流速  $U=7\text{m/s}$ 、ヒービング周波数  $f=3\text{Hz}$ 、ヒービング振幅  $EA=20^\circ$  としている。羽ばたき主翼は、翼弦方向テーパ率比 1/3 のアクリル硬質樹脂製楕円翼を用いている。計算手順は、図 1 に示すようにヒービング運動の各位相角における片翼幅中間点の翼の運動速度  $v$  を算出する事によって得られる迎角  $\alpha$  が、振り下ろし及び振り上げの中間点において  $\alpha=9^\circ$  になるようにフェザリング運動パターンを決定した。ここで  $\alpha=9^\circ$  は、固定楕円翼を対象とした空気力測定を行った結果、最大揚力係数が得られた迎角である。

### 2.2 フェザリング運動効果

空気力測定状況外観を図 2 に示す。測定装置は、6 分力ロードセル MDF-250N（昭和測器）及びデータ取得装置オムニエース III RA2300（NEC Avio）を使用し、サンプリング周波数 1kHz、サンプリング時間 20sec である。図 3 に抗力曲線を示す。この図を見ると、フェザリングを与える

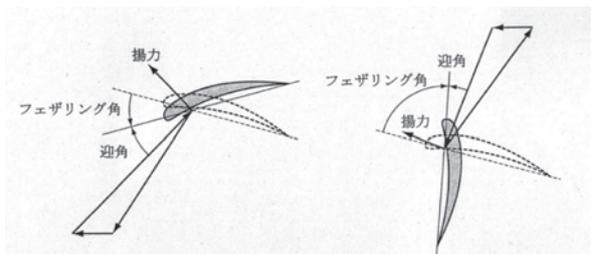


図 1: フェザリング運動



図 2: 空気力測定

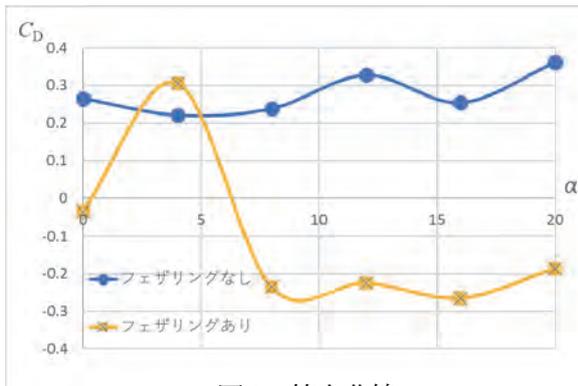


図3：抗力曲線

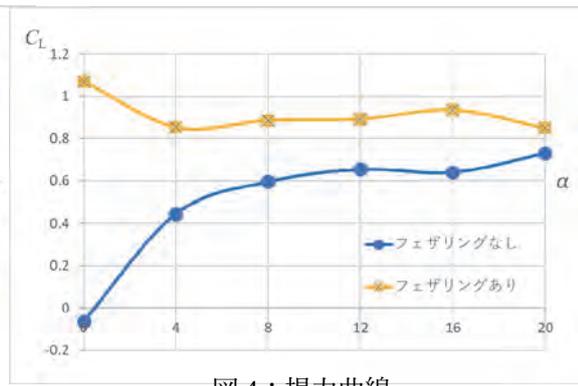


図4：揚力曲線

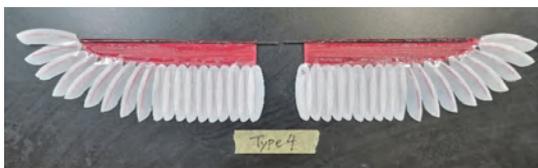


図5：鳥型翼（タイプ4）



図6：鳥型翼（タイプ5）

と  $\alpha=8^\circ$ 以上の迎角領域で、推力が発生している事が確認できる。図4に揚力曲線を示す。この図を見ると、 $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ の迎角領域においてフェザリング効果が確認できる。

## 2.3 鳥型翼有効性の評価

### 2.3.1 鳥型翼の製作

図5及び図6に、本研究において3Dプリンタを用いて製作した羽ばたき翼外観を示す。正羽形状は、フクロウ（図5：Type4）及びアオバト（図6：Type5）の正羽を3DCAD上でトレースする事によってデジタル化しており、初列風切羽9枚、次列風切羽10枚で構成されている。造形剤は、正羽はTPU（Thermoplastic Polyurethane）、上腕及び羽軸部分はPETG（Polyethylene Terephthalate Glycol modified）を使用し、各正羽と上腕部との隙間にはOPPフィルムを貼っている。

### 2.3.2 空気力測定結果

空気力測定状況外観を図7に示す。本実験ではヒービング運動のみを付加し、2.2節で使用した翼弦方向テーパー比1/3の亚克力硬質樹脂製楕円翼と比較する。図8に揚抗比曲線を示す。この図を見ると、 $\alpha=8^\circ$ 以上の迎角領域で、Type5鳥型翼の優位性が確認できる。



図7：空気力測定

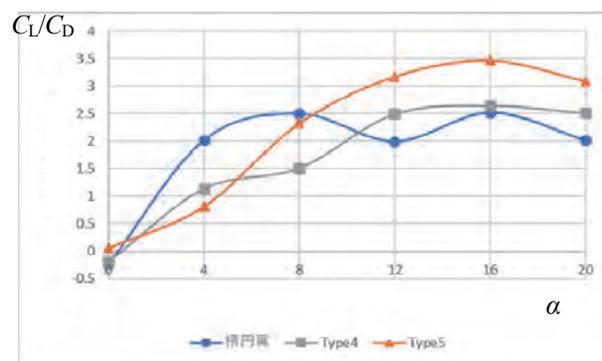


図8：揚抗比曲線

## 3. 研究目標の達成状況

本公募共同研究を通して、鳥の主翼構造を採り入れた羽ばたき翼の空力的有効性を示す事ができ、研究目標は概ね達成できたものと考えられる。

#### 4. まとめと今後の課題

本公募共同研究の実施により、鳥の主翼構造を採り入れた柔軟翼及びヒービング運動にフェザリング運動を付加した羽ばたき運動の空力有効性の一例を示す事ができたものと考えられる。今後は、さらに風洞実験を積み重ねて、より空力特性改善に寄与する翼構造及び羽ばたき運動パターンの導出を目指していきたい。

#### 5. 研究成果

##### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Tadateru ISHIDE, Taichiro ARAI, Yohei OKADA, Hajime IZUMI, Koji SHIMOYAMA and Shigeru OBAYASHI : Development of a small birdlike high-performance flying robot, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-57, pp. 125-126.

[2] 石出忠輝, 新井太一郎, 泉源, 山崎渉, 下山幸治, 大林茂, 劉浩 : 鳥の主翼構造を規範とした羽ばたき翼空力特性の調査, 日本機械学会 2021 年度年次大会, (2021), J021-11.

##### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J21H002
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	1年目

### 電子聴診器による血液乱流の解明

Elucidation of a blood turbulence using electronic stethoscope

平野 雅嗣\*†, 船本 健一\*\*††

山崎 克人\*\*\*, 井上 浩介\*\*

\*明石工業高等専門学校, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*栄宏会小野病院

†申請者, ††所内対応教員

#### 1. 研究目的

試作した電子聴診器を用い血管音を解析することにより血液乱流を解明し、循環器疾患治療に役立てる。

#### 2. 研究成果の内容

流体研では、まん延防止措置地域からの受入れが厳しく実施出来なかった。

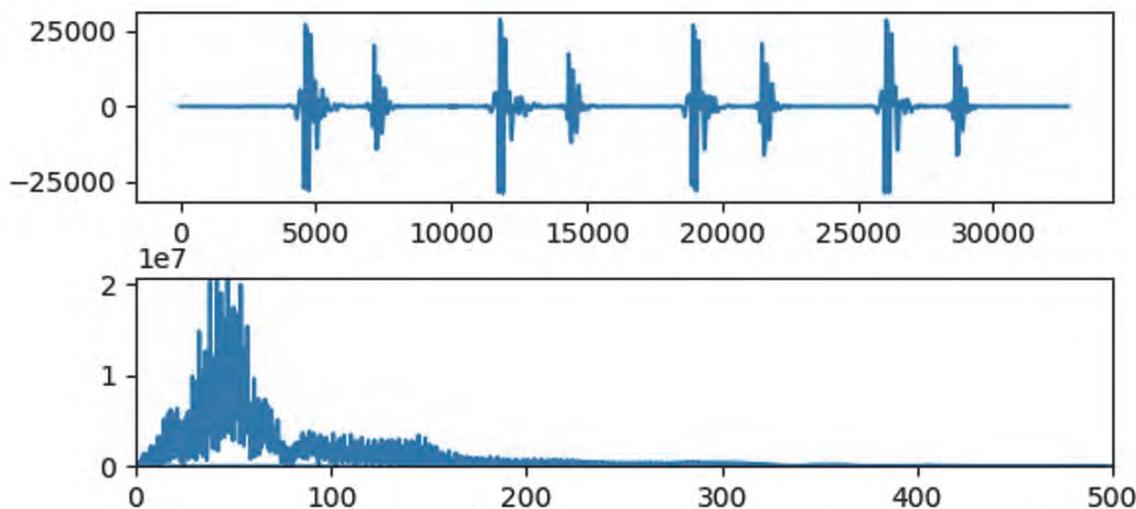


図1：健常者心音解析結果

上：心音，横軸サンプリング ( $f=8\text{kHz}$ ) 番号，縦軸AD値

下：FFT結果，横軸周波数，縦軸A.U.

#### 3. 研究目標の達成状況

周波数解析により乱流が発生していると考えられる心雑音において、高周波成分が高まっていることが分かった(図1, 2)。またスペクトログラムにより画像による乱流解明の可能性も考えられる。(図3)

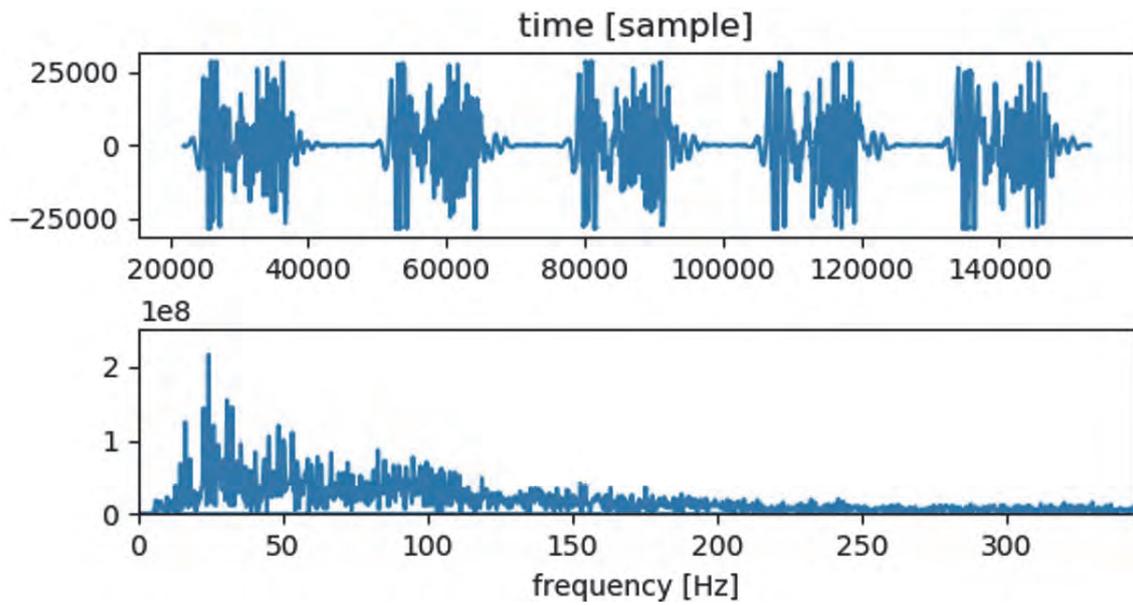


図 2：収縮後期雑音解析結果  
 上：心音，横軸サンプリング ( $f=44\text{kHz}$ ) 番号，縦軸 AD 値  
 下：FFT 結果，横軸周波数，縦軸 A.U.

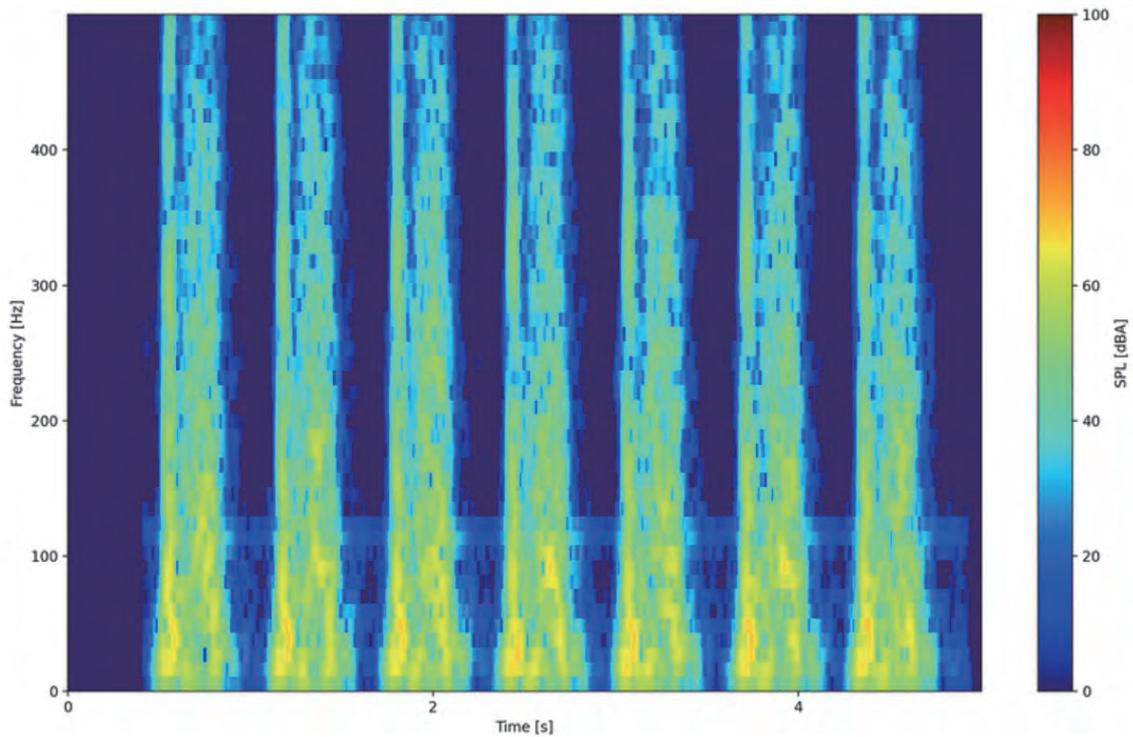


図 3：収縮後期雑音スペクトログラム

#### 4. まとめと今後の課題

今後は貸与された生体ゲルを用いた血管ファントムを用い，注射器からの水流音を，開発した電子聴診器でセンシングする．ウレタンにより狭窄を模擬し音の解析を行う．その後，流体研にて

超音波との同時計測を行い乱流度合いの可視化と音の解析を行う。また円環内の計算機シミュレーションも船本研にお願いし、乱れのシミュレーションも行う。

## 5. 研究成果

### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] M. Hirano, H.D. Yukimura, K. Yamasaki and K. Funamoto: Elucidation of a blood turbulence using electronic stethoscope, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-71.

### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）

なし

（受賞）

なし

（マスコミ発表）

なし

## **2. 研究成果報告書**

### **<特別国際公募共同研究>**



Project code	J21T001
Classification	Special International Collaborative Research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

## Development of measurement method of high-speed micro mist in environmental energy devices

Takehiko Sato\*†, James S. Cotton\*\*††

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Department of Mechanical Engineering, McMaster University

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Generating droplets from liquid and spraying them are the important elemental technology in environmental energy devices. When the size of this droplet becomes smaller and faster, the measurement becomes very difficult. Therefore, we aim at developing the measurement method for the performance improvement of the devices through the EHD technologies.

### 2. Details of program implement

In this study, we exchanged the research information through online meetings and a special lecture given by Prof. Cotton.

The special seminar entitled “Electrohydrodynamics (EHD): the next generation thermal management technology” was insightful and informative. The content includes following topics. (1) Identification of the primary mechanism of heat transfer enhancement and even deterioration - the interfacial forces on flow pattern. (2) Methodology to numerically simulate the electric field distributions in two-phase flow and estimate the effect that the interfacial forces have on flow pattern. (3) Development of a theoretical EHD flow pattern map for annular channels. (4) Discovery of unique flow regimes resulting from the influence of EHD. (5) Ability to independently control pressure drop and heat transfer coefficient by varying AC voltage, frequency and/or waveform. (6) Discovery of solid-liquid phase change thermal storage and electrophoretic bifurcation convective cell enhancement through EHD.

Prof. Sato introduced following his research topics through online meetings. (1) Initiation and propagation mechanism of underwater streamers: We clarified that a primary streamer propagated intermittently synchronized with appearance of pulsed currents with velocity of 2.5 km/s and a secondary streamer propagated with around 20 km/s during a continuous current appears. (2) Chemical transport by plasma actuator: To apply medical applications and environmental treatment, we have clarified flow patterns and mechanisms of plasma induced flow. Bullet type of thermal flow is generated when plasma is generated from the tip of the electrode to the water surface. This flow generates circulating flow in water and enhances the chemical transport generated by plasma. (3) Dynamics of plasma-induced cavitation bubble: We aim at developing a medical instrument using plasma in water by investigating dynamics of rebound bubbles. The rebound dynamics changes due to inclusion of hydrogen gas, which is non-condensation gas, when the bubbles are generated by plasma such as laser or spark.

### 3. Achievements

Although Prof. Cotton was unable to visit the Institute of Fluid Science in this year because of COVID-19, we were able to understand each other's research strengths and discuss how to use them in energy equipment and high-speed mist measurement applications.

### 4. Summaries and future plans

We have decided to continue the collaboration research and plans to visualize EHD flows using Prof. Sato's laboratory equipments and also develop measurement methods of high-speed mist using EHD technologies.

### 5. Research results

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

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

- [1] J. S. Cotton and T. Sato: Electrohydrodynamics (EHD): the next generation thermal management technology, *The 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021)*, オンライン開催, (2021), Presentation No. CRF-82.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable.

(Award)

Not applicable.

(Press release)

Not applicable.

## **2. 研究成果報告書**

### **<重点公募共同研究プロジェクト>**



課題番号	J21J001
区分	重点公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2021.4～2022.3
継続年数	3年目

### 超微小液滴と高速衝突の科学

Science of ultrafine drop and high speed impact

佐藤 岳彦\*†, 渡部 正夫\*\*††

矢野 猛\*\*\*, 小林 一道\*\*, 伊賀 由佳\*, 高奈 秀匡\*, 大谷 清伸\*,

岡島 淳之介\*, 劉 思維\*, 小宮 敦樹\*, 船本 健一\*, 肖 昀晨\*\*\*\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*北海道大学大学院工学研究院

\*\*\*大阪大学工学研究科, \*\*\*\*東北大学大学院工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

#### 1. 研究目的

超微小液滴の高速衝突現象の学術分野創成に向けて、発生方法、噴出方法、衝突方法、計測方法などの開発、物理化学特性の理解、応用展開などを行うための研究課題の抽出ならびに研究体制を構築し、大型予算へ応募し採択を目指すことを目的とする。

#### 2. 研究成果の内容

本重点公募共同研究では、1年半にわたり科研費学術変革領域研究Aについて準備し、令和3年1月に2回目の申請をした。残念ながら、申請は不採択となったが、今まで検討してきた内容について総括すると共に、検討内容を基盤に新しい研究への展開を図ることとした。具体的には、研究会の立ち上げの検討や高速ミスト装置の改良による研究展開を進めた。

最初に作製した高速ミスト装置は、断続的に凝縮した水が噴出するなど、ミストが安定し

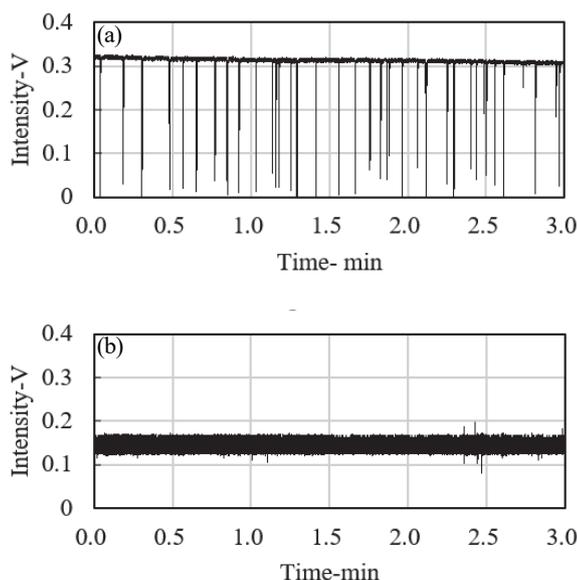


図1 ミスト装置から噴出する凝縮水の検出結果。(a)初期装置, (b)装置改良後。

て噴出しない問題があった。水が噴出すると水滴径が大きくなり、照射面が濡れたり過大な液滴圧が加わるなどの問題が生じたため、凝縮水が噴出する頻度を計測する装置を作製した。計測方法は、ミストを横断するようにレーザーを入射し、対向する位置にフォトダイオードを設置し、その発光強度の変化を検知することで、凝縮水噴出時に発光強度が減少することを捉える方法である。図 1 (a)に最初に作製したミスト装置の凝縮水噴出検出結果を示す。これより、数秒に 1 回凝縮水の噴出が起きていることが分かる。一方、図 1 (b)に示す、改良後のミスト装置では、ほとんど凝縮水が発生していないことを確かめられた。

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、科研費学術変革領域 A の採択を目指したが、残念ながら不採択となった。しかしながら、大型予算の申請の過程で抽出した研究課題は、参加者全員の研究展望に繋がる大きな成果となった。

### 4. まとめと今後の課題

本年度までに構築した研究メンバーを中心にした研究会の立ち上げならびにミスト装置の改良による応用展開を図る。

### 5. 研究成果

学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）  
なし

#### 1) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] T. Sato, M. Watanabe, T. Yano, Y. Iga, K. Kobayashi, A. Komiya, H. Takana, K. Ohtani, J. Okajima, K. Funamoto, Y. Xiao, T. Nakajima, and S. Liu: Science of Ultrafine Droplet and High Speed Impact, *The 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2021)*, オンライン開催, (2021), Presentation No. CRF-81.

#### 2) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）佐藤岳彦，中嶋智樹，ショウ インシン，藤村茂，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，PCT 出願：PC-32612（2021 年 10 月にデータを追加して P2020-179943 の優先権を利用して出願）

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

## **2. 研究成果報告書**

### **<リヨンセンター公募共同研究>**



課題番号	J21Ly01
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	2021.4~2022.3
継続年数	1年目

**TiC 粒子分散 Al 基複合材料の強度発現機構解明**  
**Strengthening mechanism of TiC particle reinforced Al matrix composite**

栗田 大樹\*†, 武田 翔\*\*††, DEZELLUS Olivier\*\*\*

\*東北大学大学院環境科学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*Laboratoire des multimatériaux et interfaces, Claude Bernard University Lyon 1

†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

Al<sub>3</sub>Ti 合金とカーボンをナノレベルで混合し、申請者の知見を基にした熱処理を加えて、高温でも使用可能な TiC 粒子分散 Al 基複合材料を開発する。

**2. 研究成果の内容**

Al<sub>3</sub>Ti 合金とカーボンをナノレベルで混合し、焼結した Al-TiC 複合材料の TEM 観察結果を図 1 に示す。サブマイクロメートルサイズの粒子が個々に存在し、その周囲を Al 固溶体を取り囲んでいた。つまり、TEM 観察では粒子のクラスター化は見られなかった。粒子の形状は様々であり、Al マトリクスと TiC 粒子との界面には中間相は形成されていない。TiC 粒子は強化領域と非強化領域の両方で Al 固溶体粒界に局在していた。強化領域では TiC 粒子の体積分率が高いため、Al 固溶体結晶粒径の微細化が観察された。

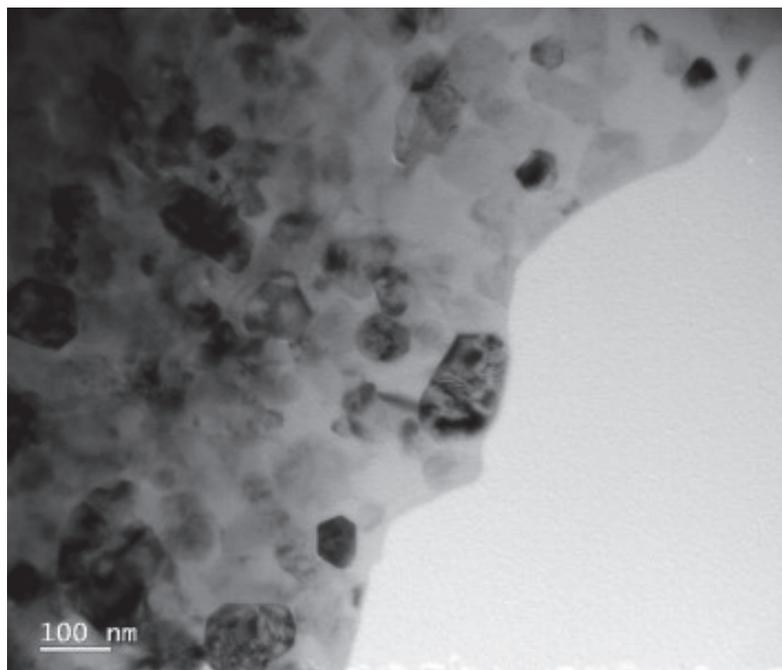


図 1 : Al-TiC 複合材料の TEM 観察結果

Al-TiC 複合材料は平均で 106 GPa のヤング率と 6.0% の最大伸びを示した。Al-TiC 複合体のヤング率は Hashin-Shtrikman モデルから計算される上限値である 106 GPa に近い値を示している。これは、TiC 粒子の *in situ* 反応合成が、強い界面結合とそれに伴う荷重移動をもたらすことを示唆している。また、純 Al と比較して、0.2% 耐力および UTS が大幅に増加し、最大伸びも減少した。図 2 に示すように、Al-TiC 複合材料に関する文献データでは強化粒子 22 vol.% を含む複合材料の破断伸びは、ほぼゼロであり、脆性的な挙動を示すことから、本研究で得られた 6% の伸びの実験値は注目すべきである。

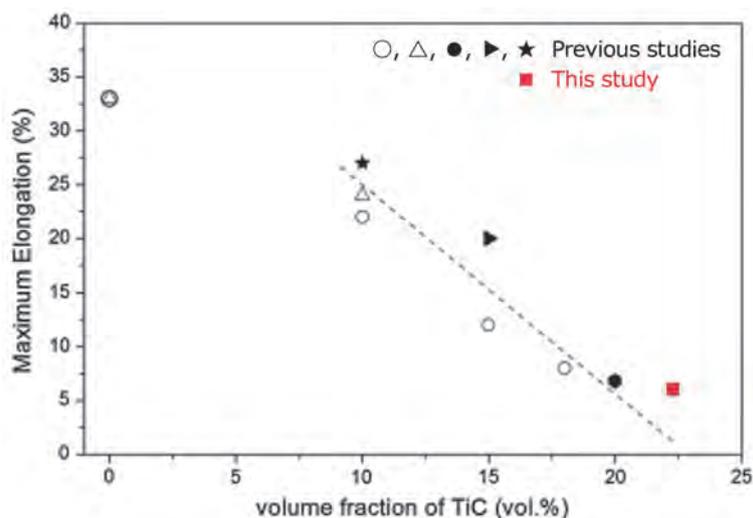


図 2 : Al-TiC 複合材料に関する文献データと本研究結果の比較

### 3. 研究目標の達成状況

順調に進展している。研究結果を整理し、学術論文として発表する準備をしている。同時に、B<sub>4</sub>C 粒子などの別の強化粒子についても検討を進め、研究をさらに進展させたい。

### 4. まとめと今後の課題

#### 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] Hiroki Kurita, Sho Takeda, Olivier Dezellus, Tetsuya Uchimoto, Fumio Narita: Microstructure and mechanical properties of an Al-TiC metal matrix composite obtained by reactive synthesis, *ICFD18*, 10/28-10/30, 2021, Online

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）  
なし

Project code	J21Ly02
Classification	LyC Collaborative Research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## Stability of jet diffusion flames cofiring with carbon-free ammonia

Hideaki Kobayashi\*\*†, Dany Escudie\*  
 Cedric Galizzi\*††, Manuel Kuhni\*,  
 Akihiro Hayakawa\*\*, Sophie Colson\*\*  
 \*CETHIL, INSA de Lyon, France  
 \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University  
 †Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Ammonia (NH<sub>3</sub>) is a promising carbon-free fuel. Though mainly produced from hydrocarbons nowadays, it has a strong potential for a carbon-neutral society as it can be produced from renewable resources and present major advantages for energy transportation and storage of those highly intermittent resources. The energy stored can then be used through direct combustion of NH<sub>3</sub> in a wide range of applications currently based on the combustion of fossil fuels, such as the power, industry, or transportation sectors.

Nonetheless, the use of NH<sub>3</sub> in those applications is challenging due to the properties of NH<sub>3</sub> as a fuel, with low burning velocity, which might lead to stabilization issues, high ignition energies, as well as the emissions of NO<sub>x</sub>, harmful to the health and environment which should be managed carefully. Investigations of NH<sub>3</sub> and NH<sub>3</sub> blend fuel are thus necessary for its development, and the determination of its fundamental characteristics is essential.

Jet diffusion flames configurations are a common, simple configuration often employed in combustion research to study flame stabilization. This simple configuration also enables relatively simple modeling, which can be employed to confront existing kinetics with experimental results. Though being simple, this configuration is also close to several industrial applications such as industrial furnaces and can be employed for the investigation of NH<sub>3</sub> use in those applications.

In this collaborative research project, NH<sub>3</sub>/CH<sub>4</sub> flames were investigated as a means of direct reduction of CO<sub>2</sub> emissions by the introduction of NH<sub>3</sub>. The flame stabilization domain and the effect of NH<sub>3</sub> addition were investigated experimentally in a jet flame configuration. In addition to the evolution of the stabilization domain, the evolution of the stabilization dynamics at the base of the flame and its interaction with the burner was observed up to liftoff by observing the flame tip position as well as the heat transfer to the burner lip. The change in the local flame stabilization was mostly attributed to a change in the chemistry, with a variation of the mixture reactivity, and stoichiometric mixing fraction, changing the local dynamics at the flame base.

Quantitative experimental measurement in this region however remains complex, and numerical analysis is considered in the present work to go further in the analysis of the local stabilization dynamics. The objective of the present study is thus first to model the experimental configuration used, validate this model based on the experimental observation, confirm the dynamics inferred from the flame position evolution, and finally use the numerical model to observe the flame tip structure and its evolution with NH<sub>3</sub> addition.

## 2. Details of program implement

The present collaborative research started in 2017 in the framework of a double-degree Ph.D. thesis on the study of fundamental combustion characteristics of ammonia/methane blends. It completes experimental work performed in the CETHIL in France from 2018, including flame stabilization domain determination with ammonia addition, and a detailed study of the local stabilization up to liftoff.

The experimental results obtained in France, relative to the local stabilization dynamics of the flame up to liftoff, were further analyzed to observe the evolution of the local couplings (aero-thermo-chemistry) which led to the earlier liftoff in the case of ammonia addition. The resulting analysis, based on experimental observations, was described in a journal paper published in 2021.

This work was then completed using numerical simulations as a way to investigate the flame structure and the local dynamics, including fuel mixing and local velocity at the burner lip which can not be investigated experimentally. In addition, the development of a numerical model for the configuration is also an essential tool for understanding the dominant parameters in the stabilization couplings, as each coupling parameter can be artificially modified, and their effects observed independently. This numerical part of the study was performed in the IFS, using OpenFOAM software with a fully detailed chemistry for  $\text{NH}_3/\text{CH}_4$  blends, taking advantage of the AFI-NITY supercomputer facility in the IFS.

## 3. Achievements

In previous experimental work, the flame base position was observed experimentally. It could be observed that its position changes up to liftoff under the combined effect of the local flow velocity, but also thermal interaction with the burner and change in the fuel gas properties as shown in Fig. 1.

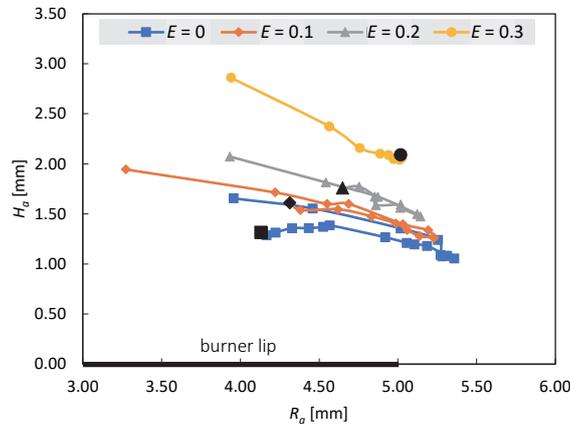


Figure 1: Evolution of flame position with increasing jet velocity, and for various ammonia mixing ratios  $E$ . Black symbols represents the flame tip position just before liftoff. *from Colson et al., Combust Flame, 2021*

Particularly, the change in chemistry associated with ammonia addition was assumed to be predominant through the decrease of the mixture reactivity and the change in the stoichiometric fraction. The couplings observed experimentally suggested that flame position was strongly affected by the change in the mixture reactivity (and thus the local velocity of the flame) and the change in stoichiometric mixture fraction, pushing the flammable mixture domain into a region of higher local velocities, and consequently requiring the flame to stabilize further away from the burner. The thermal interactions

with the burner were shown to be strongly correlated with the change in flame position. The results of this analysis were published in an international peer-reviewed journal and presented at the international conference of fluids dynamics (ICFD2021).

Simple simulations were first realized to clarify the evolution of the local mixing fraction and local velocity for the cold flow case as shown in Fig. 2. The simulations corroborated the experimental analysis, and particularly, the local evolution of the stoichiometric mixture fraction line,  $Z_{st}$ . Whereas the flow field is merely affected by the increase in ammonia content, the variation in mixture physical properties remaining minor and the white streamlines remaining identical, the stoichiometric mixture fraction iso-contour in red is located closer to jet center.

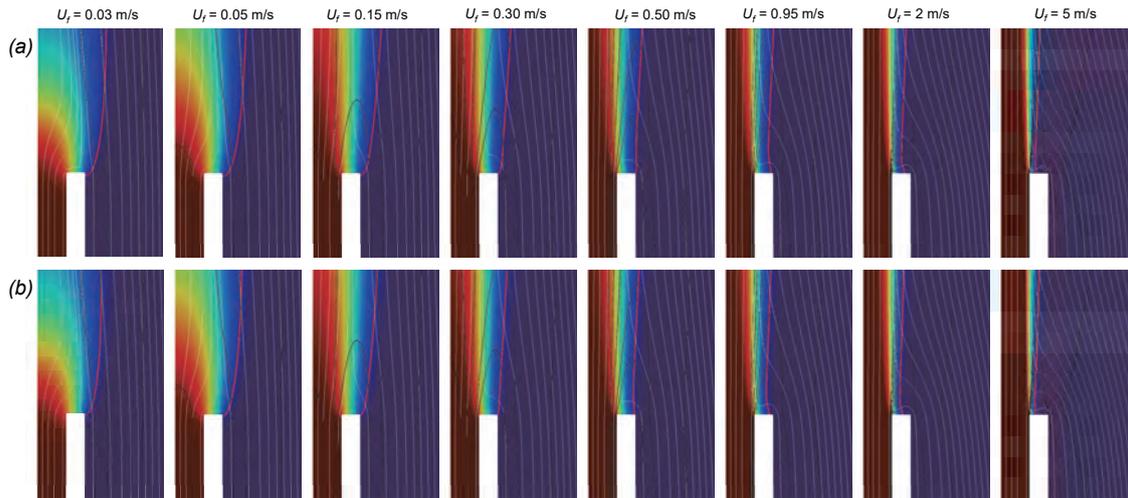


Figure 2. Effect of the jet velocity on local mixing fraction and flow field (a)  $\text{CH}_4$  case; (b)  $\text{NH}_3/\text{CH}_4$  case with  $E = 0.3$ . Cold flow laminar simulations.

Investigations of the  $\text{NH}_3/\text{CH}_4$  flame structure at the tip was started, as represented in Fig. 3, first to confirm the chemiluminescence observation, and then to observe the formation of pollutants species in the flame. Flame simulation using the Okafor mechanism detailed chemistry agreed qualitatively with the experimental observations but some refinements will be necessary to go further as developed in section 4.

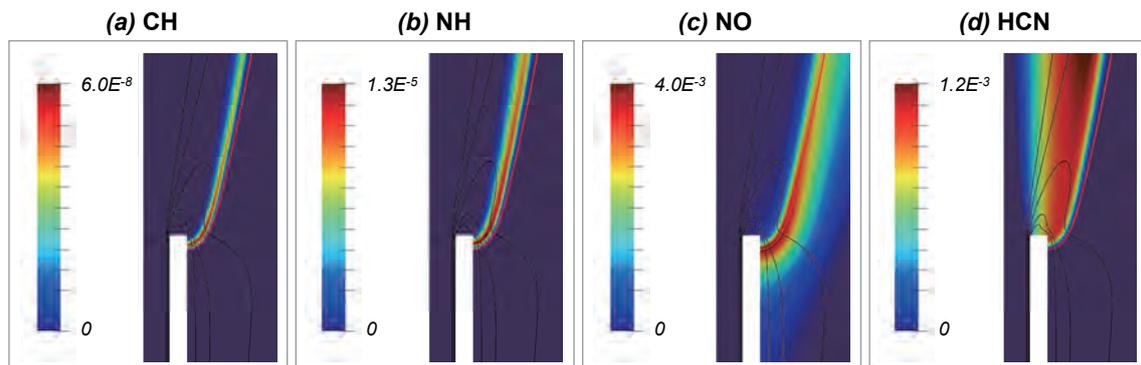


Figure 3. Flame intermediates species distributions for  $E = 0.3$  and  $U_f = 0.95$  m/s. (a) CH; (b) NH; (c) NO; (d) HCN. Simulation using Okafor mechanism.

#### 4. Summaries and future plans

The present work enabled to get a deeper understanding of the effect of ammonia addition on the evolution of the flame local stabilization up to liftoff. The preliminary

numerical simulations confirmed the analysis of the experimental observations. In future work, the modeling of the flame will be refined.

Particularly, the thermal interaction with the burner will be further investigated by observing the effect of the wall thermal boundary conditions on the flame position for both methane and methane/ammonia flames. In addition, radiation heat losses were not modeled in the present work and will be included in further development. Indeed, major changes in the radiation properties of the flame are expected to occur with ammonia addition through the change of the flame temperature and radiative species.

## 5. Research results

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

- [1] S. Colson, M. Kuhn, A. Hayakawa, H. Kobayashi, C. Galizzi and D. Escudie: Stabilization mechanism of an ammonia/methane non-premixed jet flame up to liftoff, *Combust Flame*, 234 (2021), pp. 111657, doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111657.

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

- [2] S. Colson, M. Kuhn, A. Hayakawa, H. Kobayashi, C. Galizzi, D. Escudie: Local stabilization dynamics of ammonia/methane non-premixed flames, *ELyT Workshop* June 2021, online, (2021).
- [3] S. Colson: Breaking the wall of carbon emissions with ammonia, *Falling Walls Lab* Sendai, online, (2021).
- [4] S. Colson: Study of ammonia combustion fundamental characteristics, *11th Saudi Arabian Section of the Combustion Institute Meeting*, online, (2021), invited talk.
- [5] S. Colson, M. Kuhn, A. Hayakawa, H. Kobayashi, C. Galizzi, D. Escudie: Local Stabilization Dynamics of a Methane/ammonia Non-premixed Jet Flame Up to Liftoff, *1 Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), Paper ID5117-1 (Presentation OS22-1/OS23-3).

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

(Award)

Grand Prix of the Jury Award at the France-Japan Science Photo Contest “Hidden Beauty of science – Beauté cachée de la science” hosted by the Embassy of France in Japan for the picture “Toward decarbonized combustion (Vers une combustion décarbonée)”

(Press release)

Project code	J21Ly03
Classification	LyC Collaborative Research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	2nd year

## Thermal Actuation and energy harvesting using MultiPhysics alloys (TATAMI)

Mickaël LALLART\*†, Hiroyuki MIKI\*\*††, Gaël SEBALD\*\*\*, Tetsuya UCHIMOTO\*\*

\*Univ. Lyon, INSA-Lyon, LGEF EA 682, F-69621, France

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

\*\*\*ELyTMaX UMI 3757, CNRS – Université de Lyon – Tohoku University,

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

TATAMI aims at investigating **thermo-mechano-electrical and electro-thermo-mechanical energy conversion materials and systems**. The project objective is to propose alternatives to conventional ways for thermal energy harvesting devices and actuators, thanks to materials providing **couplings between the electrical, magnetic, thermal and mechanical domains** (Figure 1). To this end, commercial (or ready-made) or homemade alloys are considered and included within a global approach driven by “**material and device by design**” philosophy. The project thus encompasses material, structural and interfacing aspects through:

- 1) The **design or selection of appropriate materials**, such as conventional ferromagnetic materials (e.g., Phytherm from Aperam - <https://www.aperam.com/product/>), or new MultiPhysics Memory Alloys (MPMA, coupling thermal, magnetic and mechanical physical domains), such as Heusler alloys.
- 2) The design of innovative **thermal energy harvesters**, based on heat engines that allows providing mechanical and thermal oscillations from constant temperature gradients, that can then be efficiently converted into electrical energy through piezoelectric and/or pyroelectric effects for instance. By proper design of the **structural and electrical interfaces**, such approaches may provide attractive approaches to conventional thermoelectric modules that suffers from high thermal conductivity.
- 3) The development of **small-scale integrated actuation devices**, whose mechanical movement is triggered by temperature, directly or indirectly (i.e., Joule heating through the application of an electrical current or use of thermoelectric modules). To this end, **bistable mechanisms**, obtained by mechanical and/or magnetic interactions, are considered for providing **energy-efficient** approaches compared to classical solutions.
- 4) The conception of dedicated **electrical interfaces** for harvesting or for actuation. For both application objectives (harvesting or actuation), one particular aim of the development of such interfaces will be to provide **energy-efficient circuits**, either to provide realistic self-powered sensors using harvested energy, or to facilitate the global integration of the actuator.

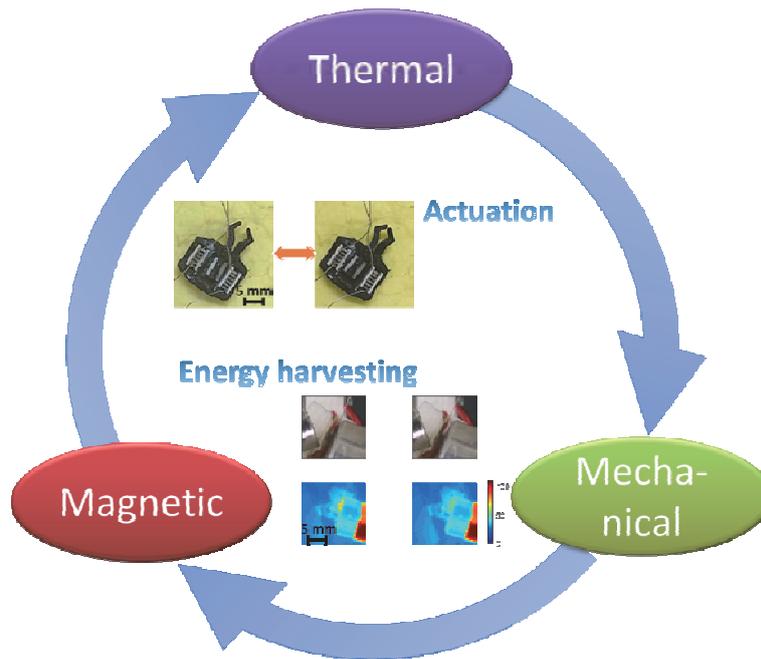


Figure 1: TATAMI concept.

## 2. Details of program implement

The origins of the TATAMI project lie in previous collaborations in the framework of the ELYT initiative, such as ELYT Global International Associated Laboratory (then International Research Network) and JSPS Core-to-Core project entitled “International research core on smart layered materials and structures for energy saving”. Another important aspect in the root of the project was the long-term research stay of Prof. Lallart in the framework of an invitational JSPS fellowship (2019-2020) which, among other aspects, allowed defining the project.

Hence, based on these preliminary results, TATAMI aims at exploring **new ways for the use of energy conversion materials able to couple three to four domains of Physics** (mechanical, thermal, magnetic and electrical). Based on the complementary skills of the partners regarding **material elaboration, material physics and device development** (structure and electrical interface), the project is driven by a “**material and system by design**” approach, that consists in considering the device as a whole for a global understanding and optimization. To this end, the project is divided into 4 Work Packages with tight connections between each other:

- WP1 - material selection, fabrication and optimization: the first task lies in the selection of materials, either through **homemade composition or suitable commercial samples**. The material under consideration will show multiphysic coupling with optimized properties in terms of conversion between mechanical, thermal, magnetic and electrical domains.
- WP2 - MPMA modeling and characterization: the optimized integration of the material goes through a **fine understanding of the underlying mechanisms** at the origin of the coupling. Hence, deep **characterizations** at microscale levels will be compared with **theoretical development**. The later, once confirmed, will permit highlighting the parameters of interest in order to properly tailor next-gen materials. In addition to this interaction with WP1, the characterization will also give premium properties for the integration achieved in the next Work Packages.
- WP3 – energy harvesting device: from the material characteristics and coupling

aspects, as well as the characteristics of the operative environment (e.g., working temperature and temperature variation range), original structures for energy harvesting will be envisioned, based on **heat engines** transforming heat gradient into mechanical oscillations and local temperature time-domain variations. This WP will also include the development of suitable **electrical interface**.

- **WP4 – actuation system:** in addition to energy harvesting device, actuation systems based on **thermal to mechanical conversion** are also under consideration, thanks to **magnetic interactions** that are dependent upon the temperature of parts of the device. Still in close relationship of the previous Work Packages, the principle here will be to design and implement **energy-efficient small-scale actuators**, for example taking advantage of **bistability**. Electrical driving circuits are also part of this investigation.

While the support of JSPS through invitational fellowship allowed starting the work in FY2020 (until June 2020), the premises of IFS Lyon Center (LyC) in Lyon provided significant support for the collaborative work, especially in regards to the sanitary situation that prevented from traveling.

### 3. Achievements

#### Summary of previous achievements

The first part of the project work was devoted to the **understanding and associated modeling of a home-made material** ( $\text{Ni}_{45}\text{Co}_5\text{Mn}_{36.6}\text{In}_{13.4}$  Heusler alloy), as well as its **applications to thermal energy harvesting** through the use of heat engines.

It enabled the understanding of temperature-dependence of the material magnetic properties, thanks to the consideration of **two simultaneous phase transitions** (first order structural transition and second order ferromagnetic one - Figure 2), revealing the mechanisms behind these transitions for a better material tailoring<sup>1</sup>.

Following this characterization and physical model of considered materials, these have then been applied to the design of a **novel energy harvesting device** exploiting the remarkable characteristic of magnetic property gain with temperature of the considered alloy. Furthermore, the proposed device allowed the development of innovative

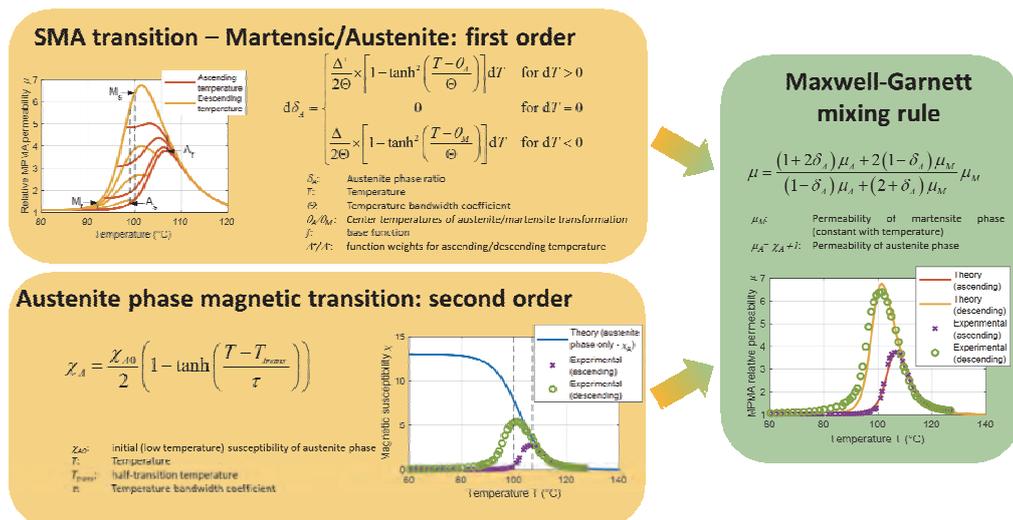


Figure 2. MPMA model principles and results.

<sup>1</sup> M. Lallart, H. Miki, L. Yan, G. Diguët, M. Ohtsuka: Investigation of Low Field Response of Metamagnetic Heusler Alloys as MultiPhysic Memory Alloys, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 53 (2020), 345002. DOI: 10.1088/1361-6463/ab8c7c

approach for thermal energy conversion thanks to a **direct conversion of the generated temperature variations to electricity** thanks to the use of pyroelectric elements<sup>2</sup>, yielding a gain up to 25 in terms of energy density compared to similar devices.

*Achievements in FY2021*

While previous year focused on the material characterization and energy harvesting first structures, work achieved in FY2021 mainly focused on the **actuation device**. The use of **bistable** devices was considered in order to provide energy-efficient solutions. More particularly, the principles lie in tailoring the magnetic interaction between **permanent magnets and ferromagnetic materials** (Aperam® Phytherm iron-nickel soft magnetic alloy<sup>3</sup>) or **Ferromagnetic Shape Memory Alloys (FSMA)** that lose their magnetic properties with the temperature, along with heating element such as power resistors or thermoelectric modules (Figure 4). For instance, considering the expression

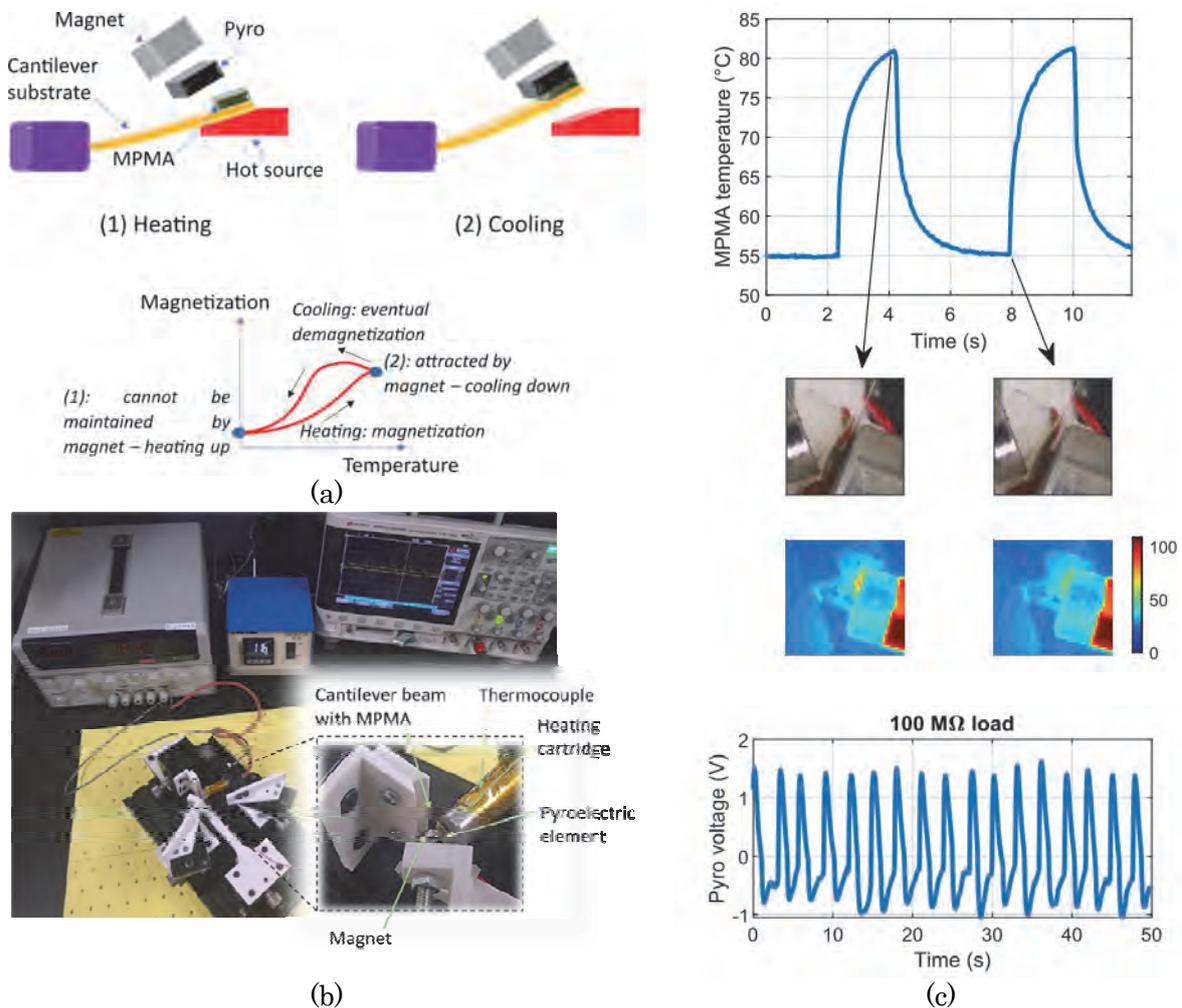


Figure 3. MPMA/pyroelectric heat engine: (a) schematics, (b) implementation and (c) experimental response.

<sup>2</sup> M. Lallart, L. Yan, H. Miki, G. Sebald, G. Diguët, M. Ohtsuka and M. Kohl: Heusler Alloy-Based Heat Engine using Pyroelectric Conversion for Small-Scale Thermal Energy Harvesting, *Applied Energy*, Vol. 288 (April 2021), 116617 (13 pages), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116617>

<sup>3</sup> <https://www.aperam.com/product/phytherm-55/>

of the magnetic field  $B$  created by a cuboid magnet at a distance  $x$  as<sup>4</sup>:

$$B(x) = \frac{B_r}{\pi} \left[ \arctan \left( \frac{(x+d+2c_m)\sqrt{a_m^2+b_m^2+(x+d+2c_m)^2}}{a_m b_m} \right) - \arctan \left( \frac{(x+d)\sqrt{a_m^2+b_m^2+(x+d)^2}}{a_m b_m} \right) \right] \quad (1)$$

with  $B_r$  the remnant field,  $a_m$ ,  $b_m$  and  $c_m$  the magnet dimensions, and  $d$  the magnet boundary and the expression of the material permeability  $\mu$  as a function of the temperature  $T$  given by<sup>5</sup>:

$$\mu(T) = \mu_0 + \mu_{0K} \left( 1 - \left( \frac{T}{T_C} \right)^n \right) \quad (2)$$

where  $\mu_0$  and  $\mu_{0K}$  denote the vacuum permeability and material permeability at 0 K,  $T_C$  the Curie temperature and  $n$  a fitting factor, yields the results depicted in Figure 5 in terms of force exerted on the moving magnet. It can be for instance seen that as the left material is heated, the force progressively goes from a negative value (meaning that the magnet is more attracted by this side compared to the right one) until the temperature reaches a limit value where the force goes positive, relating the fact that the magnet gets attracted to the right side. When the two alloy temperatures are equal the magnet is still attracted by the side it is close to, denoting the stability of the position. This thus shows that **energy should be provided for heating only during transitions**.

Such a concept was for example applied to a small-scale gripper (Figure 6). In that case, thermoelectric modules were used for heating the ferromagnetic part. The use of thermoelectric elements is here interesting as it can also be used for cooling down more quickly ferromagnetic plates, hence allowing a higher operating frequency.

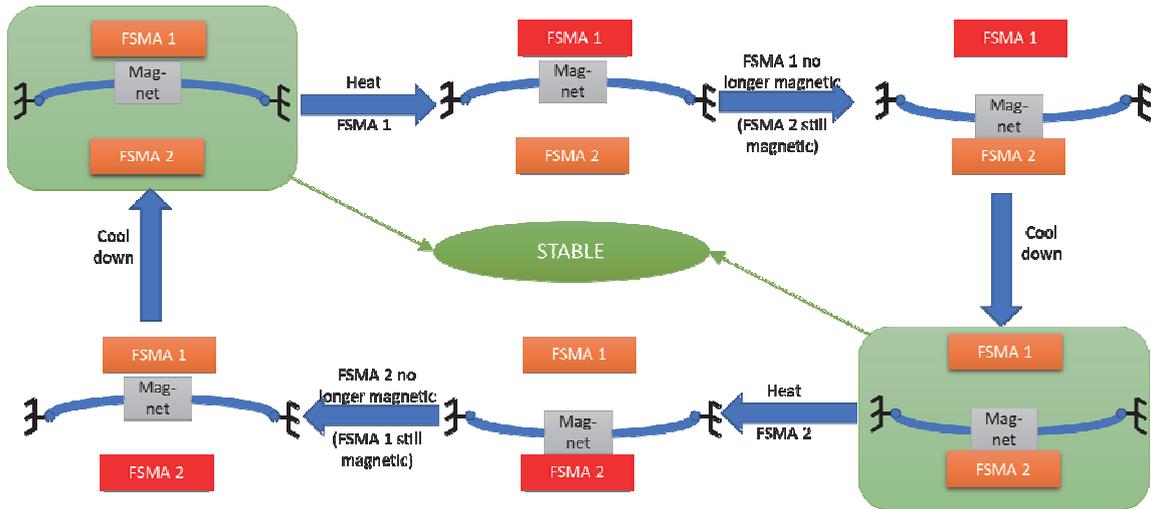


Figure 4. Ferromagnetic alloy-based actuating principles.

<sup>4</sup> M. Gueltig, F. Wendler, H. Ossmer, M. Ohtsuka, H. Miki, T. Takagi and M. Kohl: High-Performance Thermomagnetic Generators Based on Heusler Alloy Films, *Advanced Energy Materials*, Vol. 7 (2017), 1601879.

<sup>5</sup> [https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/Phyterm\\_for%20induction.pdf](https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/Phyterm_for%20induction.pdf)

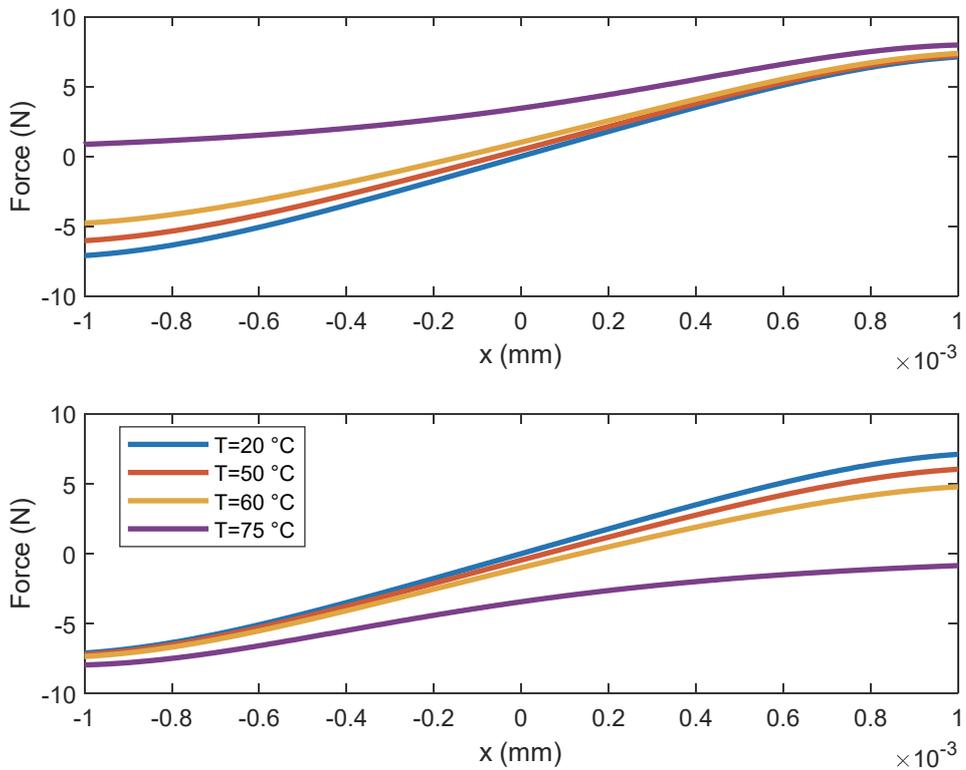


Figure 5. Total force when heating left-side magnetic alloy (top) or right-side magnetic alloy (bottom).  $T_c=60\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n=0.6$ ,  $\mu_{OK}=100\mu_0$ .

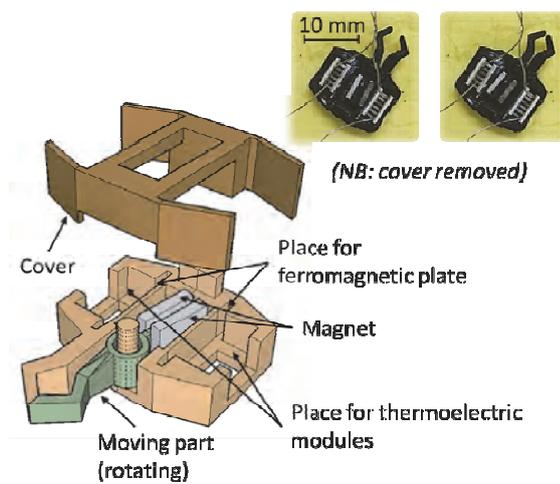


Figure 6. Small-scale gripper using ferromagnetic materials.

The development made in these directions allowed to initiate the **patenting of an**

**electrical protection device** using the properties of the investigated materials. The first application of the patent has been done in mid-2021, and feedback from the patenting office will allow envisioning PCT extension in 2022. As this patenting process is not yet finished, more information will be given in a future report.

Finally, the exposed principles can also be used for **small-scale conveying devices** (Figure 7). In this case, the principles lie in considering an array of Multiphysic Memory Alloys or ferromagnetic materials, potentially placed beneath a moving magnet (in order not to block its movement). For the MPMA case, when the material is heated, its gain in terms of magnetic properties will thus attract the magnet, yielding the movement of the latter. For ferromagnetic implementation, the principle consists in two adjacent materials so that they lose their magnetic properties, so that the magnet gets attracted by the non-heated material close to it (another possibility is cooling down the latter while not heating the former).

#### 4. Summaries and future plans

TATAMI project is a project resolutely addressing **multiphysic coupling**, along with **multiscale analyses** encompassing material, magnetic, thermal, mechanical and electrical aspects and their interfaces (“material and system by design approach”) with studies ranging from **modeling and simulations through experimental investigations and validations**. This **global analysis and systemic methodology** are of prior importance in multiphysic coupling and associated systems, as these coupling yields suboptimal devices when associating parts that are independently optimized. Yet, in addition to this global approach, TATAMI also opens **new understandings and concepts in each addressed field** (e.g., material behavior).

As previously explained, while previous years developed the material aspects and energy harvesting device, this year focused on **actuation systems**. With in minds the small-scale aspect along with energy efficiency, the possibility of playing with the magnetic properties of the considered materials through the temperature allowed the **development of new actuators** such as a microgripper. Most of these actuators share the same principle of a **moving magnet between two MPMAs or ferromagnetic plates**, allowing bistable behavior that permits no energy consumption at rest in any position. Heating can be achieved through resistive element (Joule effect), but thermoelectric

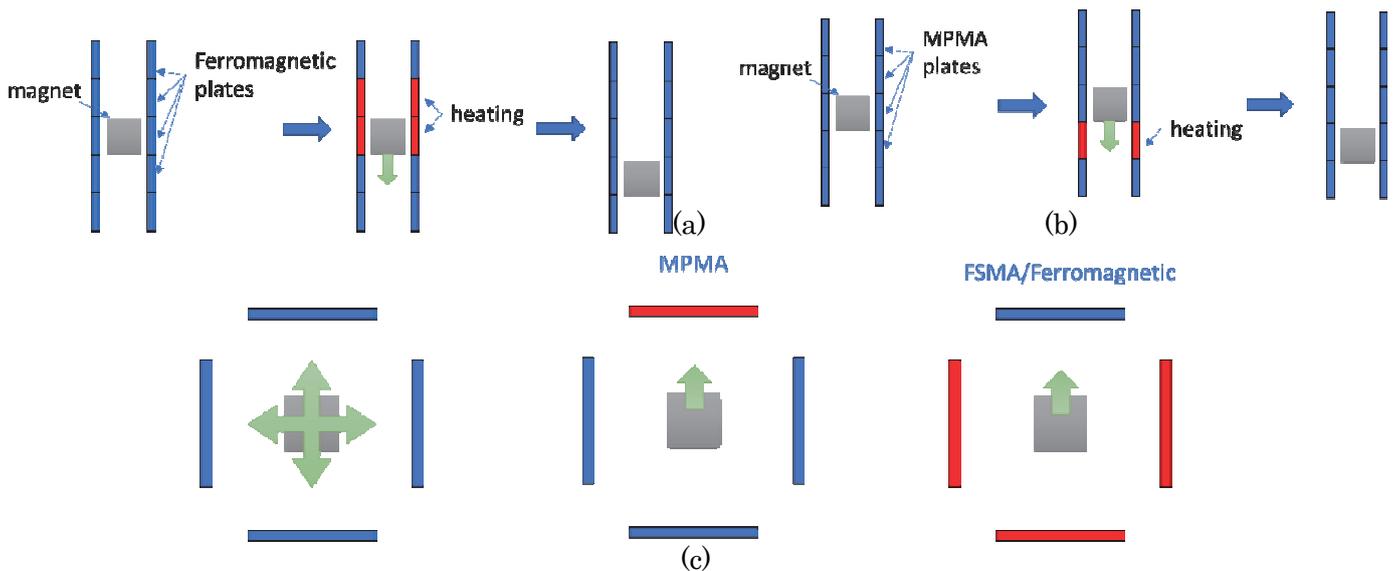


Figure 7. Use of MPMA or ferromagnetic material for 1D or 2D microconveyor: a) FSMA/ferromagnetic implementation; (b) MPMA implementation and (c) 2D extension (NB: magnet can be above or below ferromagnetic/MPMA plates, so that its movement is not limited by them).

coupling can also be taken into consideration as it brings the advantage of potentially cooling the other active material of the device for increasing the performance (e.g., operational frequency).

Current work focuses on the **optimization and transferability** of the developed transducers. In particular, an innovative electrical protection device finding its roots in the exposed concept is under patenting, and further works will aim:

- On the scientific aspect: to finely **model** the behavior of the transducers to reveal the **key parameters to tune the device** characteristics for given specifications.
- On the technical aspect: to develop and optimize a robust **proof-of-concept** design showing the validity of the concept.
- On the applicative aspect: to **foster partnerships with industrial companies** (for instance identified through valorization offices of universities) to ensure a successful technology transfer.

Finally, **electrical interfaces** are still in the process of development, both for the energy harvesting part and for the actuating devices. For the former aspect and assuming the use of pyroelectric element in conjunction with the MPMA of ferromagnetic materials, nonlinear interfaces will be particularly under consideration as they allow a significant increase of the electrothermal coupling<sup>6</sup>. For the actuation part, efficient driving of heating (and potentially cooling) elements, through a fine control of the transient and steady-state heating process, could be an interesting investigation route, as well as ensuring feedback regarding the actuator position.

## 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] M. Lallart, L. Yan, H. Miki, G. Sebald, G. Diguët, M. Ohtsuka and M. Kohl: Heusler Alloy-Based Heat Engine using Pyroelectric Conversion for Small-Scale Thermal Energy Harvesting, *Applied Energy*, Vol. 288 (April 2021), 116617 (13 pages), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116617>
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [2] M. Lallart, H. Miki, L. Yan, G. Sebald, G. Diguët, M. Ohtsuka, M. Kohl, Heat engine based on MultiPhysic Memory Alloys and pyroelectric conversion for thermal energy harvesting, *ELyT Workshop 2021*, online, June 21-25, 2021.
  - [3] M. Lallart, H. Miki, L. Yan, G. Sebald, G. Diguët, M. Ohtsuka and M. Kohl, Heusler Alloy Based Heat Engine with Pyroelectric Energy Conversion, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021)*, Sendai, Japan, October 27-29, 2021.
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent under application at the moment of writing)

---

<sup>6</sup> D. Guyomar, G. Sebald, S. Pruvost, M. Lallart, A. Khodayari and C. Richard: Energy Harvesting From Ambient Vibrations and Heat, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20 (2009), 609-624. DOI: 10.1177/1045389X08096888

Project code	J21Ly04
Classification	LyC Collaborative Research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2021 - March 2022
Project status	3rd year

## Microfluidic Tools to Study Aerotaxis in Eukaryotic Cells

Jean-Paul Rieu\*†, Christophe Anjard\*, Olivier Cochet-Escartin\*, Rémy Fulcrand\*,  
Kenichi Funamoto\*\*††, Satomi Hirose\*\*

\*The Institute of Light and Matter, Claude Bernard University Lyon 1

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

It is well known that eukaryotic cells sense oxygen tension and change their behaviors accordingly either by regulating gene expression as just highlighted by the Nobel Prize in Medicine 2019. It is less known that they can also move to regions of favorable oxygen level (aerotaxis) [M. Deygas, et al. Nat. Comm., 2018]. Using a self-generated hypoxic assay, we showed at iLM that the social amoeba *Dictyostelium* (*Dicty*) displays a spectacular aerotactic behavior. When a cell colony is covered by a coverglass, cells quickly consume the available O<sub>2</sub> and move outward of the hypoxia area, forming a dense expanding ring moving at constant speed. Hence, aerotaxis seems a conserved mechanism in various eukaryotic cells.

The self-generated hypoxic response in our spot assay combined with the easy use of *Dicty* for quantitative biology provides a powerful experimental framework to understand the molecular nature of the O<sub>2</sub> directed migration as well as the detection and sensing mechanisms (sensitivity to a threshold or to a gradient, response time, and cell adaptation). However, to get further insight in the O<sub>2</sub> sensing mechanisms, we need to develop oxygen gradient microfluidic devices to investigate the cell responses to various types of O<sub>2</sub> gradient as functions of gradient steepness and absolute O<sub>2</sub> level. Therefore, we designed a new device to study aerotaxis adapted from Funamoto's microfluidic devices for observations of cancer and endothelial cells [K. Funamoto, et al., Lab Chip, 12 (2012), Integr. Biol., 9 (2017)] during a two-month stay of K. Funamoto and S. Hirose in 2019. *Dicty* cells responded in the 0-2% range of O<sub>2</sub> concentration. This is an extremely low O<sub>2</sub> concentration indicating a very efficient O<sub>2</sub> detection mechanism for those cells. We are trying to understand which proteins are involved in the O<sub>2</sub> detection and response pathways.

### 2. Details of program implement

The project was affected by the COVID situation as JP Rieu could not visit IFS in 2021 (nor in 2020). In particular, we could not achieve the development of a second generation of device to adjust gradients in the O<sub>2</sub> concentration range of 0.1-0.5%. Fortunately, S. Hirose could join Rieu's lab in Lyon from December 2021 for a 6-month stay (JSPS fellowship). We have continued to improve the existing microfluidic device and successfully tested it with *Dicty* parental strains during these two years both in Lyon and Sendai. Since December 2021, we are testing mutant strains of *Dicty* and pharmacological compounds that, we believe, are associated with proteins involved in the O<sub>2</sub> detection and response pathways.

### 3. Achievements

- We published a major paper in “eLIFE” journal in spring 2021 including the ring assay, the microfluidic results, and a model. A complementary more detailed paper focusing on the microfluidic device was published in “Processes” journal in early 2022.
- We tested several mutants of Dicty, and among them, flavohemoglobin (Fh) null mutants seems to show clear defect in aerotaxis. As this protein protects the cell against nitric oxide (NO) damages, we also tested that the release of NO by the chemical SNP has the same effect.

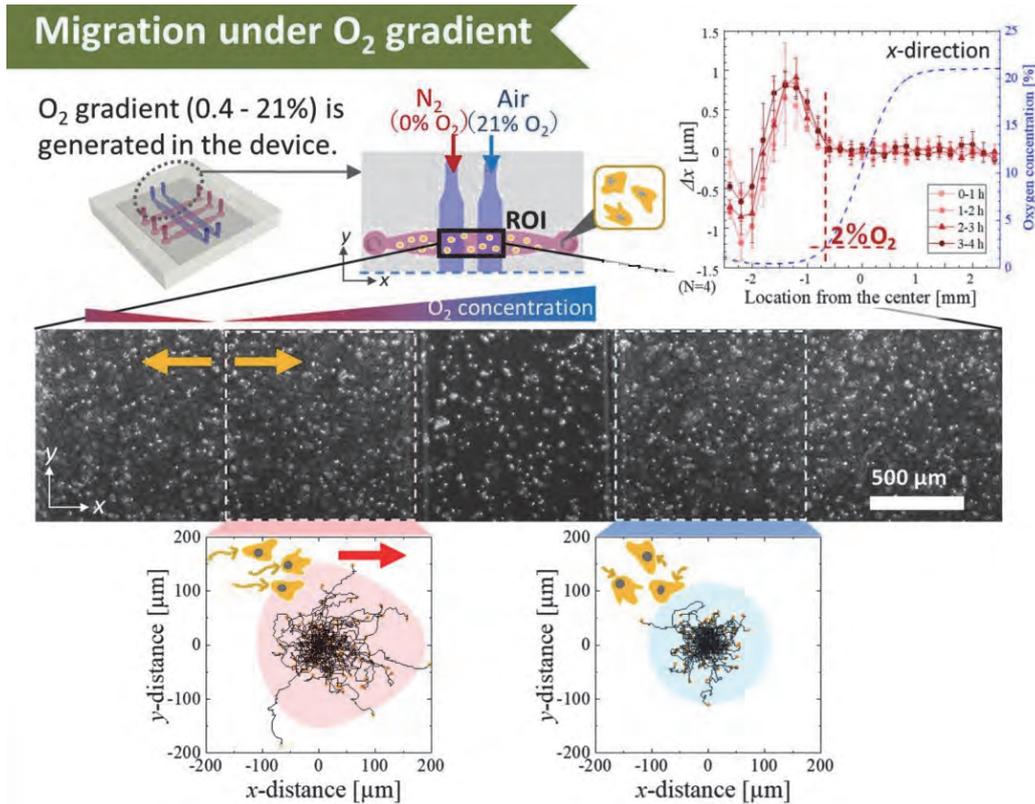


Figure 1: (Top right) Two-layer microfluidic device developed jointly by IFS and iLM generates an O<sub>2</sub> gradient between 0% and 21% in the x-direction with two gas channels (in blue) above three media channels (in pink) with cells inside (in yellow). (Middle) Microscopy images of cells inside the device along the x-direction. (Bottom) Examples of aerotactic cell trajectories in the 0-2% O<sub>2</sub> region (left) and random trajectories in the 10-20% O<sub>2</sub> region (right). (Top right) Averaged cell displacement as a function of the position of x along the gradient.

### 4. Summaries and future plans

We need to confirm the role of Fh and NO in the aerotaxis: NO could just be an inhibitor of aerotaxis (and of aerokinetic, not shown) when not properly degraded by Fh or a secondary gradient. Direct aerotaxis experiments with a NO gradient is envisioned using the very same device. Our preliminary results indicate that Dicty cells become aerotactic when O<sub>2</sub> concentration is lower than 2%. The current device can barely not control the O<sub>2</sub> concentration down to 0.5%. We need hence to work on a second generation of devices or to adjust protocols to control more precisely gradient in the O<sub>2</sub> concentration range of 0.1-0.5%.

## 5. Research results

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

- [1] O. Cochet-Escartin, M. Demircigil, S. Hirose, B. Allais, P. Gonzalo, I. Mikaelian, K. Funamoto, C. Anjard, V. Calvez, and J.-P. Rieu: Hypoxia triggers collective aerotactic migration in *Dictyostelium discoideum*. *eLife*, Vol. 10, (2021), e64731, doi: 10.7554/eLife.64731.
- [2] S. Hirose, J.-P. Rieu, C. Anjard, O. Cochet-Escartin, and K. Funamoto: The Oxygen Gradient in Hypoxic Conditions Enhances and Guides *Dictyostelium discoideum* Migration. *Processes* Vol. 10, No. 2, (2022), 318, doi:10.3390/pr10020318.

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

- [3] S. Hirose, O. Cochet-Escartin, C. Anjard, J.-P. Rieu, and K. Funamoto: Reduced oxygen availability triggers aerotaxis and aerokinesis of *Dictyostelium*. *Proceedings of the LyonSE&N & ELyT Global Workshop 2021*, (2021), pp. 31-32.
- [4] 廣瀬 理美, Jean-Paul Rieu, 船本 健一: 低酸素負荷による細胞性粘菌の運動性増進に関する評価. 日本機械学会第33回バイオエンジニアリング講演会, (2021), 1S1-13.
- [5] O. Cochet-Escartin, M. Demircigil, S. Hirose, V. Calvez, K. Funamoto, C. Anjard, and J.-P. Rieu: Modelling self-organization by oxygen with reaction-diffusion models. *Proceedings of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021)*, (2021), pp. 221-222.
- [6] S. Hirose, J.-P. Rieu, C. Anjard, O. Cochet-Escartin, and K. Funamoto: Oxygen gradient under severe hypoxia changes *Dictyostelium* migration directionality. *Proceedings of the 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021)*, (2021), pp. 487-488.
- [7] S. Hirose, J.-P. Rieu, C. Anjard, O. Cochet-Escartin, H. Kikuchi, and K. Funamoto: Aerotaxis and aerokinesis of *Dictyostelium discoideum* under hypoxic microenvironments. *Proceeding of the 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2021)*, (2021), pp. 1187-1190.
- [8] S. Hirose, J.-P. Rieu, and K. Funamoto: Migration characteristics of *Dictyostelium discoideum* depending on oxygen environment. *Proceedings of the 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (AP Biomech 2021)*, (2021), AB-07.

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

(Patent)

Not applicable

(Award)

Outstanding Abstract Award, "Migration characteristics of *Dictyostelium discoideum* depending on oxygen environment", S. Hirose, J.-P. Rieu, and K. Funamoto, December 4, 2021, The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (AP Biomech 2021)

(Press release)

CNRS Press release, 2021. "Des amibes en mouvement à la recherche 'oxygène'", November 4, 2021.

<https://www.inp.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/des-amibes-en-mouvement-la-recherche-doxygene>

ed  
東北大学プレスリリース, "酸素を求めて動く細胞 細胞性粘菌の酸素に対する集団的な走性を解明", 2021年9月7日.

課題番号	J21Ly05
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	2021.4～2022.3
継続年数	3年目

**混相エネルギーシステムにおける流体－構造体連成コンピューティング**  
**Coupled computing of fluid-structure interaction problems for multiphase energy systems**

石本 淳<sup>†</sup>, Thomas Elguedj<sup>\*\*††</sup>, 松浦 一雄<sup>\*\*\*</sup>, 桑名 一徳<sup>\*\*\*\*</sup>,  
中村 裕二<sup>\*\*\*\*\*</sup>, 松岡 常吉<sup>\*\*\*\*\*</sup>

\*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

<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>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、高压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压水素タンクの設計が必須となる。そこで本研究では、高压水素容器が破壊されたときに付随し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、高压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。高压容器にき裂が発生・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压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すが、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、高压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。

### 3. 研究目標の達成状況

達成度は95%である。高压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、粒子法の一つである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高压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



図1 漏えい水素のき裂伝ばと流速分布 に関する時間発展計算結果

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 (\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)  
なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
  - [1] 佐藤 巧実(東北大院), 石本 淳(東北大流体研), 仲野 是克(東北大流体研), 大島 逸平(東北大流体研), 山田 秀明(日立 Astemo), 佐藤 文和(日立 Astemo), 凝固現象を伴う先端ダイカストプロセスシミュレーション, 第 35 回数値流体力学シンポジウム オーガナイズドセッション (OS1-2 混相流体, 相変化, 反応, 界面), 2021 年 12 月 14 日, オンライン (Zoom ウェビナー会議).
  - [2] J. Ishimoto and T. Elguedj, Coupled Computing of Fluid-Structure Interaction Problems for Multiphase Energy Systems, *OS22: AFI-2021 IFS Lyon Center Collaborative Research Forum, The 18<sup>th</sup> International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021)*, Oct. 28, 2021 [On-line meeting].
- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)  
なし

Project code	J21Ly06
Classification	LyC Collaborative Research
Subject area	Multi-scale mobility of human and materials
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

## Response Characteristics of Cellulose Nanofibril under AC Electric Field

Hidemasa Takana\*†, Florent Dalmas\*\*††  
Jean-Yves Cavaille\*\*

Anthony Dichiara\*\*\*, Heather Wise \*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*INSA Lyon

\*\*\*College of the Environment, University of Washington

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Cellulose nanofibrils (CNFs) with a width of around 4-20 nm and a length of around 1 micro meter have attracted significant attention as a basis for advanced bio-based materials. To fabricate materials such as filaments or films with high mechanical performance from CNFs, it is essential to align the fibrils in the macroscopic structures. It has been demonstrated in the previous study that CNFs can be aligned and assembled into strong filaments using a flow-focusing channel where an elongational flow field is aligning the fibrils in the flow direction.

Takana, et al. of IFS Tohoku Univ. proposed AC electrostatic field in combination with the flow-focusing technique for further control of the CNF alignment. AC electric field is applied upstream of the flow-focusing location aiming at electrostatically control the fibril alignment in the flow. The effect of the applied alternating electric field on the CNF alignment in the flow will be clarified through numerical simulation.

### 2. Details of program implement

To realize the full potential of this method described above, a numerical simulation has been conducted. The effect of the sheath flow inlet angle in the flow-focusing channel on the cellulose filament fabrication was clarified through elucidation of the elongational flow field during the material fabrication.

### 3. Achievements

In this study, the flow-focusing channel geometries with 90 and 45 degrees sheath flow inlet angle are respectively considered. Both channels have 1 mm x 1 mm rectangular cross-section. The channels have a double focusing configuration with introducing first and second sheath flows. The CNF-water dispersion as a core flow is introduced by a syringe pump at  $Q_c = 2.4$  mL/h from the top. Water as the first sheath flow is supplied from the side of the channel to create an elongational flow and HCl solution is injected as the second sheath flow for the sol-gel transition of the CNF dispersion. The distance between the focusing points of the first and second sheath flows is set to 4 mm in both channels. The total flow rate of the first and second sheath flow,  $Q_{S2} + Q_{S1}$  is 19.2 mL/h. The numerical simulation and experiments were conducted with changing the sheath flow rate ratio  $Q_{S2}/Q_{S1}$  with keeping the total flow rate constant.

Figure 1 shows the contour map of the strain rate for  $Q_{S2}/Q_{S1} = 1.67$  on the interface for 90° and 45° inlets, respectively. The shear rate is locally larger around the

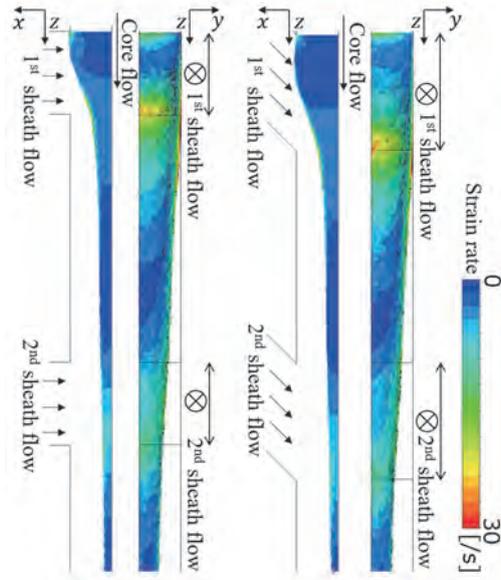


Figure 1 : Contour of strain rate for  $Q_{S2}/Q_{S1} = 1.67$  at the CNF dispersion interface (right) and in the cross section (left) for flow channel with (a)  $90^\circ$  and (b)  $45^\circ$  sheath flow inlet.

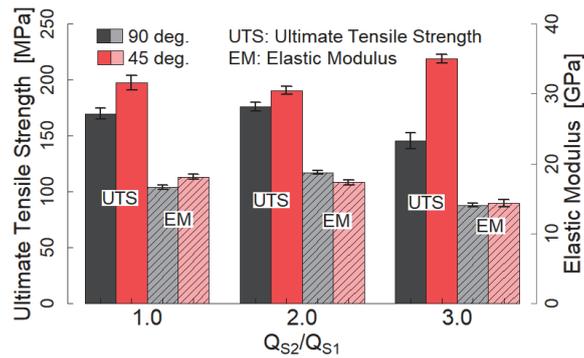


Figure 2 : Effect of flow focusing angle on the ultimate tensile strength and elastic modulus of fabricated cellulose filament at different sheath flow rate ratio.

downstream corner of the first and second sheath flow inlet, which enhances the nano-fibrils alignment by the shear effect. In the case of  $45^\circ$  inlet, strain rate is larger in the vicinity of the first sheath flow inlet position.

Figure 2 shows the averaged ultimate tensile strength and elastic modulus of the fabricated cellulose filaments using flow-focusing channel with  $90^\circ$  and  $45^\circ$  sheath flow inlet, respectively for different sheath flow rate ratios. The fabrication procedure is well described in the previous publications. For all flow rate ratios, higher ultimate tensile strength is obtained for the channel with  $45^\circ$  inlet compared to  $90^\circ$  inlet. Furthermore, in the case of  $45^\circ$  inlet, the ultimate tensile strength increases by 11 % as flow rate ratio increases from 1.0 to 3.0. On the other hand, for  $90^\circ$  inlet, the ultimate tensile strength decreases at  $Q_{S2}/Q_{S1} = 3.0$ . This enhancement in tensile strength can be supported by the numerical simulation results showing larger strain rate along the interface for  $45^\circ$  inlet as shown in Fig.1. There is no clear dependence of channel configuration and flow rate ratio on the elastic modulus of fabricated filament.

#### 4. Summaries and future plans

The effect of sheath flow inlet angle on elongational flow field in the flow-focusing channel was clarified for cellulose filament fabrication from cellulose nano-fibrils. The ultimate tensile strength of the fabricated filament increases with flow rate ratio of the second (downstream) sheath flow to the first sheath flow. In the case of 45° inlet angle of the sheath flow, the ultimate tensile strength increases by 11 % as the flow rate ratio increases from 1.0 to 3.0 with creating larger area of higher shear rate along the interface. The single fiber fabrication with assist of electric field will be conducted under the optimized flow rates using the channel with 45° sheath inlet.

#### 5. Research results

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

- [1] C. Brouzet, N. Mittal, T. Rosén, Y. Takeda, L.D. Söderberg, F. Lundell and H. Takana: Effect of Electric Field on the Hydrodynamic Assembly of Polydisperse and Entangled Fibrillar Suspensions, *Langmuir*, 37 (2021), pp. 8339-8347, doi: 10.1021/acs.langmuir.1c01196.
- [2] 高奈秀匡: 流動場と電場を重畳したナノ繊維配向制御によるセルロース単繊維の高強度・高靱化, エネルギー・化学・プラントの総合技術誌 JETI, 69-4 (2021), pp. 58-61.
- [3] 高奈秀匡: セルロースナノファイバーを原料とするセルロース単繊維の高強度・高靱性化, 油空圧技術, 60-7 (2021), pp. 1-5.
- [4] 野口 徹 監修, 高奈秀匡 他 37 名: ナノカーボン・ナノセルロースの分散・配向制御技術 第 II 編 第 11 章 交流電場と流動場を組み合わせた CNF 配向法, シーエムシー出版, (2021), pp. 242-251, ISBN 978-4-7813-1628-4.
- [5] 薄井拓巳, 高奈秀匡: セルロース分散流中のナノ繊維静電配向に関する数値シミュレーション, 日本機械学会流体工学部門 ニュースレター 2 月号, (2021), [https://www.jsme-fed.org/newsletters/2022\\_2/no4.html](https://www.jsme-fed.org/newsletters/2022_2/no4.html).

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

- [6] H. Takana and S. Fukumori: Effect of Flow-Focusing Channel Geometry on Field-Assisted Alignment of Cellulose Nanofibrils, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), OS22-3, pp. 197-198.
- [7] A. Dichiara, H. Wise and H. Takana: Multifunctional Hybrid Filaments Comprising Aligned Nanocellulose and Carbon Nanotubes Synthesized by a Filed-assisted Flow Focusing Method, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-20, pp. 46-47.
- [8] 福森 賢, 高奈秀匡: フローフォーカシング法におけるナノ繊維静電配向効果に関する実験解析, 日本機械学会 第 99 期流体工学部門講演会論文集, online, (2021), OS08-09.
- [9] 薄井拓巳, 高奈秀匡: セルロース分散流中のナノ繊維静電配向に関する数値シミュレーション, 日本機械学会 第 99 期流体工学部門講演会論文集, online, (2021), OS08-10.

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

(Patent) なし

(Award) Award, presentation titles, name or group, date of awarded, organizer of award.

- [1] 2020 年度日本混相流学会技術賞, 「交流電場および伸長流動場を用いた分散性ナノ繊維配向制御技術の開発」, 日本混相流学会, 2021 年 8 月 25 日.
- [2] 優秀講演表彰, 「セルロース分散流中のナノ繊維静電配向に関する数値シミュレーション」, 日本機械学会 第 99 期流体工学部門講演会, 2021 年 11 月 9 日.

(Press release) なし

課題番号	J21Ly07
区分	リオ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	2021.4～2022.3
継続年数	1年目（発展）

### 生物物質と相互作用する原形質流動の数値シミュレーション

### Numerical Simulations of Protoplasmic Streaming Interacting with Biological Materials

野呂 秀太\*†, 内一 哲哉\*\*††, Rieu Jean-Paul\*\*\*

鯉淵 弘資\*, 永弘 進一郎\*, 井海 寿俊\*, 本郷 哲\*, 中山 まどか\*

\*仙台高等専門学校, \*\*東北大学流体科学研究所, \*\*\*リオン大学

†申請者, ††所内対応教員

#### 1. 研究目的

原形質流動（図1）の速度分布に2つのピークがあるという実験結果が報告されている。最近に、申請者らは、このピークを定性的にはあるが数値的に再現することができることを報告した[V.Egorov et.al. Phys. Fluids, <https://doi.org/10.1063/5.0019225>]. それは、流体分子がブラウン運動すると仮定し、この運動を Langevin 方程式によってシミュレートする方法によるものである。しかし、その方程式には生物物質と流体の相互作用の影響は取り込まれていない。一方、実際の速度分布は、その影響を多かれ少なかれ受けたものであると予想できる。そこで、本研究では、この速度分布のピークの位置が生物物質との相互作用にどのような影響を受けているのかを明らかにする。

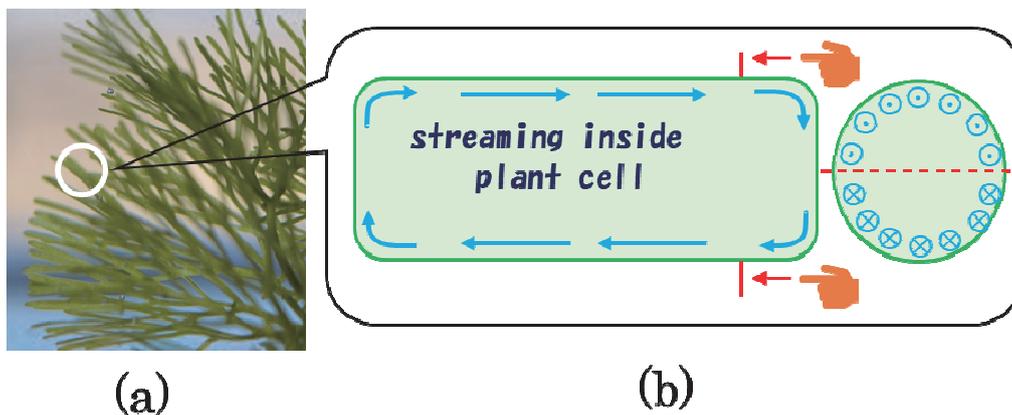


図1：(a) 水中植物の写真，(b) その細胞内流れの模式図

#### 2. 研究成果の内容

初めに昨年度に行った2次元の Brown 揺動力を仮定した Langevin-Navier-Stokes (LNS) 方程式の数値計算を今年度は3次元化して行うこととした。3次元では、渦度と流れ関数による NS 方程式ではなく、速度と圧力による NS 方程式を用いる必要がある。このため、初めに、2次元で速度と圧力による LNS 方程式、次に3次元の速度と圧力による LNS 方程式を数値計算した。

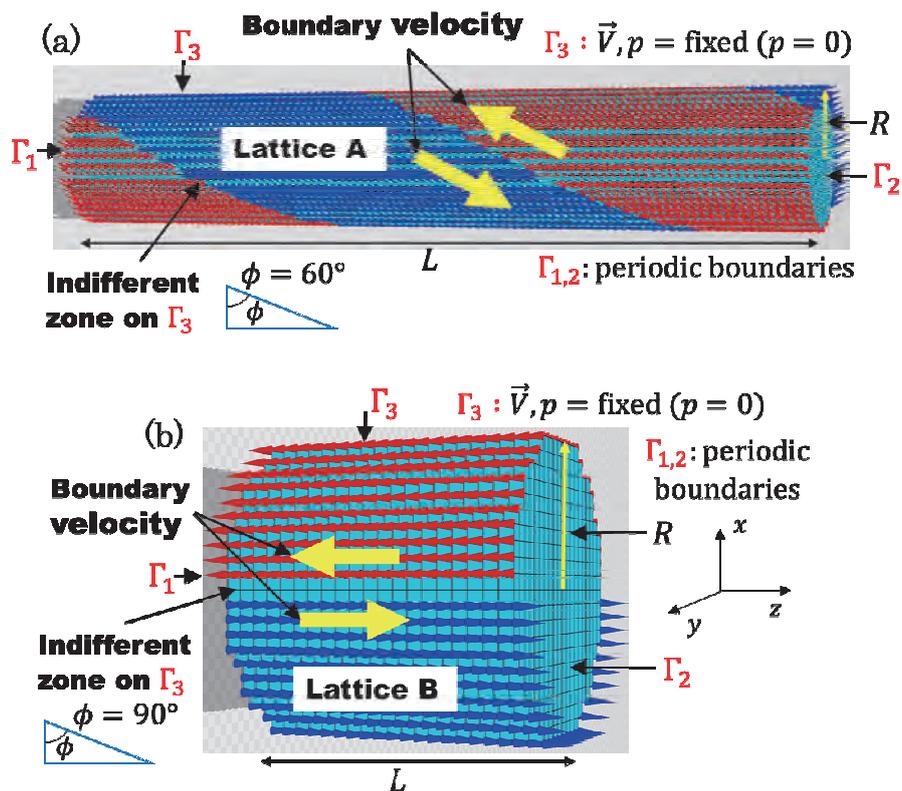


図2：速度分布における2つのピークとそのブラウン揺動力  $D_{sim}$  依存性

ここでは3次元の結果のみ報告する．3次元では，実際の原形質流動にみられる表面における傾いた流れ(図 2(a):Lattice A)をシミュレートできる．この傾きの影響を調べるため，図 2(b):Lattice Bのような傾きがない場合も同時に計算し結果を比較する．図 3には，lattice Aのある断面で得られた速度と圧力の snapshot を示す．ブラウン揺動力  $D$  が大きくなると，流れが乱れて渦が発生しているのが分かる．

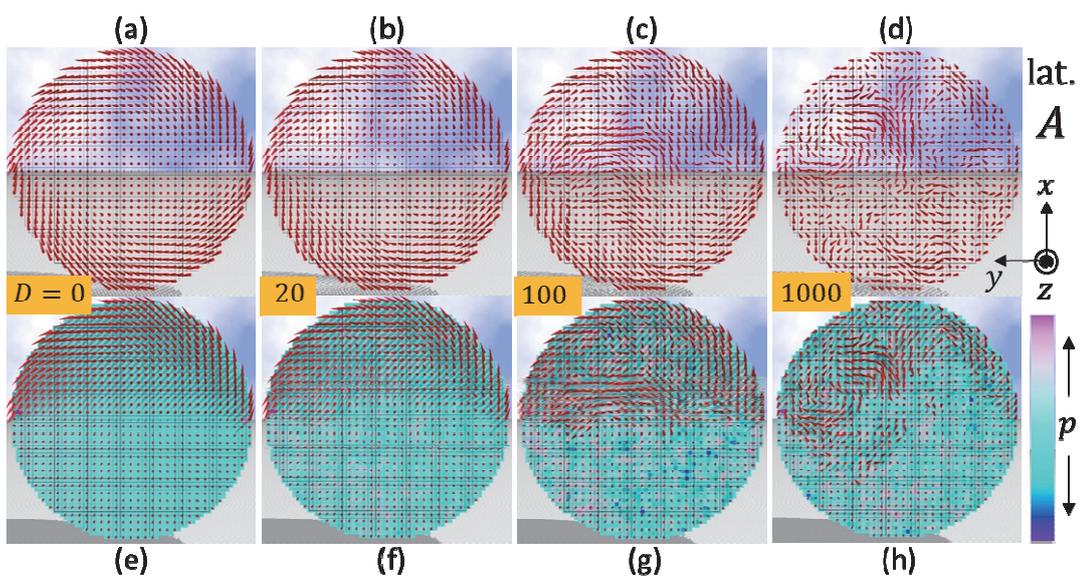


図3：Lattice Aによる計算結果：円筒断面の速度と圧力のブラウン揺動力  $D$  依存性

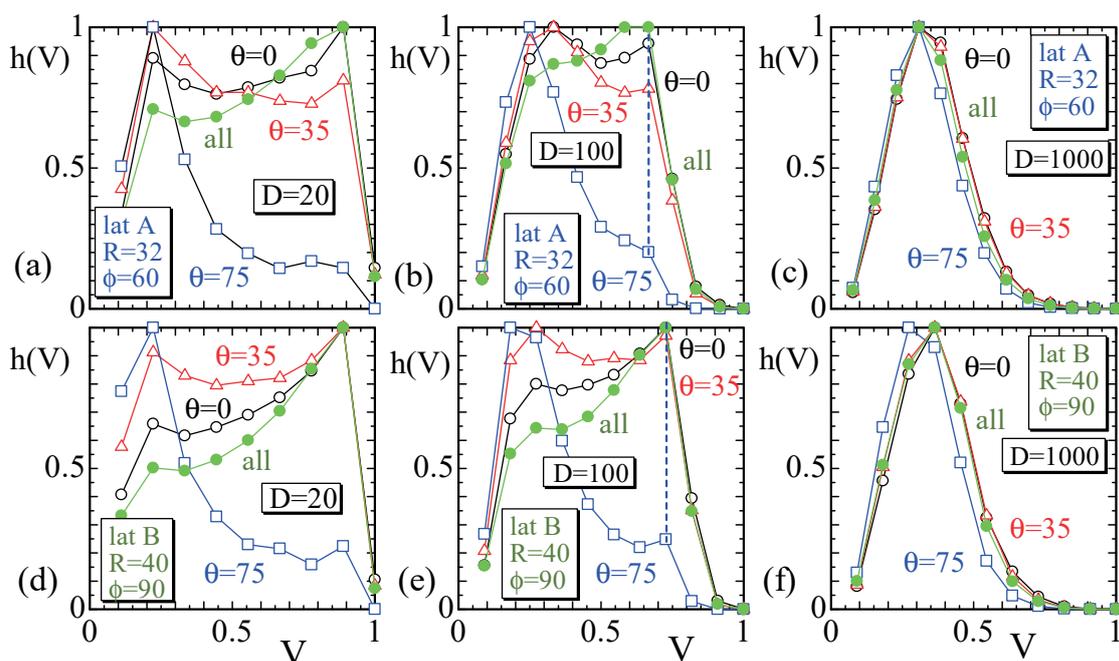


図4: Lattice A による計算結果: 円筒断面の速度と圧力のブラウン揺動力  $D$  依存性

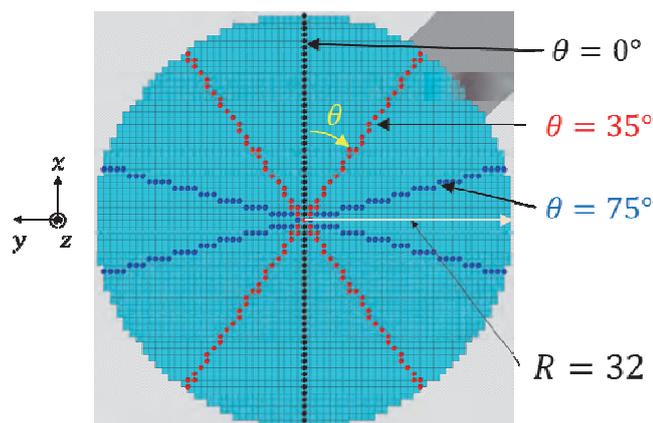


図5: Lattice A の速度を計算する格子点: 3種類の角度で速度を計算する

図4(a)-(f)にはその Lattice A の断面(図5)で計算した速度の大きさ  $V$  の分布  $h(V)$  を示す。図5の断面の点線上で速度を計算している。 $V$  も  $h(V)$  も規格化してある。図4の結果からは、ブラウン揺動力  $D$  が  $D=20$ ,  $D=100$  の場合、 $h(V)$  に2つのピークがあることが分かる。これは実験結果、および2次元の計算結果と consistent である。 $D=1000$  の場合にピークが一つになるのは、ブラウン運動が支配的になるためである。図4の緑色(●)のデータは、図5に示した3種類の角度で計算したデータの平均値である。このデータは断面上の速度測定の分解能が高くなくとも速度の分布のピークが現われることを意味する。

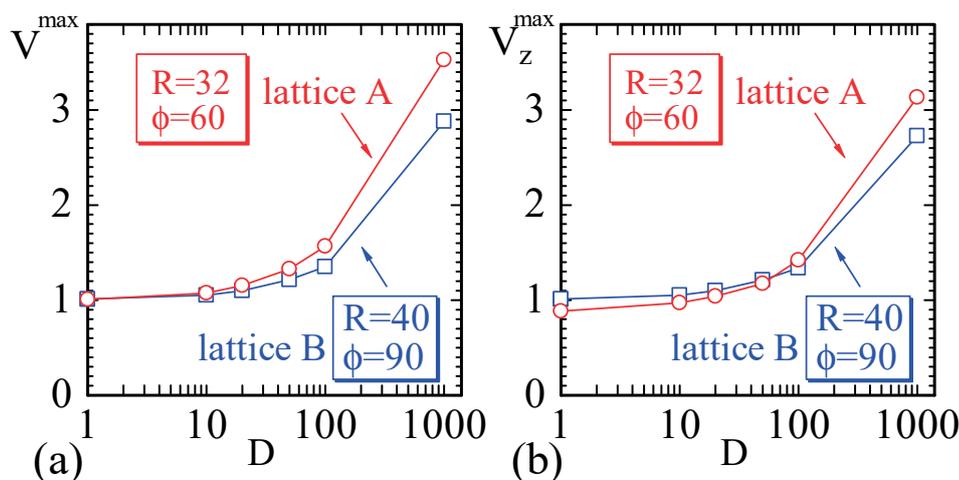


図6：速度  $V$  と  $z$  方向速度  $V_z$  の最大値のブラウン揺動力  $D$  依存性。  $D$  が大きくなると Lattice A の速度が Lattice B の速度より大きくなるのは、細胞表面の速度が傾いて動くためである。その結果として生体物質の混合が促進されると期待できる。

これらの速度の最大値を見るために、横軸をブラウン揺動力  $D$  として速度の大きさ  $V$  と  $z$  方向成分  $V_z$  のそれぞれの最大値を図 6(a),(b) にプロットする。どちらの場合も、  $D$  がある値より大きくなると、 Lattice A の結果が Lattice B の結果よりも大きくなる。このことは、細胞表面のミヨシン分子の運動方向は、 Lattice A のように傾いている(図 2(a))ことで、流体により大きな速度をもたらすことを意味する。細胞表面の傾きを持った運動は内部の物質の攪拌に有効ということが示唆される。

### 3. 研究目標の達成状況

今年度は昨年度に引き続いて原形質流動の流動場を、ブラウン揺動力を仮定した Langevin-Navier-Stokes (LNS) 方程式の数値計算により研究した。非圧縮性流体であることから、流量保存  $\text{div } \mathbf{V}=0$  が方程式に入っているため、数値計算では  $\text{div } \mathbf{V}=0$  の取り扱いに注意する必要がある。そこで、よく知られている数値的方法として Marker And Cell (MAC) 法と Simplified MAC (SMAC) 法を試みた (SMAC 法は現在も進行中)。2次元では staggered 格子を用いている。MAC 法では  $\text{div } \mathbf{V}=0$  が必ずしも満たされないが物理的意味が分かりやすい。一方、SMAC 法は  $\text{div } \mathbf{V}=0$  が満たされるが物理的意味が MAC 法より複雑になる。現在までの計算で、両者の結果は2次元も3次元も、原形質流動の範囲では、ほぼ同じになることが分かってきた。上記の3次元の結果は MAC 法の結果である (が SMAC 法の結果も同じ)。

### 4. まとめと今後の課題

当初の目的は、生体物質との相互作用の影響を調べることであったが、今年度は3次元のシミュレーションを実行した。SMAC の計算結果からは、(現在も進行中であるが)  $\text{div } \mathbf{V}=0$  の条件を満たすように速度場を求めても、速度分布や最大速度は  $\text{div } \mathbf{V}=0$  が完全には満たされない MAC 法の結果と変わらないという結果が得られそうである。これらの3次元計算をとおして、植物細胞表面でミヨシン分子がなぜ軸方向に対して傾いて動くのかという理由として、「混合促進に Brown 運動を利用するために傾いて動く」という説明を見出すことができた。これは当初の目標と同等な達成状況と考えている。これらの結果は現在論文文化を進めている。当初の目標：速度分

布のピークの位置が生体物質との相互作用にどのような影響を受けるか、は今後の課題として残っている。

## 5. 研究成果

### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Shuta Noro, Hiroshi Koibuchi, Satoshi Hongo, Shinichiro Nagahiro, Hisatoshi Ikai, Madoka Nakayama, Tetsuya Uchimoto and Jean-Paul Rieu: Langevin Navier-Stokes simulation of protoplasmic streaming by 2D MAC method, <http://arxiv.org/abs/2112.10901> (査読無)

[2] Shuta Noro, Hiroshi Koibuchi, Satoshi Hongo, Shinichiro Nagahiro, Hisatoshi Ikai, Madoka Nakayama, Tetsuya Uchimoto and Jean-Paul Rieu: Langevin and Navier-Stokes Simulations of 3D Protoplasmic Streaming and a Nontrivial Effect of Boundary Fluid Circulation, <http://arxiv.org/abs/2112.13460> (査読無)

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

なし

### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J21Ly08
Classification	LyC Collaborative Research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year (progressing)

## Numerical modeling of the particle temperature evolution during the cold spray process

Chrystelle Bernard\*†, Hidemasa Takana\*\*††

Olivier Lame\*\*\*, Kazuhiro Ogawa\*\*\*\*, Jean-Yves Cavallé\*\*\*\*\*

\*Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University, Japan

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

\*\*\*MATEIS, INSA de Lyon, Université de Lyon, France

\*\*\*\* Fracture and Reliability Research Institute, Tohoku University, Japan

\*\*\*\*\*ELyTMaX UMI 3757, CNRS — Université de Lyon — Tohoku University,

International Joint Unit, Tohoku University, Japan

†Applicant, ††IFS responsible member

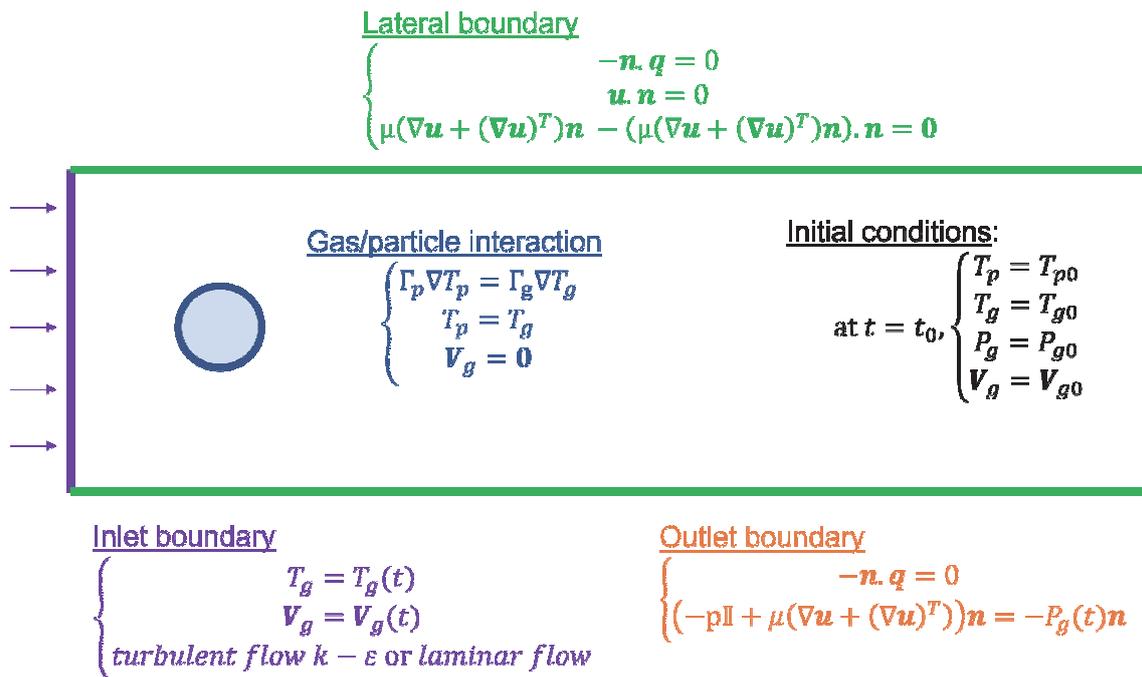
### 1. Purpose of the project

During the cold spray process, particles are accelerated through a DeLaval nozzle before impacting a substrate. During the process, particles are submitted to the surrounding gas resulting in an increase in their temperature. Knowing the particle temperature allows having better insight into the particle deformation during impact. Unlike metallic particles, whose temperature is relatively homogenous, polymer particles exhibit a non-negligible temperature gradient. As polymers are highly sensitive to temperature and strain rate, the first step in understanding their impact behavior starts with clarifying their thermal history during the flight.

### 2. Details of program implement

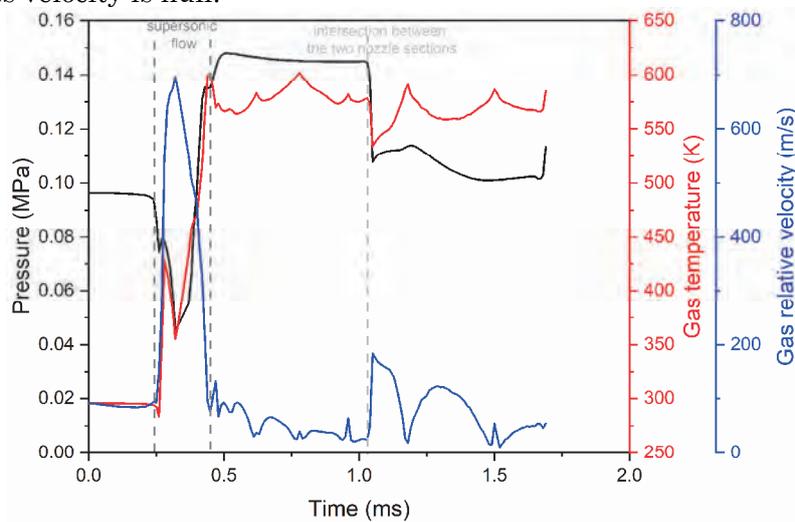
In our previous research (paper accepted in April 2022 to the *Journal of Thermal Spray Technology*), we investigated the particle history inside the cold spray nozzle. Computational Fluid Dynamics simulations (CFD) have been used to assess the fluid dynamics and the evolution of the particle temperature and velocity during the flight. However, if the particle velocity can be compared to experimental data, it is rather difficult to measure the temperature of micrometer-sized particles projected at more than  $150 \text{ m s}^{-1}$ . During the CFD simulations, the particles are considered as discrete elements. Thus, no consideration of the particle volume is made despite the existence of a thermal gradient, as stated in our previous research (Bernard et al., *Journal of Material Processing Technology*, 2020). Therefore, the particle temperature obtained from the CFD calculations is merely the average particle temperature.

To obtain an accurate map of the particle temperature distribution during the cold spray process, multiphysics simulations, considering both fluid dynamics and heat transfer, are a prerequisite. Using COMSOL Multiphysics, the model illustrated in Figure 1 was developed. The boundary conditions for the gas temperature, pressure, and relative velocity are based on our previous calculations. Different particle sizes are under investigation. However, for the purpose of this report, only one particle size will be discussed.



**Figure 1: 3D model and boundary conditions used for simulating the gas dynamics around the particle and the particle thermal gradient.**

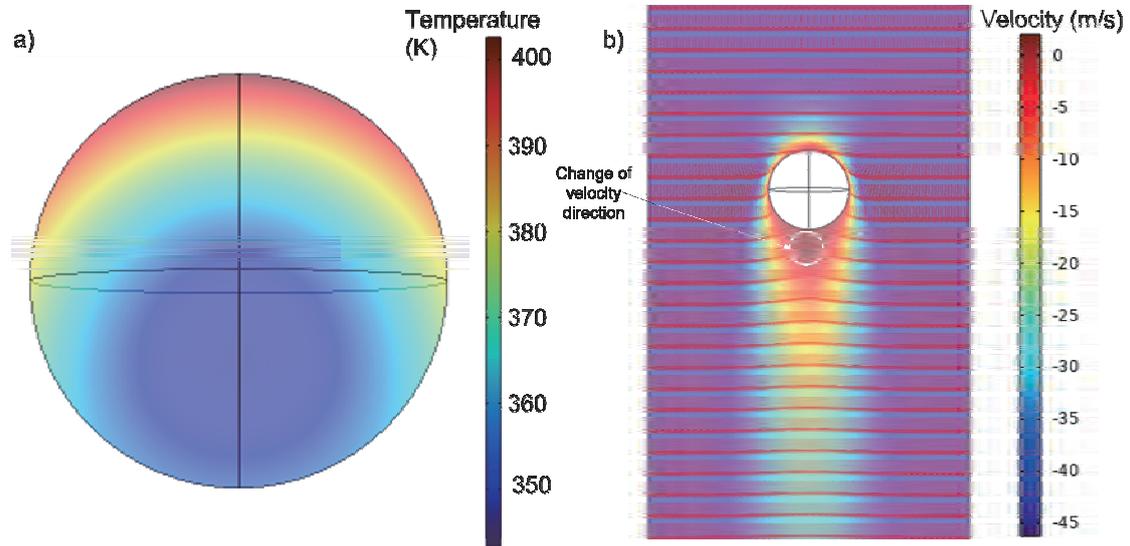
The time evolution of the gas temperature ( $T_g$ ), gas pressure ( $P_g$ ), and gas relative velocity ( $V_g$ ) are illustrated in Figure 2 for a 60  $\mu\text{m}$  particle. Initially, the particle is at 300 K, and its velocity is null.



**Figure 2: Boundary conditions. Time evolution of the gas temperature, pressure, and relative velocity for a 60  $\mu\text{m}$  particle. These boundary conditions come directly from the CFD simulations.**

During its flight, the particle is influenced by the gas behavior and experiences its temperature increase, as shown in Figure 3a. Besides, change of the velocity direction behind the particle appears (see Figure 3b), which could be explained by the apparition of small vortices. It is expected that the fluid regime evolves during the particle's flight due to velocity differences. Thus, at 700 m/s large vortices appear in behind the particle. In addition, it is important to note that the particle is here considered spherical, which is an ideal case of the polymer particle geometry. In reality, the polymer powder exhibits

a more random shape. Thus, the particle will more likely rotate to minimize the viscous drag during its flight, which is not and will not be included in the model. The temperature gradient observed in the particle (see Figure 3a) leads to a gradient of mechanical properties determinant to understand the particle deformation behavior upon impact.



**Figure 3:** a) Temperature and b) velocity maps of 60  $\mu\text{m}$  particle before its impact on the substrate. These results were obtained at the final time (1.68 ms).

### 3. Achievements

During the past year, we wrote a paper on the previous year's project regarding the influence of the pipe's inner shape on the particle history and its probability of rebounding inside the cold spray nozzle. The paper has been accepted for publication in the *Journal of Thermal Spray Technology* in April 2022. Therefore, it will be listed in next year's achievement list.

Also, after several difficulties, we successfully managed for our simulation to work as we expected. After validating the temperature distribution for given particle size, several other particle sizes were planned to be investigated. The calculations are currently running for several other particle sizes. A paper relating to the particle thermal gradient is being written.

### 4. Summaries and future plans

During the cold spray process, even though the flight duration is short, polymer particles are submitted to an important thermal gradient that could easily reach 80 K for 60  $\mu\text{m}$  particle. Such a finding is to put in perspective of the low thermal conduction of polymer material and the high strain rate and temperature dependence of their mechanical behavior.

### 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, G. Diguët, O. Lame, J.-Y. Cavallé, K. Ogawa, In-flight thermal gradient of polymer particles during cold-spray process, *Proceedings of the*

*Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, October 2021

- [2] **C. A. Bernard**, H. Takana, O. Lame, K. Ogawa, J.-Y. Cavallé, Nozzle design for polymer coating by cold spray process, *ELyT Workshop 2021*, online, June 2021

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

Project code	J21Ly09
Classification	LyC Collaborative Research
Subject area	Multi-scale mobility of human and materials
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

## Multiscale simulation of carbon electromigration in iron

Kairi Kita\*, Patrice Chantrenne\*\*††

Takashi Tokumasu\*\*\*†

\*Graduate School of Engineering, Tohoku University

\*\*LAMCOS, INSA-Lyon

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

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Electromigration is an electric field induced mass transfer in solids. To describe this phenomenon, the model considers that each specie has an equivalent electric charge. This project has two main objectives: determine the physical phenomena that lead to this equivalent electric charge in order to simulate electromigration at the atomic scale.

### 2. Details of program implement

In this study, the EAM (Embedded Atom Method) potential was used as the intermolecular force. The EAM potential is the potential used when reproducing a metal crystal. The electric field strength was kept constant and the temperature was changed. In order to analyze the electric field dependence, the temperature was kept constant and the electric field strength was changed. It was applied in the x-axis direction. Fig.1

In the particles of the initial structure shown in Fig. 1, red represents iron atoms and yellow represents carbon atoms. As shown in the figure, 4000 iron atoms in the body-centered cubic lattice are arranged, and one carbon atom is arranged in the structure. As the analysis contents, the displacement of carbon in the direction of the electric field with respect to time, each temperature, and the velocity with respect to each electric field strength were investigated for both electric field dependence and temperature dependence. The result is shown in Fig. 2.

Regarding the electric field dependence, it was found that the displacement of carbon becomes linear when the electric field strength is constant. This indicates that the velocity of carbon is constant, and there is no change in the kinetic energy of carbon. It can be seen that this suggests that the energy received from the electric field due to collision etc. is transferred to the crystal lattice of iron. It can be seen that the velocity increases linearly as the electric field strength increases.

Regarding the temperature dependence, it was found that the displacement increases as the temperature rises. This is because the energy of the carbon atom increases as the temperature rises, and it becomes easier to overcome the energy barrier of the potential. It is also possible. It was also found that the velocity increases linearly as the temperature rises. By using this gradient, carbon transfer by an electric field at a low temperature close to the actual system is obtained from the calculation results at a high temperature. You can predict the speed.

### 3. Achievements

In this study, we clarified the dependence of temperature and electric field on the migration of carbon atom and the aim in this year is achieved.

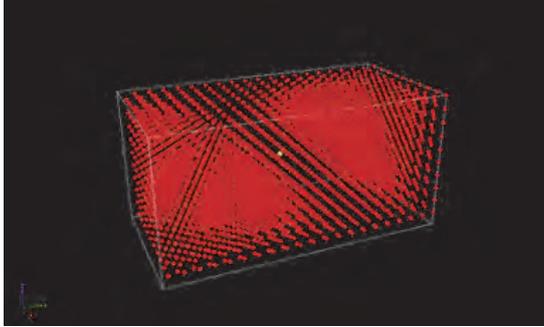


Fig. 1: Initial Structure

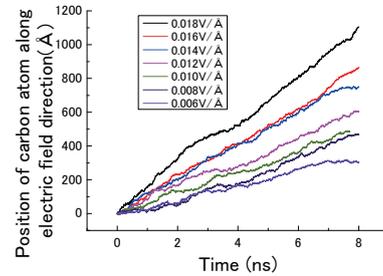


Fig. 2: The position of carbon atom versus the time at different E

### 4. Summaries and future plans

Next year we will make a simulation system which includes multiple carbon atom and we will analyze the dependence of carbon concentration on the diffusivity of carbon. Moreover, we will simulate the phase change of iron including carbon atoms.

### 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. Kita, T. Mabuchi, S. Molina-Montoya, C. Adessi, P. Chantrenne and T. Tokumasu: Multiscale Simulation of Carbon Electromigration in Iron, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Online, (2021).
  - [2] 北快理, 馬渕拓哉, Patrice Chantrenne, 徳増崇: 電場下における金属結晶内部の炭素拡散に関する分子論的解析, 日本機械学会 2021 年度年次大会, Online, (2021).
- 3) Patent, award, press release etc.
  - (Patent) Not applicable
  - (Award) Not applicable
  - (Press release) Not applicable

課題番号	J21Ly10
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	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

### 回転二重円すい間に発生するテイラー渦の安定性と乱流遷移

#### Stability and Transition to Turbulence of Taylor Vortex in a Gap between Rotating Two Cones

足立 高弘\*†, 小宮 敦樹\*\*††, ウィディアスト トシハル\*, 秋永加奈\*,  
ダニエル ヘンリー\*\*\*, バレリー ボットン\*\*\*

\*秋田大学工学部/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、円筒長さと同径の比で表されるアスペクトを無限大(円筒が無制限)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。そこで、本研究では二重円すい間内の渦形態が遷移する条件を解明するために、実験と数値解析を用いて安定性解析を行い、流れが遷移する臨界点とその後の遷移現象を分岐理論を用いて明らかにすることを目的とする。

## 2. 研究成果の内容

側壁が傾斜した場合の同心二重円すい形状の場合について、スペクトル・エレメント法を用いた非線形平衡解の計算を行った。図1は、サドル・ノード分岐が生じる場合の分岐ダイアグラムを内外円筒半径比  $\Gamma$  とレイノルズ数  $Re$  を用いて示したものである。また、側壁の傾

斜角度を $\phi$ としている。 $\Gamma=3.7$ の場合には、側壁が傾斜した場合にも分岐の構造は維持されて、サドル・ノード分岐の構造が保たれる。一方、 $\Gamma=4.0$ の場合には、側壁が傾斜することにより、分岐構造がくずれてサドル・ノード分岐が維持されないことが明らかとなった。

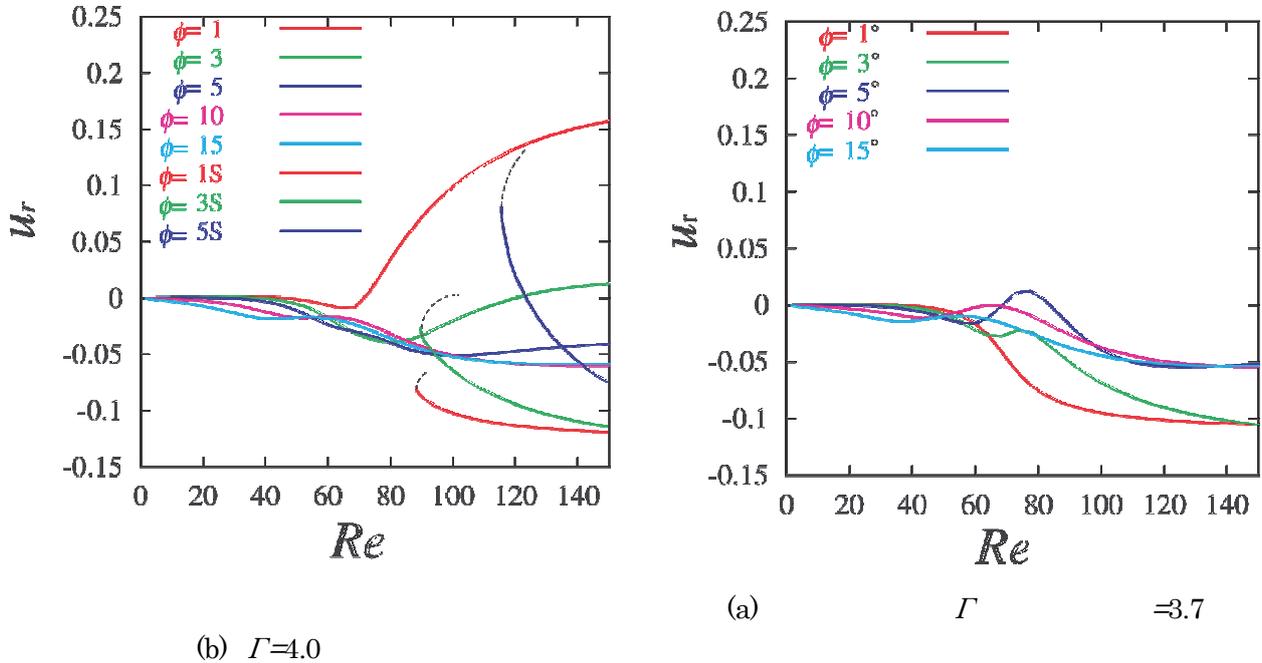


図1：側壁が傾斜した場合の内外円筒半径比 $\Gamma$ とレイノルズ数 $Re$ による分岐ダイアグラム

### 3. 研究目標の達成状況

円筒形状流路から側壁が傾斜する円すい形状の流路を取り扱う段階へと移行した。内外円筒半径比の違いにより、分岐の構造が円筒の場合と比べ大きく変化することが明らかになった。これは、昨年度の段階では考え難い結果であり、研究目標の達成に向けさらに計算を進める必要があることを示唆している。

### 4. まとめと今後の課題

側壁が傾斜を持つ同心二重円筒間に発生するテイラー渦の遷移について、非線形平衡解を求めることで、アスペクト比の異なるいくつかの流路形状の変更に対して大域的な分岐ダイアグラムを求めることができた。傾斜のある場合には、内外円筒半径比の違いにより、分岐の構造が大きく異なることから、最終的な分岐構造の解明という目標までの道程はかなり遠いものと思われる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 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. Adachi, W. Toshiharu, K. Akinaga, A. Komiya, D. Henry, V. Botton: Stability and Transition to Turbulence of Taylor Vortex in a Gap between Rotating Two Cones, *Proceedings of the 21th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021)

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J21Ly11
Classification	LyC Collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

### MAGIC: Magnetic Aging in ferromagnetic

Benjamin Ducharne\*†, Laurent Morel\*\*  
 Marie-Ange Raulet\*\*, Rania Saoudi\*\*, Tetsuya Uchimoto\*\*\*††  
 \*ELyTMaX

UMI 3757, CNRS – Université de Lyon – Tohoku University, International Joint Unit,  
 Tohoku University, Sendai, Japan.

\*\* Laboratoire Ampère

Université de Lyon, 69621 Villeurbanne, France

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

†Applicant, ††IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

Compact magnetic circuits are promoted in the design of new aircraft. However, compactness and proximity mean higher working temperatures and mechanical stresses resulting in undesired aging behaviors. These low magnetic dynamic phenomena are complex to observe and consequently weakly analyzed. In this project, we develop alternative characterization methods. Combined with simulation results, we improve the observation of magnetic aging in modern soft ferromagnets (mostly nanocrystalline materials).

#### 2. Details of program implement

The electrification of modern transportation is a source of intense research. The objective is to improve the versatility and the energy conversion. Electrification needs magnetic supports. The magnetic circuits have to be compacted and of reduced losses. Reducing the volumes triggers variations of the working conditions (higher temperatures and mechanical stresses) and low-frequency degradations of the magnetic properties.

The aging of modern soft ferromagnetic materials is a contemporary investigation challenge. Different ways can be followed, according to the nature of the magnetic material (polycrystalline, nanocrystalline, amorphous, ferrites, etc.).

Relatively Few papers are found to be [1][2] dedicated to the aging of FeCuNbSiB nanocrystalline materials. The main magnetic property that finds interest in these two references is permeability, which can be expressed with a logarithmic predictive law. It is noticed that the permeability decreases with aging, whatever the annealing type is (without or with a transverse magnetic field annealing). According to reference [2], the reason relates to the induction of local anisotropy energy during aging. The latter is introduced in each magnetic domain due to a short-range atomic diffusion.

In 1988, Yoshizawa and his team discovered a new iron-based alloy presenting very soft magnetic properties [3]. It is the oldest alloy of the Finemet nanocrystalline family, having a composition of  $\text{Fe}_{\text{Balance}}\text{Cu}_{0.5-1}\text{Nb}_{2-3}\text{Si}_{12-16}\text{B}_{6-9}$ . It was cast as an initially amorphous ribbon transformed to the nanocrystalline state by a subsequent annealing treatment in the temperature range of 500–600 °C for around one hour.

The nanocrystalline alloys consist of a crystalline phase in the form of nano-grains (10–15 nm) distributed homogeneously in the rest of the amorphous structure (1–2 nm

of amorphous separation of nano-grains). The 70% of the crystalline phase is very poor of Si. The formation of such a structure with grain size around 10–15 nm requires a high nucleation rate and a slow growth rate of the grains. The nanocrystalline alloys with the composition of Fe<sub>73.5</sub>Cu<sub>1</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>15.5</sub>B<sub>7</sub> owe their nanocrystallization to the 1 at.% Cu and 3 at.% Nb playing, respectively, the role of nucleation and controlling the grain size [4][5]. Applying the annealing (500–600 °C, one hour) without an external magnetic field allows to obtain nanocrystalline alloys with high DC (direct current) permeability ranged between 500 000 and 10<sup>6</sup>. But this permeability can be reduced in a controlled way to amplitudes of 10<sup>4</sup>, 10<sup>3</sup>, and even 10<sup>2</sup>. Such a wide range of permeability is possible due to the annealing steps: annealing under transversal magnetic field and annealing under mechanical stress [6][7]. In this project, we are developing alternative characterization methods (Magnetic Barkhausen Noise (MBN), Magnetic Incremental Permeability (MIP)). Combined with simulation development and results, we improve the observation and understanding of magnetic aging in nanocrystalline materials.

In Ampère laboratory in France, L. Morel and M.A. Raulet (Ampère) have been testing aged ferromagnets by plotting their hysteresis cycles [8][9]. Different indicators have been observed, including the hysteresis area, remanence, coercivity, and permeability.

At the same time, at Tohoku University and in ELYTMAX in Japan, alternative characterization methods, including the Magnetic Incremental Permeability (MIP) or the Magnetic Barkhausen Noise (MBN), have been developed. These characterization methods provide alternative information on the magnetization processes. The idea is to isolate the magnetization mechanisms. These mechanisms can be regrouped into 5 categories

- the magnetic domain wall bulging (in the low amplitude range [8][9]),
- the domain wall irreversible motions (in the middle amplitude range),
- the magnetization rotation (in the high amplitude range),
- the domain wall frequency dependence, ripples, and avalanches phenomena [10],
- the macroscopic eddy currents (Skin effect [11]).

The domain wall bulging is well observed with MIP. Similarly, irreversible motion can be characterized by MBN. They are complementary to the standard B(H) hysteresis cycles and to the limited permeability observation.

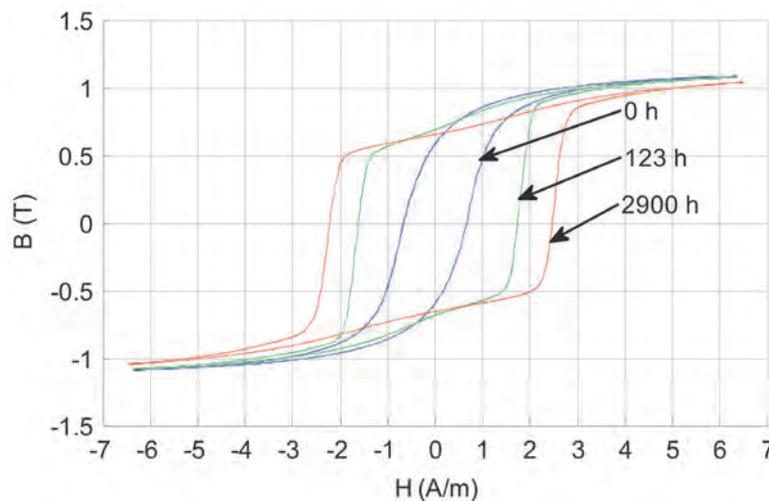


Fig. 1 Quasi-static hysteresis loops of a high permeability Finemet nanocrystalline core measured at 1 Hz for different aging times (extract from [12]).

- [1] C. Martin, R. Robutel, C. Buttay, F. Sixdenier, *IMAPS International Conference on HITEC*, Albuquerque, 2012, 6-12.
- [2] T. Waeckerlé, A. Demier, S. Camus, *Soft Magnetic Materials Conference*, Sao Paulo, Brazil, 2015, 4-5.
- [3] Y. Yoshizawa, S. Oguma, K. Yamauchi, *J. Appl. Phys.* 64, 6044, 1988.
- [4] G. Herzer, *Acta Materialia*, 61, 3, 2013, 718 – 734.
- [5] R. Hilzinger, W. Rodewald, *Magnetic Materials*, Vacuumschmelze GmbH & Co, Germany, 2013.
- [6] T. Waeckerle, T. Save, A. Demier, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320, 20, 2008, 797-801.
- [7] T. Waeckerlé, P. Vérin, P. Cremer, D. Gautard, *Journal of Magnetism And Magnetic Materials*, 215-216, 2000, 449-452.
- [8] B. Gupta, B. Ducharne, T. Uchimoto, G. Sebald, T. Miyazaki, T. Takagi, *NDT & E International*, 118, 102399, 2021.
- [9] S. Zhang, B. Ducharne, T. Uchimoto, A. Kita, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 513, 167221, 2020.
- [10] S. Zhang, B. Ducharne, S. Takeda, G. Sebald, T. Uchimoto, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 538, 168278, 2021.
- [11] B. Gupta, B. Ducharne, T. Uchimoto, G. Sebald, T. Miyazaki, T. Takagi, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 498, 166102, 2019.
- [12] A. Lekdim, L. Morel, M.A. Raulet, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 79: 20601, 2017.

### 3. Achievements

Covid restrictions forbade any international exchange and strongly limited the development of this project. At this time, it is unfortunate, but no real achievement can be pointed out.

### 4. Summaries and future plans

Covid restrictions have unfortunately slew down the pace of this project. It is currently on hold and will start again when limitations will be lifted up.

### 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] B. Ducharne, L. Model, M.A. Raulet, R. Saoudi, T. Uchimoto, Magnetic aging in ferromagnetic, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021).
- [2] R. Saoudi, L. Morel, M.A. Raulet, B. Ducharne, Magnetic properties and Barkhausen noise evolution during FeSiCuNbB nanocrystalline materials ageing, *25<sup>th</sup> Soft Materials Conference*, Grenoble, 2022, SMM25.

- 3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J21Ly12
Classification	LyC Collaborative Research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

## Active Control of Protein Mass Transfer by Membrane Utilizing Variation of Surrounding Condition

Atsuki Komiya\*†, Sébastien Livi\*\*††

Hani Alkitabi Aldaftari\* \*\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*IMP, 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 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

In this study, we focus on the hindered yet controlled mass transfer phenomenon. Both French and Japanese sides have concrete roles and they are merged in this collaborative research framework. French side provides a special membrane and Japanese side performs visualization experiment. In the visualization experiment, a typical protein, Lysozyme (molecular mass = 14 kDa), was applied as target protein. Distilled water was used as solvent in all the solutions. The experiments were performed by using two solutions couple whose concentrations are different. The concentration difference was fixed to 5mg/ml to analyze transient diffusion field clearly. Several types of the separated plates were used that were shown in Fig. 1(b). The visualized images of transient diffusion field by the interferometer are stored at the elapsed times, 900, 1600, 2500 and 3600seconds.

Figure 2 shows the comparisons of time variation of penetrated mass between numerical and experimental data. As is obvious from Fig. 2, the penetrated mass differs among three conditions even though the aperture ratio of the plate is the same through three plates. Numerical simulation presumes that different driving forces for the diffusion process occur near the pores, due to peculiar concentration profile as time progresses. The difference is numerically evident in terms of concentration profile and its gradient among three cases. Interestingly, the local concentration difference between upper and lower ends of pore is not as same among the three plates due to the difference of distance between neighboring pores. The experimental results could indirectly evaluate the difference of concentration profiles at both upper and lower ends of pores.

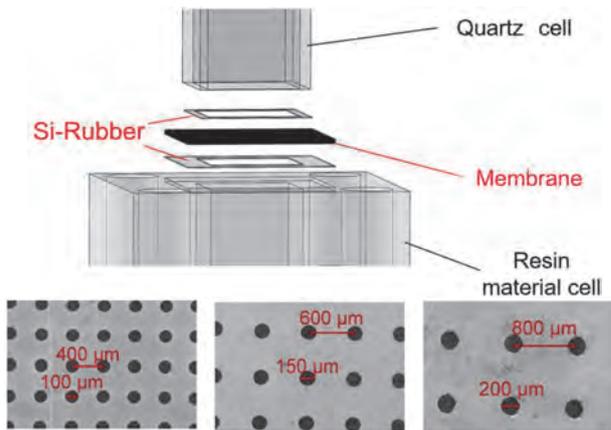


Fig. 1 (a) Integration of separated plate, (b) photos of the membranes with patterned pores.

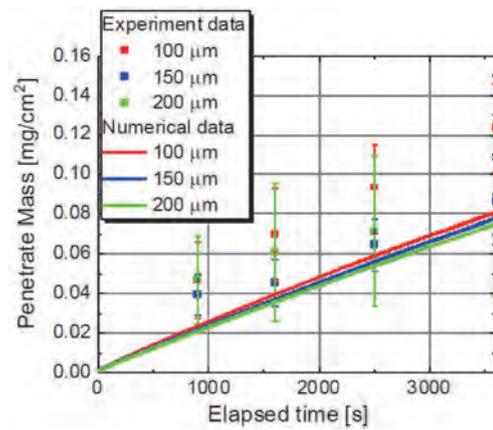


Fig. 2 Comparisons of time variation of penetrated mass between numerical and experimental data.

### 3. Achievements

At current stage, the achievement level can be evaluated at 90%. We have one peer-reviewed international journal paper, and two keynote lectures in international conferences. As mentioned above, the difference of penetrated mass among several different patterned membrane was quantitatively discussed. This might be good contribution to discuss the active control of solute in aqueous solutions.

### 4. Summaries and future plans

In this year, a series of clear visualized images of concentration profiles of diffusion fields was obtained. The experimental results show that the patterning of macropore on membrane is one of potential parameter to control mass diffusion process. We could control the penetrated mass within the range from 0.08 to 1.2 mg/cm<sup>2</sup>. As future plan, we will continue the visualization experiments and evaluate the hindered mass diffusion process.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] R. Zhu, R. Watanabe, Y. Kanda, J.F. Torres, S. Livi and A. Komiya, Experimental evaluation of membrane pore pattern on the protein diffusion, *Proceedings of the 32nd International Symposium on Transport Phenomena*, Tianjin, (2022), paper 134.
  - [2] R. Watanabe, J.F. Torres, Y. Kanda and A. Komiya, Evaluation of Mass Diffusion Control through a Membrane with a Macropore Pattern, *Proceedings of the 58th National Heat Transfer Symposium of Japan*, Koriyama, (2021), D313.
  - [3] A. Komiya, R. Zhu, J.F. Torres, Y. Kanda and S. Livi, Experimental Evaluation of the Relationship between Pore Patterning and Protein Hindered Diffusion, *Proceedings of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), OS22-9, pp.211-212.
- 3) Patent, award, press release etc.
 

(Patent) (Award) (Press release) Not Applicable

Project code	J21Ly13
Classification	LyC Collaborative Research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2021 ~ March 2022
Project status	3rd year

## Ionic Liquid Polymer for corrosion resistance applications

Nicolas Mary\*†, Tetsuya Uchimoto\*\*††  
 Sebastien Livi\*\*\*, Lucas Ollivier-Lamarque\*

\*ELyTMaX, CNRS-UdL-Tohoku University

\*\*Institute of Fluids of Science, Tohoku University

\*\*\*IMP, INSA Lyon

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Extension of material durability is an important issue to save partially earth ores resources. Among other strategies, the coating application on the existing metallic structure is one solution. Epoxy-amine polymers have been extensively studied, and their good resistance to water uptake is stated. Recently, amines were classified as a carcinogen. An alternative solution was proposed based on Ionic Liquids. First-year of the project deals with the opportunity of ionic liquid addition to the epoxy polymer material. The second-year project is dedicated to hydrogen issues evaluation for these materials. The third-year project focuses on water-uptake properties of ionic liquid epoxy resin versus classical epoxy-diamine resin

### 2. Details of program implement

Polymer materials were produced at IMP (INSA, France). Samples consisted only of polymer discs. The methodology developed in the first-year program was applied to various polymer samples. It consisted of comparing mass evolution and capacitance variation measurements as a function of immersion time in weak saline solutions.

#### 2.1. sample and technique

Epoxy-amine and epoxy-ionic liquid samples were prepared with the diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA) based epoxy prepolymer (Epon 828, Hexion Co, Louvain-la-Neuve, Belgium). A conventional aliphatic diamine denoted Jeffamine D400 (AHEW = 400 g·mol<sup>-1</sup>, Huntsman, The Woodlands, Texas, USA) was used as curing agent to prepare the epoxy-amine system considered as a reference in this paper. In addition, a phosphonium ionic liquid supplied by Solvay denoted IL105 (trihex-yl(tetradecyl)-phosphonium 2-ethylhexanoate) was used as an initiator of epoxy prepolymer to prepare epoxy-ionic liquid network.

The epoxy-amine samples were prepared at a stoichiometric ratio of 63 phr of diamine to obtain a fully cured network. The curing heat treatment consisted of a temperature ramp of 2 h at 80 °C, 3 h at 120 °C, then 2 h of cooling at room temperature. The epoxy-IL samples were prepared considering a mixing ratio of 10 phr (IL-10) without exudation phenomenon. A specific curing heat treatment in the oven was applied for IL samples: 2 h at 80 °C and 3 h at 140 °C, then 2 h of cooling at room temperature.

The samples were immersed in individual glass containers filled with about 40 mL

of a solution composed by 0.1 M NaCl and having a pH of 5.5. Immersion tests were carried out at 35 °C in a controlled temperature chamber. The containers were sealed to avoid the electrolyte evaporation. Gravimetric and permittivity measurements were performed simultaneously along a period of 3 months.

### 3. Achievements

During this project year, the water-uptake of polymer discs was analyzed either by gravimetry or capacitive measurements. Relative mass variations are displayed in Figure 1a. Using a second Fick law, both polymer's water diffusion coefficient and saturation percentage were calculated. For Diamine epoxy polymer the diffusion coefficient is about  $8 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$  and the saturation is about 2.2 wt.%. In the case of ionic liquid polymer the diffusion coefficient decreases up to  $3.6 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$  and the saturation drops about 0.6 wt%

### 4. Summaries and future plans

Capacitive and permittivity measurements allowed the water diffusion coefficients to be quantified in the different polymers coupons. It allowed selecting one composition regarding its higher physical-chemical properties, including hydrophobicity.

Capacitance measurements were performed using a parallel sensor suitable for polymer coupons. However, the polymer film may be deposited on the metallic substrate to provide a corrosion-resistant coating. With this geometry, such a parallel sensor is no longer available, and a coplanar sensor has to be designed.

### 5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] L. Ollivier-Lamarque, S. Livi, T. Uchimoto, N. Mary. Water uptake in epoxy ionic liquid free film polymer by gravimetric analysis and comparison with non destructive dielectric analysis. *Nanomaterials*. 12 (2022) 651. DOI : 10.3390/nano12040651
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [2] L. Ollivier-Lamarque, N. Mary, T. Uchimoto, S. Livi, S. Marcelin. Methodology to detect water uptake in polymer materials using non contact capacitor sensor. *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2021)* 10/2021. Sendai, Japan. Best presentation award
- 3) Patent, award, press release etc.  
Non applicable

課題番号	J21Ly14
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	2021.8~2022.3
継続年数	1年目

**磁歪複合材料のセンシングとエネルギーハーベスティングへの応用**  
**MACASH (MAGnetostrictive Composites for Application in Sensing and Harvesting)**

栗田 大樹\*†, 武田 翔\*\*††, LALLART Mickaël\*\*\*  
 \*東北大学大学院環境科学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所  
 \*\*\*FEDORA, INSA-LYON  
 †申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

申請者らの知見を融合して磁歪粒子と軟質ポリマーを混合し、自動車や航空宇宙分野での衝撃をリアルタイムに検知可能かつ、環境発電用途にも使用可能な、材料を選ばずに塗布できる磁歪複合材料を創製する。

**2. 研究成果の内容**

図1に  $\text{Fe}_{49}\text{Co}_{49}\text{V}_2$  粒子を 40 vol.% 添加した PU-FeCoV ソフトコンポジットシートの三次元 X 線 CT 画像を示す。この試験片では曲げ現象が確認された。PU-FeCoV ソフトコンポジットシートの上部領域では、下部領域と比較して大きな孔が観察されるが、PU-FeCoV ソフトコンポジットシートの下部領域にも孔が観察された。これは、作製時に発生した気泡に起因するものと考えられる。すなわち、磁場中における PU-FeCoV ソフトコンポジットシートの変形機構として、次のような曲げ機構が考えられる (図 7)。

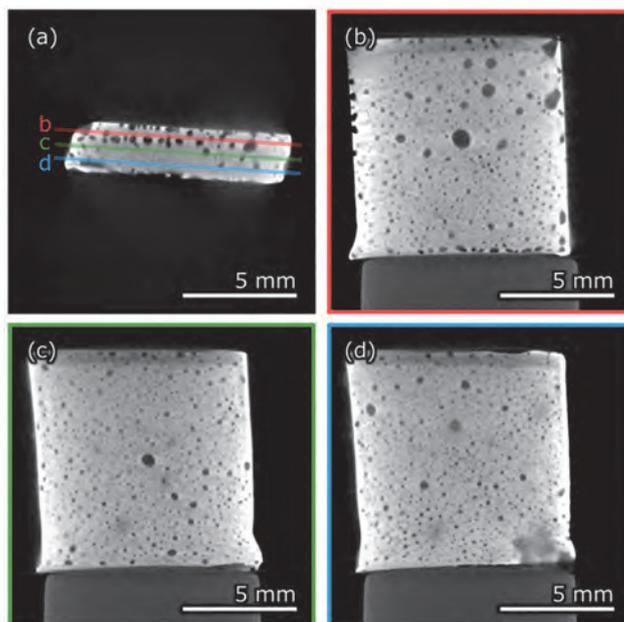


図1 : PU-FeCoV ソフトコンポジットシートの三次元 X 線 CT 画像

PU-FeCoV ソフトコンポジットシート下部領域には、上部領域と比較してより多くの  $\text{Fe}_{49}\text{Co}_{49}\text{V}_2$  合金粒子が存在している。したがって、PU-FeCoV ソフトコンポジットシートの下部領域は、磁歪と  $\text{Fe}_{49}\text{Co}_{49}\text{V}_2$  合金の電磁石への吸引力の両方によって膨張する。一方、 $\text{Fe}_{49}\text{Co}_{49}\text{V}_2$  合金の粒子が少なく、気孔が多いため圧縮弾性率が低い上側は、下側の膨張により下側よりも短くなっている。本研究では、PU-FeCoV ソフトコンポジットシートの真の磁歪を測定するために、作製工程を工夫して気孔をすべて除去する可能性を検討した。しかし、完全に気孔を除去することはできなかった。

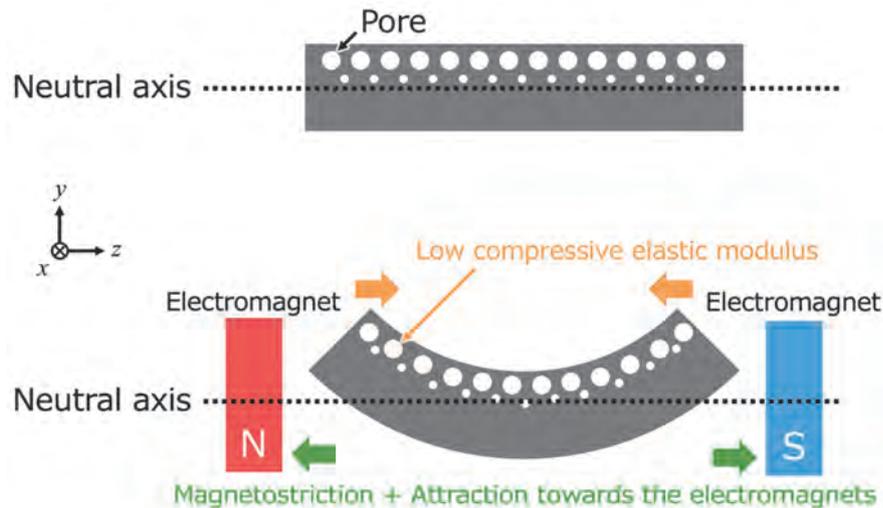


図 2 : PU-FeCoV ソフトコンポジットシートの変形機構

PU-FeCoV ソフトコンポジットシートは、交流磁場中でさまざまな振動モードが得られることがわかれば、ハプティクスデバイスに利用できる可能性がある。一方、PU-FeCoV ソフトコンポジットシートの透磁率は、気孔の有無にかかわらず、 $\text{Fe}_{49}\text{Co}_{49}\text{V}_2$  合金粒子の体積分率が增加するにつれて増加した。

### 3. 研究目標の達成状況

順調に進展している。研究結果を整理し、学術論文として発表した。修士 2 年生を INSA-LYON へ派遣することですでに合意し、研究を加速的に進展させたい。

### 4. まとめと今後の課題

#### 5. 研究成果

##### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] [Kurita H](#), [Keino T](#), [Senzaki T](#), [Narita F](#), Direct and Inverse Magnetostrictive Properties of Fe-Co-V Alloy Particle-dispersed Polyurethane Matrix Soft Composite Sheets, *Sensors and Actuators A: Physical*, 337, 113427, 2022

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

なし

##### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J21Ly15
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	2021.8～2022.3
継続年数	1年目

### スキルミオン安定性の3Dシミュレーションと磁歪現象

#### 3D simulations of skyrmion instability and mechanism of magnetostriction

加藤 文武\*†, 内一 哲哉\*\*††, GILDAS Diguët\*\*, Hung T. Diep\*\*\*,  
Sahbi El Hog\*\*\*\*, 本郷 哲\*\*\*\*\*, 鯉淵 弘資\*\*\*\*\*,

\*茨城工業高等専門学校, \*\*東北大学流体科学研究所, \*\*\*CY Cergy Paris 大学  
\*\*\*\*Monastir 大学, \*\*\*\*\*仙台高等専門学校

†申請者, ††所内対応教員

#### 1. 研究目的

スキルミオン(Sky)は将来のスピン트로ニクスデバイスの開発に向けて多くの注目を集めている。しかし、Skyを個別に自由に生成消滅させるような基本技術が確立されていないため、多くの基礎及び応用研究がなされている。本研究では、最近注目されている機械的応力によるSkyの安定化または不安定化現象に対してFinsler幾何モデルという申請者メンバーらが開発研究してきた新しい手法を適用し、3次元の4面体格子を用いたMonte Carlo計算によってその安定化メカニズムを解明することすること、更に、これをとおして、磁歪現象の機構の解明を目指す。

#### 2. 研究成果の内容

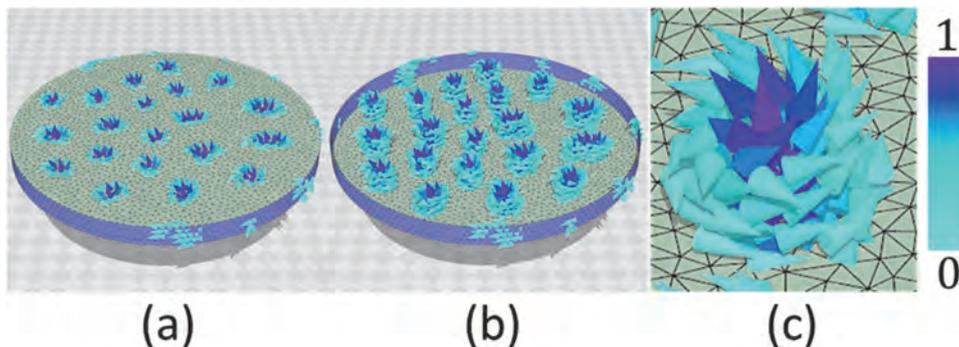


図1：3次元のdiskにおける(a)Sky基底状態のsnapshot, (b)spinのz成分>0の3次元表示, (c)一つのSkyの拡大図

2次元の3角形格子を用いたモデル化の方法を(10.1103/PhysRevB.104.024402)を3次元に拡張した(図1)。3次元では外力によって発生する物体内部のひずみ場が3次元的になり、その結果、電子スピンの自由度とひずみ場の3次元的な相互作用が可能になる。本研究では、外部磁場と同じ方向に圧縮するとSkyが不安定化し、逆に磁場と垂直方向に圧縮すると安定化するというような実験結果を再現できるかどうかを研究した(図2)。

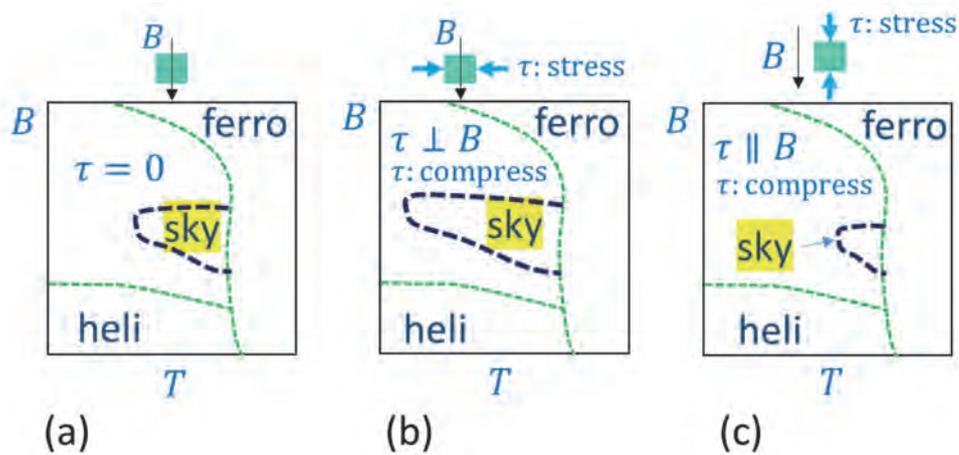


図 2 : 報告された実験結果. 磁場  $B$ —温度  $T$  相図における Sky の面積の変化 : (a) 応力なし, (b) 圧縮応力が磁場  $B$  と垂直, (c) 圧縮応力が磁場  $B$  と平行. 圧縮応力の方向が磁場と垂直 (平行) のとき, Sky は安定化 (不安定化) する.

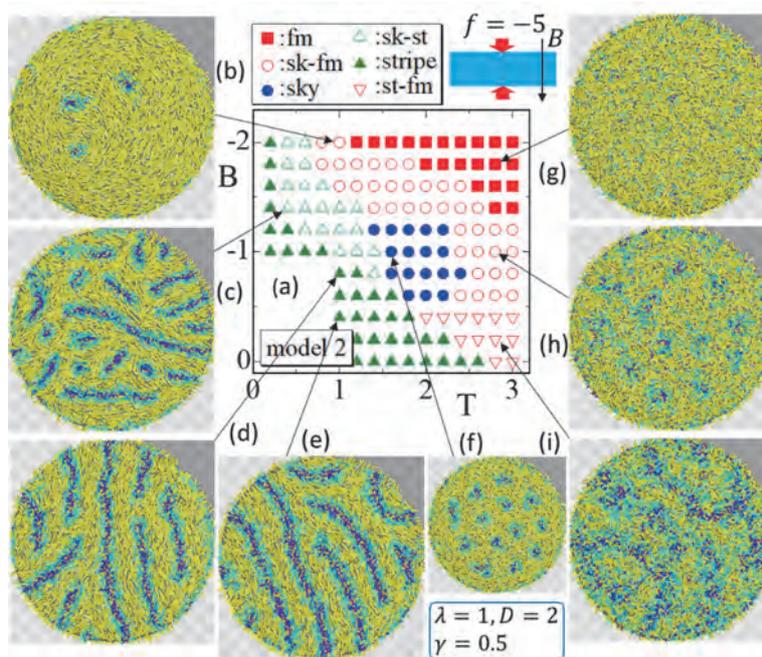


図 3 : 計算結果 : 磁場  $B$  と平行に圧縮応力を加えた場合の (a) 磁場  $B$ —温度  $T$  相図と (b)—(i) スピン状態 (紺色) およびひずみ場 (黄色の小さな円柱) の snapshots.

図 3 は  $z$  方向に圧力を加えた場合の磁場  $B$ —温度  $T$  の相図と snapshot である. 磁場  $B$  は  $z$  の負の方向にかけている. Sky という記号であらわされた skyrmion は中央の狭い領域に発生していることが分かる. また赤い 4 角は強磁性状態, 緑の 3 角はストライプ相, を表わす. 白抜き赤丸と緑 3 角は, Sky とそれらの 2 つの状態の中間の状態を表わす. Snapshot において青が正の  $z$  方向成分を持つスピン変数であり, 黄色の細い棒は, 正負の向きがない単位ベクトルで, ひずみ場の方向を表わしている. ひずみの向きは, 引張り応力方向に向くように定義されている. 図 3 の全ての snapshot で, ひずみ場の向きが面内方向であるのは,  $z$  方向に圧縮応力をかけているからである.

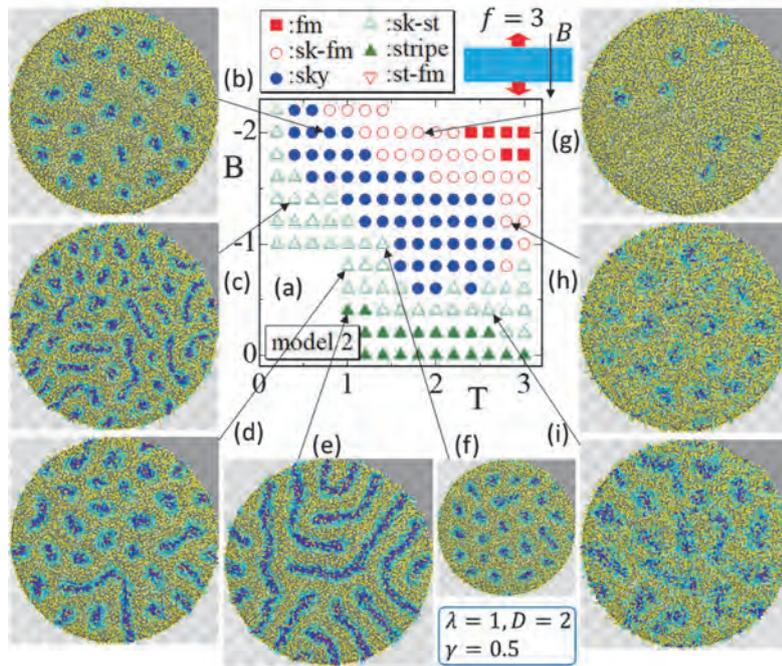


図4：計算結果：磁場  $B$  と平行に引張り応力を加えた場合の (a) 磁場  $B$ —温度  $T$  相図と (b)—(i) スピン状態 (紺色) およびひずみ場 (黄色の小さな円柱) の snapshots. 図3の圧縮応力の場合に比べて Sky (●) の領域が広がっているのが分かる.

図4には、 $z$  方向に引っ張り応力をかけた場合の結果を示す. 明らかに Sky の領域の面積が、図3の圧縮の場合に比べて大きくなっていることが分かる. また、ひずみ場の向きは  $z$  方向になっていることも確認できる. 以上のことから、 $z$  方向の引っ張り応力は  $x$  または  $y$  方向への圧縮と同等であることを考慮すると、計算結果は磁場と垂直方向に圧縮すると Sky が安定化するという実験結果(図2)を再現していることが分かる.

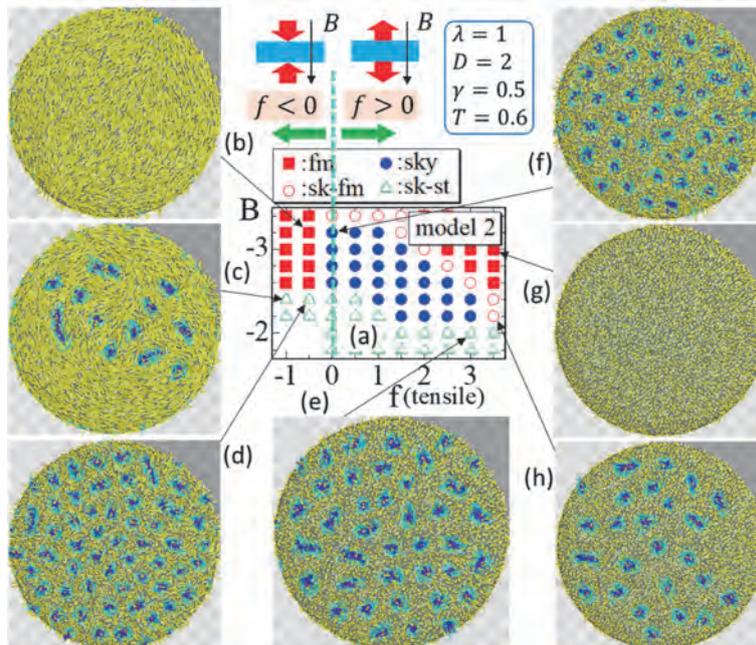


図5：計算結果：磁場  $B$  と平行に引張りおよび圧縮応力を加えた場合の (a) 磁場  $B$ —応力  $f$  相図と (b)—(h) スピン状態 (紺色) およびひずみ場 (黄色の小さな円柱) の snapshots.

図5は磁場  $B$  外力  $f$  に関する相図である。ここで、 $f > 0$  は引張り応力、 $f < 0$  は圧縮応力を意味する。図5からは、Sky が引張り応力で安定化し、圧縮応力で不安定化すること、特に磁場がある有限の値の領域 ( $B = -3$  のまわり) では  $f$  の正負で Sky の生成・消滅が明確に分かれていることが分かる。

### 3. 研究目標の達成状況

研究結果は論文報告を準備中であり[1]、その報告内容に基づいて研究目標の達成状況を述べる。初めに、実験的に確認されている skyrmion (SKY)の機械的応力による安定化・不安定化現象が数値計算で再現できたかどうかであるが、これは、おおむね達成できたと考えている。”おおむね”の意味は、計算で得られた磁場-温度、磁場-応力、の相図が報告されている実験結果と consistent ではあるが完全には一致していないからである。その理由としては、物質によって機械的応力に対する応答も変わり得ること、さらに実際の物質は結晶方向依存性があるが本研究の数値計算では結晶方向依存性は取り入れていない、などが挙げられる。

次に、磁歪機構の解明についてであるが、ここでは、問題を Sky に限定しなければならない。Sky の機械的応力に対する応答に関しては、これまでの理論的モデルでは磁化(電子スピン自由度)と機械的ひずみの相互作用を多項式で近似する方法を用いている。この方法は、どんな関数も多項式で近似できるという意味で強力な計算方法であり、磁歪現象の物理的意味も明らかになることは事実である。これに対し、本研究の Finsler 幾何モデルでは、仮定するのは「Sky のエネルギー状態は機械的ひずみの向き依存する」ということだけで、磁化とひずみがどのように相互作用するかはモデルには仮定していない、が結果としては相互作用の結果を正しく再現すると考えられる。このような意味において、細かい相互作用に無関係な Sky に関する磁歪効果の一面が理解できたと考えている。

### 4. まとめと今後の課題

Skyrmion の機械的応力に対する実験結果を新しいモデル化(Finsler 幾何モデル)の方法で3次元のモデルで研究した。その結果は報告されている実験結果と consistent である。このことは、FG モデリングの方法が、機械的外力に対する Sky の応答に関して、本研究で対象とした物質に限らず他の物質の実験結果: 磁場と垂直方向に引張り応力を加えると Sky が安定する、なども再現できる可能性があることを意味する。今後はこれらも含めて Sky 制御のモデリングを目指して研究を進める。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

\*[1] Sahbi El Hog, Fumitake Kato, Satoshi Hongo, Hiroshi Koibuchi, Gildas Diguët, Tetsuya Uchimoto and Hung T. Diep: The stability of 3D skyrmions under mechanical stress studied via Monte Carlo calculations, <https://arxiv.org/abs/2112.02173v1> (査読無)

\*[2] H. Koibuchi, S. Hongo, F. Kato, S. El Hog, G. Diguët, T. Uchimoto and H. T. Diep, Monte Carlo studies on shape deformation and stability of 3D skyrmions under mechanical stresses, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2090 012080 (2021)  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2090/1/012080> (査読つき)

open access; International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (IC-Msquare) 2021, 6-9 September 2021 (国際会議),

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[3] H. Koibuchi, S. Hongo, F. Kato, S. El Hog, G. Diguët, T. Uchimoto and H. T. Diep, Monte Carlo Studies on 3D Skyrmion Stability and Shape Deformation under Uniaxial Stress,

*Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*  
(AFI) 2021, 28 October 2021 (国際会議)

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)  
なし

Project code	J21Ly16
Classification	LyC Collaborative Research
Subject area	Health, Welfare and Medical Cares
Research period	August 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

Investigation of a predictive therapeutic response under controlled oxygen condition in cancer patient-derived organoids

Nicolas Aznar\*†, Kenichi Funamoto\*\*††  
Jean-paul Rieu\*, Zhouxing Su\*, Satoshi Aratake\*\*, Olivier Cochet-Escartin\*  
\*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. 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 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> therapy 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.

## 2. Details of program implement

**Specific aim 1:** Generation of microfluidic device compatible with 3D organoid cultures. 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.

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 will be 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 colorectal cancer patient derived-organoid. This one of kind device will be designed and fabricated at IFS. Experiments will be performed in order to validate the biocompatibility of the system with organoid 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.

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 3D tumor organoid cultures (from a biobank of CRC patients generated by Dr Aznar) will be performed as described above in hypoxia vs normoxia condition in combination with drugs routinely used to treat CRC patients (5-Fluorouracile and Oxaliplatin). Surviving cells will be monitored by microscopy (MTT assay and Toxicity assays) as well as expression of CSC markers (by Immunofluorescence, Immunoblot and RT-qPCR analysis). Drug-surviving cells will be analyzed for cytotoxic resistance (cell viability tests), tumor cell aggressiveness (invasion and migration assays) and CSCs' properties (colony efficiency assays in 3D cultures).

### 3. Achievements

#### **Update on aim 1 since the project started (August 2021):**

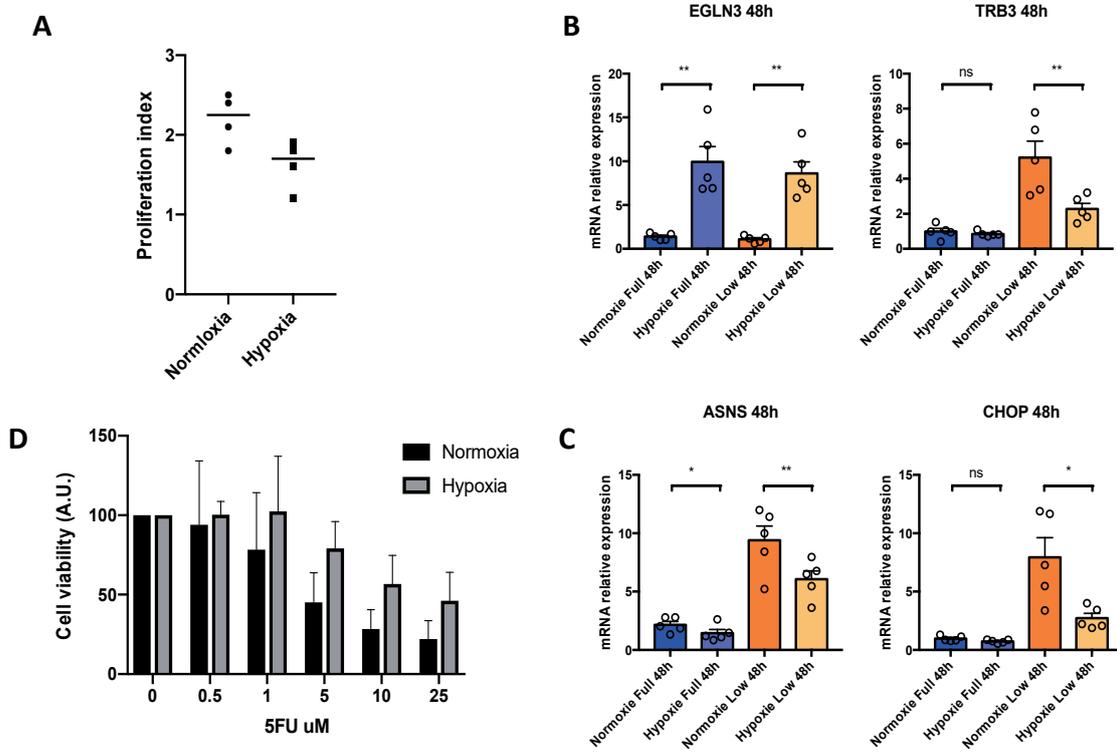
Dr Funamoto and Dr Rieu are currently designing a device which will mimic an O<sub>2</sub> concentration gradient and will be compatible with both 2D and 3D cell cultures. In parallel, Dr Funamoto acquired colorectal cancer cell lines and will test the biocompatibility of his current device (mostly optimized for 2D cell culture) with the colorectal cancer cell lines.

#### **Update on aim 2 since the project started (August 2021):**

Due to the pandemic situation, accessibility to fresh tumor samples from colorectal cancer patients present some challenges delaying the generation of our patient-derived organoid biobank. Therefore, in parallel to patient-derived organoid cultures, we decided to use HCT116 colorectal cancer cell line to assess the impact of both nutritional and oxygen heterogeneity found in tumors and responsible of tumor recurrence and resistance to conventional therapies. To mimic those conditions, HCT116 cells were cultivated in 2D and in normoxia (21% O<sub>2</sub>) vs hypoxia (1% O<sub>2</sub>) where their proliferation rate was measured by crystal violet analysis. Our data show that HCT116 cells proliferate less in hypoxia compare to normoxia and therefore that a modulating oxygen tension has an impact in cell proliferation (Fig 1A).

Next, cells were cultivated in normoxia vs hypoxia and in presence of complete or low amino acid cell media. Our qPCR analysis revealed that in condition of nutritional stress (low amino acid media condition), expression of specific stress markers such as EGLN3, TRB3, ASNS and CHOP is decreased in HCT116 cells cultivated in hypoxic conditions compared to normoxia (Fig 1B,C). These data revealed that in 2D condition, low oxygen conditions dampened

nutritional stress response and could help cancer cells to survive these extreme conditions found in tumors. Therefore, to test if hypoxia participate to tumor recurrence and resistance to therapies, HCT116 cells cultivated in normoxia vs hypoxia were treated with increasing concentrations of 5FU (Fig 1C). Crystal violet analysis show that cells cultivated in hypoxia are more resistant to 5FU compare to normoxia.



**Figure 1:** Oxygen tension controls cell proliferation and resistance to chemotherapy in 2D culture conditions. **(A)** HCT116 cells were cultivated in 2D on hard plastic surface either in normoxia (21% O<sub>2</sub>) or in hypoxia (1% O<sub>2</sub>). Cell proliferation was analyzed by crystal violet staining. **(B, C)** HCT116 cells were cultivated in 2D in presence of a complete media (Full) or in low amino acid media (Low) in normiax or hypoxia. qPCR analysis was performed to monitor expression of specific stress markers (EGLN3, TRB3, ASNS and CHOP). **(D)** HCT116 cells were cultivated in 2D and treated with increasing concentrations of 5FU and in normoxia or hypoxia. Cell viability assays were performed using MTT staining.

#### 4. Summaries and future plans

We will combine various technological developments to achieve robust control and measurements of O<sub>2</sub> environments to test their effect on CSC properties. This proposal will be performed using HCT116 and HT29 3D spheroids as well as colorectal tumor organoids to determine the impact in the response of CSC to O<sub>2</sub> levels but the methodology used in this project could also be applied on other cancers. This project will decipher the unexpected role of O<sub>2</sub> pressure on CSC plasticity (determination vs de-differentiation) 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.

To reinforce our collaboration, Zhouxing Su (Dr Aznar's master student) is currently in Japan for 2 months to perform experiments assessing the impact of O<sub>2</sub> concentration gradient on colorectal cancer cells cultivated in 2D in Dr Funamoto's lab. Satoshi Aratake (Dr Funamoto's master student) will join Dr Aznar's team in France to perform experiments assessing the impact of O<sub>2</sub> concentration gradient on colorectal cancer cells cultivated in 3D (6 months training from May to October 2022).

## 5. Research results

Not applicable

Project code	J21Ly17
Classification	LyC Collaborative Research
Subject area	Environment and energy
Research period	August 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

Experimental and Numerical Approaches for Water Film and Particle Flow Analyses (and its Particle Deposition Behavior) for Repairing Leakage Pipes by Cold Spray Process (or Solid-State Particle Impingement Process)

Chrystelle Bernard<sup>\*,\*\*\*†</sup>, Hidemasa Takana<sup>\*\*††</sup>  
Yuxian Meng<sup>\*\*\*</sup>, Hiroki Saito<sup>\*\*\*</sup>, Yuji Ichikawa<sup>\*\*\*</sup>, Daniel Nelias<sup>\*\*\*\*</sup>, Kazuhiro Ogawa<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University

<sup>\*\*</sup>Institute of Fluid Science, Tohoku University

<sup>\*\*\*</sup>Fracture and Reliability Research Institute, Tohoku University

<sup>\*\*\*\*</sup>LAMCoS, INSA de Lyon, Université de Lyon

<sup>†</sup>Applicant, <sup>††</sup>IFS responsible member

## 1. Purpose of the project

Water leakage is a severe problem for piping systems in power plants. Meanwhile, high temperatures should be avoided in some parts of piping systems to ensure safety. Therefore, we proposed to use the low-pressure cold spray (LPCS) method to repair the water leakage. In this study, we developed a water leakage repairing technology based on LPCS technology. After that, the microstructure of the deposited coating is characterized. Besides, the particle deposition behavior in the presence of a water film is studied.

## 2. Details of program implement

### 2.1 Experimental results about water leakage repairing

Different mixed ratios of Sn/Zn powder are used to repair an active leaking pipe (0.5 mm diameter hole, 4800 mL/min water flow rate) using the LPCS technique. The effect of the powder mixing ratio, gas temperature, and gas pressure (see Table 1) were considered. After repairing, a water-pressure test (2.5 MPa, keep 24 hours) was carried out to confirm the reliability of the fixed pipe. Besides, the coating properties, including the Zn ratio in the coating, Vickers hardness, and cross-sectional area, were also measured. The results show that the pipe can be fixed by the LPCS method (see Fig. 1). The optimized Zn ratio in the feedstock is between 30 and 50%. Besides, the optimized gas temperature is between 275 and 380°C. The different gas pressure conditions used in this study can fix the pipe.

Table 1: Experimental conditions

Gas pressure	0.4/0.5/0.6 MPa
Gas temperature	190/275/380/460°C
Stand-off distance	10 mm
Spray time	10 s
Zn ratio in feedstock (weight ratio)	100/90/70/50/30/10/0 wt.%

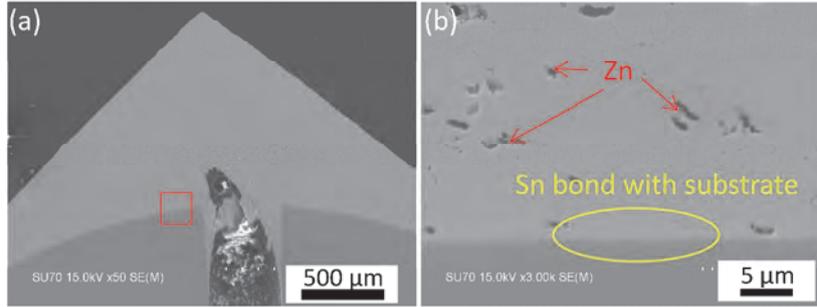


Figure 1: Cross-sectional image of the pipe repaired under the spray conditions (0.4 MPa, 275°C). The spray time is 10 s.

## 2.2 Repair mechanisms

During spraying, the gas hinders the water from leaking from the hole. Then, the particles deposit on the hole wall and pipe surface. Gradually, the hole was wholly covered by the sprayed powders.

From Fig. 1, we can find that no delamination/cracks were observed at the coating/pipe interface, indicating a high bonding strength as proved by the water-pressure test. Some Zn particles can be observed on the coating, which served as reinforced particles during spraying. As shown in Fig. 2, except for the bottom side, Sn particles also suffer significant deformation induced by the Zn impact on the top side. Zn particles have three positive influences on the repairing process: 1) shot-peening effect, which could improve the coating strength; 2) removal of the oxide film, which improves the bonding strength; 3) tamping densification, which improves the coating strength. Results show that the Zn particles are important for improving the bonding strength of Sn particles with the substrate and each other.

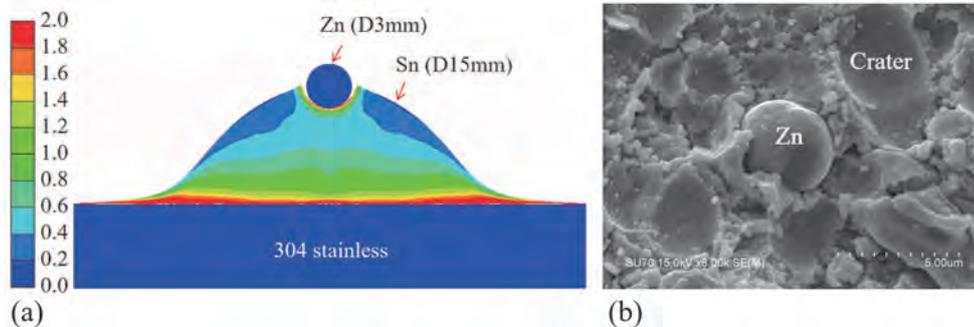


Fig. 2 (a) Effective plastic deformation of Zn particle/Sn particle/304 stainless substrate. The initial velocity of Zn and Sn was obtained from computational fluid dynamics (CFD) simulation, which is equal to 315 and 260 m/s, respectively. (b) Corresponding experiment results.

## 2.3 Impact simulation with the presence of a water film

Figure 3 shows the temperature contour of Sn particle impact on the 304 stainless steel substrate with/without water film. It can be found that the water film on the top side of the particle was nearly unaffected by the impact, while the bottom side water film was squeezed and scattered. Meanwhile, the impact-induced jetting can remove the water film from the interface, allowing bonding. Besides, in both cases, the particle temperature at the rim of the interface could reach the melting temperature. It implies that the metallic bonding between particle and substrate could happen even if the water film existed.

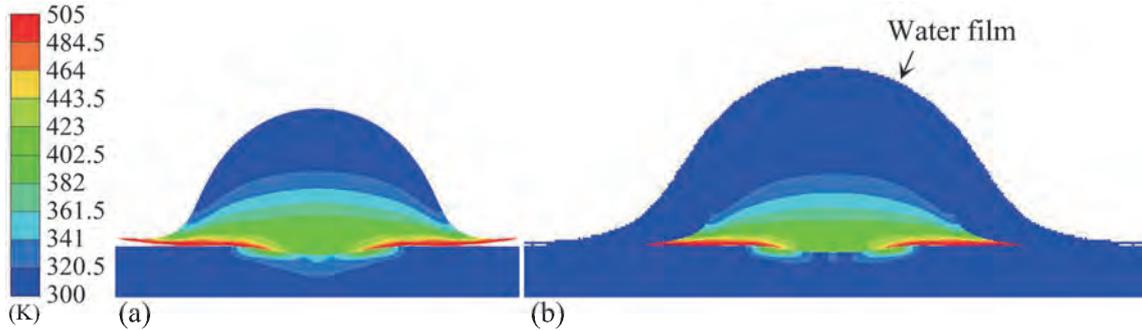


Figure 3: Particle temperature contours for Sn particle impact on 304 substrates: (a) no water film, (b) with water film (thickness: 2  $\mu\text{m}$ ).

Figure 4 shows the kinetic energy and impact direction velocity for particle (Sn), substrate (304 stainless steel), and water. With the presence of a water film, the particle velocity decreases at the initial stage due to the hindering effect of the water film (see Fig. 4(b)). Correspondingly, the kinetic energy of particle and water film was decreased and increased, respectively (see Fig. 4(a)). It is evident that the water film mainly influences the particle kinetic energy at the initial stage, i.e., before the particle contacts the substrate. After the particle contacts the substrate, the water is easily removed by the jetting from the particle. Therefore, the particle could be deposited on the substrate. The simulation results indicated that the water film mainly influences the particle velocity (or kinetic energy) at the initial stage (before contacting the substrate).

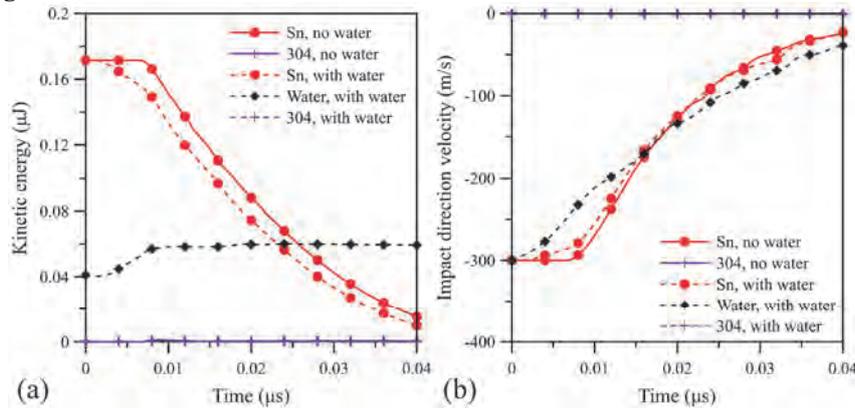


Figure 4: Time evolution of the (a) particle kinetic energy and (b) velocity following the impact direction.

### 3. Achievements

- 1) The appropriate parameters (i.e., powder mixing ratio, gas temperature, and gas pressure) for successfully repairing water-leaking pipe were confirmed;
- 2) The shot-peening effect of Zn particles on Sn particles was investigated by multi-particles impact simulation combined with experimental observation;
- 3) The effect of water/water film on the particle impact behavior was elucidated. Specifically, the cooling effect of water flow and the hindering effect of water film on the particle deposition behavior was studied.

### 4. Summaries and future plans

- 1) Summary: the experimental results demonstrated that the active water leaking pipe could be repaired by the LPCS technique using Sn/Zn mixed powder. The simulation results indicated that the particle could deposit even with the presence of a water film on the substrate.

2) Future plan: the simulation results of this study indicated that the particle could overcome the hindering effect of the water film and deposit on the substrate. Based on these observations, an underwater repair experiment will confirm whether the LPCS could be applied for underwater repair.

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] 蒙 愈先, 齋藤 宏輝, Chrystelle A. Bernard, 市川 裕士, 小川 和洋, 低圧コールドスプレー法による漏水パイプの補修 (“Active water-leaking pipe repaired by cold spray: experiment and simulation”), 日本溶射学会全国講演大会, online, 204, November 2021.

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

Project code	J21Ly18
Classification	Lyc Collaborative Research
Subject area	Environment and energy
Research period	August 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

### Theory for Electrostriction of Polymeric Actuator. (TEmpuRA)

G. Coativy\*†, K. Yuse\* \*\*\*\*, G. Diguët\*\*, V. Perrin\*, L. Seveyrat\*, F. Dalmas\*\*\*\*\*,  
 S. Livi\*\*\*\*\*, J. Courbon\*\*\*\*\*, H. Takana\*\*\*\*\*††, JY Cavallé\*\*\* \*\*\*\*  
 \*LGEF, INSA Lyon, \*\*Advanced Institute for Materials Research, Tohoku University,  
 \*\*\*ELyTMaX IRL, \*\*\*\*Lyon Center, \*\*\*\*\*MATEIS, INSA Lyon, \*\*\*\*\*IMP, INSA Lyon,  
 \*\*\*\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University  
 †Applicant, ††IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

The present project deals with the experimental study and modeling of electroactive elastomers. The deformation of thin polyurethane films stimulated by an electric field has been extensively studied by our group in compression and bending. Interestingly, a complex kinetics of deformation, which can last more than 15 hours, has been evidenced. This kinetics seem to be linked to the movement of charge carriers inside the sample. Therefore, polyurethane should not be considered as an ideal dielectric elastomer. The origin of these charge carriers could be the presence of ionic impurities from its industrial synthesis. Moreover, doping the sample with a NaCl salt increases its electromechanical activity. Although we have tried to model this behavior in a qualitative way, we wish to continue our study on model samples doped with a controlled amount of salt, whether organic or inorganic. Two main objectives are targeted: (i) to better understand the electro-actuation mechanisms of dielectric elastomers containing a controlled quantity of charge carriers by modeling and simulating their electromechanical behaviors in a quantitative way (ii) to propose different solutions to improve their efficiency (temporal response, deformation amplitude...).

#### 2. Details of program implement

Since the beginning of the project, the experimental data analysis of the electro-actuation under bending of polyurethane films doped with salt has been continued. Figure.1 shows the principle of the experiment.

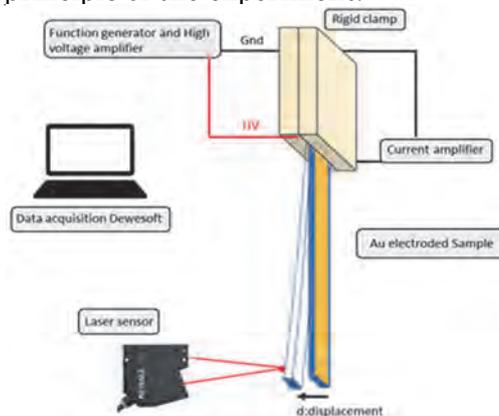


Figure. 1 Principle of the bending actuation: A thin film of polyurethane covered by two gold electrodes is clamped in one side, the other side is free. Under an applied electric field, the free end can move.

In parallel, the simulation has been improved. It is now possible to link the kinetics of bending with the kinetics of charge accumulation near the electrodes. The main hypothesis is that before applying the electric field, ionic charge carriers with different mobilities are distributed randomly in polyurethane. After applying the electric field, the faster ions reach the counter electrodes first and the slower later.

It results in a heterogeneous time dependent distribution of charge responsible of electrostatic energy gradients. This gradient leads to the time dependent expansion of the polymer near the sample surfaces.

Figure.2. a) shows the simulated displacement versus the experimental, a relatively good correlation is observed in terms of amplitude. However, some discrepancies are observed regarding the kinetics. The simulated bending starts and finishes earlier than the experimental. It could be inferred to an initial heterogeneous distribution of charge inside the material. This point will be studied on the next year. Furthermore, near the electrode, the polymer expansion might be also responsible of the sample shrinkage in the electric field direction and may have an important role in the so-called "electrostriction".

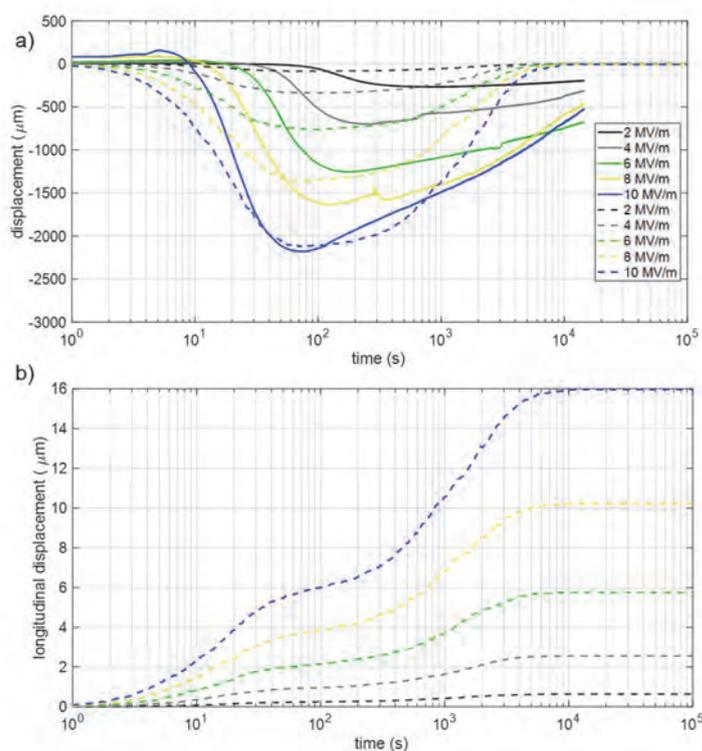


Figure.2: Preliminary results of simulation versus experimental data. a) bending displacement as a function of time b) longitudinal extension of the sample (simulation only)

### 3. Achievements

In the previous year, we failed to develop model materials for a better understanding of the electro-action of polymers under bending. Therefore, this objective is still relevant. Regarding the simulation, a lot of effort has been devoted to its improvement. Qualitatively, the physics of the bending of polymer thin films under electric field seems to be treated in a satisfactory way. We will submit soon an article about the description of the experimental and simulated data on polyurethane.

#### 4. Summaries and future plans

A lot of efforts have been devoted to the experimental data analysis and simulation of polyurethane bending under a constant applied electric field. The submission of an article is ongoing.

On the other hand, we can note that the budget we obtained LyC, which was initially requested for traveling, has been used for the purchase of new Comsol licenses for Prof. Hidemasa Takana's lab. It will be useful for sharing simulations, and for other work done at IFS during future stays, after the end of the pandemic: thus, we would like to renew our funding request for traveling for the next year.

#### 5. Research results

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

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

[1] G. Coativy, K. Yuse, G. Diguët, L. Seveyrat, V. Perrin, F. Dalmas, S. Livi, J. Courbon, H. Takana, JY Cavaille, Electroactive polymers as actuators: why do they deform?, *Proceedings of the 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021)*,

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

Project code	J21Ly19
Classification	Lyc Collaborative Research
Subject area	Environment and energy
Research period	August 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

Modal approach for extracting flow structure related to  
the subsonic jet noise generation

Aiko Yakeno\*†, Shota Morita\*, Christophe Bogey\*\*††

\*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

Jet noise is a phenomenon caused by unsteady and nonlinear turbulent vortices, and its reduction is desired from the viewpoint of environmental compatibility in recent decades. Although the remarkable development of computer technology has made it possible to obtain large scale and highly accurate numerical data of jet noise, it is difficult to understand the data without appropriate analytical methods.

In response to this, Mode Decomposition Method has been attracting attention in recent years for extracting important feature structures(modes) from large scale unsteady flow simulation data.

Based on this method, this project 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.

2. Details of program implement

This project is a collaboration between Dr. Bogey of ECL (France), Dr. Yakeno and Mr. Morita, a second-year PhD student of IFS(Japan). The research was carried out in both France and Japan, with each having a role to study. In France, Dr. Bogey performed flow simulations with high enough accuracy to resolve acoustic waves. In Japan, the highly accurate data computed by Dr. Bogey was analyzed by a data analysis method called mode decomposition method to try to extract the flow structure related to the noise generation. The study was carried out via e-mail and online meeting, instead of face-to-face meeting due to COVID-19 pandemic.

In this year, we focused on (2) quantitatively explaining the mechanism of jet noise generation as mentioned in the purpose of our project. First, we attempted to extract the flow structure near the jet exit by applying Dynamic Mode Decomposition(DMD) to the results of subsonic free jets. DMD is a technique that enables the visualization of flow structures by extracting phenomena of specific frequencies from the flow. As a result(Figure.1), a vortex structure caused by K-H instability, a phenomenon that triggers vortex generation in the wake of a free jet, and an upstream propagating acoustic wave structure were found on the jet axis. This result supports the "feedback loop phenomenon" proposed by Bogey (2021), in which the flow structure is determined by the interference between the vortex structure caused by the K-H instability and the sound waves propagating upstream. We plan to clarify the effect of the upstream propagating sound waves by conducting stability analysis in the future.

These results were presented at ICFD2021[2], JSASS northern branch [3], and are now being compiled into a paper for submission.

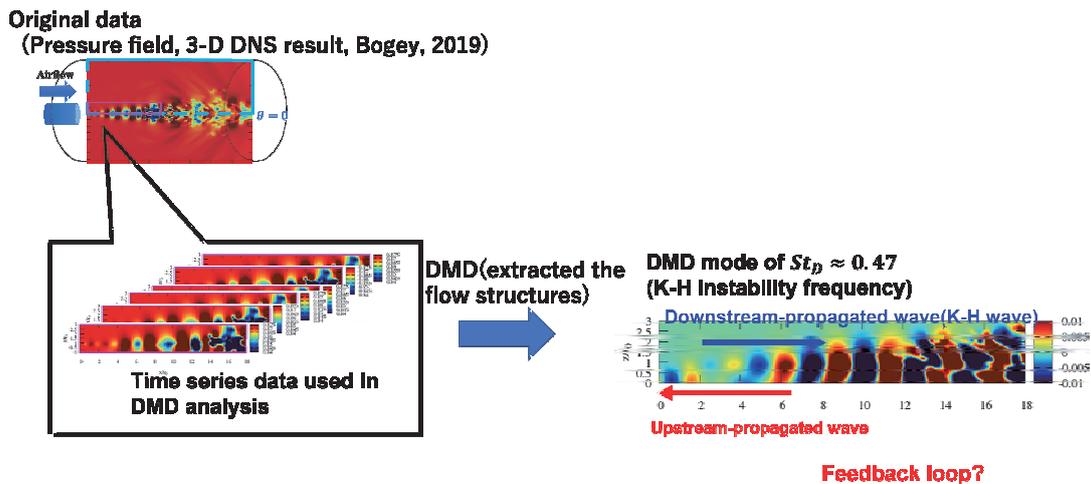


Figure 1. The schematics of DMD(left half of picture) and DMD visualization result(right half of picture).

### 3. Achievements

In the application form, we showed three sections as the expected results..

1. New insights will be gained by performing accurate large-scale numerical simulations of jet engines.
2. A quantitative index for the design of noise reduction of jet engine exhaust will be provided.
3. Proposal of a turbulence control method to prevent the flow structure related to the noise generation.

This year, by combining the highly accurate simulation results and the mode decomposition method, we were able to obtain a new knowledge of the feedback loop phenomenon as shown in Section 1. We could say that the objective of section 1 had been largely achieved. However, further verification of this feedback loop phenomenon is needed and will be the subject of future work. We plan to continue our research on the other 2. and 3. in the fiscal year 2022.

### 4. Summaries and future plans

The objective of this project is to Clarify the mechanism of jet noise by combining numerical simulations and mode decomposition methods. First, we applied the mode decomposition method to the time series of free jet simulation data computed by Prof. Bogey and tried to extract the fluid structures involved in the noise generation. As a result, the structure of pressure waves propagating upstream from the end of the potential core, which is the point where the noise is generated, was found. This flow structure was found to oscillate at a frequency equivalent to that of the K-H instability that triggers turbulence in the wake. This result supports the "feedback loop phenomenon" (Bogey (2021)) in which sound waves from the wake induce the K-H instability in a free jet, and is a step forward toward clarifying the mechanism of jet noise generation.

In the future, stability analysis will be conducted to further verify this feedback loop phenomenon, and a new fluid structure extraction method will be developed based on the results of this study.

### 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] Shota Morita, Aiko Yakeno, Christophe Bogey, Shigeru Obayashi, “Mode Decomposition Method for Extracting Characteristic Structures Related to the Subsonic Jet Noise Generation”, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (Online), (2021)
- [2] 森田聖大, 焼野藍子, Christophe Bogey, 大林茂, “モード分解手法を用いた亜音速自由噴流の音響波生成に関わる流体構造の解析”, オンライン, (2021)
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable

課題番号	J21Ly20
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	2021.8~2022.3
継続年数	2年目

**超音波による配管内の腐食の定量化**  
Corrosion characterization for pipe wall by ultrasonic wave

中本 裕之\*†, 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所, \*\*東北大学流体科学研究所  
\*\*\*LVA, INSA de 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プラント内において高温、高圧の流体が流れる配管は、循環システムの重要な要素である。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厚さと亀裂の検出に関して、これまで多くの研究がなされてきた。さらに、流体力学による配管減肉のシミュレーションも実施されてきた。これらの成果は互いに補完するものであり、特に配管の減肉をモニタリングし、その結果を用いることで破断リスク推定の高精度化が期待できる。本研究では、従来の配管の減肉管理に粗さという新しいパラメータを追加することで、循環システムにおけるメンテナンスの高度化を目指す。粗面で反射した際の超音波の減衰にもとづいて、その粗さを推定する方法を提案する。機械加工により生成した粗面をもつ試験体に対して実験を通じて減衰の傾向を確認する。

## 2. 研究成果の内容

超音波プローブにより対象に入射された超音波は対象内を伝搬し、反対側の面において反射した後、入射面に戻る。反対側の面が粗面であれば超音波は反射時に散乱し減衰する。減衰関数は指数関数を用いて次式で表される。 $r = r_0 e^{-f(h,k)}$ 。ただし、 $r_0$ と $r$ はそれぞれ平面と粗面における振幅に関する反射係数を表す。また粗面と粗さを $h$ 、超音波の波数を $k$ とした

場合、 $f(h,k) = 2h^2k^2$ で表される。実験では減衰関数を $e^{-f(h,k)} = \frac{R_0^{2nd}}{R_0^{1st}}$ でもとめる。ただし、

$R_0^{1st}$ 、 $R_0^{2nd}$ は粗さのない面でそれぞれ1回目、2回目に反射した超音波の振幅、 $R^{1st}$ 、 $R^{2nd}$ は粗面でそれぞれ1回目、2回目に反射した超音波の振幅を表す。広帯域プローブを用いて周波数解析を行うことにより、1回の計測で複数の周波数の減衰の算出が可能である。

実験には中心周波数が5 MHzのプローブを用いた。40×40 mmの面積、厚さ20 mmの炭素鋼ブロックに、機械加工により片面に平行な繰り返しのきず（ピッチが1.25, 1.50, 1.75 mmの3種類）を加えた試験体と、ブラスト加工によりランダムなきずを加えた試験体を作成した。ただし各試験体の粗さ $h$ は約20 μmと共通である。信号から1回目、2回目の反射波を抽出、フーリエ変換により求めた振幅スペクトルを反射波の各振幅とし、減衰値をdBとして算出した。結果を図1に示す。ランダムな試験体はスペクトルの分布が滑らかな凸形

状であり、減衰値の理論値と実験値との差も小さい。一方、繰り返しのきずの試験体はスペクトル分布が左右非対称の形状であり、特定の周波数で減衰値の理論値と実験値とに差が生じた。差のある周波数を用いて波長を求めると、例えば図 1(b)のピッチ 1.25 mm では約 5 MHz で差があるが、超音波の波長を求めると 1.18 mm でありきずのピッチに近い値となった。この結果より実験値からきずの有無とそのピッチを求められる可能性が示唆された。

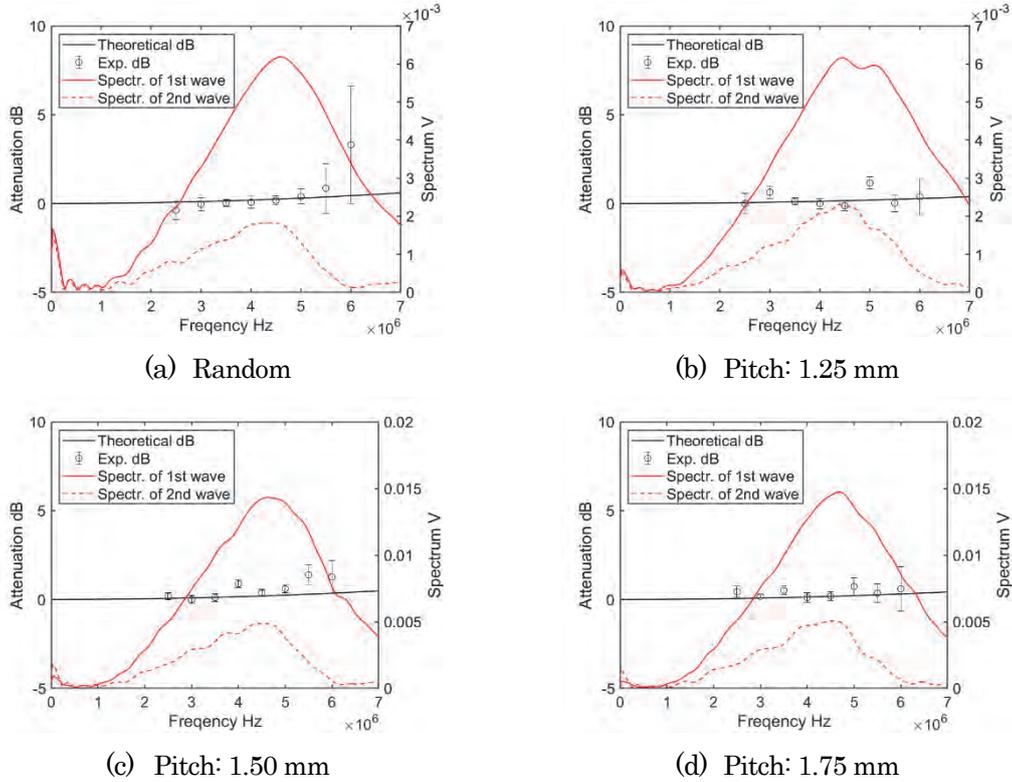


図 1：ランダムと繰り返しきずの試験体の周波数スペクトルと減衰値の比較

### 3. 研究目標の達成状況

ランダムな粗面に対する減衰値の実験値が理論値と近いことを確認した。粗面が繰り返しのきずで構成される場合、減衰値の実験値と理論値とに差がある周波数から求めた超音波の波長がきずのピッチに近いことを確認した。

### 4. まとめと今後の課題

ランダムな粗面と繰り返しのきずの粗面における超音波の反射波の特徴を確認した。粗さを求めるには、粗さを構成するきずのピッチと深さ、幅を決定する必要がある。次年度はそれらを推定する方法を検討する。

### 5. 研究成果

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

[1] 寺田 和真, 中本 裕之, Philippe GUY, 内一 哲哉: 周期的及び非周期的な粗面における反射波の超音波減衰の比較, 2021 年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会シンポジウム, (2022), pp. 121-122.

- 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等） なし

Project code	J21Ly21
Classification	LyC Collaborative Research
Subject area	Environment and energy
Research period	August 2021 ~ March 2022
Project status	1st year

High impact resistance of titanium/UHMWPE composites coatings by cold spray

Hidemasa Takana\*†, Oliver Lame\*\*††

Kazuhiro Ogawa\*\*\*, Chrystelle Benard\*\*\*, Jean-Yves Cavallé\*\*\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*MATEIS, INSA de Lyon, Université de Lyon, France

\*\*\*Fracture and Reliability Research Institute, Tohoku University, Japan

\*\*\*\*ELyTMaX UMI 3757, CNRS — Université de Lyon — Tohoku University,

International Joint Unit, Tohoku University, Japan

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

## 1. Purpose of the project

The objective of this project is to develop high wear resistance coating to protect structures against hydrodynamic cavitation. This phenomenon induces drop of the performance and earlier failure of propellers, for example. Deplancke, Lame et al. (Wear, 2015) showed that ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) exhibited outstanding cavitation erosion properties. Ravi, Lame, Ogawa et al. (2015, 2016, 2018) manufactured UHMWPE polymer coating by cold spray process. However, the deposition efficiency remains low and the adhesion strength weak. Recently, Ogawa laboratory successfully deposited perfluoroalkoxy alkane (another polymer) on metallic substrate by introducing a Titanium bond coat between the polymer and the metallic substrate. The resulting coating exhibited very high deposition efficiency (>96%) and an adhesion strength of 3.5 MPa.

Following these interesting results, in this project, we proposed to develop a new UHMWPE/Ti composites coating exhibiting high wear resistance. High deposition efficiency and strong adhesion strength are also important parameters to validate our approach.

Different parameters will be investigated: (i) UHMWPE with Ti bond coat, (ii) a mixture of UHMWPE and Ti particles in different ratio, (iii) the substrate initial temperature, and (iv) the nozzle shape known to highly influenced the particle temperature and velocity.

## 2. Details of program implement

This project can be decomposed into two main part respectively performed at MATEIS lab at INSA Lyon under the supervision of Prof. O. Lame and Prof. J.Y. Cavallé, and at Tohoku University under the supervision of Prof. K. Ogawa, Prof. Takana, and Assist. Prof. C. Bernard.

At INSA Lyon, UHMWPE/Ti compressed-sintered specimens will be characterized in terms of microstructure by tomography, X rays, DSC DMA. Influence of the Ti ratio content and relative porosity will be evaluated. Mechanical testing as well as impact test will be performed to evaluate the performance of the material and understand the relationship with the microstructure. The wear resistance to hydrodynamic cavitations (one of the main objective application of this coating) will be evaluated by cavitation tunnel experiments performed at MATEIS lab.

At Tohoku University, cold spray process experiments will be carried out to

manufacture UHMWPE coating with different Ti content ratio. Different parameters will be investigated to optimize the coating mechanical resistance (identified at INSA Lyon) and adhesion strength: (i) Ti bond coat, (ii) different UHMWPE/Ti ratio, (iii) gas pressure and temperature, (iv) substrate temperature, and (v) nozzle shape. Thanks to fluid numerical simulations in collaboration with the team of Prof. H. Tanaka, some preliminaries studies shown that high particle temperature and low velocity could be achieved by the use of a long nozzle with low gas pressure. This new compromise is likely to increase the adhesion of the material. The analysis of the particle history inside the nozzle will be performed in collaboration with Prof. H. Takana, specialist of the numerical simulation of the gas flow in the cold spray device. Finally, the obtained coating will be characterized in particular in term of resistance to hydrodynamic cavitation.

### 3. Achievements

Due to covid restrictions as well as an important building renovation plan at INSA LYON. The project has now few months of delay. As a consequence, sintering of Ti/UHMWPE has not been done until now. However, few preliminary tests have been performed as well as the design of a new and much more precise device of sintering apparatus.

It particular, we have shown that the polymer powder exhibits a slight memory effect which is important in cold spray perspective as the time spent over the melting point should be very little and then the microstructure obtained should probably keep the memory of the nascent one.

In figure 2 one can see on the DSC analyses performed for two UHMWPE grades (GUR 4130 with 3,9Mg/mol and GUR 4170 with 10,5 Mg/mol) the shift of the crystallization after a first melting followed (or not) by an annealing of an hour and half. In the particular case of cold spray this effect could be beneficial as we observe an earlier crystallization without annealing which means that the material is easier to crystallize. As a consequence, this could ease the co-crystallization of neighboring powder grains.

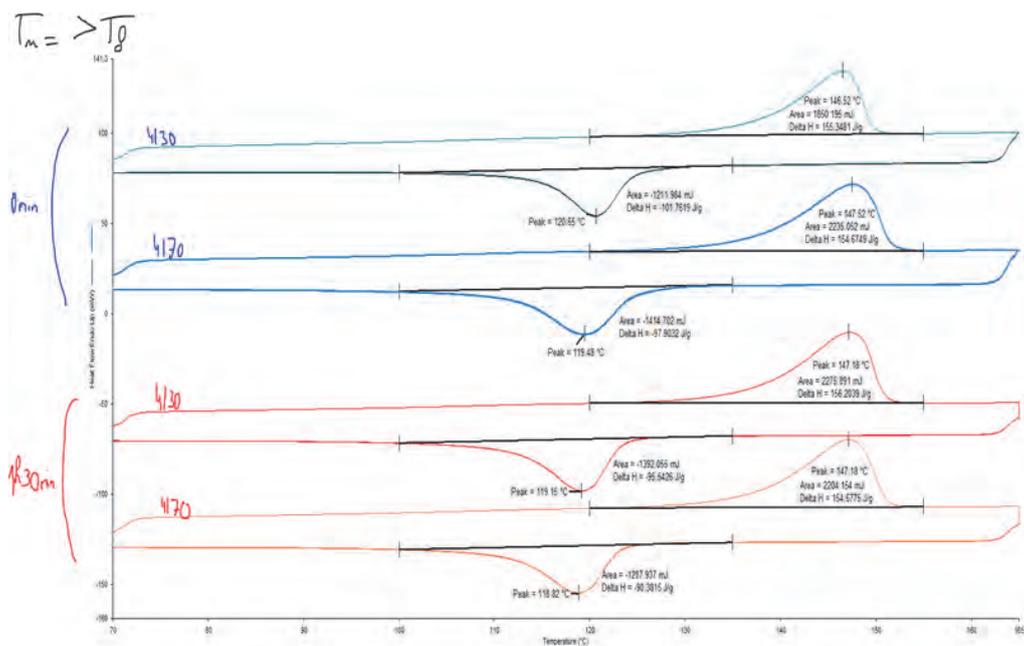


Figure 2 : Comparison of crystallization behavior using DSC analysis for two UHMWPE (3,9 and 10,5 Mg/mol respectively named “4130” and “4170”) without annealing (top) and with 1H30 of annealing at 165°C.

4. Summaries and future plans

The new sintering device is now arrived and is actually tested and optimized. In the next few month, Ti/UHMWPE mixture will be sintered at different porosity rate and temperature. Then the characterization phase will begin.

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

## **2. 研究成果報告書**

### **<リーダーシップ共同研究>**



課題番号	J21L012
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	2021.4～2022.3
継続年数	2年目

### 水中爆発を用いた物体洗浄効果の研究

Study on washing effect for textile using the underwater explosion

北川 一敬\*†, 上田 颯\*\*, 大谷 清伸\*\*\*††, 小西 康郁\*\*\*

\*愛知工業大学工学部, \*\*愛知工業大学大学院, \*\*\*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

水中衝撃波の研究は、水中衝撃波による食品加工の産業応用や生体組織中の衝撃圧減衰の医学応用、マイクロバブルを利用した海洋細菌の殺菌などがある。衝撃圧力の利用は、静的には与えにくい高い圧力を対象物体へ短時間に作用させることができる。水中爆発による洗浄技術への応用の試みは上述の特性を効率的に利用する研究や開発への期待が高まる。

水中爆発では高い圧力で微小気泡の発生を誘発でき、その近傍に被対象物(布)を設置し、水中衝撃波とバブル衝撃波に伴う気泡発生や水流ジェットの慣性力を有効に活用する事で洗浄効率の向上が図れないかという着想に至り、物体洗浄技術と洗浄効果を解明する。

#### 2. 研究成果の内容

水中爆発現象を用いた物体洗浄効果向上に関する研究において、起爆薬量と設置距離が重要な調査項目であるため、水面から起爆点と起爆点から物体のそれぞれの換算距離の比を用いる。異物除去効果の評価には色差計を用いて起爆前後の対象物の色差を取得して評価する。またハイスピードカメラを用いた可視化により、爆発生成ガスの挙動が物体洗浄効果に与える影響を調査する。

以上の調査結果より、 $Z_H/Z=0.3\sim0.75$  において洗浄効果の向上が確認された。可視化結果より、 $Z_H/Z=0.3\sim0.75$  において物体表面において微小気泡（キャビテーション）の発生、爆発生成ガスが水面上より発散することなく物体に衝突することが確認された。 $Z_H=0.6$  において最も高い洗浄効果が確認された。このとき爆発生成ガスの膨張収縮運動に伴う水流ジェットの慣性力が最も効果的に作用している。

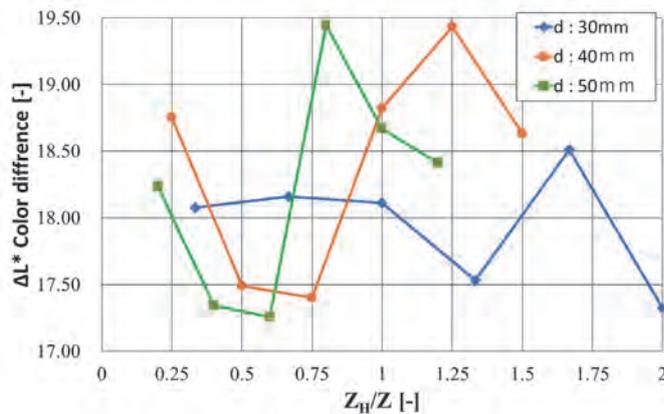


図1：起爆前後の物体より取得した色差と換算距離比の関係

### 3. 研究目標の達成状況

本研究目標は、水中衝撃波とバブル衝撃波に伴う気泡発生や水流ジェットの影響を有効に利用による洗浄効率向上が図れないかという着想に至り、物体洗浄技術と洗浄効果を調査することである。水中衝撃波、バブルジェット水流を有効利用することで、布面を無彩色まで変化させ、汗などの油脂の除去に成功した。

### 4. まとめと今後の課題

爆発時の衝撃波と生成ガス収縮時の水流ジェットが布方向に発生し、布に衝突干渉する。その結果、色相、色差値等の結果から総合判断すると、実験後の布が無彩色まで変化している。これにより、水中爆発で発生する衝撃波と水流ジェット等には布を洗浄する効果の有効性の確認ができた。

今後、泥汚れ、ガム、インクなどが除去できる瞬間洗浄技術を開発する

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] H. Ueda, K. Kitagawa, K. Ohtani, "Study on Improvement of Washing Effect for Textile Using the Underwater Explosion" *The 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021)*, OS20: *The 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021) IFS Collaborative Research Forum*, (2021.10.27-29), (Sendai, Japan), CRF-56, pp.123-124.
- [2] H. Ueda, K. Kitagawa, K. Ohtani, "Study on improvement of washing effect using underwater explosion phenomenon" *The 7th International Symposium on Energetic Materials and their Applications (ISEM2021)*, (2021.11.16-18), (Tokyo, Japan), A7-3, pp.62.
- [3] Y. Anshi, H. Ueda, K. Ohtani, K. Kitagawa, "Unsteady interaction between underwater

explosion and the concave curved wall" *The 7th International Symposium on Energetic Materials and their Applications* (ISEM2021), (2021.11.16-18), (Tokyo, Japan), A7-4, pp.63.

- [4] 上田颯, 北川一敬, 大谷清伸, "水中爆発現象と Textile の非定常干渉", 2021 年度衝撃波シンポジウム, (2022.3.9-11), 立命館大 (びわこ・くさつキャンパス) , 1C2-3.
- [5] 安司吉輝, 上田颯, 北川一敬, 大谷清伸, "凹型曲面壁周りにおける水中衝撃波の圧力変動", 2021 年度衝撃波シンポジウム, (2022.3.9-11), 立命館大(びわこ・くさつキャンパス), 1C2-1.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)  
(特許) (受賞) (マスコミ発表) なし

課題番号	J21L018
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	2021.4~2022.3
継続年数	1年目(発展)

分子動力学シミュレーションによる固液界面における不凝縮ガスに関する解析  
Molecular dynamics simulations on non-condensable gas at solid-liquid interface

堀 琢磨\*†, 菊川 豪太\*\*††, 上野 一郎\*\*\*

\*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,

\*\*\*東京理科大学理工学部機械工学科

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

固液界面上のナノバブルは、腐食の要因になるなど工学的に重要であるため、広く研究されている。具体的には、ナノバブルの生成や安定性に焦点を当てた実験的な研究が行われているほか、微細な現象の解析に有利な分子シミュレーションを用いた研究も数多く報告されている。一方で、多くの分子シミュレーションでは2次元での系や現実の水を再現しないモデルを用いるなどしており、より現実的な振る舞いを解析する必要がある。特に、界面ナノバブルにおいてコンタミネーションが意図せず混入することが起こりうるため、そのナノバブルへの影響の理解が不可欠である。

そこで、水および窒素気体からなる現実的な系を模擬した分子動力学シミュレーションにより界面ナノバブルの生成シミュレーションを行う。さらに、界面活性剤が界面ナノバブルの形状へ与える影響を明らかにする。

## 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において、分子動力学法を用いて不凝縮ガスからなる界面ナノバブルの生成シミュレーションを行った。この系では、グラファイト基板を底面に配置し、また天面にも圧力制御のためにグラフェンを設けた。さらに、底面のグラファイト基板の中央に疎水性サイトを設けた。分子動力学シミュレーションの第一段階として、天面のグラフェンにより圧縮方向に力を加えて系を緩和したのち、界面ナノバブル生成のために圧力を解放した。この結果、図 1(a)のように、疎水性サイト上に窒素ガスからなる界面ナノバブルが形成した。

このようにして生成した界面ナノバブルへ、界面活性剤を加えることにより、その体積及び形状へどのような影響があるかを調査した。ここで界面活性剤として、1-ペンタノールを用いた。界面活性剤の有無ごとの水分子の数密度分布を求め円筒座標系に変換した結果を図 1(b)に示す。この図から、界面活性剤の存在により、界面ナノバブルの体積は減少し、また平たい形状をとることがわかった。この結果は、以前に行った窒素を含まない蒸気泡の結果と同様であった。

さらに、水分子の数密度分布の気液界面を円近似することにより、界面ナノバブルの曲率を求めた。その結果、図 1(c)のように、曲率半径は界面活性剤の分子数の増大に従い増加することが分かった。

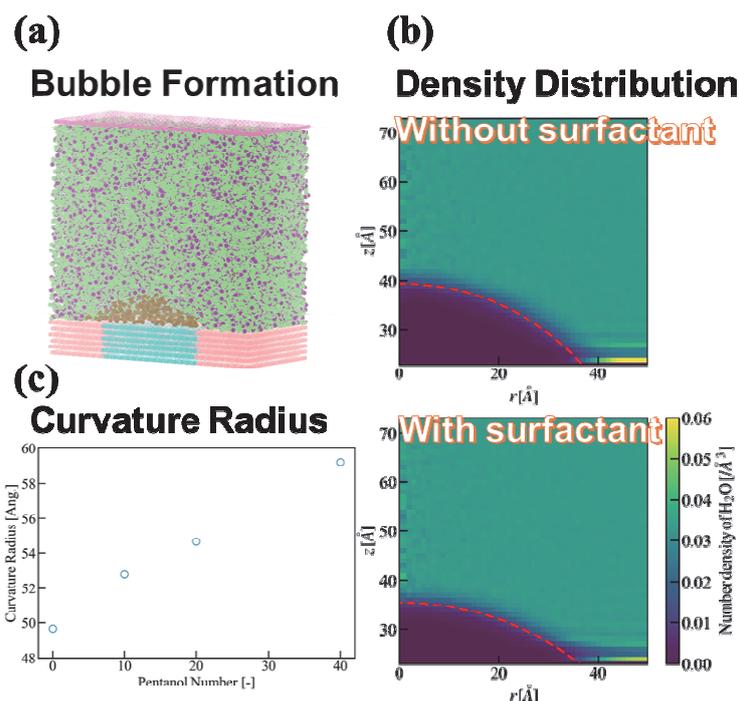


図1：(a)グラファイト基板上的の疎水サイトに形成する界面ナノバブルの分子動力学シミュレーション，(b)界面活性剤の有無による基板付近の水分子密度分布の違い，(c)形成した界面ナノバブルの曲率と界面活性剤分子の数の関係。

### 3. 研究目標の達成状況

これまでの分子動力学シミュレーションの結果から，界面ナノバブルの体積や曲率半径が界面活性剤によって制御可能であることがわかった．また，この結果は過去に行った蒸気泡の場合と同様であることも明らかとなった．一方で，より多様な表面状態でのバブルの形成や，応力に基づく変形現象の解明など，重要な知見を得るための研究が今後も必要である．

### 4. まとめと今後の課題

界面活性剤の存在により，固体壁面上に形成した不凝縮ガスからなるナノバブルの形状や体積が，どのように変化するかを明らかにした．今後はこれまでのシミュレーションに比べて，より多様な固体壁面の表面状態ごとの解析を行う．さらに，界面活性剤がナノバブルに及ぼす影響の機序を明らかにするため，ナノバブルおよび水内部の応力分布の解析を行う．以上により，界面ナノバブルの安定性や形状等の解明へ繋げる．

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 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, I. Ueno, and Y. Matsumoto, “Molecular Dynamics Study on Effect of Surfactant on Surface Nanobubble”, *18th International Conference on Flow Dynamics*, online, (2021).

#### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J21L021
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	2021.4~2022.3
継続年数	2年目

### 通気性のある生地を被覆した物体の空力改善に関する基礎研究

#### Improvement of Aerodynamic Performance of Flying Object Clothed with Fabrics of Air Permeability

長谷川 裕晃<sup>\*†</sup>, 大林 茂<sup>\*\*††</sup>, 中川 健一<sup>\*</sup>, 浅倉 祥太郎<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>宇都宮大学, <sup>\*\*</sup>東北大学流体科学研究所,

<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>所内対応教員

#### 1. 研究目的

本研究では、通気性を有する生地を被覆した物体表面の流れ構造に及ぼす影響を風洞実験により調べ、通気量と空気力との関係を明らかにすることを目的とする。スポーツ分野では、着用するウェアの重要性は認識されているものの、外被の通気量が作用する空気力にどう影響するのかは、学術的には理解されていない。生地の通気性に関しては、これまで抗力に関する評価が中心で、特に揚力に及ぼす影響は調べられてすらいなかった。一般に、揚力は、生地の通気量が大きくなれば単調減少的に落ちると考えられているが、我々の先行研究では、通気量と揚力との関係が必ずしも単調に変化するのではないという結果が得られた。そこでは、上記の通念に反し通気量が大きくなることではく離（失速）が抑制され、揚抗比の改善につながることもあった。本研究では、生地を被覆した物体の迎角を連続的に変化させながら、通気量の違いが引き起こす流れ場への影響を評価した。

#### 2. 研究成果の内容

本研究では、前年度までの結果で揚力傾斜に極端に違いが出た通気量を部分的に変化させた（パッチワーク）生地を用いて、流れ場を時系列 PIV 測定で評価した。パッチワーク生地はオリジナルの通気量（43.4 L/m<sup>2</sup>/s）と通気量を増加（65.8 L/m<sup>2</sup>/s）させた生地の組み合わせである。楕円柱前縁からコード長 50%の位置までの通気量を増加とした生地（Case3-1）、楕円柱後縁から 50%の位置までの通気量を増加した生地（Case1-3）を使用し、通気量が同一のオリジナル生地（Case-1）、通気がない生地（Case-0）との比較を行った。

先行研究より Case3-1 では他の生地と比べて最大揚力係数が増加していることが分かっている。本研究では揚力傾斜に違いが生じた理由を調べるために、楕円柱に被覆した生地近傍の流れ構造の解明を試みたが、生地表面でのハレーションにより、生地近傍のトレーサ粒子の撮影ができず、粒子の相関が取れないことから流れ場が評価できなかった。ハレーションの対策としてレーザー光の出力を下げての照射する方法、反射光をレーザーとは違う波長にして撮影レンズにフィルターをつけて反射光を映らないようにする方法などを実施したが、レーザー光出力を下げるとトレーサ粒子が映らない、柔らかい生地のため反射光の波長を変えられない結果となり、今回、生地近傍流れの評価においては課題を残す結果となった。

そこで、楕円柱後方の流れ場の比較を試みた。広範囲の撮影をするために、測定領域を図 2 のように分割して測定を行った。図 3 に測定結果を示す。スモークワイヤによる可視化では楕円柱表面から周期的な渦放出があり、その違いから通気量の影響を調査しようと試みたが、前述の通り平均場としての評価しかできず渦放出の挙動を捉えるまでには至らなかった。

領域を分けたことで平均場の流れの評価しかできなかったことが理由に挙げられ、また通気量による微小な変化が平均化処理によって消失してしまい流れ場の比較には至らなかった。また、今回はコロナ禍ということもあり、実験実施の制約があり、改善策を検討して試すことまではできなかった。

### 3. 研究目標の達成状況

楕円柱後方の流れ場の評価に関して、広範囲の測定のために測定範囲を分割、オーバーラップさせ平均化処理を行ったが、平均場では生地通気量の影響を判別し難く、また測定方法の効果的な改善策を見つけられず、評価ができなかった。後流構造の評価に関して、時系列PIVによって取得したデータから渦度を算出し、通気量の違いを渦構造の変化から言及する予定であったが速度場のデータ取得の時点で十分な計測は行えなかった。これには現象に対する知見や事前準備の不備が考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

通気性のある生地を被覆した物体の空力性能が変わる要因として、生地と物体の間に入った流れが、再び物体表面に出る位置が重要ということは分かったが、その流れが物体に発達す境界層に及ぼす影響は評価できなかった。今後は、測定方法、評価方法に関しても見直し、通気量の違いが物体表面流れに及ぼす影響を再度調べることに挑戦する。その際、空力特性（揚力傾斜、ヒステリシス）が既知の翼型模型に生地を被覆させ、流体力測定及び可視化を行う。使用する翼型模型形状、支持軸寸法の見直しなど測定系の振動対策を行った状態で事前の予備データの取得を含め、きちんと実験準備を行ったうえで研究を進めていく。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

- 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）なし

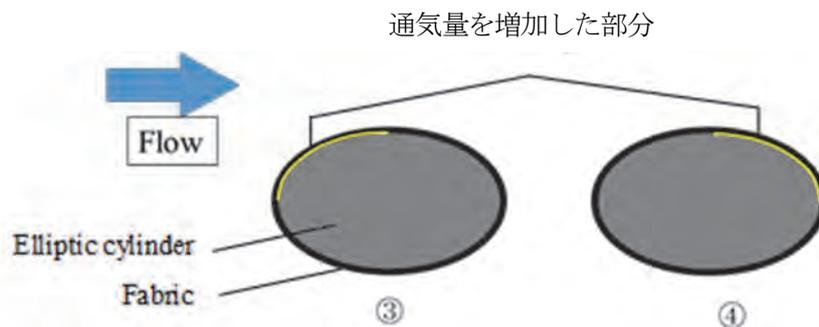


図1：使用したパッチワーク生地の概略図 1-3

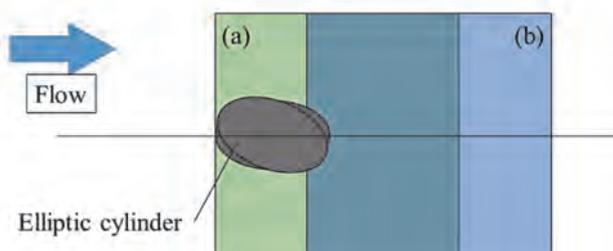


図2：分割した領域



図3：測定結果

課題番号	J21L022
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	2021.4~2022.3
継続年数	2年目

**加熱壁面に衝突する液滴の熱流動様相に関する研究**  
**Study of Hydrothermal Behaviors of Impinging Droplets on a Heated Wall**

岡部 孝裕\*†, 岡島 淳之介\*\*††

西山 幸輝\*, 城田 農\*

\*弘前大学大学院理工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

本研究では、噴霧冷却の高効率化とそのメカニズム解明を最終目的として、加熱壁面に衝突する単一液滴の熱流動様相を実験および数値解析によって明らかにする。特に、液滴衝突時のリム部分に生じる流体力学的不安定性と壁面温度の関係に着目し、固液界面の熱伝達現象に及ぼす影響を検証する。

**2. 研究成果の内容**

加熱壁面に衝突する単一液滴の固液界面における熱伝達特性を明らかにするために、高速度カメラ及び高速度赤外線サーモグラフィを用いて様々な条件における液滴衝突挙動と固液界面温度分布の高速度同時可視化を行った。図1は、本研究で使用した実験装置の概略図である。実験では、シリンジポンプによって供給される単一液滴を任意の高さから加熱された赤外線透過ガラス（サファイアガラス）に衝突させた。その時の衝突挙動を側面から高速度カメラ（10,000 fps, 17.3  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ , Photron 製 FASTCAM SA-Z）で撮影し、加熱面の温度変化を下面から高速度赤外線サーモグラフィ（1000 fps, 166  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ , 日本アビオニクス製 Thermo HAWK H9000）で撮影した。作動流体は水とし、壁面温度を 60°C から 135°C まで変化させて実験を行った。なお、衝突高さを変化することでウェーバー数およびレイノルズ数を変化させた。

図2は、本研究で異なる条件で観測された液滴の広がりフェーズを示しており、上図は光速度カメラで側面から撮影された可視画像、下図は赤外線サーモグラフィで下面より撮影された温度分布画像である。また、図3は各広がりフェーズと壁面温度およびウェーバー数との関係を表したフェーズダイアグラムである。まず、(a) **gentle spreading** フェーズでは、リムと呼ばれる液滴の縁部分が円形を保持したまま広がった。このフェーズは、温度およびウェーバー数が低い条件で観測された。(b) **contactline instability** フェーズでは、液滴の縁部分は円形を保持するが、固気液三相接触線が不安定化し、図のような接触線部分で指状擾乱が観測された。このフェーズは、低ウェーバー数かつ高壁面温度条件でのみ観測された。この **contactline instability** は、接触線近傍の蒸発の影響により発生したと考察しているが、その詳細な発生メカニズムは不明なままであり、今後検証が必要である。(c) **rim instability** フェーズでは、液滴のリム部分が不安定化し、フィンガリングが発生した。Rim instability は高ウェーバー数条件で発生し、壁面温度条件には依存しなかった。また、rim instability で観測されたフィンガーの長さは、壁面温度の上昇に伴い増大することが観測されており、接触線近傍の

蒸発が不安定性を増長する可能性が示唆された。

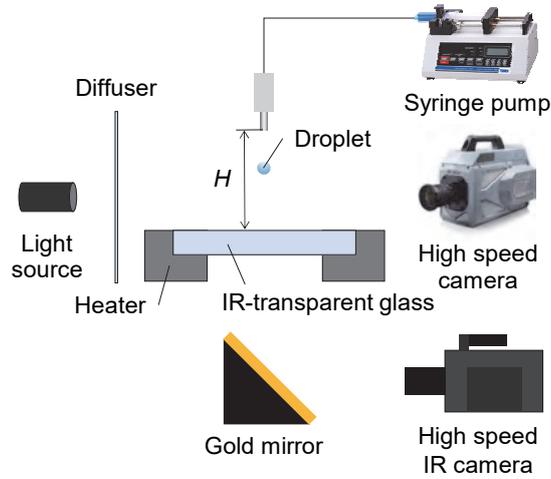


図 1 : 実験装置概略図

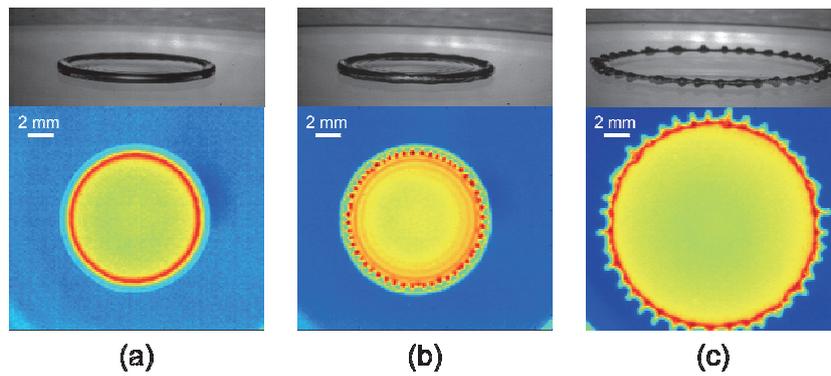


図 2 : 観測された広がりフェーズ (a) gentle spreading, (b) contactline instability, (c) rim instability.

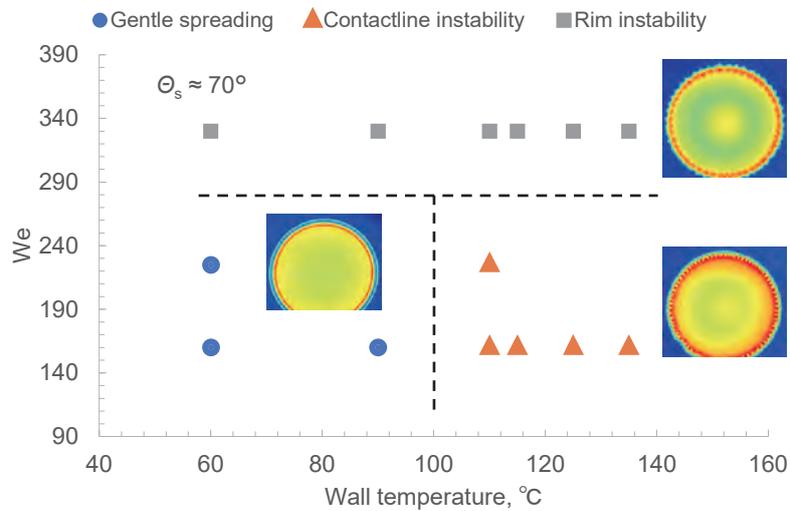


図 3 : 広がりフェーズと壁面温度およびウェーバー数の関係

次に、加熱壁面に衝突する単一液滴の界面の挙動を考慮した気液二相流と固体内熱伝導の3次元連成解析を実施した(図4)。計算では、作動流体はエタノールおよび水とし、液滴直径を1.2 mm、衝突速度を1.2 m/sとした。液滴と壁面の初期温度はそれぞれ50°Cおよび60°Cとした。なお、本計算では接触角を50°および120°とし、衝突挙動への影響を検証した。計算メッシュは、80×80×80とし、液滴および周囲を最大で16分割した。

計算結果より、接触角は液滴の衝突挙動に大きな影響を与えることが分かった。特に、衝突液滴のリムの形状を変化させ、液滴の最大広がり径や伝熱量に大きな影響を与えることが示唆された。今後は相変化や動的接触角を導入し、本研究で観測された *contactline instability* や *rim instability* の温度依存性に関する検証を行う。

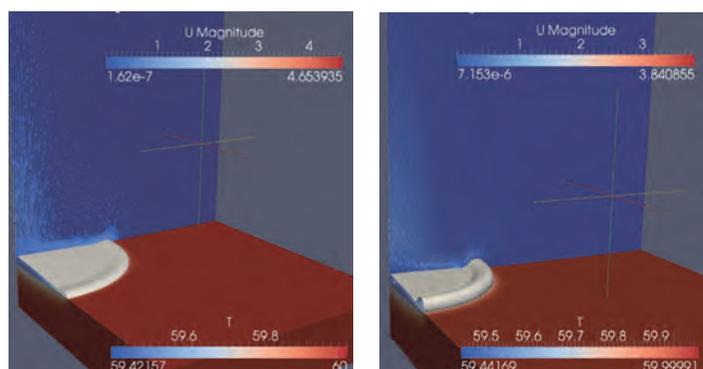


図4：気液二相流と固体内熱伝導に関する3次元数値シミュレーション結果  
接触角50°(左), 120°(右)

### 3. 研究目標の達成状況

加熱壁面に衝突する液滴の熱流動様相、特に壁面温度と液滴のリムで生じる流体力学的不安定性の関係を実験と数値解析によって明らかにすることを当初の目標として、研究を実施した。実験的アプローチでは様々な壁面温度やウェーバー数条件下で液滴衝突実験を行い、異なる壁面温度・ウェーバー数条件下で、3つの広がりフェーズが存在することを明らかにした。また、観測された広がりフェーズに関する壁面温度とウェーバー数のフェーズダイアグラムを構築できた。一方、数値解析的アプローチでは、OpenFOAMを用いた界面挙動を考慮した気液二相流と固体内熱伝導を連成させた数値解析手法によって、当該現象の解析を実施した。特に、流体力学的不安定性に大きな影響を与える接触角に着目し、液滴の衝突挙動に与える影響を検証することができた。以上のことから、当初目的をおおむね達成することができたと考える。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、加熱壁面に衝突する単一液滴の熱流動様相を実験および数値解析によって検証した。特に、液滴衝突時の広がり挙動をリムの形状によって① *gentle spreading phase*, ② *contactline instability phase*, ③ *rim instability phase* に分類できることを明らかにした。また、それらフェーズは固気液三相接触線の蒸発の影響を受ける可能性が示唆された。ただし、液滴衝突時の接触線近傍の蒸発と広がり挙動の関係についてさらなる検証の必要がある。

### 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] T. Okabe, K. Nishiyama, J. Okajima, and M. Shirota: Study of Hydrothermal Behaviors of Impinging Droplets on a Heated Wall, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-3, pp. 5-6.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

課題番号	J21L033
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	2021.4~2022.3
継続年数	1年目（発展）

**超低レイノルズ数流れにおける数值的・実験的研究による非定常空力現象の解明**  
**Experimental and Computational Study on Unsteady Aerodynamic Characteristics**  
**at Very Low Reynolds Number Flows**

佐々木 大輔\*†, 下山 幸治\*\*††  
赤坂 剛史\*, 岡本 正人\*, 大林 茂\*\*, 高橋 俊\*\*\*  
\*金沢工業大学工学部, \*\*東北大学流体科学研究所  
\*\*\*東海大学工学部  
†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

近年注目を集めているドローンを初めとして、超小型航空機の様々な用途での使用が注目されている。その一方、運用時間の制限や安定性の問題等が明らかになっており、超低レイノルズ数域における非定常空力特性を理解することで解決することが期待されている。超低レイノルズ数の流れ場においては、流れ場が複雑であり、レイノルズ数や形状の相違によって空力特性が大きく変化することが知られている。そこで、小型ドローンの性能向上・安定性向上を実現するために、実験及び数値解析を用いて超低レイノルズ数域における非定常空力学特性、特に動的特性について明らかにすることが目的である。

**2. 研究成果の内容**

物体がヒービング運動した時の流れ場が実際の現象として正しく再現できているかを確認するために、レイノルズ数 2800 の流れ場において、ヒービング運動する平板を対象に直交格子上で流体解析を実施した。その解析結果を、ヒービング風洞による可視化結果と比較した。ヒービング風洞では、翼がヒービング運動するのではなく、撮影機器と共に風洞自体が動くため、流体解析との比較に適した画像を取得することが可能である。実験による可視化と解析による可視化の比較の結果、流れが平板に沿って流れることや剥離渦が見られること等、大きな現象を実験と同じく捉えられているから、解析結果は実際の流れ場に近いたことが示された。そのため、本解析手法はヒービング運動時の物体周りの解析に妥当である。

本解析手法を用いて、平板とコルゲート翼の垂直力係数の比較を行った。比較に用いた平板はコード長に対し厚さ 1.5% であり、無次元周波数 0.5 の条件下でのコルゲート翼の凹凸が空力係数に及ぼす影響を調べる。図 1 にコルゲート翼と平板の垂直力係数を比較する。平板では、垂直力係数が 0 になるところを中央値としてヒステリシスループになっていることがわかる。そのため、平板では一周分分の羽ばたきで上下方向の力は相殺され、力が発生していないことがわかる。一方、コルゲート翼ではキャンバ効果により垂直力係数の平均値が正になっていると共に、同じ迎角変化に対する垂直力係数の振幅が大きくなっている。このことは、変形やピッチングを起さずに、コルゲート翼を上下に動かすだけでより大きな上向きの力が発生することを示している。また、図 2 に上昇時の瞬間圧力係数コンターの变化を示す。コルゲート翼では、凹凸の影響により上面に負圧領域が生じており、この効果によ

り垂直力係数がより大きくなると考えられる。

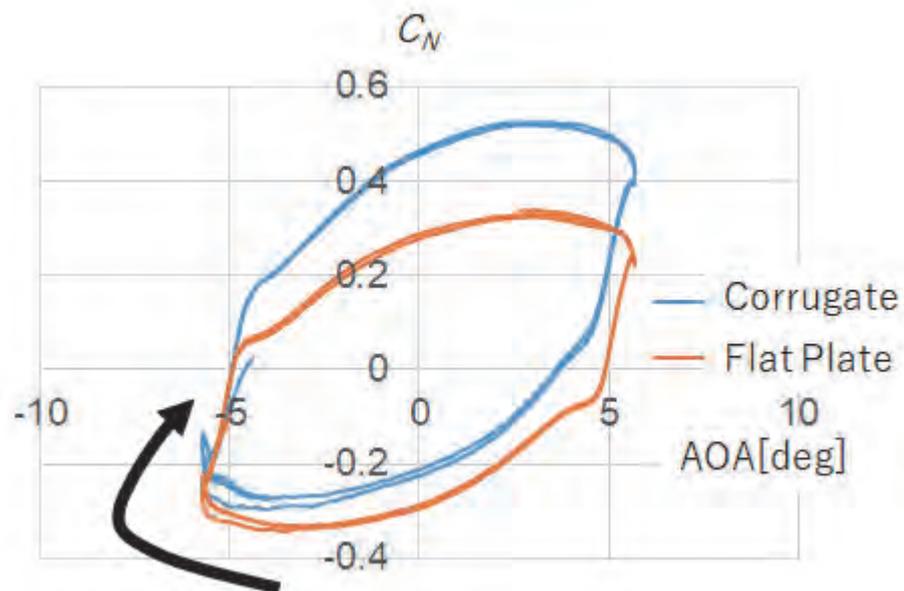
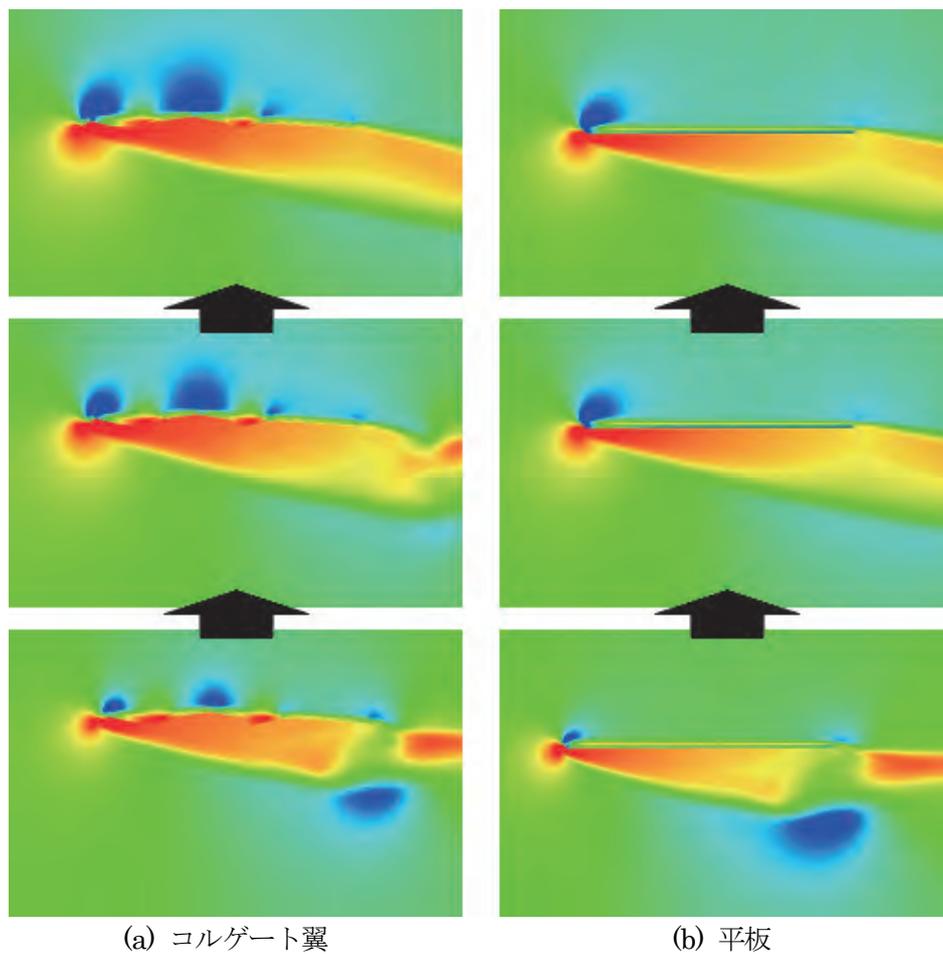


図1：ヒービング運動下のコルゲート翼と平板翼の垂直力係数の比較



(a) コルゲート翼

(b) 平板

図2：上昇時の瞬間圧力係数コンターの比較

### 3. 研究目標の達成状況

本研究において実施した実験的・数値的研究により、本解析で使用した流体解析手法が妥当であることを示した。その手法を羽ばたき翼に適用し、平板とコルゲート翼を対象に非定常空力特性を調べた。その結果、凹凸を持つコルゲート翼は、変形やピッチングを起こさずに、翼を上下に動かすだけで上向きの力が発生することを明らかにした。また、無次元周波数による空力係数や流れ場の変化を明らかにしたことから、今後のドローンの開発にとって役立つ知見を得られたと考えられることから、当初の研究目標を達成できたと考える。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、コルゲート翼と平板周りのヒービング運動を実施し、その動的特性の相違を調べた。また、無次元周波数によりヒービング運動するコルゲート翼の動的特性の変化を明らかにすることができた。今後、ピッチング運動等も含めた解析をすることで、より現実の羽ばたき運動に近い解析を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] 長沼龍太, 佐々木大輔, 岡本正人, 高橋俊: ヒービング運動するコルゲート翼に働く非定常流体力の数値解析, 第53回流体力学講演会/第39回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム講演集 (CD-ROM), オンライン, (2021).

[2] R. Naganuma, D. Sasaki, S. Takahashi, M. Okamoto: Computational Fluid Analysis of Corrugated Wing in Unsteady Motion Using Cartesian Grid, *AIAA AVIATION Forum*, Online, (2021). 口頭発表

[3] D. Sasaki, R. Naganuma, K. Mizumoto, T. Akasaka, M. Okamoto, S. Takahashi, S. Obayashi and K. Shimoyama: Experimental and Computational Study on Unsteady Aerodynamic Characteristics of Heaving Corrugated Wings, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-45, pp. 99-100.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J21L034
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	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

### 極低温液体水素中における気泡初生の量子分子動力学解析

### Quantum molecular dynamics analysis of bubble inception in cryogenic liquid hydrogen

津田 伸一<sup>†</sup>, 徳増 崇<sup>\*\*††</sup>, 永島 浩樹<sup>\*\*\*</sup>, 高橋 竜二<sup>\*\*\*\*</sup>

\*九州大学大学院工学研究院, \*\*東北大学流体科学研究所,

\*\*\*琉球大学, \*\*\*\*九州大学大学院工学府

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

燃料電池に代表されるように、クリーンエネルギーとしての水素の利活用に向けた動きが加速する中、水素の輸送・貯蔵の一手段として、液体水素の利用も本格的に検討されている。水素は、一般に 20K 程度の極低温で用いられることから熱侵入などによる相変化が生じやすい。そのため、液体水素を用いる流体機器の安全設計には気液混相流解析が欠かせないが、そもそも液体水素の相変化開始条件を規定するために必要な、気泡の発生率（初生速度）を適切に記述するモデルは存在していない。一方、液体水素中における気泡の初生には、原子核の量子効果に代表される水素特有の微視的性質が影響し得ることが示されており、水素の気液混相流解析には分子スケールの理解に立脚したモデル適用が本質的に必要である。以上を踏まえ、本研究では量子分子論的手法により、液体水素に特有の量子効果が気泡初生速度に及ぼす影響を数値的に解明するとともに、マクロな混相流解析に導入可能な気泡初生モデルの提示に必要な知見を獲得するのが目的である。

## 2. 研究成果の内容

昨年度までに、水素の量子性を分子スケールで適切に模擬できる経路積分セントロイド分子動力学 (CMD) 法、ならびに CMD の結果を参照した状態方程式に基づく密度汎用関数理論 (DFT) 解析により、液体水素中における気泡初生速度の特徴を解析してきている。その結果、熱力学的に相似とみなせる条件において量子性の有無の影響を比較すると、水素の量子性は、量子性の無い classical な流体に比べて、気泡の初生速度を 1 桁程度下げる効果があることがわかった。そこで、本年度は量子性が初生速度を下げるメカニズム、および水素の量子性を考慮した気泡初生速度の提示に有用な量子効果のスケールリングを検討した。

今年度の研究の結果、まず水素の量子性が気泡核生成速度を下げるのは、系を構成する分子の平均熱運動エネルギーに対して気泡核生成に必要な最小仕事 (エネルギー障壁) が相対的に大きくなるためであることが確認された。一方、表面張力  $\gamma$  と臨界半径  $r_c^*$  (気泡核が自発的に成長し始める最小気泡半径) を用いて気泡初生速度を支配する物理量であるエネルギー障壁  $W_c^*$  をスケールすると非常によい一致を示すこと、すなわち、エネルギー障壁に対する量子効果の影響は温度と臨界半径により見通しよく整理できることが示された (図 1)。

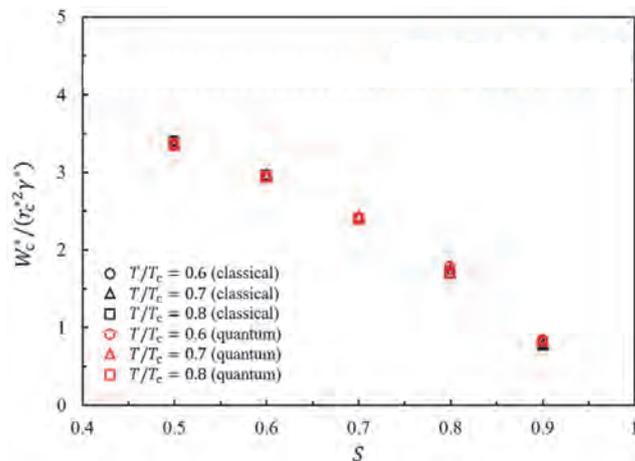


図 1：気泡初生に支配的なエネルギー障壁  $W_c^*$  のスケーリング結果（横軸は無次元過熱度  $S$ ）

### 3. 研究目標の達成状況

これまでの研究により、液体水素の量子性は気泡の初生速度を小さくする作用があること、一方で、気泡生成に必要なエネルギー障壁を表面張力と臨界サイズを用いてスケールすると、気泡初生速度のオーダを量子性の有無に関わらず、記述し得ることがわかった。特に後者の知見は、量子性が顕在化しない他の流体における既往の知見を概ねそのまま液体水素にも適用可能であることを示しており、すなわち気泡初生速度に対する水素の量子力学的性質のモデリングという観点において、当初の研究目標は達成できたと考えている。

### 4. まとめと今後の課題

今後は、量子効果により生じる分子間相互作用の変化に注目したより微視的なスケーリングを検討するとともに、本研究を通して得られた知見をマクロな混相流解析に適用することである。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] R. Takahashi, H. Nagashima, T. Tokumasu, S. Watanabe, S. Tsuda, Investigation of quantum effect of liquid hydrogen on homogeneous bubble nucleation using a density functional theory and molecular dynamics simulations, *Fluid Phase Equilibria*, 553 (2022), 12 pages, doi: 10.1016/j.fluid.2021.113300.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] R. Takahashi, H. Nagashima, T. Tokumasu, S. Watanabe, S. Tsuda: Molecular kinetic analysis of quantum effect on bubble nucleation in liquid hydrogen, *Proceedings of the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information*, Online, Japan, October, (2021), CRF-25.
- [3] 高橋竜二, 永島浩樹, 徳増崇, 渡邊聡, 津田伸一: 密度汎関数理論および量子分子動力学による極低温水素の量子性が気泡核生成速度に及ぼす影響の解析, 日本機械学会 2021 年度年次大会, (2021), J052-01.

#### 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	J21L040
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	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

**飛行する回転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\*\*\*, 野口 尚史\*, 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. 研究の目的と目標

### 1.1 研究の背景と目的

一般に、高レイノルズ数における三次元物体を過ぎる流れは航空力学や機械工学、スポーツなどのさまざまな分野で重要であるが、二次元物体と比較すると研究も少なく、不明な点も多い。3次元物体の基本構造としては球や円板などの軸対称物体が挙げられる。ここではパイプを取り上げ、さらに回転している状態を考える。

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。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。

### 2.2 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を行い、結果より得られたプログラムの問題点についての改善を行った。

### 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。数値解析においてはプログラムコードのミスを発見し、改善を行った。

### 4. まとめと今後の課題

本年度の活動で、広い迎角の範囲で、より精密、詳細な飛行パイプに働く流体力やモーメントを得ることが出来、それらがパイプの軌道にどう影響しているかを確認できた。数値解析においては観測実験とパラメータを合わせたシミュレーションを行い、いくつかコードにミスを見つけて改善を行った。現在結果が出ているのは一例のみであるため、今後さまざまなパラメータで数値解析を行い、計算することが望まれる。今後、異なる形状のパイプを作成し、形状効果における空力特性について調査する予定である。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 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）

なし

課題番号	J21L042
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2021.4~2022.3
継続年数	2年目

**水中ストリーマの高速進展機構**  
**Mechanism of high speed propagation of underwater streamer**

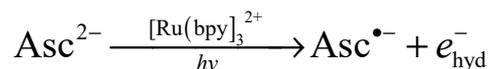
佐藤 岳彦\*†, 金澤 誠司\*\*††,  
 大谷 清伸\*, 小宮 敦樹\*, 中嶋 智樹\*, Liu Siwei\*, 日塔 開斗\*\*\*  
 \*東北大学流体科学研究所, \*\*大分大学理工学部, \*\*\*東北大学大学院工学研究科  
 †申請者, ††所外対応研究者

**1. 研究目的**

水中プラズマ流における放電現象は、相変化や熱流動場、電場、化学反応場を含む現象が重畳する複雑流動場を形成している。特に、放電形態の一つであるストリーマが、水中をどのように進展するかについては、電離進展理論と気泡進展理論があり、申請者らの今までの研究により正極性ストリーマにおいては電離進展機構を示唆する結果が得られている。しかしながら、これまでの研究により電離進展理論では、水中を秒速 20 km で電荷が移動することは説明できないことが分かってきた。そこで本研究では、申請者が提案している先駆水和電子仮説を証明することを目的とする。

**2. 研究成果の内容**

水中ストリーマの高速進展現象の解明に向け、水和電子の検出方法について開発を進めた。ここでは、水和電子を UV で生成し、生成された水和電子を検出する方法について検討した。本研究で採用した  $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]^{2+}/\text{Asc}^{2-}$  system を次式に示す。



この方法は、触媒である  $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]^{2+}$  に UV を照射すると、 $\text{Asc}^{2-}$  が  $\text{Asc}^{\bullet-}$  に変化する反応を促進させる機能があることを利用する。 $\text{Asc}^{\bullet-}$  が生成される際に水和電子を生成するため、このシステムを利用して水和電子の検出を試行した。入射光は高強度パルスレーザーの利用が一般

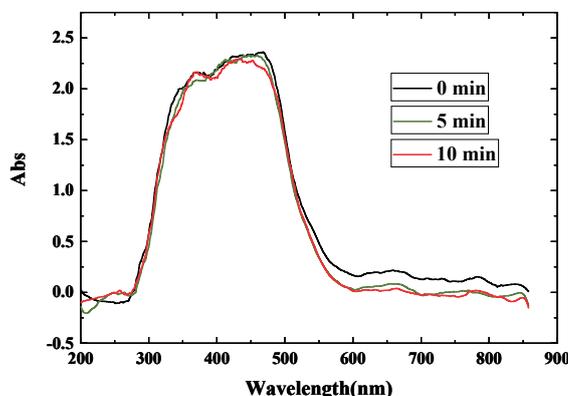


Fig. 1 Comparison of absorption in different treatment time.

的であるが、連続して生成される水和電子に焦点を当てるため、UV を利用した。[Ru(bpy)]<sub>3</sub><sup>2+</sup> ならびに Asc<sup>2-</sup> の吸光度について検討したところ、[Ru(bpy)]<sub>3</sub><sup>2+</sup> は、300–550 nm に、Asc<sup>2-</sup> は 300–400 nm に吸光する波長域があることを確認した。水和電子の吸光波長域は 600–700 nm 程度のため、これらの吸光波長域とは異なるため、水和電子の検出が可能であることを確認した。次に UV を照射し吸光度を測定すると、時間と共に 600 nm 以上の波長域で吸光度が減少することが示された。しかしながら、水和電子の吸収領域の増加は確認できなかったことから、UV の照射強度が十分ではないことが示唆された。

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、水中ストリーマの進展における電荷の状態を理解するため、水和電子の検出方法の開発を進めた。水和電子は密度が小さいと検出が困難なため、水和電子の密度を増やす工夫が必要であることが明らかになった。

### 4. まとめと今後の課題

来年度は、水和電子密度を増加させるため、スカベンジャーを用いて生成した水和電子をトラップし、トラップした水和電子を蓄えることで密度を増やすことを検討する。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

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）該当なし

（受賞）該当なし

（マスコミ発表）該当なし

課題番号	J21L053
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	2021.4～2022.3
継続年数	2年目

**再突入カプセル形状物体後流域の定量的密度計測**  
Qualitative density measurement of wake region behind re-entry capsule

太田 匡則\*†, 永井 大樹\*\*††  
廣瀬 裕介\*\*\*, 稲毛 達朗\*\*\*\*, 大谷 清伸\*\*  
\*千葉大学大学院, \*\*東北大学流体科学研究所  
\*\*\*サレジオ高専, \*\*\*\*湘南工科大学工学部  
†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

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し, 再突入カプセル形状物体まわりの非定常流れ場に対する定量的密度計測を実現し, 実験的な流れ場の解析と, カプセル形状の検討を可能にすることを目的とする.

**2. 研究成果の内容**

本年度も昨年度に引き続き, 新型コロナウイルスに関連した緊急事態宣言等により, 流体研での実験を行うことはできなかった. このため, 千葉大学においてカメラレンズの変更による計測視野の拡大と, それに伴うパルス発光 LED 光源ならびに駆動回路の設計, 制作を行い, それらを利用した計測システム全体の構造変更を行なった. 従来までは計測可能領域が約 60mm×40mm であったが, これを約 280mm×110mm へと拡大した. これによって背景画像も拡大する必要があり, 従来よりも広範囲を照射可能な LED 光源の作成を行なった. 露光時間は $\sim 4\mu\text{s}$  である. 従来は視野に対して飛翔体が相対的に大きかったため, 僅かな弾道のずれが計測の失敗につながっていたが, 視野を拡大することによって飛翔体の後流領域を含む広い領域に対する 3次元計測が可能となり, 実験成功率も大幅に向上させることができる.

**3. 研究目標の達成状況**

本年度は計測実験を行うことができなかったが, 再突入カプセルまわりの流れ場を 3次元的に計測するためのシステムの改良を行ない, 千葉大学所有の衝撃波管において予備実験を行った. これにより当初予想された成果を上げられる見込みとなった.

**4. まとめと今後の課題**

本研究により, 飛翔体まわりの非定常流れ場に対する 3次元密度計測をより広範囲の試験へ適用できる見込みである. 今後の課題としては, より高輝度なパルス光源を市販 LED を利用して安価に開発し, 様々な実験スケールにおける実験へと本手法を適用させる必要があると考える.

## 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] M. Yamagishi, Y. Yahagi, M. Ota, Y. Hirose, S. Udagawa, T. Inage, S. Kubota, K. Fujita, K. Ohtani, H. Nagai: Quantitative Density Measurement of Wake Region behind Re-entry Capsule: Improvements in Accuracy of 3D Reconstruction by Evaluating the View-Angle of Measurement System, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 16, No. 3, p. JFST0021 (2021), doi: 10.1299/jfst.2021jfst0021.

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] Masato Yamagishi, Jin Narayama, Shoki Sato, Masanori Ota, Yusuke Hirose, Kazuma Yomo, Koji Fujita, Kiyonobu Ohtani, Hiroki Nagai: Quantitative Density Measurement of Wake Region behind re-entry capsule, *ICFD2021 OS21(AFI-2021)*, CRF-41, (2021) pp.1-2.
- [3] M. Yamgaishi, J. Narayama, M. Ota, Y. Hirose, S. Udagawa, T. Inage, K. Fujita, K. Ohtani, H. Nagai: Reconstruction of Density around A Flying Sphere in the Ballistic Range, *The 19th International Symposium on Flow Visualization*, Session 13-6 (2021).

### 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	J21L058
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	2021.4～2022.3
継続年数	1年目

**はやぶさ型カプセルの後部形状が背面流れに及ぼす影響の解明**  
**Influence of the back shape of the Hayabusa type capsule on the wake flow**

山田 剛治\*†, 大谷 清伸\*\*††  
 \*東海大学工学部, \*\*東北大学流体科学研究所  
 †申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

本研究では、弾道飛行試験装置を用いた自由飛行試験により、遷音速領域におけるはやぶさ型カプセル背面流れの構造を解明することを目的とする。従来、飛翔体流れに関する研究は、風洞装置にスティング等を用いて模型を取り付けて行ってきたが、スティングの干渉により、背面流れの構造を正確に把握することは困難である。また、これまでの研究から、カプセル後部角度の違いにより流れ場と空力特性が大きく異なることを明らかにしている。そこで、解析結果を検証して流れ場構造の理解をさらに進めるために、自由飛行試験を実施して後部角度の違いが流れ場に及ぼす影響について実験的に明らかにする。

**2. 研究成果の内容**

本研究では、弾道飛行装置を1段式軽ガス銃モードとし、はやぶさカプセル型模型の遷音速領域での自由飛行試験を実施した。図1に実験に使用した模型の概要を示す。模型は真鍮製で、前面形状は全て同じであり、後部傾斜角度がそれぞれ異なる。実験では飛行中の模型周り流れのシュリーレン画像計測を実施した。また流れ場の詳細構造を調査するために、実験と同条件においてCFD解析を実施した。図2にマッハ数1.3における実験と計算の比較結果を示す。これよりすべての模型について離脱衝撃波の形状は、ほぼ同一であることが確認できる。模型背後の流れ場については、シュリーレン画像からは、明確な違いは確認できないが数値計算結果からは、背後に生じる渦構造に違いがあることが確認できる。実験と数値解析結果を比較すると、数値解析では、離脱衝撃波距離が過大評価されている。

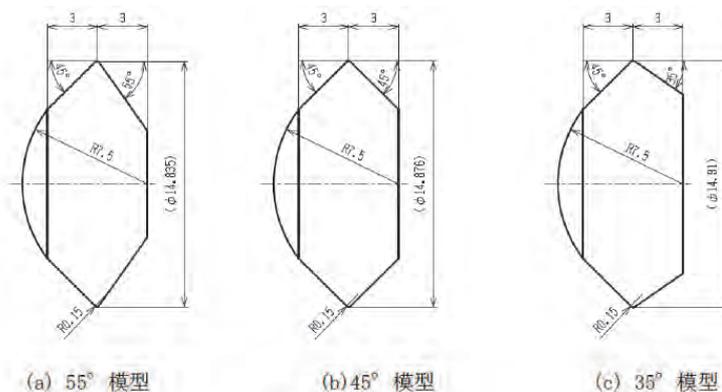


図1 射出模型

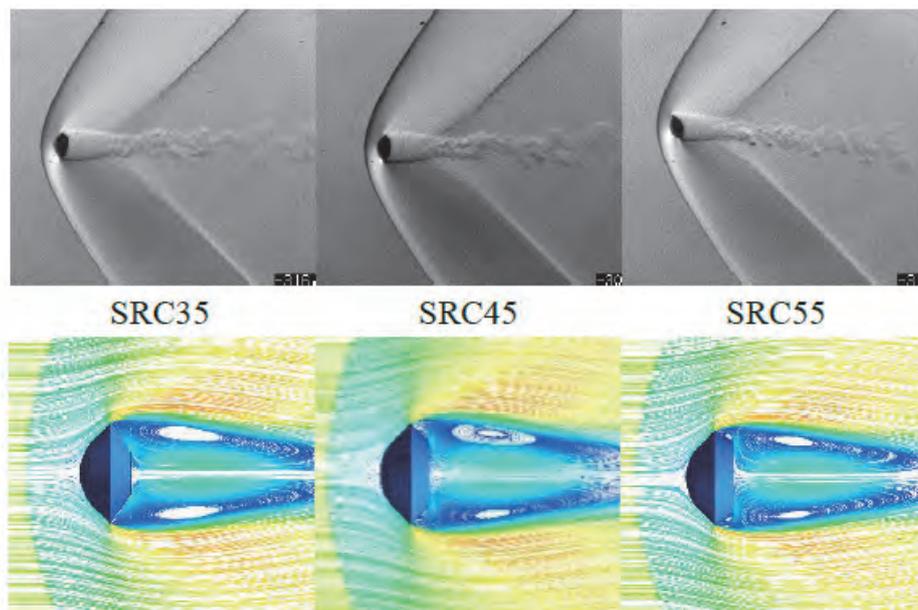


図2：カプセル模型周り流れの実験と数値解析の比較

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、スティングの影響の無い自由飛行試験によりはやぶさ型カプセル模型周り流れの特性について調査した。後部傾斜角度が異なることで背後の渦構造に違いが生じることが明らかになった。一方で数値解析では、離脱衝撃波距離が過大評価されており、今後改善が必要である。

先行研究により、カプセルの後部形状の違いが背面流れと空力特性に影響を及ぼすことを明らかにしているが、模型支持部による干渉の影響が大きく正確な流れ場の把握が困難である。そこで本研究で、自由飛行試験を実施することで模型時支部の影響を受けずに背面流れの調査を実施することができた。その結果、模型支持部の有無にかかわらず、模型後部形状により背面流れの構造が大きく異なることを明らかにすることができた。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、後部形状の異なるはやぶさ型カプセル模型を用いて、自由飛行試験により流れ場の調査を行った。その結果、後部形状の違いにより、模型背面の渦構造が大きく異なることが明らかになった。しかしながら、数値解析と実験における離脱衝撃波距離に違いが確認されたため、今後適用する数値解析モデルの検討が必要である。

### 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] 浅野涼香, 森山祐飛, 山崎威吹, 古頭龍太, 山下璃良威, 山田剛治, 織音速領域における大気突入カプセル背面流れに関する研究, 2021 年度宇宙航行の力学シンポジウム, (2021)

#### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J21L060
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	2021.4~2022.3
継続年数	1年目

課題名 タンパク質の GPI 修飾機構の解明および予測法の開発  
Project Title Development of prediction method in protein GPI modification

越中谷 賢治\*†, 太田 信\*\*††, 向井 有理\*\*\*  
\*青山学院大学理工学部, \*\*東北大学流体科学研究所  
\*\*\*明治大学理工学部  
†申請者, ††所内対応教員

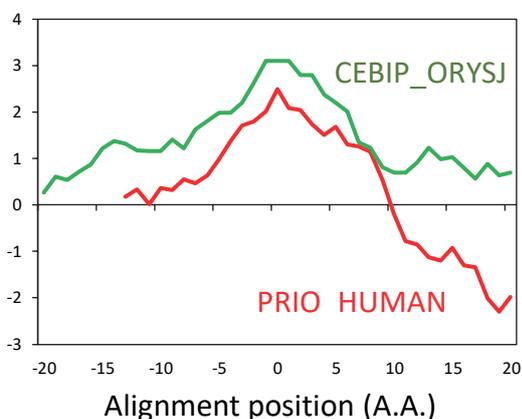
## 1. 研究目的

本年度は、タンパク質の細胞内局在に寄与する因子による分類と糖種の相関をもとに、タンパク質の細胞内局在性に応じた糖鎖修飾分布を明らかにした。加えて、バイオインフォマティクス解析の結果を実験的に明らかにするためにモデルタンパク質を選定し局在を人工的にコントロール可能な手法を構築した。また、同時に組織特異性を確認すべく、線虫の糖鎖修飾を解析し候補タンパク質を選定し、実験的アプローチのために基盤を整える。

## 2. 研究成果の内容

タンパク質の GPI 修飾をうけるタンパク質の解析および予測法の開発  
代表的なタンパク質のアミノ酸配列および GPI 修飾の有無が記載されているデータベースである Swiss-Prot より GPI アンカー型タンパク質を抽出してきた。特に、植物由来の GPI アンカー型タンパク質とヒトの代表的な GPI アンカー型タンパク質であるプリオンタンパク質を対象に GPI 修飾機構に重要であるといわれている要因を解析し、比較することを行った。

まず、植物由来の GPI アンカー型タンパク質とヒト由来の GPI アンカー型タンパク質であるプリオンタンパク質を対象にアミノ酸配列 N 末端の疎水性値を算出した。その結果、ヒトプリオンタンパク質と比べ、植物由来の GPI アンカー型タンパク質は高い疎水性値を持ち、同時に長い疎水性領域を保持していることが明らかになり、大きな違いがあることが示された。次に GPI 修飾を受ける際に最も重要なタンパク質 C 末端部分の疎水性値を解析した。前項と同様に疎水性解析を行った結果、ほとんど同じ疎水性値を示しており、長さもほとんど変化がないことがわかった。その結果、GPI 修飾を受ける領域では植物、ヒトではほとんど違いがないことが明らかにされた。最後に、両者の疎水性領域を示しているアミノ酸配列に着目した。疎水性値の高いアミノ酸は複数存在しており、当該領域にどのようなアミノ酸が選択的に選ばれ疎水性値を保持しているかを調査した。その結果、植物由来の GPI アンカー型タ

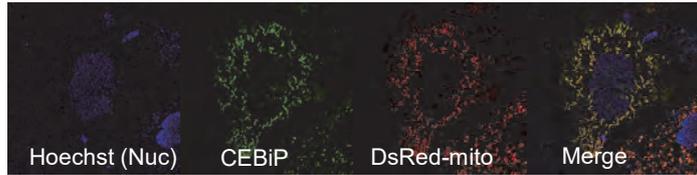


ンパク質では優位にイソロイシンとバリンが疎水性領域を形成しており、ヒトではほとんどがロイシンによって疎水性領域が形成されていた。この結果は、植物とヒトで存在するアミノ酸の数に依存している可能性が示された。

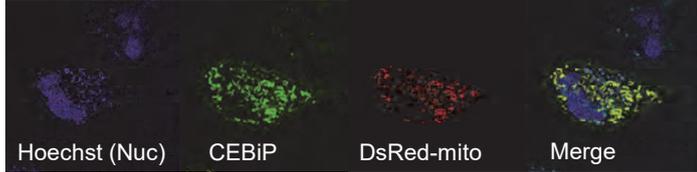
上記の研究内容からモデルタンパク質を作成し、実験的に検証を行った。植物由来の GPI アンカー型タンパク質

CEBiP をもとに、局在性に関与するシグナル領域前後に AcGFP を導入し、最適な条件を検討した。GPI 修飾に寄与する AS 領域の前に GFP を導入することで、適切にオルガネラを経由し細胞膜に局在化することが本研究で示された。

(a) CEBiP\_SP-AcGFP-CEBiP-CEBiP\_AS



(b) CEBiP\_SP-CEBiP-AcGFP-CEBiP\_AS



### 3. 研究目標の達成状況

一方で、DsRed-Mito を同時に HeLa 細胞に導入することで、キメラ CEBiP がミトコンドリアに誘導されていることから局在性をプラスミドに変異を導入せずにタンパク質局在性を変化させられることが新たに明らかとなった。以上のことから、研究目標の基礎は達成していると考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

当該年度において、GPI 修飾を受けるタンパク質を解析することにより得られた結果をもとに、バイオインフォマティクス解析と実験的検証により、モデルタンパク質をコードする複数の遺伝子をクローニングし、モデルタンパク質の細胞内局在性を人工的に制御することに成功した。これらの実験結果を基にさらに細胞内でのタンパク質の輸送モデルの構築が可能となれば、データベースへの還元を行うとともに、実験による新たな発見が期待される。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

\*[1] K. Etchuya, M. Doi, Y. Mukai, “Sugar Type Discrimination of Protein Sugar Modification based on Subcellular Localization” *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Flow Dynamics*, 2021.

#### 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	J21L069
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	2021.4~2022.3
継続年数	3年目

**実際の構造を反映させた多孔質材料内部の固気反応を伴う物質移動と  
構造変化の大規模シミュレーション**  
Large-scale simulation of mass transfer with solid-gas reaction  
in porous material with actual structure

松下 洋介\*†, 小宮 敦樹\*\*††, 沼澤 結\*, 青木 秀之\*  
\*東北大学大学院工学研究科化学工学専攻, \*\*東北大学流体科学研究所  
†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

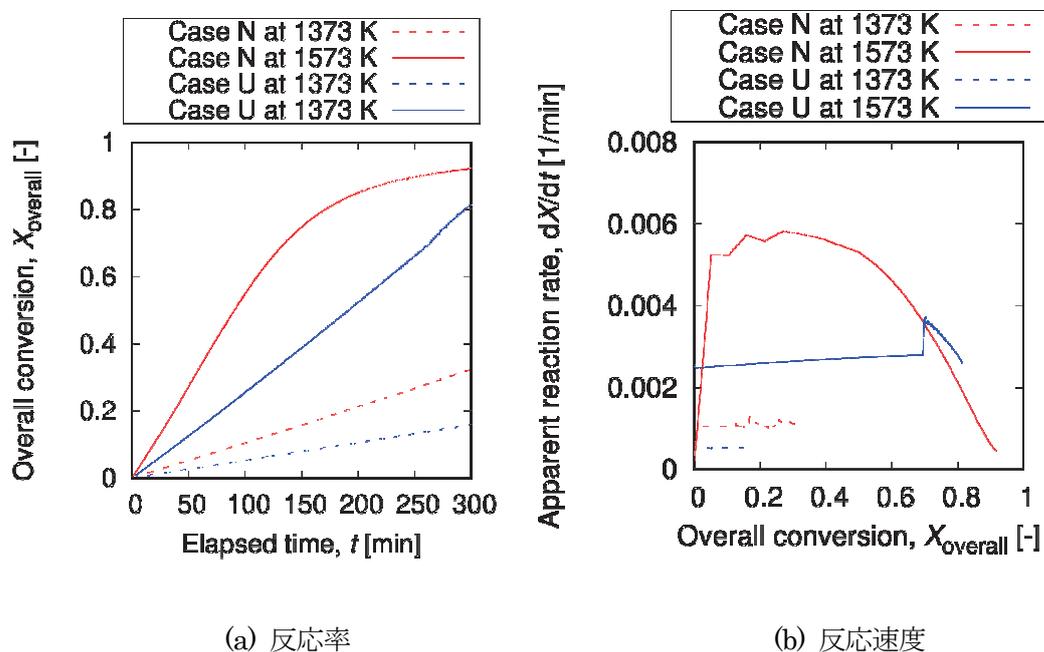
コークスの不均質な構造を直接反映させた有意性を検討するため、比較対象として均質なモデルに対しても同様の解析を行った。その結果として、X線CTを用いて不均質な構造を直接反映させた場合はコークスが不均一に脆化し、反応後期では均質なモデルを用いた場合には表現できない炭素基質ボクセルが集中する領域のみが残存した。さらに、全体の反応率および見かけの反応速度は均質なモデルを用いた場合ではほとんど単調に変化したものの、不均質な構造を直接反映させた場合では非線形な変化を示した。

## 2. 研究成果の内容

円柱状のコークスのマイクロX線CT像を撮像した。なお、画面分解能は20.6  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  であり、スライス厚は32  $\mu\text{m}$  である。本研究では、コークスが気孔および炭素基質から構成されると仮定したうえで、Otsuの手法に基づいて2値化し、コークスのX線CT像におけるボクセルを気孔と炭素基質に分類した。2値化した画像を積層させることで、コークスモデルを作成した(Case N)。また、比較対象として均質な解析対象も作成した(Case U)。この解析対象の大きさはCase Nと同様に $\phi 20 \times 14 \text{ mm}$ とした。また、炭素基質ボクセルの密度はCase Nと同じである。解析対象内のすべてのボクセルに空隙率 $\epsilon$ を与えることで、解析対象内部に均質な気孔構造を形成させた。なお、Case Nの解析対象全体における平均の気孔率が0.49であるため、初期のタイムステップにおけるボクセルの空隙率 $\epsilon$ を0.49とした。また、Case Uの各炭素基質ボクセルの表面積は、コークスモデル全体の表面積がCase Nと等しくなるように設定した。

図1にコークス全体の反応率および見かけの反応速度の経時変化を示す。いずれのCaseにおいてもみかけの反応率は、全体の傾向として時間の経過とともに単調に増加し、Case Nの1573 Kでは反応時間200 min以降において傾きが減少する非線形な挙動が見られた。これは図1(b)に示す見かけの反応速度からもわかり、反応後期において反応表面積が減少したためである。また、いずれの温度においてもCase Nの全体の反応率および見かけの反応速度はCase Uよりも大きい値を示した。反応温度1373 Kでは、Case Nの見かけの反応速度がCase Uよりもおよそ2倍大きかった。一方、反応温度1573 Kでは、Case Nの見かけの反応速度は全体の反応率が0から0.5の範囲ではCase Uの2倍程度大きかった。この差は2つのCaseで表面積とCO<sub>2</sub>の拡散性が異なるためである。また、全体の反応率が0.5以上の範囲で

は両者の差が小さくなる傾向が見られた。これは両者の全体の表面積が同程度となったためである。



(a) 反応率 (b) 反応速度  
図1：反応率の経時変化と反応率に対する反応速度

### 3. 研究目標の達成状況

実際の構造を反映させた多孔質材料内部の固気反応を伴う物質移動と構造変化の大規模シミュレーションとして、コークスが本来有する複雑な構造を考慮することで実際に観察される反応挙動を表現することができた。これは、反応工学で用いられる迷宮度などのパラメータでは表現することはできないと考える。

### 4. まとめと今後の課題

X線CT像を直接反映させることで、コークスが本来有する構造を再現し、また、反応に伴う構造の変化も表現可能であることを示した。今後X線CTの技術が発展し、解像度が増加することで、さらに微細な構造も考慮可能であると考えられる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 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] Y. Numazawa, Y. Matsukawa, Y. Matsushita, H. Aoki, A. Komiya, Large-Scale Simulation of Gasification Reaction with Mass Transfer for a Full-Scale Porous Model: Temperature Dependency, *the 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2021)*, Online, (2021), pp.24-25. CRF-10.

課題番号	J21L070
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	2021.4~2022.3
継続年数	2年目

ナノ構造界面での気体分子散乱特性の分子動力学解析  
 Scattering properties of gas molecules on interfaces of nanostructures  
 using molecular dynamics analysis

小崎 祐助\*, 武内 秀樹\*\*††

杵淵 郁也\*\*, 徳増 崇\*\*\*†

\*高知工業高等専門学校, \*\*東京大学大学院工学系研究科

\*\*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所外対応研究者

## 1. 研究目的

マイクロ・ナノデバイス, バイオセンサー, 分離膜, 燃料電池内のナノ細孔等の気体輸送に対しては, 原子・分子の流れとして取り扱う必要性がでてくる. このような高 Knudsen 数流れでは, 気体分子は他の気体分子よりも界面と数多く衝突が起こるため, 流れ場が界面での気体分子散乱特性に強く依存し, その把握が熱流動場の理解に極めて重要となる. しかしながら, 気体分子散乱特性への影響因子は多岐にわたり, それらをすべて考慮した適切な気体分子反射モデルは存在していない. そこで本研究では, マイクロ・ナノスケールの気体の熱流動特性の正確な把握に必要な界面での気体分子散乱特性の解明に向けて, 原子レベルの界面状態の相違による気体分子散乱挙動について分子シミュレーション解析を行い, 気体-ナノ構造界面における気体分子散乱特性に与える影響要因やその散乱メカニズムを基礎的レベルで明らかにし, 有用な気体分子反射モデルを提示することを目的としている.

## 2. 研究成果の内容

昨年度の知見に基づき, ナノ構造界面を有する金表面でのアルゴン気体分子の散乱特性を調査するために, 二平板壁間に温度差を有する Couette 流れを DSMC 法と分子動力学法を組み合わせた方法により解析を実施した. 表 1 は, 両平板温度が等しい場合の速度比  $S$  や原子レベルの表面構造の違いによる接線方向運動量適応係数  $\alpha$  の値を示している. 平滑固体表面に比べてナノ構造表面での接線方向運動量適応係数が増加していることが明らかとなった. 図 1 は, ナノ構造の金固体表面でのアルゴン気体の入射・反射分子に対する分子速度分布関数を示している. 反射分子の速度分布関数が, 平滑な金固体表面と同様に拡散反射の分布に近い結果が得られていることが示されている.

表 1: 接線方向運動量適応係数  $\alpha$

Ar-Au ( $T_R=1.0$ )	Flat solid surface		Nanostructured solid surface	
$S$	1.0	2.0	1.0	2.0
$\alpha$	0.88	0.90	0.95	0.95

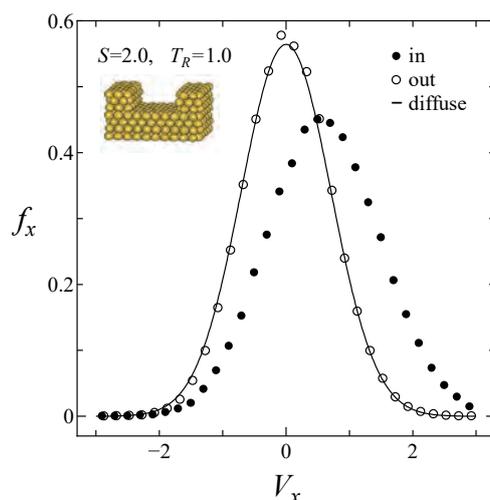


図1：ナノ構造界面での入射・反射分子に対する接線方向の分子速度分布関数

### 3. 研究目標の達成状況

今年度は、昨年度の平滑な金固体表面でのアルゴン気体分子の散乱解析の結果をもとに、原子レベルの界面構造を有する気体分子散乱挙動について、DSMC法と分子動力学法を組み合わせた手法により、巨視的な流れ場や固体表面の原子レベルの形状変化による流速分布への影響や分子速度分布関数、運動量適応係数等の散乱特性を明らかにすることができた。気体分子散乱データと界面情報との関連性を精査し、界面構造に対して重要な因子の解明や散乱モデルの構築にむけて、本研究は、当初の目標を達成しつつあると考えている。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、二平板間に温度差を有するCouette流れにおいて、壁面での気体分子の散乱挙動に対して、分子動力学法による干涉解析を実施し、ナノ構造界面を有する金固体表面でのアルゴン気体分子の散乱特性として、壁面温度や壁面速度の違いによる分子速度分布関数や接線方向運動量適応係数を求め、固体表面の原子レベルの形状変化による気体分子散乱特性への影響について定量的な評価を行った。今後は、固体表面における気体分子散乱の核となる重要な素過程の解明を目指す。

### 5. 研究成果

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）  
なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Y. Kosaki, H. Takeuchi, I. Kinefuchi, and T. Tokumasu: Characteristics of Reflected Gas Molecules on Interfaces of Nanostructures, *The Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information (AIFI-2021)*, (2021), CRF-26.

- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J21L084
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	2021.4～2022.3
継続年数	2年目

### 種々の微粒子流れの数値解析法の開発と工学的応用

Development and application of numerical method for various particulate flows

高橋 俊\*†, 大林 茂\*\*††

\*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

ロケットノズルからの排気中の金属や水滴や、内燃機関の筒内の粒子状物質、流体食品中の固形食材、噴霧流中の液滴など、様々な微粒子を含む混相流が我々の身の回りに存在する。これらの混相流の工学応用に向けた特性の把握のため、埋め込み境界法を用いた微粒子周りの流れ場の解析と、それらをモデル化した離散要素法による流れ場の高速・高精度な再現を目的として研究に取り組む。中でも本研究では非ニュートン流体中に固体の微粒子が混在する流れ場を扱い、数値モデル化と高速・高精度な流れ場予測を行う。

#### 2. 研究成果の内容

埋め込み境界法を用いた CFD を応用して多数の粒子を含む非ニュートン性流体の解析手法の精度検証と確立に取り組んだ。管内流れに負荷する圧力差とその時の流量、また粒子の挙動を実験で計測し、それを数値解析で再現するための手法を構築した。最終的に実験で確認された圧力と流量の関係が定量的に再現できたことから、さらに粒子の面内分布を検証すべく研究を進めている。その中で多数の粒子が含まれた流れ場の安定な解析手法も確立すべく取り組み、結果的に粒子の体積占有率が高い流れ場も安定に解析できることを示した。図 1 は粒子の体積占有率が 15% の際非ニュートン流体の速度と粘度の可視化図である。このように実際の製品で見られるような体積占有率が高い管内流に対しても安定に解析が行えることと、粒子と流れ場の干渉によって速度と粘度が非定常的に変化する様子が確認された。また、これらの結果でも時間平均、面内平均の圧力差と流量の関係では実験結果を再現できている。そこで今後は面内の粒子の位置分布や速度分布を実験値と定量的に比較することが課題である。

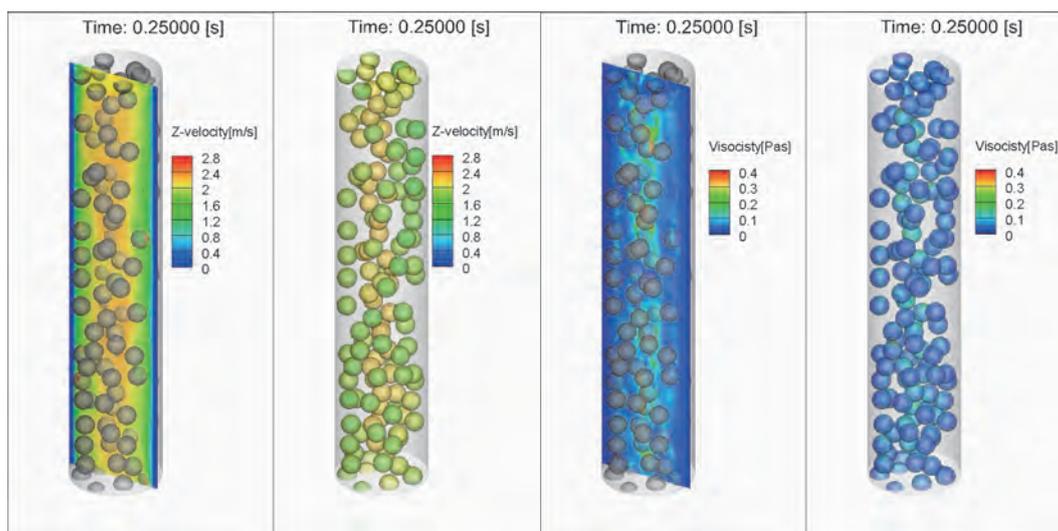


図 1：粒子の体積占有率 15% の非ニュートン流体の流れ  
 (最左：中央断面上下方向速度分布，左：粒子上下方向速度，右：中央断面粘度分布，最右：粒子表面粘度分布)

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、最終的には離散要素法を応用した迅速な解析が重要であると考え、そのために CFD により内部流動現象の把握と、実験で得られる流量と圧力差の関係の再現を最初の目的に取り組み、これらの特性を定量的に再現する数理モデルは構築できた。そこで次に面内の粒子の位置分布の再現を目指して解析を進め、現在は過去の Segre-Silberberg の実験結果を再現すべく、CFD と離散要素法と実験結果を比較中である。今後はこれらの検証を進めて粒子の挙動の定量的な比較検証を行い、その妥当性を示す。これによって非ニュートン流体中において離散要素法を用いた簡易な粒子の挙動を予測が可能となる。

### 4. まとめと今後の課題

最終的に離散要素法を応用した迅速な解析を実現するために、これまでに固液混相流の CFD により管内の粒子の内部流動現象の把握と、流量と圧力を定量的に再現する数理モデルを構築した。その後、多数の粒子を含む非ニュートン性流体への適用性を検討して、粒子の体積占有率 15% まで安定に解析が可能であることを示した。現在はこれらに対して PIV を応用して粒子の速度分布を計測し解析の妥当性検証を行いつつ、離散要素法の適用を検討している。その後、粒子の抗力係数、揚力係数のモデル式にデータ同化を応用した高精度化が可能と考えており、早急にそれらの実証を行うべく進める。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] S. Nara, S. Kawamata, Y. Kawamoto, S. Takahashi, T. Nohara and S. Obayashi: Numerical Simulation of Non-Newtonian Flow including Multiple particles, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai*,

(2021), CRF-59

- [2] S. Kawamata, Y. Kawamoto, S. Nara, T. Nohara, S. Takahashi and S. Obayashi: Multiphase Flow Simulation of Non-Newtonian Fluids including Many Solid Particles through Corrugated Tube, *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2021)*, OS20-33
- [3] 川俣終介, 川本裕樹, 奈良祥太郎, 野原徹雄, 高橋俊, 大林茂: 非ニュートン流体の数値解析における圧力流量特性を再現するモデルの開発と応用, 混相流シンポジウム 2021 (2021)
- [4] 川俣終介, 川本裕樹, 奈良祥太郎, 野原徹雄, 高橋俊, 大林茂: 複雑な形状を有する管の内部を流れる非ニュートン流体解析, 第34回計算力学講演会 (2021)

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J21L085
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	2021.4~2022.3
継続年数	2年目

**自励振動ヒートパイプの設計高精度化に向けた低次元化モデルの開発と応用**  
**Development and application for Accurate Design of Oscillating Heat Pipe**

高橋 俊\*†, 永井 大樹\*\*††  
 \*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**

低コストの熱輸送デバイスとして様々な機器への応用が期待される自励振動ヒートパイプは加熱部と冷却部の温度差のみを駆動力として外力を用いないメカニズムと、管内の圧力振動を利用した大容量の熱輸送の特長を有する。しかしながら安定な動作とその動作限界の予測等はいまだ困難であるため、現在も研究開発が盛んである。そこで本研究では高精度に性能予測を行う数値解析法の開発を行ってヒートパイプの流動形態を定性かつ定量的に再現することで自励振動ヒートパイプの高精度設計に繋げる。今年度は、管内の壁面近傍に着目した数値解析を行って、壁面近傍の液膜に関連した顕熱と潜熱の輸送メカニズムに着目し、気泡の成長模擬の解析を行って適用性を検討した。

**2. 研究成果の内容**

数値流体解析によりヒートパイプ内部の流動現象を再現するため、気液二相流中において物体を含む気液二相流と気泡流の流動挙動を解析した。本研究では潜熱と顕熱の両者の輸送を行うヒートパイプに着目し、内部の伝熱特性予測に重要な蒸気泡周りの液膜内部の熱伝達特性を把握すべく、level-set法とghost-fluid法に基づく形状任意性の高い数値モデルによって相変化を再現すべく取り組んだ。気泡の成長を模擬したStefan問題によって提案手法の妥当性について検討した。領域の中心に配置された半径 $R=1.56$ の円形状の相内部に対し温度 $T=0$ 、その他の領域に $T=-0.5$ を初期条件として設定し、時間経過に伴い形成される温度場と相界面の移流に関して理論解との比較を行った。図1左に $t=1.5$ における気液界面と温度分布、図1右に中心軸上における各点の温度を示した。温度は相界面から半径方向に減少する傾向を示し、各格子解像度において相界面の位置と周囲の温度分布は理論解と同様の傾向を示した。

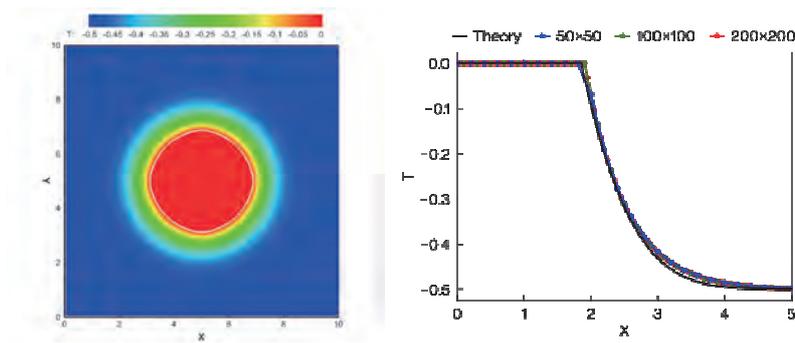


図1：2次元 Stefan 問題の解析結果  
(左：温度分布，右：格子解像度ごとの温度)

### 3. 研究目標の達成状況

解析手法の検証のため1次元と2次元の Stefan 問題の理論解と格子解像度を変えた場合の比較を図1と図2のように行って、いずれの結果も良好な一致を見せており、本解析手法が良好な相変化の特性を示すことが確認された。

また応用計算として細管内部で強制振動を受ける気泡の解析を行った。得られたキャピラリ数と液膜厚さの関係を図2に示した。また解析中の瞬時の温度分布を図3に示した。これらの傾向は先行研究の結果と良好に一致を見せており、今後はこちらに相変化モデルを適用した場合に液膜の内部にどのような変化が生じるかを詳細に検討する。

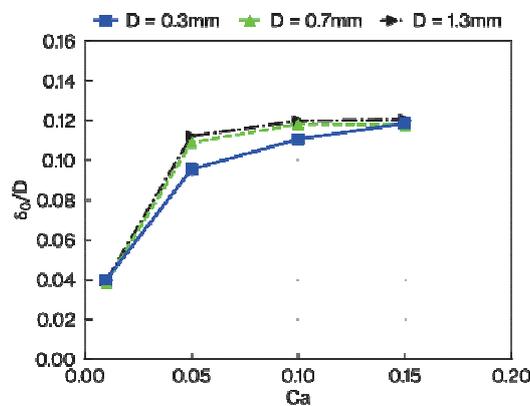


図2：二相流解析による細管内部の振動気泡の特性

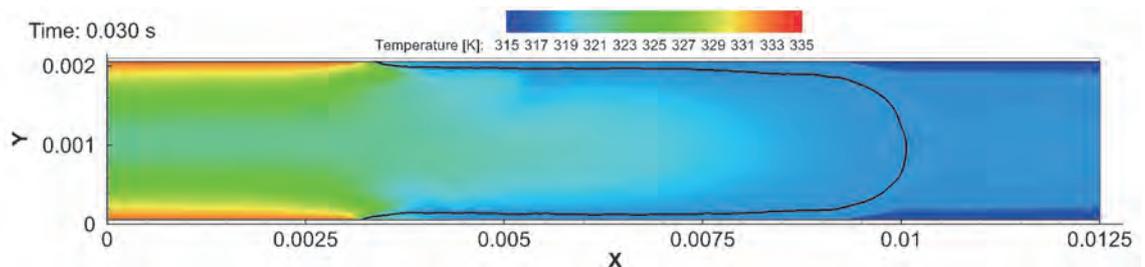


図3：振動気泡周りの界面形状と瞬時温度分布

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、より信頼性に富む結果と実際の設計に活用できる結果を得ると同時に社会に還元できる設計解析手法の開発を狙い、自励振動ヒートパイプの温度変化ならびに相変化現象の再現を目指して、振動する気液二相流内部の CFD 解析手法の構築に取り組んだ。その結果、Stefan 問題による理論値との整合性の確認と、振動気泡と液膜厚さに関して先行研究との一致を見た。今後は相変化の安定な解析手法の構築と、それによる潜熱と顕熱の輸送割合の定量化、さらにはそのメカニズム解明を行って自励振動ヒートパイプの性能向上につなげるべく研究を進める。

#### 5. 研究成果

##### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Y. Kawamoto, S. Takahashi, S. Nara, S. Kawamata, and H. Nagai: Two-Phase Flow Simulation of Heat Pipe Using Sharp-Interface Level Set Method with Phase Change, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-42

##### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J21L087
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	2021.4～2022.3
継続年数	2年目

### 航空機体と稼働エンジンとの統合解析

Integrated analysis of an aircraft body and an operating engine

千葉 一永<sup>\*†</sup>, 大林 茂<sup>\*\*††</sup>

<sup>\*</sup>電気通信大学大学院情報理工学研究所, <sup>\*\*</sup>東北大学流体科学研究所

<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>所内対応教員

#### 1. 研究目的

メーカーがエンジン単体で設計している航空機エンジンは、機体の影響を少なからず受けるが、現在はモデル化で対処しており、今後の高性能エンジン設計には変革がなければ世界に後れを取る。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な統合解析を世界で初めて行い、今後の環境適合型航空機の設計に先鞭を付ける。

#### 2. 研究成果の内容

胴体、主翼、ナセル・パイロン・ロータ・パッセージを個別に用意し解析モデルを生成するシステムを構築し、機体側にはNASA CRM (AIAA DPW6 type)を参考に、エンジン側にはNASA Rotor 67に基づき、各形状を再定義、モデル化し、表面格子は同一で空間格子密度を変更した coarse mesh と fine mesh の2格子を用意し、解析を始めた。本解析は、JAXA 開発の移動格子法ベース3次元非定常圧縮性 Navier-Stokes ソルバ FaSTAR-Move を使用させて頂いている。Fine mesh に対し、研究室内で用意した計算サーバではメモリが足りなかったため、coarse は弊研究室計算サーバで、fine はAFI-NITYで、それぞれ解析を行い、パイロンと主翼との結合部付近の流体構造から、現象を解釈するに至った。

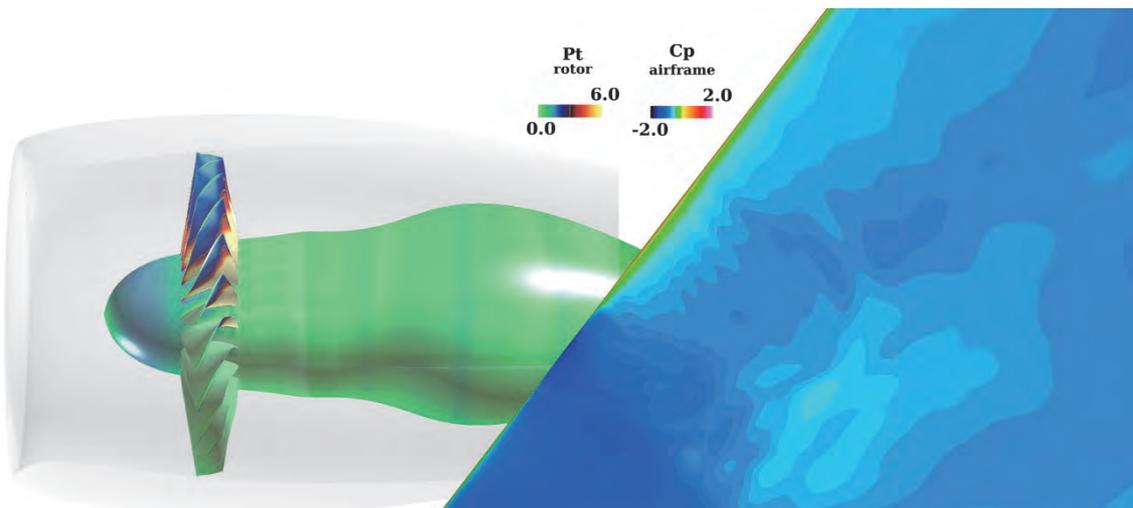


図1：エンジンが3回転した際の稼働エンジン内総圧分布と主翼静圧分布。

### 3. 研究目標の達成状況

予定通り得られつつある弊研究室計算サーバで解析を実施の coarse mesh の結果により、流れ場の不安定性を追う必要が判り、収束判定に関する知見が逐次獲得できている。一方、AFI-NITY で解析させて頂いている fine mesh は、100 時間ごとに計算が打ち切れ、その都度継続計算が開始されるまでに数週間待つことを繰り返し、ロータの回転計算まで至らず終了となった。

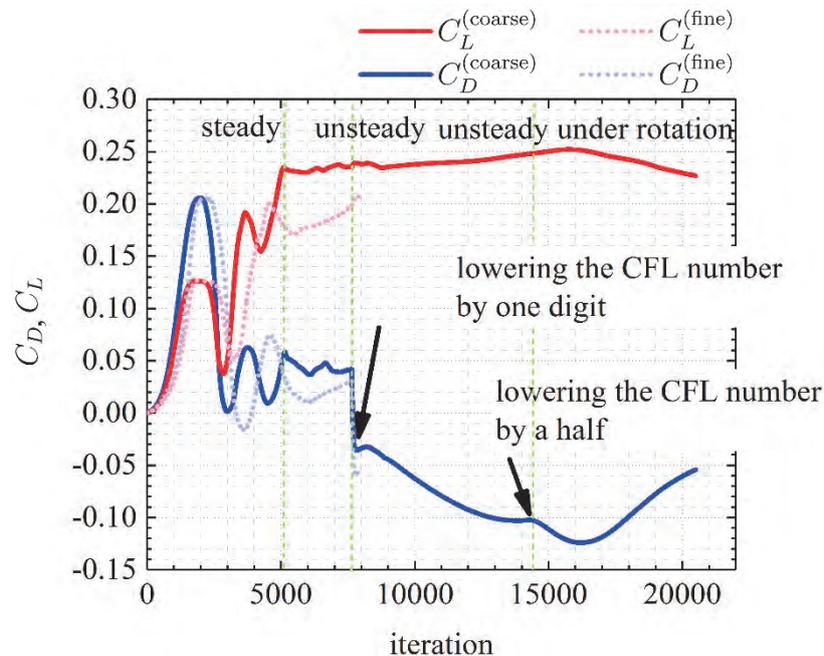


図 2 : 全機揚力・抗力各係数履歴 (途中結果)。

### 4. まとめと今後の課題

モデル化をせず、エンジンディストーションを解析し、将来の環境適合型航空機の開発に寄与するため、稼働エンジンと機体との統合解析を実施している。解析速度の劇的向上が目下の課題だが、計算機能力の向上により実現できるため、現在環境を整えつつある。計算収束性や格子依存性を確認し、現在実施する巡航状態ではなく、着陸時・地上走行時のディストーションを解析し、将来に資する知見を獲得する。

### 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  
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	J21L097
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	2021.4~2022.3
継続年数	2年目

分子動力学シミュレーションを用いた接触線近傍に働く摩擦力の解析及び数値モデリング  
 Modeling of the contact line and contact angle dynamics based on the molecular dynamics simulation

福島 啓悟\*†, 徳増 崇\*\*††

\*福井大学学術研究院工学系部門, \*\*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

液相-気相-固相で構成される接触線は、液滴の運動量や熱輸送現象に大きな影響を与える。また、バルク液体の力学には影響を与えない固体壁面の濡れ性の影響が顕著に表れるため、接触線周辺の力学的挙動は非常に複雑であり、様々な物理モデルが提案されている。しかし、系の大きさがナノスケールと小さくなると、様々な運動モデルが使えるかどうかわかっていない。そこで、本研究では、分子動力学法を用いて接触線周辺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し、様々な長さスケールの液滴に適応できるモデルを作ることを目的とする。

## 2. 研究成果の内容

昨年度得られた結果を論文執筆するに当たって、滑り長さの再計算を行った。滑り長さは液体-固体間の Navier の摩擦係数と液体の粘性係数の比であり、非平衡分子動力学シミュレーションを用いて計算していた。固体壁面と液体で構成された気液界面のない系を用いて内部に Couette 流を生じさせ、得られた速度勾配から算出する。一方、粘性係数が含まれていることから液体温度の影響を強く受ける。そこで、平衡分子動力学シミュレーションを用いて滑り長さの再評価を行った。図 1 に本計算に用いた計算モデルを示す。

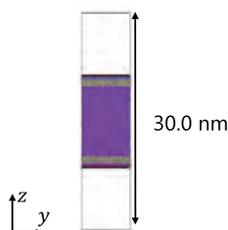


図 1 Simulation system used in this study

固体壁面にはハニカム構造を持つ仮想固体壁面であり、液体は液体アルゴンを用いた。滑り長さは Hansen<sup>1</sup>らの方法を用いて求めた。定常状態において固体壁面-液体間に働く力と液体の速度を以下のように定義する。

$$F^y(t) = \sum_{\substack{i \in \text{slab} \\ j \in \text{wall}}} F_{ij,x}(t) \quad (1)$$

$$U_{\text{slab}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i \in \text{slab}} v_{i,x}(t) \quad (2)$$

ここで、slab は固体壁面から  $z$  方向に  $10\text{\AA}$  の幅の領域である。  $F_{ij,x}$  は slab 内の分子  $i$  と固体壁面の分子  $j$  の間に働く力の  $x$  方向成分を表し、  $v_{i,x}$  は分子  $i$  の  $x$  成分の速度を表す。この2つの量の時間変化から、  $U_{\text{slab}}$  の自己相関関数  $C_{uu}(t)$  及び  $U_{\text{slab}}$  と  $Fx'$  の相互相関関数  $C_{uf}(t)$  を求める。この2つの量の  $t=0$  における値の比を用いて摩擦係数を計算し、温度  $85\text{K}$  における液体アルゴンの粘性係数を用いて滑り長さを算出した。サンプリングは  $1\text{ns}$  間行った。得られた結果を表1に示す。

表1 Interaction parameter dependence of slip length

Interaction parameter between fluid and solid [J]	Slip length [nm]
$3 \times 10^{-22}$	2.40
$4 \times 10^{-22}$	1.70
$5 \times 10^{-22}$	1.37
$6 \times 10^{-22}$	0.95
$7 \times 10^{-22}$	0.60
$8 \times 10^{-22}$	0.43

固体壁面と液体間の相互作用が大きくなると、摩擦係数が大きくなり滑り長さが小さくなっていくことがわかる。これは非平衡分子動力学シミュレーションと同様の傾向であることがわかる。

1. J. S. Hansen, B. D. Todd, and Peter J. Daivis. Prediction of fluid velocity slip at solid surfaces, *Phys. Rev. E*, 2011, 84, 016313

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、接触線近傍に生じる摩擦力の流路幅依存性をモデル化することであり、概ねモデル化できた。これまでは、気液界面から遠く離れた領域に生じている剪断応力を用いて規格化していたが、滑り長さがもとまったことで温度上昇の影響を排除して Couette flow が生じた際に液体内に生じる剪断応力を用いて規格化を行うことができるようになった。

### 4. まとめと今後の課題

本年度の研究により、モデル化に必要なパラメータを全て得ることができた。気液界面に生じる摩擦力の流路幅依存性モデルを構築し、論文としてまとめる。

### 5. 研究成果

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

該当なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] A. Fukushima, T. Tokumasu : Numerical Modeling of Frictional Forces Acting Near Contact Lines Using Molecular Dynamics Simulation, *Proceedings of the Twenty-first International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2021), CRF-27.

- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

該当なし

