



東北大学

**令和2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 2020
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」を目的としており、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ている。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、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、公募共同研究の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 2 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、126 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 3 年 10 月

東北大学流体科学研究所長
丸田 薫

目次

1. 令和2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	6
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2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＞	
J20I001 Numerical Simulation of a Thermal Plasma Reactor for the Wastes to Energy Sooseok Choi (Jeju National University)、高奈 秀匡 (東北大学)	11
J20I002 Numerical Simulations as Evaluation Method for Biofluidic Experiments Narendra Kurnia Putra (Institut Teknologi Bandung)、安西 晔 (東北大学)	16
J20I003 Study on Fundamental Combustion Characteristics of Jatropha Surrogate Fuel Willyanto Anggono (Petra Christian University)、早川 晃弘 (東北大学)	19
J20I004 Numerical Study on Transonic Flow Characteristics over Return Capsules Bok Jik Lee (Seoul National University)、永井 大樹 (東北大学)	21
J20I005 Efficient Uncertainty Quantification of Fluid Flow Problems via Combination of Kriging Surrogate Modeling and Proper Orthogonal Decomposition Mehrdad Raisee Dehkordi (University of Tehran)、下山 幸治 (東北大学)	23
J20I007 Thermal Conductivity Reduction and Carrier Concentration Optimization for Development of Nanocomposite Materials with Enhanced Thermoelectric Figure of Merit Vladimir Khovaylo (National University of Science and Technology "MISIS")、三木 寛之 (東北大学)	25
J20I008 The Dynamic Behavior of Marine Ecosystems in the Complex Flows Evgeniy Dats (Institute of Applied Mathematics FEB RAS)、岡島 淳之介 (東北大学)	29
J20I009 The Study on the Mechanism of Coupling Wall-Effect on Multidirectional Wings Based on Multi-Objective Optimization Chenguang Lai (Chongqing University of Technology)、大林 茂 (東北大学)	33
J20I010 ナノ構造界面での気体分子散乱特性の分子動力学解析 徳増 崇 (東北大学)、武内 秀樹 (高知工業高等専門学校)	36
J20I011 Development of Pressure Measurement Method in Laser-Cavitation Bubbles 佐藤 岳彦 (東北大学)、Mohamed Farhat (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL))	38
J20I014 水中ストリーマの高速進展機構 佐藤 岳彦 (東北大学)、金澤 誠司 (大分大学)	40
J20I015 Data-Driven Kriging-Variant Characterization and Construction for Complex Aerospace Problems Rhea P. Liem (Hong Kong University of Science and Engineering (HKUST))、下山 幸治 (東北大学)	42
J20I016 Development of Deep Gaussian Processes for Complex Fluid-Structure Interaction Problems Lavi Rizki Zuhail (Bandung Institute of Technology)、下山 幸治 (東北大学)	44
J20I018 Solid Oxide Fuel Cells Replacement of a Traditional Catalytic Converter Jeongmin Ahn (Syracuse University)、中村 寿 (東北大学)	47

J20I020	Electric Field Measurements in Nanosecond Pulse Discharges in Atmospheric Pressure Flames for Plasma Assisted Flameholding	49
	高奈 秀匡 (東北大学)、Igor V. Adamovich (The Ohio State University)	
J20I021	Evaluation of Defects In CFRP Material Based on High Frequency Eddy Current Testing Method	51
	Zhenmao Chen (Xi'an Jiaotong University)、内一 哲哉 (東北大学)	
J20I022	New Parameterization Methods for Uncertainty Quantification of Geothermal Reservoir Models	53
	鈴木 杏奈 (東北大学)、Ruanui Nicholson (The University of Auckland)	
J20I023	再突入カプセル形状物体後流域の定量的密度計測	55
	太田 匡則 (千葉大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J20I024	飛翔体上の非定常流体場計測のためのマルチカラー P S P 技術の基礎研究	57
	沼田 大樹 (東海大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J20I025	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	59
	永井 大樹 (東北大学)、三坂 孝志 (産業技術総合研究所)	
J20I026	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	62
	松下 洋介 (東北大学)、小宮 敦樹 (東北大学)	
J20I028	Active Control of High-Speed Boundary Layer Flows	64
	服部 裕司 (東北大学)、Adrian Sescu (Mississippi State University)	
J20I030	種々の微粒子流れの数値解析法の開発と工学的応用	67
	高橋 俊 (東海大学)、大林 茂 (東北大学)	
J20I032	Instability and Wave Interactions in Helical Vortices	70
	服部 裕司 (東北大学)、Ivan Delbende (LIMSI)	
J20I033	衝撃波減衰に関する実験的数値的研究	72
	酒井 武治 (鳥取大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J20I034	赤外線カメラによる高精度温度測定手法の確立	74
	古川 琢磨 (八戸工業高等専門学校)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J20I035	火星大気突入カプセル周り流れの数値解析	76
	古舘 美智子 (Chungnam National University)、永井 大樹 (東北大学)	
J20I036	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	79
	長谷川 裕晃 (宇都宮大学)、大林 茂 (東北大学)	
J20I037	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	82
	福山 敦彦 (宮崎大学)、寒川 誠二 (東北大学)	
J20I039	離脱衝撃波脈動を利用した側面噴流発生による飛行姿勢安定	84
	水書 稔治 (東海大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J20I040	Tensile Effect by Wall Shear Stress around Stagnation Point and Flow Instability by Wall Elasticity in Full-Scale Patient-Specific Aneurysm Model	86
	田中 学 (千葉大学)、太田 信 (東北大学)	
J20I041	Modelling Core Scale: Investigation of Multiscale Porosity Using 3D Printed Micromodels	89
	鈴木 杏奈 (東北大学)、Julien Maes (Heriot-Watt University)	
J20I042	Development of a Method for Optimizing the Rheological and Optical Properties of Blood Mimicking Fluids	93
	Simon Tupin (東北大学)、Karim Mazeau (CERMAV-CNRS, Universite Grenoble Alpes)	
J20I044	Towards Next Generation CFD Models of Intracranial Aneurysm (NX-CFD): In-vitro Validation Studies and in-silico Benchmarking of Intracranial Transitional Flow	95
	Simon Tupin (東北大学)、Khalid M. Saqr (Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport)	

J20I045	ノッキング末端ガス自着火現象における燃料反応特性の影響	97
	寺島 洋史 (北海道大学)、中村 寿 (東北大学)	
J20I047	The Effect of Hypertension and Anti-Coagulant to Aneurysm Rupture	99
	Kahar Osman (Universiti Teknologi Malaysia)、太田 信 (東北大学)	
J20I048	Effects of Pulsatile Flow on Endothelial Permeability and Cell Motility	102
	Eugenia Corvera Poiré (National Autonomous University of Mexico)、船本 健一 (東北大学)	
J20I049	水素-空気予混合火炎のダイナミクスに及ぼす熱損失効果	105
	門脇 敏 (長岡技術科学大学)、小林 秀昭 (東北大学)	
J20I052	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	107
	後藤 実 (宇部工業高等専門学校)、三木 寛之 (東北大学)	
J20I053	Mathematical Modeling of the Glycocalyx Based on the Molecular Dynamics for Blood Flow Analysis Considering Microstructures on Blood Vessel Walls	109
	宮内 優 (東北大学)、Yiannis Ventikos (University College London)	
J20I054	ふく射熱遮蔽機能を有する消防装置の開発	111
	江目 宏樹 (山形大学)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J20I055	誘導加熱を用いた回転円すいディスク式薄膜湯水蒸発機構を用いた液糸生成装置の開発	114
	足立 高弘 (秋田大学)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J20I056	極超音速機周りで生じる高エンタルピー流の特性解明	116
	山田 剛治 (東海大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J20I057	Numerical Study on Gas Lubrication System Using Micro/Nanoscale Dimples	120
	米村 茂 (東北大学)、Yevgeniy Bondar (ITAM, SB RAS)	
J20I059	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	122
	福井 智宏 (京都工芸繊維大学)、船本 健一 (東北大学)	
J20I062	Unsteady Aerodynamics of Axially Oriented Low Fineness Ratio Cylinders	124
	Colin P. Britcher (Old Dominion University)、大林 茂 (東北大学)	
J20I063	II 型膜貫通タンパク質の細胞内局在化におけるシグナルアンカー領域の役割	127
	池田 (向井) 有理 (明治大学)、太田 信 (東北大学)	
J20I064	Buoyant Magnetic Filaments	129
	Stefan Llewellyn Smith (University of California)、服部 裕司 (東北大学)	
J20I065	Numerical Simulation of GaN-Based High-Electron-Mobility Transistors Fabricated by Neutral Beam Etching	131
	Yiming Li (National Chiao Tung University)、寒川 誠二 (東北大学)	
J20I068	Detecting and Locating Microseismic Events at Groningen as a Natural Laboratory for Understanding Induced Seismicity Mechanisms	134
	仲田 典弘 (Massachusetts Institute of Technology)、椋平 祐輔 (東北大学)	
J20I069	イオン液体静電噴霧による二酸化炭素吸収促進に関する数値モデルの構築	136
	高奈 秀匡 (東北大学)、藤野 貴康 (筑波大学)	
J20I070	Novel Experimental-Computational Research Framework for In-Depth Understanding of Cancer Mechanobiology	138
	鳥井 亮 (University College London)、船本 健一 (東北大学)	
J20I071	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	140
	金子 智 (神奈川県立産業技術総合研究所)、徳増 崇 (東北大学)	
J20I073	加熱壁面に衝突する液滴の熱流動様相に関する研究	142
	岡部 孝裕 (弘前大学)、岡島 淳之介 (東北大学)	

J20I074	Ultra-Fine Surface Roughness Effect on Boundary Layer Transition	145
	焼野 藍子 (東北大学)、Bagus Nugroho (The University of Melbourne)	
J20I075	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	147
	竹内 希 (東京工業大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J20I076	Estimation of Fracture Permeability by Integrating Microseismic Observational Data and Reservoir Engineering Modeling.....	149
	椋平 祐輔 (東北大学)、Justin Rubinstein (United States Geological Survey)	
J20I077	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	152
	酒井 康彦 (名古屋大学)、早瀬 敏幸 (東北大学)	
J20I078	Experimental and Chemical Kinetics Modeling Study of Nitromethane in Shock Tubes and a Micro-Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile	155
	Olivier Mathieu (Texas A&M University)、中村 寿 (東北大学)	
J20I079	Characterisation and Behaviour of Centreline Shock Reflection in Axisymmetric Supersonic Intakes	159
	Hideaki Ogawa (九州大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J20I081	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	161
	内田 諭 (東京都立大学)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J20I082	An Innovative Method of Generating Plasma Microbubbles in Flowing Water	163
	Jong-Shinn Wu (National Chiao Tung University)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J20I083	Individual Effects of Plasma-Generated Electrical Field, Short-Life Species, and Long-Life Species on Cell	165
	Yun-Chien Cheng (National Chiao Tung University)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J20I084	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	168
	塚田 隆夫 (東北大学)、小宮 敦樹 (東北大学)	
J20I087	圧縮性 DNS を用いた管楽器の流体音響解析	171
	高橋 公也 (九州工業大学)、服部 裕司 (東北大学)	
J20I088	Development of Sonic Boom Evaluation Function under Real Meteorological Conditions.....	174
	山下 博 (German Aerospace Center)、大林 茂 (東北大学)	
J20I089	同軸円筒 MHD エネルギー変換機内の電磁流体现象の研究.....	176
	小林 宏充 (慶應義塾大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J20I091	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	178
	鶴飼 孝博 (大阪工業大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J20I092	固体高分子形燃料電池における触媒層乾燥・形成プロセスの分子論的解析	181
	若嶋 振一郎 (一関工業高等専門学校)、徳増 崇 (東北大学)	
J20I093	航空機体と稼働エンジンとの統合解析	187
	千葉 一永 (電気通信大学)、大林 茂 (東北大学)	
J20I094	水中爆発を用いた洗浄効果向上の研究	189
	北川 一敬 (愛知工業大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J20I095	中枢創薬のための三次元ヒト血液脳関門チップの開発	191
	立川 正憲 (徳島大学)、船本 健一 (東北大学)	
J20I096	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	194
	寺島 修 (富山県立大学)、小西 康郁 (東北大学)	
J20I097	Evaluation of Natural Convection Flow under Spatiotemporally Variable Thermal Condition	200
	小宮 敦樹 (東北大学)、Nicholas Williamson (The University of Sydney)	
J20I099	デブリ除去のための伝導性テザーの構造形態に関する実験的研究	202
	楨原 幹十朗 (東北大学)、大谷 清伸 (東北大学)	

J20I100	Application of Core-Based Inversion to Reconstruct Stress Field in an Underground Geoscience Laboratory	204
	伊藤 高敏 (東北大学)、Xiaodong Ma (ETH Zurich)	
J20I101	Multifunctional Hybrid Filaments Comprising Aligned Nanocellulose and Carbon Nanotubes Synthesized by a Field-Assisted Flow Focusing Method	207
	Anthony B. Dichiara (University of Washington)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J20I102	Interferometric Measurement of Temperature Fields in Turbulent Flows	209
	Juan F. Torres (The Australian National University)、小宮 敦樹 (東北大学)	
J20I103	Data-Driven Modeling of Flow in Complex Structures	213
	鈴木 杏奈 (東北大学)、James Minto (University of Strathclyde)	
J20I104	火星探査航空機高高度試験機の高自由度空力一飛行連成計算と飛行制御最適化による動的特性理解	216
	金崎 雅博 (東京都立大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J20I105	イオン液体の二酸化炭素吸収による光学特性の解明	220
	古川 怜 (電気通信大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J20I107	Numerical Analysis of a Morphing Slotted Jet Flap	223
	Edyta Dzieminska (上智大学)、大林 茂 (東北大学)	
J20I109	翼形に発生する非定常キャビテーションの能動・受動制御	225
	伊賀 由佳 (東北大学)、Ebrahim Kadivar (University of Duisburg-Essen)	
J20I110	A Machine-Learning Approach for Computation of Cardiovascular Function Parameters from Pulse Wave of Limbs	228
	Xiaorui Song (Shandong First Medical University & Shandong Academy of Medical Sciences)、 太田 信 (東北大学)	

<令和2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>

J20H001	小鳥型高性能飛行ロボットの開発	233
	石出 忠輝 (木更津工業高等専門学校)、大林 茂 (東北大学)	
J20H002	パルスジェットメスの生体硬組織への応用に関する基礎研究	236
	中川 敦寛 (東北大学病院)、大谷 清伸 (東北大学)	
J20H003	湿り蒸気の流動状態の解明	238
	丹澤 祥晃 (日本工業大学)、石本 淳 (東北大学)	
J20H004	深層学習を用いたマルチスケール格子の多目的最適化	240
	北村 拓也 (長崎大学)、下山 幸治 (東北大学)	

<令和2年度東北大学流体科学研究所国際連携公募共同研究プロジェクト採択課題>

J20R001	Endovascular Stent and Vessel Remodeling	245
	Aike Qiao (Beijing University of Technology)、太田 信 (東北大学)	
J20R002	An Electrically Efficient Self-Sustained Microcombustion/Flame-Assisted Fuel Cell (FFC) System	250
	Jeongmin Ahn (Syracuse University)、丸田 薫 (東北大学流)、 Ryan Milcarek (Arizona State University)	
J20R003	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)	

J20R004 An Efficient Algorithm of Inlet Turbulence Generation for Cross-Platform-Based Parallel Computation and Its Application for Flows over a Low-Pressure Turbine Cascade	260
阿部 圭晃 (東北大学)、Peter E. Vincent (Imperial College London)、 Freddie D. Witherden (Texas A&M University)、Brian C. Vermeire (Concordia University)	
<令和2年度東北大学流体科学研究所重点公募共同研究プロジェクト採択課題>	
J20J001 超微小液滴と高速衝突の科学	267
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2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>	
J20Ly01 Microfluidic Tools to Study Aerotaxis in Eukaryotic Cells	269
Jean-Paul Rieu (Claude Bernard University Lyon 1)、船本 健一 (東北大学)	
J20Ly02 Ionic Liquid Polymer for Corrosion Resistance Applications	271
Nicolas Mary (ELyTMAX, CNRS-Universite de Lyon-Tohoku University)、内一 哲哉 (東北大学)	
J20Ly03 Numerical Modelling of Particle-Laden Effect on Supersonic Flow for Cold-Spray Polymer Coating ...	274
Chrystelle Bernard (東北大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J20Ly04 Response Characteristics of Cellulose Nanofibril under AC Electric Field	277
高奈 秀匡 (東北大学)、Florent Dalmas (INSA Lyon)	
J20Ly05 Thermal Actuation and energy harvesting using Multiphysics alloys	279
Mickaël Lallart (INSA Lyon)、三木 寛之 (東北大学)	
J20Ly06 Stability of Jet Diffusion Flames Cofiring with Carbon-Free Ammonia	286
小林 秀昭 (東北大学)、Dany Escudie (INSA-Lyon)	
J20Ly07 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	291
石本 淳 (東北大学)、Thomas Elguedj (INSA-Lyon & LaMCoS)	
J20Ly08 Elucidation of the Pathophysiology of Skin Sodium and Water Metabolism	293
Asadur Rahman (香川大学)、石本 淳 (東北大学)	
J20Ly09 原形質流動の速度分布に関する確率論的流体力学シミュレーション	295
鯉淵 弘資 (仙台高等専門学校)、内一 哲哉 (東北大学)	
J20Ly10 Active Control of Protein Mass Transfer by Membrane Utilizing Variation of Surrounding Condition ...	298
小宮 敦樹 (東北大学)、Sébastien Livi (INSA Lyon)	
J20Ly11 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	300
足立 高弘 (秋田大学)、小宮 敦樹 (東北大学)	
<令和2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>	
J20L006 Development of Conservative Kinetic Force Method near Equilibrium	303
Vladimir Saveliev (National Center of Space Researches and Technologies)、米村 茂 (東北大学)	
J20L012 Analysis of Transport Phenomena of Oxygen Ion in Dual-Phase Electrolyte Material	305
徳増 崇 (東北大学)、Jeongmin Ahn (Syracuse University)	
J20L013 水中プラズマによる微細気泡の生成・安定化機構	307
佐藤 岳彦 (東北大学)、中谷 達行 (岡山理科大学)	
J20L017 Surface Pressure Measurement of a Re-Entry Model in Ballistic Range Facility using Motion-Capturing Pressure-Sensitive Paint Method	309
坂上 博隆 (University of Notre Dame)、永井 大樹 (東北大学)	
J20L019 Comparison between h-BN and MXene as Promising 2D Materials for Biolubricant Additives: Molecular Dynamic Simulation Perspective	312
徳増 崇 (東北大学)、Nasruddin Yusuf Rodjali (Universitas Indonesia)	

J20L027	火星ヘリの実現を目指した同軸反転ローターの研究開発	314
	永井 大樹 (東北大学)、米澤 宏一 (電力中央研究所)	
J20L031	タンパク質 GPI 修飾機構の解明および予測法の開発	317
	越中谷 賢治 (青山学院大学)、太田 信 (東北大学)	
J20L038	中性粒子ビームを用いたプラズマと触媒の相互作用機構の解明	319
	白谷 正治 (九州大学)、都甲 将 (東北大学)	
J20L046	離島間を結ぶ飛行車両についての実現性の検討	322
	森澤 征一郎 (沖縄工業高等専門学校)、大林 茂 (東北大学)	
J20L050	Geothermal Onsen Seminar	326
	鈴木 杏奈 (東北大学)、Roland N. Horne (Stanford University)	
J20L051	塑性加工された炭素繊維強化熱可塑性プラスチックの内部欠陥に関する研究	328
	中山 昇 (信州大学)、三木 寛之 (東北大学)	
J20L058	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	331
	津田 伸一 (九州大学)、徳増 崇 (東北大学)	
J20L060	細径ノズルから噴射される大気圧マイクロプラズマの流れ解析	333
	吉木 宏之 (鶴岡工業高等専門学校)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J20L066	数値的・実験的研究による低レイノルズ数領域での回転翼・運動翼における動的空力特性の解明	335
	佐々木 大輔 (金沢工業大学)、下山 幸治 (東北大学)	
J20L067	飛行する回転中空円筒の実験と数値解析	337
	平田 勝哉 (同志社大学)、石本 淳 (東北大学)	
J20L072	分子シミュレーションを用いた固液界面のナノスケール気泡形成の解析	339
	堀 琢磨 (東京農工大学)、菊川 豪太 (東北大学)	
J20L080	セルロース単繊維創成法に向けた濃度勾配下におけるナノ繊維・静電流動場相互作用系の理論構築	341
	石本 志高 (秋田県立大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J20L085	キャビテーション不安定現象の遷移メカニズムの解明	343
	姜 東赫 (埼玉大学)、伊賀 由佳 (東北大学)	
J20L086	局所軸幾何理論による渦軸の解析と定義	345
	中山 雄行 (愛知工業大学)、服部 裕司 (東北大学)	
J20L098	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	348
	高橋 俊 (東海大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J20L106	構造化照明を用いた高精度 PSP 計測手法の開発	351
	松田 佑 (早稲田大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J20L108	Modeling of the Contact Line and Contact Angle Dynamics Based on the Molecular Dynamics Simulation	354
	福島 啓悟 (福井大学)、徳増 崇 (東北大学)	

1. 令和2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2年度公募共同研究は、令和2年4月1日から令和3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、令和元年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2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2年10月28日～30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-2020において開催した。同年は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116件(一般・重点・国際連携・萌芽100件、リヨンセンター公募共同研究12件、第17回流動ダイナミクス国際会議(ICFD2020)OS1、OS2、OS3、OS6での発表4件を含む)のプレゼンテーションとポスター発表が行われ、168人の出席者があった(写真1)。

発表は全て英語で行われ、海外からの共同研究者も交えて活発な議論が行われた。

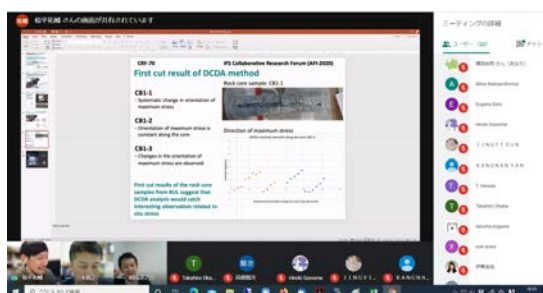


写真1：AFI-2020開催の様子(オンライン)

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
公募共同研究成果の登録数	67	71	90	90	90
登録済みデータ総数	540	552	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

※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3年3月に、令和元年度の共同利用・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
申請数 (件)		99	101	105	104	108
採択数 (件)		69	70*	77	82	84
国内・国際	国内	44	44	38	44	41
	国際	25	33	32	38	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)
	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)
	健康・福祉・医療	10 (6/4)	5 (3/2)	6 (3/3)	7 (4/3)	11 (3/8)
	基盤流体科学	23 (17/6)	22 (13/9)	27 (19/8)	24 (15/9)	31 (18/13)
採択率 (%)		70	69	73	79	78
申請金額 (千円) : a		30,396	30,546	43,460	41,819	36,923
採択金額 (千円) : b		16,819	17,065	19,847	22,409	21,733
平均充足率 (金額) (%) : b/a		55	56	45	54	59
平均採択金額 (千円)		244	243	244	273	259

*年度途中で 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
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
申請数 (件)	6	6	6	4	4
採択数 (件)	5	6	6	4	4
採択率 (%)	83	100	100	100	100
申請金額 (千円) : a	8,140	8,135	8,011	5,600	5,870
採択金額 (千円) : b	4,869	4,470	5,010	3,795	3,452
充足率 (金額) (%) : b/a	60	54.9	62.5	67	59
一件あたりの採択金額 (千円)	974	745	835	948	863

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
申請数 (件)	5	4	3	5	4
採択数 (件)	5	4	3	5	4
採択率 (%)	100	100	100	100	100
申請金額 (千円) : a	994	697	468	816	680
採択金額 (千円) : b	525	559	362	643	486
充足率 (金額) (%) : b/a	53	80	77.3	78	71
一件あたりの採択金額 (千円)	105	140	120	128	122

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
申請数 (件)	2	2	3	1
採択数 (件)	2	2	3	1
採択率 (%)	100	100	100	100
申請金額 (千円) : a	3,042	3,687	3,948	1,850
採択金額 (千円) : b	3,599	2,790	3,477	1,455
充足率 (金額) (%) : b/a	118	75.6	88	79
一件あたりの採択金額 (千円)	1,799	1,395	1,159	1,455

※採択額には、20%のインセンティブが含まれる。

表 4：リヨンセンター公募共同研究の申請・採択状況

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

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
実施数（件）		28	31	28	19	22
国内・国際	国内	15	20	24	16	17
	国際	13	8	7	3	5
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)
	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)
	健康・福祉・医療	6 (3/3)	5 (5/0)	4 (4/0)	2 (2/0)	1 (1/0)
	基盤流体科学	13 (7/6)	9 (5/4)	13 (7/6)	6 (4/2)	7 (5/2)
申請金額（千円）：a		11,825	12,217	9,186	6,600	9,038
採択金額（千円）：b		2,894	2,905	2,508	1,847	2,327
平均充足率（金額）（%）：b/a		24	24	27	27	26
平均採択金額（千円）		103	94	89	97	106

2) 研究者の受け入れ状況

本研究所が公募共同研究を実施するために受け入れた研究者の人数（延べ人日）を表 6 に示す。対象は公募共同研究経費を使用して来仙した研究者とし、滞在日数を基に算出した。

表 6：研究者の受け入れ状況

	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
国内	389 (94)	469 (60)	411 (123)	577 (196)	476 (59)
国外	625 (53)	628 (230)	927 (74)	533 (55)	190 (38)
合計 (延べ人日)	1,014 (147)	1,097 (290)	1,338 (197)	1,110 (251)	666 (97)

() の数字は大学院生の人数で内数。

※令和 2 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*
物件費(千円)	16,377	12,911	25,569	20,275	49,843
旅費(千円)	16,177	18,201	34,323	35,974	1,277
合計(千円)	32,554	31,112	59,892	56,249	51,120

*平成 30 年度から令和 2 年度については、全国共同利用・共同実施分（共同利用・共同研究拠点の強化）「流動グラウンドチャレンジ国際研究ネットワーク」採択分を含む。

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

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。

Project code	J20I001
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st 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

**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.

2. Details of program implement

In the present work, basic experiments and the numerical analysis on the thermal plasma generator has been carried out for the waste to the energy production. Because COVID-19, the simulation has been conducted in Jeju National University, Republic of Korea, and the numerical method and results have been advised by Prof. Takana at IFS, Tohoku University.

First, we have conducted thermal plasma generation experiment. The operating condition of the plasma torch is listed in Table 1. As a plasma forming gas, nitrogen was supplied at 110 L/min and the arc current was fixed at 110 A. The arc voltage fluctuates from 200 to 220 V, resulting the input power range from 22.0 to 24.2 kW. The plasma jet was successfully generated in the lab test as shown in Figure 1.

Second, the numerical analysis on the thermal plasma jet was conducted by using a homemade magnetohydrodynamics(MHD) code.

In the numerical results, the calculated arc voltage and the input power were 215.9 V and 23.8 kW, respectively. Therefore, the numerical simulation for the plasma generation is well agreement with the experimental data. Two-dimensional temperature and axial velocity distributions of the thermal plasma jet are presented in Figure 2 and Figure 3, respectively. The arc core temperature is higher than 15,000 K in the plasma torch, and the arc jet speed at the center of the torch exit is higher than 1,000 m/s. Detailed temperature and axial velocity profiles at the plasma torch exit is presented in Figure 4.

Table 1 : Operating condition of the plasma torch

N ₂ flow rate [L/min]	Arc current [A]	Arc voltage [V]	Input power [kW]
110	110	200 ~ 220	22.0 ~ 24.2

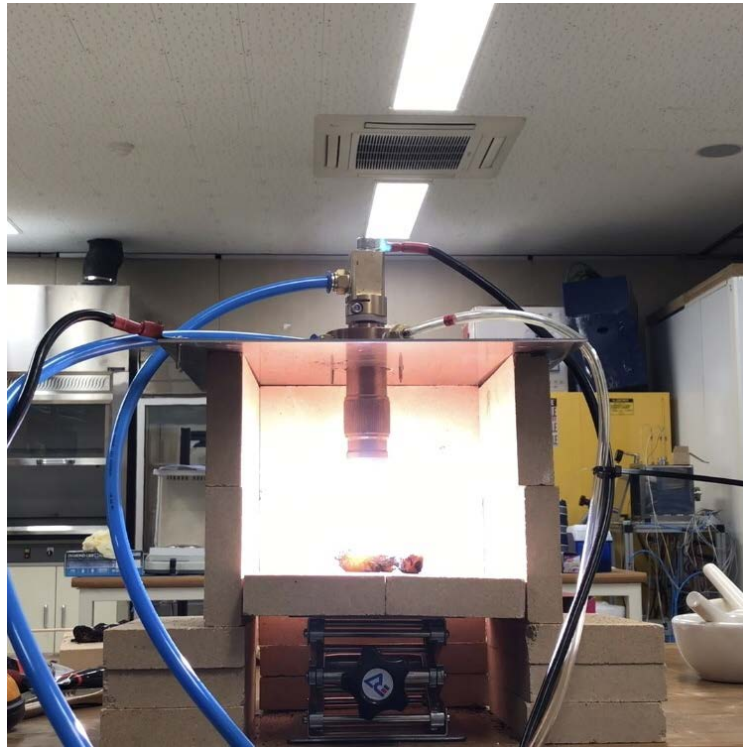


Figure 1 : A picture of the thermal plasma generation in a single plasma torch.

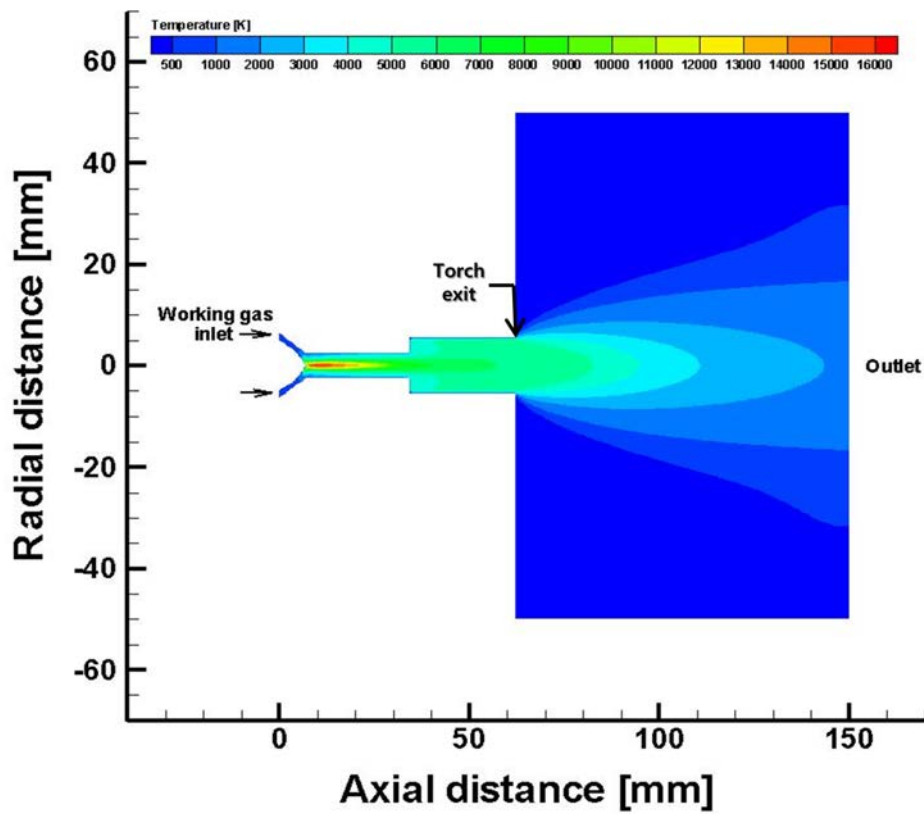


Figure 2 : Two-dimensional temperature distribution.

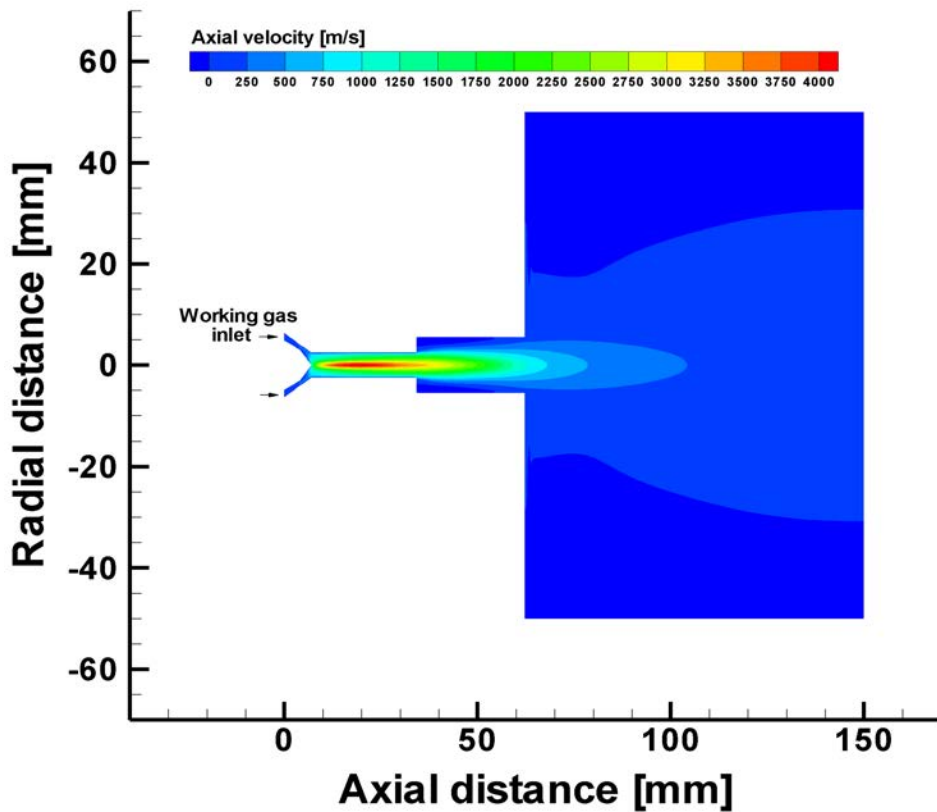


Figure 3 : Two-dimensional axial velocity distribution.

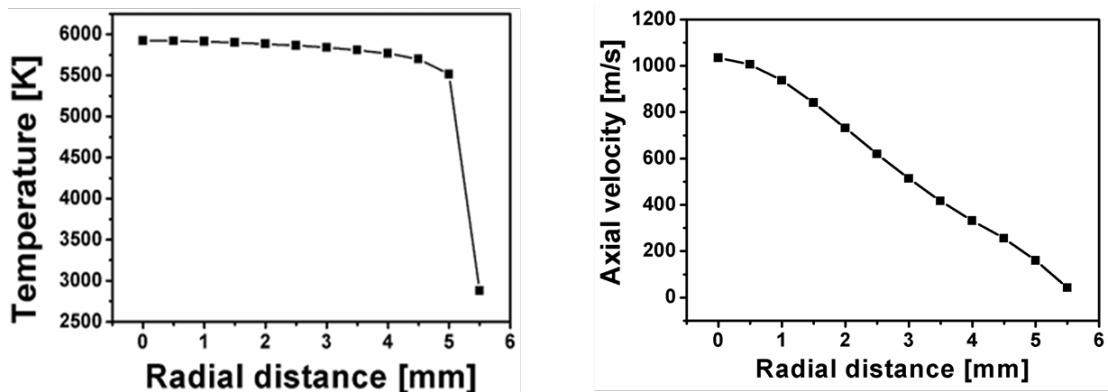


Figure 4 : Temperature and axial velocity profiles at the plasma torch exit.

We are conducting numerical simulation for the multi plasma torches base on the numerical analysis for the single plasma torch. In order to treat a large amount of waste, a large volume of high temperature region is required. As show in Figure 2, a high temperature zone over than 3,000 K is limited as 10 cm in the axial direction and as 5 cm in the radial direction, respectively. Therefore, the multiple plasma torches array is essentially required. In the second year of this collaborative research, the plasma system with multi torches is numerically analyzed for an efficient conversion of waste to alternative fuel on a large scale.

3. Achievements

The optimal design and operating conditions for the single plasma torch was determined from the basic experiment and numerical analysis.

The results of the first year collaborative research was presented in 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2020) on Oct. 29, 2020.

Now we are writing a research paper which will be submitted to an international journal in the middle of 2021.

4. Summaries and future plans

A single plasma torch was successfully analyzed by the numerical simulation. The calculated arc voltage and the input power were in well agreement with experimental results. The high temperature region where the plasma temperature is over than 3,000 K was limited as 10 cm 5 cm in the axial and the radial direction, respectively. Therefore, the multiple plasma torch system will be numerically analyzed in the next step. In addition, the numerical results will be compared with an experimental diagnostics and pilot test for the combustion of burnable wastes.

5. Research results

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

- [1] M. Kim, Y. H. Lee, J. H. Oh, S. H. Hong, B. I. Min, T. H. Kim, S. Choi: Synthesis of boron nitride nanotubes using triple DC thermal plasma reactor with hydrogen injection, *Chemical Engineering Journal*, 395 (2020), 125148 (9 pages), doi: /10.1016/j.ceramint.2020.08.042.
- [2] T. H. Kim, J. H. Oh, M. Kim, S. H. Hong, S. Choi: Thermal plasma synthesis of ceramic nanomaterials, *Applied Science and Convergence Technology*, 29 (2020), pp. 117–123, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.08.042.
- [3] J. H. Oh, M. Kim, Y. H. Lee, S. H. Hong, S. S. Park, T. Hee Kim, S. Choi: Synthesis of cobalt boride nanoparticles and h-BN nanocage encapsulation by thermal plasma, *Ceramics International*, 46 (2020), pp. 28792–28799, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.08.042.
- [4] J. Park, M. Kim, S. Choi, J. Y. Sun: Self-healable soft shield for γ -ray radiation based on polyacrylamide hydrogel composites, *Scientific Reports*, 10 (2020), 21689 (8 pages), doi: 10.1038/s41598-020-78663-x.
- [5] J. H. Oh, Y. H. Lee, T. Hee Kim, S. Choi: Numerical simulation and diagnostic of thermal flow characteristic inside triple DC thermal plasma jet system, *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, 15 (2021), e01002 (8 pages), doi: 10.34343/ijpest.2021.15.e01002.

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

- [6] J. H. Oh, M. Kim, S. H. Hong, Y. H. Lee, J. Y. Ko, T. Hee Kim, S. Choi: Thermal Plasma technology for nanomaterial synthesis, *Proceedings of the 59th Summer Annual Conference of The Korean Vacuum Society*, (2020), PT-S004, p. 21.
- [7] J. H. Oh, M. Kim, S. H. Hong, T. Hee Kim, S. Choi: Synthesis of h-BN nanoparticle from amorphous boron in atmospheric pressure Ar-N₂ thermal plasma, *Proceedings of the 59th Summer Annual Conference of The Korean Vacuum Society*, (2020), PF-A005, p. 33.
- [8] J. Y. Ko, T. Hee Kim, S. Choi: Numerical study on SF₆ decomposition in thermal plasma combined with kiln reactor, *Proceedings of the 59th Summer Annual Conference of The Korean Vacuum Society*, (2020), PW-P002, p. 54.
- [9] M. Kim, J. H. Oh, S. H. Hong, T. Hee Kim, S. Choi: Calculation on thermodynamics equilibrium for purification of BNNTs by halogen gases,

Proceedings of the 59th Summer Annual Conference of The Korean Vacuum Society, (2020), PW-P011, p. 55.

[10] S. H. Hong, T. Hee Kim, J. H. Oh, M. Kim, S. Choi: Synthesis of Si-MWCNT nanocomposite by triple thermal plasma jet and its electrochemical performance evaluation, *Proceedings of the 59th Summer Annual Conference of The Korean Vacuum Society, Jeju*, (2020), PF-P019, p. 61.

[11] S. Choi, J. H. Oh, S. H. Hong, Y. H. Lee, M. Kim, T. Hee Kim: Triple DC plasma torch system for nanomaterial synthesis, *Proceedings of Seventeenth International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, (2020), OS5-3, pp. 208–209.

*[12] S. Choi, H. Takana: Numerical simulation of a thermal plasma reactor for the wastes to energy, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-50, pp. 87–88.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

“The device for measurement of transmittance by thickness for calculating the radiation attenuation coefficient in one direction”, S. Choi, J. H. Oh, M. Kim, June 10, 2020, approval.

“Producing device of boron nitride nano tube”, B. K. Son, K. H. Lee, S. Choi, M. Kim, August 6, 2020, approval.

“Locally hot combustion chamber and cement calcination facility having the same”, H. S. Kim, S. D. Lee, J. Y. Lee, J. H. Lee, S. Choi, November 27, 2020, approval.

“Method for manufacturing a water electrolysis catalyst electrode containing cobalt borohydride nanoparticles synthesized by thermal plasma and a water electrolysis catalyst electrode according to the method”, S. Choi, J. H. Oh, November 2, 2020, apply.

(Award)

Not applicable.

(Press release)

Energy and Economy Newspaper, “Dry reforming for green hydrogen production”, June 28, 2020. (Korean)

Project code	J20I002
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Numerical Simulations as Evaluation Method for Biofluidic Experiments

Narendra K. Putra*†, Hitomi Anzai**††

Johanna Muliany***, Tomo Kinoshita****, Bonfilio Nainggolan***

Petrus C. A. Santoso***, Suprijanto*, Makoto Ohta**

*Instrumentation & Control Research Group, Faculty of Industrial Technology,
Institut Teknologi Bandung

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

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

****Department of Diagnostic Radiology, Tohoku University Hospital

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

As a continuation of the previous year's study, this research focused on utilizing computational fluid dynamics (CFD) on the predictions of flow conditions and endothelial cells (ECs) inside the flow chamber. On this phase of the study, the in vitro flow experiments has been conducted under the change of flow conditions due to different tilt placement orientation of the stent wires.

Besides, a new computational study on designing a new intravenous catheter's tip has been performed on this study. In this new study, the computational model of intravenous catheterization has been constructed to learn more about improving the success rate of adrenal venous sampling procedures.

2. Details of program implement

This research has been conducted on two main subjects on the utilization of numerical simulation as the evaluation method of actual flow experiments and the parametrical study of catheter design. The details of this research have been conducted as follow:

1. CFD simulations of the flow chamber system have been conducted on predicting the distributions of ECs under the flow exposure. CFD simulations for both stent strut configurations of 90° and 70° position relative to the main flow directions have been performed. We found the direct influence on the flow characteristics drove the ECs movement under the different configurations through the comparison between CFD results and experimental data. On implementing the research program, the ITB team was responsible for conducting the CFD simulations and providing all necessary computational data. At the same time, the IFS team is responsible for conducting cell experiments. Currently, both part of the team has jointly worked on publication manuscript and further improved the study.
2. The first stage of studying the effect of intravenous catheter shape versus the blood sampling withdrawal process on the adrenal venous sampling (AVS) procedures has been commenced this year. This case has emerged from the real clinical problem in the Tohoku University Hospital. As the part of this work, ITB team has been responsible for developing the computational model, running the

simulation, and providing the data. Data analysis, interpretation of the simulation results, and further development have been discussed and performed together by all the team members.

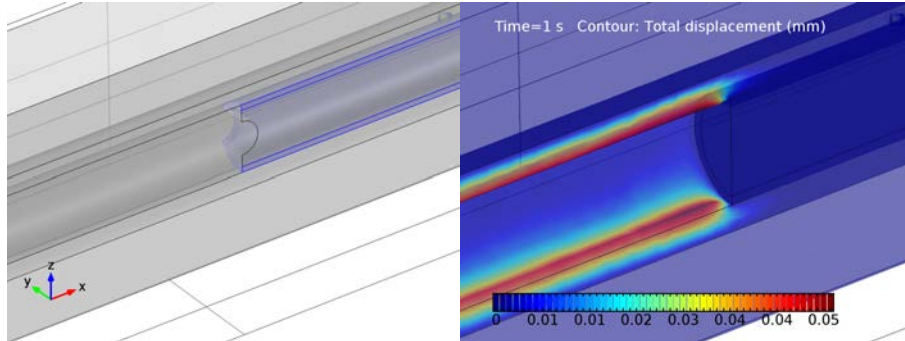


Figure 1 : Early development on the catheter simulation model (left) to show the prediction of wall displacement during the AVS procedures (right).

3. Achievements

For the flow ECs experiment- CFD comparison study, the comparison on different stent wires set up (90° and 70°) under the flow conditions of working fluid on the ECs behavior has been successfully obtained. This study strongly proves that the effect of WSS on the ECs migration. For the design parametric study of the AVS catheter design, the first phase has been successfully performed with the construction of a geometrical model and a good physical representation of AVS catheterization on the adrenal venous system.

4. Summaries and future plans

The current study on ECs behavior under the flow exposure shows that the different orientation due to the placement of stent wires has a significant effect on the ECs migration since the different location of the vortex and flow pattern changes drove the ECs movement towards different locations. Further study will be focused on the analysis and data interpretation on comparison between experimental data and CFD. More flow parameters such as WSS gradient and detailed observation of the ECs density on several different locations of the flow chamber are planned to be conducted in this study.

For the catheter's design study, the development of the AVS simulation on the prediction of vessel wall displacement has been successfully performed. Further study on the design exploration of different catheter geometrical shapes is planned as the later stage 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] J. Muliany, N. K. Putra, Nugraha, T. Kinoshita, M. Ohta, H. Anzai: Construction of the Split-Tip Catheter Model of the Segmental Adrenal Venous Sampling Procedure using Computational Fluid Dynamics, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS9-2, pp. 292-294.

*[2] N. K. Putra, J. Muliany, B. Nainggolan, T. Kinoshita, M. Ohta, Suprijanto, H.

Anzai: Computational Simulation on Improving Intravascular Treatment Device's Performance, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-4, pp. 6-7.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable.

(Award)

Not applicable.

(Press release)

Not applicable.

Project code	J20I003
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Study on Fundamental Combustion Characteristics of Jatropha Surrogate Fuel

Willyanto Anggono*†, Akihiro Hayakawa**††, Yusuf Hilario Wasisdi*

*Department of Mechanical Engineering, Petra Christian University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

To achieve a carbon-neutral society, biofuel has been considered as a solution for a more sustainable energy source. However, certain types of biofuel have been criticized for its edible raw material and therefore may compete with the need for food resources. In regard to that, non-edible sources of biofuel should be used. One of those sources includes Jatropha plant (*Jatropha curcas*) with its seed that can be extracted for oil. Jatropha oil has been studied for its great potential as a renewable fuel. However, the fundamental combustion characteristics of Jatropha oil has not been fully investigated. It is considered that the major compositions of Jatropha methyl ester are methyl oleate ($C_{19}H_{36}O_2$) and methyl linoleate ($C_{19}H_{34}O_2$). In this study, combustion characteristics of major fatty acid methyl ester in Jatropha methyl ester were investigated in order to understand the fundamental combustion characteristics of the biofuel produced from Jatropha oil.

2. Experimental setup

Experiments were performed at the Institute of Fluid Science, Tohoku University. Figure 1 shows the schematic figure of the experimental setup.

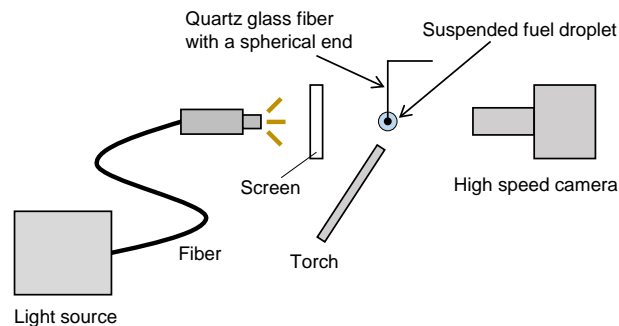


Figure 1: Experimental setup for droplet combustion.

Droplets of methyl oleate (purity: 99%) and methyl linoleate (purity: 95%), which are the major fatty acids methyl ester in Jatropha methyl ester, were studied using a high-speed backlight photography technique. The fuel was suspended using a quartz glass fiber with a spherical end. The diameters of the glass fiber and the spherical end were about 0.25 mm and 1.2 mm, respectively. The volume of suspended fuel was 4 μ l. The fuel was ignited by a torch. The backlight image of the flame and droplet were taken by a high-speed camera (Photron, FASTCAM Mini AX 100) with a micro lens (Nikon, Ai AF Micro-Nikkor 200mm f/4 IF-ED). The frame

rate and the shutter speed were 60 fps and 1/1000 s, respectively. Soot was produced on the glass fiber after the droplet combustion, and it was burned by a premixed methane flame before the next experiments.

3. Flame observation

Figure 2 shows the flame images of the droplet combustion of methyl linoleate and methyl oleate. Here, the time of 0 s represents the timing at which the droplet burned completely. Combustion of the droplet required almost 3 s for both fuels. After the droplet combustion, soot production was observed.

Figure 3 shows the droplet image at $t = -0.78$ s for methyl oleate. Even though it is pure substance, bubble was observed inside the droplet especially for the case of methyl oleate.

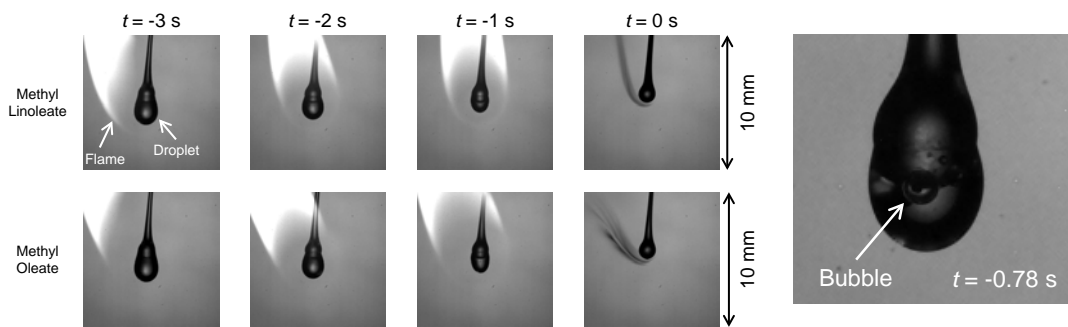


Figure 2: Images of droplet combustion.

Figure 3: Boiling of methyl oleate droplet.

4. Summaries and future plans

An experimental study of droplet combustion was performed for methyl oleate and methyl linoleate. In this study, the production of the bubble inside the droplet were observed especially for the case of methyl oleate. As for the next step, we will evaluate the temporal change of droplet diameter and calculate the burning rate of the fuel droplet. In our previous study, the difference of burning rate was observed between oleic and linoleic acids due to the difference of surface tension [1].

In addition, we will examine the droplet combustion experiment for the mixture of methyl linoleate and methyl oleate because *Jatropha* methyl ester is the mixture of these components.

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, G. J. Gotama, Y. Hilario, W. Stefanus: Combustion Characteristic of Suspended Single Droplet of Oleic and Linoleic Acids as the Major Components of *Jatropha* Methyl Ester, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-62, pp. 109-110.

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

Project code	J20I004
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Numerical Study on Transonic Flow Characteristics over Return Capsules

Seoeum Han*, Bok Jik Lee**†

Michiko Ahn Furudate***, Nomura Masayuki****, Hiroki Nagai*****††

*Interdisciplinary Program in Space Systems, Seoul National University

**Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University

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

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

*****Institute of Fluid Science, 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 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 of transonic flows over return capsules for a range of Mach number from 1.03 to 1.52 were conducted. The test model was a Hayabusa capsule 15 mm model. The pitch angle of the capsule was fixed at $\alpha = 0^\circ$. 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 the time-averaged flow field and instantaneous flow field.

Figure 1 compares the recirculation region length and the wake diameter at each Mach number between the measurement data obtained from a ballistic range [H. Kiritani et al., *AIAA SciTech 2020 Forum*, 2020] and the results of the present study. The distance from the back of the capsule to the neck point is defined as the recirculation region length, and the distance between the neck points is defined as the wake diameter. Both the recirculation region length and the wake diameter did not exactly agree with the experimental data, but the overall relationship between the feature-length and Mach number was reasonably reproduced.

Figure 2 depicts the numerical schlieren images extracted from the results of the numerical simulations for $M = 1.09$ and 1.52 . The bow shock that occurred in the front of the capsule was observed, and the boundary layer separation and the recompression shock wave occurred in the back of the capsule were observed. The local shock wave generated in the free shear layer in the recirculation region was observed after the recompression shock wave moved downstream.

3. Achievements

The transient numerical solutions were obtained by conducting three-dimensional simulations over return capsules with fixed pitch angle, and the feature-length showed

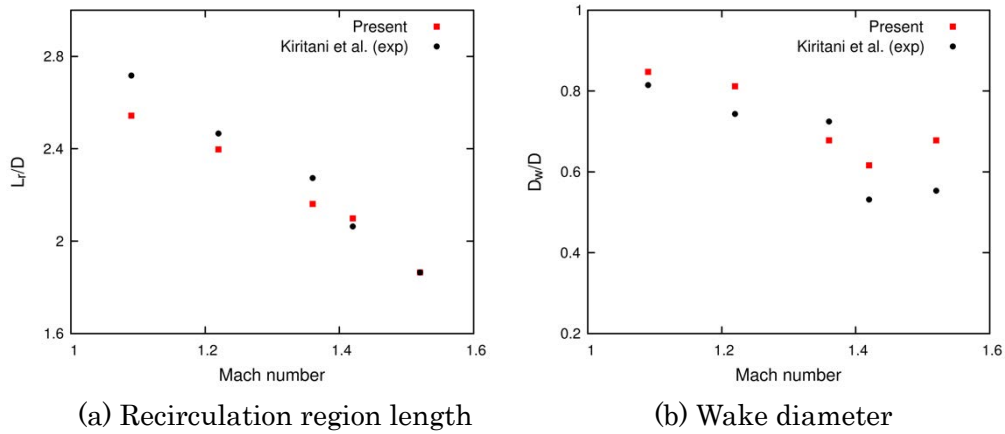


Figure 1. Feature-length

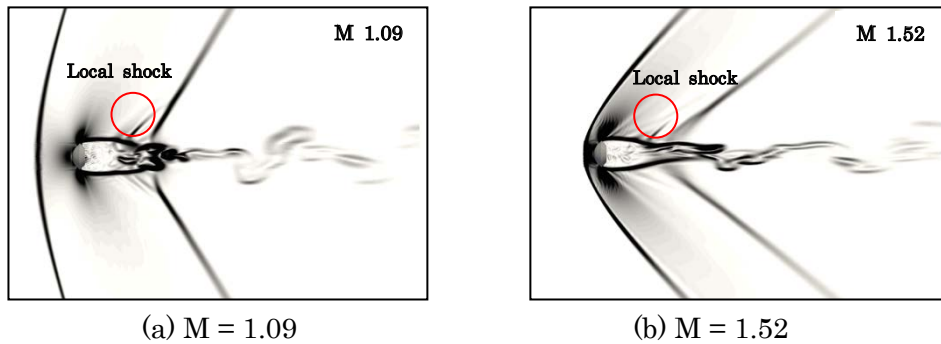


Figure 2. Numerical schlieren images

good agreements with the measurement data obtained from a ballistic range. The transient flow characteristics over return capsules such as local shock wave occurred in the free shear layer in the recirculation region were observed. Therefore, a numerical method for three-dimensional simulations of transonic flows over Hayabusa capsules has been established.

4. Summaries and future plans

In this project, the transient flow characteristics over return capsules were investigated using three-dimensional simulations with fixed pitch angle. In the future, numerical simulations for several capsule geometries including non-zero angle-of-attack are planned 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, N. Masayuki, H. Nagai: Numerical Study on Transonic Flow Characteristics over Return Capsules, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-60, pp. 106-107.

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

Project code	J20I005
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd 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

In large number of engineering applications, inevitable uncertainties in the physical properties, model parameters, operating conditions and geometry can strongly influence the system output. In such situations to achieve a robust response, it is necessary to take into account the effects of all sources of uncertainty in the design process. Uncertainty Quantification (UQ) is a growing subject in the engineering aiming at recognition of intrinsic uncertainties and characterization of their influences on the Quantity of Interest (QoI) based on the available measurements or calculations. However, a single computation of real engineering problems based on an advanced numerical method can be extremely expensive. Thereby, in such problems, it is unfordable to quantify a large number of simultaneous uncertainties. Therefore, development of efficient UQ methods that significantly reduces the computational burdens for the stochastic analysis of Computational Fluid Dynamics (CFD) problems is of great importance. The purpose of the current project is the development of novel affordable UQ methods for tackling practical fluid flow problems with large number of random variables. The proposed methods are multi-fidelity surrogate models and use the non-intrusive Polynomial Chaos Expansion (PCE). The ultimate goal of this research project is to combine three efficient UQ methods; namely: i) the Proper Orthogonal Decomposition (POD), ii) the Compressed Sensing (CS) or ℓ_1 -minimization and iii) the Kriging method to reduce the computational time of UQ. To fulfill this objective, the proposed method is developed in two stages. During the first and second years of the project, a novel non-intrusive UQ framework is developed based on the combination of multi-fidelity POD and compressed sensing. In the next step, the computational framework will further refined by incorporating the Kriging method. In other words, the retrieved optimal basis functions from POD are used in the trend part of the Kriging method.

2. Details of program implement

During the last two years, UQ analysis of two CFD problems with large number of random variables are performed using the developed method. In the first test case, stochastic turbulent transonic flow around the RAE2822 airfoil is investigated by considering 18 geometrical uncertain variables. In the second test case, combined effects of 24 operational and geometrical uncertainties on the flow field characteristics as well as performance of the NASA Rotor 37 are quantified. The UQ analysis is performed using three methods, namely; i) the full PCE method, ii) the combination of full PCE with the POD and finally iii) the new method based on the combination of POD and compressed sensing. Results showed that both POD

methods are able to significantly reduce the computational cost of the UQ analysis. Further improvement in the performance is obtained via combination of the POD and the compressed sensing. The second phase of the project is progressed by further refining the computational model with introducing the Kriging method to the non-intrusive multi-fidelity, compressed sensing. More specifically, the ℓ_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. So far, the developed method is applied to the Rastrigin function. It was found that the computational cost of the multi-fidelity POD-OMP method is much lower than the multi-fidelity POD approach. The methodology will be applied to the complex CFD problems.

3. Achievements

The POD method is successfully combined with the compressed sensing method and subsequently implemented to two challenging high-dimensional CFD problems. It is found that the new bi-fidelity method is able to significantly reduce the computational cost of UQ analysis of challenging fluid engineering problems compared to the alternative methods. The outcome of the research has already been published in Journal Applied Mathematical Modelling.

4. Summaries and future plans

This project is concerned with the development of affordable UQ methods to handle large numbers 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. For the continuation of the work, the Kriging model will be incorporated in the developed multi-fidelity method. Finally, attempts will be made to introduce the adaptive sampling method in the methodology. The research findings will be presented in ICFD2021 conference and submitted to Journals.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - *[1] A. Mohammadi, K. Shimoyama, M. S. Karimi and M. Raisee: Efficient uncertainty quantification of CFD problems by combination of proper orthogonal decomposition and compressed sensing, *Applied Mathematical Modelling*, 94 (2021), pp. 187-225, doi:10.1016/j.apm.2021.01.012
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - *[2] A. Mohammadi, M. Raisee and K. Shimoyama: Progress in Development of an Efficient Uncertainty Quantification Method via Combination of POD and Compressed Sensing, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-18, pp. 28-29.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.
 - (Award) Not applicable.
 - (Press release) Not applicable.

Project code	J20I007
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd 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*

Anna Kalugina*, Anastasiya Taranova*

*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 2020 was devoted to the influence of doping on thermoelectric properties of $\text{Fe}_{1.5}\text{TiSb}$ Heusler alloy and modeling phase diagram of this ternary intermetallic. Alongside with this, thermoelectric properties of Fe_2TiSn prepared by a mechanomechanical method, was studied as well.

2. Details of program implement

Samples of $\text{Fe}_{1.5}\text{TiSb}_{1-x}\text{Sn}_x$ and $\text{Fe}_{1.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Y}_x\text{Sb}$ solid solutions ($x = 0; 0.05; 0.1$) were synthesized by arc and induction melting, annealed at 1073 K. In the case of Fe_2TiSn sample, the preparation process, including weighting the raw materials, sealing the jars, and extracting of the powders after the ball milling, as well as preparation of the die for the SPS sintering, was carried out in a pure argon-filled glovebox. All milling experiments were performed using 250 ml stainless-steel jars with 6 mm stainless-steel balls as the milling media. The ball-to-powder ratio of 20:1 (360 g of stainless-steel balls and 18 g of powder) was kept constant for all experiments. Structure of the prepared samples was examined by X-ray diffraction and scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray analysis. Thermal conductivity, electrical resistivity and Seebeck coefficient were measured by laser flash, four probe and differential methods, respectively. Simulation of the phase diagram was carried out using a Pandat software based on the CALPHAD method. Description of binary Fe-Ti was taken from several sources, specifically. From the Fe-Ti-V ternary system and Fe-Ti binary system. The description of binary Fe-Sb was taken from Co-Fe-Sb ternary system.

3. Achievements

Powder X-ray diffraction patterns collected at room temperature from the studied alloys are shown in Fig. 1. It is seen that for all of the samples, the main characteristic peaks correspond to the reflections from the half-Heusler phase. Judging by the absence of foreign peaks on the XRD patterns (Fig. 1), all of the samples after SPS are single-phased without any impurities. Since the crystal structures of half-Heusler C1_b and full-Heusler L2_1 structures can be distinguished only when comparing intensity of superstructural reflection, we undertook a Rietveld refinement of the XRD pattern of $\text{Fe}_{1.5}\text{TiSb}$. Results of our refinement indicate that it is better to describe $\text{Fe}_{1.5}\text{TiSb}$ as having the half-Heusler (HH) structure, with the lattice parameter $a = 0.59565$ nm.

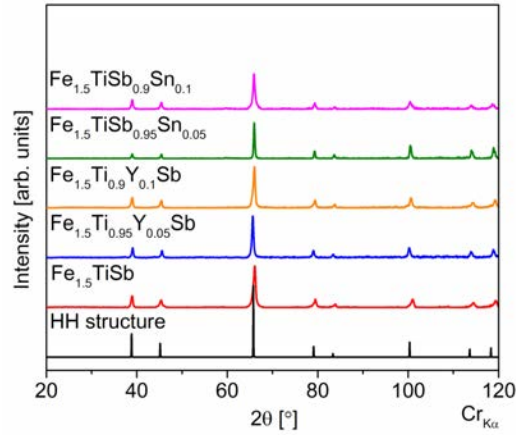


Figure 1: Powder X-ray diffraction patterns of $\text{Fe}_{1.5}\text{TiSb}_{1-x}\text{Sn}_x$ and $\text{Fe}_{1.5}\text{Ti}_{1-x}\text{Y}_x\text{Sb}$ ($x = 0$; 0.05; 0.1) samples

Investigation of the effects of Sn and Y doping on thermoelectric properties of the Heusler $\text{Fe}_{1.5}\text{TiSb}$ semiconductor revealed the following. In the parent $\text{Fe}_{1.5}\text{TiSb}$, substitution of Sb by Sn results in increasing electrical conductivity σ , whereas substitution of Ti by Y decreases σ . Measurements of thermal conductivity κ showed that it decreases with substitution Sb for Sn, as well as with substitution of Ti for Y. The highest $zT = 0.14$ (at 473 K), was found for the composition $\text{Fe}_{1.5}\text{TiSb}$.

Calculation of the phase diagram revealed that isothermal sections are virtually identical for all temperatures which were set in the calculations (970, 1020 and 1070 K). Typical example of such phase diagram obtained within the calculations is shown in Fig. 2. In general, three different regions which contain $\text{TiFe}_{1.5}\text{Sb}$ as an equilibrium phase can be distinguished on the isothermal sections. These regions are as follow: (1) equilibrium region which contains pure body centered cubic Fe and the $\text{TiFe}_{1.5}\text{Sb}$ phase; (2) equilibrium region which contains pure body centered cubic Fe, Fe_2Ti Laves phase and the $\text{TiFe}_{1.5}\text{Sb}$ phase; and (3) equilibrium region which contains Fe_2Ti Laves phase, TiFeSb Half-Heusler phase and the $\text{TiFe}_{1.5}\text{Sb}$ phase.

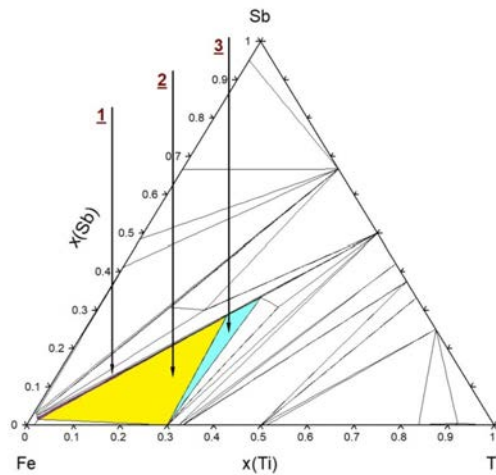


Figure 2: Isothermal sections of the Ti-Fe-Sb ternary phase diagram at 970–1070 K. 1 (purple) – Fe + $\text{TiFe}_{1.5}\text{Sb}$; 2 (yellow) - Fe + Fe_2Ti + $\text{TiFe}_{1.5}\text{Sb}$; 3 (cyan) - Fe_2Ti + TiFeSb + $\text{TiFe}_{1.5}\text{Sb}$.

Experimental characterization of Fe_2TiSn by XRD and EDS methods indicated that a single-phase sample in the powder form was produced after milling for 90 minutes. Since the phase formation requires high-energy impacts between the balls and the walls of the jar, the phase composition of the powder after ball-milling was not changed and corresponded to the starting elements. In order to obtain polycrystalline bulk materials, the obtained powders were consolidated by SPS. Temperature dependence of the electrical conductivity, $\sigma(T)$, and the Seebeck coefficient, $S(T)$, were measured by a standard dc four-probe method and a differential method, respectively. Measurements of thermal conductivity revealed that the total thermal conductivity of the samples prepared by the melting-annealing approach is higher than that for our samples. Combining the results of the electrical conductivity and the Seebeck coefficient, the thermoelectric power factor was calculated and is shown in Fig. 3a. The power factor of the ball-milled sample reached a maximum of $\sim 2 \mu\text{W cm}^{-1} \text{K}^{-2}$ at 250 K, comparable to that fabricated by conventional technique. Consequently, the obtained zT value is comparable to those for the Fe_2TiSn prepared by the conventional inductive melting technique (Fig. 3b).

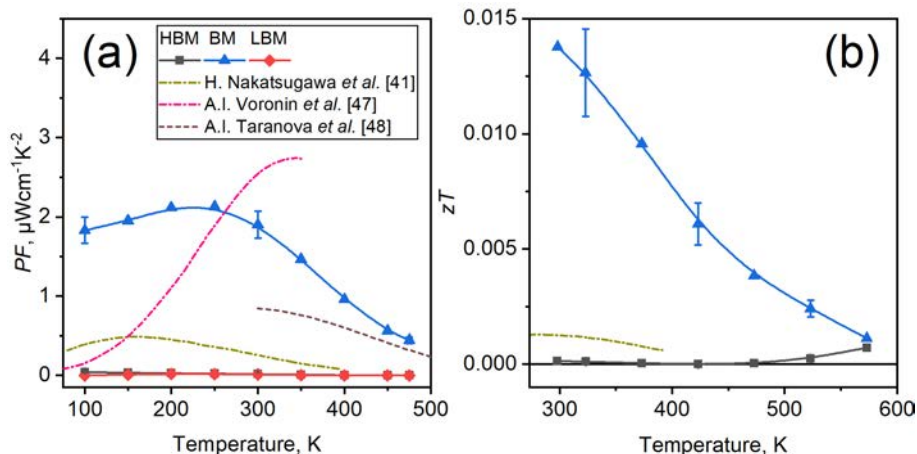


Figure 3: Temperature dependence of (a) the power factor and (b) the figure of merit of Fe_2TiSn prepared by various ball milling regime followed by SPS and annealing. Data from some previous reports are also given for comparison.

4. Summaries and future plans

Influence of Sn and Y doping on thermoelectric properties of the Heusler-based $\text{Fe}_{1.5}\text{TiSb}$ semiconductor was studied. The highest $zT = 0.14$ (at 473 K), was found for the composition $\text{Fe}_{1.5}\text{TiSb}$. Phase diagrams for the ternary Ti-Fe-Sb system were obtained using the CALPHAD method. The existence of the thermoelectric Heusler $\text{TiFe}_{1.5}\text{Sb}$ phase was revealed in a temperature range from 970 to 1070 K. It was shown that bulk Fe_2TiSn can be successfully fabricated by a combination of mechanochemical synthesis and spark plasma sintering. Such synthesis technique can be considered as the easily scalable and straightforward route that allows fabrication of fine powder in large quantities with actual stoichiometry close to the nominal one since there is no evaporative loss during synthesis as it occurs in solid-state or arc/induction/levitation melting synthesis approaches.

Future plan is to develop nanocomposites based on full and half-Heusler alloys and to study so called double half-Heusler alloys. In the framework of the first approach, it is proposed to form *in situ* nanoscale coherent inclusions of the magnetic Heusler alloy Co_2VSn in the nonmagnetic matrix of semiconducting FeVSb *via* its doping with cobalt and tin. The second approach is based on alloying of two half-Heuslers XYZ with

valence electron concentration $VEC = 17$ and $XY''Z$ with $VEC = 19$. Thus designed $X_2Y''Y'''Z_2$ double half-Heusler compound will have typical for thermoelectric half-Heusler $VEC = 18$ per formula unit.

5. Research results

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

*[1] A. Tukmakova, A. Novotelnova, S. Taskaev, H. Miki and V. Khovaylo: Simulation of Fe-Ti-Sb Ternary Phase Diagram at Temperatures above 900 K, *Key Eng. Mater.*, 877, (2021), pp. 114-119, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.877.114.

*[2] A. Novitskii, I. Serhienko, A. Nepapushev, A. Ivanova, T. Sviridova, D. Moskovskikh, A. Voronin, H. Miki and V. Khovaylo: Mechanochemical synthesis and thermoelectric properties of $TiFe_2Sn$ Heusler alloy, *Intermetallics*, 133, (2021), 107135 (8 pages), doi: 10.1016/j.intermet.2021.107195.

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	J20I008
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

The Dynamic Behavior of Marine Ecosystems in the Complex Flows

Evgeniy Dats*†, Sergei Minaev*
Junnosuke Okajima**††

*Institute of Applied Mathematics, Far East Branch of 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 particularly, 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 2020, we had web-based meetings to discuss the results and future direction. The online meetings were held 6 times (23 April, 22 May, 15 June, 9 September, 25 December 2020, and 5 March, 2021).

3. Achievements

The structure and propagation velocity of one and two-dimensional population’s waves are numerically investigated in the framework of the “predator-prey” model with the Arditi-Ginzburg trophic function:

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial t} &= \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + p(1-p) - a \frac{zp}{z+p} \\ \frac{\partial z}{\partial t} &= d \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) + s \frac{zp}{z+p} - mz\end{aligned}\tag{1}$$

where $p(x, y, t)$, $z(x, y, t)$ are the densities of prey and predator populations, a is the predation rate of predator, s is the food conversion efficiency, m is the mortality rate of predator d is the ratio of predator and prey diffusion.

The propagation of population’s wave of living organisms occurs due to the growth of an already formed colony in an area where living organisms are absent, and there

are conditions for their reproduction. Inside the colony, the distribution of the living organism's concentrations corresponds to a stationary or quasi-stationary state of the system. In the case of propagation of only a prey population in the absence of predators or distribution of only predators over an area with a constant concentration of prey, the equations describing wave propagation are similar to the Kolmogorov-Petrovsky-Piskunov-Fisher equation. In these cases, the wave propagation speed is the same as in these classical models. The dynamics of wave propagation becomes more complex when the populations of the prey and predator behind the wave front are in an unstable, quasi-equilibrium state. In this case, changes in the concentration of prey and predator in the wave are interrelated, and the two-dimensional wave sometimes assumes cellular shape with unstable chaotically moving cells (Fig. 1).

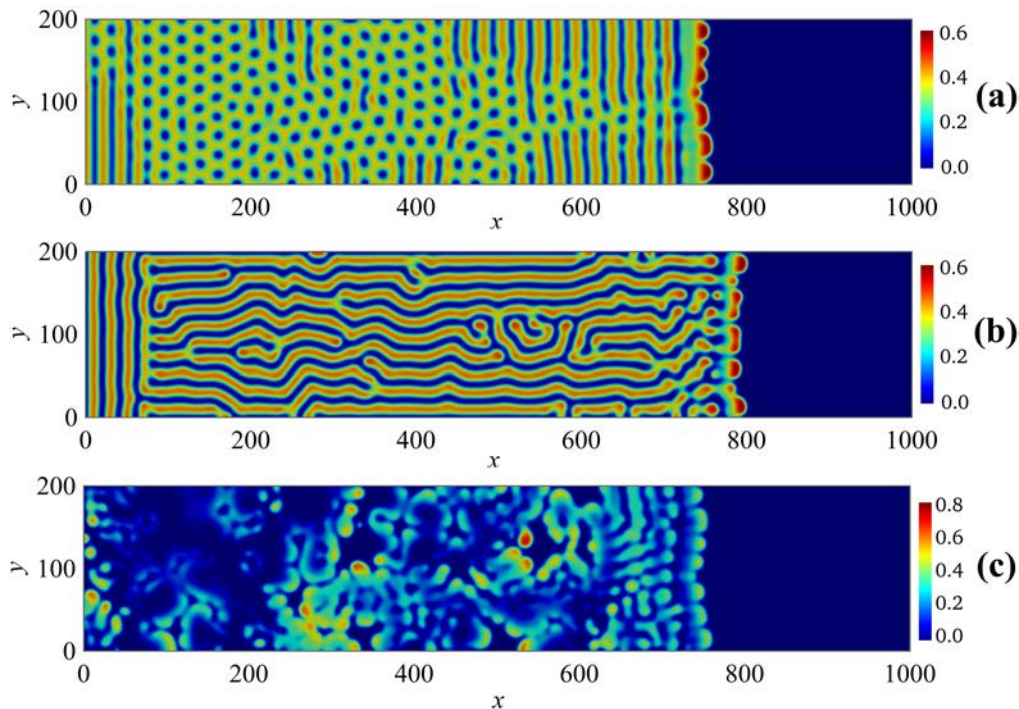


Figure 1: The prey distribution behind the propagating wave. The parameters are the following: (a) $a=1.9$, $d=10$, $s=1$, $m=0.6$, $t=1200$. (b) $a=2.1$, $d=10$, $s=1$, $m=0.6$, $t=1400$, (c) $a=2.1$, $d=5$, $s=1$, $m=0.6$, $t=1200$.

Calculations have shown that the spatial instability of the wave front, at which cells are formed, is observed in a wider range of parameters, compared with the range of parameters that determine the instability of a state homogeneous in space. The propagation of a joint wave of a predator and a prey can be non-monotonic, with a speed periodically varying in time. It is shown (Fig 2) that the average propagation speed of a combined wave is a well definite value, even in the case of the formation of cellular wave front. The simulation results showed (Fig. 3) that the radial growth rate of the diverging circular population at large colony radii is equal to the propagation speed of plane populations' wave. This allows applying the concept of normal propagation velocity to estimate the mass growth of organisms in a large colony with an arbitrary initial shape.

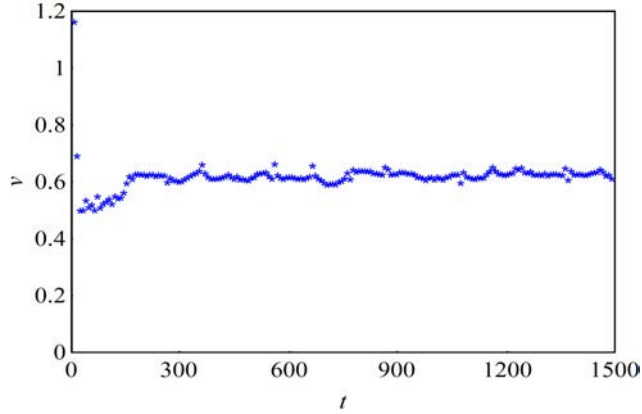


Figure 2. The propagation velocity of the joint populations wave evaluated for $a = 2.1$, $d = 5$, $s = 1$, $m = 0.6$. The concentration distributions corresponding to this case is shown at Fig. 1 (c). Mean value of propagation velocity is $\bar{v} \approx 0.58$.

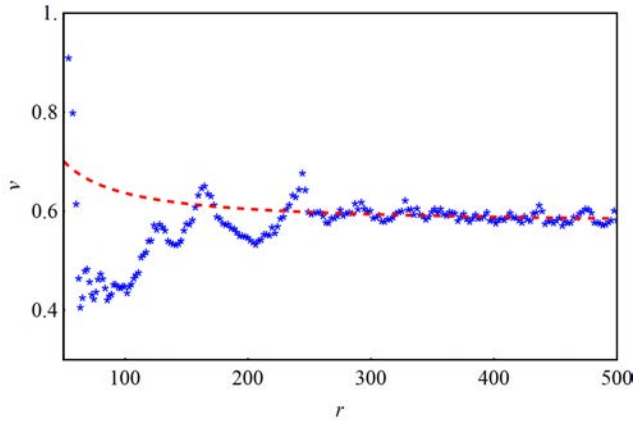


Figure 3. The dependency of propagation velocity on the wave radius, evaluated for $a = 2.1$, $d = 5$, $s = 1$, $m = 0.6$, $\bar{v} \approx 0.58$. The red dashed curve is the approximate dependency $v = \bar{v}(1 + \chi/r)$ with $\chi = 11.24$.

4. Summaries and future plans

The propagation of one and two-dimensional waves of populations are numerically investigated in the framework of the “predator-prey” model with the Arditi - Ginzburg trophic function. The propagation of prey and predator population waves and the propagation of co-existing population’s waves are considered. The simulations demonstrate that even in the case of an unstable quasi-equilibrium state of the system, which is established behind the front of a traveling wave, the propagation velocity of the joint population wave is a well-defined function. The calculated average propagation velocity of a cellular non-stationary wave front is determined uniquely for a given set of problem parameters. The estimations of the wave propagation velocity is obtained for both the case of a plane and cellular wave fronts of populations. The structure and velocity of outward propagating circular cellular wave are investigated to clarify the local curvature and scaling effects on the wave dynamics.

We note that the data on the normal velocity and the structure of the population’s wave can be conveniently used to verify and to refine the model parameters by comparing the theoretical values with experimental data. Further

research within the project is related to the study of influence the turbulent flow on the population dynamics.

5. Research results

1) Journal

Not applicable.

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

*[1] E. Dats, S. Minaev, T. Miroshnichenko and J. Okajima: Sporadic Propagation of Spatiotemporal Patterns in a Plankton Model, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-71, pp. 123-124.

3) Patent, awards, press release etc.

Not applicable.

Project code	J20I009
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	3rd year

The Study on the Mechanism of Coupling Wall-Effect on Multidirectional Wings Based on Multi-Objective Optimization

Chenguang Lai*†, Shigeru Obayashi**††, Yuting Zhou***, Bin Zhao*
 Yi Chen*, Haitao Bai*

* 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 understand the mechanism of coupling wall-effect on multidirectional wings, and provide the key theoretical direction and basis for the further study and development of the innovative aero-train system.

2. Details of program implement

To investigate the control mechanism and verify the application effect of active flow control in vehicle aerodynamics, the control effect on the airflow separation at the rear of the notch-back by using the phenomenological numerical simulation method of plasma flow control. Firstly, the plasma actuator is arranged separately on the rear end of the roof, c-pillar, upper and side of the trunk to study the control effect of airflow separation. After that, the plasma actuators at each position are combined and actuated simultaneously. We try to observe the control effect of airflow separation and select the combination with the best drag reduction effect. In the third stage, an efficient global optimization (EGO) algorithm based on Kriging response surface is applied to optimize the supply voltage of the best combination that has been obtained before and obtain the driving voltage parameter of each actuator optimized under this combination. The plasma generated by surface dielectric barrier discharge is utilized to produce a blue plasma as shown in Fig. 1, and the actuators were arranged on the roof and c-pillar, top and side of the trunk lid of a MIRA model where the flow separation is serious, as shown in Fig. 2.

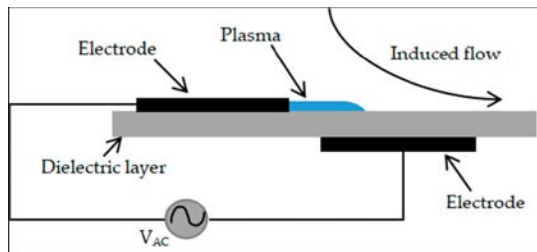


Fig. 1: Surface dielectric barrier discharge (SDBD) plasma actuator structure.

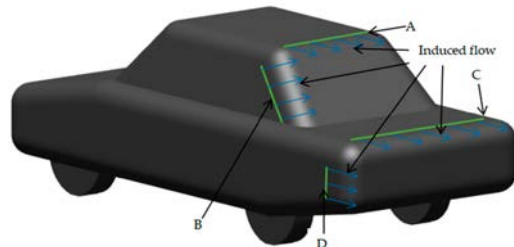


Fig. 2: Schematic of the vehicle with the plasma actuator

3. Achievements

The results illustrate that only the actuation at the side of the trunk can reduce the drag, and when the plasma actuation was applied at each position separately, the drag reduction rate reached 5.35%. The flow field structure at the rear of the vehicle can be enhanced in most cases when the actuation is applied simultaneously at two or more positions. Particularly, the drag reduction effect is best performed as high as 8.76% when the actuation is applied simultaneously at all positions. Meanwhile, the actuation voltage is optimized by an efficient global optimization algorithm, and the drag reduction rate reaches 13.17%. This suggests that the plasma jet can obviously inhibit the flow separation in the tail of the vehicle and strengthen the aerodynamic characteristics of the vehicle as long as the appropriate plasma intensity is applied at the appropriate position. The latest research trends demonstrate the influence of the output voltage of the actuator on the control effect to some extent, but other parameters of the plasma actuator have not been considered, such as the influence of actuation frequency, electrode width and thickness and dielectric thickness on the control effect. Fig. 3 shows the influence of different positions and voltages on the drag coefficient, and Table 1 lists the drag coefficients with different flow velocities when the actuation is arranged on place A.

These results help us to further understand the flow theory of the complex wake flow of a vehicle and give enlightenment to build the theory model of boundary layer flow for unidirectional wing.

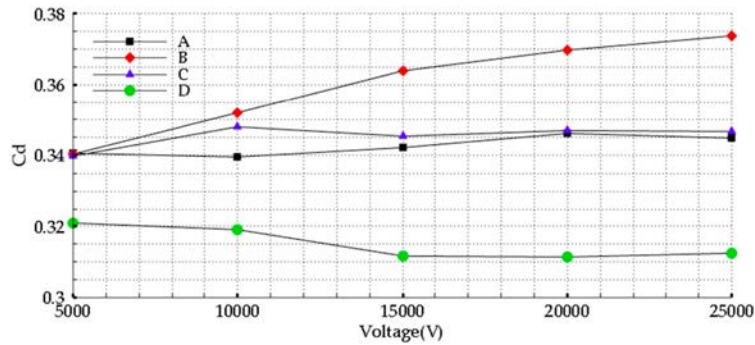


Fig. 3: Influence of different positions and voltages on the drag coefficient

Table 1: Drag coefficients with different flow velocities when the actuation is arranged on place A

	0kV	14 kV	16 kV	18 kV	20 kV	22 kV	24 kV
10m/s	0.3471	0.3331	0.3304	0.3272	0.3223	0.3262	0.3279
15m/s	0.3240	0.3162	0.3138	0.3114	0.3082	0.3067	0.3091
20m/s	0.3053	0.3013	0.3004	0.2982	0.2947	0.2921	0.2908
25m/s	0.2968	0.2962	0.2948	0.2931	0.2913	0.2905	0.2883

4. Summaries and future plans

In this study, the plasma active flow control technology is applied to vehicle drag reduction through numerical simulation methods, which promotes its development in the field of vehicle aerodynamics, and accumulates experience and data foundation for the practical application of active flow control technology to vehicle aerodynamics, as

well as to help us to further understand the flow theory of the complex wake flow of a vehicle.

Future work will involve studying the control effect of the flow field of the vehicle via the latest plasma numerical simulation methods, and verifying the numerical simulation results by wind tunnel test on the account of the influence of more actuator parameters on the control effect.

5. Research results

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

[1] C. Lai, H. Fu, B. Hu, Z. Ling, and L. Jiang: Aerodynamic Drag Reduction and Optimization of MIRA Model Based on Plasma Actuator, *Actuators*, Vol. 9, No.3, (2020), 64 (16 pages), doi: 10.3390/act9030064.

[2] C. Lai, H. Fu, Z. Ling, L. Li, and S. Obayashi: Numerical simulation of controlling backward facing step flow based on plasma actuator, *Machine Tool & Hydraulics*, 48 (24): (2020), pp. 101-108, doi: 10.3969/j.issn.1001-3881.2020.24.015

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

*[3] C. Lai, H. Fu, Z. Ling, Y. Zhou, and S. Obayashi: Numerical Study on Backward-facing Step Flow Separation Control by SDBD Plasma Aerodynamic Actuation, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2020), CRF 35, pp. 58-59.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J20I010
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	1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, Boltzmann 方程式を基礎とする原子・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 Knudsen 数が小さくない熱流動場では, 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

研究の初年度は, 様々なマイクロ・ナノスケールのアプリケーションで有益なマテリアルとなる遷移金属の固体表面に対して, 単原子分子気体の散乱特性を分子動力学解析により詳細に調べ, 基礎的データの収集を行った. 具体的には, 金原子の FCC(111)面に対するアルゴン気体分子の散乱について, 気体-固体表面間の分子間ポテンシャルに Buckingham 型のポテンシャルを採用し, 平滑な金表面での気体分子散乱特性への影響を調査した. なお, 温度 300K の金原子の固体表面では, アルゴン気体分子の物理吸着が確認され, 物理吸着表面に対するアルゴン気体分子の散乱について, 二平板壁間に温度差を有する Couette 流れに対する流れ場を対象に DSMC 法と分子動力学法をカップリングした手法により解析を実施した. 図 1 は, 固体壁面でのアルゴン気体の入射・反射分子の分子速度分布関数を示しており, 反射分子の速度分布関数は, 概ね拡散反射の分布に近い結果が得られている. 入射した気体分子が金表面分子や物理吸着分子と十分干渉した後に反射していることが示唆される. また, 固体表面との適応度合いを定量的に表す接線方向運動量適応係数を求め, 先行研究で得られている, 白金原子の固体表面の結果と比較して, 接線方向運動量適応係数が大きな値を示すことが明らかになった.

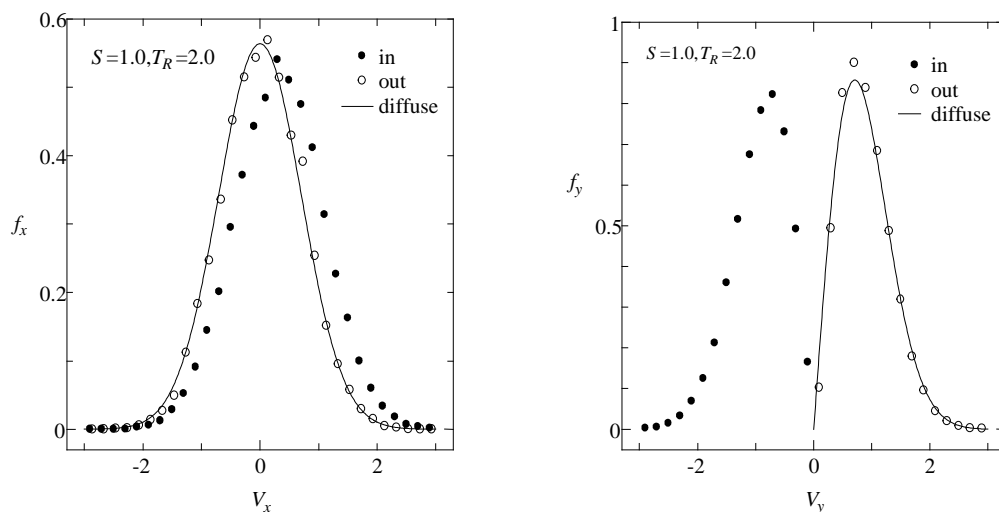


図1：固体表面での入射・反射分子の速度分布関数（左：接線方向，右：法線方向）

3. 研究目標の達成状況

今年度は，金固体表面でのアルゴン気体分子の散乱現象について，分子動力学解析により吸着分子を伴う平滑な固体表面での分子速度分布関数や運動量適応係数を明らかにすることができた．これまでの知見と合わせて，原子レベルの界面構造の相違による気体分子散乱挙動を明らかにし，散乱モデル構築にむけて，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 流れに対して，壁面での気体分子の反射に対して，分子動力学法による干涉解析を行い，金固体表面でのアルゴン気体分子の散乱特性として，分子速度分布関数や接線方向運動量適応係数を求め，壁面温度や壁面速度の違いによる気体分子散乱データの取得を行った．今後は，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に評価していく．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Y. Kosaki, H. Takeuchi, I. Kinefuchi, and T. Tokumasu: Scattering Properties of Gas Molecules on Interfaces of Nanostructures using Molecular Dynamics Analysis, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-93, p. 162.

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	J20I011
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year (progressing)

Development of Pressure Measurement Method in Laser-Cavitation Bubbles

Takehiko Sato *†, Mohamed Farhat **††
 Outi Supponen ***, Kiyonobu Ohtani *, Tomoki Nakajima *, Satoshi Uehara *
 *Institute of Fluid Science, Tohoku University
 **Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)
 *** ETH Zurich
 †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Cavitation bubble dynamics is still a major issue for a variety of industrial applications, including hydraulic machines, marine propellers and space rocket inducers among others. We have clarified that hydrogen gas is included in a plasma generated bubble and jetting dynamics from cavitation bubble through the previous IFS collaboration research project. We strongly believe that the complementary skills developed by the research groups led by Prof. Farhat (EPFL) and Prof. Sato (Tohoku University) will greatly help achieving the project goals.

2. Details of program implement

Figure 1 shows an experimental setup. The microbubbles of around $2\ \mu\text{m}$ in diameter, which were generated by an ultrasound agent, were grown by tension waves. The quasi-planar tension waves were generated by reflection of the spark-generated shockwave at water surface through a flat alumina plate of 0.2-mm-thick. The images of bubble behaviors were captured by an ultra-high speed camera with the frame rate of 10 Mfps.

Figure 2 shows temporal change of the bubble radius (a) and temporal change of the bubble center position (b). Circle symbols show the experimental data and lines show the computational results. The trends of temporal change of

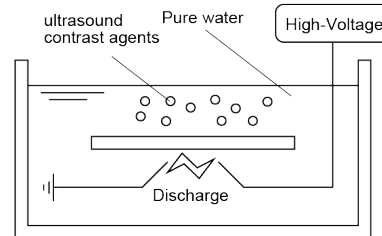


Fig. 1 Experimental setup.

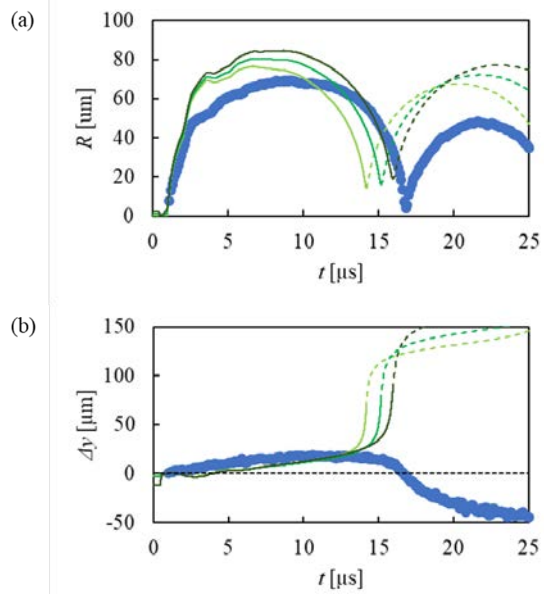


Fig. 2 (a) The temporal change of the bubble radius of the cavitation bubble produced from the coated bubble. (b) The temporal change of the bubble center position of the cavitation bubble produced from the coated bubble at y axis. The lines in light, intermediate, dark green show the calculations with $R_{\text{ini}} = 0.4, 1.2, 2.5\ [\mu\text{m}]$, respectively. The solid and dashed lines show the cavitation bubbles before and after the total collapse, respectively. The dotted line shows

the bubble radius obtained by computational method correspond to the experimental data, especially, at the time of compression and tension wave passing. The center location shows similar trends between the experimental and computational methods before the first collapse. However, after collapse, the trends show the opposite directions.

3. Achievements

In this study, we have found that the movement of center locations of the cavitation bubbles show different directions after the collapse and the computational analysis does not correspond with the experimental data after collapse. We observed cavitation bubble behavior generated by expansion wave by constructing the ultra-high speed camera system. It is found that there is a linear relation of maximum radius R_{\max} and collapse time T_E .

4. Summaries and future plans

We investigated the cavitation jetting characteristics in this year and aim at the clarification of detail mechanism of movement of jetting cavitation bubbles.

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, T. Akimura, T. Nakajima, K. Ohtani, Q. Supponen, M. Farhat, and T. Sato: Characteristics of Jetting from Micro Cavitation Bubbles, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2020)*, Sendai, オンライン開催, (2020), CRF-15, p. 25.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

課題番号	J20I014
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	1年目（発展）

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*, 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、申請者らのこれ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

水中ストリーマガスチャネル内の圧力の評価を行うための計測法の開発に取り組み、昨年度までに開発した水中に発生させたレーザー収束誘起気泡内の圧力測定装置を、本年度では改良し圧力測定精度の向上を目指した。Fig. 1 に気泡内圧力計測の実験装置を示す。立方体の容器の各面に窓を設け、レーザー収束光の導入や電極の挿入、背景光の入力と高速度カメラによる観察が行えるようにした。本年度は、針状電極をワイヤ状に変更し、平行に設置す

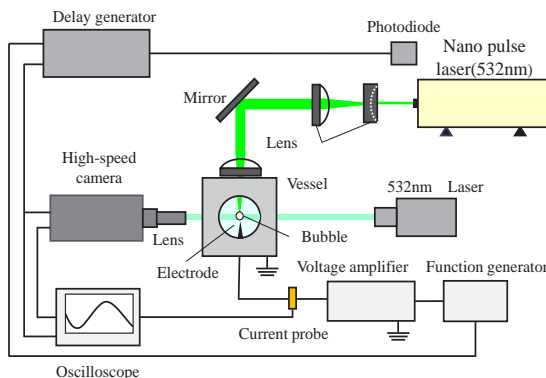


Fig. 1 A schematic of the experimental setup for observation of growth and collapse process of the laser-induced bubble and the discharge emission in the bubbles.

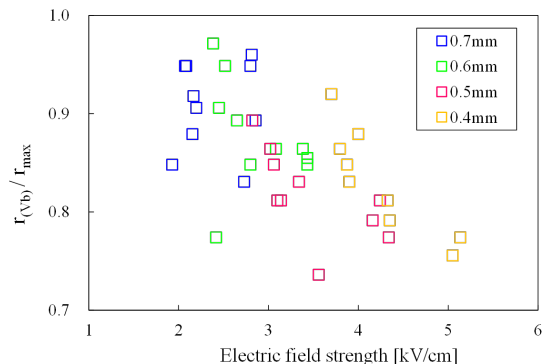


Fig. 2 The ratio of the bubble radii at the breakdown and the maximum of the primary bubble against the electric field strength.

ることで、電極間を結ぶ平面においてできるだけ平等電界が形成されるように工夫した。これにより、パッシェン曲線において用いる電界強度がより正確に与えられる。パッシェン曲線は、ガス種により異なるため、昨年度用いた空気の代わりに本年度は水蒸気ののパッシェン曲線を利用した。印加電圧は1.5 kVと2.0 kVの2条件、電極間距離は0.4 mmから0.7 mmまで0.1 mm毎に変化させ、放電時の気泡の大きさを高速カメラで撮影した。さらに、可視化画像を解析し放電時の気泡体積と最大径に達した時の気泡体積を求め、断熱変化を仮定して最大径時の圧力を算出した。Fig. 2に最大径と放電時の気泡径の比と電界強度の相関を示す。これより、電極間距離が短く電界強度が大きくなるほど、放電時の気泡径が小さくなることを示された。すなわち、この圧力計測手法は気泡内の圧力の変化を捉えていることが示された。

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、ストリーマガスチャンネル内の圧力測定法を改良し、気泡内圧力を捉えていることを明らかにした。これは、当初予定した計画通りであり、本年度の目的を達成した。

4. まとめと今後の課題

本年度では、放電を利用したレーザー誘起気泡内圧力計測法の提案と検証を行い、気泡内圧力を捉えていることを示した。今後は、圧力の推定を行い、気泡内圧力の解析を実施する。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] S. Uehara, S. Kamata, T. Nakajima, Y. Iga, S. Kanazawa, T. Sato: Improvement of Pressure Measurement Method in a Laser-Induced Cavitation Bubble, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, オンライン開催, (2020), CRF-16, p. 26.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

Project code	J20I015
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Data-Driven Kriging-Variant Characterization and Construction for Complex
Aerospace Problems

Rhea P. Liem*†, Koji Shimoyama**††
K. S. Oyetunde*, P. S. Palar***

*Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, HKUST

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Institut Teknologi Bandung (ITB)

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The key objectives of the proposed approach are twofold. First, we aim to gain a fundamental understanding on how the assumptions, model structure selection, and hyperparameter derivation in kriging construction affect the effectiveness of kriging model. This insight would be useful to systematically study the suitability of different kriging variants to approximate function profiles with different characteristics. Second, we would derive a systematic and computationally rigorous method to select the optimum model structure and parameters of the kriging model for the specific problem at hand. This task would involve characterizing the function profiles based on sample data (i.e., to “learn” about the function characteristics), which would be achieved by incorporating machine learning techniques in the kriging derivation procedure. Our research efforts will lead the way to seamlessly integrate data-intelligence and surrogate modeling techniques to improve approximation accuracy via “customized” kriging models.

2. Details of program implement

Kriging has been demonstrated successfully in various applications, including those in the context of aerospace engineering applications performed by the project leaders and the team members. The complexity of the physical system that needs to be modeled, however, could quickly surpass the modeling capability of the conventional kriging models. As an example, an aircraft design problem that considers all mission phases from takeoff to landing would require a more complex aerodynamic performance modeling than, say, when we only focus on the cruise portion of the flight. A kriging model is typically defined by its model structure (e.g., the correlation function), model parameters (e.g., the global model coefficients), and hyperparameters (e.g., correlation parameters). The model parameters and hyperparameters are typically derived to maximize the likelihood function, to find the “best fit” with respect to the available sample data. The selection of model structure, on the other hand, is usually not as rigorous, and sometimes subjective or empirical. This procedure limits the flexibility of the model, in particular when the problem is highly nonlinear and has a heterogeneous function profile. These challenging function characteristics are inevitable when we wish to model the aircraft design problem as realistic as possible.

The main purposes of the proposed research are twofold. First, we would investigate the relationship between problem characteristics (e.g., dimensionality, nonlinearity, multi-modality, function gradients), and kriging structures and parameters. As an example, previous works by our team members have shown that using multiple kernels in kriging can improve the approximation accuracy for some problems, which can justify the increased computational complexity. However, the studies have been empirical and it is not yet understood, from the mathematical perspective, why and when using multiple kernels should be preferred than using a single kernel. We would start this study by generating an ensemble of “tunable” analytical functions, i.e., where we can explicitly specify the model characteristics. The proper selection of analytical functions to be studied is critical to the success of this work, since we wish to use these functions to analyze the different model structures and inherent assumptions in kriging derivation. This task thus requires a strong understanding of the fundamental theory and derivation of kriging, including all assumptions involved in the derivation. Such assumptions have been taken for granted and are often overlooked; while this might work well for simple problems, these assumptions might impede the effectiveness of using kriging models to model complex problems. The model accuracy, and its correlation with the model characteristics, would then be analyzed by employing data analytics techniques. The results of this research phase would help gain intuition and insight into the effectiveness of kriging, which would be used in the next phase. Second, we would develop kriging variants that offer more flexibility and thus are more suitable for modeling complex aerospace problems. The variants would include, but not limited to, using multiple kernels in the model structures, and incorporating the machine learning ensemble approach to derive the mixture of experts model. Such approaches are aimed to combine the strength of each expert in order to boost the approximation accuracy of the derived surrogate models. The final deliverable would be a computationally rigorous technique to use sample data to select the optimum kriging variant in addition to deriving the models.

3. Achievements

Due to the disruption brought about by the Covid-19 pandemic, we could not travel to have research meetings, and progress in the collaboration has been slow.

4. Summaries and future plans

We still wish to continue our close collaborations and produce more research outputs (e.g., conference papers and journal articles). When the situation allows, we will resume our travels for research meetings and continue our discussion. We will also apply for another IFS Collaborative Research Project fund in the future.

5. Research results

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

Project code	J20I016
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Development of Deep Gaussian Processes for Complex Fluid-Structure Interaction Problems

Lavi Rizki Zuhail*†, Muhammad Faiz Izzaturahman**
Pramudita Satria Palar***, Koji Shimoyama**††

*Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Institut Teknologi Bandung

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

This research aims to develop a set of surrogate modeling methods, with emphasis on deep Gaussian Process (DGP), to solve complex fluid-structure interaction (FSI) problems frequently encountered in aerospace and civil engineering. The responses in FSI problems are highly non-linear and non-stationary; thus, special treatments are needed to handle such problems. A variety of surrogate models, which include support vector regression, DGP, and gradient-enhanced polynomial chaos Kriging, was developed. The methods were applied on a set of aerostructural problems and the results show the high capability of the proposed methods in approximating the complex input-output relationships.

2. Details of program implementation

Three models were developed in parallel and started from the gradient-enhanced polynomial chaos-Kriging method (GEPCK). GEPCK utilizes polynomial chaos in the trend function and stochastic part of Kriging to create highly accurate models. The application on a 17-dimensional wing aerostructural problem reveals that the method outperformed state-of-the-art surrogate modeling methods (see Fig. 1). Beside aerostructural problem, the method is applicable for other complex aerospace problem, e.g. mission analysis and uncertainty quantification problem.

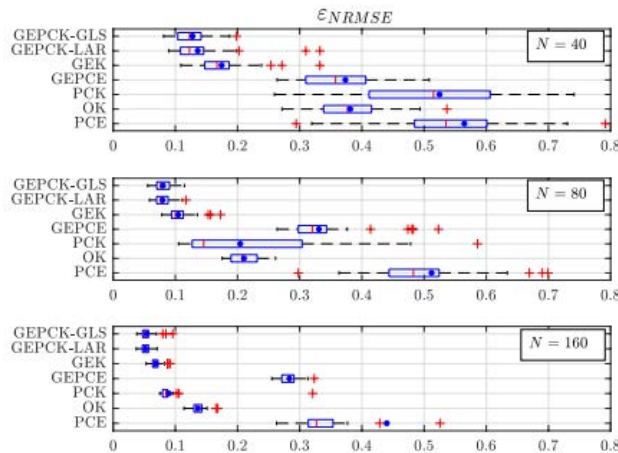


Figure 1 : Results for the aerostructural problem. The proposed methods (GEPCK-GLS and GEPCK-LAR) yielded the best accuracy.

Besides, the support vector regression (SVR) was developed first to handle flutter boundary detection in a two-dimensional Isogai problem. The objective in the Isogai problem is to accurately capture the flutter boundary with as few simulation calls as possible. As shown in Fig. 2, SVR accurately captured the non-linear trend in the Isogai problem with limited calls of CFD simulation. The unsteady CFD simulation used to model the Isogai problem is highly expensive; thus, SVR greatly helps in reducing the computational burden to solve this particular task.

Next, we developed a surrogate modeling framework based on DGP and tested it on Isogai problem. The development is still ongoing

3. Achievements

The method was successfully used to model the relationship between Mach number and flutter speed index (i.e., the input variables) with the damping coefficient (i.e., the output variable). Based on this surrogate model, the flutter boundary is extracted by locating the contour of zero damping coefficient. Designers can then use this information to draw the safe flight envelope according to the flutter boundary.

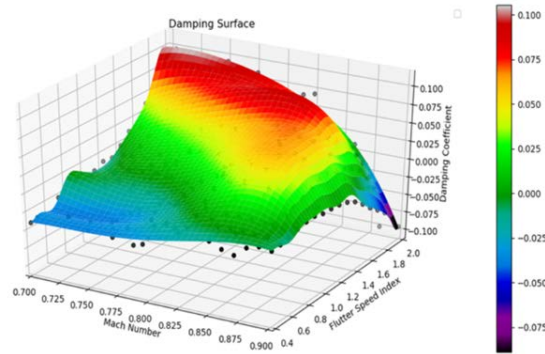


Figure 2: The application of SVR on the Isogai problem.

4. Summaries and future plans

In this research, a set of advanced surrogate modeling methodology was developed to tackle non-linear problems, with emphasis on fluid-structure interaction problem which is known for its highly nonlinear response. The three methods are GEPCK, SVR, and DGP, in which each method relies on different working mechanism and principle to build the approximation model. The methods were applied mainly on aerostructural and aeroelastic problems, including wing aerostructural and Isogai problems. The errors yielded by the three methods are lower than conventional and state-of-the-art methods, indicating high efficiency of the proposed techniques.

For future works, we plan to investigate DGP more for an even more complex FSI problem. For example, the method can be applied for problems with higher dimensionality of the input variables.

5. Research results

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

- *[1] P. S. Palar, M.F. Izzaturrahman, L. R. Zuhul and K. Shimoyama: Prediction of the Flutter Boundary in Aeroelasticity via a Support Vector Machine, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-19, pp. 30-31.
- [2] P. S. Palar, K. Zakaria, L. R. Zuhul, K. Shimoyama, and R.P. Liem: Gaussian Process and Support Vector Regression for Uncertainty Quantification in Aerodynamics, *AIAA Scitech Forum 2021*, (2021), AIAA 2021-0181, pp. 181-193. <https://doi.org/10.2514/6.2021-0181>.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J20I018
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	3rd Year

Solid Oxide Fuel Cells Replacement of a Traditional Catalytic Converter

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 Project

Study the characteristics of combustion of typical automotive fuels, such as gasoline and diesel, and how they relate to performance characteristics of solid oxide fuel cells (SOFCs). The eventual objective is to integrate SOFCs into automotive exhaust to increase efficiency and decrease emissions.

2. Details of Program

It was discovered that the primary concern that needed to be addressed was the ability of a SOFC to reduce automotive emissions to successfully replace a traditional catalytic converter. A Ni-gadolinium doped ceria (Ni-GDC) SOFC was compared against a section of commercially available catalytic converter. The anode of the SOFC was made via dry pellet pressing of 60% by weight NiO and 40% by weight GDC powder. The anodes were then pre-sintered at 1000°C. A GDC electrolyte was then wet-powder sprayed onto the anode layer. The anode and electrolyte layers were then co-sintered to 1400°C. Finally, a lanthanum strontium cobalt ferrite (LSFC: $\text{La}_{0.60}\text{Sr}_{0.40}\text{O}_{0.95}\text{Co}_{0.20}\text{Fe}_{0.80}\text{O}_{3-x}$), GDC cathode layer was wet-powder sprayed onto the electrolyte.

A test was constructed in order to investigate the fundamental mechanism by which the cathode layer of the electrochemical-catalytic membrane was able to significantly breakdown NO. The new electrochemical-catalytic membrane, with 0.81 cm² of reactive surface area, is tested for NO reduction against: 1. VAG catalytic converter with 0.81 cm² of reactive surface area; 2. The same electrochemical-catalytic membrane with the anode and cathode wired together to resemble a short circuit condition (hereafter referred to as an external short circuit or short circuited); and 3. The same electrochemical-catalytic membrane with an external 3 V, 8,000 μs (4 % duty cycle) pulse width modulation (PWM) signal with 0.81 cm² of reactive surface area. Each specimen was held at 600 °C and subject to 5 ml/min flow of a certified premixed gas cylinder of 10 vol% NO and 90 vol% N₂. All testing equipment was cleaned, dried, and flushed with Ar for 1 hour within the furnace at 600 °C prior to testing, to ensure no contamination of results. Only N₂ and NO were supplied to the testing apparatus. During each test, the internal furnace environment surrounding the testing equipment was flooded with Ar, in order to ensure an external inert environment and to detect any leakage. For the electro-chemical catalyst, the NO flow was sent to the cathode side of the membrane. The voltage signal for both the electro-chemical catalytic membrane and the short-circuited membrane were recorded with a 100 MHz oscilloscope.

3. Achievements

Specimen Sample	NO Concentration in Effluent (vol %)	Percent Reduction from Baseline (%)
Baseline	10.0	-
PGM Catalytic Converter	7.08	29.2
Short Circuited Electro-chemical Catalytic Membrane	7.01	29.9
Electro-chemical Catalytic Membrane	3.10	69.0
Electro-chemical Catalytic Membrane with 3V PWM Signal	2.07	79.3

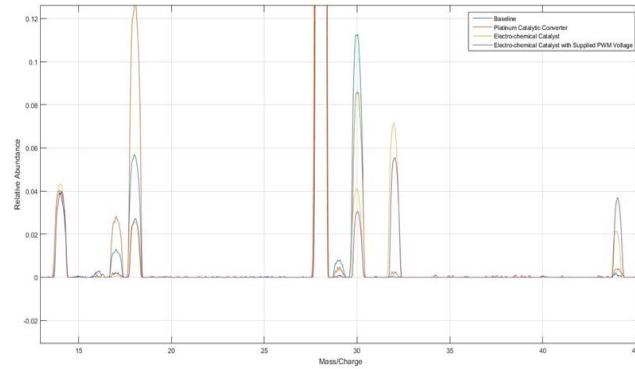


Figure 1: Comparison of Exhaust Effluent after Interacting with Each Specimen at 600 ° C and Subject to 5 ml/min Flow of 10 vol% NO and 90 vol% N₂.

4. Summaries and future plans

The electro-chemical catalytic membrane shows significant deviations from all other specimens in the mass spectrum at 17, 18, 30, 32 and 44 amu. The large peak at 18 amu, followed by sub-peaks at 17 and 16 amu indicates lone and charged oxygen. The peak at 44 amu indicates a concentration of N₂O. The decrease in magnitude at 18 amu and the substantial peak at 44 amu represents a significant deviation from the majority of literature for NO breakdown. Formation of N₂O is seen in the mass spectrum analysis of the electrochemical catalytic membrane and more predominately in the electrochemical catalytic membrane with forced electrical oscillations. It is not as evident in the effluent of the traditional PGM catalyst, nor the electrochemical catalytic membrane with an electrical connection between the anode and cathode. The deposition, removal, and rearrangement of electrons from/on the catalytic surface is believed to be the key in altering the probability of reaction pathways. The unique configuration of a metal-based catalytic surface connected through a dielectric membrane to another metal-based electrode allows for the potential of surface charging and charge communication without significant internal current flow or internal charge balancing. This charging and discharging of the catalytic surface allows for the altered chemical reaction pathways demonstrated in this work.

5. Research results

1) Journal

[1] Welles, T. S., Ahn, J.: Novel investigation of perovskite membrane based electrochemical nitric oxide control phenomenon, *Sci Rep.*, Vol. 10, (2020), 18750. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75360-7>.

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

[2] Welles, T. S., Ahn, J.: A novel solid oxide fuel cell based catalytic converter replacement for enhanced emission control and power generation in automotive exhaust, *Proceedings of the SAE*, 20PFL-0379, (2020).

*[3] Welles, T. S., Ahn, J. and Nakamura, H.: Solid oxide fuel cells replacement of a traditional catalytic converter”, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-37, p. 62.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J20I020
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Electric Field Measurements in Nanosecond Pulse Discharges in Atmospheric Pressure Flames for Plasma Assisted Flameholding

Keegan Orr*, Xin Yang**, Ilya Gulko*, Igor V. Adamovich*††, H. Takana***†
 *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Ohio State University
 **State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment
 ***Institute of Fluid Science, Tohoku University
 †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Provide quantitative insight into mechanisms of formation and development of transient plasmas generated by high voltage, ns pulse duration electric discharges in atmospheric pressure flames and atmospheric pressure plasma jets. Such insight is critical to predictive analysis of plasma-assisted combustion and flameholding, and applications of plasmas in biology and medicine.

2. Details of program implement

Ionization wave development during ns pulse breakdown in nitrogen between two parallel plate, dielectric-covered electrodes is studied by ps Electric Field Induced Second Harmonic (EFISH) generation and kinetic modeling. The results indicate formation of two well-defined ionization waves in the discharge gap, which requires a relatively high initial electron density. Both the measurements and the modeling predictions exhibit a transient electric field overshoot in the center of the gap, caused by the anode-directed front of the second wave. The electron density and coupled energy distributions predicted by the model at the end of the discharge pulse are nearly uniform, except near the cathode-adjacent wall, where the applicability of the present model is uncertain and which is not accessible to the EFISH measurements.

3. Achievements

The measurements and modeling calculations are done in pure nitrogen at P=100 Torr and discharge pulse repetition rate of 10 kHz. Both the measurement results and the kinetic modeling predictions, as well as the plasma emission images, indicate formation of two well-defined ionization waves in the discharge gap,

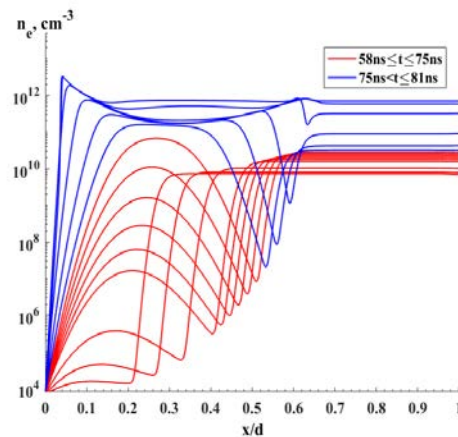


Fig. 1. Electron density distributions predicted by the model, for the initial electron density of $n_0 = 0.7 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Cathode is on the left, anode is on the right. Electron density is plotted for every 4 ns ($t < 70$ ns) and every 1 ns ($t \geq 70$ ns). Formation of second ionization wave with two well-defined fronts propagating in opposite directions is apparent.

which occurs only at a relatively high initial electron density in the gap (i.e. at a high pulse repetition rate). The first, anode-directed, wave is produced by “sweeping” the initial electrons by the applied voltage pulse. The second wave originates between the cathode and the first wave front, due to the field enhancement in this region, generating two wave fronts propagating in opposite directions (see Fig. 1). Only the anode-directed front of the second wave is detected by the EFISH measurements, most likely due to the proximity of the cathode-directed front to the cathode-adjacent wall. The measurements exhibit a strong electric field overshoot on the discharge centerline, caused by the anode-directed front of the second wave (see Fig. 2).

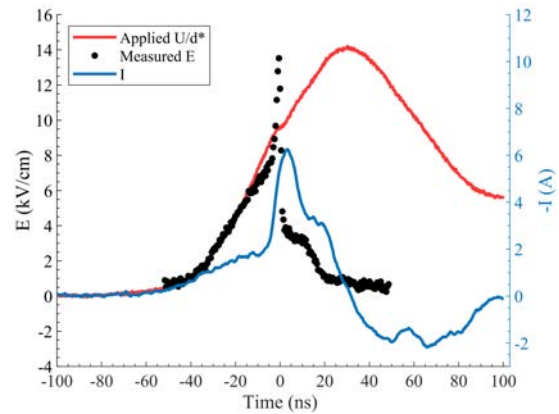


Fig. 2. Time-resolved electric field measured during the discharge pulse on the centerline of the cell.

4. Summaries and future plans

The electron density and coupled energy distributions predicted by the model at the end of the discharge pulse are nearly uniform, except near the cathode-adjacent wall, where the applicability of the present model is uncertain and which is not readily accessible to the EFISH measurements. This suggests that the distributions of the number densities of the excited species generated in the discharge gap at the present conditions are also close to being uniform, justifying the use of the reduced order analytic models. The present results yield the data for the validation of higher fidelity, fully kinetic models incorporating the Boltzmann equation for plasma electrons and non-local ionization.

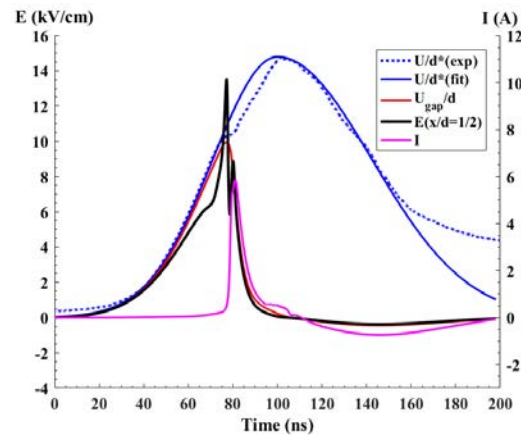


Fig. 3. Kinetic modeling predictions for the electric field and current on the discharge centerline.

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] Keegan Orr, Xin Yang, Ilya Gulko, Igor V. Adamovich and Hidemasa Takana: Formation and Propagation of Ionization Waves During Ns Pulse Breakdown in Plane-to-Plane Geometry, *Proceedings of 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, (2020), CRF-48, pp. 83-84.

[2] K. Orr, X. Yang, C. Richards, E. Jans, S. Raskar, D. van den Bekerom, and Igor V. Adamovich: Characterization and Kinetic Modeling of Ns Pulse and Hybrid Ns Pulse / RF Plasmas, *AIAA Aerospace Sciences Meeting (SciTech 2021)*, (2021), AIAA Paper 2021-0683.

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

Project code	J20I021
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year (progressing)

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

Zhenmao Chen*†, Tetsuya Uchimoto **††
Toshiyuki Takagi **, Shejuan Xie*, Yali Du*, Hong-En Chen*

*School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

In this FY year's project, for quantitative ECT of structures of the carbon fiber reinforced polymer (CFRP) material, numerical schemes for forward and inverse analysis of eddy current testing signals are proposed, implemented and validated for the high frequency eddy current testing of the CFRP structures. At first, an efficient forward solver based on the database approach is updated to treat anisotropic eddy current problem for efficient simulation of the eddy current testing signals due to cracks in a plate of the CFRP material, and an inversion scheme based on the conjugate gradient method is developed using the updated fast forward solver for sizing defect in the CFRP plate. Second, a hybrid inverse analysis scheme is proposed and implemented to improve the sizing accuracy of defect in the CFRP plate using the eddy current testing signals of high frequency. Third, eddy current testing signals due to artificial cracks in CFRP plates are measured and adopted to reconstruct the profile of the cracks. A good agreement between the true and the reconstructed defect sizes demonstrated the validity of both the fast forward solver and the new inversion scheme for sizing defects in the CFRP plate from high frequency eddy current testing signals.

In practice, the fast forward simulation scheme is developed based on the FEM-BEM hybrid code of $A\text{-}\phi$ formulation and the databases approach. An upgraded code is developed and experimentally validated for the rapid and high precision simulation of the high frequency ECT signals due to defects in a CFRP plate. Comparison of numerical results of the present method with those of the conventional full anisotropic FEM-BEM code and the experimental results for artificial cracks in CFRP laminate plates indicates that the proposed novel fast forward scheme can predict ECT signals over 100 times faster but without worsening numerical accuracy, which enables it to be applied in the efficient reconstruction of cracks in CFRP plates and for probe optimization. On the other hand, the conjugate gradient optimization algorithm was adopted to predict the size of the fiber broken defect, which is modeled as a crack in an anisotropic homogenous plate. This inversion scheme can give good reconstruction results of crack sizes with a reasonable computational burden.

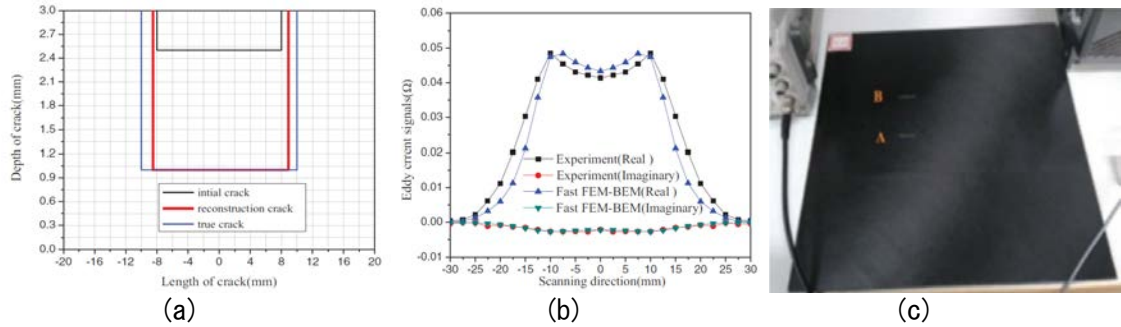


Figure 1: An example of inversion results with experimental signals for a crack in a CFRP plate. (a) Crack profile, (b) Related ECT signals, (c) Viewgraph of the specimen

3. Achievements

In this year's project, an efficient forward solver based on the database approach is updated to treat anisotropic eddy current problem for efficient simulation of the ECT signals due to crack in a plate of the CFRP material at first. A hybrid inversion scheme based on the conjugate gradient method and the genetic algorithm is developed with use of the updated fast forward solver for sizing defect in a CFRP plate. Both inversions with simulated and measured ECT signals were conducted and found very efficient and of high precision. Figure 1 gives an example of the inversion results and a CFRP specimen with crack. The crack profile and signals were properly reconstructed.

4. Summaries and future plans

In this year's project, the numerical methods and codes were developed for both the forward and inverse analyses of the high frequency ECT signals for the fiber broken defect which is modeled as a crack in an anisotropic CFRP plate. The validity was proved by using both the simulated signals and experimental signals due a slit crack in the laboratory environment. As the future plan, the numerical schemes and codes will be further updated and validated for more realistic defect profile and structure configurations. Experiments and reconstructions for defects of different configuration will be conducted to demonstrate their feasibility for practical applications.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - *[1] 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).
 - [2] Y. Zhao, C. Jomdecha, S. Xie, Z. Chen, P. Qi, S. Liao, T. Uchimoto, T. Takagi: Reconstruction of Complex Shaped Crack from ECT Signals Based on a Fast Forward Solver Using an Advanced Multi-Media Element, *Int. J Applied Electromagn. Mech.*, Vol. 64 (2020), pp. 621-629.
 - [3] Z. Xie, Y. Zhao, Q. Li, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi: A Study on Influence of Strong Magnetic Field on Fracture of Interface Crack Considering Magneto-Elastic Coupling Effects, *Int. J Applied Electromagn. Mech.*, Vol. 64 (2020), pp. 581-588.
 - [4] X. Li, C. Pei, S. Xie, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi: A Stable FEM-BEM Hybrid Method for the Numerical Simulation of Magnetomechanical Coupled Problem with Both Inductive and Conductive Current Excitations Aiming to Application to Tokamak In-Vessel Structures, *IEEE Trans. on Plasma Science*, Vol. 48 (2020), pp. 2902-2907.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
Not applicable.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J20I022
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st 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 project is aimed at developing and testing new, practical parameterization schemes for uncertainty quantification of geothermal models to characterize geothermal reservoirs better. We especially target more flexible schemes for describing the energy sources that feed geothermal reservoirs.

2. Details of program implement

Parameterization schemes currently used in the geothermal industry are commonly too inflexible 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 which underestimate model uncertainty. We target developing parameterization schemes which can better characterize geothermal reservoirs and reduce underestimation of model uncertainty.

Our focus has been on developing parameterization schemes for use along with ensemble-based uncertainty estimation methods to characterize geothermal reservoirs. Our prior parameter schemes mainly use Gaussian parameter distributions and thresholding to generate parameter samples. When developing our schemes, we have used state-of-the-art geothermal reservoir models (Fig. 1) as references, which we can compare our parameter proposals against (Fig. 2).

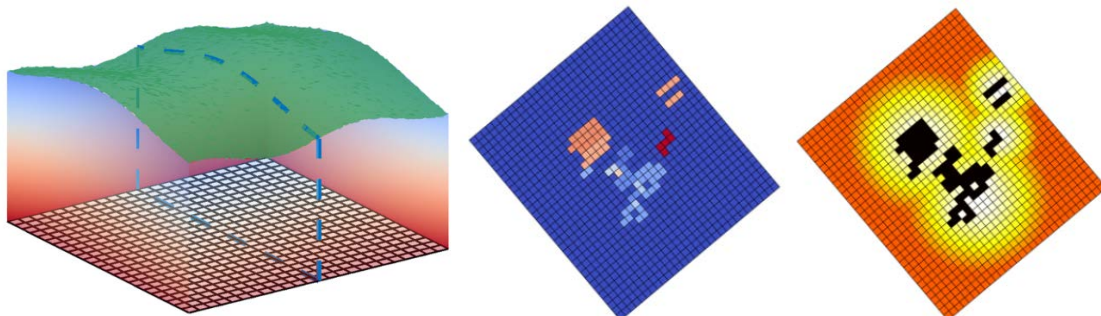


Figure 1 : Example model domain (left). In geothermal reservoir models, sources supplying geothermal energy from deep within the Earth are accounted for by assigning mass fluxes (center) and heat fluxes (right) to the bottom boundary. The parameters depicted here are representative of parameters used in a state-of-the-art model (developed over many years) of the Wairakei geothermal field.

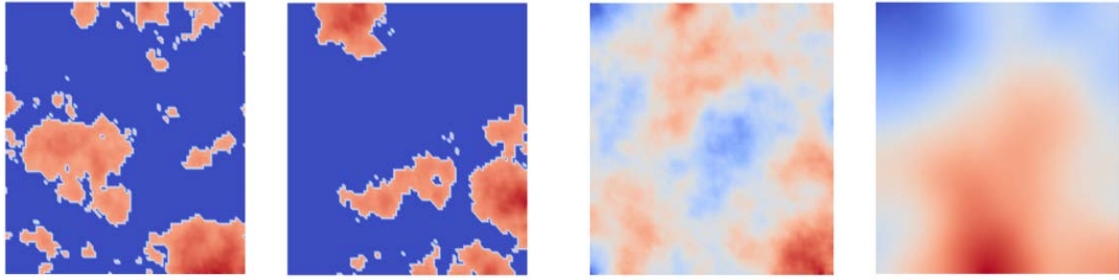


Figure 2 : For the bottom boundary, mass-flux regions can be sampled by using Gaussian distributions, which promote smoothness, and level-sets (left figures). Heat-fluxes can be represented by choosing appropriately smooth Gaussian prior parameters (right figures).

3. Achievements

We have developed a better understanding of what types of parameterization schemes are suitable for geothermal reservoir modeling. Furthermore, we have proposed novel parameterization schemes for geothermal models and presented our results at two conferences [1,2]. 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 a large number of 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. However, we have yet to complete uncertainty quantification experiments to showcase our parameter representation schemes.

4. Summaries and future plans

We have considered various representations for unknown parameters in geothermal models and demonstrated that Gaussian distributions can be used, along with additional processing such as thresholding, to generate parameter samples having features which resemble what we might expect for geothermal settings. The parameterization schemes proposed here could prove to be more flexible and useful than standard geothermal parameterization schemes. In future work, we aim to refine our parameterization methods further and demonstrate their applicability by carrying out uncertainty quantification experiments. Those experiments are aimed at highlighting the effectiveness of our schemes, such as our novel schemes for describing deep geothermal energy sources.

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] E. K. Bjarkason, R. Nicholson, O. J. Maclaren and A. Suzuki: New parameterization methods for uncertainty quantification of geothermal models, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-45, pp. 77-78.
- [2] R. Nicholson, O. J. Maclaren, J. P. O'Sullivan, M. J. O'Sullivan, A. Suzuki and E. K. Bjarkason: Representation of unknown parameters in geothermal model calibration, *Proceedings of the 42nd New Zealand Geothermal Workshop*, Waitangi, New Zealand, (2020), 8 pages.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J20I023
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	1年目（発展）

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
 ***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

本年度は新型コロナウイルスに関連した緊急事態宣言により、流体研での実験を行うことはできなかった。このため、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 300mm × 200mm へと拡大した。これによって背景画像の大きさも拡大する必要があり、従来の LED 光源では照射可能領域が狭いため、広範囲を照射可能な LED 光源の作成を行なった。従来は視野に対して飛翔体が大きかったため、僅かな弾道のずれが計測の失敗につながってしまっていたが、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の LED 等を利用して安価に開発して様々な飛翔体を用いた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）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[1] M. Yamagishi, Y. Yahagi, M. Ota, Y. Hirose, S. Udagawa, T. Inage, S. Kubota, K. Fujita, K. Ohtani, H. Nagai: Qualitative Density Measurement of Wake Region behind Re-entry Capsule: Improvements in Accuracy of 3D Reconstruction by Evaluating the View-Angle of Measurement System, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-57, pp. 101-102.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20I024
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

飛翔体上の非定常流体場計測のためのマルチカラーPSP技術の基礎研究
Development of Multi-Color PSP Technique for Ballistic Range Experiments

沼田 大樹*†, 大谷 清伸**††
 *東海大学工学部, **東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

バリスティックレンジは、飛翔体を様々な速度で射出することで試験部内を自由飛行させ、支持干渉なしの模型回り流れを実現できる空力実験装置である。バリスティックレンジを用いた様々な空力研究においては、飛翔体の空力現象の把握のために、主にシュリーレン法やシャドウグラフ法等を用いており、これにより飛翔体周りの流れ場の把握を行っている。しかしながら、これら計測法は一般的には定性的可視化法に位置付けられ、流れ場構造を把握することはできても、飛翔体に作用する空気力等を、可視化結果から直接的に把握することは困難である。

そのような中、近年感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint, PSP) が注目されている。これは機能性分子センサの一種であり、蛍光色素の酸素消光作用を用いて塗布面の圧力変化を色素からの発光の形で検出可能となる。本手法は光計測であるためバリスティックレンジのような自由飛行する飛翔体であったとしても原理的に親和性が高い。

しかしながら、バリスティックレンジにおける PSP を用いた定量的な圧力計測には課題点も多い。第1に、発光強度比の算出に必要な参照発光が通常の PSP 計測のようには得られない点であり、第2に、PSP には温度誤算が存在することである。これらの問題を解消するためには、参照発光をいかに取得するか、補正用の温度データを以下に取得するかが問題となる。

本研究では、これらの問題を解決するため、PSP に対して他の蛍光色素を混合し、その色素からの発光を PSP の発光と同時に計測することで PSP の参照発光としての利用および温度補正データとしての利用を行うことが可能な、マルチカラー PSP 技術の基礎研究を行うものである。

2. 研究成果の内容

本年度においては、色素混合による PSP の特性への影響を調査するため、複数の蛍光色素を PSP の色素と同時に溶液に溶解して PSP サンプルを作成し、その特性を調べた。特性としては、圧力感度や温度感度等の静的特性、および時間応答特性などの動的特性を評価し、それらの結果を踏まえてマルチカラー PSP に適した色素の組み合わせの可能性を検証した。

結果として、比較的理想的な特性を有する色素の組み合わせ等を見出すことに成功した。また、その過程において、特性評価のための新たな評価法の開発にも成功し、その手法を用いることで従来よりも妥当な結果を比較的短時間に得ることに成功した。

3. 研究目標の達成状況

本年度については、サンプル試験ベースの試験に終始せざるを得ず、試作した PSP を実際のバリステックレンジ試験において試験するところまでは至らなかった。しかしながら、PSP の開発においてはいくつか特性的に適した候補を得ることに成功しており、バリステックレンジ試験へ適用する上での各種準備はほぼ完了している状況である。

4. まとめと今後の課題

今後においては、本年度は実施まで至らなかったバリステックレンジを用いた実証試験を行い、開発した PSP が実試験においてどの程度の性能を示すかの検証を行う必要がある。また、より多くの PSP を作成し、PSP の特性向上に向けた開発も引き続き行っていく予定である。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] D. Numata and K. Ohtani: Development of Multi-Color Pressure-Sensitive Paint for Ballistic Range Experiment, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-21, p. 33.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）

なし

（受賞）

なし

（マスコミ発表）

なし

課題番号	J20I025
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	2020.4～2021.3
継続年数	2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。これに加えて、温度センサ配置と状態推定精度の関係解明を目指す。

2. 研究成果の内容

今年度は、これまでよりも大規模な熱数学モデルに対しての伝熱状態を推定するために、機械学習の一種である深層学習に着目した。深層学習は Deep Neural Network (DNN) を用いてデータセット間の複雑な関係を模擬するもので、容易な実装が可能である。これを宇宙機の熱数学モデルに適用することで機体の温度データから任意の熱コンダクタンスを推定することを目的とする。さらに、手法の有用性を検証するために模擬小型衛星のモデルを用いた数値実験を行った。

3. 研究目標の達成状況

DNN を用いた手法の有用性を確かめるため、模擬小型衛星 eATMOS モデルによる数値実験を行った。モデルは図 1 に示すように内部 Deck, 外部 Panel から成り、Panel は宇宙空間と輻射による熱交換が行われるものとする。

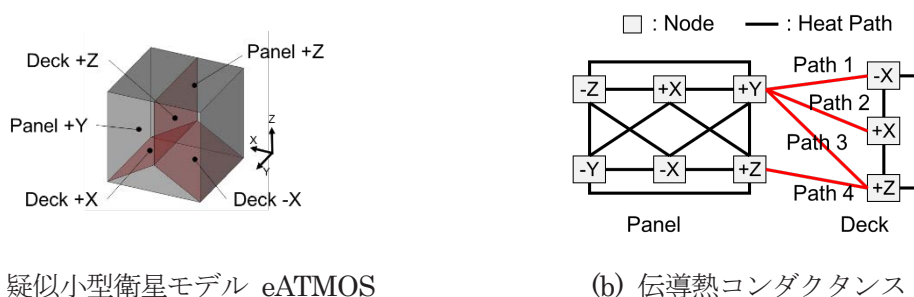
図 2 に検証結果を示す。Case 1 においては熱コンダクタンスの推定精度にバラつきが見られるものの、Case 2 では高精度に推定が行われていることが確認された。また Case 1, Case 2 における相対誤差の中央値はそれぞれ 12.93%, および 3.19% であった。

本研究では熱数学モデルに含まれる所望の熱コンダクタンスを温度データから求めるために DNN を用いた推定手法を提案した。数値実験の結果、熱コンダクタンスの DNN による推定が可

能であることが確かめられた。一方で推定精度は DNN の入力値となる温度データによって異なることから、その要因を定量的に評価する必要がある。

4. まとめと今後の課題

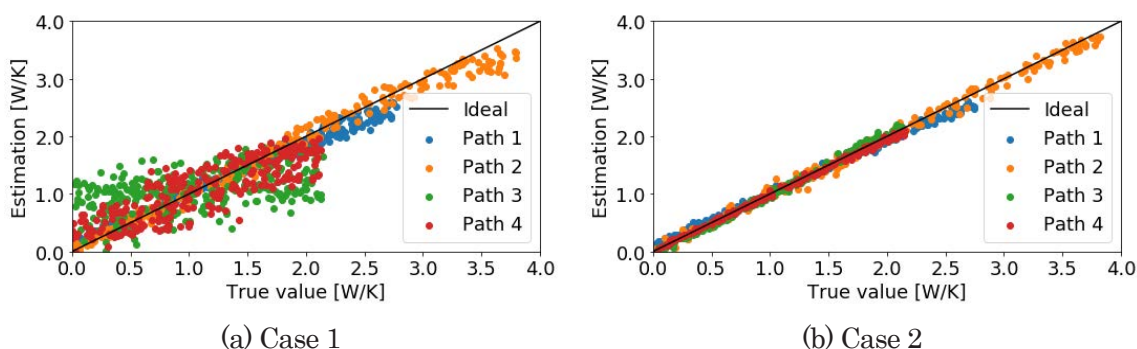
これまでの研究によって、宇宙機のような限られた温度データしか得られない事象から機体の伝熱状態を推定する手法が可能となった。ただし、これまで状態推定が出来た熱数学モデルの規模は深層機械学習を応用した方法でも実際の衛星などと比べて依然、小規模のみである。今後は、Physics Informed Neural Network (PINN)を利用することも視野に入れて大規模なネットワークモデルの状態推定を行うことを目指し、研究を継続していく予定である。



(a) 疑似小型衛星モデル eATMOS

(b) 伝導熱コンダクタンス

図1 熱数学モデル



(a) Case 1

(b) Case 2

図2 熱コンダクタンス推定結果

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] Hiroto Tanaka, Takashi Misaka, Hiroki Nagai: Data Assimilation Applied Thermal Analysis of Mars Airplane for High-Altitude Flight Test (MABE2), *50th International Conference on Environmental Systems*, Sendai, (2020), ICES-2020-120.

[2] Hiroto Tanaka, Hiroki Nagai: Sensitivity Analysis of Observation Point for Data Assimilation: Application to Thermal Analysis of Pseudo Small Satellite, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), Sendai, OS18-19, pp. 514-515.

*[3] Hiroto Tanaka, Takashi Misaka, Hiroki Nagai: Establishment of High-accuracy Analysis Method of Spacecraft Thermal System Using Data Assimilation (2), *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*,

Sendai, (2020), CRF-53, pp. 93-94.

- [4] 田中寛人, 藤田昂志, 大山聖, 永井大樹: 火星飛行機の高高度実証試験 (MABE-2) における機体システムの熱解析, 第 64 回宇宙科学技術連合講演会, (2020), 1D02.
- [5] 田中寛人, 永井大樹, 藤田昂志, 小川博之: Deep Neural Network を用いた宇宙機システムの熱コンダクタンス推定, 令和 2 年度宇宙航行の力学シンポジウム, (2020).
- [6] 田中寛人, 永井大樹, 藤田昂志: Deep Neural Network を用いた熱数学モデルのコリレーション, 2021 年度日本航空宇宙学会北部支部シンポジウム, (2021).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許)

なし

(受賞)

The 17th International Conference on Flow Dynamics Best Presentation Award for Students Session, OS18-19: “Sensitivity Analysis of Observation Point for Data Assimilation : Application to Thermal Analysis of Pseudo Small Satellite”, Hiroto Tanaka (Tohoku University, Japan), Hiroki Nagai.

(マスコミ発表)

なし

課題番号	J19I026
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	2020.4～2021.3
継続年数	2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

本研究では、X線CT像により構築し、約2億ボクセルによって表現した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を実施する。共同研究1年目の去年度は、固気反応が生じる系において、Stefan-Maxwell式によって多孔質内の $N_2/CO/CO_2$ の3成分系の拡散を正確に考慮し、多孔質の構造変化を予測し、構造によって決定される見かけの反応速度を推算した。共同研究2年目の今年度は、固気反応としてC- CO_2 ガス化反応に加えてC- H_2O ガス化を考慮することで、より現実的な条件下においてシミュレーションを実施することを目標とする。ここで、C- H_2O ガス化を考慮することで、多孔質内の $N_2/CO/CO_2$ の3成分系は $N_2/CO/CO_2/H_2/H_2O$ の5成分系となるだけでなく、気相では水性ガスシフト反応が生じると予想される。そのため、本研究では、幅広い濃度条件下において水性ガスシフト反応速度を予測可能なモデルを構築する。

2. 研究成果の内容

水性ガスシフト反応と称される反応は総括反応であり、実際は多くの素反応からなる。そのため、幅広い条件下において単一の活性化エネルギーと頻度因子で見積もる、いわゆる総括反応速度式を用いて水性ガスシフト反応の反応速度を正確に見積もるのは困難である。一方、詳細化学反応機構に基づくシミュレーションを実施することで、幅広い条件において水性ガスシフト反応の反応速度を予測することが可能となる。しかしながら、詳細化学反応機構ではラジカルを含む多くの化学種を考えるため、解くべき化学種の保存式が増え、時間刻みも小さくしなければならず、本解析対象では実施不可能なほど計算負荷が膨大となってしまふ。そこで、本研究では、ゼロ次元の完全混合槽型反応器を対象に、種々の濃度条件において詳細化学反応機構を用いた反応動力学計算を実施する。機械学習に基づき、水性ガスシフト反応の正味の速度を正確に予測することを目指す。

結果の一例として、図1に水性ガスシフト反応を考慮しない場合、考慮する場合の詳細化学反応機構に基づく場合(DC)と機械学習(NN)に基づく場合の CO と H_2 のモル分率の経時変化を示す。まず、水性ガスシフト反応を考慮する結果は考慮しない結果と異なることがわかる。そのため、 $N_2/CO/CO_2$ の3成分系から $N_2/CO/CO_2/H_2/H_2O$ の5成分系に変更する場合、気相反応を無視することはできず、水性ガスシフト反応を考慮すべきことがわかる。また、機械学習に基づく結果(NN)は詳細化学反応機構(DC)をほぼ完全に再現していることがわかる。なお、ここでは示していないが、 CO_2 と H_2 のモル分率についても機械学習に基づく結

果は詳細化学反応機構をほぼ完全に再現している。機械学習では水性ガスシフト反応の正味の反応速度を推算しているため、 $N_2/CO/CO_2/H_2/H_2O$ の 5 成分の化学種の保存式を解くだけ良く、その算出も単純な行列積であるため、総括反応速度式を用いる場合と同程度の計算負荷で実施可能である。

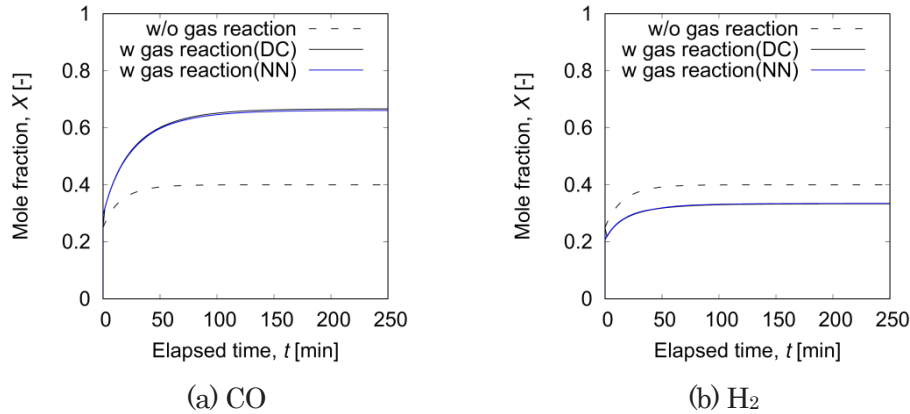


図 1 : CO と H₂ のモル分率の経時変化

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、機械学習により詳細化学反応機構とほぼ同じ精度で水性ガスシフト反応速度を予測することができ、その計算負荷の増加も確認されなかったことから、概ね目標は達成した。

4. まとめと今後の課題

機械学習により詳細化学反応機構とほぼ同じ精度で水性ガスシフト反応速度を予測することができ、その計算負荷の増加も確認されなかったことから、本モデルは大規模シミュレーションに実装可能であると考えられる。現在、本モデルを組み込んだ大規模シミュレーションを実施中である。今後、この大規模シミュレーションの結果を実験結果とも比較することでその妥当性を示す予定である。

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] Yui Numazawa, Yohsuke Matsushita, Hideyuki Aoki, Atsuki Komiya: Numerical Investigation for the Temperature Dependency of Coke Degradation by CO₂ Gasification Reaction in a Blast Furnace, *ISIJ International*, Vol. 60, No. 12, (2020), pp. 2686–2694.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Y. Numazawa, Y. Matsushita, H. Aoki, A. Komiya: Numerical simulation of mass transfer and structural change with solid-gas reaction in a full-scale porous model, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Online, (2020), CRF-86, pp. 149-150.

[3] 沼澤結, 赤尾津翔大, 松下洋介, 青木秀之, 小宮敦樹: 三成分系の拡散における Stefan-Maxwell 式と Correction velocity を用いた近似式の比較, 化学工学会第 51 回秋季大会, オンライン, 9月 24–26 日, (2020).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J20I028
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Active Control of High-Speed Boundary Layer Flows

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, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

A better understanding of the phenomenology underlying the transition in high-speed boundary layer (HBL) flows is of crucial importance from the fundamental as well as practical points of view. It is known that at high freestream disturbance level or large surface non-uniformities, streamwise oriented vortices and the accompanying streaks in pre-transitional boundary layers play a major role in the transition onset. 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

In the third year, progress has been made on the derivation and testing of the adjoint boundary region equations. We also studied the effect of the wall heating and cooling on Gortler vortices for various flow regimes, covering both supersonic and hypersonic boundary layers. Figure 1 show a result from the optimal control applied to a Mach 4 boundary layer; several iterations are shown to reveal the reduction of both the vortex energy and the wall shear stress. In figure 2, the wall temperature effect on the development of mushroom shapes is revealed through contour plots of temperature.

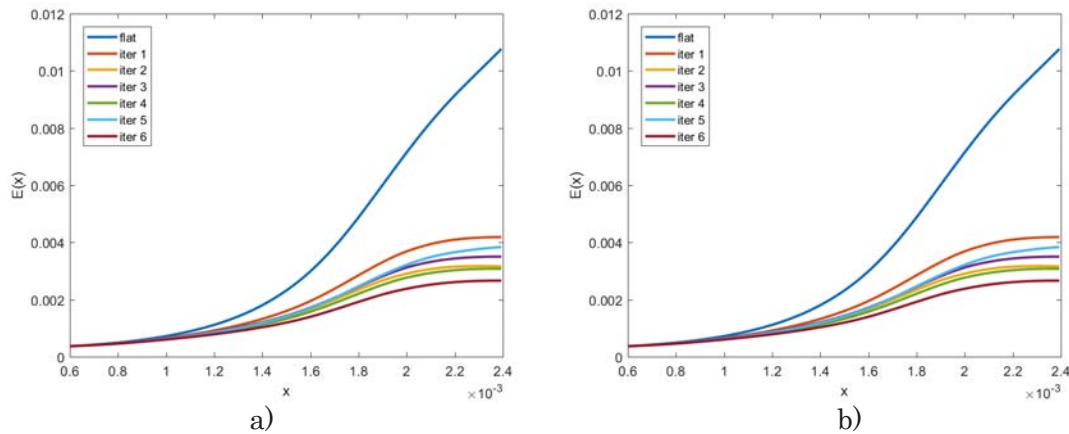


Figure 1: a) vortex energy; b) wall shear stress for several control iterations

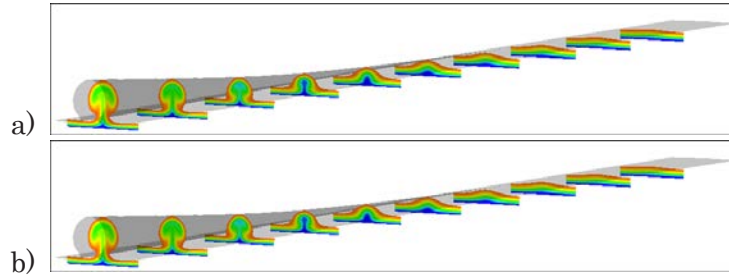


Figure 2: The effect of wall temperature on the development of mushroom shapes: a) $T_w=100\text{K}$; b) $T_w=900\text{K}$.

3. Achievements

For the first time, an optimal control approach based on the adjoint equations has been derived and tested in the context of high-speed boundary layers, for Mach numbers that covers both supersonic and hypersonic regimes. The effect of wall transpiration and wall cooling on streamwise vortices and the associated streaks was investigated using boundary region equations (BRE). 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

The results from this research showed that it is possible to derive an optimal control algorithm in the context of compressible boundary layers. The mathematical model was represented by the boundary region equations set which is an asymptotic extension of the full Navier-Stokes equations; the parabolic character of these equations allowed us to develop a much more efficient control algorithm. We plan to wrap up the final results of the research project and disseminate the findings in journal articles and peer-reviewed conference papers. We already have two journal articles under review and work on another article that will be submitted soon.

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 & M. Hirota: Effect of wall cooling or heating on streaks in high-speed boundary layers, *AIAA Scitech Forum*, (2021), Virtual Event, AIAA Paper 2021-0853, doi.org/10.2514/6.2021-0853.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
 - [2] O. Es-Sahli, A. Sescu, M. Z. Afsar, Y. Hattori & M. Hirota, M.: Investigation of an Optimal Control Approach in the Context of Compressible Boundary Region Equations, *Bulletin of the 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, Chicago, IL, (2020).
 - [3] A. Sescu, O. Es-Sahli, M. Z. Afsar, Y. Hattori, & M. Hirota: Effect of wall cooling or heating on streaks and streamwise vortices developing in compressible boundary layers, *Bulletin of the 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, Chicago, IL, (2020).
 - [4] J. Blake, A. Sescu, D. Thompson & Y. Hattori: Analysis of a Coupled LES-Synthetic Turbulence Modeling Approach for Jet Noise Prediction, *Bulletin of the 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, Chicago, IL, (2020).
 - [5] O. Es-Sahli, A. Sescu, M. Z. Afsar, Y. Hattori & M. Hirota: Control of Streamwise Vortices Developing in Compressible Boundary Layers, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020)*, Sendai, Japan, (2020), OS16-2, pp. 464-465.

- [6] J. Blake, A. Sescu, D. Thompson & Y. Hattori: Predicting Jet Noise with a Coupled LES-Synthetic Turbulence Method, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020)*, Sendai, Japan, (2020), OS15-8, pp. 434-435.
- *[7] Adrian Sescu, Mohammed Z. Afsar, Shanti Bhushan, Yuji Hattori, and Makoto Hirota: Active Control of High-speed Boundary Layer Flows, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-79, pp. 136-137.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J20I030
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	1年目（発展）

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

我々の身の回りで微粒子を含む流れ場は数多く見られるが、その特性の把握と設計はまだ発展途上である。そこで本研究では埋め込み境界法を用いた微粒子周りのマイクロな流れ場を対象とした詳細解析と、離散要素法を用いたマクロな流れ場を対象とした粗視化解析の両者を応用して、様々な流れ場の予測とモデル化に取り組む。

2. 研究成果の内容

埋め込み境界法を用いた CFD では多数の粒子を含む非ニュートン性流体を検証対象として解析手法の構築を行った。実験では管に負荷する圧力差とその時の流量を計測しており、それを再現するための手法を構築した。こちらについては現在論文を執筆中であるが、具体的には非ニュートン性流体の特徴である栓流の速度分布を再現するように、設定した圧力差から流速分布を修正する手法である。この手法を導入したことで、実験で得られた圧力-流量の関係を定量的に再現するに至った。また多数の粒子が含まれた際の安定な解析手法の構築も実施して、定性的に実験を再現する管内固液混相流解析を実施出来た。図 1 は一般化 Re 数が 10 程度と、400 程度の固液混相流内部の Q 値の等値面上の速度分布を可視化した図である。低い一般化 Re 数の場合には渦と粒子が一体化して流れるような挙動を示したが、一般化 Re 数の上昇とともに粒子と流れの慣性力の間はずれが生じて渦と粒子が干渉して渦崩壊する様子が見られた。このように高い一般化 Re 数の流れ中で粒子が運動すると、せん断率が空間的に大きく乱されるため、より一層非ニュートン性が強調されて、流れの挙動が非線形となることが確認された。こちらに関しては未だに実験との比較検証を実施しており、実験との速度分布の詳細な比較などが必要と考えている。非ニュートン性流体は空間的に粘度が大きく変化するが、それは見かけ粘度と粘度指数の両方が大きく変化するためであることが近年の研究結果から報告されており、本研究でもこれらを考慮した上で正確な速度分布や圧力分布を求める必要があることがわかった。

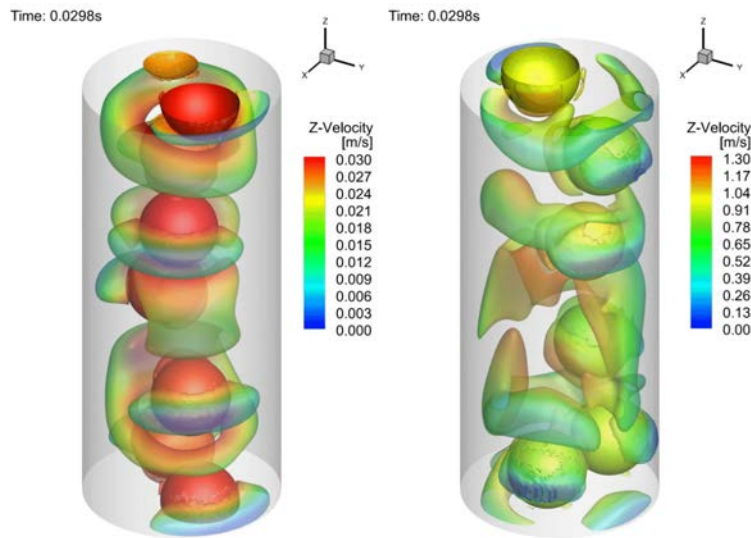


図1：粒子を含む非ニュートン性流体中の Q 値の分布
(左：一般化 Re 数 10 程度，右：一般化 Re 数 400 程度)

3. 研究目標の達成状況

本研究では、今後、1D モデルのような低次元モデルを応用して迅速な解析、論文化、様々な機関との連携研究が可能となると考え、まずモデル化のために CFD により内部流動現象の把握と、流量-圧力の関係の構築を最初の目的に取り組んだ。その結果、安定して実験の圧力と流量の関係を再現するための、非ニュートン流体における見かけ粘度を調整することで、流量を自動的に実験値に近づける数値モデルを構築したことと、また円管内で多数の粒子を含む非ニュートン性流体を安定して解析出来るようになったことは成果であり、これらについては国内学会で発表を行った。通常非ニュートン性流体でよく用いられる Power-law モデルや、Herschel-Bulkley モデルを用いた実験との非ニュートン性流体の挙動の比較検討は世界的にも行われている。しかしながらそれらの多くの非ニュートン性は比較的小さい流体の場合が多い。このような場合には粘度指数が 1 に近く、速度分布がニュートン流体に近いため、解析も安定しており実験と合致しやすい特徴がある。しかしながら、非ニュートン性が大きい流体中においては、栓流の速度分布が流量により変化することや、せん断速度のみならず流量によって見かけ粘度と粘度指数の両方が変化することが近年の非ニュートン性流体の工学応用研究では示されており、我々の CFD でもそれらの課題が浮き彫りとなった。現在はこれらに対して、その場の速度分布や粒子の速度分布を PIV や PTV によって計測を行って CFD の速度分布と定量的な比較検証を行い、その妥当性を示すことを第一の目的としている。これによって固液混相流中における粘度変化を予測することが可能となれば、非ニュートン流体中において離散要素法を用いて粒子の挙動を予測することが可能となると考えている。

4. まとめと今後の課題

本研究では、今後、1D モデルのような低次元モデルを応用して迅速な解析、論文化、様々な機関との連携研究が可能となると考えていた。そこでまずはモデル化のために CFD により内部流動現象の把握と、流量-圧力の関係の構築を最初の目的に取り組んだ。その結果、安定して実験の圧力と流量の関係を再現するモデルを構築したことと、多数の粒子を含む非ニュートン性流体を安定して解析出来るようになったことは成果であった。だが、大きな非

ニュートン性を有する流体中において栓流の速度分布が流量により変化することや、流れ中でせん断速度のみならず流量によって見かけ粘度と粘度指数の両方が変化するという世界的な課題に我々の突き当たった。現在はこれらに対してその場の速度分布や、粒子の速度分布を PIV や PTV によって計測を行うことで CFD の速度分布と定量的な比較検証を行ってその妥当性を示すことを第一の目的としている。それらによって粘度分布を予測することが可能となれば、非ニュートン流体中において離散要素法を用いて粒子の挙動を予測することが可能となると考えており、研究も当初の予想通りに迅速に進めることが可能になると考えている。現在は CFD と実験の比較の内容で論文執筆を準備している。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] S. Nara, Y. Kawamoto, S. Takahashi and S. Obayashi: Non-Newtonian Multiphase Flow Using Immersed Boundary Method, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-38, pp. 63-64.

[2] 川俣柊介, 川本裕樹, 奈良祥太郎, 野原徹雄, 高橋俊: 多数の固体粒子を含む非ニュートン流体の混相流解析, 第 34 回数値流体力学シンポジウム, (2020).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J20I032
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd 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 Linear stability of helical vortex

The linear stability analysis of a helical vortex was performed by solving the linearized Navier-Stokes equations in the cylindrical coordinate system. For the spatial discretization, the sixth-order accurate compact scheme is used in the radial direction, while the Fourier spectral method is used in the azimuthal and axial directions, in which the periodic boundary conditions are imposed. The parameters of the base flow are set to $\varepsilon \approx 0.1$, $W_0 \approx 0.2$, $L/R = 0.3$, $N = 1$, $Re = 10000$. As a result, the curvature instability mode of $(-1, 0, [2, 4])$, $k = 1.829$ is captured. The structure of the mode is similar to that found for a vortex ring with similar values of parameters.

2.2 Nonlinear time evolution of helical vortex

Next, nonlinear dynamics of a helical vortex disturbed by an elliptic instability mode was studied by DNS. The nonlinear Navier-Stokes equations were solved by the same methods as in the linear stability analysis. The parameters of the base flow are set to $\varepsilon \approx 0.15$, $W_0 \approx 0$, $L/R = 0.3$, $N = 1$, $Re = 796$ and 2500 . When $Re = 796$, the elliptic instability added initially saturates as the vortex core becomes thick and the resonance condition for the instability is lost. However, a different elliptic instability mode appears after a while and grows into a nonlinear stage. Then interaction between adjacent spirals occurs and the helical vortex breaks down eventually. When $Re = 2500$, on the other hand, the first elliptic instability mode grows into a nonlinear stage and the core

becomes turbulent. The turbulence decays gradually. After a while interaction between the adjacent spirals occurs and the helical vortex breaks down eventually.

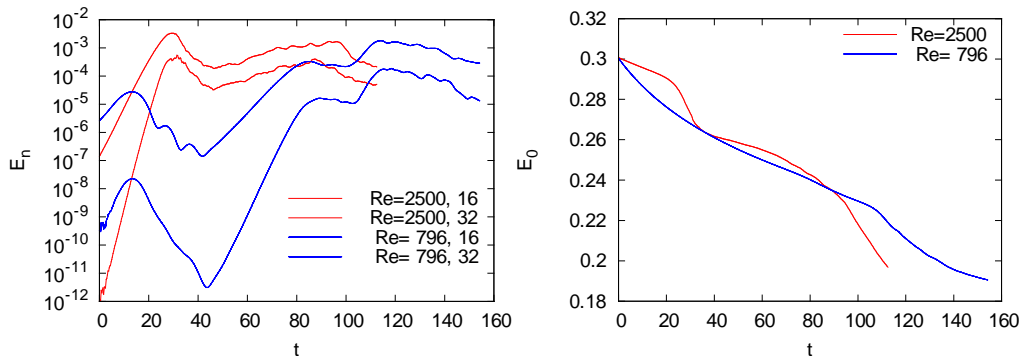


Figure 1 : Time evolution of (left) energy of disturbance and (right) total energy.

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 using the code developed last year and showed that the process leading to transition to turbulence depends on the Reynolds number. The project has achieved this year's objectives.

4. Summaries and future plans

We have performed direct numerical simulation of helical vortices. A curvature instability mode was captured by linear stability analysis. Nonlinear time evolution of a helical vortex disturbed by an elliptic instability mode was studied. The future plans include:

- To clarify how the stability properties depend on the parameters of the base flow and the types of disturbances;
- To further explore nonlinear dynamics.

5. Research results

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

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

*[1] Y. Hattori, I. Delbende, M. Rossi : Instability and Wave Interactions in Helical Vortices, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-99, pp. 173-174.

[2] 服部裕司, Ivan Delbende, Maurice Rossi : 軸流をもつらせん渦の線形不安定性の数値解析, 日本流体力学会年会 2020, (2020), オンライン.

[3] 服部裕司, Ivan Delbende, Maurice Rossi : らせん渦の不安定性の数値解析, 日本物理学会 2020 年秋季大会, (2020), オンライン.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J20I033
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

衝撃波減衰に関する実験的数値的研究
Experimental and Numerical Study of Shock Wave Attenuation

酒井 武治*†, 大谷 清伸**††
 佐藤 洋輔*, 後藤 祐都*, 坂本 憲一*
 *鳥取大学工学部, **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、長い管内を伝播する衝撃波が乱流境界層の発達によって減衰する過程を数値流体力学(Computational Fluid Dynamics, 以下 CFD)法で再現できるかを調査する。この現象は古くから知られているが、壁面境界層が乱流に遷移する場合の研究例が乏しく、CFDによる再現例はあまりない。近年、超高エンタルピ流れを生成する膨張波管内流れを診断するため、CFD技術の信頼性向上が求められ、管内衝撃波伝播をいかに正確に捉えられるかが一つの課題となっている。ただし、膨張波管はその作動が複雑で解離・電離流れまでを解析しなければならず、衝撃波伝播以外にも流れ場モデリングの課題が多い。このようなことから、完全気体近似が成り立つ範囲に限定でき、乱流境界層発達が衝撃波減衰の主要因となりえる衝撃波管実験条件を選定できる、流体科学研究所の衝撃波管を使って研究に着手した。

2. 研究成果の内容

衝撃波管は100×180mmの矩形断面を有し、約14mの低圧部管壁に最大11個の圧力センサー(Kistler model 603B)を設置できる。多数の圧力センサーデータによるTime of arrival方式で、軸方向距離に対する衝撃波速度の変化を調べた。表1に実験条件を示す。実験で得られる衝撃波マッハ数がおおよそ1.5, 2, 3となるように作動条件を設定した。なお本実験条件では、壁面境界層は衝撃波背後で速やかに乱流遷移することが予想される。

表1：実験条件

CASE	Driver / Driven gas	p ₁ (kPa)	p ₄ (kPa)	p ₄ /p ₁	Theoretical Ms
1	Air/Air	19.6	182	9.27	1.58
2	He/Air	29.6	364	12.3	2.14
3	He/Air	4.40	480	109	3.68

図1に計測結果を示す。縦軸は衝撃波マッハ数Ms、横軸は、低圧管軸方向距離xを矩形管断面積の水力直径d(129mm)で除した無次元化距離である。図から、衝撃波マッハ数がある位置まで増加してピークを迎えた後、下がる傾向がいずれの実験条件でも見て取れた。これが、境界層の発達による衝撃波減衰にあたる。ただし一方で、減衰傾向が観測できたのは低圧管の最下流部であり、大部分で観測されているのは、衝撃波マッハ数が増大する、いわゆる衝撃波形成過程

であった。流体研の衝撃波管は無隔膜方式である。従って、衝撃波管形成距離が長いことは当初想定よりしていたが、予想以上に形成距離が長く、長い低圧管を生かした衝撃波減衰測定は現行の作動方式のままでは難しいこともわかった。

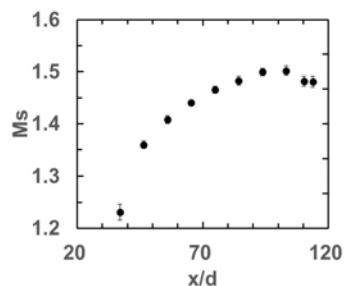


図 1 Case 1

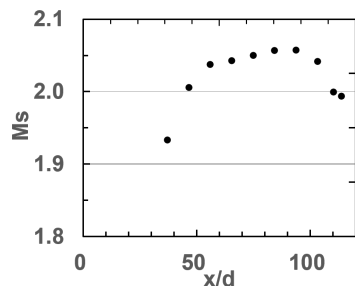


図 2 Case 2

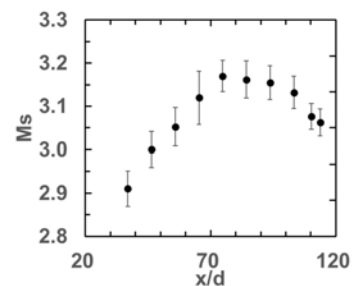


図 3 Case 3

3. 研究目標の達成状況

測定した衝撃波減衰特性は、Baldwin-Lomax モデルを使った全场乱流 CFD 計算で再現できる結果が得られており、当初の研究目標を概ね達成できたものと考えている。減衰特性を捉えるための必須要件は、シャープに衝撃波を捕獲すること、壁面隣接格子幅を細かく設定し、温度境界層プロファイルまでを詳細に解像することであることもわかった。我々は、移動格子有限体積法を適用して、衝撃波近傍にのみ細かい格子を配置し、衝撃波管全体の計算を回避することで、計算コストを抑えながらこれら必須要件をクリアしている。

4. まとめと今後の課題

当初想定した 10m オーダーで減衰する現象は捉えられなかったものの、2~3m で衝撃波が減衰する特性を実験・CFD 計算両面から明らかにした。ここで、実験で観測された衝撃波形成過程は無視して CFD 解析をしており、乱流遷移点がどのように時間発展するかは未解明である。任意の衝撃波管作動条件での衝撃波減衰の CFD で予測可能とするためには、このような点を明らかにすることがさらに必要である。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] K. Sakamoto, Y. Sato, T. Sakai and K. Ohtani: Experimental and Numerical Study of Shock Wave Attenuation in a Shock Tube, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-27, pp. 44-45.

[2] 佐藤洋輔, 後藤祐都, 坂本憲一, 酒井武治, 大谷清伸: 長い衝撃波管内流れの乱流境界層による衝撃波減衰, 2020 年度衝撃波シンポジウム, (2021).

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

(特許) なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

課題番号	J20I034
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	2020.4～2021.3
継続年数	3年目

赤外線カメラによる高精度温度測定手法の確立
Development of Accurate Temperature Measurement Method by Infrared Camera

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

本研究では、赤外線カメラによる高精度温度測定手法の確立を目的とする。赤外線カメラの高精度測定のためには、カメラの波長感度特性を定量的に把握する必要がある。しかしながら、カメラの波長感度特性はメーカー側から開示されておらず、ユーザー側で予測する必要がある。そこで本研究では予め、透過率が既知のプラスチックフィルムを赤外線カメラの前に設置して、プラスチックフィルムによって減衰した赤外線エネルギー量を測定することによって、間接的に赤外線カメラの波長感度特性を予測する手法を開発することを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究期間中には黒体炉、プラスチックフィルム、赤外線カメラを用いた波長感度測定実験を実施した。プラスチックフィルムは赤外線カメラの波長領域の特定を行うために、数種のプラスチックフィルムの透過率の測定実験を行った。図1に使用した各種プラスチックフィルムの透過率の波長特性分布を示す。フィルムの透過率測定には流体科学研究所が保有する赤外分光光度計を使用した。また測定対象のフィルムには、ポリエチレン、ポリ塩化ビニル、ポリ塩化ビニリデン、ポリエチレン及びポリプロピレン、ポリエチレン及びポリアクリエイトの混合フィルムを用いた。

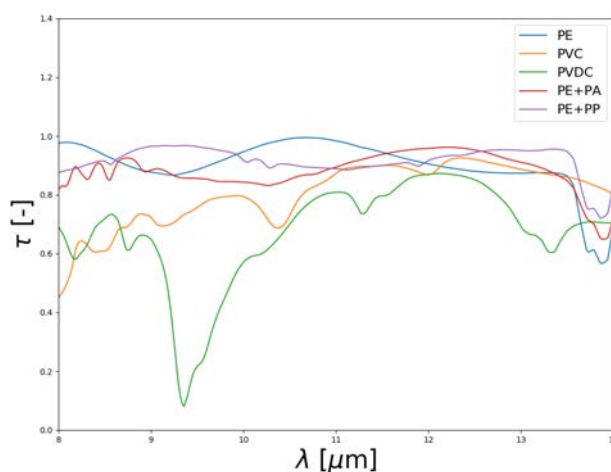


図1：測定したプラスチックフィルムの透過率分布

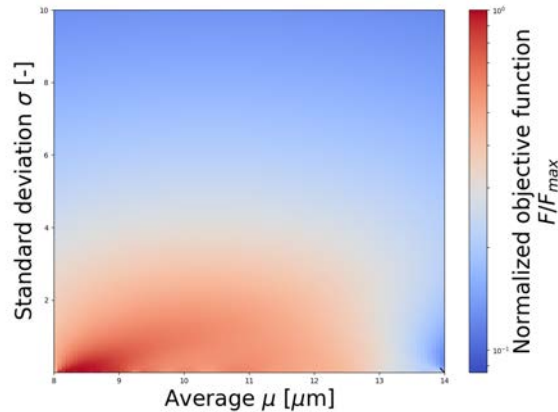


図2：波長感度パラメータ分布

図1に示された透過率分布を持つプラスチックフィルムを赤外線カメラの前に設置して、黒体炉から放射される赤外線線の減衰量を測定してカメラの波長感度特性について調査した。本研究では、カメラの波長感度特性がガウシアン分布であると仮定して、ガウシアン分布の代表パラメータである、分散値、平均値を種々に変化させて、もっともらしい波長感度特性について議論した。図2に各分散値、平均値における作成した目的関数の分布を示す。作成した目的関数は実験結果との整合性が取れるパラメータであればあるほど、目的関数の絶対値が小さくなることを示している。図2に示されるように、目的関数が小さくなる領域は広範囲に分布しており、今回の波長感度特性予測実験では、選択的に波長感度特性を予測することは困難であった。以上の結果から、目的関数の再考や適切なフィルムへの変更等、実験手法を改善する必要があると考えられる。

3. 研究目標の達成状況

本研究期間中は、赤外線カメラの波長感度特性の予測実験の有用性評価を目的としていた。実験による解析結果から、現在の実験手法では赤外線カメラの波長感度特性を予測することは困難であることが明らかとなった。波長感度特性を予測する手法を確立することはできなかったが、今後進めるべき実験方針を確立することができた点においてはおおむね研究目標を達成することができたと考えられる。

4. まとめと今後の課題

今後は適切に透過率の波長依存性が著しく異なったプラスチックフィルムを使用して、同様の実験を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] T. Kogawa, J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama: Experimental Evaluation of Objective Function for Prediction of IR Camera's Sensitivity, *Proceedings of Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-76, pp. 130-131.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20I035
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	2020.4～2021.3
継続年数	2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*†, Dongoh Seo*, Bok Jik Lee***

Nomura Masayuki***, Hiroki Nagai****††

*Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University

** Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University

*** 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。そこで本研究では、火星飛行機を搭載する突入カプセルの最適な形状を検討するために、いくつかの形状の突入カプセル周りの火星大気流れの数値計算を行い、空力加熱や空力係数の算出を行うことを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究では、C, N, O, CO, N₂, NO, O₂, and CO₂ の8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 Mars 2001 の鈍頭部形状を採用し、流れの数値計算と澱み点の熱流束の算出を行い、既存の計算結果と比較した。計算で得られた流れ場は、衝撃波背後で並進温度と振動温度が異なる熱化学非平衡状態であった(Fig.1)。また、非触媒壁面を仮定した本計算で得られた澱み点の熱流束は、壁面での触媒効果を考慮した過去の計算結果よりも低い値となった。これらの結果から、熱流束をより正確に予測するためには、流れ場や壁面での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。

しかし、現在、火星大気中の極超音速流れ中の熱化学過程を記述するモデルは完全に検証されたものとは言い難い。そこで、火星大気の主成分であるCO₂の解離反応をよりよく理解するため、CO₂+O(3P)分子系で起こりうる反応経路をGRRMプログラムを用いて探索した。この時の系の電子エネルギーはガウシアンタイプの基底関数を用いたメラー=プレセット法で計算した。その結果、CO+O₂を生成する4つの反応経路が求められた(Fig.2)。

これらの研究結果の一部は2020年10月に行われたICFDにおいて成果発表を行った。

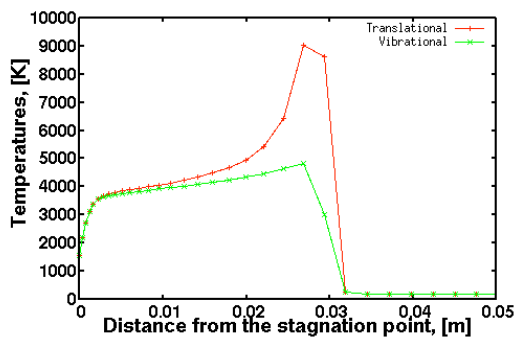


Fig.1 Temperature distributions (Case 4)

Table 1 Freestream conditions and the predicted heat flux (P. Papadopoulos, et. al., *AIAA-98-0272*(1998), P. Palmer, et. al., *JSR5*, 37(2000), 747-752)

Case	V_∞ [m/s]	ρ [kg/m ³]	q [W/cm ²]		
			Present	Ref.	
1	6041	5.35e-5	14	13	Papadopoulos
2	6278.5	1.9568e-4	28	90	P. Palmer
3	6136.3	4.0276e-4	26	105	P. Palmer
4	5362.7	6.0539e-4	21	100	P. Palmer

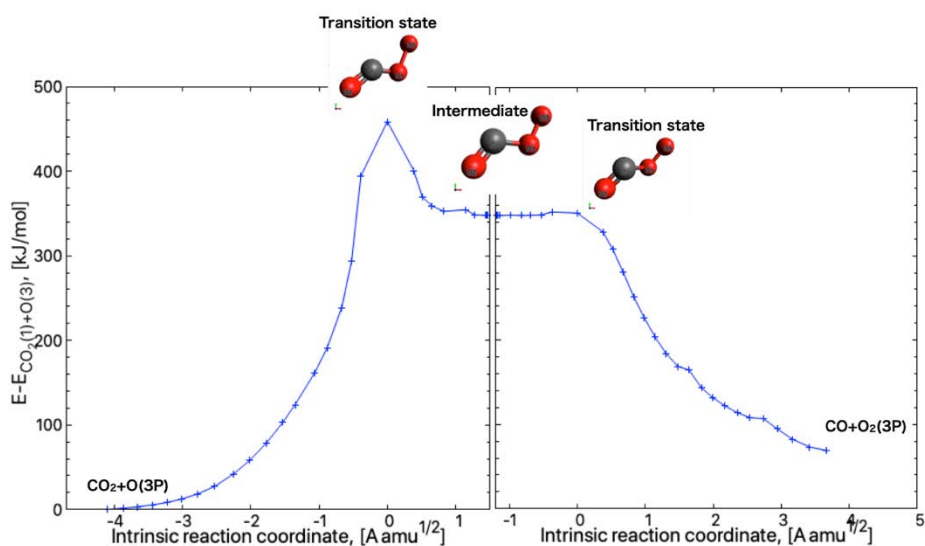


Fig.2 Example of intrinsic reaction coordinate of $\text{CO}_2+\text{O} \rightarrow \text{CO}+\text{O}_2$ reaction channel

3. 研究目標の達成状況

- 火星大気突入カプセルへの空力加熱解析用CFDコードの構築
物体表面の空力加熱率予測のための化学反応を考慮した火星大気用CFDコードは構築し、より正確な空力加熱率予測を可能にするために熱化学モデルの検討を行なった。
- 火星飛行機を搭載する突入カプセルの空力係数および熱流束データ
構築されたコードにより突入カプセルの空力係数および熱流束データを取得した。より正確なデータの取得は今後の課題とする。

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計算により空力加熱率予測を行なったが、流れ場や壁面での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。

一般に、高温実在気体効果を考慮した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。そこで今後の研究では、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] Michiko Ahn Furudate, Dongoh Seo, Bok Jik Lee, M. Nomura and H. Nagai: Numerical simulation of flowfield over Mars entry capsules II, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-58, p. 103.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20I036
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目（発展）

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^{*†}, 大林 茂^{**††}, 瀬尾 和哉^{***}, 片岡 裕樹^{*}, 浅倉 祥太郎^{*}
^{*}宇都宮大学, ^{**}東北大学流体科学研究所, ^{***}山形大学
[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

本研究は、スキージャンプスーツの生地の通気量を変化させた際に、生地表面の流れが変わり、物体の失速特性、空力特性に及ぼす影響を流体力学的に明らかにすることを目的とする。生地を楕円柱に被覆し、揚力傾斜、最大揚力係数、揚抗比、失速特性への影響を調べる。生地表面および物体後方の流れ場は、通気量の影響で生じる微小なかく乱を評価するため、時系列 PIV での測定を実施する。その結果をもとに条件抽出法で、特定の渦構造の抽出を試みる。その結果をもとに、これまででない境界層制御技術への適用も検討する。

2. 研究成果の内容

本研究では、オリジナルの生地とオリジナルの生地の状態から中間層の穴を拡張、増加させたものを組み合わせた生地を用いた。オリジナルの生地の通気量は $43.4 \text{ L/m}^2/\text{s}$ 、増加させた生地の通気量は $65.8 \text{ L/m}^2/\text{s}$ である。本研究で使用したパッチワークを用いた供試体の概略図を図 1 に示す。楕円柱前縁から 50%の通気量を増加としたものを Case3-1、楕円柱後縁から 50%の通気量を増加したものを Case1-3 とした。また、通気量を増加した部分の面積は両方のケースで等しいので、それぞれの生地全体としての通気量は変わらない。

図 2 は、3 種類の生地を巻き付けた $Re = 2.0 \times 10^5$ における楕円柱の揚力係数曲線と抗力係数曲線である。Case3-1 では他の生地と比べて低迎角の揚力傾斜が大きくなっている。また、最大揚力係数も大幅に大きくなっている。抗力係数 (図 2(b)) では、Case3-1 の値が他二つの生地と比べ最も小さい結果となった。

部分的に通気量を増加した生地において揚力傾斜に違いが生じた理由を調べるために、楕円柱周りの流れを PIV 測定により可視化した。図 3 は迎角 $\alpha = 31^\circ$ における楕円柱周りの時間平均の流れ場である。赤が濃いほど、主流方向の速度成分が大きいことを意味する。図中のポンチ絵は、可視化(測定)した領域を示している。楕円柱から流れが剥がれた速度せん断層で、case3-1 ではわずかではある増速領域が小さくなっている(図の白い楕円部分)。case3-1 では、楕円柱の前方側に通気量の大きい生地を用いているため、生地と楕円柱との間に流れが入り、生地表面の流れが減少したといえる。こうした楕円柱まわりの流れの違いが揚力係数の違いになったと推測されるが、揚力傾斜の傾向、最大値の違いが生じる理由の解明までは至らなかった。生地通気量の違いで生じる流れは、生地表面境界層内の微小なかく乱の違いとなることが考えられるため、今後は変動場で流れの違いを見る予定である。

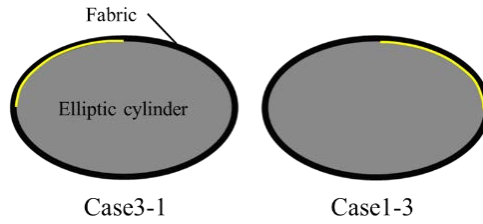


図1： 使用したパッチワーク生地概略図（—：通気量を増加した部分）

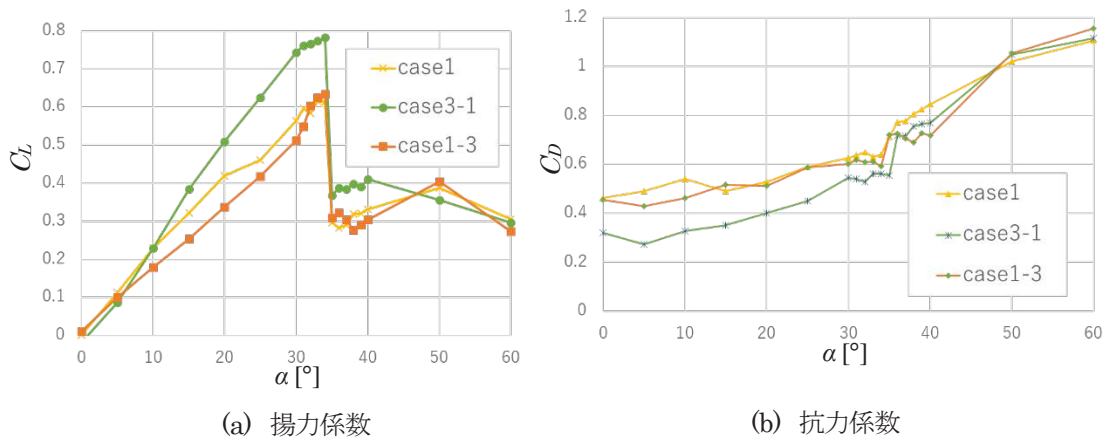


図2：空力係数

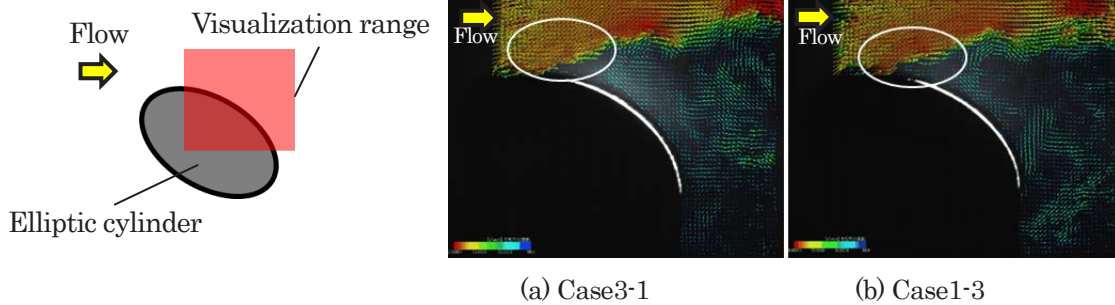


図3：楕円柱まわりの流れ場（迎角 $\alpha = 31^\circ$ ）

3. 研究目標の達成状況

部分的に通気量の異なる生地を組み合わせることで、空力特性に違いが生じることが分かった。ジャンパーは、カンテ踏切後の空中を飛行中では、体の部位によって迎角が異なる。そのために部位の迎角の大小によりパッチワークの組み合わせを調整することで飛距離延伸の可能性を示唆できた。このことから概ね目標は達成できた。しかし、通気量を部分的に変化させた際の空力の違いを流れ場の違いからは明らかにできず、今後課題が残った。

4. まとめと今後の課題

本研究では、パッチワーク生地を用いることで楕円柱の空力特性に違いが生じることを明らかにし、ジャンパーの飛距離延伸の戦略につながる可能性を得ることができた。しかし、

生地通気量を変えることで境界層のふるまいを制御するという、新たな境界層制御手法に発展させるための流れ場の解明には至らなかった。

今後は生地の通気量の違いで生じる流れ場の解明を行うことによって物体表面の境界層のふるまいに与える影響を詳細に調べ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] Y. Kataoka, H. Hasegawa, M. Murakami, K. Seo and S. Obayashi: Flow Behavior Caused by Air Permeability of Ski Jumping Suit Fabric, *Proceedings of the 13th Conference of the International Sports Engineering Association*, Online, 49 (1), (2020), 109.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Y. Kataoka, H. Hasegawa, K. Seo and S. Obayashi: Improvement of Aerodynamics of Objects Clothed with Air Permeable Fabrics, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Online, (2020), CRF-41, p. 69.

[3] 片岡裕樹, 長谷川裕晃, 村上正秀, 瀬尾和也, 大林茂: 通気性パッチワークスキージャンプスーツの空力改善への可能性, *スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2020*, (2020), B-5-3.

[4] 浅倉祥太郎, 長谷川裕晃, 片岡裕樹: スキージャンプ空力におけるスーツ生地の通気量の影響, *日本機械学会関東支部関東学生会第 60 回学生員卒業研究発表講演会*, 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	J20I037
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	2020.4～2021.3
継続年数	2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**††, 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デバイス開発が必須である。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ため、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る必要がある。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）法を用いて作製した規則配列ナノピラー（以下、NDs）を、宮崎大学が所有する光熱変換分光法（以下、PPT）で熱伝搬を測定する。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40と60 nm（以下、NP40とNP60）であった。PPT測定は波長依存性と周波数依存性を測定した。前者は断続周波数 f を108 Hzに固定し、励起光波長を600から1800 nmの間で変化させた。後者は励起光波長を1150 nmに固定し、 f を40から3500 Hzの間で変化させた。発生した熱波および熱弾性波を透明トランスジューサで検出した。測定は室温で測定を行った。

図1に得られたPPTスペクトルを示す。信号強度はNP60の方がNP40よりも1桁大きかった。本測定ではSOI基板側に励起光を照射しており、発生した熱が基板から複合膜、検出器へと伝わる。そのため、複合膜によって熱の伝搬が阻害されることが考えられる。つまり、NP間隔が狭い方が熱伝導率(κ)が小さいと予想できる。また、NP40では1.25 eV付近にdipが観測された。PPTスペクトルのdipは κ と光吸収係数(α)の大小関係に起因する。そこで、励起光の波長を固定してPPT信号強度の f 依存性を測定し、 κ の算出を試みた。

図2に励起光波長1150 nmにおけるPPT信号強度の f 依存性を示す。 f の増加に伴い、信号強度が減少した。これは、 f の増加に伴い熱拡散長が減少するためである。また、NP40では1000 Hzに、NP60では355 Hzに傾きの変曲点が観測された。これは二つの試料間で熱拡散長が異なることを示唆している。

次に、1次元の熱拡散方程式を用いた理論計算を行った。計算では空気/SOI基板/複合膜/LiNbO₃の4層を考慮した。Si-NP/SiGe複合膜の κ と α を変化させ、それ以外は文献値を用いて定数とした。計算結果を図2に実線で示す。算出された κ はNP40とNP60でそれぞれ2.5

$\times 10^{-3}$ および 1.2×10^{-2} W/mK であった。また、 α はそれぞれ 6.3×10^4 および 9.2×10^4 cm^{-1} であった。NP 間隔が狭い方が κ が小さく α が大きいことがわかった。しかしながら、得られた κ は不適切なほど小さく、 α は非常に大きく算出された。この理由は、現在検討中である。

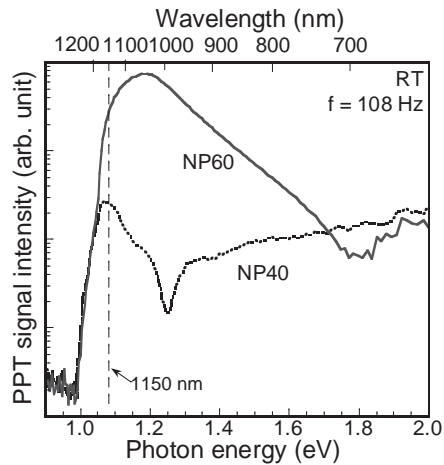


図 1：複合膜試料の PPT スペクトル

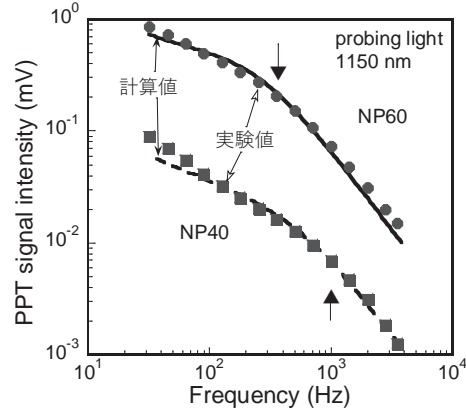


図 2：周波数依存性の実験値と計算値比較

3. 研究目標の達成状況

本年度は Si-NPs/SiGe の NP 間隔を変化させた試料を用意して PPT 測定を行った。既に明らかにしている通り NP 間隔が狭くなると κ が減少したが、PPT 測定および理論解析から NP 間隔が狭くなると α が増加するという新しい知見を得た。これは誘電率の変化に起因していると思われ、デバイス特性にも影響を及ぼすと示唆される。よって達成率は 8 割と判断した。

4. まとめと今後の課題

Si-NPs/SiGe の NP 間隔によって熱伝導率だけでなく、光吸収係数も変化することがわかった。適切な数値の算出には、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を解くことが必要であると考えられ、計算モデルの改善が不可欠となる。

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] 原田知季, 安良田裕基, 大堀大介, 寒川誠二, 碓哲雄, 福山敦彦: シリコンナノピラーの間隔変化による熱特性への影響, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, (2020), 8a-Z09-5.

*[2] T. Harada, Y. Arata, D. Ohori, S. Samukawa, T. Ikari, A. Fukuyama: Estimating Thermal and Optical Properties of Si-Nanopillar/SiGe Composite Film by a Piezoelectric Photothermal Measurements, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), Online, CRF-65, pp. 115-116.

[3] Y. Arata, T. Harada, D. Ohori, S. Samukawa, T. Ikari, A. Fukuyama: Theoretical study on the photothermal signal of the multilayer structure and application to the Si-nanopillar/SiGe composite films, 第 41 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, オンライン, (2020), 3J5-2.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20I039
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	2年目

離脱衝撃波脈動を利用した側面噴流発生による飛行姿勢安定
Flight Attitude Stabilizing by Side-Jet Generated by Detached Shock Pulsation

水書 稔治*†, 大谷 清伸**††
*東海大学工学部, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

大気を有する惑星への探査機投入では、惑星大気突入後に空力減速装置展開による超音速降下を経て着陸する。超音速降下時には、空力減速装置前方での離脱衝撃波の不安定挙動による姿勢の不安定化が報告されている。本研究では、離脱衝撃波を積極的に脈動させ、誘起される圧力振幅を利用した姿勢制御法の実現性について、弾道飛行実験装置による自由飛行実験による飛しよう体の姿勢変化と周囲の流れ場計測結果から評価する。

2. 研究成果の内容

令和2年度は、第4四半期に実施予定であった弾道飛行試験装置による模型周囲の衝撃波振動の可視化計測実験が社会情勢の変化のため、中止となった。前年度までに得られた概要を示す。

弾道飛行試験流体科学研究所共同利用施設の弾道飛行実験装置を利用し、2種類の模型（図1）をM1.8で大気環境下の測定部に自由飛行させ、周囲で発生する衝撃波脈動を影写真法による可視化計測を実施した（図2および図3）。模型寸法は、これまでの実験結果を元に、安定飛行可能なものとして決定されたものを用いた。高速度カメラにより、M1.8で飛行する模型周囲における衝撃波干渉様態と模型本体の姿勢を明りょうな画像を取得できた。

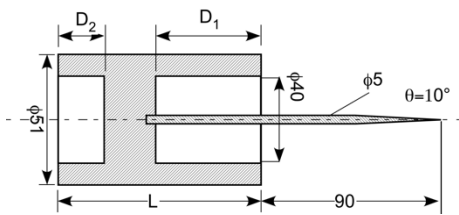


図1. スパイク付前向きキャビティ模型形状(単位 mm,

Model type	L	D1	D2	Spike
1-N	70	42	10	N/A
1-S	70	42	10	Equipped

スパイク先端の半頂角口は 10°)

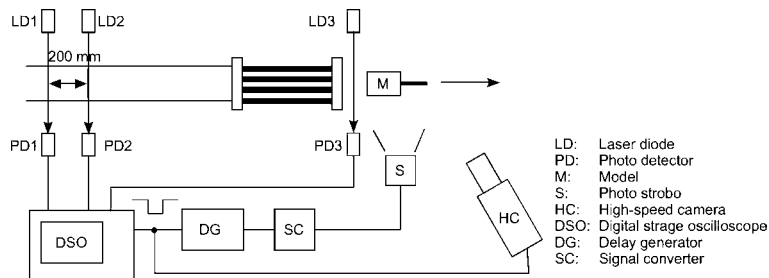


図2. 弾道飛行実験装置による衝撃波脈動および模型飛しよう姿勢可視化計測実験系

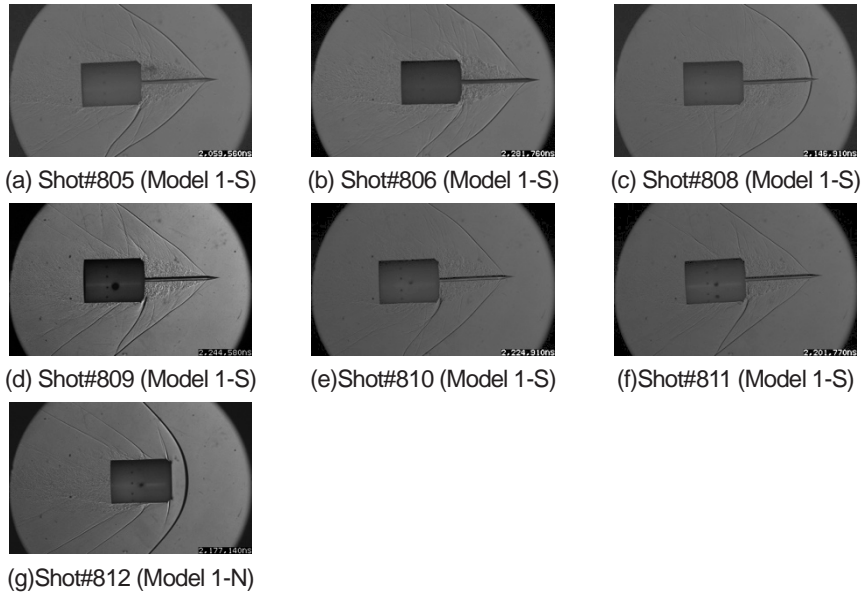


図3. 弾道飛行実験装置から射出直後の模型飛しょう姿勢と周囲の衝撃波の可視化
(Shot#807は、撮影トリガの不調のため画像計測失敗)

3. 研究目標の達成状況

上記のごとく、本年度も昨年度に引き続き実験中止となったため、実験データの取得は未達成である。

4. まとめと今後の課題

本課題では回転速度と側面小孔からの質量流量との相関を解明が強く望まれる。また、回転速度に対する飛行速度を勘案し、複数の観測部での計測で回転角度の増加による計測精度の向上を狙う必要がある。しかし、昨年度に引き続き予定した実験データ取得ができず、研究目的が未達となった。この原因は、社会情勢が大きなものであるが、一方、実験模型の製作および形状の最終調整で、実験装置そのものが必要であること、および取得した実験データに基づいた再調整が必要なため、オフサイトで進めることの困難性も無視できない。今後は、CFDの活用を視野に入れ、オンサイトでの作業時間（実験日数）を最小化することも課題と考える。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] F. Wang, Y. Yoshitomi, F. Iwasaki, T. Mizukaki, and K. Ohtani: Flight Attitude Stabilizing by Side Jet Generated by Detached Shock Pulsation, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-22, pp. 34-35.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J20I040
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year (progressing)

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**, Makoto Ohta**††

*Graduate School of Engineering, Chiba University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of Project

A lot of researchers in CFD assume to be rigid for cerebral aneurysm wall. Few experimental approaches are carried out for the elastic wall model. Particularly, there were few experimental studies with respect to hemodynamics using cerebral aneurysm model with elastic wall. The effect of wall elasticity on wall shear stress, tension force and flow instability was examined for the comparison of elastic with rigid models in pulsatile blood flow wave *in vitro*. In the present study, the authors have tried to fabricate a full-scale patient-specific elastic cerebral aneurysm phantom using special technology. And the authors are examined to measure flow behavior, i.e. wall shear stress, tensile effect and flow instability.

2. Content of Research Achievement

2.1 Model

The morphology of phantom constructed from a human patient-specific aneurysm at the bifurcation of the middle cerebral artery (MCA) in full-scale size is shown in Fig.1. Two outlet vessels M2 and M3 bifurcate from the inlet vessel M1. The current phantom model was fabricated in silicone elastomer. The wall elasticity is $E = 0.67$ MPa.

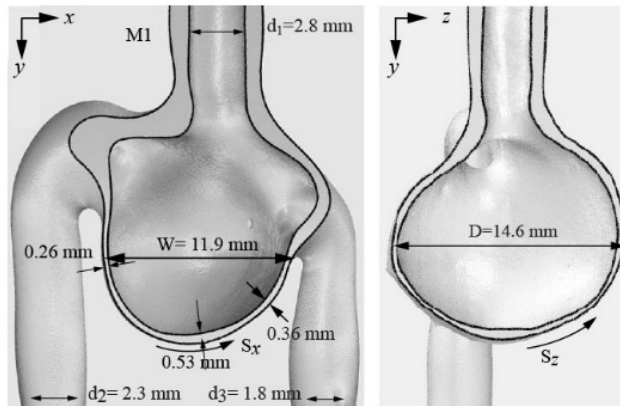


Figure. 1 Front and right-side views of cerebral aneurysm

2.2 Measurement

The working fluid is aqueous glycerol with potassium iodide solution. The physical properties are the same as those of blood and the refractive index is $n=1.411$. The mean Reynolds numbers is 310. The velocity vector was measured by 5W continuous Yag Laser (Dantec SYSTEM, Skovlunde, Denmark) with a SpeedSense M camera (Dantec, SYSTEM 8; 1280×800 pixels).

2.3 Results and Discussion

Comparison of rigid of velocity vectors including contour with elastic models is shown in Fig. 2 at early- and peak-systole at median plane (xy plane in Fig. 1). The main flow through the inlet vessel collided at the stagnation point, and then divided and circulated

clockwise in the left wide region and anti-clockwise in the right narrow region throughout the cardiac cycle. The large circulation flow then separated around C near vortex core. The velocity vectors in elastic is similar to that of rigid models. Only, there is a little difference, with a slightly smaller main flow colliding at stagnation point in elastic model compared with rigid models, which was related to dilatation of the aneurysm. The distribution of WSS and WSSG along the aneurysm wall at the median plane is shown in Fig. 3(a) and (b). WSS steeply increased from the left to right side along distance S_x (around the stagnation point 0). This positive WSSG represents the tensile effect around the stagnation point. The line with the arrow denotes the direction of the tensile effect. Current findings indicate a large tensile effect around the stagnation point, which may be closely associated to initiation and growth of the aneurysm.

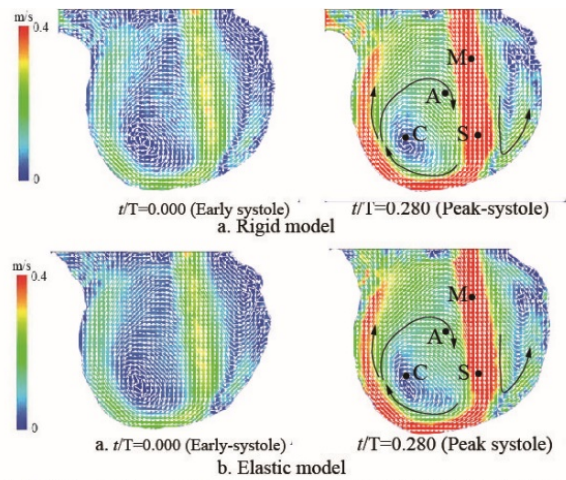


Fig.2 Comparison of velocity contour in rigid with elastic models

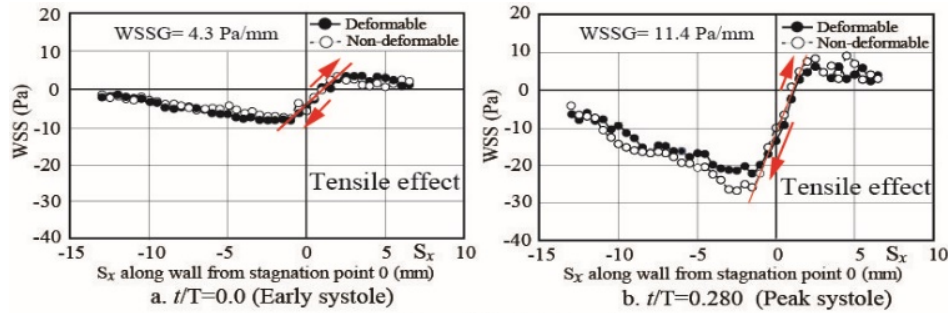


Fig.3 Distribution of WSS and WSSG at median plane

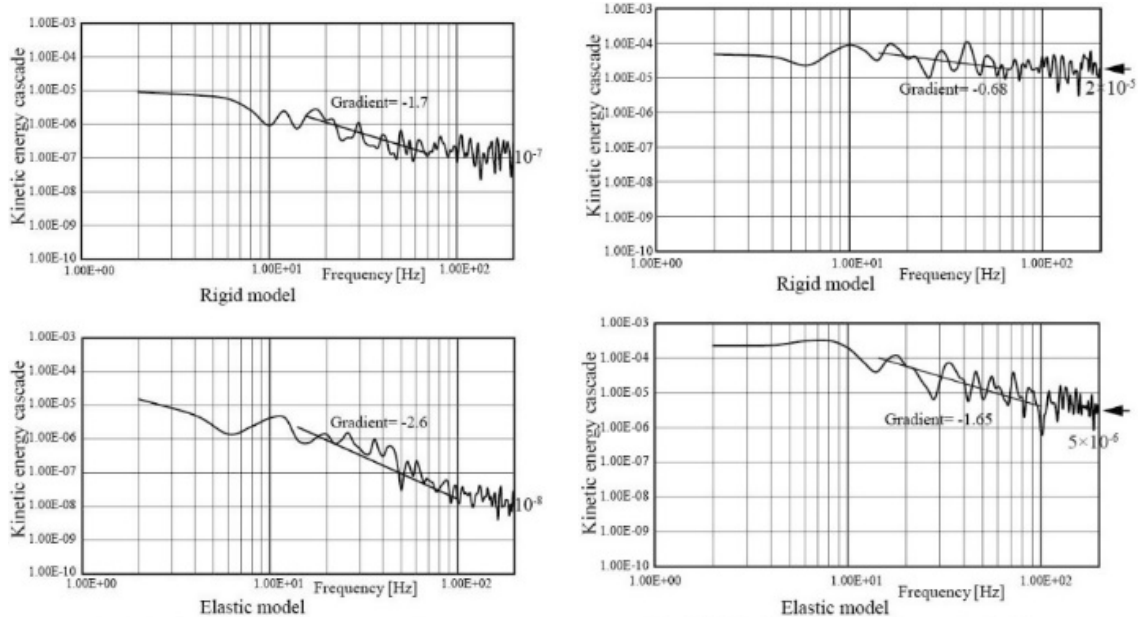


Fig.4(a) Kinetic energy cascade around point C in Fig.2

Fig.4(b) Kinetic energy cascade around point S.

We found a great difference in KEC between the elastic and rigid models as shown in Fig. 4. As shown KEC (m^2/s^2) around the circulation point C after collision linearly decreased in both models. At low frequency range, the gradient of KEC in elastic (-2.6) was larger than that in rigid models (-1.7) in Fig. 4(a). At high frequency range, KEC in elastic is attenuated by 10-fold smaller than that in rigid models.

3. Achievement of Research Target

In the present research the final gargets are the clarification of WSS, WSSG, tensile effect and Flow instability in 3-dimension. Final target is the “revolution” against the aneurysm world of rigid model in CFD. Currently, we established the behavior of WSS, WSSG in 2-dimension. In another 2 years, I can clarify the tensile effect and the flow instability in 3-dimension. The achievement level will be estimated to be 50 %.

4. Summaries and Future plans

From WSS along aneurysm wall estimated from velocity, the elasticity of the aneurysm wall may attenuate the absolute temporally- and spatially-averaged WSS, and WSSG influences on progress as tension force. Furthermore, elastic model attenuates flow instability. Future, when the velocity and the elongation of phantom are measured three-dimensionally, another phenomena and new insights will be found. These results will be published in Medical Engineering & Physics, Physics of Fluids or Nature.

5. Research results

1) Journal

- [1] Nadia Shaira binti Shafii, Ryuhei Yamaguchi, Gaku Tanaka, Makoto Ohta and Kahar Osman: Hemodynamic and Flow Recirculation Effect on Rupture and Prediction of Middle Cerebral Artery Aneurysm, *ARASET Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Vol. 79, No.1, (2021), pp. 1-16.
- [2] Nadia Shaira binti Shafii, Ryuhei Yamaguchi, Gaku Tanaka, Shiddiq Hashuro, Makoto Ohta: Flow characteristics in a deformable full-scale patient-specific model cerebral aneurysm, (2020), *ASME SB3C*, (2020), #159.

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

- *[3] Gaku Tanaka, Ryuhei Yamaguchi, Tomoaki Yamazaki, Nadia S. Shafii, Hitomi Anzai, Kahar Osman, Makoto Ohta: Hemodynamics of Full-Scale Patient-Specific Aneurysm Model in Cerebral Artery, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-5, pp. 8-9.
- [4] Naoki Ikeya, Tomoaki Yamazaki, Gaku Tanaka, Ryuhei Yamaguchi, Makoto Ohta: Behavior of flow in a middle cerebral aneurysm with deformation, *JSME 31th Bio-frontier Conference*, (2020), 1B15.
- [5] Tomoaki Yamazaki, Yodai Okazaki, Gaku Tanaka, Makoto Ohta, Fujimaro Ishida, Ryuhei Yamaguchi: Numerical simulation of flow behavior in basilar bifurcation artery aneurysms based on 4D-CTA, *JSME 31th Bio-frontier Conference*, (2020), 1B19.
- [6] Gaku Tanaka, Ryuhei Yamaguchi, Nadia S. Shafii and Makoto Ohta: WSS and Frequency Characteristics in Patient-Specific Aneurysm in MCA, *2ND International Symposium on Computational Biofluid in Malaysia*, (2020), pp. 12-15.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J20I041
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st 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 CO₂ storage efforts. We must thus be able to predict these fluid movements in order to ensure permanent storage of CO₂. When there is only water present in the reservoir our predictions of this fluid movement are highly accurate. However, when CO₂ is introduced, the two fluids (water and CO₂) have different densities that change as a function of depth making the interaction between CO₂ density, movement of CO₂, 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 CO₂ 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 fractured micromodel has been designed by superimposing a monodisperse disc-packing (Mehmani et al., 2017) with a fracture. First, a 3D micro-CT image of a fracture (Fig. 1a) was obtained from the digital rocks portal (www.digitalrocksportal.org). A 2D slice has been selected and segmented (Fig. 1b). The image was then extruded to obtain a 2D single-layered model (Fig. 1c). The domain was then superimposed onto a monodisperse disc-packing. The full domain is 100 mm x 100 mm x 0.3 mm. The fracture as a minimum aperture of 1mm. The discs have a diameter of 600 microns, giving throat size of 200 microns. The model was save as a CAD image and printed using the Form2 3D printer at IGE.

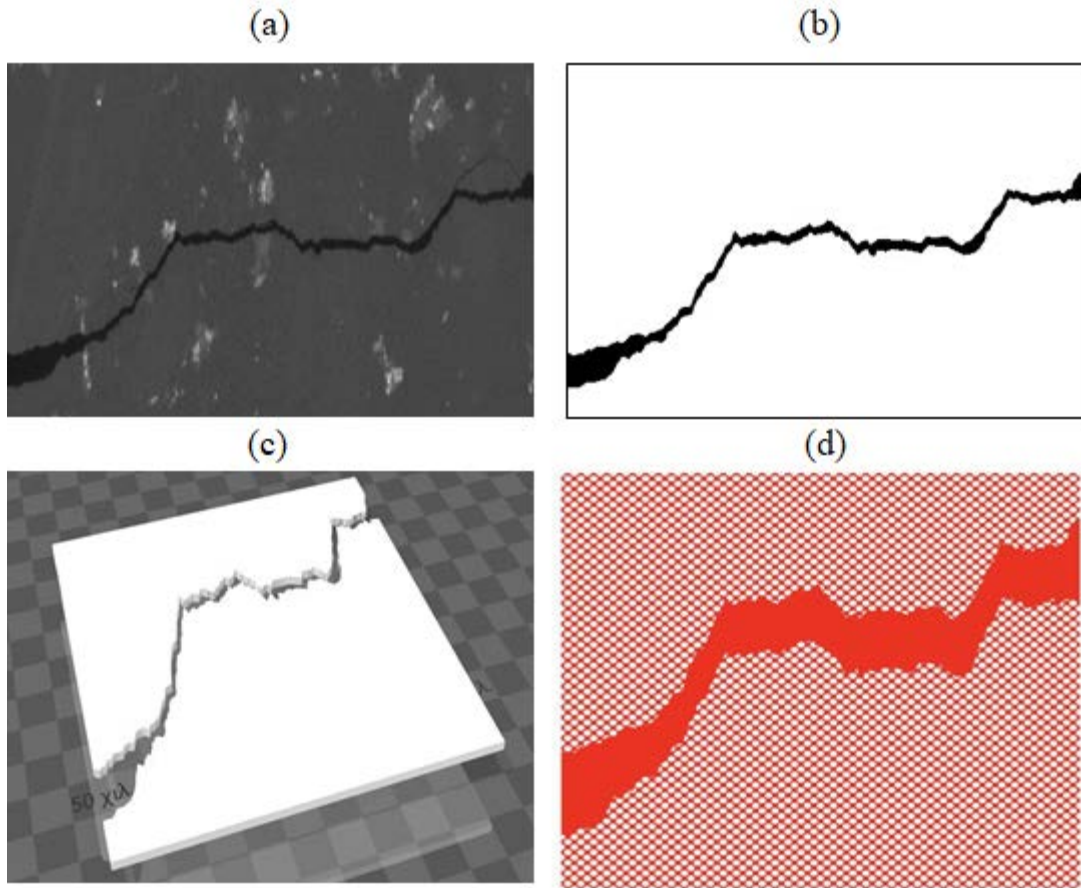


Figure 1 : An example of multiscale porosity model representing fracture-matrix interaction.

A dye was injected at the bottom left of the model in the fracture at a rate of 0.008 mL/min, and the invasion was recorded with a high resolution camera. The dye invades the fracture and the matrix at two different time-scale.

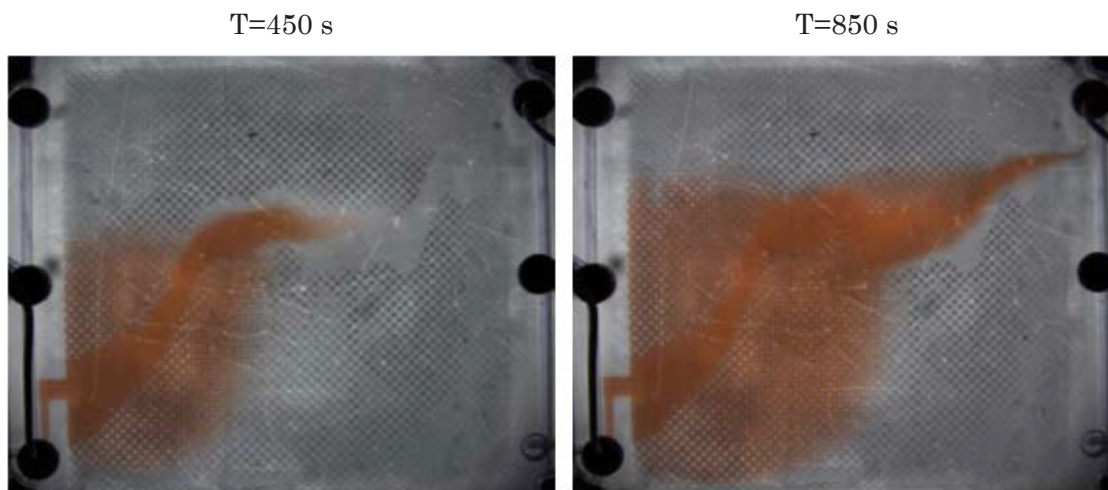


Figure 2 : Injection of dye in a fractured model

The velocity field in the model has been calculated first by a fully resolved pore-scale

simulation with a mesh resolution of 50 microns. The simulation takes 5182 s. Then the results were compared with a multiscale Darcy-Brinkman-Stokes (DBS) simulation. The permeability of the matrix was first calculated by performing a simulation on a 5x5 disc packing domain with the same structure (Representative Elementary Volume). Then the permeability was reinjected in a DBS simulation performed with a mesh resolution of 300 microns. The full procedure takes 32 s to run.

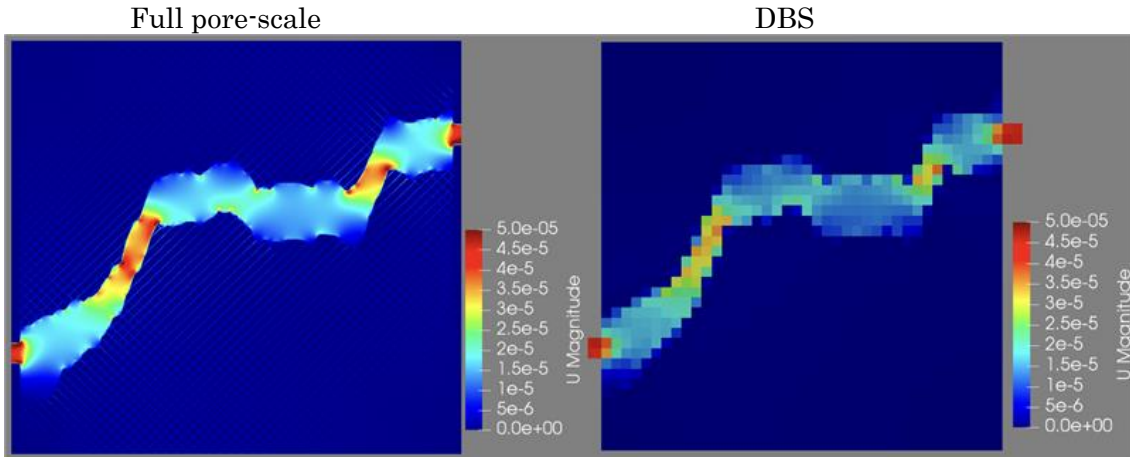


Figure 3 : Comparison of velocity fields obtained with pore-scale and DBS simulation

4. Summaries and future plans

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 next step is to compare the transport of the dye between (1) experiment (2) full pore-scale simulation and (3) a DBS transport simulation. 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 (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. Maes and A. Suzuki: Modelling core scale: Investigation of multiscale porosity using 3D printed micromodels, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Online, (2020), CRF-31, pp. 50-51.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.
 - (Award) Not applicable.
 - (Press release) Not applicable.

Project code	J20I042
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Development of a Method for Optimizing the Rheological and Optical Properties of Blood Mimicking Fluids

Simon Tupin*†, Karim Mazeau**††
 *Institute of Fluid Science, Tohoku University
 ** CNRS, CERMAV, Univ. Grenoble Alpes
 †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The development of blood mimicking fluids (BMFs) for particle image velocimetry (PIV) studies is a difficult and time-consuming process. Such fluids are produced by mixing several chemicals to reproduce the rheological properties of blood (i.e. density and viscosity) while adjusting the refractive index of the arterial model. Recipes reported in the literature are valid only for specific materials (e.g., acrylic or PDMS), delaying the use of new materials (e.g., PVA-hydrogels).

The goal of this project was to develop a method to easily produce BMFs valid for a wide range of refractive indices and different rheological models.

2. Details of program implement

Among the different BMFs found in the literature, 3-components fluids composed of a mixture of water, glycerol and sodium iodide (NaI) are the most common. Glycerol is used to adjust the viscosity of the mixture, while sodium iodide is used to adjust its refractive index.

Based on previous experimental studies, an analytical model that describes the evolution of optical and rheological properties of Water-NaI-Glycerol mixtures was developed. Figure 1 present the concept of the method, which is composed of two steps: a) fixing the refractive index, b) tuning the viscosity.

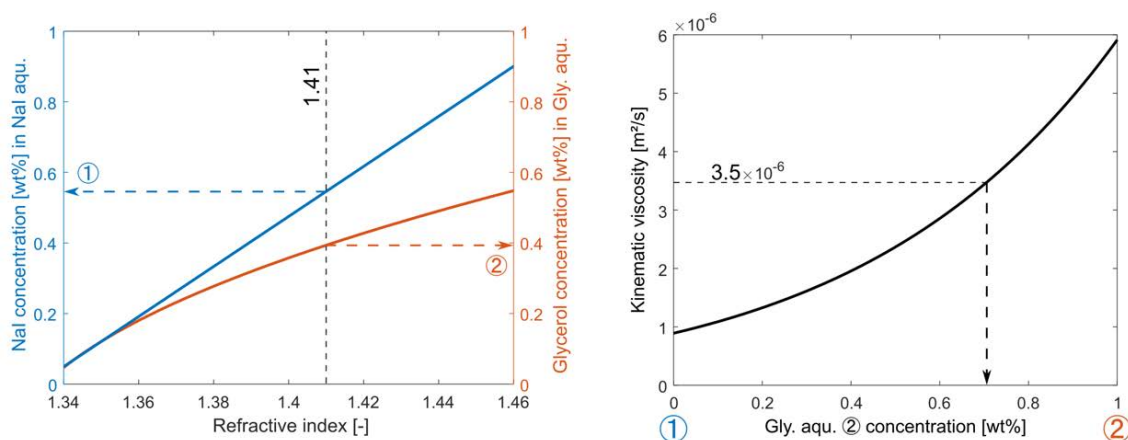


Figure 1 : Concept of the developed method: (left) selection of aqueous solutions of NaI and Glycerol exhibiting the refractive of index of interest, (right) determination of stoichiometric ratio that achieve the kinematic viscosity of interest.

Using this method, the refractive index can vary from 1.33 to 1.47, while the kinematic viscosity changes by 2 scales (Figure 2).

Experimental validation was conducted in testing 15 mixtures using an electromagnetically spinning viscometer and a refractometer. The error in all parameters was within 15%.

Meanwhile, preliminary equilibrium molecular dynamics simulations were conducted in conjunction with a Green-Kubo integral of the pressure tensor autocorrelation to calculate the shear viscosity of fluids.

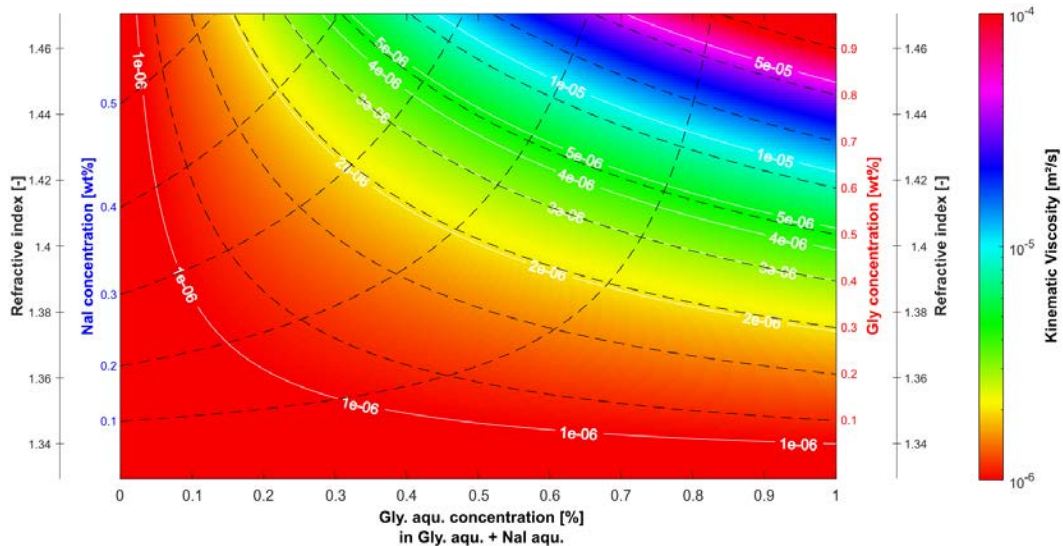


Figure 2 : Map of kinematic viscosity covered by method developed in this project.

3. Achievements

At the end of the first year of the project, the expected results are achieved. An analytical model has been successfully developed. Experimental validation has been carried out. Preliminary atomistic simulations have been carried out to test their ability to predict viscosity and will be completed in the near future.

4. Summaries and future plans

A method to easily produce BMFs was proposed and experimentally validated. The important range of viscosity and refractive index achievable makes it appealing to the experimental flow dynamics community.

Based on current results, we will focus next on the addition of Xanthan gum in the mixture to develop of non-Newtonian fluids that better mimic actual haemorheology.

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. Tupin and K. Mazeau: Optimization of Blood Mimicking Fluids Optical and Rheological Properties, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-1, p. 2.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J20I044
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Towards Next Generation CFD Models of Intracranial Aneurysm (NX-CFD): In-vitro Validation Studies and in-silico Benchmarking of Intracranial Transitional Flow

Simon Tupin*†, Khalid M. Saqr**††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**College of Engineering and Technology, Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Recent research findings confirmed the existence of transitional flow in intracranial aneurysm (IA). 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 Computational Flow Dynamics (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 and establish a verification and validation database. The focus of this second year was to develop more anatomically realistic geometries to expand the V&V database.

2. Details of program implement

The proposed model development method is based on a careful analysis of the parent artery centerline geometry and the aneurysm shape and position. A 3D averaged centerline is created from a group of patients' data, and used to reconstruct a 3D model (figure 1).

Two averaged models representing aneurysms located in the internal carotid artery (ICA) and the middle cerebral artery (MCA) bifurcation were produced based on aneurysmal geometries provided by Dr Sugiyama (Kohnan Hospital, Sendai).

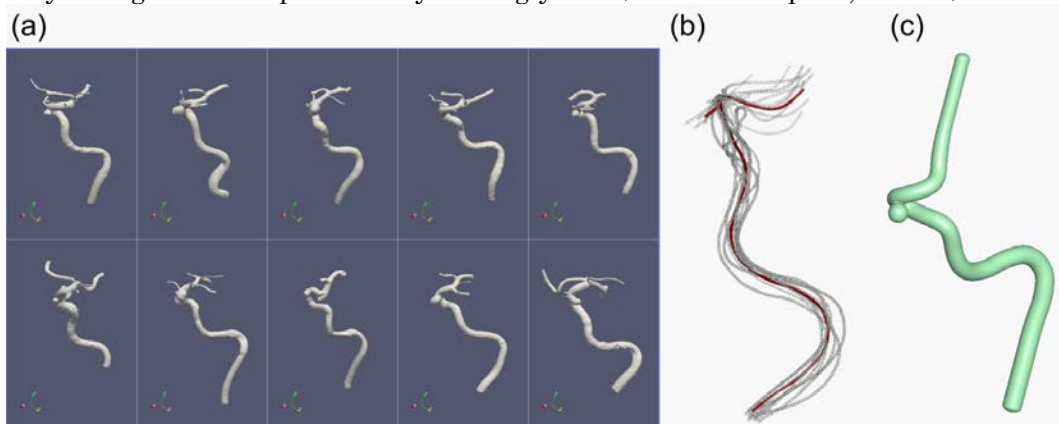


Figure 1 : Overview of the averaging method (ICA model): (a) set of aneurysmal data, (b) averaging of the centerlines geometry, and (c) final 3D model.

Those geometries were then manufactured in silicone models, and intra-aneurysmal flow velocity was evaluated using PIV (figure 2.a) under steady and pulsatile conditions. Preliminary coarse CFD simulations presented good agreement with the experimental results.

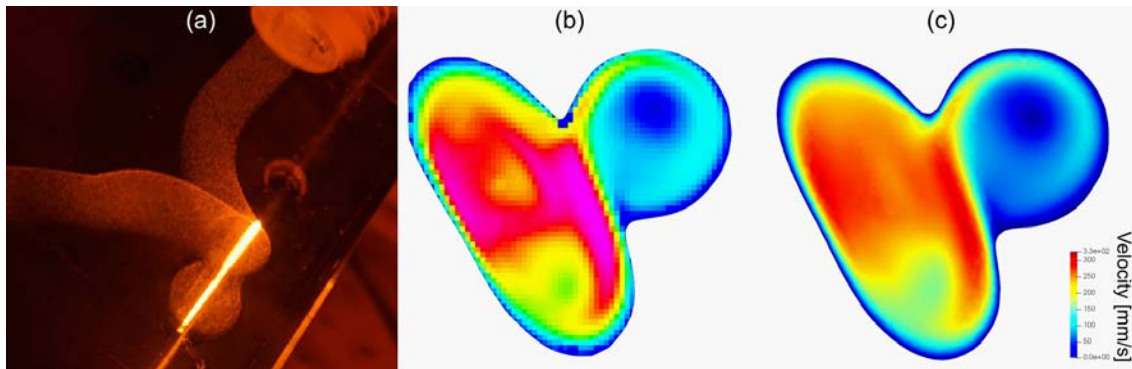


Figure 2 : Comparison of the velocity in the aneurysm of the ICA model: (a) cross-section of the silicone model illuminated by the laser, (b) PIV results and (c) CFD results.

3. Achievements

This year achievements are in line with the expected results. The new models significantly expand the NX-CFD project database and will be made available to the research community to validate their *in silico* methods.

4. Summaries and future plans

A method to create anatomically realistic models from patient-specific geometries was proposed. Particle image velocimetry experiments were performed to investigate the intra-aneurysmal flow, and preliminary CFD simulations conducted.

Using the developed models, we will then focus on studying the influence of blood viscosity models (i.e., Newtonian vs. non-Newtonian) on transitional flow.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - *[1] Simon Tupin, Khalid M. Saqr and Makoto Ohta: Effects of wall compliance on multiharmonic pulsatile flow in idealized cerebral aneurysm models: comparative PIV experiments, *Experiments in Fluids*, Vol. 61 (2020), 164 (11 pages), doi: 10.1007/s00348-020-02998-4.
 - *[2] Khalid M. Saqr, Simon Tupin, Sherif Rashad, Toshiki Endo, Kuniyasu Niizuma, Teiji Tominaga and Makoto Ohta: Physiologic blood flow is turbulent, *Scientific Reports*, 10 (2020), 15492 (12 pages), doi: 10.1038/s41598-020-72309-8.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[3] Simon Tupin and Khalid M. Saqr: Development of Averaged Geometries for CFD Benchmarking of Intracranial Aneurysmal Flow, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-2, p. 3.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J20I045
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	2020.4～2021.3
継続年数	2年目

ノッキング末端ガス自着火現象における燃料反応特性の影響
Fuel Sensitivity on End-Gas Autoignition Behavior during Knocking Combustion

寺島 洋史*†, 中村 寿**††
 *北海道大学工学研究院, **東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

ノッキング現象は、末端ガス自着火および強い圧力波発生を伴う異常燃焼として知られ、エンジン熱効率向上の大きな障壁となっている。本研究では、詳細反応機構/圧縮性流体解析技術を適用することで、未だ不明瞭なノッキング現象の詳細理解を目指す。特に燃料反応特性(低温酸化反応)に着目し、ノッキング現象に対する燃料反応特性の影響を明らかにする。

2. 研究成果の内容

まず、ノッキング現象に対する燃料反応特性の影響を調べるため、四種類の燃料を用いた解析を実施してきた。その結果、ノッキング強度(末端ガス自着火から圧力波発達過程)を決定する要因が NTC 燃料の第一段目温度上昇率および主着火までの誘導期間の長さにあることを明らかにした。NTC 燃料では、低温酸化反応起因で二段階の温度上昇が生じるが、第一段目温度上昇率が急激な場合、末端ガス領域において明確な圧力波擾乱が発生する。この圧力波は容器内を継続的に伝播し、末端ガス反応進行の空間非一様性が強め、爆轟波のような強い圧力波の発達をもたらす。末端ガス反応非一様性は、第一段目温度上昇率と誘導期間長さのトレードオフで決定されることから、特定の温度条件で大きなノッキング強度ピークが現れる[研究成果 1)-[1]]。

上記の燃料を変化させた解析によって、第一段目温度上昇率と誘導期間長さの重要性が示されたが、これら二つのパラメータは当量比条件によっても変化する。そこで、正ヘプタンを用い、当量比(および初期温度)を変化させた解析を行った。図 1 に、各初期温度におけるノッキング強度と当量比の関係を示す。

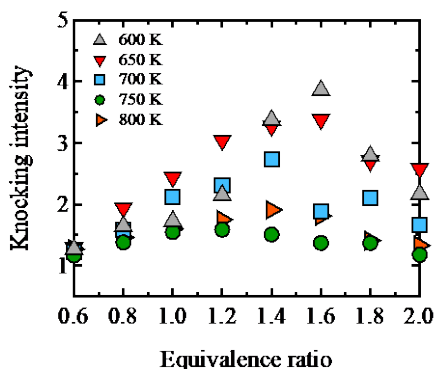


図 1: ノッキング強度と当量比の関係

高温条件(750, 800 K)では、当量比 1.4 付近でピークが見られるが大きな値ではない。高温条件では、第一段目温度上昇がほとんど現れないことから、ノッキング強度を強める要因が存在しない(当量比 1.4 付近のピークは、主着火時の熱発生率が関係している)。一方、低温条件(600, 650 K)では、当量比 1.6 付近に大きなピークが発生する。低温条件では、第一段目温度上昇が明確に見られることから、燃料を変化させた解析と同様に、ノッキング強度のピーク発生機構を説明することができる。図 2 に第一段目最大温度上昇率(熱発生率)と誘導期間長さの結果を示す。最大熱発生率は当量比の増加とともに大きくなり、誘導期間長さは短くなる傾向にある。よって、当量比変化に対する第一段目温度上昇率と誘導期間長さ、それらのトレードオフによって、当量比 1.6 付近に大きなピークが発生したと考えられる。

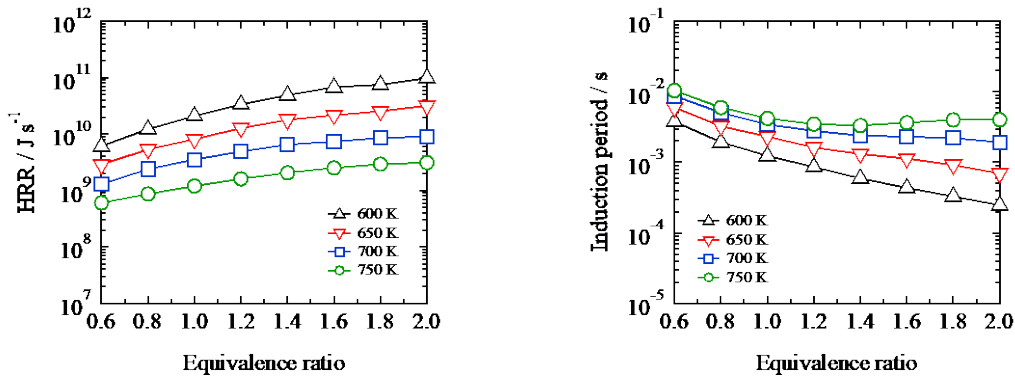


図 2: 第一段目最大熱発生率と誘導期間長さ

3. 研究目標の達成状況

強い圧力波を発生させる支配要因として、NTC 燃料の第一段目温度上昇率(熱発生率)および主着火までの誘導期間の長さ、これら二つが重要となることを明らかにした。燃料 NTC 特性とノッキング圧力波発達の関係に答えを与える、という研究目標を達成した。

4. まとめと今後の課題

ノッキング強度は、NTC 燃料の第一段目温度上昇率および主着火までの誘導期間の長さ、それらのトレードオフで決定される。

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] H. Terashima, H. Nakamura, A. Matsugi and M. Koshi: Role of low-temperature oxidation in non-uniform end-gas autoignition and strong pressure wave generation, *Combust. Flame*, 223 (2021), pp. 181-191, doi: 10.1016/j.combustflame.2020.09.025.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] H. Terashima and H. Nakamura: Fuel sensitivity on end-gas autoignition behavior during knocking combustion, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, Online, (2020), OS2-6, p. 124.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J20I047
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamental
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

The Effect of Hypertension and Anti-Coagulant to Aneurysm Rupture

Nadia Shaira binti Shafii*, Ryuhei Yamaguchi***
 Ahmad Zahran Md Khudzari*,**, Gaku Tanaka****
 Simon Tupin***, Atsushi Saitoh*****
 Makoto Ohta***††, Kahar Osman*,**†

*School of Biomedical Engineering and Health Sciences, Faculty of Engineering,
 Universiti Teknologi Malaysia

**IJN-UTM Cardiovascular Engineering Center, Universiti Teknologi Malaysia

***Institute of Fluid Science, Tohoku University

****Graduate School of Engineering, Chiba University

*****Department of Neurosurgery, Sendai Medical Center

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

This study proposed a detail analysis on severity of the IA rupture risk prediction with a hypothesis proposed in this study is that the hypertension would increase the rupture risk as blood flow is reduced while the anti-coagulant would lower the rupture potential due to the increased flow from reduced viscosity.

2. Details of program implement

By understanding the nature and causes of the aneurysm rupture, preventive measure could be taken in avoiding rupture and proper treatment can be suggested. However, till today there is no specific standard in defining the IA rupture risk behavior due to the effect of hypertension and anticoagulant reaction. Thus, in this study the patient specific of IA will be remodeled and hemodynamic analysis. The experimental expertise was provided by Prof Makoto Ohta and Prof Yamaguchi Ryuhei from Institute of Fluid Science, Tohoku University Japan. Fluid structure interaction (FSI) method will be used in achieving higher accuracy.

The CFD result of real model was validated by comparing the velocity distribution on XZ plane in the middle of the model on previous year reports also the structural effects. Most of the recent studies focus on the morphological parameters statistically to assess the risk of rupture and also the effect of hemodynamic parameters to the condition of the walls. This study focus on one model of MCA aneurysm with hypertension and anticoagulant effect before proceed simulation for another few actual models.

3. Achievements

Flow complexity inside the aneurysm can be assessed through observations of the velocity flow distribution inside the aneurysm. Figure 1 shows front and side view of the velocity contour at the median plane of the aneurysm. These results were analyzed at peak value during systolic condition which is at time 0.3625s.

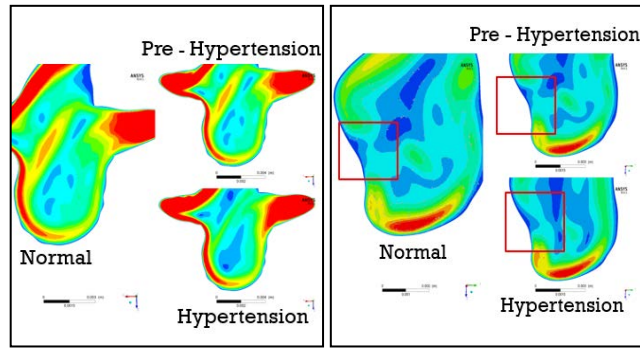


Fig 1. (a) Front view (b) Side view of median plane

From the distribution of velocity in Figure 1, flow recirculation can be seen clearly at the middle area of the aneurysm. There was not much difference between normal and pre hypertension condition. However, for hypertension condition, a larger stagnation region was observed as in in Figure 1(b) due to the lower velocity compared to the others two conditions. This could result in low WSS.

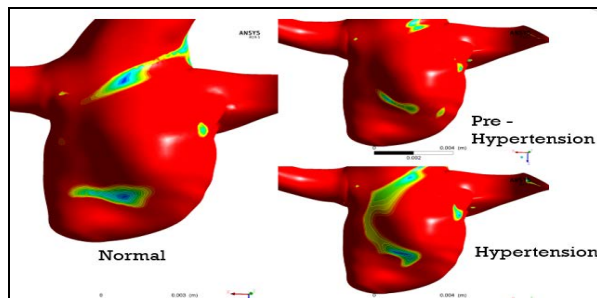


Fig 2: The low WSS distribution (front view).

Figure 2 shows the WSS distribution below the threshold value of 1 Pa. Wall Shear Stress (WSS) is commonly used as a predictor of performance for medical devices towards the vascular wall. Recent studies reported that aneurysm will rupture with larger the area with low WSS below 1Pa [6]. The low WSS area in hypertension condition has larger pockets of low WSS region as compared to normal and pre-hypertension condition. The same could be said from the perspective of maximum WSS, there is just small difference between normal and pre hypertension pressure, 275Pa and 255Pa and low max WSS for hypertension condition, 143Pa. Thus, hypertension flow condition would contribute to higher risk of aneurysm rupture due to larger areas of low WSS.

The second aspect of the study is the effects of anti-coagulants such as aspirin in affecting rupture risk. This was simulated by altering the viscosity condition matching the flow conditions induced by anti-coagulant. Generally, consuming the anti-coagulant would affect in reduced low WSS (<1 Pa) areas by about 0.28% as shown in Figure 3 which may decrease the rupture risk.

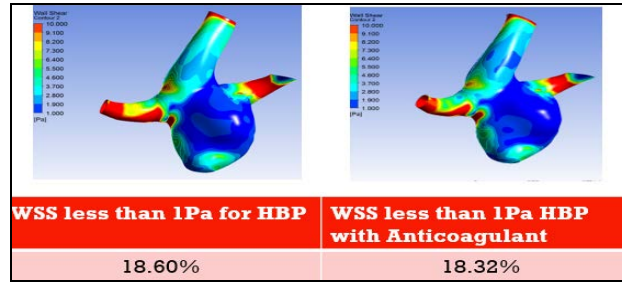


Fig 3. Anticoagulant effect to WSS

4. Summaries and future plans

From this study hypertension flow conditions would increase the risk of MCA aneurysm rupture due to inducing larger areas of low wall shear stress. However, anti-coagulants flow conditions were able to reduce about 0.28 percent risk of rupture. Therefore, MCA aneurysm with hypertension would slightly reduce the rupturing risks with anti-coagulant treatment.

The future plans are as follows

1. The simulation for different actual models will be continue 3.
2. The results from the FSI simulation will be collected to determine the correlation for each parameter using the multiple regression method.
3. Then, a guideline support system will be established based on analyzed result of hypertension and anticoagulant effect to the rupture risk in IA.

5. Research results

1) Journal

*[1] Nadia Shaira Shafii, Ryuhei Yamaguchi, Ahmad Zahran Md Khudzari, Gaku Tanaka, Atsushi Saitoh, Makoto Ohta, Kahar Osman: Hemodynamic and Flow Recirculation Effect on Rupture Prediction of Middle Cerebral Artery Aneurysm, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanic and Thermal Sciences*, Vol. 79, Issue 1 (2021), pp. 1-16.

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	J20I048
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st 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 will study the effect of mechanical imposition of dynamic stresses to endothelial monolayers by controlling pulsatile fluid flow in contact with cells. By integrating UNAM experimental methods and IFS in-house microchip, we will observe of ECs and evaluate their permeability (Fig. 1). 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.

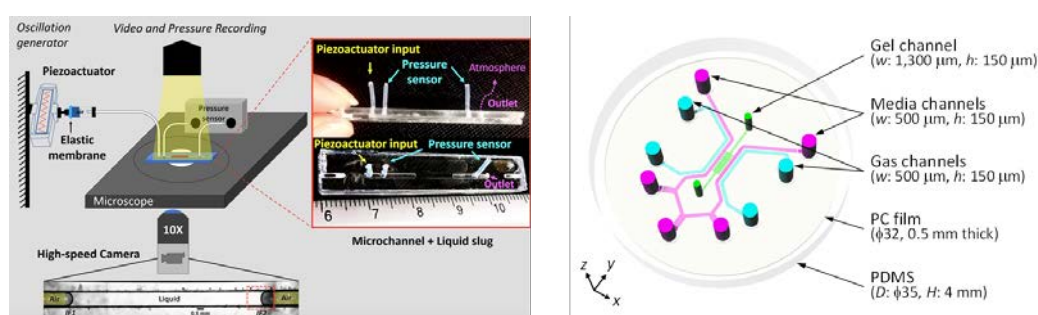


Figure 1: Microfluidic experimental setup to generate pulsatile flows (left) and a microfluidic device for cellular experiment controlling microenvironment (right)

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

This was the first year for our collaborative research project. Due to the pandemic, all collaborative research has been done remotely. Right now, we are implementing the experimental methods developed at UNAM to the IFS original microchip. We will experimentally characterize the dynamic permeability of the microchannel, filled with a slug of cell culture medium, by visualization of one of the fluid interfaces, and control the shear stress felt by cells by changing the frequency of the pulsatile pressure drop. We then will investigate the cellular dynamics when the slug of cell culture medium flows over a monolayer of endothelial cells. We will observe changes in cell motility and cell morphology.

We have characterized the rheological properties of water and culture medium at physiological temperature in a conventional viscosimeter. Density and viscosity are shown in Table 1.

Table 1: Rheological properties of water and culture medium

	T [°C]	ρ [kg/m ³]	η [mPa · s]
<i>Culture medium</i>	37	979	0.757
<i>Water</i>	37	991	0.717

We have computed theoretically the dynamic permeability, which is a frequency-dependent response function, for culture medium and water at physiological temperature (37°C). Figure 2 shows the magnitude of the dynamic permeability as a function of radial frequency for a fluid slug made of each one of three fluids: water at room temperature (20°C) with black line (used for reference), water at physiological temperature with green line, culture medium at physiological temperature with magenta line. We can observe that the theoretical model predicts a tinny 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, could be used for preliminary experiments.

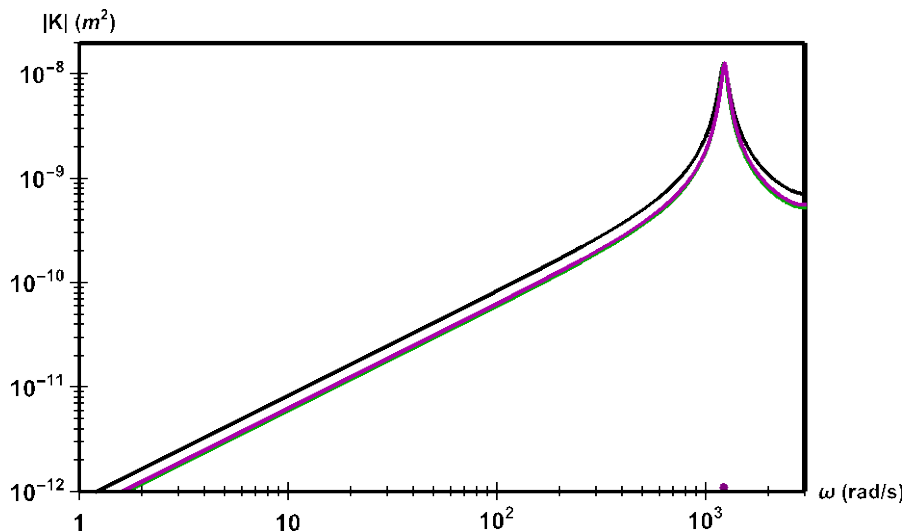


Figure 2: Dynamic permeability for a fluid slug formed of each one of three fluids: water at room temperature, used as reference, with black line, water at physiological temperature with green line, culture medium at physiological temperature with magenta line.

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, Δp , as $K = vL/\Delta p$, where L is the slug length. As the figure shows, this one 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. Similarly, it can be proven that shear rate grows linearly with the imposed frequency in a wide frequency range. 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

Experimental implementation to study pulsatile dynamic response of culture medium and the effect that this one has on the motility and morphology of endothelial monolayer, is under way. We have rheologically characterized culture medium and water at physiological temperature. We have computed the dynamic permeability for water and culture medium at physiological temperature, which is the conditions at which the experiments will take place, and find that the dynamic permeability is almost identical in a wide frequency range. This feature will allow doing preliminary experiments with water. We have derived equations for shear rate at different distances from the wall and at the wall. We have found that shear rate grows linearly with the frequency of the external driving. This feature will allow us to apply a wide shear stress range solely by changing the frequency of the pulsatile pressure drop. We have computed the characteristic frequencies of the system, which will be useful to analyze experimental data.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] K. Funamoto, E. Corvera Poiré: Endothelial Cell Migration under Oscillatory Flow, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, (2020), CRF-10, pp. 16-17.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J20I049
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	2020.4～2021.3
継続年数	3年目

水素 - 空気予混合火炎のダイナミクスに及ぼす熱損失効果
Effects of Heat Loss on the Dynamics of Hydrogen-Air Premixed Flames

門脇 敏**†, 小林 秀昭**††

*長岡技術科学大学技術経営研究科, **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

水素の希薄予混合燃焼は、近年、低環境負荷や省エネルギーに直結するエネルギー変換として着目されている。水素火炎は不安定な振る舞いを示すことが知られており、それを制御するには火炎のダイナミクスに関する知見が不可欠である。従来の数値計算では、火炎のダイナミクスにおけるスケールの影響や熱損失の効果を明らかにしてきた。しかし、高圧条件下における水素 - 空気予混合火炎の挙動に関する情報は乏しいのが現状である。本研究では、詳細な化学反応を含む N-S 方程式に基づく数値計算を遂行し、高圧条件下での火炎のダイナミクスに及ぼす熱損失の効果を調べ、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

支配方程式として詳細な化学反応を考慮した圧縮性 N-S 方程式を採用し、二次元非定常反応流の数値計算を遂行した。計算スキームとしては、有限差分法の一つである陽的マッコーマック法を用いた。本数値計算では、申請者がこれまで開発してきたコードをベースとし、流体科学研究所のスーパーコンピューターを用いて計算を遂行した。

図1は、当量比を0.5とし、圧力が1, 3, 5 atmのときの断熱・非断熱条件下におけるセル状火炎（一波長分）の温度分布を示したものである。圧力が高くなると火炎は薄くなり、熱損失が存在すると火炎面の凹凸は深くなる。これは、熱損失が不安定性をプロモートするからである。図2は、圧力が5 atmのときの広い空間におけるセル状火炎の温度分布を示したものである。セルは合体と発達、及び分割を繰り返す、火炎は複雑な形状を呈する。高圧下では、火炎が薄くなるので、流体力学的効果及び拡散・熱的效果はより顕著になる。また、熱損失が存在すると火炎形状は複雑化し、火炎面は更に不安定になる。

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、圧力を変化させて遂行し、火炎のダイナミクスに及ぼす熱損失の効果を精査した。そして、水素の希薄予混合燃焼において、熱損失と共に圧力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、火炎のダイナミクスに及ぼす熱損失の効果に着目した本研究は、十分な成果を得ている。

4. まとめと今後の課題

熱損失と圧力に着目し、火炎挙動に及ぼすそれらの影響を精査した。今後は、化学種分布の影響を調べると共に、火炎のダイナミクスにおける不活性ガス添加の影響を議論する。そして、水素希薄予混合火炎の不安定性のメカニズムを明らかにする。

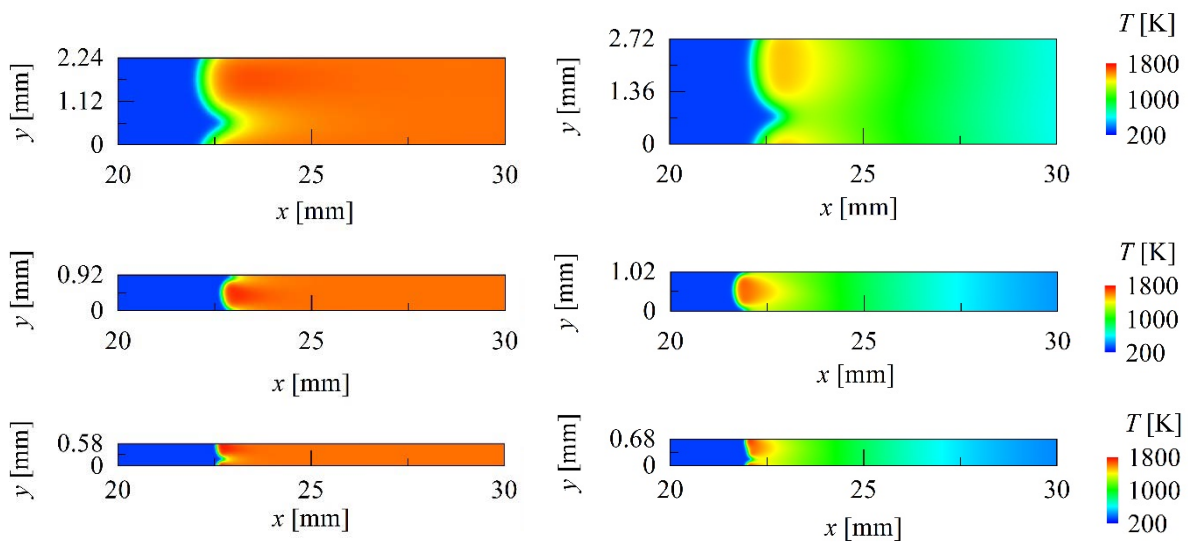


図1 断熱・非断熱条件下におけるセル状火炎の温度分布 (1, 3, 5 atm)

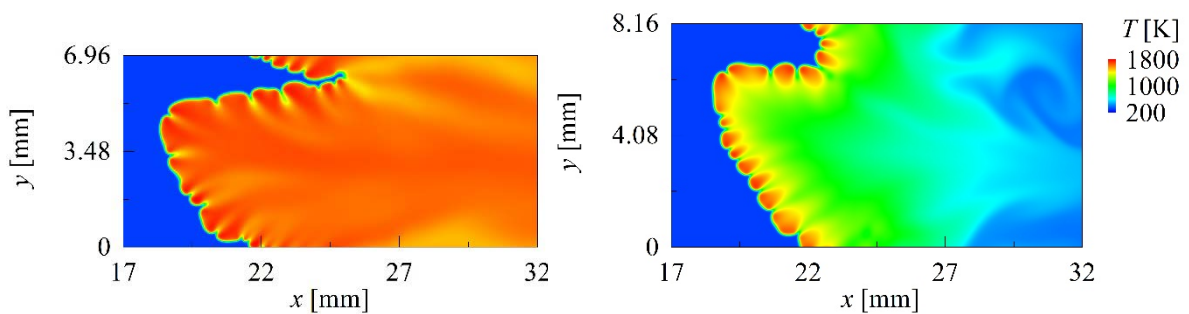


図2 広い空間におけるセル状火炎の温度分布 (5 atm)

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] Kadowaki, S., Thwe Thwe Aung, Furuyama, T., Kawata, K., Katsumi, T., and Kobayashi, H.: Effects of pressure and heat loss on the unstable motion of cellular-flame fronts caused by intrinsic instability in hydrogen-air lean premixed flames, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 16, No. 2, 20-00491, (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.: Heat-loss effects on the dynamic behavior of hydrogen-air lean premixed flames under the high-pressure conditions, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-63, pp. 112-113.

- [3] 古山大誠, 河田一将, 勝身俊之, 小林秀昭, 門脇敏: 水素・空気予混合火炎の不安定挙動に及ぼす熱損失の影響, 第58回燃焼シンポジウム, B211, (2020).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J20I052
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目（発展）

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

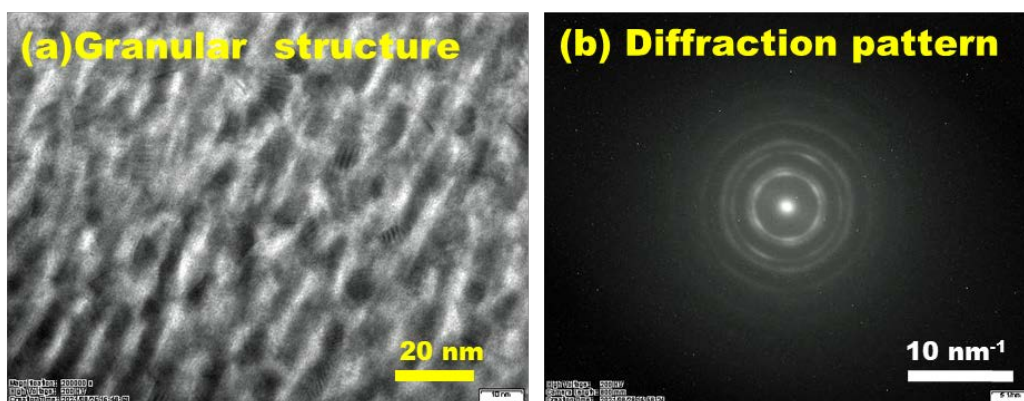
†申請者, ††所内対応教員

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. 本年度は, 新型コロナウイルス感染症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 の成膜条件と膜のナノ構造の関係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, 成膜パラメータの検討と透過電子顕微鏡 (TEM) によるナノ構造観察を行った. Au 含有量が 24at.%, 膜厚 585 nm の Au-DLC の断面を TEM で観察した例を図 1 に示す.



Au tablet: 10 mm, RF Power: 125 W, Deposition time: 90 min.

図 1 : TEM による Au-DLC のナノ構造観察結果

Au-DLC の断面ナノ構造は、図 1(a)に示す様に、これまで観察した Ag-DLC および Cu-DLC と同様の粒状組織であり、非晶質炭素中に Au ナノ結晶が分散した構造であることがわかった。図 1(b)は Au-DLC 断面の電子回折パターンであり、膜中の Au ナノ結晶による回折リングが確認できる。

また、Au-DLC の成膜速度および、同心円複合ターゲットの Me/C 比に対する膜中金属含有量は、スパッタ収率と融点がほぼ同一である Cu-DLC の値とそれぞれ同程度であり、今後の Au-DLC の成膜パラメータ設定の際にこれまで蓄積してきた Cu-DLC のデータを参照することで高額な Au 試料の消耗を抑制して実験コストを低減しうる可能性が示された。

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、異なる二種類の成膜時基板温度と高周波出力において成膜した Au-DLC のナノ構造を調査し、Au とほぼ等しいスパッタ収率である Cu を添加した Cu-DLC の成膜パラメータとの比較を行った。その結果、Au-DLC の断面ナノ構造は Ag-DLC および Cu-DLC と同様の粒状組織であることが分かった。また、Au-DLC とほぼ同一組成の Cu-DLC との成膜パラメータはほぼ同等であることがわかった。引き続き Au-DLC 中の Au 含有量を変化させた場合の断面ナノ構造変化を明らかにし、抵抗率の温度依存性と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] 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, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-67, pp. 119-120.

[2] 田中佑弥, 綿田知明, 後藤実: Ag-DLC ナノコンポジット膜の摩擦特性に及ぼすポリイミド中間層の影響, トライボロジー会議 2020 秋 別府 ZOOM online 開催, (2020), pp. 217-218.

[3] 綿田知明, 田中佑弥, Mohd Shahrman Adenan, Juri Bin Saedon, 後藤実: Cu/DLC ナノコンポジット膜の摩擦特性と内部 Cu ナノ結晶の配向性の関係, トライボロジー会議 2020 秋 別府 ZOOM online 開催, (2020), pp. 219-220.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

Project code	J20I053
Classification	General collaborative research
Subject area	Health welfare and medical care
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Mathematical Modeling of the Glycocalyx Based on the Molecular Dynamics for Blood Flow Analysis Considering Microstructures on Blood Vessel Walls

Suguru Miyauchi*†, Yiannis Ventikos**††

Xizhuo Jiang**, Toshiyuki Hayase*

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Mechanical Engineering, University College London

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Bush-like microstructures called glycocalyx are present on endothelial cell membranes covering a blood vessel wall. Previous studies reported that damage to the vascular endothelia including the glycocalyx is strongly related to circulatory diseases such as an arterial aneurysm, and many blood flow analyses have been performed for the elucidation of the initiation and development of the diseases and the early prediction. However, most of the blood flow analyses ignored the glycocalyx, and the stress acting on the blood vessel wall has not been evaluated accurately. In recent years, large-scale molecular dynamics analysis has been performed on the interaction between glycocalyx and blood flow.

The purpose of this project is to propose a mathematical continuum model of flow resistance by the glycocalyx based on the molecular dynamics analysis results.

2. Details of program implement

We performed two molecular dynamics analyses as the preliminary study: equilibrium calculation and non-equilibrium calculation, in which the Couette flow was reproduced between the two lipid membranes. Visual Molecular Dynamics (VMD) and Nanoscale Molecular Dynamics Program (NAMD) were used for the modeling of the molecular system and the molecular dynamics analysis, respectively. As the computational setup, two POPC membranes were set in a certain distance in parallel, and water molecules were filled in spaces between, above and below the membranes. For the equilibration, NPT ensembles were performed for 10 ns. After the equilibration, to reproduce the Couette flow, the moving harmonic constant feature in NAMD was applied to one POPC membrane, and the other membrane was fixed.

For confirming the equilibration of the system, the time variations of the membrane thickness and membrane area per lipid were investigated (Fig. 1). In both figures, the numerical results are close to or within the experimental results at 10 ns, although more computational time might be needed.

For the non-equilibrium computation, the velocity profile and the distribution of the number of atoms of water molecules were investigated (Fig. 2). The nearly Couette flow profile was reproduced between the two membranes for the high speed of the membrane ($U = 25$ m/s), but not reproduced for slow speed case ($U = 0.5$ m/s). In the slow case, the effect of the moving membrane would be hidden by the thermal fluctuation. No difference was seen for number of atoms between the two cases.

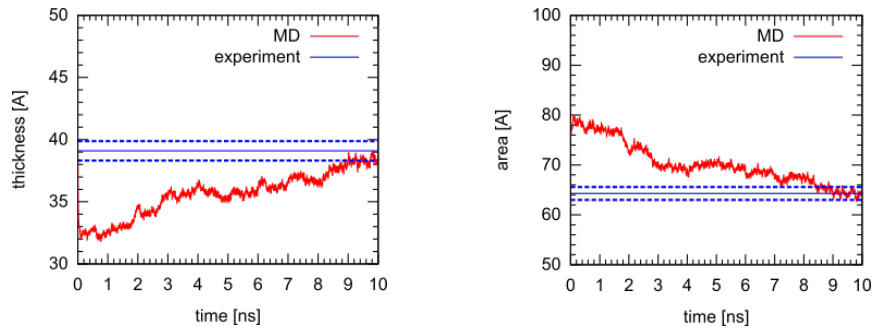


Figure 1 Time variations of the membrane thickness and the area per lipid. Dashed lines indicate the standard deviation.

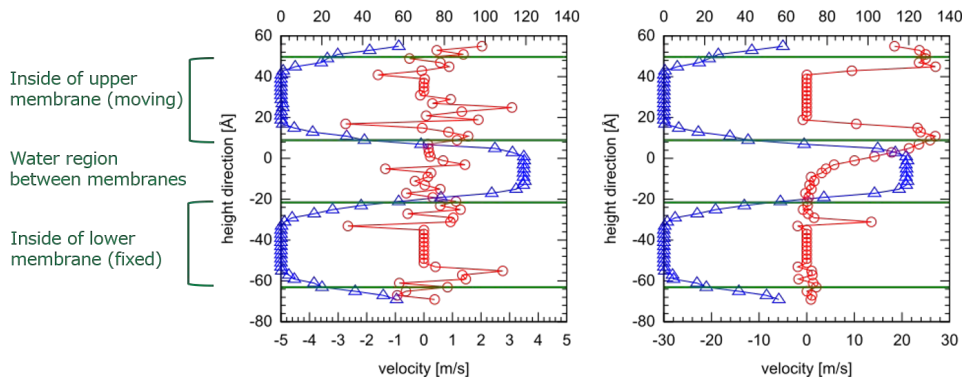


Figure 2 The velocity profile and distribution of the number of atoms for water molecules. Left: membrane velocity $U = 0.5\text{m/s}$. Right: $U = 25\text{ m/s}$. Circle and triangle symbols are velocity and number of atoms, respectively.

3. Achievements

The preliminary study on the molecular system including moving lipid membrane has been completed.

4. Summaries and future plans

As the preliminary study, methods for equilibration and membrane-driven flow, which occurs the Couette flow between the two lipid membranes, were established. The computation for the glycocalyx and the development of the mathematical model are future 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] S. Miyauchi, T. Hayase, X. Jiang, Y. Ventikos: Mathematical Modeling of the Glycocalyx Based on the Molecular Dynamics for Blood Flow Analysis Considering Microstructures on Blood Vessel Walls: Fundamental Analysis for a Couette Flow between Lipid Membranes, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-7, p. 12.

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

課題番号	J20I054
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	2020.4～2021.3
継続年数	1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**††

平井 達朗*, 小野 泉帆*, 矢野 雅之*, 古川 琢磨***, 岡部 孝裕****, 守谷 修一**

*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, *弘前大学理工学部

†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・安全を守ることの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

実際の火災では散乱性媒体として煤が発生する。そのため、煤の混入によってウォーターミストのふく射熱遮蔽性能が変化する可能性があるが、煤の発生には化学反応や燃焼媒体、燃焼温度といった様々な要因が影響するため、定量的なふく射特性評価が困難である。本研究ではMie散乱理論を用いて粒子状のディーゼル煤のふく射特性を計算した。また、ふく射伝熱解析よりウォーターミスト内にディーゼル煤が独立して混在した系のふく射熱遮蔽性能を計算した。ウォーターミストに煤が混在した系のふく射熱遮蔽性能を全炎反射率(TFR: Total Flame Reflectance)により評価を行い、ディーゼル煤の混入によるふく射遮蔽性能への影響を議論した。

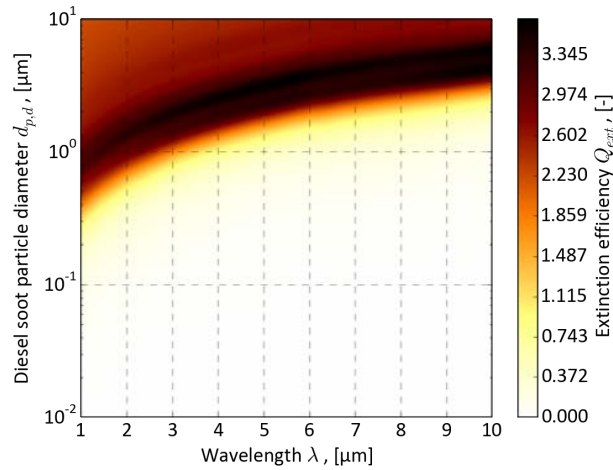


図 1：ディーゼル煤粒子の減衰効率

Mie 散乱理論によって計算されたディーゼル煤粒子の減衰効率を図 1 に示す。粒径 $0.3 \mu\text{m}$ 以上のディーゼル煤はふく射熱を吸収・散乱しやすいことが示唆される。空間中に分散する水粒子とディーゼル煤の体積分率を 0.0125% とし、ミスト層の層厚を 1.0 m とし、混在する散乱性媒体内のふく射伝達を計算した。混在するミスト層のふく射熱遮蔽性能を表す TFR を図 2 に示す。ウォーターミストの最大 TFR が 42% であるのに対して、ディーゼル煤が独立して混入した系の最大 TFR は、いずれの大きさのディーゼル煤が混入した場合も大幅に低下した。最大 TFR を示す水粒子径はどのような場面においても約 $2.4 \mu\text{m}$ であり、独立したディーゼル煤が混入したことによる、ふく射熱遮蔽に最適な水粒子径の変化は僅かであった。

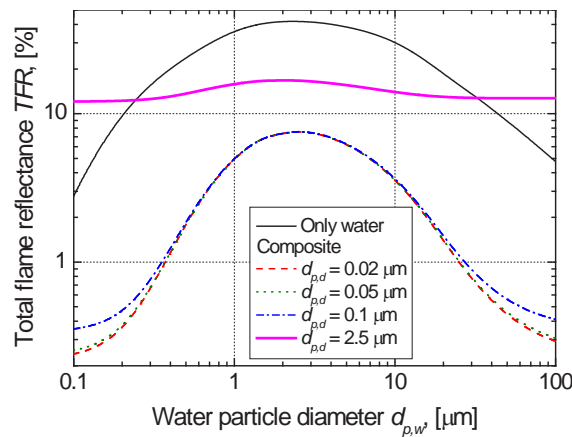


図 2：ウォーターミストに煤が混在した系の全炎反射率

3. 研究目標の達成状況

本研究は、ウォーターミストと煤が混在する系のふく射熱遮蔽性能を評価した。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、ふく射伝熱の評価を可能としているが、対流伝熱現象などは、現状、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。周囲環境からの伝熱による水滴粒径の経時変化を模擬できる観察室を作製し、FTIRによるスペクトル透過率測定を行う。加熱下のミスト層のふく射遮蔽性能の経時変化を直接測定する。また、対流熱伝達が水滴の経時変化に与える影響評価するため、高温環境下で流動する液滴の粒径の時間変動、および移動経路のモデル化を行う。液滴の散乱パラメータの変化によるふく射遮蔽機能の評価を行うために、OpenFOAMを用いた熱流動解析を行う。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

*[1] H. Gonome, T. Nagao, Y. Takagi, M. Ono, T. Kogawa, S. Moriya and J. Okajima: Protection from thermal radiation of hazardous fires: Optimizing microscale droplet size in mist barriers using radiative transfer analysis, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 143, (2020), pp. 114-120.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] H. Gonome, Y. Takagi, T. Nagao, M. Ono, T. Kogawa, and J. Okajima: Radiative transfer analysis in soot smoke and water mist for development of thermal barrier fire extinguishing devices, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-72, pp. 125-126.

[3] 鷹木 勇人, 長尾 太一, 小野 泉帆, 江目 宏樹: ウォーターミストのふく射熱遮蔽性能に対する煤の影響, 第41回日本熱物性シンポジウム, (2020), B213 (3 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）

講談社, ブルーボックス, 消防士を炎の熱から守る伝熱工学「ナノ粒子でのふく射熱制御」の秘密, 2020.05.14.

(<https://gendai.ismedia.jp/articles/-/71875>)

Yahoo!, Yahoo!ニュース, 消防士を炎の熱から守る伝熱工学「ナノ粒子でのふく射熱制御」の秘密, 2020.05.15.

(<https://headlines.yahoo.co.jp/article?a=20200515-00071875-gendaibiz-sctch>)

課題番号	J20I055
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	2年目

誘導加熱を用いた回転円すいディスク式薄膜揚水蒸発機構を用いた液系生成装置の開発
Development of Spinning Device Using Filmwise Pumping-up Mechanism with Induction Heating and Rotating Cone

足立 高弘*†, 高橋 賢次*, 秋永 剛*, 秋永 加奈*
 岡島 淳之介**††, 小宮 敦樹**
 *秋田大学理工学部, **東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

頂角を下にした円すいを水に浸し回転させると、円すい外表面に沿って液が揚水される。水の場合には、膜状流れが形成され液滴となって周囲に噴霧される。一方、水より粘度の大きな流体では曳糸性(糸を引く性質)の影響により、円すい外表面には糸状の揚水が現れ、液糸となって放出される。この興味深い現象を利用して液体を揚水し、粘度の大小に依らず液糸を生成・放出する機構についての研究を行う。すなわち、粘度が小さく膜状流れで揚水される場合にも揚水の途中で工夫を施すことで、液糸として周囲に放出される装置の開発を目的とする。

粘度が小さい場合に生成される膜状揚水から、粘度が大きく曳糸性が要求される液糸が放出される過程を実現させるためには、揚水の途中で粘度を大きな値に変化させることが必要と考えられる。本研究では、永久磁石を用いた電磁誘導により、作動媒体の粘度を変化させる方法を用いる。説明用画像の実験装置に示すように、回転円すいの底面に円すいとともに回転するアルミ板を設置する。また、その上方に永久磁石を配置した固定板を設置する。固定板の磁石により、固定板とアルミ板の近傍には磁場が形成される。アルミ板は非磁性の金属であり、静止している場合には磁石から何等影響を受けない。一方、円すいとともに高速で回転する場合には、アルミ板が固定板に設置された永久磁石による磁場を乱すことで、アルミ板の中に電磁誘導が生じ誘導加熱によりジュール熱が発生する。この熱は、アルミ板を通過して移動し膜状流に到達する。本研究で用いる作動媒体は水溶液なので、この熱により水分が蒸発し水溶液の濃度が増加することで揚水の途中で作動媒体の粘度が大きくなることが期待できる。本機構は、回転体を非接触で加熱し水分を蒸発させる蒸発器となっている。液糸の生成メカニズムを明かにし、粘度が小さく膜状流れで揚水される場合にも、液糸として周囲に放出することを可能とする装置の開発を目的とする。

2. 研究成果の内容

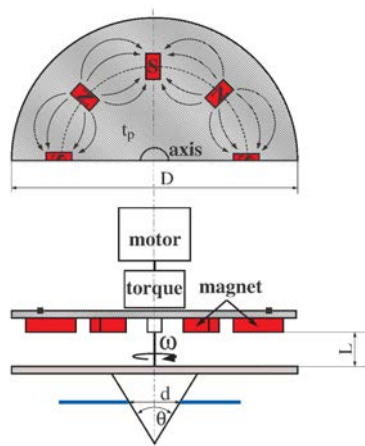


図 1：実験装置概略図

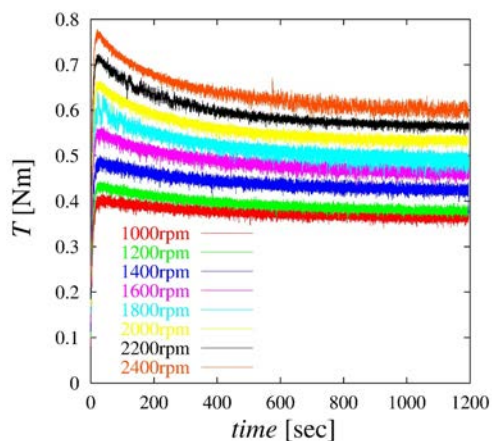


図 2：トルク測定結果

図 1 は、固定板に設置された永久磁石の磁場の影響下で、円板付き円すいを回転させた際の揚水現象を再現する実験装置の概要である。磁石と円板が固定されているが、アルミ製の円すいと円板が回転することで磁場が乱れ、誘導電流が発生することで回転円板が加熱される仕組みとなっている。磁石の磁場を乱すことで、回転に要するトルクが大きくなることが予想される。図 2 は、軸トルクの時間発展を示している。円板の回転開始とともにトルクの値が上昇している。また、回転数が大きいほど、温度の値は大きくなる。これは、円板の回転によって磁場が乱れローレンツ力による抵抗が増大するためと考えられる。

3. 研究目標の達成状況

電磁誘導加熱を用いて膜状揚水流に熱を加え、粘度を大きくすることを目的としている。昨年度の結果から、円板の表面温度は円板の回転数が 2000rpm 程度以上になれば 100℃に達することが明らかとなっている。一方で、回転に必要な消費動力が電磁力の影響で大きくなることが明らかとなった。研究目標に至る途中段階としては、十分に途中目標を達成している。

4. まとめと今後の課題

本研究で取り扱う回転円すいを活用した液の揚水機構は、シンプルな構造の液糸生成装置として期待できる。基礎的な研究目標はある程度達成できたと考えられる。今後は、実際に繊維を製布する応用面に進める必要がある。

5. 研究成果

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] K. Takahashi, T. Adachi, K. Akinaga, T. Akinaga, J. Okajima, A. Komiya: Development of Spinning Device Using Filmwise Pumping-up Mechanism with Induction Heating and Rotating Cone, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-74, p. 128.

- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20I056
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	3年目

極超音速機周りで生じる高エンタルピー流れの特性解明
Characteristics of High Enthalpy Flows around a Hypersonic Vehicle

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

惑星探査カプセルが大気突入飛行する際には、前方に強い離脱衝撃波が生じて空力加熱が問題となる。空力加熱から探査機を守るためには熱防御システムが必要となり、適切な厚みと形状を設計開発するためには、空力加熱率を高精度に予測できることが求められる。そこで本研究では、大気突入飛翔体の空力加熱率の高精度予測を目的として大気突入飛翔体周り流れの特性を解明することを目的とする。従来の研究においては、衝撃波管による衝撃波背後の気流特性解明及び膨張波管による飛翔体周り流れの特性解明がなされてきた。しかしながら、いずれの試験も実際の大気突入飛行環境を完全に再現したものではない。そこで本研究において、より実際の飛行に近い飛行環境を弾道飛行装置により再現して、大気突入飛翔体周り流れの特性解明に取り組む。

2. 研究成果の内容

本研究では、大気突入飛行環境を模擬して、弾道飛行装置を用いた自由飛行試験を実施した。弾道飛行装置を2段式軽ガス銃モードとして使用して、図1に示す段付き円柱模型をプロジェクタイルとして用いて約秒速4.1kmで射出して実験を行った。図2に計測システムの概要図を示す。試験気体のアルゴンを充填したガスチャンバ内を試験室内に設置して、プロジェクタイルがガスチャンバ内を通過する際の衝撃層からの発光の分光計測計測とシャドウグラフ計測を行った。図3にシャドウグラフの結果を示す。左上の画像から、模型前方領域に、先行する斜め衝撃波が確認できる。一方で、模型周りに離脱衝撃波の形成が予想されたが、本画像からは確認することができない。図4に波長763nmのアルゴン原子線の時間分解発光強度を示す。これより、30 μs付近から発光強度が急激に上昇して、70 μs付近で最大値となることが分かる。これは円柱模型周りで生成される衝撃波の強い圧縮加熱によりアルゴン原子が励起されて発光するためである。しかしながら、シャドウグラフの結果から、模型がガスチャンバ内を通過する時間は、20 μs程度であるのに対して、発光の持続時間が100 μs程度と長いことが分かる。この原因については現時点では不明であるため、今後の研究で明らかにする必要がある。

またアルゴンの熱化学反応過程を考慮してプロジェクタイル周り流れのCFD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ークス方程式を用い、化学種としては、アルゴン原子、アルゴン原子、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た。図5にプロジェクタ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、並進温度は淀み点付近の衝撃層内の広い領域で20000K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、衝撃波面で 5000 程度まで上昇して、淀み点に向かって 10000K 程度まで上昇する。これより淀み点付近では、並進温度と電子温度が大きく異なる熱的熱的非平衡状態にあることが分かる。また電子温度に関しては、淀み点に限らずプロジェクトイル表面で高くなっていることが確認できる。図 6 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トイル表面付近で電離が進んでいるものの、電子のモル分率は 10^{-3} 程度であり、本条件においては電離度が小さいことが分かる。



図 1 : プロジェクトイル

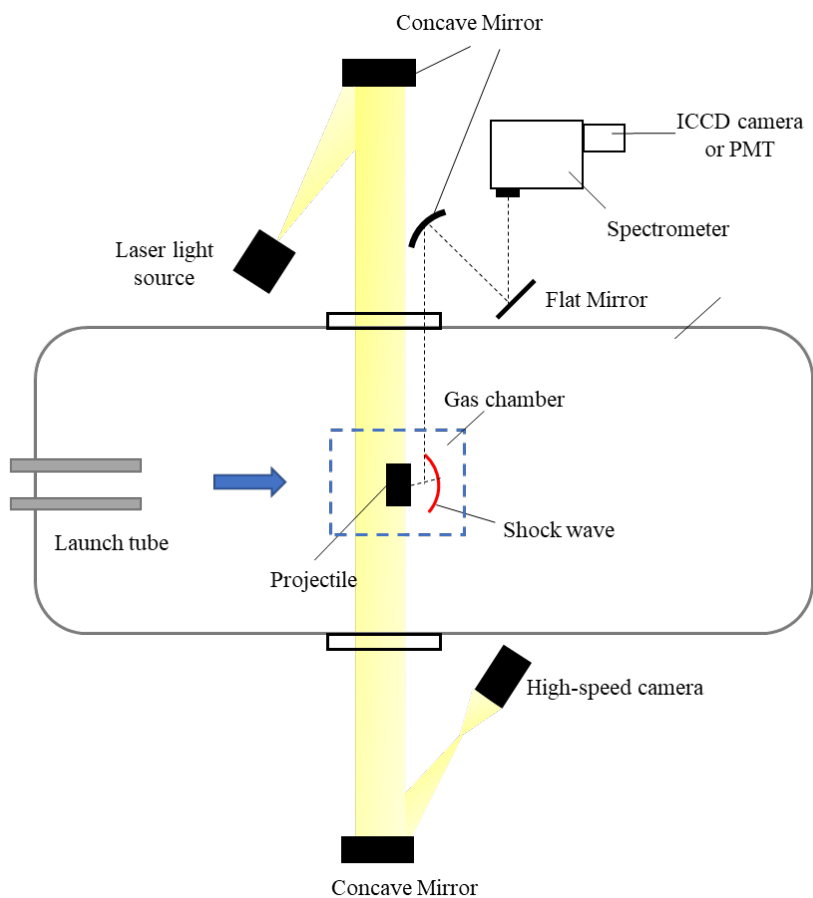


図 2 : 計測システムの概要図

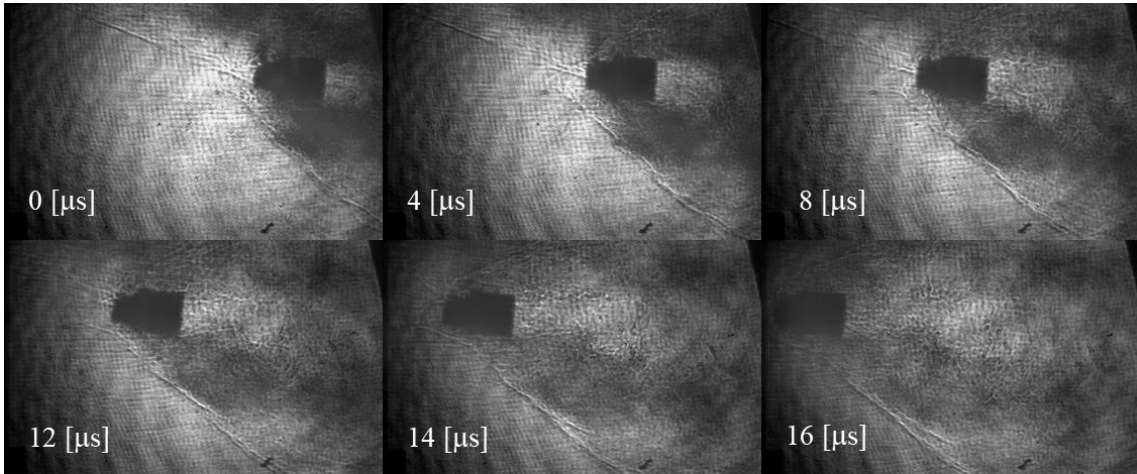


図3：自由飛行する円柱模型のシャドウグラフ画像

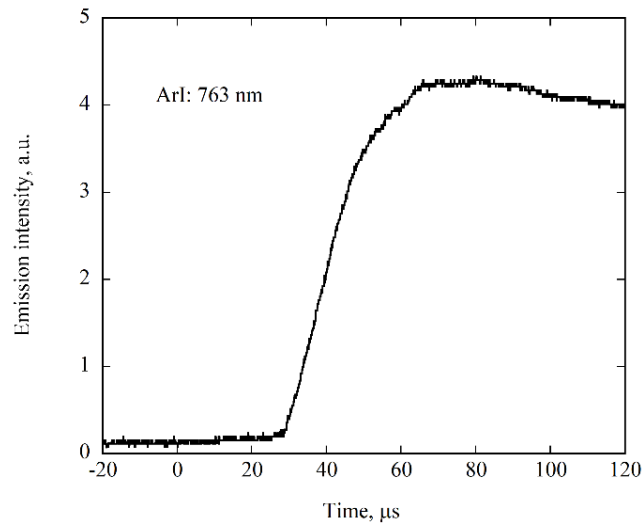


図4：波長 763nm におけるアルゴン原子線の発光強度の時間分布特性

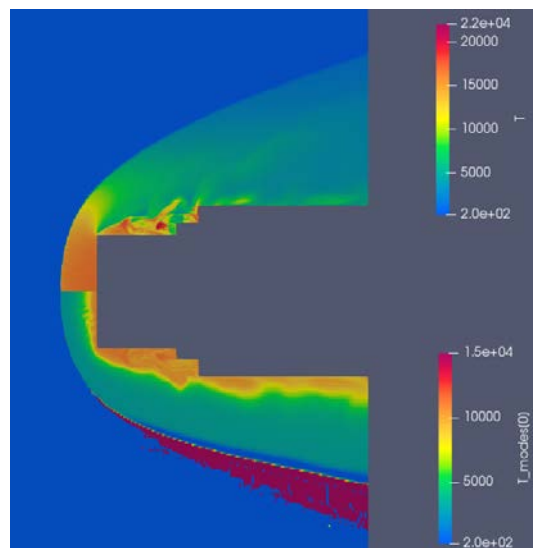


図5：プロジェクトイル周りの温度分布（上側：並進温度、下側：電子温度）

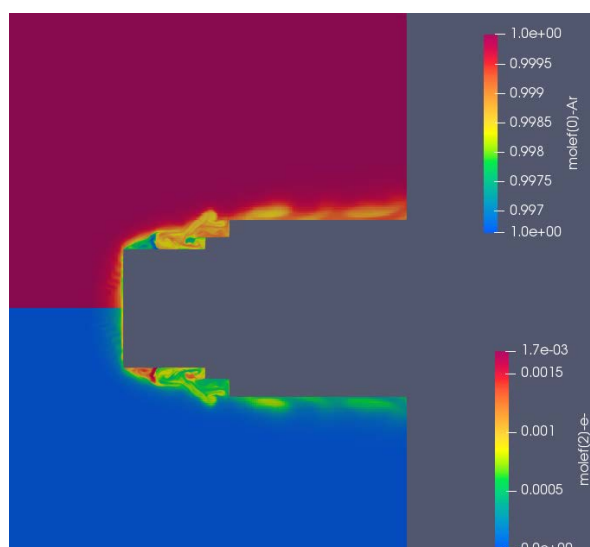


図6：モル分率分布（上側：アルゴン原子、下側：電子）

3. 研究目標の達成状況

極超音速で自由飛行する円柱模型周り流れの発光分光計測を実施することで、衝撃波により圧縮されたアルゴン原子からの発光スペクトルを取得することができた。また同時にシャドウグラフ計測を実施して模型周り流れの可視化計測を実施した。これより、模型前方領域で、先行する斜め衝撃波が観測され、またアルゴン原子の発光の持続時間が予想されるよりも長くなっており、衝撃波管や膨張波管を用いて実施する結果と異なる現象が明らかになった。今後、これらの現象が試験装置自体に起因するものなのかの検証が必要であるが、数値解析との比較を行うことにより実際の飛行条件で生じる流れの特性の解明に繋がるものと考えられる。また本研究により極超音速で自由飛行する飛翔体模型周りの衝撃層からの発光の分光計測システムを確立することができた。

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流れの発光分光計測とシャドウグラフ法による可視化を実施した。これより模型前方領域で先行する斜め衝撃波が観測された。また分光計測から、衝撃波による圧縮加熱により励起されたアルゴン原子からの発光現象を取得することに成功した。今後は、流れ場の数値解析とともに、分光計測システムをさらに改善して、流れ場の熱化学構造を明らかにしていく。

5. 研究成果

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] G. Yamada, S. Takahashi, and K. Ohtani: Ballistic Range Experiment of a Hypersonic Free Flight Cylinder in Argon, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-23, pp. 36-37.

- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J20I057
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	3rd year

Numerical Study on Gas Lubrication System Using Micro/Nanoscale Dimples

Shigeru Yonemura*†, Yevgeniy Bondar**††,
Pavel Vashchenkov**, Alexander Shevyrin**, Georgy Shoev**
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Surface texturing has been studied for improvement in tribological performance of sliding surfaces. Recently, the applicant clarified the mechanism of high gas pressure generation induced by a textured surface in micro/nanoscale, and revealed that thanks to high gas pressure generation, sliding surfaces are separated, and therefore, the friction coefficient is drastically reduced. Up to now, we mainly investigated high pressure generation due to one dimple surrounded by periodic boundaries. Namely, it was assumed that the dimples were repeated periodically. But, considering the practical use of surface dimples for lubrication, the collective function of a group of dimples for pressure generation of gas to the atmospheric air are important. We investigate those in the present study by 3D DSMC simulations.

2. Details of program implement

The boundary condition for DSMC simulation is to give the condition of incoming molecules to the computational domain, i.e., the sliding region, through the boundary, i.e., the edge of the sliding region, such as the number and the velocities of incoming molecules. However, the molecules which constitute the flow at the boundary is composed of two kinds of molecules; one is a group of molecules which enter the computational domain, and the other is a group of molecules which come out of the computational domain. In the case of supersonic flow, the latter group can be neglected. But, in the case of slow gas flow considered here, the influence of the latter group of molecules is significant. Even if the boundary condition for incoming molecules to the computational domain is set based on a considered flow condition at the boundary, molecules coming out of the computational domain will make the flow condition at the boundary different from the considered condition.

To avoid this problem, in our DSMC simulations from previous years, we considered not only the sliding region between two sliding surfaces but also “buffer” regions outside the inlet, outlet and side of the sliding region, which was connected to stationary ambient atmospheric air. But, there is a trade-off in determining the size of the buffer regions: a larger buffer region is more preferable to reproduce the number and the velocities of incoming molecules to the slider region but requires huge computational load. Therefore, this year, we implemented “implicit boundary condition”, in which the boundary condition which gives the number and the velocities of incoming molecules is updated considering the condition of the resultant molecular gas flow inside the computational domain.

The operation of the implemented technique was tested in the current sliding problem shown in Fig. 1. Here, the lower flat plate is moving in the direction of the

yellow arrow at a speed of 10m/s. On the other hand, the upper surface is stationary and has 4 dimples which have a length of $10\mu\text{m}$, a width of $1\mu\text{m}$ and a depth of $0.9\mu\text{m}$ and are arranged at equal interval of $10\mu\text{m}$ along the sliding direction. The minimum clearance between the two surfaces is $0.1\mu\text{m}$. The computational domain is bounded by the two symmetry planes in the horizontal direction normal to the sliding direction. Due to these symmetry planes, the obtained computational result is the same as the one for the case when this 4 dimples pattern is repeated in the traverse direction.

Two computations were carried out. The first one is that of our former method and the buffer region was considered. The second one is that of our “implicit boundary condition” and the buffer region was not considered. Figure 2 shows the pressure distributions along the centerline of the dimples for the two computations.

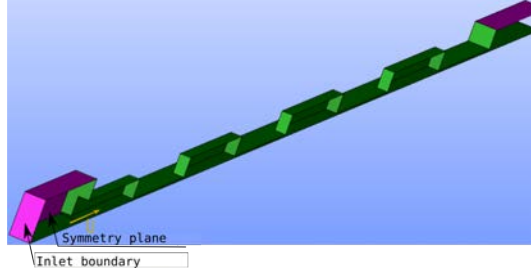


Fig. 1 Schematic of the sliding problem

The result (blue line) for low-cost method using the “implicit boundary condition” shows good agreement with the result (red line) for our previous high-cost method in the latter half of the sliding region. But the pressure at the inlet resulted in a bit lower than the intended setting value of 1 and hence the pressure distribution in the first half became a bit lower than our previous high-cost method.

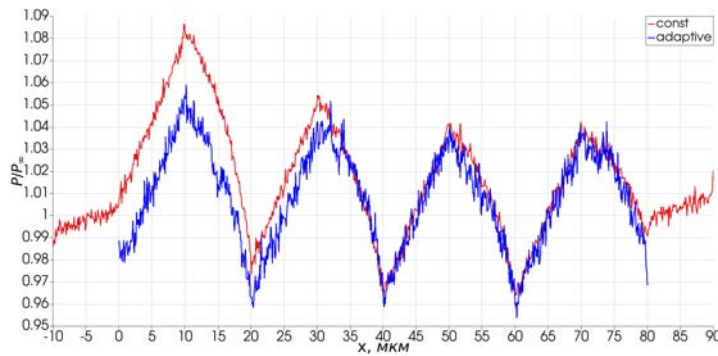


Figure 2: Pressure distribution in the microchannel

3. Summaries and future plans

We successfully implemented the “implicit boundary condition”. Thanks to the low cost of this method, we can investigate the gas lubrication much more efficiently from now. But, the value obtained at the boundary is a bit lower than the intended setting value. Further work is required to improve the new method implemented here.

4. Research results

1) Journal

Not applicable.

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

*[1] Pavel_Vashchenkov, Yevgeniy_Bondar and Shigeru Yonemura: Numerical Investigation of Pressure Distribution in a Microchannel by the DSMC Method, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-95, pp. 165-166.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J20I059
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	2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*, 宮内 優**, 村田 滋*, 田中 満*, 早瀬 敏幸**
*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、流体から受ける慣性力により、流れと直交する方向へマイグレーションする。この現象の利用により、微小流路を用いた細胞の分離や濾過技術への応用が期待されることから、近年盛んに研究が行われている。懸濁液の巨視的な流動特性は、溶媒の粘度のみならず、懸濁粒子の挙動によって変化するが、その全容は明らかではない。本研究では、剛体球懸濁液流れの微細構造および巨視的なレオロジーの評価方法を検討することを目的とする。

2. 研究成果の内容

本プロジェクトでこれまでに用いてきた、著者らによる自作の円形断面を有する微小流路は、作製が簡便である一方、幾何学的な精度に検討の余地がある。また、懸濁粒子の中立浮遊精度は粒子の分布に大きな影響を与える可能性が考えられる。本報告では、中立浮遊条件の達成度および流路の幾何学的精度の影響を検討した。レイノルズ数が一定（レイノルズ数 $Re = 0.25$, 粒子レイノルズ数 $Re_p = 5.78 \times 10^{-4}$ ）の条件で、異なる流路を5本用いて計測した。半径方向に一様であると期待される粒子分布の計測結果は、流路によって異なった（図1）。計測画像内の500秒間の平均粒子個数と標準偏差（図2）を調べると、半径方向に非一様な分布が得られた流路では、標準偏差が大きくなる可能性が示唆された。粒子個数の増減は、粒子と溶媒の密度差による粒子の浮遊・沈降のほか、鉛直方向の流路の勾配に起因すると考えられる。そのため、計測粒子個数の標準偏差は、計測したデータの精度を判断するための指標となり得ることが示唆された。しかしながら、channel 3と同程度に半径方向分布が非一様であった channel 4の標準偏差は今回計測した中では比較的小さいことから、今後より詳細に検討する必要がある。

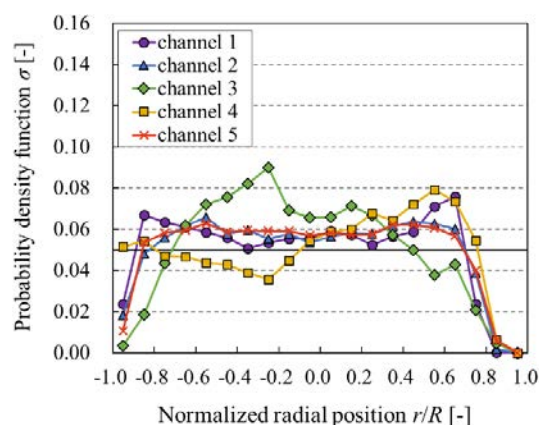


図1：懸濁粒子の半径方向分布
(黒の実線は一様分散状態を表す.)

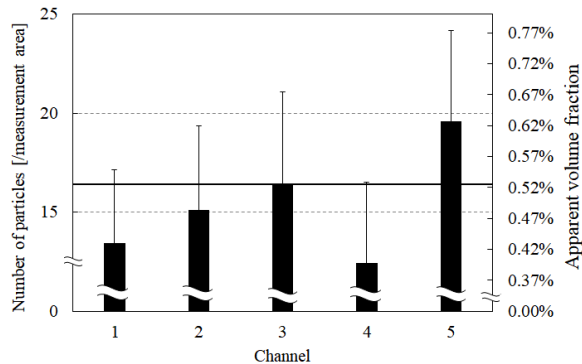


図2：500秒間の粒子個数の平均値と標準偏差
(黒の実線は一様分散状態を仮定したときの粒子個数を表す.)

3. 研究目標の達成状況

実験的アプローチによる計測精度の信頼性に対する評価について検討し、半径方向の懸濁粒子の分布を計測することにより、懸濁液流れの微細構造の評価を試みた。このような解析結果を、巨視的なレオロジー評価に展開するための課題は依然として残っている。

4. まとめと今後の課題

本報告では、計測粒子個数の時間履歴に着目し、中立浮遊条件の達成度および流路の幾何学的精度が懸濁粒子の半径方向分布の計測精度に及ぼす影響について検討した。懸濁粒子の中立浮遊精度の影響が比較的抑えられる計測条件（高レイノルズ数条件など）や、流路による幾何学的精度のばらつきを考慮し、複数の流路を用いた計測を行うことで、本解析手法による微小流路内懸濁液流れの微細構造評価を検討した。今後は、さらに詳細な検討を行った後、慣性集約現象の再現および流路内を懸濁液が流れるときの実効粘度評価を行う。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[1] M. Kawaguchi, T. Fukui, K. Funamoto, M. Tanaka, M. Tanaka, S. Murata, S. Miyauchi, and T. Hayase: Experimental Study on the Radial Particle Distributions of Neutrally Buoyant Spheres in a Dilute Suspension Flow through a Circular Microchannel, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Online, (2020), CRF-96, pp. 167-168.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J20I062
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Unsteady Aerodynamics of Axially Oriented Low Fineness Ratio Cylinders

Colin P. Britcher*†, Shigeru Obayashi**††
Keisuke Asai***, Taku Nonomura ***

*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Old Dominion University

Institute of Fluid Science, *Faculty of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Exploration of steady and unsteady aerodynamics of low fineness ratio axially-oriented circular cylinders using CFD and wind tunnel testing.

2. Details of program implementation

Due to COVID-19, access to the NASA/ODU 6-inch MSBS was not possible during nearly all of the reporting period. Access to the ODU low-speed wind tunnel was also restricted until late Fall 2020. Therefore, the main emphasis has been CFD analysis, coupled with verification in the ODU low-speed wind tunnel. This work is the focus of this report. Laboratory activity is currently restarting at NASA and being expanded at ODU so experimental work will be re-emphasized for the near future.

A computational campaign was performed using the Software Cradle (now Ansys) package SCFlow on the Old Dominion University high performance computing (HPC) Turing cluster. A graduate student, Forrest Miller, carried out the work. SCFlow is a commercial CFD code based on the core polyhedral-mesh preprocessor with an intuitive user-interface, a robust solver, and a built-in post processor. A cylinder model with a diameter of 0.0445m (1.75inches) was used as the computational model so as to match the size of the NASA LaRC MSBS models rather than the 6in diameter used in the ODU low-speed tunnel. Computations were performed with a solid boundary representing the actual NASA/ODU 6-inch MSBS test section and with a far-field boundary, in order to permit subsequent assessment of boundary interference corrections. RANS computations are unable to capture accurate forces in this case owing to the highly unsteady flowfields characteristic of these cylinder geometries, so LES calculations were also performed, although computationally expensive.

Wind tunnel tests were performed at the ODU subsonic wind tunnel in order to take advantage of PIV measurement capabilities and to permit direct force and moment measurements with a six-component internal balance (ATI Mini-40). The test matrix for the tunnel runs included angles-of-attack from -10° to $+10^\circ$ in 5° increments, then 35° to 55° and 80° to 90° likewise. Limited base pressure data was also recorded. Flow velocities ranged from 5 to 30 m/s for force and moment measurements, with 15 and 30 m/s chosen for PIV measurements. Figure 1 shows the model in the wind tunnel test section.

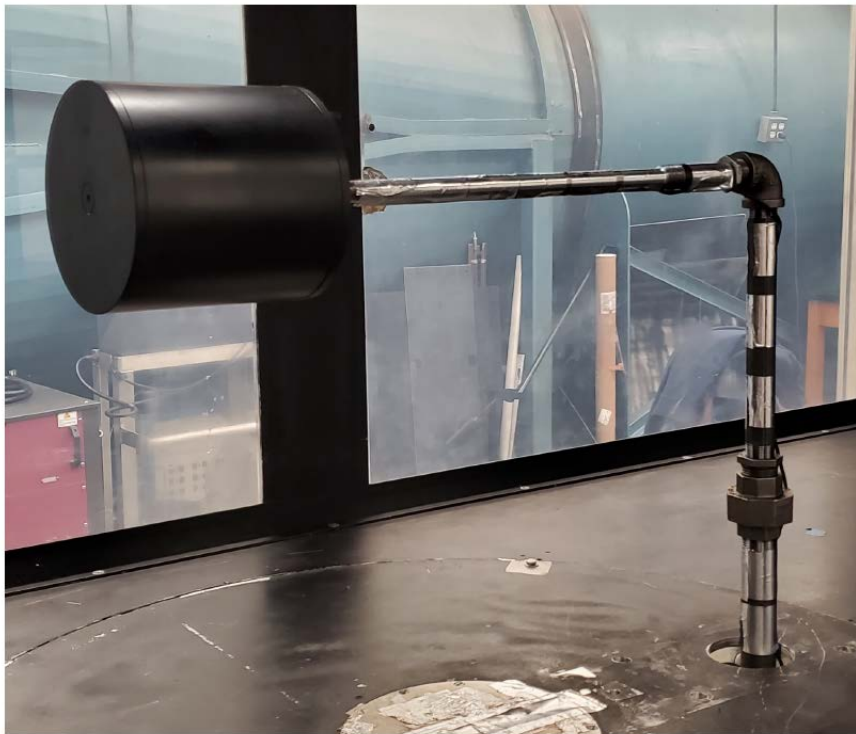


Figure 1 – 6 inch dia. 1:1 L/D cylinder model in the ODU low-speed wind tunnel

3. Achievements

Drag and lift coefficients from CFD and experimental tests are shown in the Figures below. Agreement between experiment and RANS calculations is not very good, with RANS consistently underpredicting drag forces. Although only limited runs have been completed so far owing to the computational cost, agreement between LES and experiment is fair, aside from drag at 90° angle-of-attack.

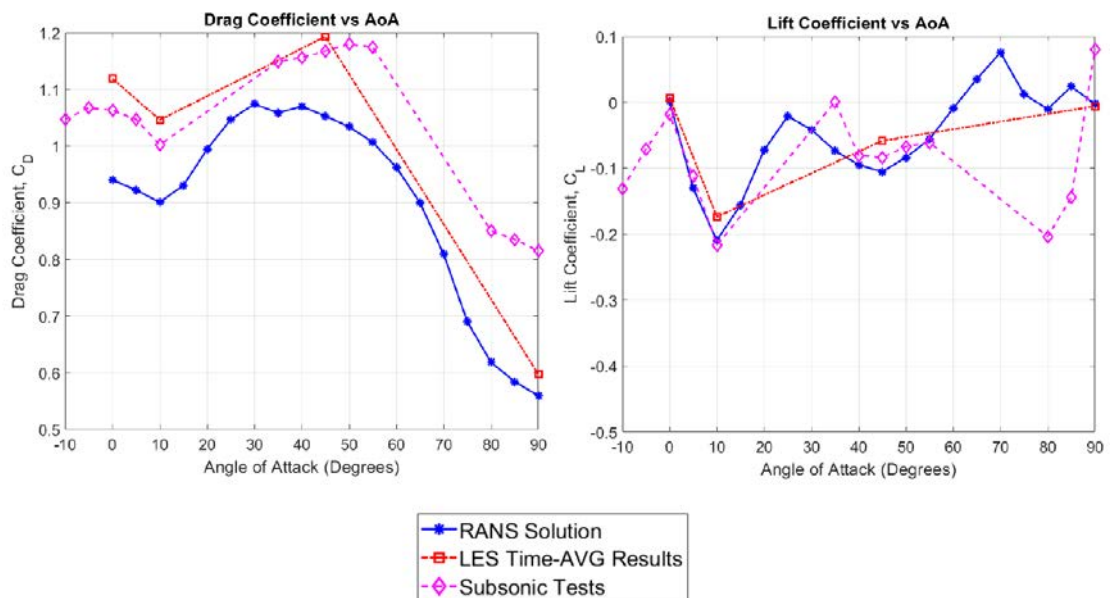


Figure 2 – CFD and Experimental Drag and Lift Coefficients Compared

PIV results focus on the separated shear layer and again confirm that LES

calculations agree more closely with experiment than RANS, where shear layer reattachment points are consistently predicted too early.

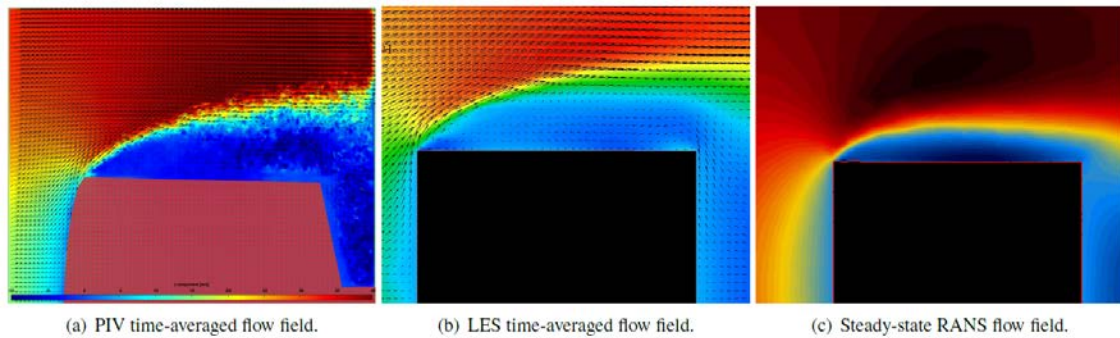


Figure 3 – Comparison of PIV and computational identification of the shear layer
(0 degree angle-of-attack : cylinder axis aligned with flow)

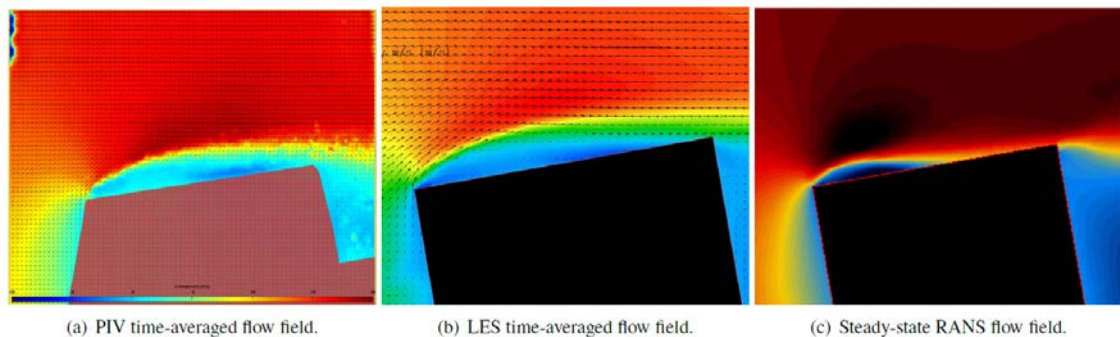


Figure 4 – Comparison of PIV and computational identification of the shear layer
(-10 degree angle-of-attack)

4. Summaries and future plans

The extensive results obtained from the wind tunnel campaign are not yet fully analyzed. It is intended to study the following aspects:

- a. Wind tunnel boundary corrections based on computational results. This will shed light on the accuracy of the Maskell method for this geometry,
- b. CFD analysis (LES) with an enforced pitch rate. This will provide an ability to compare to the existing MSBS results where tumbling (self-generated and self-sustaining continuous pitching motion) has been observed.
- c. Comparison of experimental and CFD results with MSBS tests conducted by IFS and Tohoku researchers. This will include drag and lift/drag at small angles of attack, as well as unsteady characteristics of the near wake.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
[1] F. Miller, C. P. Britcher : Studies of Unsteady Aerodynamics of Axially Oriented Low Fineness Ratio Cylinders. *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), virtually, OS6-2, pp. 236-237.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J20I063
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	3年目

II 型膜貫通タンパク質の細胞内局在化におけるシグナルアンカー領域の役割 The Role of Signal-Anchor Region of Type II Transmembrane Protein in Subcellular Localization

向井 有理*†, 亀卦川 樹*,

越中谷 賢治**, 太田 信***††

*明治大学大学院理工学研究科電気工学専攻

**青山学院大学工学部化学・生命科学科

***東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

細胞内で生合成されたタンパク質は適切な細胞内小器官に局在化されその機能を発揮する。またほとんどのタンパク質は、細胞内の最終的な局在場所へ直接向かうのではなく、多くの細胞内小器官を経由する。これは、各小器官において翻訳後修飾関連酵素から適切な分子修飾を受けるためである。したがって、タンパク質の最終局在位置のみならず局在化経路を明らかにすることが、タンパク質機能発現のメカニズムを考えるうえで重要となる。

各々のタンパク質の細胞内局在性（最終局在位置および局在化経路）は、局在化シグナルとしてアミノ酸配列の一部により決定されていることが知られている。II 型膜貫通型タンパク質の膜貫通領域『シグナルアンカー』は小胞体局在化シグナルとしても働くことが明らかにされている。II 型膜タンパク質は最もシンプルな構造をした膜タンパク質でありながら、タンパク質の翻訳後修飾など重要な生化学反応に関わる酵素が多く、細胞内の正しい位置に送達されることが細胞の恒常性維持に必須である。したがって、II 型膜タンパク質の細胞内局在性のメカニズムを明らかにすることにより、真核細胞内のシステムティックな翻訳後修飾の仕組みにも直結する。

本研究では、II 型膜貫通型タンパク質のシグナルアンカー配列のバイオフィオマティクス解析や、異なるシグナルアンカー配列を導入した蛍光タンパク質を用いた細胞内局在化経路・局在化効率の評価を行い、膜タンパク質の細胞内局在化におけるシグナルアンカーの役割を明確にする。

2. 研究成果の内容

小胞体膜からゴルジ体膜や細胞膜へ輸送される II 型膜タンパク質のシグナルアンカー配列は、小胞体膜に留まるタンパク質のシグナルアンカー配列から 90%以上の精度で区別できていたが、シグナルアンカー周辺配列のアミノ酸出現傾向をスコア化することにより、小胞体膜・ゴルジ膜・細胞膜に局在化するタンパク質の膜貫通領域のアミノ酸配列を明確に判別できたことから、II 型膜タンパク質においてはシグナルアンカー周辺配列が細胞内局在性を決定している可能性を示してきた (Kikegawa *et al.*, *Biosci. Biotech. Biochem.*, 2018)。

次に、II 型膜タンパク質のシグナルアンカー周辺配列を GFP と融合させたタンパク質を遺伝子工学的に作製し、GFP 融合タンパク質が正しい細胞内局在性を有するかどうかという点

について、検証実験を行った。細胞内局在性の異なる9種のII型膜タンパク質のシグナルアンカー周辺配列を導入したGFP発現ベクターを用いてHeLa細胞のトランスフェクションを行い、GFP融合タンパク質の細胞内局在性を経時的に観察したところ、小胞体局在性を有するII型タンパク質のシグナルアンカー周辺配列と結合させたGFP融合タンパク質は小胞体局在性を示した。シスゴルジへの局在性を有するII型タンパク質のシグナルアンカー周辺配列と結合させたGFP融合タンパク質では、小胞体からCOP II小胞を經由してシスゴルジ領域への移行する様子が見られた。さらに、細胞膜への局在性を有するII型タンパク質のシグナルアンカー周辺配列と結合させたGFP融合タンパク質では、小胞体からCOP II小胞を經由してシスゴルジ、ミディアルゴルジ、トランスゴルジと經由し、最終的には細胞膜へ移行する様子が見られた。とくに、トランスゴルジと細胞膜に共局在する様子がみられ、トランスゴルジから細胞膜への移行は律速と考えられた。この段階では糖鎖修飾など、シグナルアンカー以外の他の局在化シグナルの存在や、分泌小胞における輸送時の仕分けメカニズムの存在など、さらなる検討が必要であることが確認できた。

3. 研究目標の達成状況

- ◆ 小胞体膜・ゴルジ膜・細胞膜に局在する膜タンパク質を中心としたII型膜タンパク質の細胞内局在性決定要因の段階的解明 (95%)

成果：科学研究費採択への発展

- 2018年4月～2023年3月 科学研究費補助金 基盤研究 (C), 「膜タンパク質の段階的な細胞内局在化機構の解明と細胞内局在化経路予測法の確立」, 研究代表者：池田 (向井) 有理, 研究分担者：越中谷賢治, 4,420 千円.
- 2019年4月～2023年3月 科学研究費補助金 若手研究, 「タンパク質の細胞内での動きに注目した糖鎖修飾糖種判別法の開発」, 研究代表者：越中谷賢治, 4,160 千円.

4. まとめと今後の課題

当該研究課題において、II型膜貫通タンパク質の細胞内局在化におけるシグナルアンカー領域の役割については、シグナルアンカーとその周辺のアミノ酸配列が分泌経路における最終局在位置ごとの仕分けのシグナルとなっていることを、理論計算と実験検証の両面から明らかにすることができた。今後は、シグナルアンカーによる細胞内局在性と他の局在化要因による局在制御との関係についても検討する必要がある。

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] Y. Mukai, T. Kikegawa, M. Ohta, K. Etchuya: The Role of Signal-anchor Region of Type II Transmembrane Protein in Subcellular Localization, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFT-2020)*, Sendai, (2020), CRF-9, p. 15.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J20I064
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Buoyant Magnetic Filaments

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

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

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The Sun consists of an electrically conducting fluid in motion. The immense scales mean that it is a high-Reynolds number flow, dominated by concentrated vortex filaments. Gravity is also present, and hence density differences lead to buoyancy effects. The dynamics of thin vortex filaments is a classical problem in fluid mechanics. The effects of magnetic field and buoyancy have been considered separately previously, but have not been combined to date. This is the goal of the present project.

2. Details of program implement

Because of the continuing COVID-19 pandemic, no physical visit to Sendai took place. The PI attended the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics virtually and presented a talk at the Conference.

3. Achievements

A new model integrating the buoyant vortex filament model of Chang and Llewellyn Smith (2018) and the current-vortex filament model of Yatsuyanagi (1996) was investigated. A numerical calculation using the new buoyant current filament model was carried out for circular thin rings, and the result was been reported oat the ICDF Conference in Sendai. However, careful investigation shows that this new buoyancy-current model can lead to the creation of bulk current at $O(1/\text{curvature})$. This has some similarities to the two-dimensional calculation of Llewellyn Smith and Hattori (2019). This issue limits the utility of the model in the case of general vortex filaments. This work is consistent with the expected results of the application filament, although it shows that the applicability of the model is limited.

4. Summaries and future plans

We are delaying the next application until 2022 to allow COVID-19 to subside. The results above and those of Llewellyn Smith and Hattori (2018) show the limitations of vortex-current sheet models. However, bulk calculations produce useful results for short times. One approach is to examine the validity of calculations compare to DNS results. Another is examine thin vortex patches as they approach building on work by Baker and Shelley (2018). The applicant is currently examining dipole sheets as the limit of thin patches, and combining these with current is an interesting extension.

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. Chang, S. G. Llewellyn Smith, Y. Hattori: Vortex-current Filaments with Buoyancy, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-82, pp. 141-142.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J20I065
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	3rd year

Numerical Simulation of GaN-Based High-Electron-Mobility Transistors Fabricated by Neutral Beam Etching

Yiming Li*†, Seiji Samukawa**††

*Department of Electrical and Computer Engineering, National Chiao Tung University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

High-electron-mobility transistors (HEMTs) fabricated by the neutral beam etching are feasible for advanced communication technologies. Structural optimization of HEMTs produces diverse fascinating electrical and physical properties; by applying advanced transport models and numerical simulation techniques, in this project, based on the achieved results of the collaborative research projects in years 2015-2020, we explore the advanced characteristics of GaN-based HEMTs for high-speed and high-power devices.

2. Details of program implement

The AlInGaN/GaN HEMT used to validate the simulation results is shown in Fig. 1(a). The details of adopted device parameters are listed in Table 1. The calibrated parameters of the physical models are used to study the electrical characteristic of the single barrier Al_{0.36}In_{0.08}Ga_{0.56}N/GaN HEMT (Sample I), and the proposed double barrier Al_{0.72}In_{0.16}Ga_{0.12}N/Al_{0.18}In_{0.04}Ga_{0.78}N/GaN HEMT with a 9-nm-thick recess gate (Sample II) which are shown in Figs. 1(b) and (c), respectively.

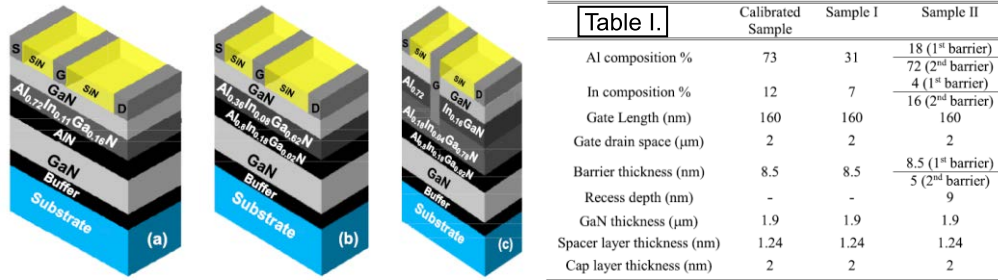


Figure 1 : (a) Schematic plots of (a) calibrated AlInGaN/AlN/GaN, (b) the single barrier HEMT (Sample I), and (c) the double barrier HEMT (Sample II).

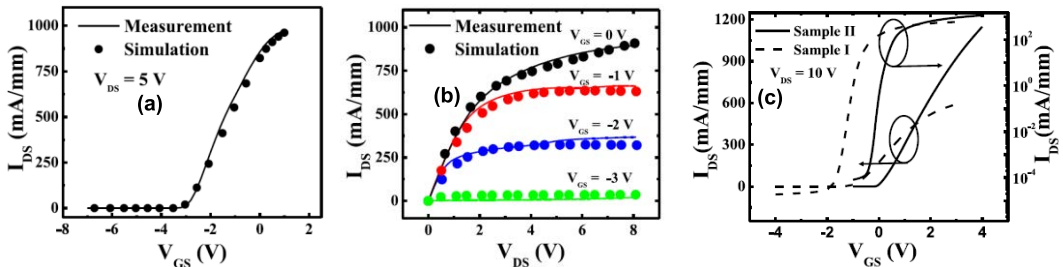


Figure 2 : Plots of the measured and simulated (a) transfer characteristics at $V_{DS} = 5$ V. (b) Output characteristics of the calibrated structure. (c) $I_{DS} - V_{GS}$ at $V_{DS} = 10$ V.

Fig. 2(a) shows the simulated and measured transfer characteristics at $V_{DS} = 5$ V of the AlInGaN/GaN HEMT. The transport and physical models properly account for the physical phenomena of device. Fig. 2(b) is the output characteristics with respect to different gate voltages. The simulated I_{DS} of the proposed double barrier AlInGaN / GaN HEMT is shown in Fig. 2(c). The results shows that the simulated $I_{DS,max}$ of Sample II were 1149 mA/mm (at $V_{DS} = 10$ V and $V_{GS} = 4$ V), which was 94% larger than that of Sample I with a shift of V_{th} from -1.2 V to 0.2 V. The I_{on}/I_{off} ratios of both devices are in the order of 10^7 which is remarkable for GaN-based HEMTs.

3. Achievements

The recess gate and double barrier of the proposed device can achieve a maximum drain current density of 1149 mA/mm and a maximum transconductance of 358 mS/mm. The maximum drain current density in the double barrier HEMT at high gate bias condition is due to injection of electrons from upper 2DEG. The outcome of this study suggests that the proposed device will be beneficial for high-frequency and high-power electronic applications.

4. Summaries and future plans

In this project, we have proposed and analyzed a novel lattice matched double barrier $Al_{0.72}In_{0.16}Ga_{0.12}N/Al_{0.18}In_{0.04}Ga_{0.78}N/GaN$ normally-off HEMT by solving a set of thermodynamic transport equations. These results are very new and useful for advanced communication systems and electric vehicle technologies. We will continue the collaboration with IFS of Tohoku University.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - [1] D. Ohori, T. Fujii, S. Noda, W. Mizubayashi, K. Endo, Y.-J. Lee, J.-H. Tarng, Y. Li, and S. Samukawa: High Electron Mobility Germanium FinFET Fabricated by Atomic Layer Defect-Free and Roughness-Free Etching, *IEEE Open Journal of Nanotechnology*, Vol. 2, (2021), pp. 26-30, doi: 10.1109/OJNANO.2021.3055150.
 - [2] S. Takeuchi, D. Ohori, M. Sota, T. Ishida, Y. Li, J.-H. Tarng, K. Endo, and S. Samukawa: Surface wettability of silicon nanopillar array structures fabricated by biotemplate ultimate top-down processes, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol. 39, (2021), 023202 (9pp), doi: 10.1116/6.0000770.
 - [3] M.-H. Chuang, D. Ohori, Y. Li, K.-R. Chou, and S. Samukawa: Fabrication and simulation of neutral-beam-etched silicon nanopillars, *Vacuum*, Vol. 181, (2020), 109577 (5pp), doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109577.
 - [4] N. M. Shrestha, Y. Li, C.-H. Chen, I. Sanyal, J.-H. Tarng, J.-I. Chyi, and S. Samukawa: Design and Simulation of High Performance Lattice Matched Double Barrier Normally Off AlInGaN/GaN HEMTs, *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, Vol. 8, (2020), pp. 873-878, doi: 10.1109/JEDS.2020.3014252.
 - [5] N. Thoti, Y. Li, S. R. Kola, and S. Samukawa: Optimal Inter-Gate Separation and Overlapped Source of Multi-Channel Line Tunnel FETs, *IEEE Open Journal of Nanotechnology*, Vol. 2, (2020), pp. 38-46, 10.1109/OJNANO.2020.2998939.
 - [6] M.-Y. Lee, Y. Li, M.-H. Chuang, D. Ohori, and S. Samukawa: Numerical Simulation of Thermal Conductivity of SiNW-SiGe_{0.3} Composite for Thermoelectric Applications, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 67, (2020), pp. 2088-2092, doi: 10.1109/TED.2020.2975079.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [7] T.-Z. Hong, W.-H. Chang, A. Agarwal, Y.-T. Huang, C.-Y. Yang, T.-Y. Chu, H.-Y. Chao, Y. Chuang, S.-T. Chung, J.-H. Lin, S.-M. Luo, C.-J. Tsai, M.-J. Li, X.-R. Yu, N.-C.

- Lin, T.-C. Cho, P.-J. Sung, C.-J. Su, G.-L. Luo, F.-K. Hsueh, K.-L. Lin, H. Ishii, T. Irisawa, T. Maeda, C.-T. Wu, W. C.-Y. Ma, D.-D. Lu, K.-H. Kao, Y.-J. Lee, H. J.-H. Chen, C.-L. Lin, R. W. Chuang, K.-P. Huang, S. Samukawa, Y. Li, J.-H. Tarng, T.-S. Chao, M. Miura, G.-W. Huang, W.-F. Wu, J.-Y. Li, J.-M. Shieh, Y.-H. Wang, and W.-K. Yeh: First Demonstration of heterogenous Complementary FETs utilizing Low-Temperature (200 °C) Hetero-Layers Bonding Technique (LT-HBT), *Tech. Dig. IEEE IEDM*, (2020), pp. 319-322.
- [8] N. Thoti, Y. Li, S. R. Kola, and S. Samukawa: High-Performance Metal-Ferroelectric-Semiconductor Nanosheet Line Tunneling Field Effect Transistors with Strained SiGe, *Proc. IEEE Int'l Conf. Simulation of Semiconductor Processes and Devices*, (2020), pp. 375-378.
- *[9] Yiming Li, Min-Hui Chuang, Niraj Man Shrestha, Daisuke Ohori, and Seiji Samukawa: Electrical Characteristics of Double Barrier AlInGaN/GaN HEMTs, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-66, pp. 117-118.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J20I068
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st 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 km² 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

The particle motion of the noise before the direct P-wave is random as shown in Fig. 1. For direct P-waves, particle motion is linear. The feature of direct S-wave particle motion is that all point links appear nearly flat. In coda part, the particles motion shows random again.

We need to detect the particle motion characteristics of S-wave, which is flat shape. We apply the spectral matrix (SPM) analysis to characterize the 3D particle motion in time and frequency domain, so as to extract the arrival of S-wave more accurately. The following equation (1) is the SPM representation of the complex function of time and frequency.

$$S_p(t, f) = \begin{pmatrix} S_{xx}(t, f) & S_{xy}(t, f) & S_{xz}(t, f) \\ S_{yx}(t, f) & S_{yy}(t, f) & S_{yz}(t, f) \\ S_{zx}(t, f) & S_{zy}(t, f) & S_{zz}(t, f) \end{pmatrix} \quad (1)$$

where $S_{ii}(t, f)$ ($i = x, y, z$) are the power spectra; $S_{ij}(t, f)$ ($i, j = x, y, z; i \neq j$) are the cross-spectra calculated using short-time Fourier transform (STFT) on each moving time window.

We introduce the eigen decomposition of the spectral matrix to characterize the 3D particle motion and evaluate the arrival features of P-wave and S-wave, as following

equation (2).

$$S_p(t, f) = (V_1 \ V_2 \ V_3) \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \cdot V^T \quad (2)$$

where $\lambda_i(t, f)$ ($i = 1, 2, 3$) are the eigenvalues for SPM; $V_k(t, f)$ ($k = 1, 2, 3$) are the eigenvectors for SPM.

3. Achievements

We have developed the signal processing method to detect the characteristics of particle motion behavior of direct S-wave arrival, which is the planarly shape and perpendicular relation to the direction of P-wave polarization. The introduction of the 3D particle motion and detection of flat shape particle motion can better measure the direct S-wave of low signal-to-noise ratio events.

4. Summaries and future plans

Compared with the traditional methods mentioned above, 3D particle motion is very useful to help us extract P-waves and S-waves which might be hidden in noise. In addition, SPM contains features of polarization of waves, apply SPM to 3D particle motion enhance the sensitivity to low SNR wave, and do not need to depend on source type. Now our work is to introduce the function to evaluate the planarity of the 3D particle motion and apply it to synthetic and real microseismic data set.

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. Jingyi, Y. Mukuhira, and N. Nakata: Detection of S-wave Arrival of Low SNR Event using Polarization, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-69, p. 121.
- 3) Patent, award, press release etc.
(Patent) Not applicable.
(Award) Not applicable.
(Press release) Not applicable.

課題番号	J20I069
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	2020.4～2021.3
継続年数	3年目

イオン液体静電噴霧による二酸化炭素吸収促進に関する数値モデルの構築
Development of Numerical Modeling on Enhancement of CO₂ Absorption by
Ionic Liquid Electropray

高奈 秀匡*†, 藤野 貴康**††

*東北大学流体科学研究所, **筑波大学 システム情報系

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

イオン液体は不揮発性や難燃性などの性質を有し、また種々のガスを選択的に吸収可能である。近年、このイオン液体を二酸化炭素 (CO₂) の分離回収技術に応用するための研究開発が活発化している。イオン液体への CO₂ 吸収は気液界面の表面反応により生じることから、イオン液体をナノオーダーの微小液滴として噴霧することによって、液滴の比表面積効果による効率的な CO₂ 吸収が期待できる。申請者である東北大の高奈らの研究グループでは、微小イオン液滴の生成 (200 nm 程度) を可能とする静電噴霧を利用した新規な CO₂ 分離回収技術を提案し実験的研究を進めてきた。一方で、静電噴霧のために印加する電界の強さ (電圧) とイオン液滴径の定量的関係、またイオン液滴径と CO₂ の吸収速度の間の定量的関係に対する理解が不十分である。これらの関係性の理解ならびにそのモデリングは、静電噴霧方式のイオン液滴を利用した CO₂ 回収技術の実用化に大きく貢献するものと考えられる。

そこで、本研究では、液滴挙動解析に関して多くの実績を有する筑波大の藤野らの共同研究により、イオン液体静電噴霧による CO₂ 吸収過程に対する物理モデルを構築し、印加電圧に対する吸収特性を明らかにすることにより、本プロセスを最適化することを目的とする。

2. 研究成果の内容

前年度までに構築したイオン液体静電噴霧による CO₂ 吸収過程に対する物理モデルを用い、数値シミュレーションを行うことで本プロセスを最適化することに成功した。数値シミュレーションにより得られた最適条件の下で実証実験を行い、イオン液体静電噴霧による CO₂ 分離回収の促進効果を明らかにした。本実証実験においては、図 1 に示すように、純度 99.5 % の CO₂ で置換された容量 62.8 cm³ のアクリル製チャンバー内でイオン液体静電噴霧を行い、チャンバー内部の圧力および温度を計測することで、静電噴霧による CO₂ 吸収量を求めた。なお、イオン液体には 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate ([emim][Ac]) を用い、シリンジポンプにより供給した。

散乱光強度の変化から液滴径を算出するエアロゾルスpektロメータによる計測から、イオン液体供給量が大きく、印加電圧が高いほど静電噴霧による液滴の発生数が増加することが示された (図 2)。また、いずれの条件においても計測下限値である 260 nm において液滴発生数が最大となることから、噴霧液滴径は 260 nm 以下であることが明らかとなった。

イオン液体静電噴霧を 60 分間行った際の CO₂ 吸収量は、6.2 kV 印加時において無電場に対して約 60% 向上しており、イオン液体静電噴霧による顕著な CO₂ 吸収促進効果が示された (図 3)。

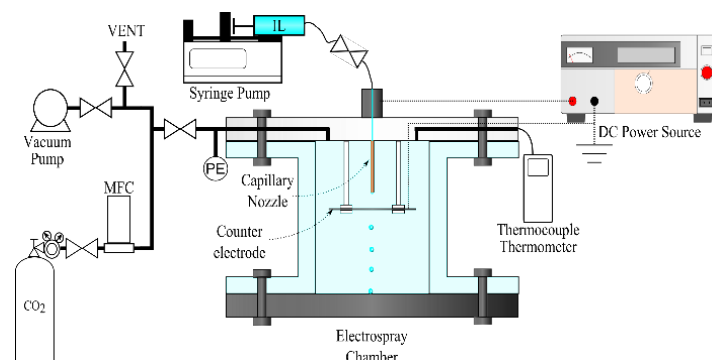


図1：イオン液体静電噴霧による二酸化炭素吸収量評価システム

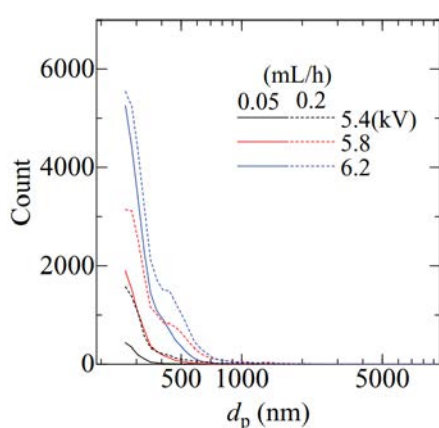


図2：静電噴霧による生成液滴径分布

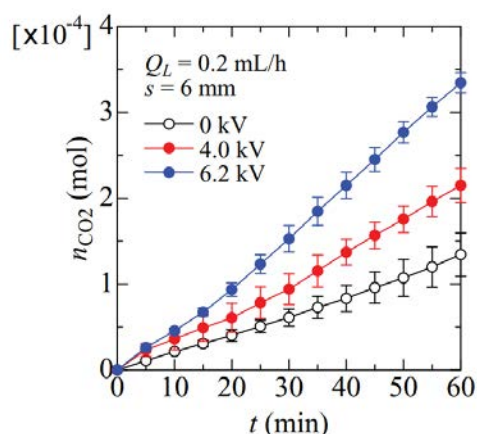


図3：二酸化炭素吸収量の経時変化

3. 研究目標の達成状況

本研究において提案されたイオン液体静電噴霧による二酸化炭素分離吸収の高性能化に対し、数値解析と実験解析の両面から統合的に現象を解明し、最適条件を見出すことに成功した。さらに、イオン液体静電噴霧により無電場の場合に対して CO_2 の吸収量が約 60% 向上するという顕著な向上効果が得られたことから、本研究目的は達成されたと言える。

4. まとめと今後の課題

今後は、マルチノズルの導入による、さらなる高効率化を目指し、実用化に向けた二酸化炭素分離吸収システムの構築を展開する。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] H. Takana, K. Yamamoto, T. Makino and M. Kanakubo: Improvement of CO_2 absorption by ionic liquid electro-spray, *EPL (Europhysics Letters)*, Vol. 131, No. 3, (2020), 34002, doi.org/10.1209/0295-5075/131/34002.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] H. Takana and T. Fujino, Development of Numerical Modeling on Enhancement of CO_2 Absorption by Ionic Liquid Electro-spray, *Proceedings of the 20th Int. Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-49, pp. 85-86.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J20I070
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Novel Experimental-Computational Research Framework for In-Depth Understanding of Cancer Mechanobiology

Ryo Torii*†, Kenichi Funamoto**††

*Department of Mechanical Engineering, University College London

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Mechanobiological interaction between cells and surrounding tissue is known to play an important role in the development of cancer tumour. Our aim is to develop a novel platform to investigate this mechanism in-depth, by integrating state-of-the-art experimental microfluidic model and computational modelling by the synergistic expertise existing in Tohoku University and University College London (UCL). Such a ‘virtual experimental environment’ will expedite hypothesis-testing research and allow reduction of cost as well as the use of animal in laboratory experiments.

2. Details of program implement

In this project, an integration of microfluidic experiments and computational modelling was attempted based on experimental expertise at Tohoku University Institute of Fluid Science (IFS) and computational modelling expertise at UCL.

2.1 Computational Model

The computational model is to predict the behavior of simple *in vitro* tumor model based on the existing cell-tissue interaction computational model of musculoskeletal tissue-engineered construct. This computational model is developed by combining finite element method (FEM) to handle macroscopic phenomena in the tissue such as its deformation and agent-based model (ABM) to incorporate the presence of cells and their response to the changes of mechanical and chemical environment in the tissue. Development of ABM part was conducted first in the project period.

2.2 Experimental Setup

Experimental set up existing at IFS, to monitor development of vascular networks in a hydrogel and transport of cancer cells in the network, was developed further. In this set-up, microfluidic channels are placed in a stage incubator for the development of tissue model that can be monitored with a spinning disk microscope with high spatial and temporal resolutions. The set-up also allows measurement of oxygen concentration and matrix metalloprotease (MMP) distributions in the hydrogel, which are crucial factors for the development of tissue models.

In the 1st year of project, each of those components was developed separately through interactive online discussion.

3. Achievements

Initial *in silico* (computational) and *in vitro* models of vessel network generation in a hydrogel culture in a microfluidic experimental set up have been established, which are shown in Figure 1.

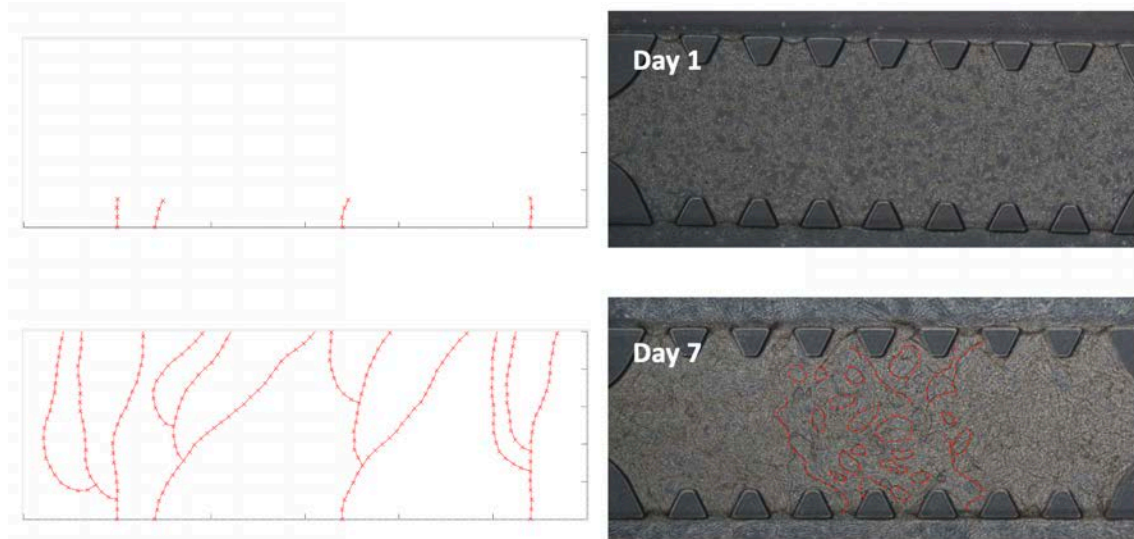


Figure 1 : Generation of vessel network. Agent-based computational angiogenesis model (left) and experimental observation of vasculogenesis (right).

4. Summaries and future plans

Despite challenges in exchanging information efficiently, due to COVID-19 related travel restriction, we have established the initial models to describe vascular network generation in microfluidic experimental environment.

In the future, information from the experimental observation, e.g., cell migration speed, etc. will be integrated in the computational model. After the “calibration” of the model based on experimentally-acquired information, the computational results will be compared against an independent set of experiments for validation of the model.

5. Research results

1) Journal

Not applicable.

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

*[1] R. Torii and K. Funamoto: Novel Experimental-Computational Research Framework for In-depth Understanding of Cancer Mechanobiology, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium of Flow Dynamics*, Sendai, (2020), CRF-30, pp. 48-49.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J20I071
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	2020.4～2021.3
継続年数	2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
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係数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、酸化物基板上への酸化マグネシウムの成膜を試み、また、分子動力学の計算ソフトである LAMMPS を用いたシミュレーションを試みた。

シリコン基板とは異なる歪みを導入するため、酸化ストロンチウム基板上への MgO 薄膜のエピタキシャル成長を試みた。また、酸化マグネシウム(MgO)の構造最適化を行った。図 1 (a)

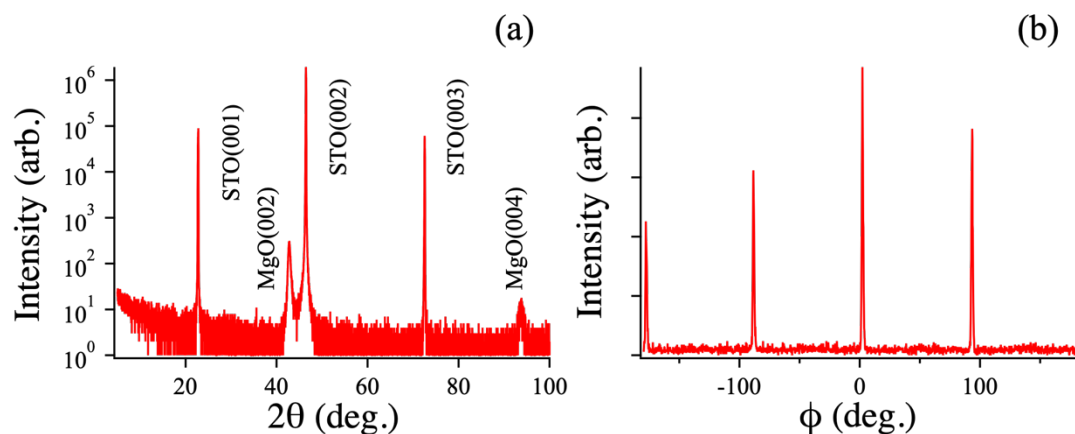


図 1 (a) θ - 2θ X線回折プロファイルと(b) MgO(002)の ϕ スキャン

に示すように MgO 薄膜からは MgO(002)と MgO(004)のピークだけが観察され, MgO 薄膜は(001)単一配向膜として成長していることが確認できた. 更に, 面内配向性を観察するため, MgO(022)ピークを用いた ϕ スキャンを行った. 図 1 (b)に示すように, MgO(022)ピークからは 4 回対称性が菅申され, MgO 薄膜のエピタキシャル成長が確認できた. シミュレーションに用いた LAMMPS は原子間ポテンシャルを用いて分子動力学計算だけでなく, 構造最適化も行うことが可能である. 完全結晶での構造最適化において, 以前に報告した量子化学計算である abinit の結果よりも実験地に近い値となった.

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, コロナ禍のなか多くの学会が中止かオンラインになったため発表件数が減っている.

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. 既報とは異なるポテンシャルとして PAW 法を取り入れた計算を始めている.

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] [Satoru Kaneko](#), [Rieko Sudo](#), [Shigeo Yasuhara](#), [Tamio Endo](#), [Manabu Yasui](#), [Masahito Kurouchi](#), [Musa Can](#), [Shalima Shawuti](#), Yoshimi Nakamaru, Chiemi Kokubun, Eri Miyake, Takashi Tokumasu: Lattice constant between Magnesium Oxide Thin Film deposited on Silicon Substrate, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-92, pp. 160-161.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J20I073
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	2020.4～2021.3
継続年数	1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**††

秋山 由佳*, 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。

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加熱面熱流束分布の同時計測を行った。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通電加熱されたステンレス箔に衝突させた。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ゴールドミラーを介して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、壁面温度を室温から任意の温度まで変化させて実験を行った。図2は、衝突高さを変化させた場合の固液界面に生じる熱量の時間変化を表す。図中のカラーマップは、最大広がり径に達した際の熱流束分布である。いずれの条件でも、衝突初期段階では、熱流束の最大値は液滴の中心部で観測された。この段階では、熱流束分布は中心付近においておおよそ一様で、半径方向外側に向かって減少した。その後、最大広がり径に達した際に最大熱量を示し、接触線付近の局所熱流束が中心部よりも大きい傾向を示した。これらのことから、液滴衝突における加熱面の冷却のほとんどは最大広がり径に達するまでに行われていることが分かった。また、衝突高さが異なると、衝突速度が増大し、最大広がり径が大きくなる。すると、液体の厚さが減少かつ伝熱面積が増大することで、固液界面の熱伝達が促進されることが分かった。

図3は、衝突高さを 200 mm に固定し、加熱面温度を変化させた際の最大広がり時の固液界面温度分布の一例である。なお、加熱したサファイアガラスに液滴を衝突させることにより、液滴表面の温度分布を直接観察した。図より、衝突高さが一定にも関わらず、壁面温度の変化によって液滴の広がり挙動に大きな違いが生じた。特に、壁面温度が 110°C の場合のみ、液滴のリム部分に不安定性を観察することができ、固気液三相接触線における蒸発等が寄与している可能性が示唆された。

なお、本研究で得られた成果について議論するために、2021年1月18日に共同研究集会（参加者：岡部、岡島、城田）をオンラインにて実施した。

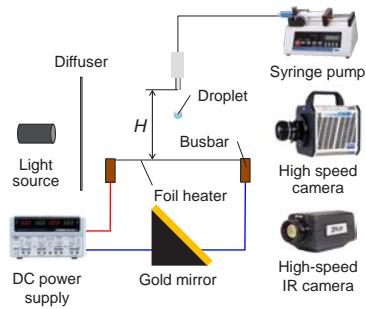


図 1：実験装置概略図

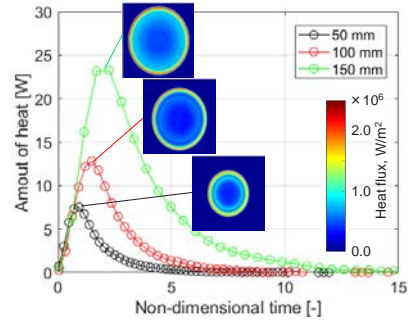


図 2：各種衝突高さにおける熱量の時間変化

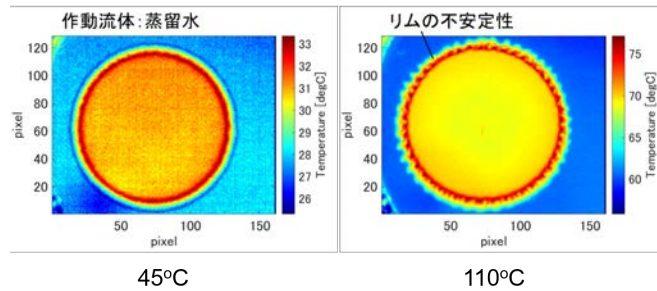


図 3：壁面温度を変化させた時（衝突高さ一定）の液滴表面温度分布。

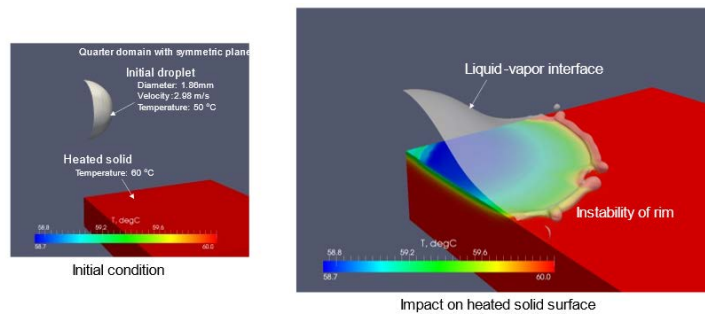


図 4：気液二相流と固体内熱伝導に関する 3 次元数値シミュレーション結果。

次に、加熱壁面に衝突する単一液滴の三次元数値シミュレーションを行った（図 4）。界面の挙動を考慮した気液二相流と固体内熱伝導を連成させて解析した。まずは相変化を考慮せず、接触角を 168° で一定とし解析した。通常の液滴衝突で見られるリムの不安定性が発現し、それに伴い固体表面温度分布が影響を受けた。今後は相変化や動的接触角の温度依存性を組み込み、表面温度分布とリムの不安定性の関係について調査する。

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。実験では様々な条件において液滴衝突挙動と加熱面熱流束分布の同時計測により、衝突液滴の固液界面における熱伝達特性を明らかにすることができた。また、壁面温度のみを変化させた際に液滴のリム部分の不安定挙動に違いが生じる可能性を示すことができた。数値解析では、Open FOAM 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、衝突液滴の広がり挙動および加熱壁面内温度分布、さらに液滴のリム部分に生じる不安定挙動を再現することができた。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、固液界面熱流束分布挙動や熱量の時間変化、リム部分に生じる不安定挙動について評価した。ただし、壁面温度を変化させた時の固気液三相接触線の挙動やリムの不安定性が生じる原因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, Y. Akiyama, J. Okajima, M. Shirota: Study of Hydrothermal Behaviors of Impinging Droplets on a Heated Wall, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-75, p. 129.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J20I074
Classification	General Collaborative Research
Subject area	Multi-scale mobility of human and materials
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

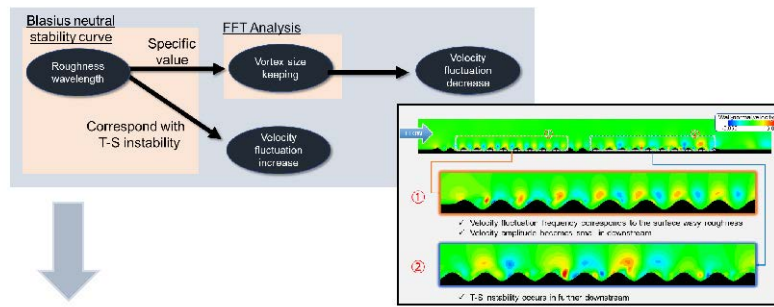
Ultra-Fine Surface Roughness Effect on Boundary Layer Transition

Aiko Yakeno*†, Bagus Nugroho**††
 *Institute of Fluid Science, Tohoku University
 **The University of Melbourne
 †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

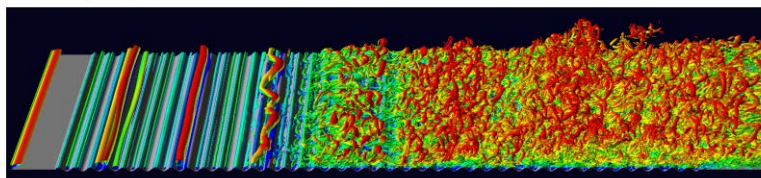
Wall bounded turbulent flow over rough surfaces has attracted plenty of interest in the last eight decades due to its complexity and importance in various practical flows i.e.: ship hull roughness due to biofouling rivets roughness on aircraft fuselage, canopy flows, etc. Although surface roughness is generally associated with an increase in drag penalty, recent studies (including by the applicants) have shown that by arranging a surface roughness in a unique configuration, for example, different roughness height, slope, and wavelength, the flow would behave differently than that of a traditional roughness. This project aims (i) to understand the turbulent boundary layer flow over surface roughness and (ii) to provide a methodology and technology that can reduce the drag penalty, particularly by exploiting controlled roughness patterns as a flow control mechanism. For practical engineering applications, this will lead to lower emissions and operating costs for a large engineering system.

◆ 2-D Flow Simulation (Tameike *et al.* 2019)



◆ 3-D Flow Simulation (Hamada *et al.*, 2020)

- suppress turbulent kinetic energy
- delay transition



Vortex structure of 3-dimensional result with small wavy wall.

Fig. 1 The progress of the project; transition-delay-effect was confirmed also in the three-dimensional flat plate DNS.

2. Details of program implement

The investigation is structured around a collaboration between Australia's and Japan's leading turbulent flow research institutions with a shared interest in boundary layer research and roughness. The investigation is performed both in Australia and Japan, and it is divided into two strands. The first is a numerical simulation using the Implicit Large Eddy Simulation (Implicit LES) method (which was conducted in Japan by Dr. Aiko Yakeno), which advanced from that of 2D transition to that of 3D (figure 1). And the second is a laboratory experiment using a wind tunnel (which is conducted in Australia by Dr. Bagus Nugroho).

Tameike *et al* (2019), showed that by arranging the height and slope of a 2D roughness pattern to a certain ratio, it could delay flow transition from laminar to turbulent. In other words, it would reduce the drag penalty. We performed the three-dimensional simulation for the same pattern. The roughness height was fixed, and the wavelength was varied. Our 3D DNS shows that the T-S wave growth is almost identical to with our 2D DNS. The phenomenon considerably depends on the roughness shape. We confirmed that the entire transition-delay performance seemed to depend on the primary mode growth.

3. Achievements

The study has just been launched in April 2020. The experiment at the University of Melbourne has been postponed to prevent corona infection, and little results have been obtained. On the other hand, the details of the flow field are obtained by large-scale numerical calculation at Tohoku University, it is expected to obtain the new findings.

4. Summaries and future plans

We analyzed the effect of two-dimensional wavy roughness of less than half the boundary layer thickness on the T-S wave transition, and obtained certain results. In the future, we plan to analyze the turbulent inflow conditions and the effect on the bypass transition. Furthermore, we are considering optimizing the roughness of the three-dimensional shape that delays the transition most or reduce the friction drag.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - [1] Hiroki Tameike, Aiko Yakeno, Shigeru Obayashi: Influence of small wavy roughness on flat plate boundary layer natural transition, *Journal of Fluid Science and Technology (JFST)*, Vol. 16, No. 1, (2021), JFST0008, 査読有り DOI: <https://doi.org/10.1299/jfst.2021jfst0008>.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
 - [2] Shingo Hamada, Aiko Yakeno, Shigeru Obayashi, Bagus Nugroho: Small wavy roughness effect on T-S wave and three-dimensional transition by Direct Numerical Simulation, *73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, (2020).
 - *[3] Shingo Hamada, Aiko Yakeno, Bagus Nugroho, Shigeru Obayashi: Ultra-fine surface roughness effect on boundary layer transition, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, (2020), CRF-37, p. 62
 - [4] 焼野藍子: 壁乱流の秩序構造発生のダイナミクスと予測制御, 大阪大学 MMDS モデリング部門ワークショップ「工学と数学の接点を求めて」, (2020), 招待講演.
- 3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J20I075
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	2020.4～2021.3
継続年数	1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^{*†}, 高奈 秀匡^{**††}

^{*}東京工業大学工学院, ^{**}東北大学流体科学研究所

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

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大気圧下で高速に生成することが可能である。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電極間に供給することで、プラズマの安定生成が可能となった。本研究では、このキャビテーションプラズマの電氣的計測と同期して、気泡の詳細観測や圧力場の計測を行うことで、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に示すキャビテーションプラズマリアクタに低導電率の溶媒を10 L/min程度の流量で流し、電極間にキャビテーション気泡を供給してプラズマを生成した。始めに、超純水中キャビテーションプラズマの電圧・電流測定計測結果から、繰り返しパルス電圧印加におけるプラズマ生成の基礎特性を調査した。プラズマは、複数パルス期間の生成と休止を繰り返す。生成期間は流量や印加電圧パラメータによって制御可能で、プラズマ生成確率は流量、印加電圧振幅および周波数に伴って増加した。

続いて、キャビテーションプラズマによるナノ炭素材料合成をキシレンを原料として行い、キャビテーションなしで合成した試料と特性を比較した。キャビテーションなしで合成した炭素材料は、グラファイト構造を有する結晶子が球状の一次粒子を形成し、一次粒子がランダムにつらなる二次粒子を構成する。一方、キャビテーションを発生させると、上記と同様の球状の一次粒子に加えて、図2のようにカーボンナノチューブと思われるロッド状の粒子が観測されたことから、プラズマ中から有機溶媒中へのラジカル輸送速度やキャビテーション気泡の存在が、材料特性を大きく変化させる可能性が示唆された。本共同研究成果をまとめたキシレンからのナノ炭素材料合成に関して、共著論文を学術論文誌に投稿済みである。

さらに、炭素材料へのヘテロ原子の導入手法として、目的とする元素を含有する有機溶媒を主溶媒と混合して原料とすることにした。これは、元素を含有する塩を添加する当初の方式に比べて、塩の溶解度や塩による導電率増加の影響を受けず、元素の導入量を広範囲で変化できると考えたためである。試行として、硫黄を含有するチオフェン中でプラズマを生成し、硫黄が導入されたナノ炭素材料の合成に成功している。

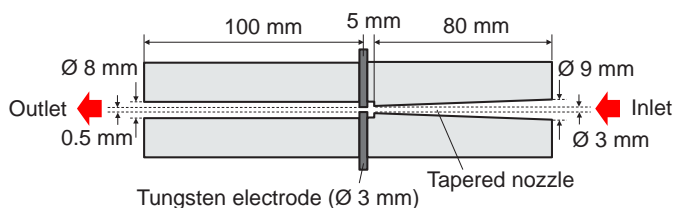


図 1 : キャビテーションプラズマリアクタ

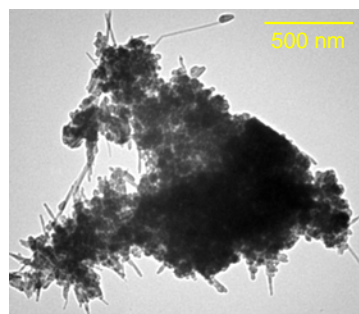


図 2 : 合成された試料の TEM 画像

3. 研究目標の達成状況

本研究の目標は、キャビテーション現象と液中プラズマを併用した複雑なプラズマ反応場を理解し、プラズマ合成される炭素材料の特性制御を可能とすることである。印加電圧パラメータ、および、キャビテーションの有無に対する実験より、試料特性に影響する因子とその制御法について見当がついたことから、目標に向かって大きな進展が得られていると言える。

4. まとめと今後の課題

有機溶媒中でのプラズマ観測を可能とするリアクタが完成したため、今後、放電電流計測と同期した高速度カメラでのプラズマ観測により、プラズマ生成位置や電子密度の変化を明らかにする。また、発光分光法によりラジカル生成量やプラズマ中のガス温度の評価を行う。溶液の流速や印加電圧に対する上記諸パラメータの変化を明らかにし、合成される材料の特性との相関性を解明することで、放電条件による材料特性の制御を可能とする。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] N. Takeuchi, S. Yamazaki, S. Imaizumi, and H. Takana: Cavitation Flow to Generate Plasma in Organic Solvent for Carbon Particle Synthesis, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS5-7, pp. 216-217.

*[2] N. Takeuchi, S. Yamazaki, S. Imaizumi, and H. Takana: Control of Reaction Field in Cavitation Plasma for High-speed and Eco-friendly Synthesis of Carbon Catalysts, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-47, pp. 81-82.

[3] 山崎翔矢, 竹内希, 高奈秀匡: 有機溶媒中キャビテーションとプラズマを併用した炭素材料合成, 第 68 回応用物理学会春季学術講演会予稿集, ウェブ会議, (2021), 18p-Z18-11, p. 07-076.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J20I076
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	3rd year

Estimation of Fracture Permeability by Integrating Microseismic Observational Data and Reservoir Engineering Modeling

Yusuke Mukuhira*†, Justin Rubinstein**††
 Jack Norback***, Meihua Yang*, ****, Kangnan Yang*, ****
 *Institute of Fluid Science, Tohoku University
 **Earthquake Science Center, United States Geological Survey
 ***Energy Technologies Area, Berkeley Lab
 ****Chendu University of Technology
 †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Effective utilization of geothermal resources is crucial to realize a sustainable society. Geothermal resources are widely present in Japan and the western United States, and the usage of geothermal resources are gradually increasing with many efforts. One of the challenges in conventional/next generation geothermal development (Enhanced/Engineered Geothermal System: EGS) is to understand the hydraulic properties of the geothermal reservoir. We often attempt to measure the hydraulic property (permeability or diffusivity) by wellbore tests or by using indicators such as migration of microseismicity. However, these quantities are often interpreted as representative value of hydraulic property for the entire reservoir. Meanwhile, geothermal fluid circulates or flows in the existing/nucleated fracture system where permeability varies depending on condition of each fracture. Geothermal fluid is extracted from those permeable fractures very locally throughout production well drilled into the specific part of reservoir. Also the fluid flow occurring the geothermal reservoir governs the shape of microseismic cloud, which directly connect to the ability of the heat exchange and geothermal fluid production i.e. the capacity of the reservoir.

Therefore, we need to have the best estimates of permeability for each fracture (local permeability) as well as representative permeability (global permeability). Also the relationship between the distribution of permeabilities of each fracture and shape of the microseismic cloud. The clarifications of local permeability of each fracture and its connection to the entire artificial reservoir creation process is beneficial for design of geothermal energy extraction system and understanding of hydrology in the reservoir.

2. Details of program implement

Forecasting the shape of a microseismic cloud is essential to pre-design an energy extraction system. The microseismic cloud produced after hydraulic stimulation is empirically known to extend to the maximum principal stress direction. However, this empirical relationship is inconsistent with the results of some studies, and the cloud growth process has not been fully understood. This study investigates the microseismic cloud growth process using microseismic data derived from a stimulation in Basel, Switzerland and considering its correlation with in-situ stress. We applied principal component analysis to a time series of microseismic

distribution for macroscopic characterization of microseismic cloud growth. The least orientation of the microseismic cloud was stable and almost identical to minimum horizontal stress. The most extensive orientation experienced some dip angle during stimulation, although it had become almost vertical following injection. This suggests that microseismic cloud growth behavior was different before and after stimulation, owing to the dynamic and static permeability tensor. There was radial growth in the cross-sectional microseismic cloud along with the maximum horizontal stress orientation. This is consistent with the nearly identical maximum horizontal and vertical stresses. Microseismic clouds did not grow in the least principal stress direction due to low permeability. However, the microseismic cloud extended between the orientation of the maximum and intermediate stresses, reflecting their magnitude. These findings suggest that microseismic cloud growth is mainly controlled by in-situ stress when various existing faults exist. They also suggest the feasibility of forecasting microseismic reservoir shape from in-situ stress before stimulation.

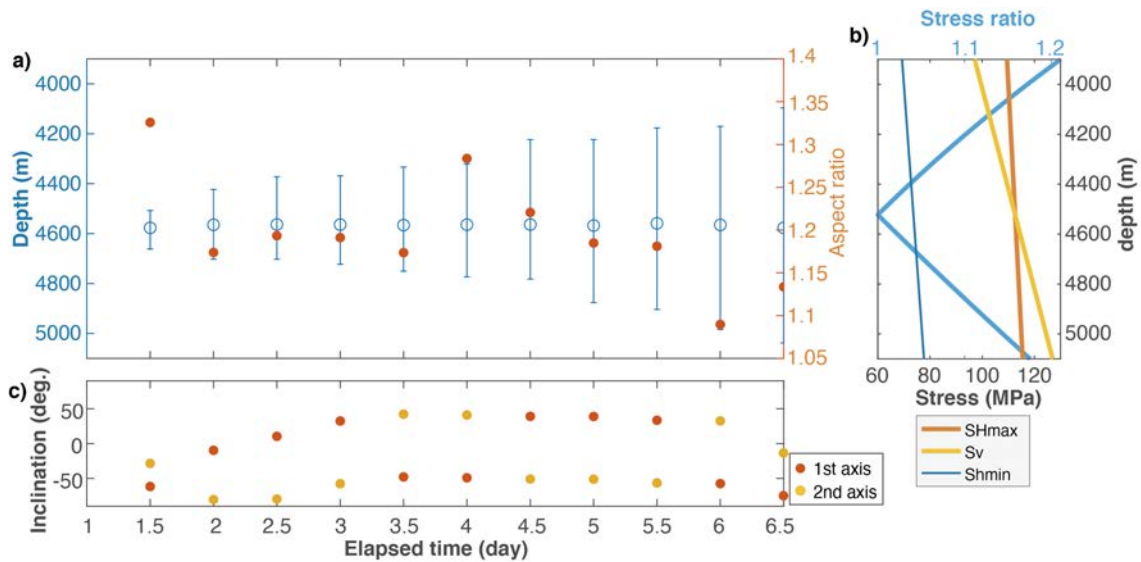


Figure 1 : Correlation between MS cloud shape and in-situ stress. a) Circles corresponds to the gravity depth of the MS cloud, and the error bar corresponds to the upper and lower limits of the MS cloud. Red dots show the aspect ratio of the 1st and 2nd components of MS cloud. b) stress profile and stress ratio between vertical and maximum horizontal stress. c) inclination of 1st and 2nd component. Downdip is negative in this figure.

3. Achievements

This study precisely investigated how microseismic clouds grow during hydraulic stimulation by applying PCA to a time series of microseismic hypocenter distribution. PCA derived the orientation of MS cloud growth both quantitatively and statistically. The MS cloud behavior characterized by PCA in several aspects was compared and discussed as it relates to in-situ stress information.

4. Summaries and future plans

We conclude that MS cloud shape is mainly controlled by in-situ stress, particularly in where various existing fractures exist, such as was the case in Basel. This study has advanced the understanding of the reservoir creation process. There are still

knowledge gaps that need to be addressed for a complete understanding of the reservoir creation process. These include understand how the MS cloud shape may be roughly scaled by the stress ratio. The findings from this study also emphasize the importance of reliable stress measurements that provide more meaningful information on the reservoir creation process.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - [1] Y. Mukuhira, M. Yang, K. Okamoto, T. Ishibashi, Y. Kumano, H. Moriya, T. Ito, H. Asanuma, K. Yan, J. Rubinstein, Y. Zuo, M. O. Häring, Microseismic Cloud Growth Process Mainly Controlled by In-Situ Stress During Hydraulic Stimulation, *Journal of Geophysical Research*, (in revision), Published Online: 6 Jan. 2021.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - *[2] K. Yan, Y Mukuhira, J. Rubinstein, and J. H. Norbeck: Estimation of Focal Mechanisms of Large Number of Induced Seismicity to Understand Fracture System in the Geothermal Reservoir, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-68, p. 120.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent)
Not applicable.
 - (Award)
Not applicable.
 - (Press release)
Not applicable.

課題番号	J20I077
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	2020.4～2021.3
継続年数	3年目

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
 Fluid Dynamics and Energy/Scalar Transport
 in Coexisting Flow of Turbulence and Non-Turbulence

早瀬 敏幸*††

酒井 康彦**†, 伊藤 靖仁**, 岩野 耕治**

Zhou Yi***, 鬼頭 憲司**

*東北大学流体科学研究所, **名古屋大学大学院工学研究科機械システム工学専攻

***南京理工大学エネルギー工学専攻

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

外部間欠性を有する乱流と非乱流が共存する流れでは、乱流状態のみの流れと挙動が異なるにもかかわらず、一様等方的な乱流場を仮定した乱流理論から導き出される統計法則が満たされる場合が多く見られる。この原因を明らかにするために本研究では、様々な流れに対する大規模数値シミュレーションを実行し、乱流と非乱流が共存する流れ場における乱流構造とエネルギーおよびスカラ輸送機構を解明することを目的とする。

2. 研究成果の内容

本節では、化学反応を伴う噴流場におけるスカラ拡散にシュミット数が及ぼす影響についてのみ記述する。本研究で計算対象とする流れ場の概略図を図1に示す。反応性物質 B (初期濃度 Γ_{B0}) を含む周囲流中に、幅 d のスリットから反応性物質 A (初期濃度 Γ_{A0}) を含む流体を噴出する。噴流中で 2 つの反応性物質が混合することにより 2 次の不可逆反応 $A+B \rightarrow P$ が進行し、反応生成物 P が生成する。計算領域は直方体であり、サイズは主流(x)方向、噴流広がり(y)方向、スパン(z)方向に対してそれぞれ $9\pi d$, $6.5\pi d$, $2\pi d$ である。図2にシュミット数が1と8における反応生成物質 P の無次元濃度 Γ_P/Γ_{P0} の瞬時分布を示す。ここで Γ_{P0} は $\Gamma_{P0} = \Gamma_{A0}\Gamma_{B0}/(\Gamma_{A0} + \Gamma_{B0})$ で表される代表濃度である。図より、シュミット数が大きい場合の方が噴流内部に細かな濃度変動が生じること、

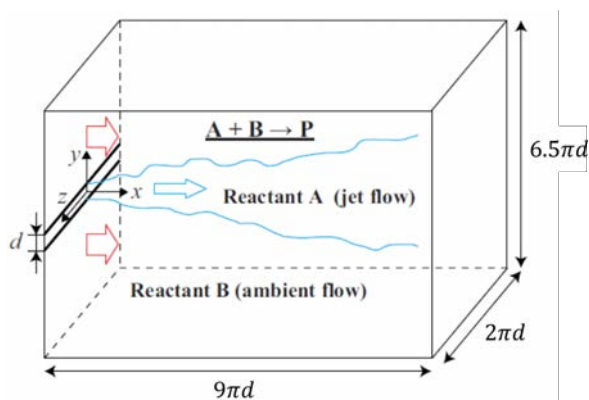


図1. 流れ場の概略図.

図2にシュミット数が1と8における反応生成物質 P の無次元濃度 Γ_P/Γ_{P0} の瞬時分布を示す。ここで Γ_{P0} は $\Gamma_{P0} = \Gamma_{A0}\Gamma_{B0}/(\Gamma_{A0} + \Gamma_{B0})$ で表される代表濃度である。図より、シュミット数が大きい場合の方が噴流内部に細かな濃度変動が生じること、

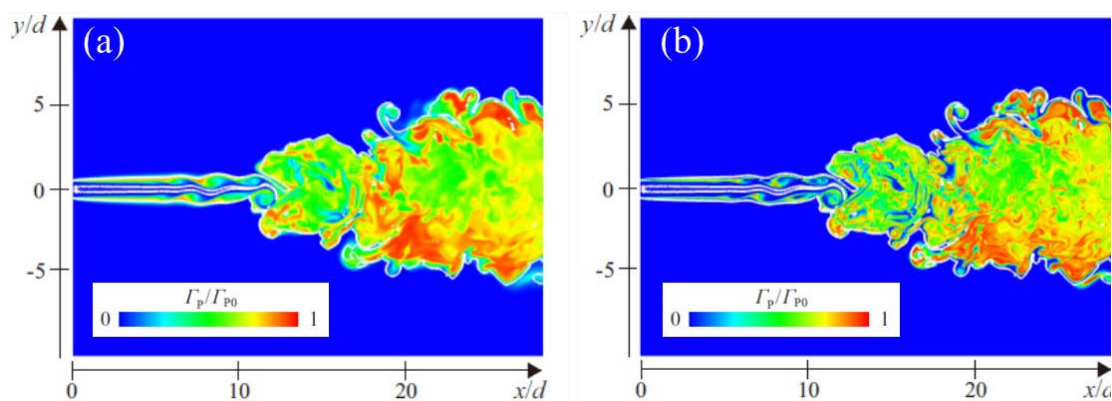


図 2. 反応生成物質の無次元時濃度分布: (a) $Sc = 1$, (b) $Sc = 8$.

また、乱流・非乱流界面での濃度勾配が急峻であることがわかる。図 3 に $x/d = 20$ での反応性物質の乱流・非乱流界面近傍における条件付き平均生成速度 $\langle \hat{S}_p \rangle_I = Da \langle (\Gamma_A \Gamma_B) / (\Gamma_{A0} \Gamma_{B0}) \rangle_I$ 示す。ここで、 Da はダムケラ数であり本研究では 10 に設定した。 Γ_A と Γ_B はそれぞれ反応性物質 A と B の瞬時濃度である。また、図中の y_I は乱流・非乱流界面からの y 方向距離、 λ は Taylor のマイクロスケールである。図より、条件付き平均生成速度のピークはシュミット数によらず乱流・非乱流界面から 0.5λ 離れた位置にあることがわかる。一方、ピークの大きさはシュミット数が大きいほど小さくなる。これはシュミット数が高いほど分子レベルまで混合が進みづらいつことを表している。

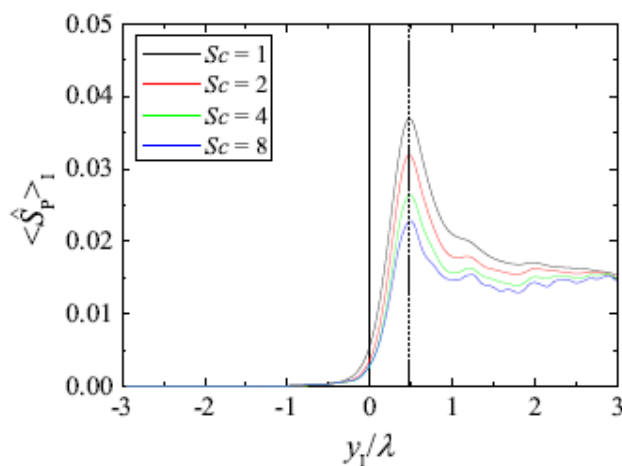


図 3. 乱流・非乱流界面で条件付け平均された反応生成速度。

3. 研究目標の達成状況

本年度は、上記の化学反応を伴う 2 次元噴流に対する数値シミュレーション及び統計解析に加えて、角柱後流干渉に対する考察も行った。また、成果の一部は以下のように論文・学会で発表された。したがって、順調に研究が遂行されたと言える。

4. まとめと今後の課題

本研究では、複数の異なる流れ場に対して数値シミュレーションを実施し、乱流と非乱流が共存する複雑な流れ場における乱流構造とエネルギーおよびスカラー輸送機構を明らかにした。今後より大規模な計算を実施し、これらの現象に及ぼすレイノルズ数の影響を明らかにすることが必要と考えられる。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

*[1] Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, T. Watanabe, Y. Ito, T. Hayase: Energy transfer in turbulent flows behind two side-by-side square cylinders, *J. Fluid Mech.*, Vol. 903, (2020), A4 (31 pages), doi:10.1017/jfm.2020.611.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Y. Sakai, Y. Ito, K. Iwano, T. Hayase, Y. Zhou, K. Kito: Fluid Dynamics and Energy/scalar Transport in Coexisting Flows of Turbulence and Non-turbulence: Cases of Dual-wake Flow and Plane Jet, *Proceedings of the Twentieth Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-100, pp. 175-176.

[3] Y. Ito, T. Yurikusa, Y. Sakai, K. Iwano, Y. Zhou: Inter-scale Transfer of Turbulent Energy and Scalar in Grid Turbulence, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS15-6, pp. 430-431.

[4] 鬼頭憲司, 岩野耕治, 酒井康彦, 伊藤靖仁: DNS を用いた化学反応を伴う二次元乱流噴流場におけるシュミット数の影響の調査, 第34回数値流体力学シンポジウム, (2020), オンライン開催, B01-1 (4 頁).

[5] 鬼頭憲司, 岩野耕治, 酒井康彦, 伊藤靖仁: DNS による化学反応を伴う乱流噴流拡散場に及ぼすシュミット数の影響に関する研究, 日本機械学会東海支部第70期講演会, (2021), オンライン開催, GE-05 (1 頁).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J20I078
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Experimental and Chemical Kinetics Modeling Study of Nitromethane in Shock Tubes and a Micro-Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile

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

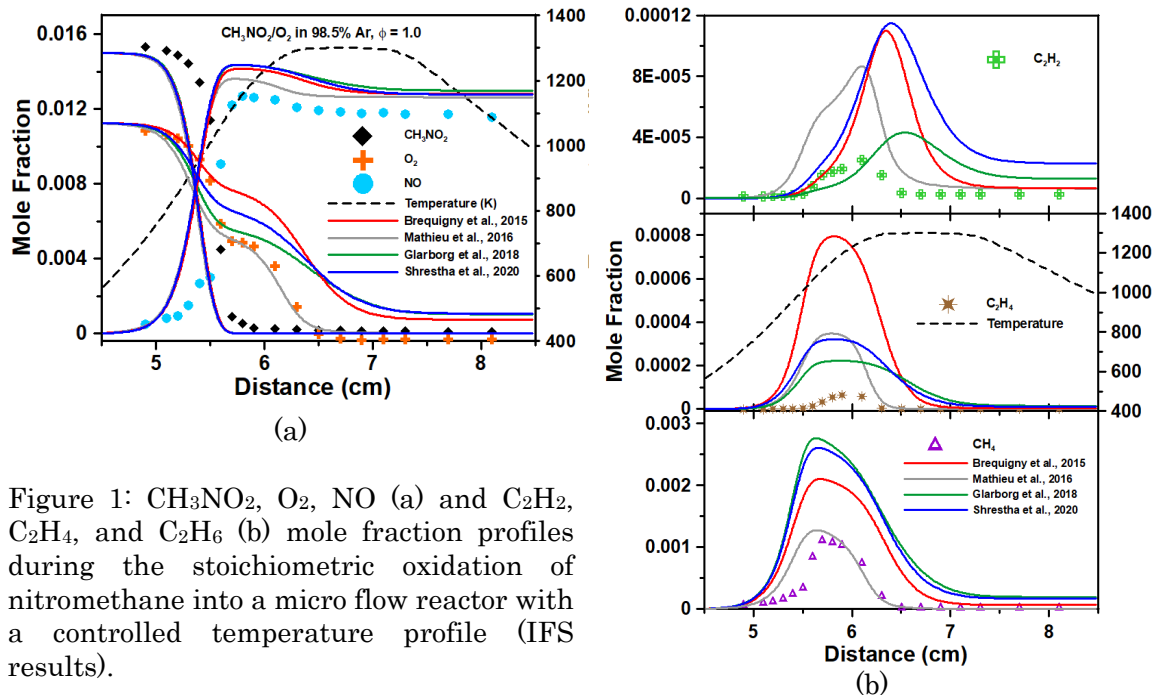
The project is a continuation of last year's international collaboration between the IFS and the TEES Turbomachinery Laboratory at Texas A&M University (TAMU) on nitromethane (NM, formula CH_3NO_2). Nitromethane pyrolysis was studied during the first year of the project while the oxidation part was investigated this year.

The project aims at taking new experimental data (Micro Flow Reactor with a controlled temperature profile (MFR) at IFS, and laser absorption measurements in shock tubes and a laminar flame speed measurements at TAMU), with the development of an accurate detailed kinetics model being the end goal.

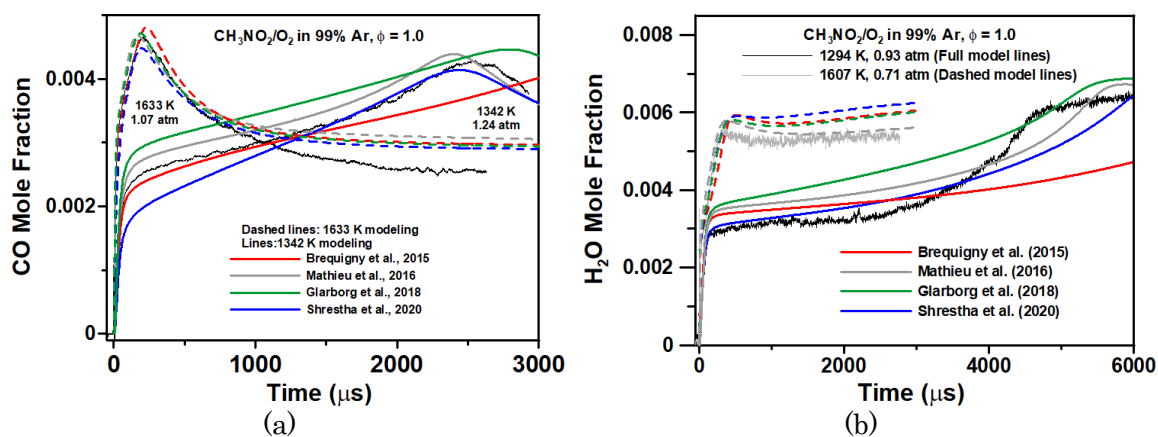
Studying NM is important for several reasons. First it is a gasoline additive which, increases octane sensitivity (RON-MON), a beneficial property for preventing knock in modern, boosted gasoline engines. Nitromethane is also a fuel for model and racecar engines and is often used as a reference component to understand the combustion mechanism of solid propellants (plus it is itself a candidate liquid monopropellant). Finally, it is also worth mentioning that the proposed effort will allow for a better understanding of the interactions between CH_4 , the main component of natural gas, and NO_x , since nitromethane will primarily dissociate into CH_3 , a dominant and early radical of CH_4 combustion, and NO_2 . This is of interest for Japan as blends of ammonia and CH_4 are considered a possible way to obtain low-carbon fuels with a higher reactivity than that of ammonia, with the combustion of ammonia being source of high NO_x emissions.

2. Details of program implement

During this program, experimental results have been successfully produced at the IFS using their MFR for three equivalence ratios (0.5, 1.0, and 2.0). Examples of results, obtained at stoichiometric conditions, are visible in Fig. 1, along with the comparison with modern detailed kinetics mechanisms. As one can see, models are not fully capable of predicting the experimental results.



Similar equivalence ratios were investigated on the TAMU side, and results for the CO (a) and H_2O (b) laser absorption results are visible in Figure 2. Once again, the results demonstrate the modern kinetics mechanisms are not suitable to model NM combustion chemistry.



Finally, laminar flame speed experiments have been conducted at TAMU and the results are visible in Fig. 3. As can be seen, when taken at similar conditions, some variation in the results can be observed depending on the experimental method.

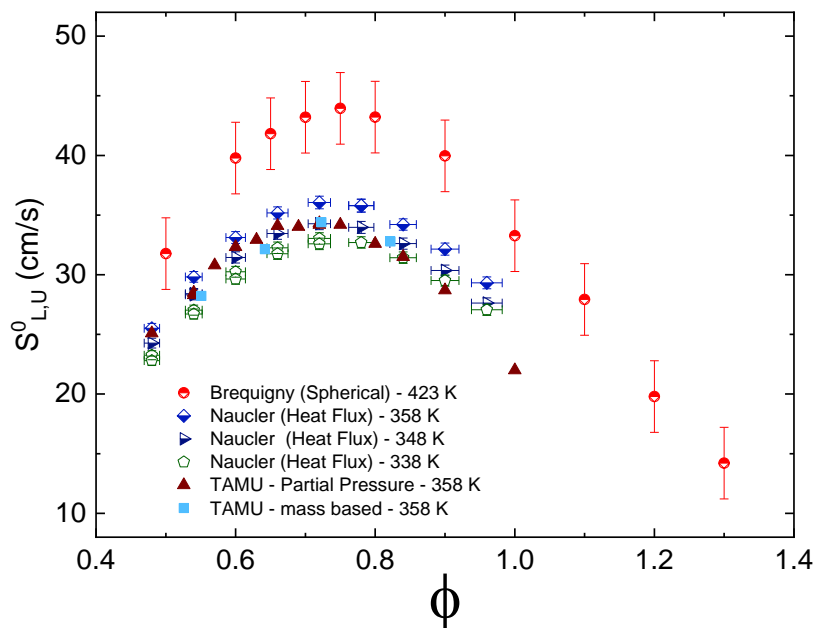


Figure 3: Current nitromethane laminar flame speed data compared to the data available in the literature. All data were collected at an initial pressure of 1 atm. Different experimental methods and initial temperatures are indicated.

3. Achievements

On the experimental side, all targets have been met and high-quality results have been produced. Comparison with models from the literatures were made in most cases (work on the flame speed results in progress). The final goal of providing a detailed kinetics model remain a work in progress and a journal paper will be written jointly by the two groups when this model will be ready. Results from this fiscal's year were presented to domestic conferences while the paper written using last year's results was accepted for publication in the Proceedings of the Combustion institute (<https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.07.132>). An oral presentation was delivered on this paper during this fiscal's year.

4. Summaries and future plans

Future plans involve finalizing the model comparison with the laminar flame speed experiments at Texas A&M University, and finalizing a detailed kinetics model, so the results can be published in a journal. A detailed kinetics model should be assembled this year and initial work on this task has been made, which is proven more difficult than anticipated.

5. Research results

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

- [1] Y. Yamamoto, H. Nakamura, T. Tezuka: Investigation on Pyrolysis and Oxidation of Nitromethane using a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *Thermal Engineering Conference 2020*, The Japan Society of Mechanical Engineers, (2020), Oct. 10-11, 2020, online (in Japanese).

- *[2] O. Mathieu, H. Nakamura, C. Mulvihill, Y. Yamamoto, T. Tezuka, Eric L. Petersen: Experimental and Chemical Kinetics Modeling Study of Nitromethane Oxidation in Shock Tubes and a Micro-Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-78, pp. 134-135.
- [3] O. Mathieu, N. Chaumeix, Y. Yamamoto, S. Abid, C.-E. Paillard, T. Tezuka, H. Nakamura, C. Mulvihill, Eric L. Petersen: Nitromethane Pyrolysis in Shock Tubes and a Micro Flow Reactor With a Controlled Temperature Profile, *38th International Symposium on Combustion*, (2021), 24 – 29 January 2021, Adelaide Convention Centre, Australia (Oral presentation).
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J20I079
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	3rd year

Characterisation and Behaviour of Centreline Shock Reflection in Axisymmetric Supersonic Intakes

Hideaki Ogawa*†, Chihiro Fujio*, Shuvayan Brahmachary*
Sannu Mölder**, Evgeny Timofeev***, Ben Shoemith***
Georgy Shoen****, Kiyonobu Ohtani*****††

*Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University

**Department of Aerospace Engineering, Ryerson University

***Department of Mechanical Engineering, McGill University

****Khristianovich Inst. of Theo. and Applied Mechanics, Russian Academy of Science

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

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The air intake constitutes a key component of airbreathing engines for economical high-speed transport. Thorough understanding of intake physics and performance is of crucial importance for efficient engine operation and reliable intake start. Shock wave interactions play a principal role in intake flow compression. Unique characteristics and flow behaviour including a toroidal vortex ring structure and potential hysteresis have been observed for the shock reflection on the symmetry axis in our preceding studies, suggesting considerable impact they may cause on the supersonic engine performance.

However, the understanding and in-depth investigation of such phenomena practically represent a challenge due to multiple factors; (a) Mach reflection must occur at the focal point on the centreline where the incident shock impinges, as the occurrence of centreline regular reflection is prohibited by theory; (b) Such Mach reflection resembling regular reflection is characterised by a minuscule Mach disc (stem), which poses a significant challenge due to the limitations in mesh resolution in simulation and the difficulties in using optical apparatus and measuring the centreline flow properties in experiment in traditional approaches. Further, the presence of flow viscosity and curvature of the incident shock can have manifold effects on the shock structure and their prediction.

This project aims to gain detailed insights into the characteristics and behaviour of centreline shock reflection in supersonic flow and elucidate the underlying physics by means of state-of-the-art approaches including; (a) high-fidelity numerical simulation with local mesh adaption to the order of the shock wave thickness; (b) theoretical analysis based on curved shock and Guderley singularity theories as well as the method of characteristics; and (c) experimental testing using free flight in a ballistic range.

2. Details of program implement

The research project is undertaken, following the studies in the preceding two phases, which (1) investigated the characteristics of centreline Mach reflection in computational and analytical approaches, utilising a high-fidelity CFD (computational fluid dynamics) solver with adaptive meshing and the method of characteristics (MOC) in J18I042; and (2) examined the detailed characteristics of centreline shock reflection and the effects of viscosity on the shock structures via the Euler and Navier-Stokes simulations and flow visualisation in the ballistic range, in conjunction with theoretical methods in J19I001.

This research, in particular, focussed on the incident shock and shock structure in the vicinity of the triple point, aiming at prediction of its characteristics and occurrence in supersonic ring wedge intakes. The study is conducted in an analytical approach coupling with the three-shock theory (Fig. 1) and the Guderley analogy (Fig. 2), which represents the incident shock shape as a generalised hyperbola, along with the curved shock theory and high-resolution numerical simulation.

3. Achievements

The flow properties in the four flow regions surrounding the triple point divided by the shock waves and the slip line (Fig. 1) are assessed by applying the three-shock theory to the incident shock from inviscid simulation.

The coefficients for the Guderley analogy (Fig. 2) have been determined by curve fitting to minimise the mean squared error between the shapes of the hyperbola and the incident shock from inviscid simulation (Fig. 3), along with the triple point height for ring wedges with various leading-edge angles at $M_\infty = 2.5$.

4. Summaries and future plans

The characteristics of Mach reflection in supersonic ring wedge intakes have been investigated by numerical simulation using mesh adaption in conjunction with the three-shock theory. Results are described in Ref. [3].

Future plans include the assessment of the Mach stream with respect to the choking criterion at its throat in the light of the curved shock theory to enable the prediction of the Mach stem height (disk radius) as well as flow visualisation in the IFS ballistic range and the supersonic wind tunnel for verification.

5. Research results

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

- [1] Fujio, C., Brahmachary, S. and Ogawa, H.: Numerical Investigation of Axisymmetric Intake Flowfield and Performance for Scramjet-Powered Ascent Flight, *Aerosp. Sci. Technol.*, Vol. 111, (2021), 106531.
- [2] Brahmachary, S., Fujio, C. and Ogawa, H.: Multi-point design optimization of a high-performance intake for scramjet-powered ascent flight, *Aerosp. Sci. Technol.*, Vol. 107, (2020), 106362.

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

- *[3] Ogawa, H., Fujio, C., Shoemith, B., Mölder, S., Timofeev, E., Shoey, G. and Ohtani, K.: Centreline Reflection of Axisymmetric Shock Waves in Supersonic Ring Wedge Intakes, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-24, pp. 38-39.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

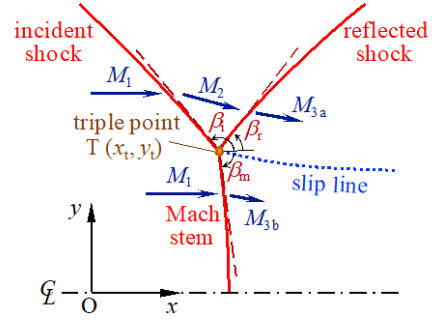


Figure 1 : Mach reflection shock system with three curved shock components.

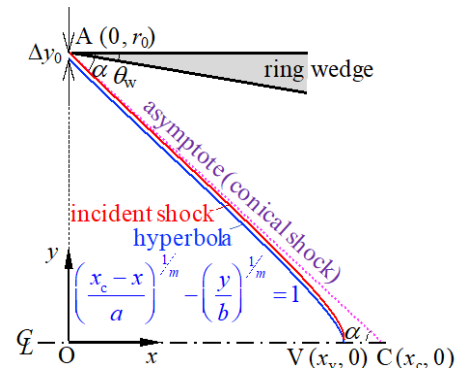


Figure 2 : Incident shock and hyperbola for Guderley analogy in a ring wedge.

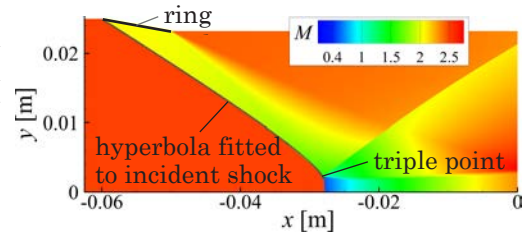


Figure 3 : Mach number distribution with an incident shock represented by a hyperbola ($M_\infty = 2.5$, $\theta_w = 10^\circ$).

課題番号	J20I081
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	2年目

プラズマ生体界面における活性種挙動の数値動力的考証
Numerical Molecular Analysis of Reactive Species Behavior between Discharge Plasma and Biological Surface

内田 諭^{*†}, 佐藤 岳彦^{**††}

*東京都立大学システムデザイン研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年、大気圧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。

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、細胞各部位における電圧および電流の経時変化を導出した(図1参照)。本解析から、典型的なタウンゼント様放電において、細胞膜に掛かる最大電圧は6 mV程度であり、電気穿孔や膜電位変動が生じる閾値を超えないことが示された。

また、酸素活性種の一つである過酸化水素を内在した数値生体膜モデルを新たに構築して、膜法線方向に電界を重畳した際のアンブレラサンプリングシミュレーションを行った。電界強度を0.1 V/nmごとに変化させながら、膜内の自由エネルギーを随時導出した。上記の結果は、他研究における挙動傾向と概ね一致し、モデルの妥当性を示せた。

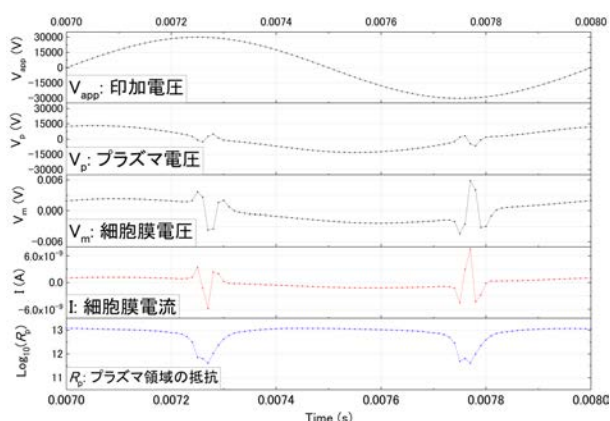


図1: 細胞各部位における電圧・電流の経時変化

3. 研究目標の達成状況

今回の研究目標において、流体近似計算と等価回路を併用した統合的モデリングの妥当性を検証した。また、印加電界に対する膜内の自由エネルギー変化を定量的に導出できたことから、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を確立し、詳細な細胞部位の電圧・電流や高精度な自由エネルギープロファイルを導出することができた。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] Satoshi Uchida: Numerical Modeling of Molecular Interactions between Plasma Species and Biological Membrane, *The 8th International Conference on Microelectronics and Plasma Technology and The 9th International Symposium on Functional Materials (The 8th ICMAP & The 9th ISFM)*, Online, (2021), MC1-1, Invited.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Shota Yamauchi, Kazuaki Abe, Yuya Oishi, Ippei Yagi, Satoshi Uchida, and Takehiko Sato: Numerical Analyses of Transport Characteristics of Discharge Species Generated by Cold Atmospheric Plasma on Cell Membrane using Fluid Model and Molecular Dynamics, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-14, pp. 23-24.

[3] 内田諭: プラズマ-生体間の電荷・電界における直接制御の計算科学的探索, 第 37 回プラズマ・核融合学会年会, オンライン, (2020), S2-3.

[4] 山内翔太, 八木一平, 内田諭: 生体細胞へのプラズマ照射における膜間電圧変化の等価回路解析, 第 68 回応用物理学会春季講演会講演予稿集, オンライン, (2021), 19p-Z17-12, 07-123.

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	J20I082
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st 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

1. To build an experimental setup combining ultra-high speed camera and laser sheet for visualizing the motion of the plasma microbubbles.
2. To develop a method for obtaining the microbubble size distribution and the microbubble concentration in water.
3. To measure the absolute concentration of some specific reactive species in water based on the light absorption technique.

2. Details of program implement

In this study, we aimed at improving the plasma activated water (PAW) device which was originally developed in NCTU. The PAW device has an advantage for sterilization and treatment of waste because it is able to generate reactive oxygen/nitrogen species (RONS) in bubbles. The specific surface increases if the size of bubbles decreases. Therefore we developed a generation method of microbubbles using PAW to increase efficiency of dissolution of RONS. Figure 1(a) shows the PAW device and (b) shows the improved device. The PAW device consists of a rod type electrode, a quartz tube, a grounded electrode surrounding the tube, a RF power source and gas injection system. A non-thermal atmospheric-pressure plasma jet (APPJ) is generated around in a quartz tube and generating millimeter bubbles including the generated plasma gas by issuing from the exit of the quartz tube as shown in Fig. 1(a). To generate microbubbles instead

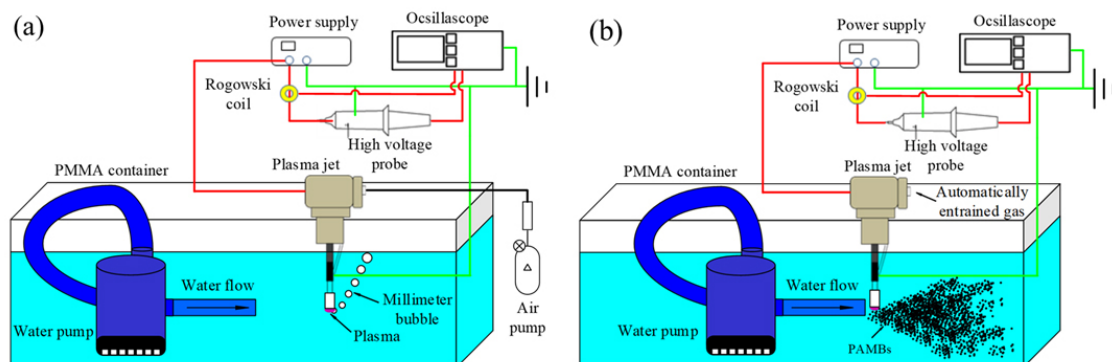


Fig. 1 (a) A schematic diagram of the experimental setup of generation system of Plasma Activated Water (PAW) which is the original device of NCTU. (b) A schematic diagram of the experimental setup of generation system of Plasma Activated Micro Bubbles (PAMBs) water which is the improved device in Tohoku Univ.

of millimeter bubbles, a water pump was used to supply the water flow into a pipe with an open end as shown in Fig. 1(b). When the water flow through the constricted part as

formed by the same plasma jet staying close to the open exit of the pipe vertically, the ambient air would be automatically entrained into plasma jet and discharged because of the lower-pressure region generated by the horizontally immersed water jet. Afterwards, the plasma activated gas would be broken into a group of small bubbles forming so-called PAMBs jet. In addition, the flow circulated the water in the polymethylmethacrylate (PMMA) container to distribute RONS uniformly in the water. Finally we obtained results that the improved PAMBs device increase the dissolved concentration of ozone and nitrogen oxides up to twice as the original PAW device.

3. Achievements

We succeeded in generating microbubbles using the original PAW device and increase the dissolved concentrations of ozone and nitrogen oxides. We also named the new device Plasma-Activated MicroBubbles (PAMBs).

4. Summaries and future plans

We need to increase the amount of microbubbles to enhance sterilization and water treatment efficacies. To increase bubbles, we plan to observe the generation processes of microbubbles to understand the generation mechanism.

5. Research results

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

[1] M.-C. Wu, S. Uehara, J.-S. Wu, Y.-C. Xiao, T. Nakajima, and T. Sato: Dissolution enhancement of reactive chemical species by plasma-activated microbubbles jet in water, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 53, No. 48 (2020), Article No. 485201 (12 pages), DOI: 10.1088/1361-6463/abae96.

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

[2] M.-C. Wu, 上原聡司, 中嶋智樹, C.-H. Chang, J.-S. Wu, 佐藤岳彦: 高速流を用いたプラズママイクロバブル生成デバイスによる水質浄化, 第 30 回環境工学総合シンポジウム 2020, オンライン開催, (2020), 講演番号: 307.

*[3] M.-C. Wu, S. Uehara, T. Nakajima, T. Sato, J.-S. Wu: Concentration Enhancement of Reactive Chemical Species by Plasma-activated Microbubbles Jet in a Water Recirculation System, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, オンライン開催, (2020), CRF-12, pp. 19-20.

[4] M.-C. Wu, S. Uehara, T. Sato, T. Nakajima, J.-S. Wu: Comparison of the Concentration of Reactive Chemical Species in Water by Plasma Jet and Plasma-activated Microbubbles Jet, *Proceedings of the 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020)*, Sendai, オンライン開催, (2020), OS8-7, pp. 274-275.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

“Liquid Treatment Apparatus”, Jong-Shinn Wu, Mu-Chien Wu, Satoshi Uehara and Takehiko Sato, May 28, 2020, apply (Application Number: 16885300).

(Award)

Student Best Presentation Award, “Comparison of the Concentration of Reactive Chemical Species in Water by Plasma Jet and Plasma-activated Microbubbles Jet”, Mu-Chien Wu (Co-Authors: Satoshi Uehara, Takehiko Sato, Tomoki Nakajima, Jong-Shinn Wu), October 30, 2020, 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020).

(Press release)

Not applicable.

Project code	J20I083
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2020 ~ March 2021
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

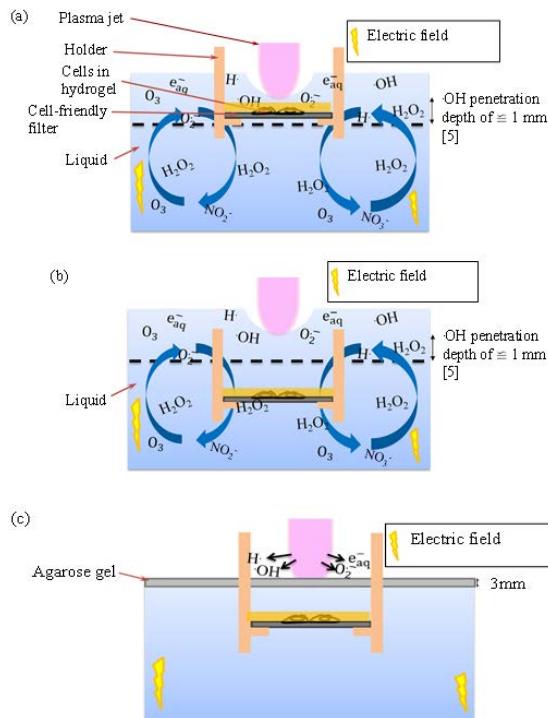
†Applicant, ††IFS responsible member

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 τ . When the distance between cells and surface is less than τ , 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 τ , 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.

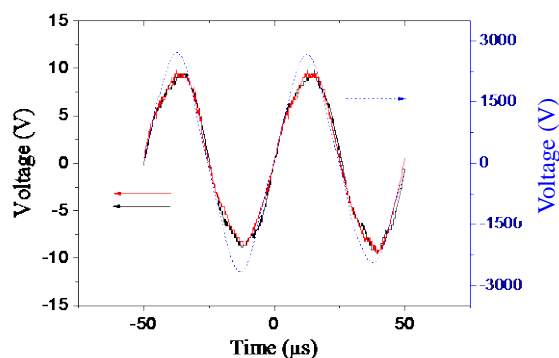


Figure 2: Voltage difference in the PBS solution without the PBS-agarose gel (black line); voltage difference in the PBS with the PBS-agarose gel (red line); voltage applied to the plasma source (blue dashed line).

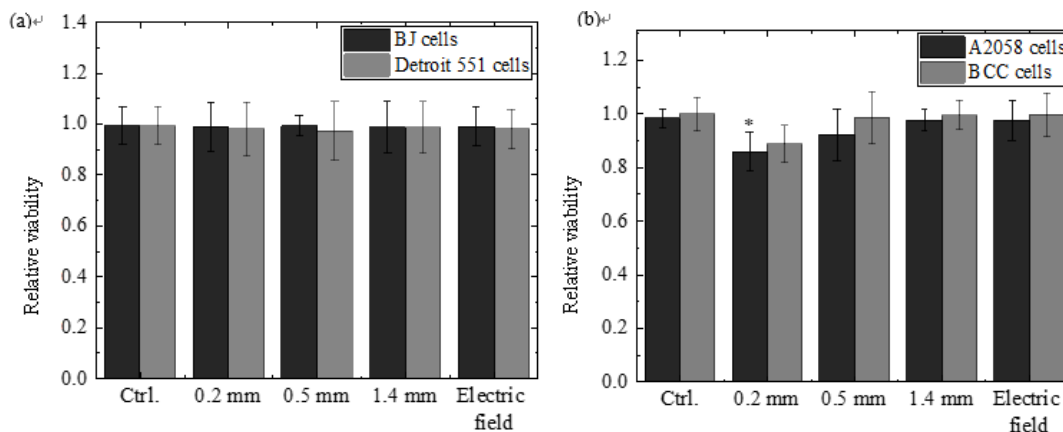


Fig. 3: Cell viability of normal skin cells (a) and cancer cells (b) after the treatments via plasma and the electric field. The distances between the cells and plasma-liquid interface for the plasma treatments were 0.2, 0.5, and 1.4 mm. Data shown is the mean and SD ($n = 3$). * $P < 0.05$ (Student's t test).

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)
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [1] 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).
 - *[2] Po-Chien Chien, Chao-Yu Chen, Takehiko Sato, Yun-Chien Cheng: The Effects of Atmospheric-pressure Cold Plasma Generated Electrical Field, Short-life Species, and Long-life Species on Cancer Cells, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-13, pp. 21-22.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J20I084
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	2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/有機溶媒サスペンション液滴の拡張・収縮挙動の可視化計測

位相シフトエリプソメータと新たに開発した反射型干渉顕微鏡を併用することにより、接触線近傍のナノ～メゾスケールの2次元膜厚分布(液膜, ナノ粒子層)の測定を可能とした。Fig. 1に、デカン酸修飾 CeO₂ ナノ粒子(直径 5.8 nm, 濃度 0.151 wt%) を分散したオクタンサスペンション (ナノ流体) 液

滴を Si 基板上に滴下した際のオクタン蒸発に伴う液滴の収縮挙動の観察結果を示す。ここで、デカン酸修飾 CeO₂ ナノ粒子は超臨界水熱法¹⁾により合成した。図には、液滴の接触半径と接触角の経時変化を示しているが、比較のために純オクタン液滴の結果も示した。また、時間はオクタンの蒸発が完了したときを $t=0$ としている。純オクタン液滴の接触半径は蒸発初期から徐々に減少するが、サスペンション液滴は蒸発初期から約 20s 間一定値を示し、その後減少している。一方、接触角はその逆の傾向を示した。Fig. 2 は、オクタン蒸

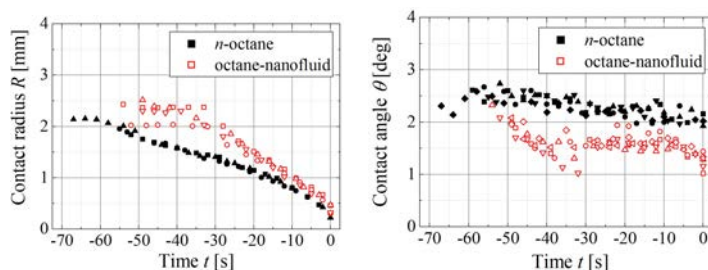


Fig. 1: Time change of the contact radius R and the contact angle θ .

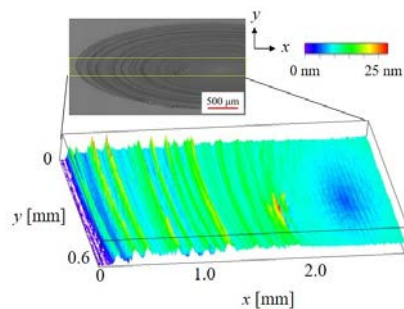


Fig. 2: Thickness profile of the deposited nanoparticle layer.

発完了後に基板上に形成されたナノ粒子層の2次元分布を示す。Fig. 1 とは異なる液滴ではあるが、形成されたナノ粒子層の厚さは、5~20 nm (1~4 粒子層) で振動していた。

2.2 MD シミュレーションによる表面修飾無機固体平面/溶媒界面の付着仕事に及ぼす表面修飾鎖の影響

MD シミュレーションと Phantom-wall 法²⁾を併用し、表面修飾 Al₂O₃ 平面/ヘキサン間の付着仕事に及ぼす各種修飾鎖の影響を検討した。ここで、表面修飾有機分子には、ヘキサン酸 (C6)、デカン酸 (C10)、オクタデカン酸 (C18) を選択した。また、修飾鎖層への溶媒の浸透度合いを定量的に評価するために、以下に示すオーバーラップパラメータ P_{op} ³⁾を算出し、付着仕事との関係を検討した。

$$P_{op} = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{OM-solid}(z) \times \rho_{solvent}(z) dz}{\int_0^{\infty} \rho_{OM-solid}(z) dz \times \int_0^{\infty} \rho_{solvent}(z) dz}$$

ここで、 $\rho_{OM-solid}$ および $\rho_{solvent}$ はそれぞれ界面垂直方向の有機修飾固体および溶媒の密度分布である。Fig. 3 に表面修飾率 50% の系における P_{op} と付着仕事との関係を示す。 P_{op} 、すなわち溶媒の浸透度合いが大きいと付着仕事は大きくなるのがわかる。これは、浸透度合いが大きいほど溶媒分子と修飾鎖の接触が増えるためである。

(参考文献) 1) J. Zhang et al., *Adv. Mater.*, 19 (2007) 203; 2) F. Leroy et al., *Macromol. Rapid Commun.*, 30 (2009) 864; 3) Y. Zhao et al., *J. Appl. Polym. Sci.*, 135 (2018) 45725

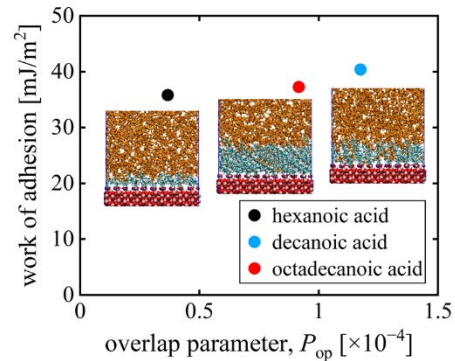


Fig. 3 Relationship between overlap parameter and work of adhesion.

3. 研究目標の達成状況

研究成果に示す通り、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濡れ挙動およびこれに伴い形成されたナノ粒子層の可視化技術の確立、さらには昨年度確立した分子シミュレーションによる表面修飾ナノ粒子/溶媒界面の親和性評価技術を利用し、表面修飾鎖の影響等を明らかにするなど、当初の目標をほぼ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) の関係を明らかにする。

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] Takamasa Saito, Eita Shoji, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Gota Kikugawa, Donatas Surblys: Evaluation of the work of adhesion at the interface between a surface-modified metal oxide and an organic solvent using molecular dynamics simulations, *J. Chem. Phys.*, Vol. 154, (2021), 114703.

(DOI :<https://doi.org/10.1063/5.0040900>)

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] 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/有機溶媒界面の付着仕事に及ぼす溶媒および表面修飾鎖の影響, 化学工学会第 86 年会, (2021).
- *[3] M. Kubo, T. Otsuka, E. Shoji, T. Tsukada, A. Komiya: A study on nano-scale interfacial phenomena of surface-modified nanoparticle suspensions, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-84, pp. 145-146.
- [4] Takamasa Saito, Eita Shoji, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Gota Kikugawa, Donatas *Surblys*: Evaluation of the work of adhesion at organic-modified Al₂O₃/organic solvent interface by molecular dynamics simulation”, *Proceedings of the 17th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS18-10, pp. 496-497.
- [5] 齋藤高雅, 庄司衛太, 久保正樹, 塚田隆夫, 菊川豪太, *Surblys Donatas* : 有機分子修飾アルミナ表面/有機溶媒間の付着仕事に関する分子動力学解析, 第 57 回日本伝熱シンポジウム金沢 特別オンラインセッション, (2020).
- [6] 齋藤高雅, 庄司衛太, 久保正樹, 塚田隆夫, 菊川豪太, *Surblys Donatas* : 分子動力学計算による付着仕事に基づいた有機分子修飾 Al₂O₃/有機溶媒界面の親和性評価, 化学工学会第 51 回秋季大会, (2020).
- [7] 大塚俊輝, 久保正樹, 庄司衛太, 塚田隆夫, 小池修, 辰巳怜, 藤田昌大: 表面修飾ナノ粒子含有ナノフルイド液滴の拡張現象に及ぼす表面修飾鎖の影響, 化学工学会東北支部第 22 回先端研究発表会, (2020).
- [8] 庄司衛太, 金子峻大, 米村建哉, 久保正樹, 塚田隆夫, 小宮敦樹: Si 基板上の SiO₂ ナノ粒子/PDMS 懸濁液の微視的濡れ挙動の測定, 第 57 回日本伝熱シンポジウム, (2020).
- [9] 齋藤高雅, 庄司衛太, 久保正樹, 塚田隆夫, 菊川豪太, *Surblys Donatas* : 分子動力学シミュレーションによるデカン酸修飾 Al₂O₃/ヘキサン界面の親和性評価, 第 20 回日本伝熱学会東北支部学生発表会, (2020).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J20I087
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	2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*†, 田畑 諒也*, 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. 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. 現在のところ, 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. 研究の推進にあたり, 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.

2. 研究成果の内容

まず, 前年度まで行なっていたエッジトーンの成果を原著論文にまとめ発表した[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[2]

長さ 9cm の閉管エアリード楽器のモデルを制作し, 10m/s のジェット速度を与えて楽器の定常的な発振状態を再現した. 図 1 (a)および(b)に圧力分布および歌口近傍の流速分布を示す. 圧力分布を見ると, 管内に強い共鳴状態が再現されていることが確認できる. また, 流速分布をみるとジェットが振動している様子が見られる. 図 2 は, 歌口近傍の Lighthill の音源の第一項を再現したものである. ジェットの上端と下端で正負の領域が交互に入れ替わっている様子がみられる. ジェットが正の傾きのとき, 上端で負, 下端で正となり, 負の傾きの時はその逆になる. また, 渦の中心では負となりその周りでは正となる. このように Lighthill の音源は流れの形状によって変化する. Lighthill の音源の揺らぎの標準偏差を調べるとエッジの近くで大きくなることがわかった. これは, エッジ近くで流体音(空力音)が発生していることを意味する. これは, LES の解析で行った Howe のエネルギー推論(HEC)の結果と定性的に一致する.

(2) DNS を用いたホルンのマウスピースの解析[3]

ホルンのマウスピースの 2D モデルを作成し(図 3), DNS による数値解析を行った. ホルンのマウスピースは, 単体ではヘルムホルツ共鳴器となることが知られている. 唇を模した細いスリットから一定流速のジェットを流入させ, その減衰振動を調べることで, 共鳴周波数を推定した. 図 4(a)はそのときのマウスピース内の圧力変動である. 図 4 (b)は格子の粗い LES の計算である.

LES では高周波数のノイズ成分の発振が見られるが、DNS では綺麗な減衰振動が観測される。これは、LES では十分な精度の計算ができていないためと考えられる。ここでは、唇を振動する代わりに、求めた共鳴周波数で変動する流速を与え共鳴状態を再現した。図 5 (a),(b)は、そのときの流速分布と圧力分布である。共鳴状態が再現され、開口部から球面波が放出されている様子が再現されている。

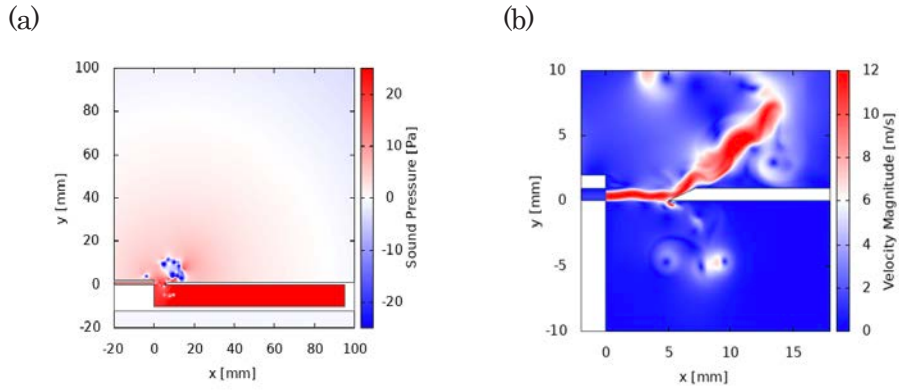


図 1 エアリード楽器の定常発振状態 [2] (a) 圧力分布 (b) 歌口付近の流速分布

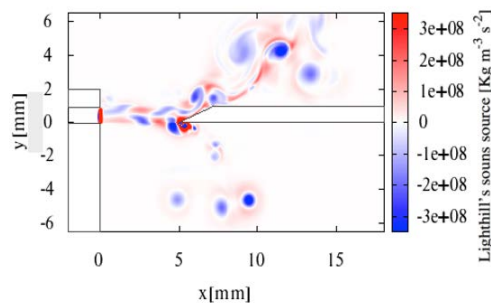


図 2 エアリード楽器の歌口付近の Lighthill の音源 [2]

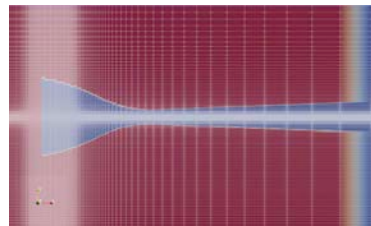


図 3 ホルンのマウスピースのメッシュ

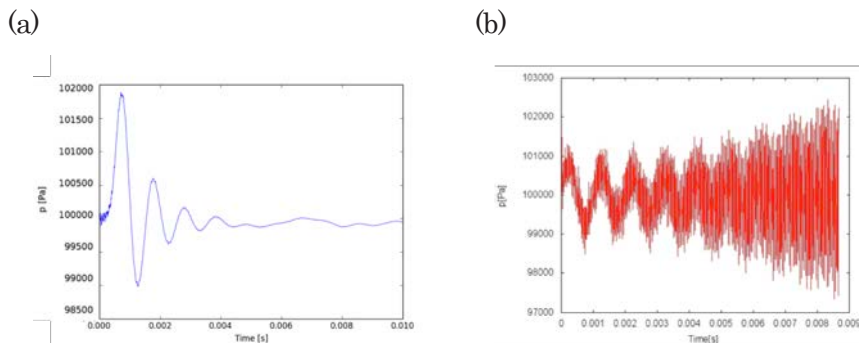


図 4 一定流速を加えたときのマウスピース内の圧力変動[3] (a) DNS (b) LES

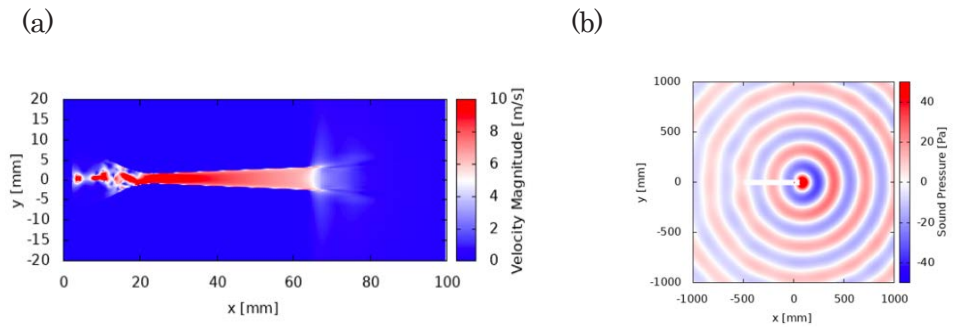


図5 周期的に変動する流速を加えたときの発振状態 [3] (a) 流速分布 (b) 圧力分布

3. 研究目標の達成状況

まず、前年度までのエッジトーンの研究をまとめ原著論文[1]の公表した。DNS を用いた小型エアリード楽器の解析に成功し、Lighthill の音源について議論した。その成果を ICFD で発表した[2]。また、ホルンのマウスピースの 2D モデルを作成し、DNS を用いた解析に成功し、その成果を AFI 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。(1) DNS をもちいた小型エアリード楽器の解析では、これまでの研究成果をもとに、エッジトーンと共鳴管体を持つエアリード楽器との違いについて、Lighthill の理論等を用いて考察する。さらに、3次元の LES を用いて計算した結果と比較検討し、2次元モデルの実現象の再現性について考察する。(2) DNS を用いたホルンのマウスピースの解析では、唇の周期的な開閉を再現し、より現実に近い共鳴状態を再現する。その結果を 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。

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*, (2021), First published 24 Mar 2021 (34 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] R. Tabata, S. Iwagami, T. Kobayashi, K. Takahashi, Y. Hattori : Numerical Analysis of Air-Jet Instrument's Sound Sources by Compressible Direct Numerical, *Proceedings of 17th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS16-6, pp. 472-473.

*[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 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-97, pp. 169-170.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J20I088
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st 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.

2. Details of program implement

A large number of supersonic flights were simulated for a representative flight route in the chemistry-climate model EMAC (v2.54) coupled with the air traffic simulation model AirTraf (v2.0). The simulation setup consists of the following: for westbound flights, the Concorde departs from Heathrow airport (LHR) at 10:30 (UTC) and flies to John F. Kennedy (JFK) airport along the great circle route at $M=2.0$ at 15.3 km; for eastbound flights, it departs from JFK at 13:30 (UTC) and flies to LHR (Fig. 1). The near-field pressure waveform of the pseudo Concorde model was employed (the waveform data were provided by courtesy of JAXA); the simulation period was set from December 2008 to March 2019. Many atmospheric profiles along the flight route were obtained successfully (Fig. 2). Our preliminary sonic boom simulations clearly showed that ground sonic boom waveforms vary as a result of the variation in the atmospheric profiles: the overpressure ranges from 91.8 to 100.9 Pa under representative atmospheric conditions.

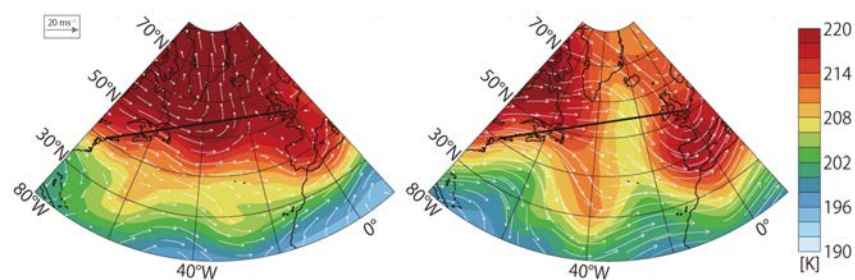


Figure 1 : Exemplary temperature (contours) and wind vectors at 15.3 km in summer (left) and in winter (right). The thick solid line shows the great circle (LHR-JFK).

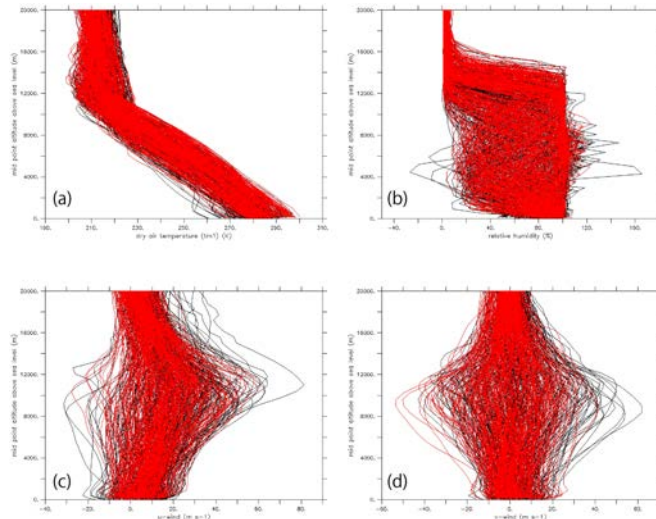


Figure 2 : Daily change in atmospheric profiles along the flight route for a year: (a) temperature, (b) relative humidity, (c) u-wind and (d) v-wind components. Eastbound: black lines; westbound: red lines.

3. Achievements

The research activity of WP1 (work package) has been performed in the first year and a post processing of the obtained data are implemented (on going). Those data are provided to WP2 as input data for sonic boom simulations, as we planned. The SEIRA project was introduced and our preliminary results were presented at the 20th ICFD in Sendai (virtual conference). A student of Osaka Institute of Technology (Dr. Takahiro Ukai was his supervisor) has submitted bachelor thesis related to the SEIRA project successfully.

4. Summaries and future plans

The planned EMAC simulations (WP1) have been performed successfully and the expected atmospheric profiles were obtained in the first year. With those data, sonic boom evaluations are carried out by using the Integrated Supercomputation System of AFI Research Center, IFS, Tohoku University (WP2). Furthermore, a surrogate model for sonic boom impact will be constructed from a data set of flight conditions, atmospheric data and sonic boom evaluations, and its validation will be performed (WP3). A scientific paper will be submitted in the second year, which reports some relationships between sonic boom impact and atmospheric conditions.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
 - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- *[1] H. Yamashita, B. Kern, S. Obayashi, T. Misaka and T. Ukai: Sonic-boom Evaluation in Realistic Atmospheres: Introduction of the SEIRA Project, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-29, p. 47.
- 3) Patent, award, press release etc.
(Patent) (Award) (Press release) Not applicable.
(Thesis)
A. Yamamoto and T. Ukai, "The numerical evaluation of a real atmospheric effects in a supersonic transport aircraft by sonic boom analysis," Bachelor thesis in Osaka Institute of Technology (2020).

課題番号	J20I089
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	2020.4～2021.3
継続年数	1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）から既の実証されている。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は起こっているか、その際の速度分布、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半径方向 1 次元理論解析ならびに 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

図 1 左に、同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の概念図を示す。内円筒 R_{in} から外円筒 R_{out} さらに上下壁間 L で囲まれた領域に電気伝導性を有する液体金属を封入する。内円筒が回転することで円周方向に流れが駆動される。軸方向に印加された磁場によってローレンツ力は流れと反対方向に作用し、流れを減速する。このようなトルク制御を実施することで、余剰風力時にも軸回転速度を定格速度に保ち、同時にファラデーの電磁誘導の法則で発生する電力を、内円筒と外円筒間に負荷抵抗を繋ぐことで外部に取り出す。

内円筒と外円筒の半径比を $\eta(= R_{in}/R_{out})$ とし、磁場の強さに比例するハルトマン数 Ha と無次元化された電流 I^* で表されるパラメータ $K(= Ha^2 I^*)$ を導入する。まずは、半径方向 1 次元の理論解析により、様々なパラメータ依存性を検討した。図 1 中央に、 $K = 0$ での周速度分布を示す。半径比が大きいほど、速度分布は半径中央での速度低下が顕著となる。図 1 右に、 $\eta = 0.25$ での周速度の K 依存性を示す。 K が大きくなり、電磁場との相互作用が大きくなると周速度は逆流が生じることがわかった。逆流は取り出す電力を減少させるので、発電効率を向上するためには、できるだけ逆流が起こらない条件とすることが重要であり、トルク制御の観点からは、半径比が大きいほうがトルクを大きく変化できることもわかった。

また、3 次元数値解析による検討を始め、まずは半径方向 1 次元理論解析との比較を層流

条件にて実施した。3次元計算では、上下に絶縁壁が存在するので、円周方向に垂直な断面内に渦電流が発生することがわかり、理論解析とのずれが生じることがわかった。

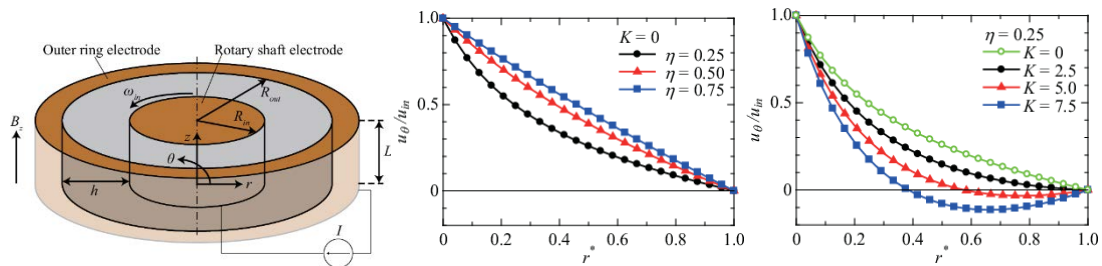


図1：同軸二重円筒型 MHD エネルギー変換装置の概念図(左)と $K = 0$, $\eta = 0.25$ での周速度

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、種々のパラメータ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。さらに、3 次元数値解析に着手し、層流条件での電磁流体现象の理解が可能となった。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

今後は、実験のようにより回転数の高い、乱流条件での 3 次元数値解析を実施し、層流条件との違いや実験結果との比較検討を行い、大型風車への導入を見越した設計指針などを検討する。

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] 佐々木亮, 藤野貴康, 高奈秀匡, 小林宏充: MHD 相互作用下での回転同軸二重円筒内層流の理論解析, 電気学会論文誌 B, Vol. 141, No. 3 (2021), pp. 280-286, doi: 10.1541/ieejpes.141.280.

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: Study on MHD Annular Flows Driven by Rotating Co-axial Cylinder, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020)*, Sendai, (2020), OS5-9, pp. 220-221.

- *[3] Hiromichi Kobayashi, Hidemasa Takana, Ryo Sasaki, Takayasu Fujino: Study on MHD phenomena in Co-axial Energy Conversion Device, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, (2020), CRF-5, pp. 8-9.

- [4] 佐々木亮, 藤野貴康, 高奈秀匡, 小林宏充: MHD 相互作用下での回転同軸二重円筒内層流の理論解析, 電気学会, 新エネルギー・環境研究会, オンライン開催, (2020), 6 ページ.

- [5] 佐々木亮, 坂本裕基, 藤野貴康, 高奈秀匡, 小林宏充: 層流条件下での回転同軸二重円筒内 MHD 流れの三次元数値解析, 電気学会全国大会, オンライン開催, (2021), 1 ページ.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J20I091
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	2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

過去に研究代表者らは、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、乱流干渉時間が「立ち上がり時間の長い波形」に及ぼす形状を数値解析的に評価した。乱流場数値解析には、圧力波の伝搬と乱流干渉が模擬できる KZK 方程式を用いた。圧力波形は様々な幅の一樣乱流場に通過させた (表 1)。ここで、 C は音速である。

表 1 : 乱流場の条件

Case	乱流場の幅: W [mm]	乱流干渉時間: $t_{int} = W/C$ [ms]
1	40	0.117
2	60	0.175
3	120	0.351
4	150	0.526
5	250	0.730
6	300	0.764

図 1 に幅 40 mm の乱流場を通過した際の圧力波形を示す。乱流場を通過していない圧力波形と比較して、「立ち上がり時間の短い圧力波形」の最大過剰圧が 2 倍程度増加した。一方、立ち上がり時間の長い圧力波形では、最大過剰圧の変動が少なく、圧力波形はほとんど歪んでいない。過去に研究代表者らは、幅 40 mm の乱流場と圧力波形の干渉実験を行っており、「立ち上がり時間の長い圧力波形」が乱流干渉の影響を受けにくい結果を示した。本数値解析においても、実験と同様な結果を再現できている。図 2 に 189 個の圧力波形の最大過剰圧

の統計値（平均値と標準偏差）を示す。 $P_{w/o}$ は乱流干渉していない状態の最大過剰圧であり、 $P/P_{w/o} = 1$ の場合は、乱流干渉によって最大過剰圧が変化していないことを意味する。「立ち上がり時間の短い圧力波形」では、乱流干渉によって平均の最大過剰圧が低くなり、乱流場との干渉時間が増加しても変動はなく、平均の最大過剰圧は低い値を維持した。一方、「立ち上がり時間の長い圧力波形」では、たとえ乱流干渉時間が増加しても乱流干渉によって平均の最大過剰圧はほとんど変化しなかった。また、「立ち上がり時間の短い圧力波形」では、最大過剰圧の標準偏差が大きくなったが、「立ち上がり時間の長い圧力波形」は、ほとんど変化しなかった。つまり、たとえ乱流干渉時間が増加しても「立ち上がり時間の長い圧力波形」は、乱流干渉の影響を受けないことが分かった。しかしながら、先行研究の実験的研究では、乱流場との干渉時間の増加によって平均の最大過剰圧が低下しており、本結果では、先行研究の結果と一致していないため、更なる調査が必要である。

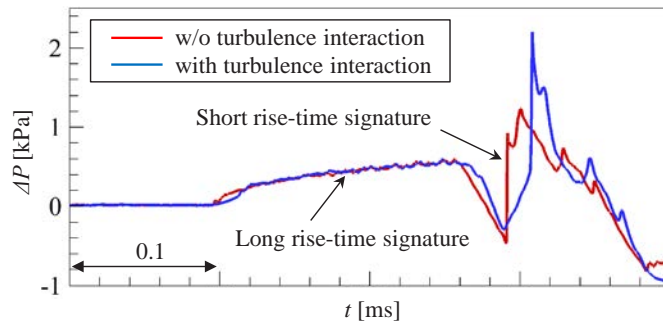
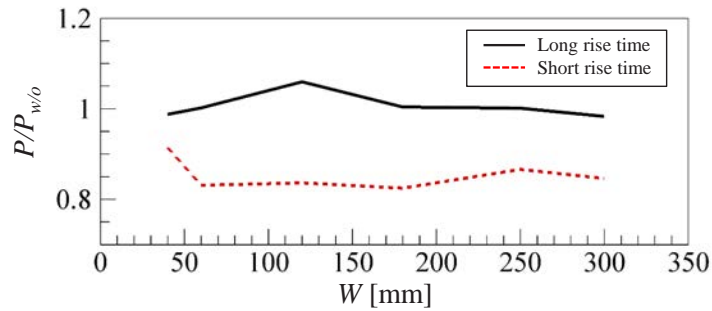
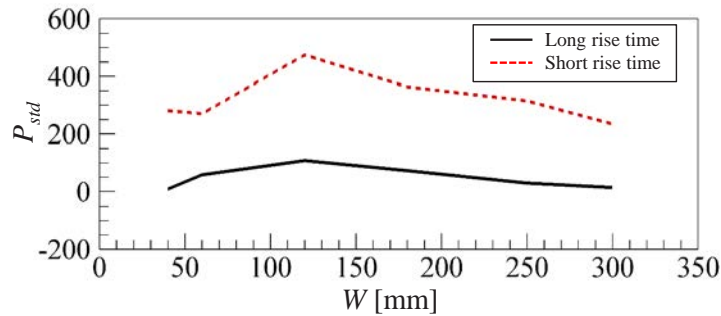


図 1：40 mm 幅の乱流場を通過した圧力波形と乱流干渉のない圧力波形との比較



(a) 平均値



(b) 標準偏差

図 2：乱流干渉時間による最大過剰圧の変化

3. 研究目標の達成状況

本研究課題の初年度は、乱流場発生装置の開発および流体科学研究所の1段式火薬銃を用いた衝撃波-乱流干渉実験の実験基盤を整えた。本年度は、衝撃波伝搬解析ツールおよび一様乱流場生成ツールを用いて、数値解析の研究基盤を整えたことで、実験的・数値解析的に「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」を解明することが可能となった。しかし、流体科学研究所で実施予定であった衝撃波-乱流干渉実験が実施できなかったため、若干の遅れが生じているものの、数値計算による研究基盤が整ったことで、数値的・実験的に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できることが期待できる。

4. まとめと今後の課題

本年度は、数値計算によって「立ち上がり時間の長い圧力波形」と乱流干渉時間の関係を調査した。この結果、「立ち上がり時間の長い圧力波形」は、乱流場と長時間干渉しても乱流干渉の影響を受けにくいことを明らかにした。今後は、この数値計算結果の妥当性を検証するため、実証実験を行う予定である。また、詳しく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解明するため、追加の数値計算および実験を行う。

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] T. Ukai, H. Nakagawa, K. Ohtani : A Numerical Investigation of the Turbulence Effect on Pressure Rise Time, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-32, pp. 52-53.

[2] 鵜飼孝博 : 実用的な Time-resolved 3DBOS 法に関する研究, 2020 年度衝撃波シンポジウム, (2021).

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20I092
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

固体高分子形燃料電池における触媒層乾燥・形成プロセスの分子論的解析
MD Analysis of Formation Process of PEFC's Catalyst Layer

若嶋 振一郎*†, 三上 寛哉*, 徳増 崇**††

*一関工業高等専門学校, **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

固体高分子形燃料電池 (PEFC) の電極触媒層 (CL) は、電力の入出力密度等の燃料電池性能を決める上で非常に重要な部材である。一方で、CL の構造決定や製造方法の指針は明確になっておらず、各メーカーでの試行錯誤的な結果として製品が作られているのが現状である。

PEFC の高性能化にあたっての課題にはいくつかあるが、触媒インク製造上の課題の代表的なものとして、CL を構成するアノード・カソード触媒層内の触媒微粒子 (Pt) と高分子電解質膜 (ナフィオン膜) の接触量の増加、水素・酸素ガス拡散律速条件の改善、水素イオンの移動形態 (Vehicle Mechanism, Grotthuss Mechanism) によるプロトン伝導度の向上、触媒担持体の性質・形状、Pt 担持量・分散量の最適化などといった点が挙げられる。

また、CL の主な製造方法としては、電解質膜に触媒インク (触媒層構成粒子を含んだアルコール・水溶液) を塗布して乾燥させる方法、ガス拡散層に触媒インクを塗布して形成された電極を電解質膜に接合する方法、触媒インクが塗布された PTFE などの転写シートから電解質膜に触媒層を転写する方法、などがある。しかし、上述の製造した触媒インクを塗布・乾燥して行われる転写シート製造において、乾燥プロセスの結果、どのような分子構造が最終的に得られるかについては必ずしも明確な知見がないのが現状である。

そこで本研究では、後者の製造工程の課題に着目し、触媒インクを塗布・乾燥させる工程において、塗布前のアルコール濃度と乾燥後の触媒層形成状態の関係を、粗視化分子動力学シミュレーションを通じて明らかにすることを最終的なゴールとする。とくに本申請課題では、塗布する触媒インクの主な溶媒である水・アルコールの蒸発過程を対象を絞り、水・アルコール溶液の粗視化モデルを利用した分子動力学シミュレーションを行い、乾燥プロセスにおける分子挙動解析を通じて、粗視化モデルの力場パラメータと製造方法の指針策定に必要な蒸発速度などのマクロな物理量との関係をまず明らかにする。

2. 研究成果の内容

2.1 MD シミュレーションモデルの構築

本研究では、分子動力学シミュレーションソフトウェアの LAMMPS を用いて計算を行った。触媒インクの溶媒アルコールは、水分子とアルコール分子のみで構成されると仮定し、分子モデルには、代表的な粗視化分子モデルである MARTINI モデルと、比較のため GROMOS 力場 (Version.54A7) を適用した全原子 (full atom) モデルを使用した分子動力学解析での比較を行った。アルコールにはエタノールを選択した。異なるパターン of アルコール濃度溶媒で検証を行うため、水およびエタノール分子をそれぞれ溶媒全体に対するアルコール濃度が 0, 25, 50, 75wt% にな

るように各分子の初期分子数を Table 1 の通り定め、これらを用いてシミュレーションを行った。乱数で設定した初期分子配置からの NVT アンサンブル、NPT アンサンブルを組み合わせたアニーリング処理を行い、その位置情報を蒸発モデルの初期値として利用した。

蒸発を再現する計算系は、諸星ら(2018)の手法を参考に構築した。具体的には平衡状態からシミュレーションボックスを Z 方向にそれぞれ 9.0nm の高さとなるように拡張した。拡張に当たって拡張前の周期境界上に配置されていた分子は配置が大きく変動するため削除し、さらに Borges らの手法(Borges, 2015)を参考に、9-3LJ ポテンシャルで再現した炭素壁を最底面に配置した。その後、蒸発を再現するため、Z 方向に 6.5~9.0nm の領域に一定間隔で分子を削除する処理を適用した。上述の手順を進めると Fig. 1 にまとめて示す計算系となり、この系を用いてシミュレーションを行った。

蒸発の再現の方法としては、NVT アンサンブルを用いて計算系の温度を段階的に制御して加熱プロセスを模擬した。具体的には、(1)高温まで加熱し、準備を行うステップと(2)高温を維持し分子を蒸発させるステップの 2 段階に分けてシミュレーションを進めた。比較の基準となる全原子モデルを用いた際の各ステップの条件は以下の通りである。

(1) 加熱ステップ

計算系を NVT アンサンブルで 290K から 500K まで加熱

- ・ 時間刻み幅：1step 当たり 0.5fs
- ・ 総ステップ数： 10000step
- ・ 加熱時間： 5ps

(2) 蒸発ステップ

加熱ステップが終了した状態から NVT アンサンブルで 500K を維持

- ・ 時間刻み幅：1step 当たり 0.2fs
- ・ 総ステップ数： 250000step (合計 50ps)

なお、MARTINI 粗視化分子モデルを用いたシミュレーションでは、全原子モデルと粗視化分子モデルを用いた場合の計算結果の比較の際に、加熱ステップの違いの影響を評価するため、加熱ステップで Table 2 のような 5 通りの条件を設け、それぞれ検討を行った。

Table 1 Number of first molecules

Weight percentage of ethanol in the solvent [wt%]		0	25	50	75
GROMOS (full atom)	Water	4000	3000	2000	1000
	Ethanol	0	391	782	1173
MARTINI (CG)	Water	1000	750	500	250
	Ethanol	0	250	501	751

Table 2 Heating Conditions in MARTINI model simulation

Conditions Number	Time step length [fs]	Total steps	Total Heating time [ps]
1	0.5	10000	5
2	0.25	10000	2.5
3	0.5	5000	2.5
4	1.0	10000	10
5	0.5	20000	10

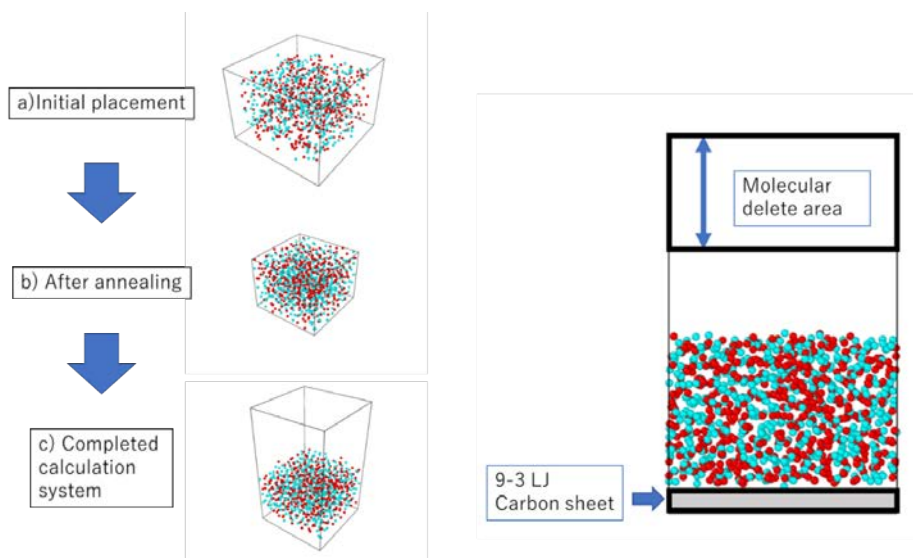


Fig.1 Computational system construction procedure and illustration of the evaporation system

2.2 解析結果および考察

2.2.1 全原子モデルと粗視化分子モデルの比較

分子モデルの違いによる各分子の蒸発の仕方への影響を検証するため、各アルコール濃度で、全原子モデルおよび、全原子モデルと同じ加熱ステップ条件の粗視化分子モデルでシミュレーションを行った。その後、蒸発による各分子の質量の変化と溶媒中のアルコール濃度の変化を比較した。それぞれの結果はFig. 2の通りとなった。

Fig. 2(a)から、アルコール濃度 0wt%の場合は、全原子モデルでは 35ps 経過後から蒸発量の増加が確認できたが、粗視化分子モデルでは 35ps 経過後もあまり蒸発量の増加があまり見られなかった。Fig. 2(b)からは、アルコール濃度が 25wt%の時も同様で、水・エタノールともに、全原子モデルでは一定経過後から蒸発量の増加が確認されたが、粗視化分子モデルからは一定時間経過後も蒸発量の増加があまり見られないという特徴が確認できた。

Fig. 2(c)からアルコール濃度が 50wt%では、各分子の蒸発の仕方について、分子モデルによる差はほとんど生じないことが確認できた。Fig. 2(d)からアルコール濃度が 75wt%となると、全原子モデルでは各分子の蒸発量の上昇は見られなかったが、粗視化分子モデルでは 13ps 経過後から、水・エタノールともに蒸発量の増加が見られた。

また、アルコール濃度の変化について比較すると、Fig. 2(d)からアルコール濃度が 75wt%で粗視化分子モデルを用いた場合のみ、時間経過とともに、アルコール濃度が減少していく傾向が見られたが、Fig. 2(b)～(d)のそれ以外のグラフからは、時間経過に比例したアルコール濃度の変化はほとんど確認されなかった。また、Fig. 2のグラフを 0～50ps の間でそれぞれ線形近似し、総蒸発時間に対する各分子の平均蒸発速度を求めた。算出された各分子の平均蒸発速度をまとめると Table 3 の通りとなった。アルコール濃度が 25wt%の場合では、全原子モデルと粗視化分子モデルともに、エタノールよりも水の平均蒸発速度の方が大きくなることが確認できた。分子モデルによる平均蒸発速度の差の比較でも、水の方が大きくなることが確認できた。

アルコール濃度が 50wt%の場合は、水とエタノールとの平均蒸発速度の差は小さくなり、分子モデル間での各分子の平均蒸発速度の差は最も小さくなることが確認できた。しかし、全原子モデルでは、水の平均蒸発速度が大きくなったのに対し、粗視化分子モデルではエタノールの平均蒸発速度の方が大きくなる違いが見られた。

アルコール濃度が 75wt%の場合は、エタノールの平均蒸発速度が大きくなり、分子モデルによる平均蒸発速度の差もエタノールの方が大きくなることが確認できた。

2.2.2 分子モデルの違いによる影響の考察

平均蒸発速度を比較すると、アルコール濃度が 25, 75wt%の分子の質量に偏りがある場合、分子モデルによる差が大きくなり、アルコール濃度が 0, 50wt%の分子の質量に偏りがない場合は、分子モデルによる差は小さくなった。この現象は、分子モデルの分子間力の差によるものと考えられる。

全原子モデルと粗視化分子モデルでは、粗視化によって分子間力に差が生じるため、水・エタノール分子がそれぞれ蒸発速度に与える影響も異なる。分子の質量に偏りがある場合、割合の多い分子の分子間力が大きく働き、分子モデルの差がより大きくなったと考えられる。そのため、蒸発速度を算出する場合、各分子モデルの分子間力に関するポテンシャルパラメータの調整が必要になると考えられる。

Table 3 Average evaporation speed for each molecule
(Comparison of molecular models)

Weight percentage of ethanol in the solvent [wt%]	Average evaporation speed [g/(mol · ps)]			
	Water		Ethanol	
	GROMOS	MARTINI (Conditions No.1)	GROMOS	MARTINI (Conditions No.1)
0	114.4	80.0	-	-
25	158.8	61.5	53.7	24.5
50	79.5	72.8	75.5	79.8
75	13.3	38.9	39.3	146.2

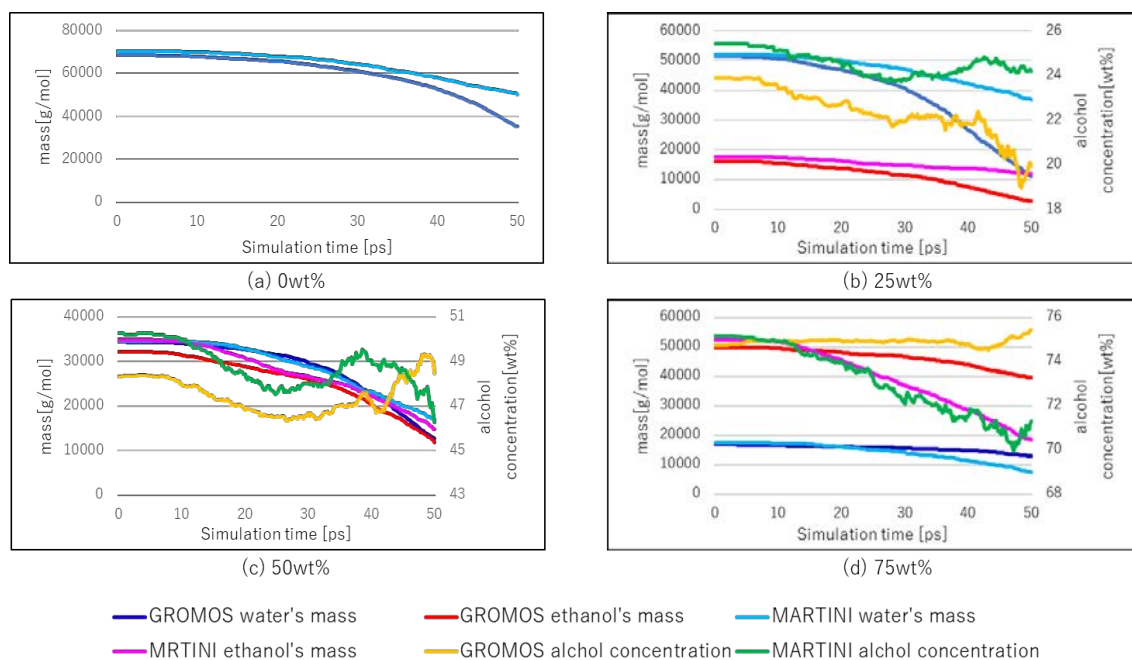


Fig.2 Change in the mass of each molecule and the concentration of alcohol in the solvent
(all atom model and MARTINI CG model condition No.1)

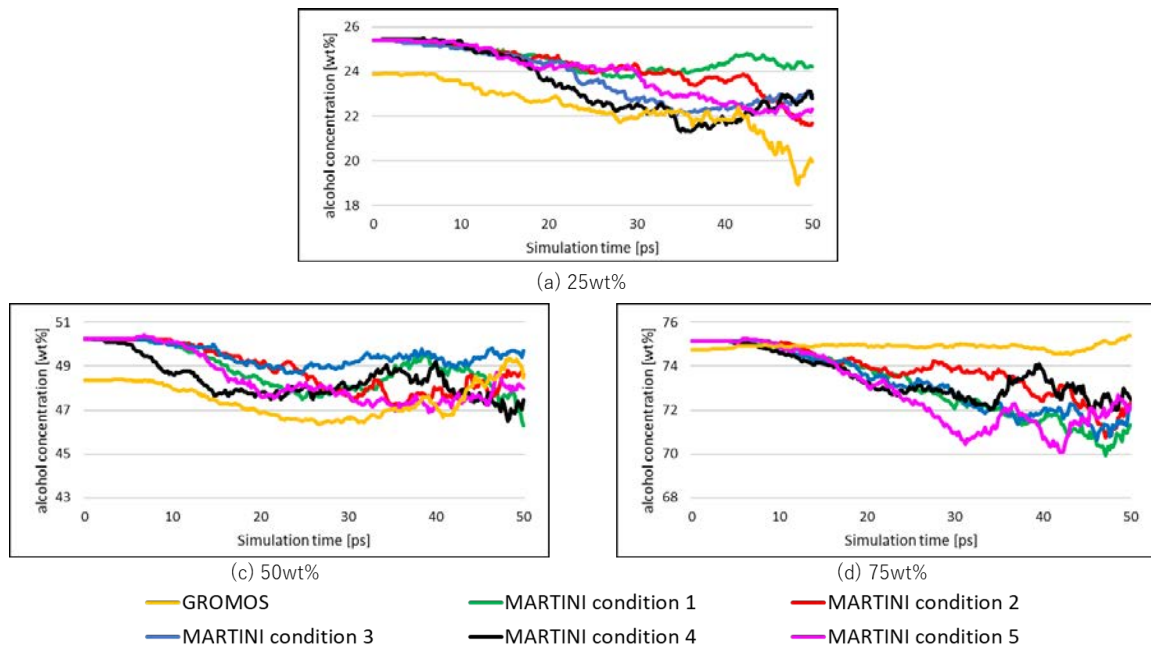


Fig.3 Change in alcohol concentration
(all atom model and MARTINI CG model all conditions)

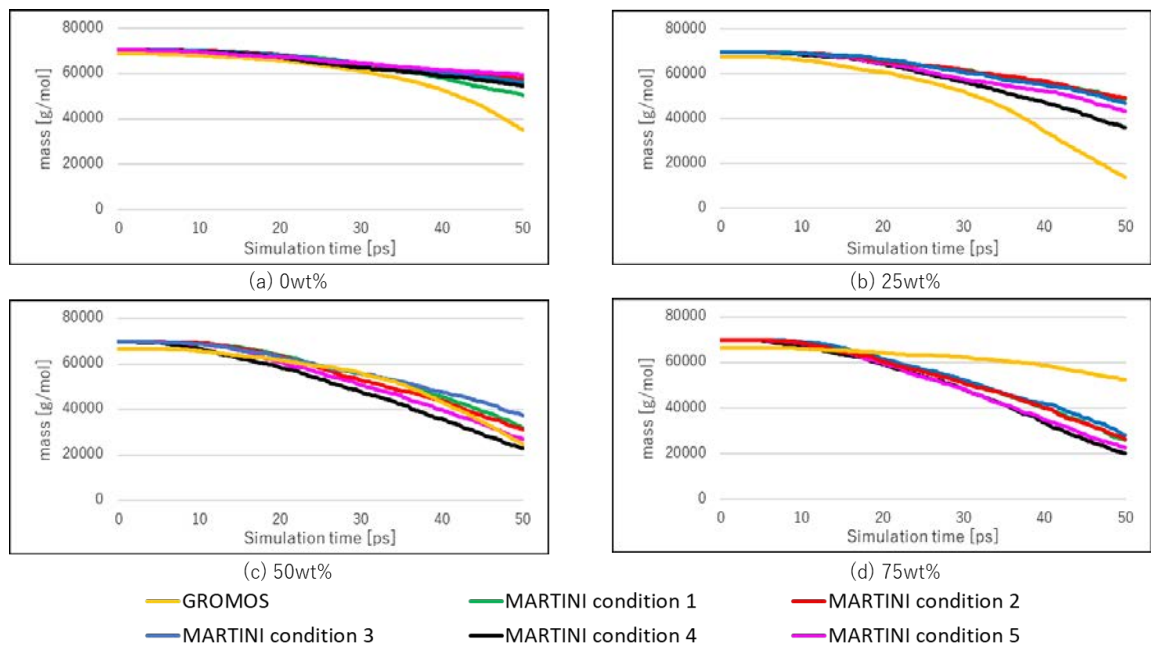


Fig.4 Variation in solvent mass
(all atom model and MARTINI CG model all conditions)

3. 研究目標の達成状況

本研究の最終的な目標は、PEFC 電極触媒層の乾燥工程を含んだ形成過程を、様々な添加物濃度・環境条件の下で明らかにすることで、製造工程の条件設定に関わる知見として、製造の低コスト化やスピードアップに繋げることであるが、本申請の研究期間内では、上述のように全原子

モデルと粗視化モデルでの蒸発速度の比較において相互の計算結果の良い一致を見出せず、さらに個々のモデルパラメータの検討が必要であることが分かった。このため、実際の乾燥工程の諸条件の検討には至らなかった。

4. まとめと今後の課題

本研究では、GROMOS 力場による全原子モデルと MARTINI 粗視化分子モデルを用いて、水-エタノール混合溶液の蒸発シミュレーションを行った。シミュレーションの結果から以下の知見を得た。

- (1) 分子の質量に偏りがない場合には、分子モデルによる平均蒸発速度の差は小さくなり、分子の質量比が変化することで分子モデルによる差が大きくなる。
- (2) 分子の質量に偏りがある場合、蒸発に用いる溶液中のアルコール濃度が高い時には加熱ステップの時間を短縮し、アルコール濃度が低い場合には加熱ステップの時間を延長することで、全原子モデルの平均蒸発速度に近い値が得られる。
- (3) 加熱時間を変更する場合、総ステップ数は変えずに時間刻み幅を変更することで、より全原子モデルに近い結果が得られる。

今後の課題としては、蒸発シミュレーション手法の改善が挙げられる。今回の検証にアルコールとして使用したエタノールは、特に強い揮発性を有しているため、蒸発速度が高くなる傾向がある。また、水-エタノール混合溶液についてもエタノール含有量が高いほど蒸発速度が高くなることから Gurralla ら (Gurralla et al., 2019) の研究などからも明らかとなっている。今回の GROMOS 力場による全原子モデルによる検証では、アルコール濃度が上昇すると蒸発速度が上昇する傾向が確認できなかった。このような結果となった原因を考察すると、以下の2点の改善案が考えられる。

(1) 計算系の改善

本研究では、計算系の構築手順として、アニーリング処理を行い、完成した平衡状態を用いて、蒸発のシミュレーションへと移っている。しかし、単純な平衡状態では、水-アルコール溶液の蒸発特性が現れにくくなっていたため、今回の結果となったと予想できる。今回の計算系を改善するにあたって、蒸発の観察・再現に適した初期配置からの計算が必要になると考えられる。

(2) 分子数および計算系の拡張

もう一つは計算系の大きさおよび分子数を増加する方法である。分子挙動を観察するにあたってほとんどの場合、一定数以上の分子が必要となる。本研究でも初期配置の時点では十分な数の分子を用意したが、蒸発系の性質上時間経過とともに分子数が減少してしまうため、分子挙動の解析に必要な分子数を下回り、本来の挙動とは異なってしまった可能性が考えられる。この可能性を少なくするため、更に多くの分子を用意し解析を行うことでより正確な結果が得られると予想できる。

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[1] [H. Mikami](#), [Shin-ichiro Wakashima](#), and T. Tokumasu: MD Analysis of Formation Process of PEFC's Catalyst Layer, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-90, p. 157.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J20I093
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	2020.4～2021.3
継続年数	1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^{*†}, 大林 茂^{**††}

*電気通信大学大学院情報理工学研究所, **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

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的设计に先鞭を付ける。

2. 研究成果の内容

本解析は、JAXA 開発の移動格子法ベース三次元非定常圧縮性 Navier-Stokes ソルバ FaSTAR-Move を使用させて頂いている。2019 年度までは解析格子の格子点数に上限が陰に設けられており、十分な格子密度にできなかった。2020 年度初頭に、格子点数上限制限を外して頂き、アップデート版ソルバでの解析を実施した。安定的な解析に試行錯誤を要したが、2020 年度末までにローター一周の解析を終え、エンジンメーカーでの収束判定法と比較した結果、図 1 に示す通り、粗かった以前の格子よりも物理量収束の改善が確認された。

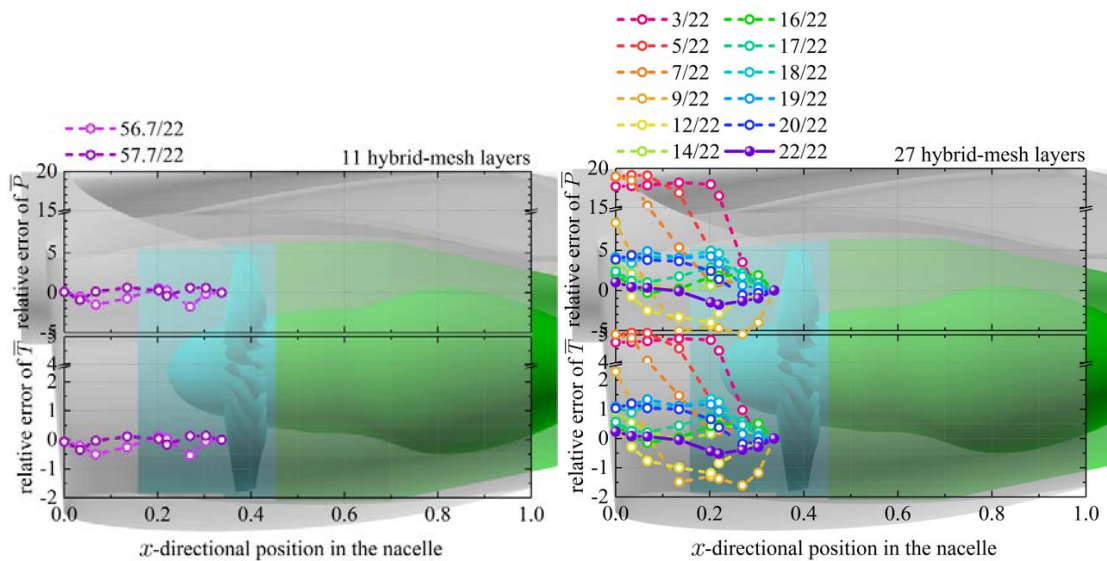


図 1：格子細密化による、ロータ前方での全圧・全温相対誤差の収束性比較。左) ロータ周囲ハイブリッド格子 11 層の結果, 右) ロータ周囲ハイブリッド格子 27 層の結果。

3. 研究目標の達成状況

航空機のエアフレームと稼働状態のエンジンとの統合解析という、世界初の試みが成功裏に進められるのか試行錯誤の状態であったが、まずは、安定的な非定常解析の実施に目処が付いたため、当初の目標を達成した。ただし、格子細密化のため、ロータ周囲での圧力発散が発生しやすくなり、 Δt を以前の1/2に刻まざるを得なくなった。解析の収束に要する時間がおよそ2倍になり、また、格子細分化に因る必要メモリ量もテラを超え、本解析がスパコンシステム以外では受け付けられない内容に肥大化した。

4. まとめと今後の課題

世界初の試みとして、航空機のエアフレームと稼働状態のエンジンとの統合解析を開始し、安定的な非定常解析が可能になった。格子依存性の確認作業を引き続き実施し、得られる解析結果の精度検証を行う。本年度の試行の結果、ローター一周の解析にAFI-NITYで1ヶ月強要することが判明したため、応答曲面等を活用し、効率的な解析結果の精度検証を進める予定である。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Chiba, K., Ishikawa, H., Oba, Y., and Obayashi, S.: Integrated Analysis of an Operating Jet Engine with an Airframe - A First Attempt, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2020), CRF-33, pp. 54-55.

[2] 石川晴基, 千葉一永: 飛行条件に高忠実な航空機エンジン性能評価 - 駆動エンジンと機体の統合流体計算の実現, JHPCN: 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第12回シンポジウム, 東京, 9th July, (2020).

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	J20I094
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	1年目（発展）

水中爆発を用いた物体洗浄効果の研究

Study on Improvement of 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影響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

表1は色差計を用いて計測した各布表面の計測結果を示す。表1から各設置距離にける明度、色度を比較すると、設置距離に比例して明度、色度は高くなる事がわかる。

表1 色差計測結果

X [mm]	L* (明度)	a* (色度)	b* (色度)	C* (彩度)	h (色相角)
30	78.8	1.1	8.8	8.9	1.4
40	77.5	1.2	8.9	9.0	1.4
50	76.9	1.4	9.5	9.6	1.4

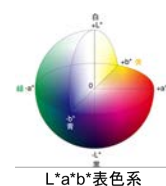


図1は水深40[mm]の位置に設置された爆薬の下方X[mm]の位置に布を設置した時の可視化結果を示す。No.1で起爆、爆発生成ガス内部が高圧になり膨張過程(No.2-8), No.8で爆発生成ガスがそれぞれ最大時である。その後爆発生成ガス内部が負圧になることで収縮過程(No.8-14), No.14で水流ジェットが発生する。その後、No.14以降、爆発生成ガスは下方に移動しながら再膨張過程となる。X=30mmではNo.15で布表面にガスバブルが付着して再膨張収縮過程(No.15-)となる。X=40mmではNo.15で再膨張過程となり、No.18で布表面に付着し膨張収縮過程となる。X=50mmではNo.15で再膨張収縮過程(No.15-20)となる。No.21で水流ジェットが発生し、布表面に達する。各可視化結果において布表面に達した以降は水流ジェットは弱まり、再膨張収縮過程は発生しない。また布表面を通過する水流ジェットはX=30mm~50mmにかけて減少していることが確認された。

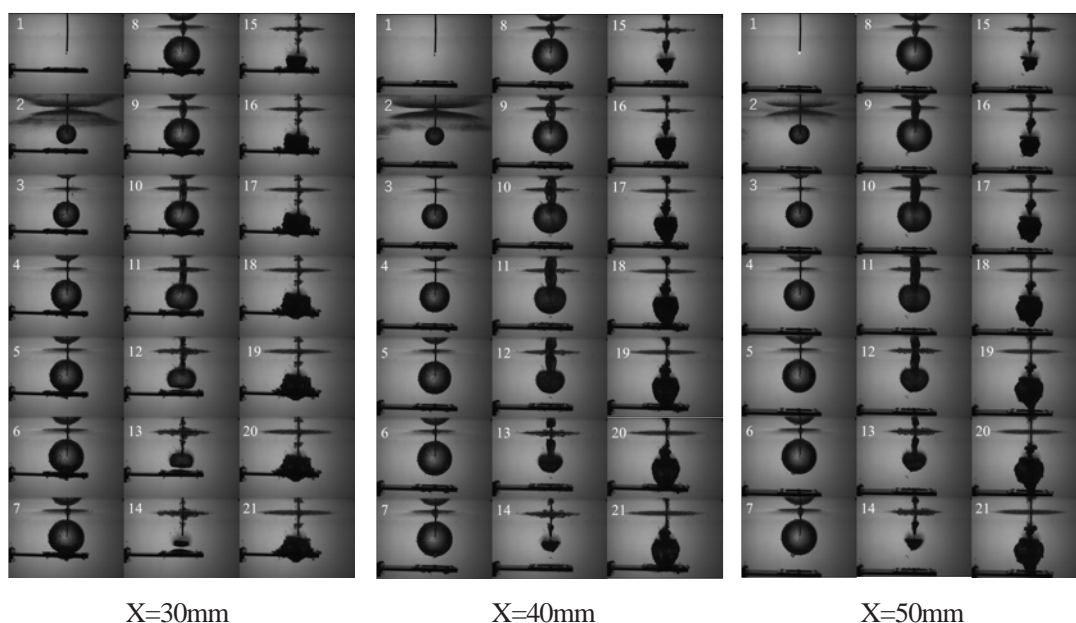


図1 起爆点から布までの距離 X[mm]における可視化結果($\Delta t=0.3\text{ms}$)

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慣性力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用性の確認ができた。

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）

[1] K. Kitagawa and A. Abe: The behavior of micro explosive charge underwater explosion near a rigid wall near a rigid wall, *Progress in Scale Modeling, an International Journal*, Vol. 1, No. 1, (2020), 5 (6 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] K. Kitagawa, H. Ueda, K. Ohtani, Y. Konishi: Study on Improvement of Washing Effect for Textile Using the Underwater Explosion *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-26, pp. 42-43.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20I095
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	1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。このことは、脳神経疾患に対する治療薬開発の成功率を著しく下げている原因の一つである。そこで、薬物のヒト BBB 透過性 (脳移行性) 予測の精緻化を目指して、これまでに多くのバイオベンチャー企業や製薬企業が、最適な実験動物の探索や *in vitro* 評価系の改良を重ねてきた。しかし、依然として満足いく成果は上がっていない。その原因の一つとして、従来の血管内皮細胞の二次元培養法では、*in vivo* の組織微小環境を十分に反映しないことが挙げられる。そこで本研究では、マイクロサイズの流路内でヒトの BBB の機能を再現する三次元の微小脳血管網を構築することを目的とした。この取り組みによって、中枢作用薬の BBB 透過性をスクリーニングするシステムを確立することが期待される。

2. 研究成果の内容

本研究では、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 (図 1A) を用いて、その内部のマイクロサイズの流路内でヒトの BBB の機能を有する三次元の微小脳血管網が形成される過程をリアルタイムで追跡した。さらに、脳転移性を示す乳がん細胞株を用い、血流を介するがんの転移を模倣する転移モデルを構築した。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、研究推進を図った。令和2年4月～令和3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: ヒト脳血管内皮細胞(HBMVEC), ヒトアストロサイト(HA), 及びヒト脳血管ペリサイト(HBVP)を混合して、図 1A に示すマイクロ流体デバイスのフィブリンゲル流路内に播種しその1-2日後にHBMVECをメディア流路内に播種した。その後7-10日間培養することで、三次元微小脳血管網を形成させた。DyLight 594 蛍光標識レクチンをメディア流路内に注入し、共焦点レーザー顕微鏡を用いてデバイス内の蛍光を検出した結果、形成された血管網の内壁に沿って連続的にレクチンの蛍光が検出され、三次元構築画像によって管腔構造の形成が示された (図 1B)。さらに、FITC 蛍光標識デキストラン(40kDa)とリ

ン酸緩衝液を交互にメディア流路内に注入すると、血管内腔の蛍光強度が増減を繰り返した。これらの結果から、HBMVEC 細胞を用いた灌流可能なヒト BBB 模擬チップの構築が実証された。

②脳転移性乳がん細胞を用いた転移モデルの構築：ヒト臍帯静脈内皮細胞株(HUVEC)とヒト肺線維芽細胞株(NHLF)を用いて、三次元の微小血管網を形成させた。GFP を発現させたヒト乳がん細胞株 (MDA-MB-231 細胞) をメディア流路内に注入し、共焦点レーザー顕微鏡を用いてデバイス内の蛍光を検出した結果、GFP 標識乳がん細胞が血管内腔において内皮細胞に接着し、血管内腔外へ漏出した様子が示された。今後は、構築したヒト BBB 模擬チップを用い、脳転移性の乳がん細胞の、脳への転移過程をリアルタイムで追跡する。

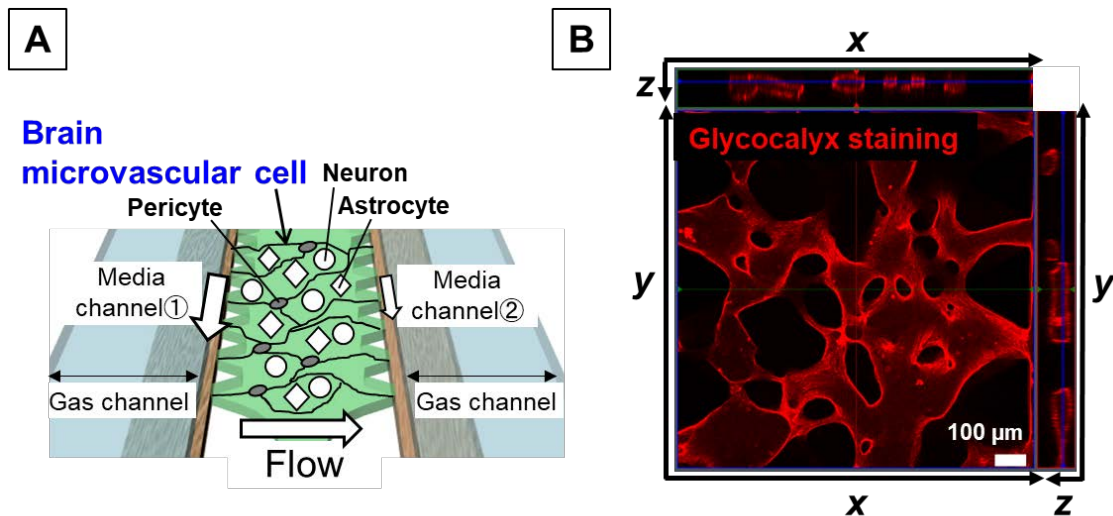


図 1：マイクロ流体デバイスを用いた三次元ヒト脳微小血管網の構築

3. 研究目標の達成状況

ヒト *in vivo* BBB の薬物輸送機能を再現するヒト BBB 模擬チップの構築は達成することができた。遺伝子発現及びタンパク質発現プロファイルデータの取得は現在検討を進めており、機能的品質が保証された BBB 評価系の確立は次年度の課題とする。

4. まとめと今後の課題

ヒトの BBB の機能を再現する 3 次元微小脳血管網のプロトタイプを構築した。今後は、ヒト凍結脳から単離した脳微小血管と、チップ内に培養した脳血管内皮細胞における遺伝子発現及びタンパク質発現プロファイルを定量的に比較解析することで、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, Y. Sakamaki, M. Inagaki, K. Funamoto, M. Tachikawa: 3D Human Blood-Brain Barrier Chip for Central Nervous System Drug Development, *Proceedings of the*

Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020), Sendai, (2020), CRF-11, p. 18, オンライン.

[2] 立川正憲 : 量プロテオミクスで解き明かす血液脳関門・血液くも膜関門, 第 39 回日本認知症学会学術集会, (2020), 名古屋.

[3] 立川正憲 : Role of the blood-arachnoid barrier transport system as a brain clearance system (脳内クリアランスシステムとしての血液くも膜関門輸送系の役割), 第 43 回日本神経科学大会, (2020), 神戸, オンライン.

[4] 稲垣舞, 佐野陽乃里, 中野瑛介, 登美斉俊, 立川正憲 : ヒト胎盤絨毛細胞株 BeWo 細胞由来エクソソームのヒト脳血管内皮細胞(hCMEC/D3)への内在化, 日本薬学会第 141 年会, (2021), 広島, 29V07-am07, オンライン.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J20I096
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	2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 稔磨^{***}, 内藤 匠海^{***}, 奥野 未侑^{*}

*富山県立大学工学部, **東北大学流体科学研究所, ***富山県立大学大学院工学研究科

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

本研究では、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。実験方法の詳細については研究成果[1]を参照されたい。

図4に流速 U_∞ 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_∞ 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_∞ 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_∞ 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 $M_s = 0.18$ 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, $M_s = 0.18$ 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, M_s 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.

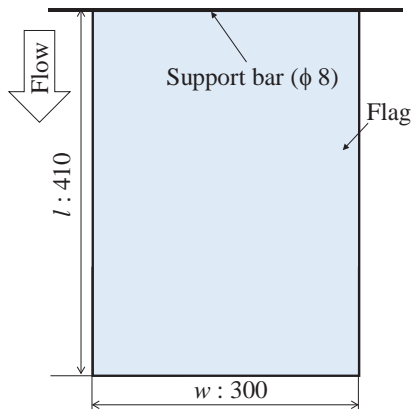


図1 実験に使用した旗

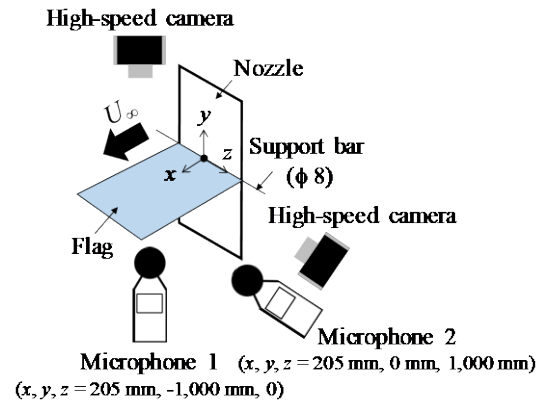


図2 発生音と旗の動きの同時計測方法

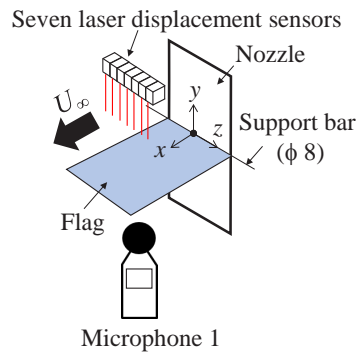


図3 発生音と旗の振動の同時計測方法

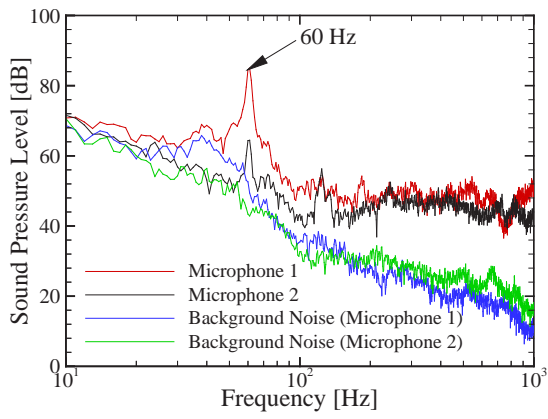


図4 発生音の計測結果

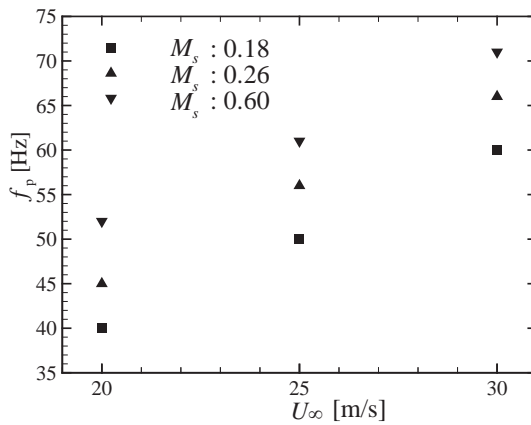


図5 発生音の周波数と流速の関係

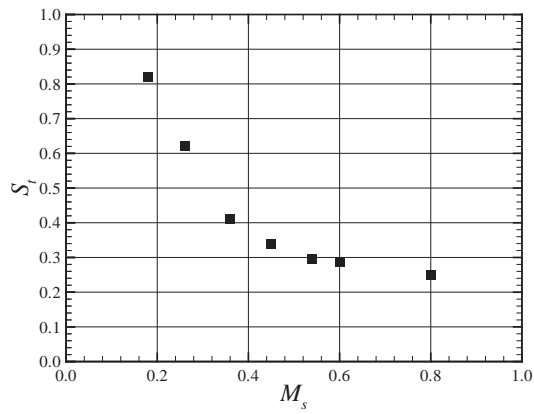


図6 St と M_s の関係

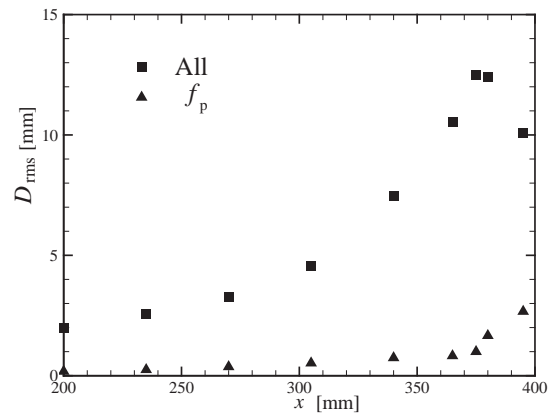


図7 各流れ方向位置の振動の大きさ

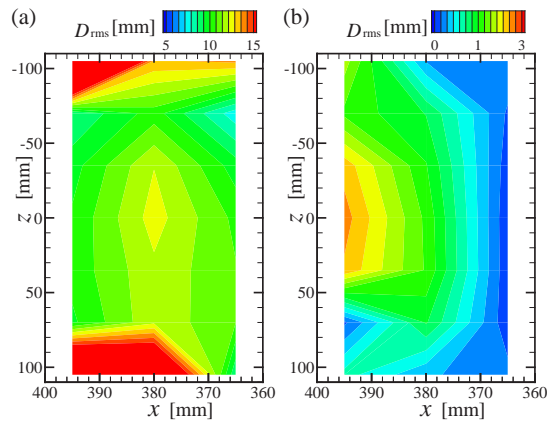


図8 各位置の振動の大きさのコンター図

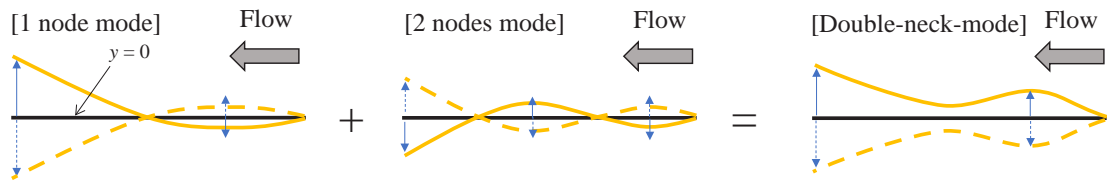


図9 旗の振動モード

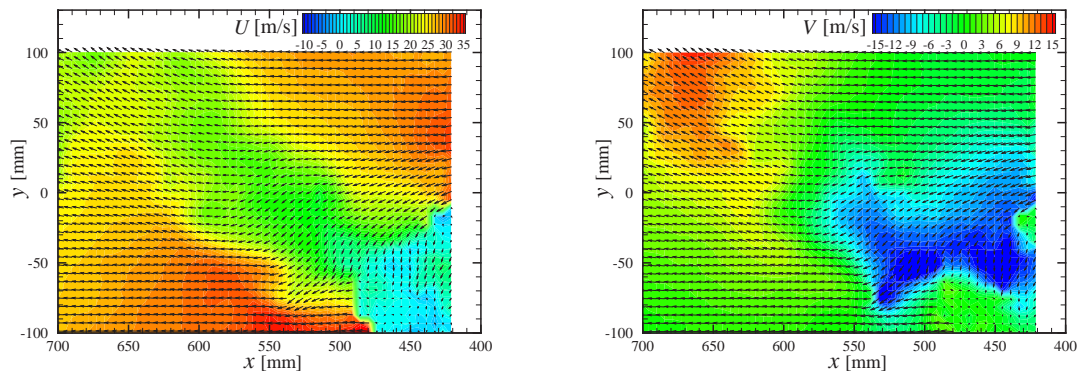


図10 旗の後流の様子 ($U_\infty = 25$ m/s)

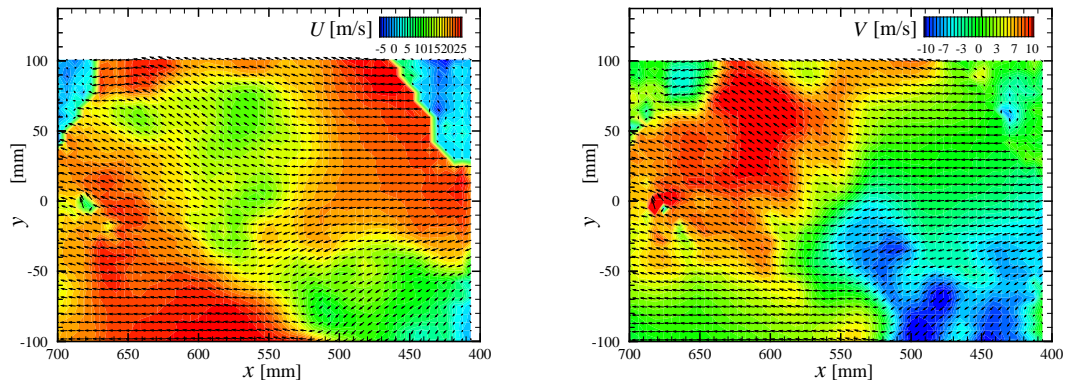


図 11 旗の後流の様子 ($U_\infty = 30 \text{ m/s}$)

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. まとめと今後の課題

これまでの研究の結果、弾性体の変形モードと発生音の関係、および、弾性体の後流の流れ場の構造と発生音の関係を明らかにすることができた。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して本研究を終了する。特に(b)については未だ世界でも計測事例が無いことから、可視化計測技術の観点からも価値が高いものと予想される。

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] R. Nishikawa, O. Terashima, Y. Konishi and M. Okuno, Noise Generation of Fluttering Flag in a Free Stream, *J. Fluid Sci. & Tech.*, Vol. 16, No. 1, (2021), JFST0005, doi: 10.1299/jfst.2021jfst0005.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] 奥野未侑, 西川礼恩, 寺島修, 小西康郁：一様流中の変形を伴う物体の後流構造と発生する流体音の関係, 日本機械学会北陸信越支部第 58 期総会・講演会, (2021), Paper No. F025 (5 Pages).
- [3] 奥野未侑, 西川礼恩, 寺島修, 小西康郁：一様流中の変形を伴う物体から発生する流体音の特性とその発生メカニズム, 日本機械学会北陸信越支部学生会第 50 回学生員卒業研究発表

講演会講演論文集, (2021), Paper No. D024 (2 Pages).

*[4] M. Okuno, R. Nishikawa, O. Terashima and Y. Konishi: Relation between flow-induced vibration and noise generation of a fluttering flag in a free stream, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai*, (2020), CRF-42, pp. 71-72.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）
なし

Project code	J20I097
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Evaluation of Natural Convection Flow under Spatiotemporally Variable Thermal Condition

Atsuki Komiya*†, Nicholas Williamson**††
 Junhao Ke**, Linjing Zhou**, 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

The present study concerns a temporally developing parallel natural convection boundary layer with Prandtl number $Pr = 0.71$ over an isothermally heated vertical plate. Three-dimensional direct numerical simulations (DNS) with different initial conditions were carried out to investigate the turbulent statistical profiles of mean velocity and temperature up to $Gr = 7.7 \times 10^7$, where Gr is the Grashof number. By virtue of DNS, we have identified a constant heat flux layer and a constant forcing layer in the near-wall region. In the present study, we have employed two DNS (DNS-A and DNS-B) to ensure that the fully turbulent regime of the NCBL is independent of initialization. The different initializations of the spanwise perturbation lead to different laminar–turbulent transition pathways for the NCBL, as demonstrated by Fig.1. In DNS-A, the nonlinear interactions between the larger amplitude spanwise modes and the streamwise modes lead to an earlier three-dimensional transition, and the transition behavior, shown in Fig.1 (a–d), is similar to the data reported in literatures; whereas in DNS-B, the smaller initial background amplitude delays the transition so that the nonlinear interaction where energy is transferred between streamwise and spanwise modes occurs at a much higher Gr or time t than in DNS-A. In DNS-B, the accumulated momentum in the laminar regime undergoes transition via the ejection of the sprout-like convective rolls with the most unstable streamwise mode, as shown in Fig.1 (e, f). The detached convective rolls then begin to break into smaller scale structures, as depicted in Fig.1 (g), and finally attain the turbulent regime shown in Fig.1 (h). We conjecture that DNS-A represents a more ‘natural transition’ because of its similarity to previous experimental studies and that DNS-B as an example of a flow which undergoes a substantially different transition pathway. Nevertheless, despite the weakly three-dimensional transition for DNS-B, the velocity and temperature profiles proposed here are initial condition independent once the wall shear and wall heat flux are identified.

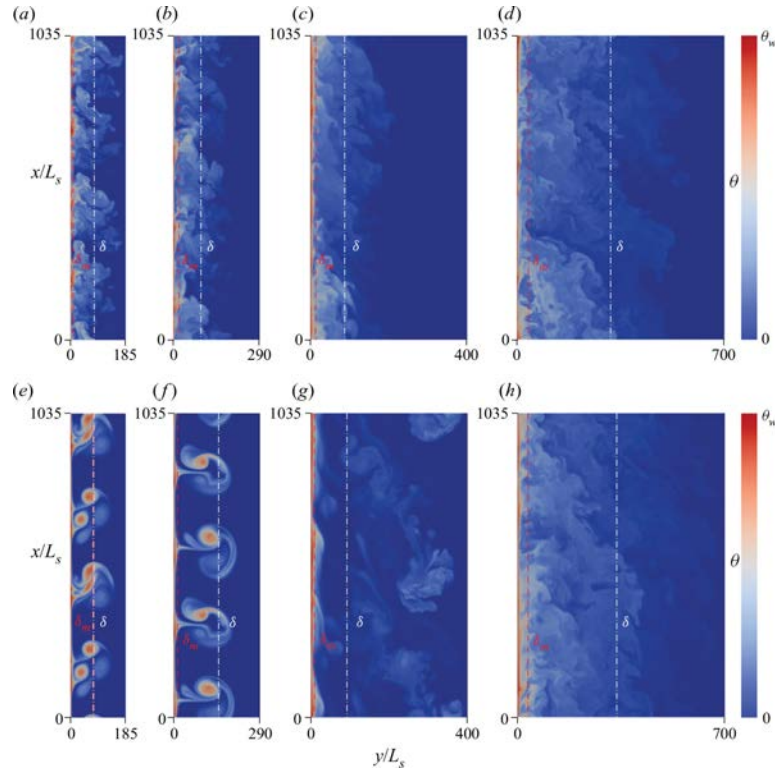


Figure 1 : Visualization of the midspan temperature field for the laminar–turbulent transition of DNS-A (a–d) and DNS-B (e–h).

3. Achievements

In the present study, the law of the wall has been investigated for the mean temperature and velocity profiles of a parallel temporally developing NCBLs. The dependence of the turbulent statistics on the initial conditions are also investigated using two DNS. Although the two DNS undergo different laminar–turbulent transition mechanisms, they still share the same Gr scaling relationship. Based on the DNS data, we have identified a constant flux layer in the near-wall region, similar to the observations in spatially developing NCBLs in literature.

4. Summaries and future plans

In this year, we performed numerical simulations and investigated the NCBLs structure. The ongoing analysis on the outer region of the turbulent boundary layer will be focused on as future plan.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - [1] J. Ke, N. Williamson, S.W. Armfield, S.E. Norris and A. Komiya: Law of the wall for a temporally evolving vertical natural convection boundary layer, *J. Fluid Mech.*, 902 (2020), A31, doi: 10.1017/jfm.2020.621.
- 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: Integral Modelling of an Unsteady Natural Convection Boundary Layer, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-83, pp. 143-144.
- 3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J20I099
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	2020.4～2021.3
継続年数	3年目

デブリ除去のための伝導性テザーの構造形態に関する実験的研究
Experimental Study on Structural Shape of Conductive Tether for Removing Space Debris

楨原 幹十朗*†, 大谷 清伸**††,
 富崎 帆乃花*, 小林 稜平*, 鈴木 麻友美*
 *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

新しい導電性テザー構造の提案と実証を大きな研究目的とする。新しい導電性テザー構造として中空円筒メッシュテザーの構造形態を提案している。中空円筒メッシュテザーの特性を明らかにして、高い性能を実証することを研究目的の1つ目とする。実験により、デブリ衝突位置と中空テザーの損傷との関係性を明らかにして有用性を示す。衝突破壊力学の学術観点からロバストなテープ形状テザーの構造形態研究も進めることを研究目的の2つ目とする。超高速衝突実験によって、微小デブリの衝突に対する変形したテザーの破壊形態を詳細に調べ、その構造特性を定量的に評価する。

2. 研究成果の内容

テザー衝突実験の方法としては以下の手順に従った。

1. 両端を治具で固定したテザーをチャンバー内に設置しアルミ球を衝突させた。
2. デブリクラウド発生やの複数衝突の物理現象を、高速度カメラで撮影した。
3. 衝突を変化させた衝突実験を行い、中心軸から偏差した衝突の損傷を評価した。
4. 変形したテザーへの衝突による損傷を評価した。

ターゲットは、厚さ 0.3 mm のアルミニウム平板を使用した。ここで、ループ状にねじれたテープテザーを中空円筒形状だと見立て、中空円筒ターゲットへの衝突実験を行った。中空円筒ターゲットの半径、すなわち、ループの大きさを 5 通り (15, 25, 30, 50, 100 mm) に変化させ、損傷の違いを評価した。図 1 は衝突後の中空円筒ターゲットを展開した様子である。衝突後のターゲットには、2 つの損傷穴が確認できる。1 つは、プロジェクタイトルにより生じた損傷穴である。これを Hole 1 とし、横方向の損傷長さを a_1 、周方向の損傷長さを b_1 とする。一方の損傷穴は、プロジェクタイトルがターゲットに衝突した直後に発生したデブリクラウドによる最大の損傷穴である。これを Hole 2 とし、横方向の損傷長さを a_2 、周方向の損傷長さを b_2 とする。ここで、損傷長さは損傷穴から伸展したき裂も含む。図 2 に、本実験結果をまとめる。横軸は中空円筒ターゲットの半径 r 、縦軸は損傷長さを示す。始めに、Hole 1 の損傷長さについて考察する。全てのターゲットにおいて、損傷長さ a_1 、 b_1 の値に大きな変化はなかった。ここで、衝突点近傍において、プロジェクタイトルは斜め板への衝突とみなすことができる。全 5 回の実験において、高さ比 0.5 で統一した。従って、5 回の実験は全て同じ条件下であると言え、損傷長さ a_1 、 b_1 に変化がなかったと考えられる。次に、Hole 2 のテープテザーの横方向の損傷長さ a_2 について考察する。図 2 より、ターゲット半径 r が 15 mm から 50 mm に増加するに伴い、損傷長さ a_2 は緩やかに増加した。これは、ターゲット半径の増加により、発生したデブリクラウドがターゲット

後方に到達するまでに、広範囲に拡散したためである。また、ターゲット半径が 50 mm から 100 mm に増加するに伴い、損傷長さ a_2 は緩やかに減少した。これは、ターゲット半径の更なる増加により、デブリクラウド全体の密度が低下し、貫通し辛くなったためだと考えられる。以上より、中空円筒ターゲットの半径の違い、つまり、変形したテープテザーのループの大きさの違いにより、テープテザーの損傷が変化することがわかった。

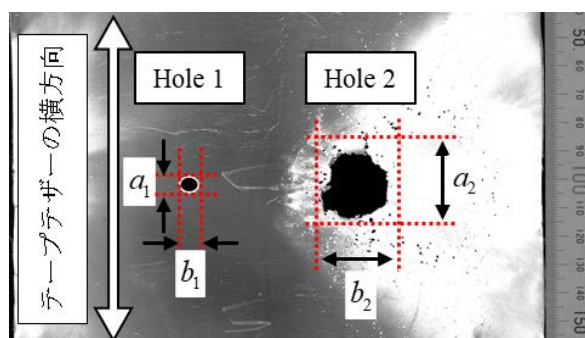


図 1 衝突後の中空円筒ターゲットの展開図

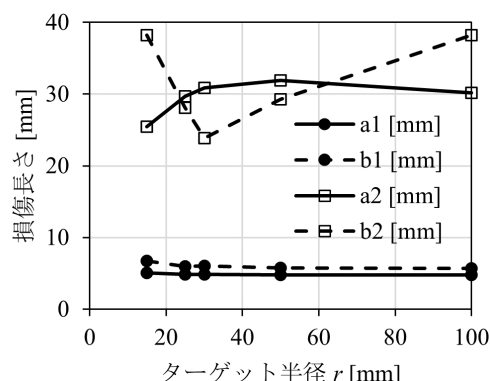


図 2 衝突実験結果

3. 研究目標の達成状況

変形したテザーへの衝突損傷を定量的に評価出来た。テザーへのデブリ衝突でデブリクラウドが生成される様子までも高速度カメラによって捉えることに成功した。テザーの衝突現象を把握して評価し、目標である衝突損傷を定量的に評価できており、十分に研究目的を達成している。

4. まとめと今後の課題

変形したテザーへのデブリ衝突による損傷評価を行った。本研究では、変形したテザーへのデブリ衝突を模擬した衝突実験を実施し、変形の大きさの違いにより損傷が変化することがわかった。また、変形の有無によるテザーの損傷長さを比較し、変形により大きな損傷を被ることがわかった。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[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] H. Tomizaki, R. Kobayashi, M. Suzuki, N. Karasawa, S. Hasegawa and K. Makihara: Assessment of Space Debris Collisions Against Spacecraft with Deorbit Devices, *Advances in Space Research*, 67 (2021), pp. 1526-1534, doi: 10.1016/j.asr.2020.12.018.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[3] H. Tomizaki, R. Kobayashi, M. Suzuki, N. Karasawa, K. Ohtani and K. Makihara: Damage Assessment for Twisted Tape Tether on Space Debris, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-25, pp. 40-41.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J20I100
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd 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

We applied DCDA method to the core sample from DUGLab project. We measured the core diameters of rock core samples at several different points along the core. We measured the asymmetric variation of core diameter with specially designed apparatus which is equipped in our lab. From the measured data, we can determine diameter difference and orientation of the maximum stress in the plane normal to the borehole axis.

Fig. 1 shows one example of estimates of maximum orientation of maximum stress along the core (top figure) and the one of the core sample from DUGLab (bottom figure). The result shows the orientation of maximum systematically varies with the measurement location along the core long-axis. This variation can be seen only in one of three core samples we measured. This observation could be artifacts from the

drilling or core retrieved process since the DCDA method is highly influenced by the quality of the core. Currently, we are working on the interpretation of this variation by referring the drilling log and other geophysical data.

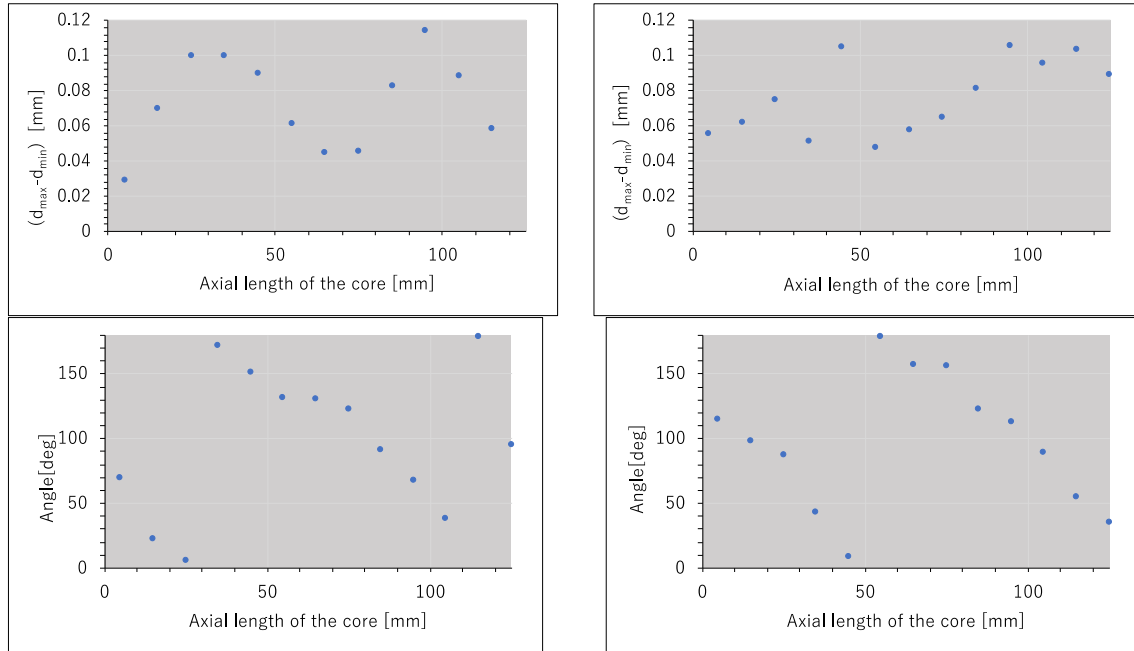


Figure 1 : One example of the result of DCDA measurement on rock core samples from DUGLab. Upper column shows the core diameter measurement results and lower column shows the measured orientation of maximum stress.

3. Achievements

We completed more measurements on the rock core samples from DUGLab. The results of the measurements leads the in-situ stress model in study field and heterogeneity in orientation of stress. In addition, some of the rock core samples accompanies the artifact which is probably oscillation of drilling bit.

4. Summaries and future plans

We have applied DCDA method to the core retrieved from greater depth at DUGLab. The results of measurement show meaningful result which encourage further measurement of core with DCDA method. We will compile all of the measurements results of DCDA method and combined with other measurement results obtained from other measurement to model in-situ model for entire study field.

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, and T. Ito: First Application Result of DCDA Method to the Rock Core Samples from Underground Geoscience Laboratory, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-70, p. 122.

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”).

Project code	J20I101
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd 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). Electron microscopy revealed exceedingly small SWCNT bundles evenly distributed throughout the entire filament surface. When the electric field was applied, an obvious SWCNT alignment was observed in the longitudinal direction. The preferred SWCNT orientation increased the UTS, strain-to-failure and toughness of the filament nanocomposites by 31, 47 and 51 %, respectively compared to randomly aligned materials. Noteworthy, the tensile strength of the nanocellulose composites with high SWCNT content (i.e. 50 wt%) reached unprecedented values above 330 MPa. The applied electric field also induced a 26 % increase in the electrical conductivity of the filaments due to the formation of a percolated network through end to end junctions between aligned SWNTs. The filament nanocomposites exhibited excellent sensing performance toward liquid water, which can be attributed to its reversible swelling behavior in the presence of water molecules.

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. The project members are currently preparing a manuscript to summarize the research outcomes, which we anticipate to submit to ACS Nano or RSC Materials Horizon by the end of summer 2021. In addition, Prof. Takana has been invited to serve as a committee member for PhD defense of Heather G. Wise, which will take place remotely at the end of May 2021. Another UW PhD student, Dylan Edmundson, is currently being trained on nanocellulose synthesis and filament characterization to ensure a smooth transition for the rest of the project. The third year of the project will explore the potential of filament nanocomposites as energy generators based on a transpiration driven electrokinetic mechanism. With these advances, the PIs will be in a good position to pursue external funding opportunities. The PIs also plan to foster student exchange between their institutions through the development of an educational summer program.

5. Research results

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

[1] H. G. Wise, H. Takana, F. Ohuchi, A. B. Dichiara: Field-Assisted Alignment of Cellulose Nanofibrils in a Continuous Flow-Focusing System, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 12, No. 25, (2020), pp. 28568-28575.

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

[2] H. Wise, H. Takana and A. Dichiara: Aligned Conductive Composite Filaments using Field Assisted Flow Focusing System, *Proceedings of the 17th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, online, (2020), OS5-13, pp. 227-228.

*[3] A. Dichiara, H. Wise and H. Takana: Multifunctional hybrid filaments comprising aligned nanocellulose and carbon nanotubes synthesized by a field-assisted flow focusing method, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, online, (2020), CRF-81, p. 140.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable.

(Award)

Not applicable.

(Press release)

Invited journal cover in ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 12, No. 25, (2020).

Press release from Tohoku University, 「夢の新素材セルロースナノファイバーを原料とした革新的セルロース単繊維創製法を開発 —電場と流れ場による繊維配向制御で高強度化に成功—」, Oct. 5th, 2020.

日本経済新聞電子版, 「東北大、セルロースナノファイバーを原料としたセルロース単繊維の高強度・高靱化に成功」, Oct. 5th, 2020.

日経 XTECH, 「電場と流れ場で CNF を整列、セルロース繊維の強度もじん性も向上」, Oct. 13th, 2020.

Project code	J20I102
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	3rd year

Interferometric Measurement of Temperature Fields in Turbulent Flows

Juan F. Torres*†, Atsuki Komiya**††
 *College of Engineering and Computer Science,
 The Australian National University
 **Institute of Fluid Science, Tohoku University
 †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In the 3rd year, the project focused on reporting improvements of the optical and applications simulations measurements of heat and fluid flow (one journal paper published in *Physical Review Applied*). The phase-shifting interferometry technique was examined using different phase-shifting algorithms and applied to natural convection in a cavity. Two additional applications of interferometry were explored in-depth: investigation of mass transfer control through macroisopore membranes (journal paper under preparation; one published conference paper), and investigation of thermal boundary layer control by an impinging jet (journal paper under review in *Physical Review Fluids*; another journal paper under preparation; one published proceedings paper).

2. Details of program implementation

The simultaneous phase-shifting and PIV technique developed in the 1st and 2nd year of the project were published in *Physical Review Applied* in the context of measuring Rayleigh–Bénard convection in a cubical cavity to investigate flow transition. The main results are shown in **Fig. 1**.

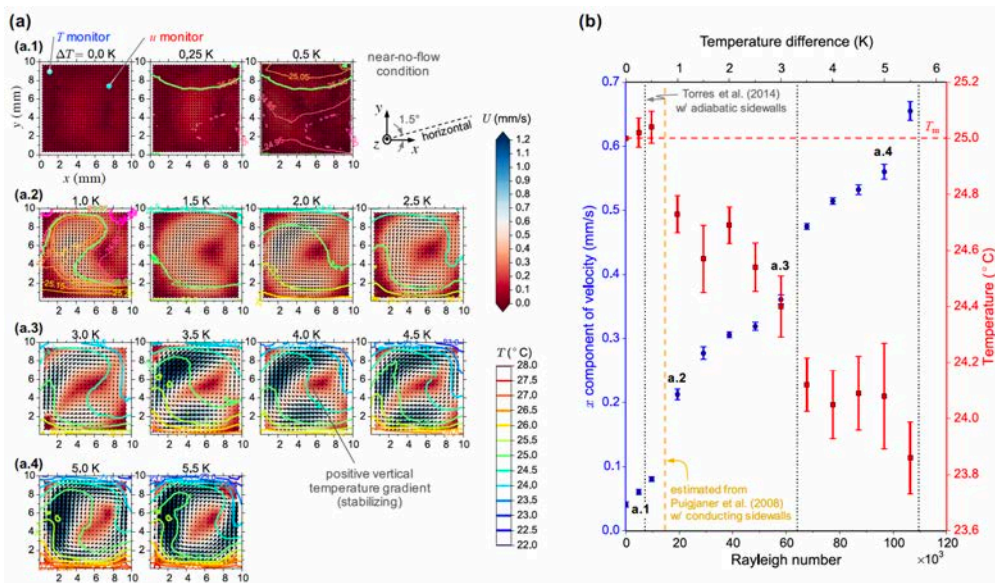


Figure 1: Characterization of Rayleigh–Bénard convection in a cubical cavity using the proposed optical technique. (a) Temperature field on the xy plane averaged along

the z direction; overlapped with the xy velocity profile on the plane $Z=7.5$ mm. (b) Empirical bifurcation diagram using the x component of the velocity at $(x,y) = (7.5,7.5)$ mm (left axis) and the temperature value at $(x,y) = (1,9)$ mm as a function of Ra , which is linearly dependent on the temperature difference ΔT . The error bars for velocity correspond to the standard deviation of ten consecutive PIV measurements (with a time interval of 0.2 s), whilst the error bars for temperature correspond to a 3.0% of ΔT experimental error accounting for PSI precision plus the standard deviation in the boundary temperature during the PID control.

This phase-shifting technique was also applied to investigate the mass transport through membranes having different isopore size. The diffusion field and mass flux as a function of time are shown in **Fig. 2**. The macro-isopore-membrane not only sets the mass flux through the membrane, but it also makes it quasi-steady, which is a requirement in many bio-technology applications including drug release. We are currently preparing a journal paper on this topic.

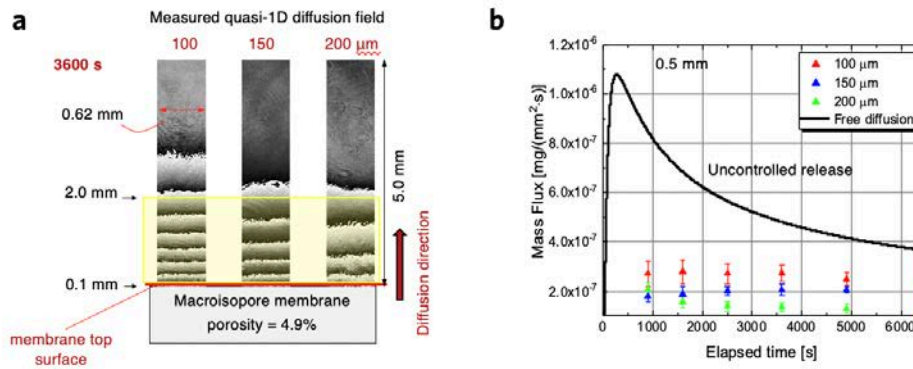


Figure 2: Experimental evidence of controllability using a macroisopore membrane. (a) Visualization of mass diffusion field above macroisopore membranes with different pore size. (b) Measured transient mass flux at 500 μm above the membrane and comparison with uncontrolled theoretical mass flux. The stability of the mass flux, in comparison to free diffusion, was achieved with the macroisopore membrane, while the pore size determined the mass flux.

Interferometry, in conjunction with large eddy simulations (LES), was also utilized to investigate resonance-driven heat transfer enhancement in a natural convection thermal boundary layer developing along a vertical isothermal plate. The concept of the work as well as the main findings are shown in **Fig. 3** (currently under review in *Physical Review Fluids*). The optical setup was used to visualize the thermal boundary layer in the steady state region (Z1) and region where transition from laminar to turbulence occurred (Z2). Another journal paper is currently under preparation detailing the effect of changing the impinging region of the jet, as well as the effect on extremely large Ra_y .

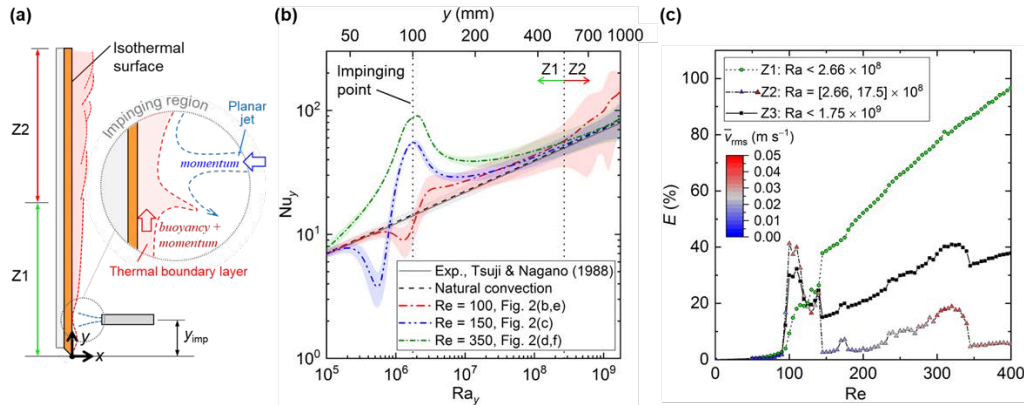


Figure 3: Heat transfer enhancement of natural convection ($Ra_y < 1.75 \times 10^9$) by an impinging planar jet ($Re < 400$). (a) Schematic of the physical problem, consisting of natural convection from an isothermal vertical wall on which the jet impinges near the leading edge. The inset focuses on the impinging region where the unbalanced forces of buoyancy and momentum can cause flow instability. (b) Nu_y as a function of Ra_y for natural convection and three jet Re . (c) Dependence of heat transfer enhancement E on Re in two regions: Zone 1 (Z1) for $Ra_y < 2.66 \times 10^8$, and Zone 2 (Z2) for $Ra_y = 2.66 \times 10^8$ to 1.75×10^9 ; Zone 3 (Z3) comprises both zones. The large E at moderate Re and its associated cause (resonance) is the main focus of this study. The colorbar shows the RMS velocity probed at $y = 700$ mm.

3. Achievements

- Completed **one** jointly supervised undergraduate thesis (ANU Honours).
- Completed **two** jointly supervised Tohoku University Master's theses.
- Produced **two** journal papers: one published (PRApplied) and one under review (PRFluids).
- Produced enough scientific results for **two** additional journal papers. To be submitted in 2021
- Produced **four** joint conference papers: two in ICFD and two in Japanese Mechanical Society Conference.

4. Summaries and future plans

In summary, we have developed the optical technique and applied it to three physical settings: Rayleigh-Bénard convection in a cubical cavity (one paper published), heat transfer control by flow resonance in a thermal convection boundary layer by an impinging jet (under paper review and another under preparation), and mass transfer control through membranes (under preparation). Concerning future plans, we will prepare and submit shortly the paper that is pending. We have also recently commenced a joint project (funded by the Foundation for Australia-Japan Studies) on solar-driven desalination, jointly supervising a PhD based at ANU. We expect to strengthen future collaborations based on that topic, leveraging the optical setup supported by this Collaborative Project.

5. Research results

1) Journal

- [1] J. F. Torres, Y. Zhao, S. Xu, Z. Li and A. Komiya: Optical Method for Simultaneous High-Resolution Measurement of Heat and Fluid Flow: The Case of Rayleigh-Bénard Convection, *Physical Review Applied*, Vol. 14, No. 5, (2020),

- 054038.
- [2] 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, *Physical Review Fluids*, under review (submitted in December 2020).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [3] R. Watanabe, J. F. Torres, Y. Kanda and A. Komiya: Evaluation of the possibility to control protein mass diffusion by micro pores, *Proceedings of Thermal Engineering Conference 2020, The Japan Society of Mechanical Engineering*, (2020), F125, (in Japanese).
- [4] N. Ogasawara, Y. Kanda, J. F. Torres and A. Komiya: Thermal Boundary Layer Control in High Rayleigh Number Natural Convection by Impinging Flow, *Proceedings of Thermal Engineering Conference 2020, The Japan Society of Mechanical Engineering*, (2020), E213, (in Japanese).
- *[5] S. Xu, Y. Zhao, A. Komiya and J. F. Torres: Quantitative visualization of flow bifurcation in laminar Rayleigh-Bénard convection with combined PSI and PIV, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-85, pp.147-148.
- [6] A. Komiya, R. Watanabe, Y. Kanda, J. F. Torres and S. Livi: Effect of Micropores Patterning in Separated Plate on Protein Hindered Diffusion Phenomena, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), OS20-9, pp. 194-195.
- 3) Patent, award, press release etc.
- (Patent)
Not applicable.
- (Award)
Not applicable.
- (Press release)
Not applicable.
- (Thesis)
- [1] Shuqi Xu: “Visualisation of Natural Convection in a Cubical Cavity”, ANU Honours Thesis (2020).
- [2] Naoto Ogasawara: “Thermal boundary layer control over a wide range of Rayleigh number natural convection by impinging flow”, Tohoku University Master’s Thesis (2020).
- [3] Ryo Watanabe: “A Study of Spatial Diffusion Control Using Micro-Pore”, Tohoku University Master’s Thesis (2020).
- (Grant & press release)
Foundation for Australia Japan Studies (FAJS), *Contributing to Global Freshwater Security with Novel Solar-driven Desalination Methods*, Dr Juan Felipe Torres (ANU) and Prof Atsuki Komiya (Tohoku University) lead the project to develop a scalable desalination method based on a solar-driven, low-energy technique using thermophoresis to achieve a 95 per cent salinity reduction in seawater.
AUD \$132,000. Press release: <https://www.fajs.org/2020-grant-awardees>

Project code	J20I103
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Data-Driven Modeling of Flow in Complex Structures

Anna Suzuki*†, James Minto**††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

** Civil and Environmental Engineering, University of Strathclyde

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

For energy resource development (for example, geothermal energy) in underground, it is necessary to understand the fluid flow flowing through rock fractures based on measurable data. If the relationship between "structure" and "flow" is quantified and formulated, we can develop energy resources properly. In this research, we will carry out a structure-controlled flow experiment and numerical simulation using a 3D printer. We prepare multiple crack network patterns and calculate their flow, mass transfer, and heat transfer phenomena by two types of numerical simulations. One is OpenFOAM, which performs a direct simulation, and the other is TOUGH2, a fluid, mass and heat transfer simulator for multi-phase porous materials. Using the obtained numerical calculation results as learning data, a relationship between a complicated structure and flow phenomena is formulated by a data-driven approach based on machine learning.

2. Details of program implement

We will prepare a large number of highly reliable learning data by a structure-controlling flow experiment and numerical simulation using a 3D printer. Then, 3D complex crack network is quantified by topological data analysis. By using the flow data and structure data, we will proposal of a data-driven model for understanding the relationship between geometric structure and measured data (concentration change and temperature response).

The research tasks are as follows:

- (1) Structural control type flow experiment and numerical simulation using 3D printer
 - Crack structure design and sample creation
 - Acquisition of benchmark of concentration change and heat transfer response by experiment
 - Collect learning data by numerical simulation
- (2) Quantification of complex crack structure by persistent homology
 - Evaluation of 3D crack network model
 - Comparison with other analysis methods
- (3) Development of a data-driven model for the relationship between complex crack structure and measurement data
 - Selection of learning model for machine learning (SVM, CNN, etc.)
 - Model construction
- (4) Physical semantics of complex mathematical model parameters
 - Elucidation of the relationship between model parameters and structure

Dr. Minto has been helping to develop the simulation environment in IFS supercomputing system since 2019. Now we can run simulation with complex fracture

networks.

3. Achievements

(1) Structural control type flow experiment and numerical simulation using 3D printer
 We generated synthetic fracture structure by using OpenSCAD and run transport simulation by OpenFOAM in the supercomputing system. Figure 1 show the results of tracer response for the simple fracture. When increasing in fracture aperture, the peaks of tracer response appear slowly. Figure 2 show the effect of number of flow paths on tracer reponses. When increasing in the number of fractures, the peaks of tracer response appear slowly. These results suggest that tracer response reflect the fracture structure and would be useful to estimate the structures.

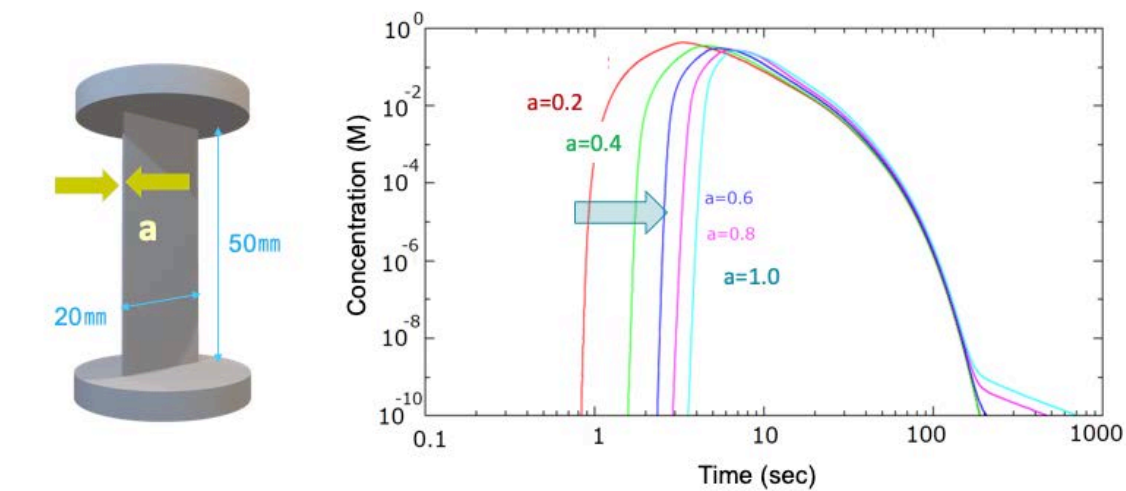


Figure 1 : Effect of fracture aperture on tracer response data.

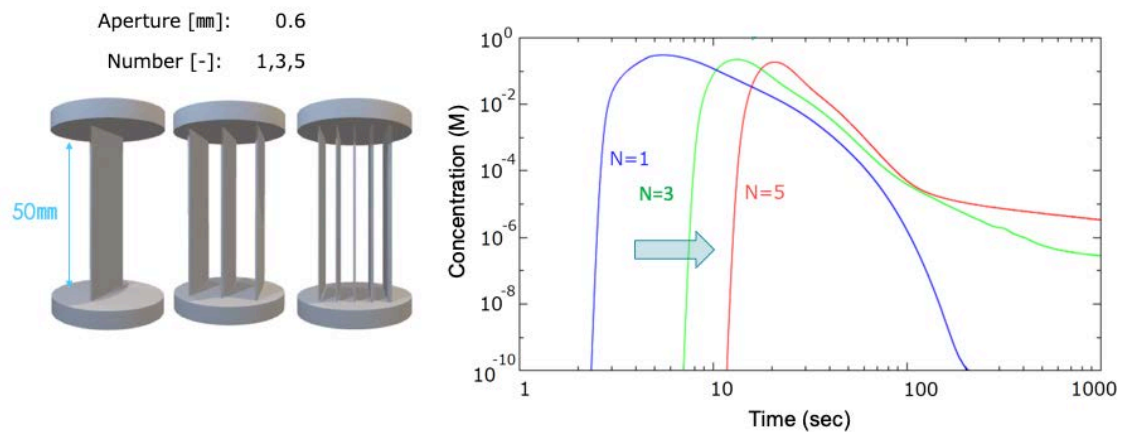


Figure 2 : Effect of number of flow paths on tracer response data.

4. Summaries and future plans

The accuracy of the machine learning model depends on the ability to prepare a large number of reliable learning data. Flow experiments using a 3D printer that can control the crack structure provide benchmark results to compare with numerical simulation, which can ensure the accuracy of dataset. By using a supercomputer system, a large amount of data can be generated, and learning data for learning by ML can be secured.

Guiding this relationship between data-driven flow and structure will be a new approach in the field of data science as well.

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. Suzuki and J. Minto: Data-driven modeling of flow in complex structures, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Online, (2020), CRF-43, pp. 73-74.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

課題番号	J20I104
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目（発展）

**火星探査航空機高高度試験機の多自由度空力—飛行連成計算と飛行制御最適化による
動的特性理解**

**Multidimensional Aerodynamic-Flight Simulation for Mars Airplane Balloon Experiment and
Investigation of Its Flight Characteristics by Aerodynamic Control Optimization**

金崎 雅博*†, 永井 大樹**††

*東京都立大学システムデザイン学部, **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

火星探査航空機の研究開発の一環として、大気球を用いたモデルによる飛行試験が予定されている。試験の実施に向けて、実際の飛行試験とその後の分析に向けて、飛行特性や空力制御特性の詳細な理解が求められる。本研究では、申請者らにより概念検討が行われた火星探査航空機に向けた次期高高度試験機 MABE-2 について、横方向運動の飛行経路への影響性に関しての検証を行いその結果に基づくフライトシミュレーションの実施を目的とする。

2. 研究成果の内容

前年度に引き続き、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics : CFD）により、横方向の動特性を取得した。特に、第 1 図に示す通り、ピッチング運動による揚力の軸方向変化のほか、ローリングによる軸力・揚力のスパン方向変化、ヨーイングによる横力の軸方向変化などの分析を行った。これらの図から、ローリングにより、アドバースヨーの発生に制御を対応させるべきことや、ヨー方向には安定方向の力が働くことなどが理解された。

取得した横方向特性に基づき、本研究では MABE-1 の飛行試験とシミュレーション結果との相違を検証した。昨年度までの取り組みにおいて、縦運動のみを考慮した 3 自由度運動計算を行ったが、計算値と実験値に一部差が見られた。そこで、「ロール運動などの横運動は揚力や抗力など縦方向の力に与える影響が大きい」との仮説を立て、特に、揚力・効力への影響を考慮することとして、第 2 図に示すロール角、ヨー角の実験データを入力し、運動を解くことでそれぞれの影響性を調べた。第 3 図より、ロール角の変化により、揚力などや縦運動はほぼ影響を受けないことが分かった。これは MABE-1 の試験結果から、そもそも時間的にロール運動が抑えられていたことから予想された結果である。第 4 図より、ヨー方向の時間変化が、ピッチ角変化に影響を与え、その結果飛行経路に影響を与えたことが分かった。本検討では、一部 MABE-1 飛行試験での取得データを利用した。今後は、ロール角運動の影響などを仮定し、検証を行う予定である。

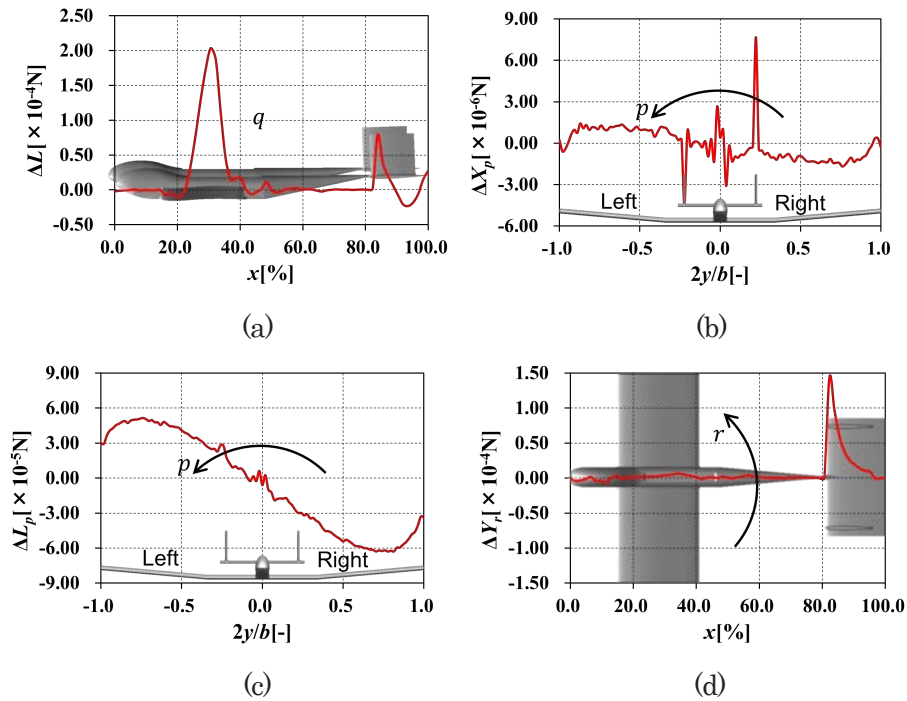


図 1 : 回転運動による空気力の変化. (a)ピッチング運動による揚力分布の変化, (b)ロール運動による軸力分布の変化, (c) ロール運動による揚力分布の変化, (d) ロール運動による横力分布の変化.

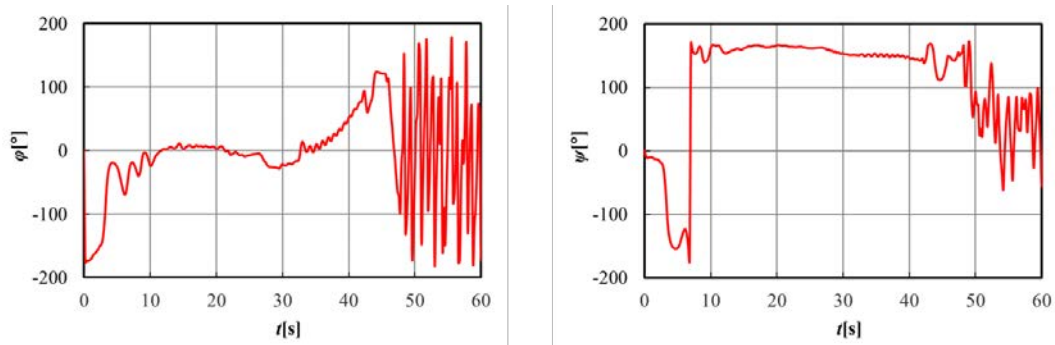


図 2 : MABE-1 飛行試験で取得したロール角 ϕ とヨー角

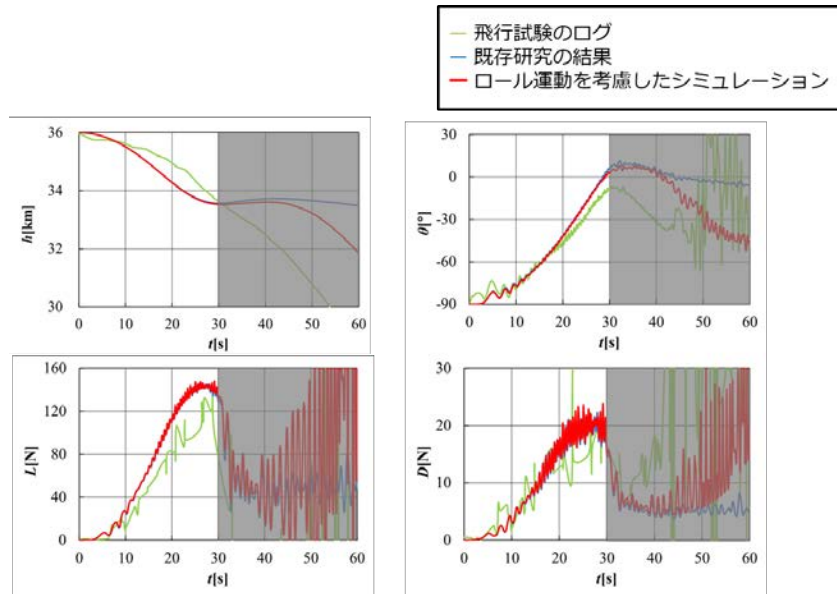


図3：MABE-1 飛行においてロール角変化を考慮したシミュレーション結果

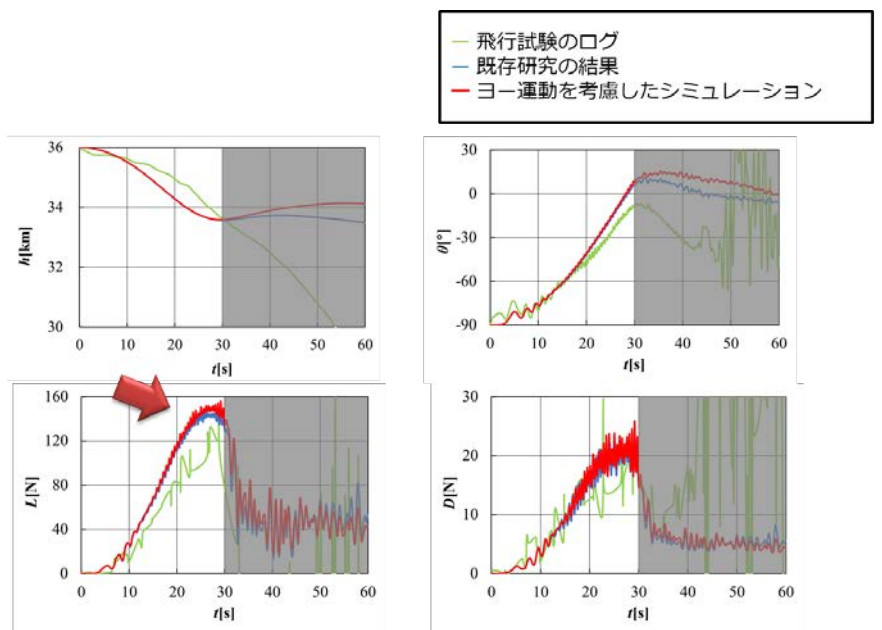


図4：MABE-1 飛行においてヨー角変化を考慮したシミュレーション結果

3. 研究目標の達成状況

本研究の目的を達するために次の目標を掲げた。

- ① 再設計機における多自由度運動特性の取得
 - ② MABE-2 飛行試験の事前・事後分析
 - ③ 空力制御の効果に関する知見の獲得
 - ④ 外乱の想定や、展開の実施、推進系付き形態など MABE-2 では考慮されていない機体概念の飛行特性調査予測への展開
- ①に関しては、横方向の運動モードも検証し、3軸全ての運動特性を取得した。②③については、CFDに基づく3軸全ての空気をを用いた空力-飛行連成計算を用いて、任意の飛行シ

ミュレーションを実施できるようになった。今後は、構造変形などの要素を考慮するなどの検討を続ける。④については準備中であるが、今年度の成果を活かす。

4. まとめと今後の課題

火星探査航空機大気球試験の実施に向けて、飛行特性や空力制御特性の詳細を試みた。本研究では、申請者らにより概念検討が行われた火星探査航空機に向けた次期高高度試験機 MABE-2 と先代機 MABE-1 について、横運動の影響性を調査した。まず、各軸方向に回転運動をさせた際の空力分布について可視化、考察を行った。そのうち、運動計算に実際の MABE-1 飛行結果のうち、ロールとヨーの履歴を用いて、それらの影響性について調査を行った。その結果、これらのうちヨー運動は飛行に影響を及ぼすことが理解されたが、構造変形などそのほかの要因の調査も必要であることが示唆された。

外乱がある中での飛行や、推進系付火星探査航空機の検討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] Kanazaki, M., Kittaka, K., Fujita, K., and Nagai, H.: Efficient Flight Simulation of MABE-2 Toward Global Trajectory Optimization, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, Miyagi, Japan, (2020), CRF-56, pp. 99-100.

[2] 橘高洋人, 金崎雅博, 藤田昂志, 永井大樹: 大気球試験機の空力-飛行シミュレーションに基づく大域的飛行・空力制御の最適化, 1D07, 第64回宇宙科学技術講演会, Virtual, (2020).

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20I105
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	2020.4～2021.3
継続年数	2年目

イオン液体の二酸化炭素吸収による光学特性の解明
Optical Characterization of Ionic Liquid upon Its Absorption of Carbon Dioxide Gas

古川 怜^{*†}, 高奈 秀匡^{**††}
大倉 美紅^{*}, 大内 二三夫^{***}

*電気通信大学基盤理工学専攻, **東北大学流体科学研究所
***ワシントン大学材料工学科
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

本研究では、イオン液体の二酸化炭素吸収量に伴う吸光度及び屈折率などの光学的特性の可逆的变化を利用し、イオン液体を液体コアとして利用する導波路型ガスセンサーの構築を目的とする。イオン液体は、その特異的物性から多分野での活用が見込まれる材料であるが、構成する塩の選択肢によって物性が大きく異なる。イオン液体の中でも CO₂ 吸収性能で先行研究例のある 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate ([emim][Ac])及び 1-butyl-3-methylimidazolium acetate ([bmim][Ac])について、CO₂ 吸収前後の物性調査を実施した。

2. 研究成果の内容

物性測定に先立ち、購入した[emim][Ac]及び[bmim][Ac]を封入したフラスコ内を-0.1 MPa に減圧し 80 °Cに加熱しつつ 1 週間攪拌することで精製した。この精製後、室温で 0.1 MPa の CO₂ をフラスコ内に充填し攪拌下で 72 時間曝露して CO₂ 吸収試料を調製した。各 CO₂ 吸収前後のイオン液体において、粘度、屈折率、吸光度をそれぞれ Anton paar MCR302, Anton paar Abbatmat, Jasco Corp. V-630 を使用して計測した。計測に使ったイオン液体の構造を Fig. 1 に示す。

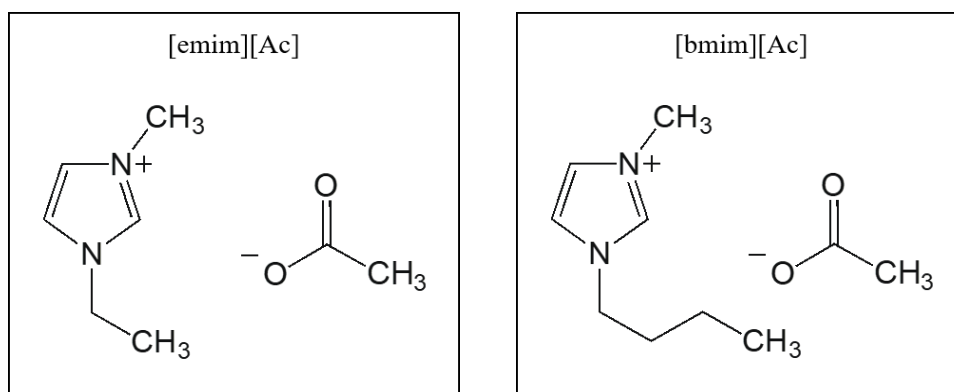


Fig. 1. Chemical structures of [emim][Ac] (left) and [bmim][Ac] (right).

結果, [emim][Ac]に比べ [bmim][Ac]の粘度が大きい傾向にあったが, いずれの液体についても CO₂ を吸収する前後で明確な粘度の変化は見られなかった. Fig. 2は各試料における屈折率の温度依存性の計測結果を表している. 両者共, 温度の上昇と CO₂ 吸収によって屈折率が減少する傾向が得られた. イオン間に働く相互作用の衰退が密度の低下を招き, 屈折率値の低下につながったと推測される. UV 可視光に対する吸光度にも CO₂ 吸収の影響が見られた. [emim][Ac]の場合は 400 nm 付近に特徴的なピークが現れ, CO₂ 吸収後に吸光度が

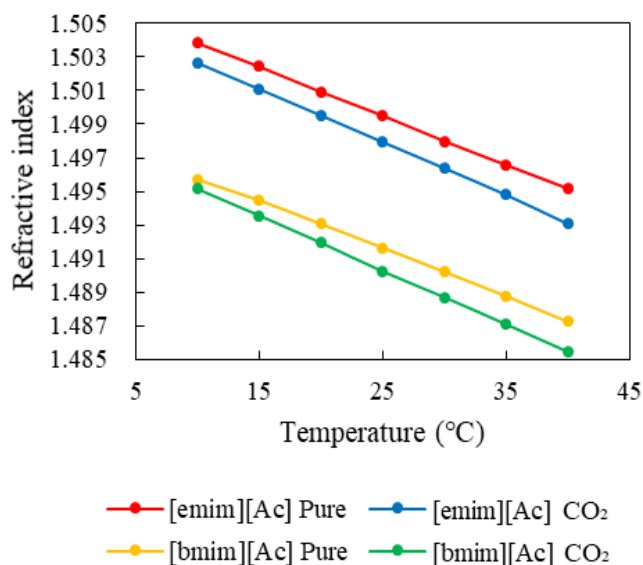


Fig. 2. Temperature dependence of the refractive index at the wavelength of 589.3 nm.

増大する様子が見られた. 一方, [bmim][Ac]では 400 ~ 500 nm にかけてピークが見られ, CO₂ 吸収後にはピーク位置がレッドシフトする傾向が示唆された. 以上より, 屈折率と吸光度の変化を利用することで CO₂ の検知に役立つ可能性が示唆された.

3. 研究目標の達成状況

CO₂ 吸収に利用される代表的なイオン液体において, CO₂ 含有量と光学特性の相関が得られることがわかった. 一方で, 液体コアの導波路デバイスを形成するにあたり, 封止方法などのアセンブリ上の課題が何点か浮上した.

4. まとめと今後の課題

[emim][Ac], [bmim][Ac]いずれのイオン液体においても, CO₂ を吸収する前後で, 屈折率と吸光度の数値に明確な変化が表れた. 粘度の値においては, 本研究での計測結果を含め, 複数の文献値にまたがり偏差が大きく, イオン液体独特の粘度に影響する結合要素の影響が示唆された.

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] M. Ohkura, H. Takana, F. S. Ohuchi and R. Furukawa: Fabrication of liquid-core fiber-optic structure for large-area CO₂ sensing using ionic liquids, *J. Fluid Sci. Technol.*, Vol. 16, No. 1, (2021), JFST0004.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] 大倉美紅, 古川愔, 大内二三夫, 高奈秀匡: イオン液体を用いた導波型二酸化炭素センサー, 第 69 回高分子学会年次大会, (2020), 1Pf072.
- [3] M. Ohkura, H. Takana, X. Wang, Y. Huang, F. S. Ohuchi and R. Furukawa: Property Investigation of Imidazolium-Acetate Based Ionic Liquids Using Experimental Measurements and Machine Learning, *Proceedings of the 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020)*, Sendai, (2020), OS5-11, p. 225.

- *[4] Miku Okura, Hidemasa Takana, Xinyue Wang, Yue Huang, Fumio Ohuchi, Xinyue Wang, Rei Furukawa: CO2 Detection Using an Ionic Liquid-Core Fiber-Optic Structure and Material Optimization Using Machine Learning, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, (2020), CRF-46, pp. 79-80.
- 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）
なし

Project code	J20I107
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year (progressing)

Numerical Analysis of a Morphing Slotted Jet Flap

Edyta Dzieminska*†, Sigeru Obayashi**††

Yuki Kamiyama*, Daisuke Yariwake*, Aiko Yakeno**, Yoshiaki Abe**

* Department of Engineering and Applied Sciences, Sophia University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this study is to verify the aerodynamic effects of the combination of a morphing flap and a propeller slipstream. Also, the aerodynamic effects of the morphing wing with the Distributed Electric Propulsion (DEP) system are investigated to improve the flight performance of DEP aircraft.

2. Details of program implement

In this program, three-dimensional aerodynamic characteristics of morphing flap models with propeller slipstream were computed using CFD solver, ANSYS Fluent.

Three-dimensional propeller-wing models equipped with a slotted flap with and without morphing were made, then lift and drag characteristics were computed. Figure 1 shows the comparison of the aerodynamic characteristics of the propeller-wing models with and without morphing. As the morphing area gets larger, the lift coefficient gets higher and lift-to-drag ratio gets lower. The morphing flap with large morphing angle has more lift coefficient and lower lift-to-drag ratio.

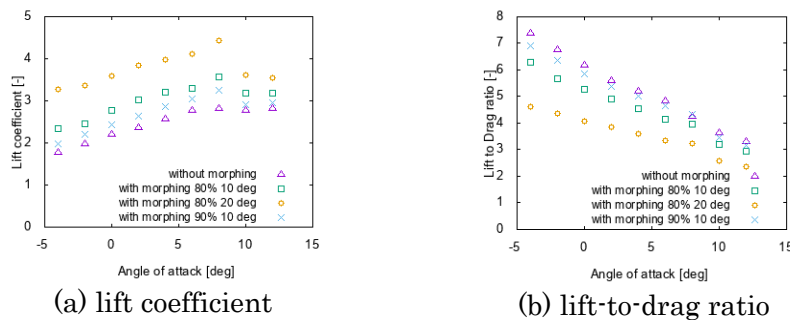
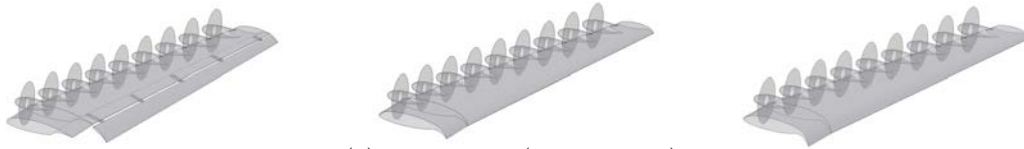


Figure 1: Comparison of the aerodynamic characteristics between the propeller-wing models with and without morphing.

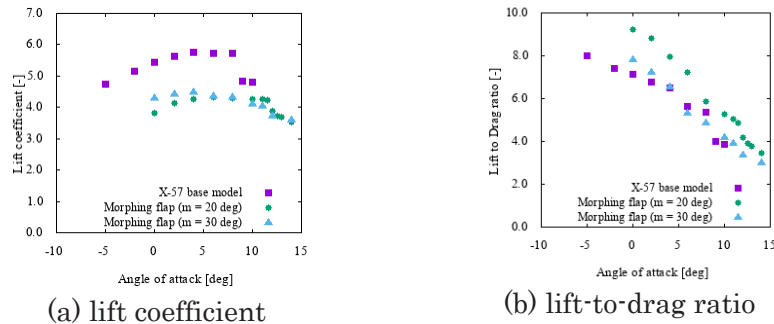
Furthermore, morphing wings with Distributed Electric Propulsion (DEP) system was investigated. Lift and drag characteristics of NASA X-57 aircraft with a Fowler flap as a base model and that with added morphing flap, as shown in Fig. 2, were computed to examine the aerodynamic effects of the morphing flap. The deflection angle of the morphing flap is represented as “m.”

Figure 3 shows that maximum lift coefficients of the morphing flap models are about 1.5 lower than the base model. However, lift and drag ratio of the morphing flap ($m = 20$ deg) is higher than other models for each angle. From this result, it is

thought that the deflection angle of the morphing flap can be optimized to maximize lift and drag ratio of the DEP aircraft.



(a) NASA X-57 base model (b) Morphing ($m = 20$ deg) (c) Morphing ($m = 30$ deg)
 Figure 2 : Geometries of the NASA X-57 aircraft base model and the morphing flap models (“m” represents the deflection angle of the morphing flap)



(a) lift coefficient (b) lift-to-drag ratio
 Figure 3 : Comparison of the aerodynamic characteristics of the NASA X-57 aircraft base model and the morphing flap models

3. Achievements

The lift enhancement by the combination of the slotted morphing flap and the propeller slipstream were verified. Also, the lift to drag ratio of the DEP aircraft was found to increase for certain morphing flap geometries.

4. Summaries and future plans

The aerodynamic effects of the combination of the morphing flap and the propeller slipstream were investigated to improve flight performance. More analysis and optimization processes are needed to search for the morphing flap geometries suitable for flights with less environmental impacts.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [1] D. Yariwake, Y. Kamiyama, E. Dzieminska, A. Yakeno, Y. Abe and S. Obayashi: 2D Numerical Analysis of Propeller-Wing Interaction with Morphing Flap, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS18-65, pp. 613-614.
 - *[2] Y. Kamiyama, D. Yariwake, E. Dzieminska, A. Yakeno, Y. Abe and S. Obayashi: Investigations on aerodynamic effect of morphing flap and distributed propulsion system, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-40, pp. 67-68.
- 3) Patent, award, press release etc.
 Not applicable.

課題番号	J20I109
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

翼形に発生する非定常キャビテーションの能動・受動制御
Active and Passive Control of Unsteady Cavitation on a Hydrofoil

伊賀 由佳*†, Ebrahim Kadivar**††

**東北大学流体科学研究所

** University of Duisburg-Essen, Department of Mechanical and Process Engineering

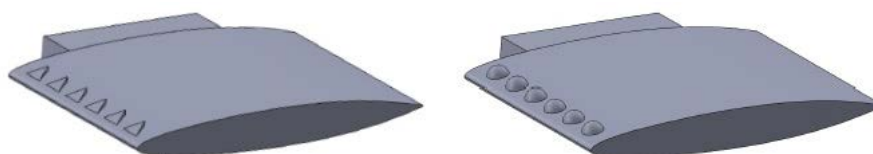
†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

非定常なキャビテーションは、流体機械の騒音、破損、性能低下を招く。本研究では、境界層特性の異なる数種の翼形に対し、数種の能動および受動制御を行い、キャビテーションの非定常性の抑制効果について検討する。実験には、流体科学研究所のキャビテーションタンネル実験設備を用い、境界層特性の異なる数種の翼形において、さらに、迎角を変えて形態の異なるキャビテーションをそれぞれ発生させ、それぞれの翼形に対して、翼性能を低下させずに非定常キャビテーションを抑制するための有効な制御手法を検討する。翼形に発生する非定常キャビテーションを抑制することができれば、流体機械、特にポンプの高性能化、高信頼化、高寿命化が実現できる。それにより、昨今の台風やゲリラ豪雨の際に問題となっている大規模水害の発生を防ぐための排水インフラの整備の強化や、原子力発電プラントの冷却水系の高信頼化を図るなど、流体機械の研究を通じて自然災害に対する防災機能を高め、社会の安全と発展に貢献することができるものと考えている。

2. 研究成果の内容

本年度の共同研究では、NACA16-012 翼形の負圧面の前縁近傍にボルテックスジェネレータ (VG) を付け、受動制御によるキャビテーションの抑制を試みた。VG は 2 種類で、図 1 に示すように (a) Forwards wedge VG と (b) Hemisphere VG を、それぞれスパン方向に 6 つ設置した。本研究では、溶存気体量の異なる常温水道水を作動流体に用い、流速と迎角は一定のもと、主流圧力を変化させ、キャビテーションを発生させた。溶存気体量が高い水は、雨水排水系など自然界に近い状況で使用される流体機械を、溶存気体量が低い水は、原子力発電プラントの冷却系配管など、コントロールされた状況で用いられる流体機械を想定しており、それぞれでの制御性を評価するためである。キャビテーションの発生形態、周波数特性の評価、圧力変動の評価、破断周波数の比較及び様相とキャビティ長さの評価を行い、VG が非定常キャビテーションにどのような影響を与えるか調査した。



(a) Forwards wedge VG

(b) Hemisphere VG

図 1 本研究で用いた 2 種のボルテックスジェネレータ (VG)

その結果、図 2 に示すように、いずれの溶存気体量でも、Forwards wedge VG, Hemisphere VG, Base (VG なし) の順で初生キャビテーション数が高くなった。すなわち本研究での VG を付けるとキャビテーションが発生しやすくなることがわかった。よって、キャビテーションの初生の抑制に関しては、本研究で用いた VG は有効ではないことがわかった。

また、キャビテーションの発生形態に関しては、溶存気体量が低い条件では、キャビテーション発生形態の変化はなく、すべての翼形でシート/クラウドキャビテーションとトランジエントキャビテーションが発生した。一方、溶存気体量の高い条件では Base, Forwards wedge VG ではシート/クラウドキャビテーションのみ発生し、Hemisphere VG ではトランジエントキャビテーションも発生した。

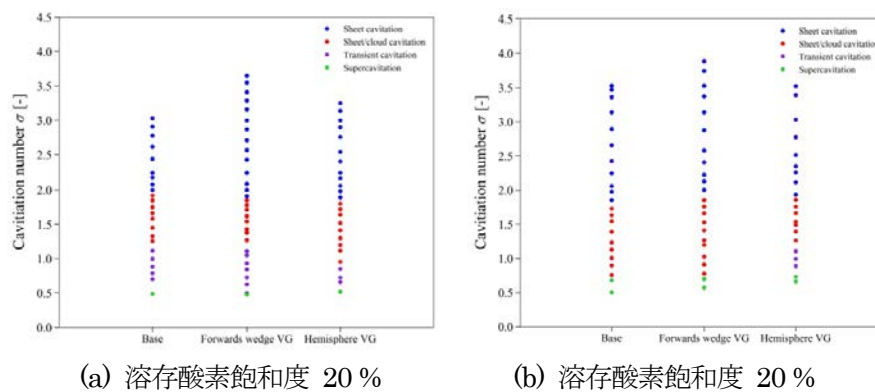


図 2 キャビテーションの発生形態とその領域

キャビテーションの非定常性に関しては、流れ場の圧力変動は、溶存気体量が低い条件では、Hemisphere VG が最も圧力変動が低いことがわかった。溶存気体量が高い条件では、圧力変動が Base と Hemisphere VG が最も低くその値はおおむね一致していた。一方、Forwards wedge VG ではシート/クラウドキャビテーションの振動が強くなってしまふことがわかった。

また、キャビテーションの非定常性に関して、キャビティの振動は、いずれの溶存気体量においても、Forwards wedge VG では、キャビティ長さが変動しやすいことがわかった。また Hemisphere VG ではキャビティが最大長さになってから、破断するまでの時間が最も長く、キャビティを破断させる圧力波が発生しにくくなっていることが推察された。よって、非定常キャビテーションの振動の抑制としては Hemisphere VG が有効であることが示された。

3. 研究目標の達成状況

共同研究 1 年目で、翼形は 1 種類で、受動・能動制御手法のうち、受動制御の実験を終了したため、予定していた成果は上げられたと考える。

4. まとめと今後の課題

1 年目の成果として、非定常キャビテーションの振動の抑制に Hemisphere VG が有効であることが示された。今後は、本能動制御手法のうち Hemisphere VG に関して、各迎角における有効な VG の位置を検討することによって、Hemisphere VG の抑制メカニズムについて考察する。

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] Takaho Ochiai, Ebrahim Kadiyar, Koki Sugaya, Junnosuke Okajima, Yuka Iga: Active and Passive Control of Unsteady Cavitation on a Hydrofoil, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, Web, (2020), CRF-67, p. 119.

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	J20I110
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

A Machine-Learning Approach for Computation of Cardiovascular Function Parameters from Pulse Wave of Limbs

Xiaorui Song*†, Xuezhen Wang*, Shigang Wang*, Chunyu Zhu**, Gaoyang Li***
Hitomi Anzai****, Aike Qiao****, Makoto Ohta****††

*Department of Radiology, Shandong First Medical University & Shandong Academy of Medical Sciences

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

***Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University

****Institute of Fluid Science, Tohoku University

*****College of Life Science and Bioengineering, Beijing University of Technology

† Applicant, †† IFS responsible member

1. Purpose of the project

Purpose of the project includes the following four aspects.

- 1) Promote the Sino-Japan bilateral communication on the study of noninvasive computing method of cardiovascular function parameters.
- 2) Jointly investigate the noninvasive calculation model of cardiovascular function parameters by machine-learning approach based on pressure and pulse wave of limbs as the current non-invasive diagnosis method of cardiovascular disease in clinical primary care, which including but not limited to: Cardiac output per minute; Stroke volume; Cardiac index; Stroke volume index; Ejection fraction; Aortic compliance; Total peripheral resistance.
- 3) Jointly investigate the correlation between the waveform characteristic information of pulse wave of limbs and the cardiovascular function parameters, and put forward the indexes that can evaluate the cardiovascular function.
- 4) Then optimize the machine-learning model, and discuss the application of community physical examination.

2. Details of program implement

1) Preparation of pulse wave data set: preprocess the original pulse wave data of subjects by normalization, and collect the corresponding cardiovascular function parameter information of all patients. The medical research investigation among cardiovascular function parameters, clinical influencing factors and waveform characteristics information.

2) Establish the computing model, train pulse wave and obtain the computing model of cardiovascular function parameters. Our predictive model was based on an ML network, which was composed of three parts: an input layer, five fully connected layers, and an output layer. The five fully connected layers separately contain 1024, 256, 64, 16, and 4 neurons. And ReLU was employed as the activation function after each layer. For predicting each cardiac function parameter of AC, TPR, and SV, the two pulse wave datasets were separate as the input to train the network. We saved the optimal configuration of the network's parameters in the six training times. Error analysis and consistency analysis were performed in each corresponding test set.

3) The Bland-Altman method is used to analyze the consistency between the calculated value of cardiovascular function parameters and the actual clinical data to verify the feasibility and accuracy of the calculation model.

4) Attended Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (Otc. 28th, 2020). Oral.

5) Thank you very much for the cooperation opportunity and financial support provided by IFS. In the process of cooperation, Professor Ohta's team provided technical support, discussed the research contents, and completed the main contents of this study. On October 28, 2020, I attended the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information , and gave an oral report.

3. Achievements

Expected result mainly includes the following four aspects that are stated application form.

1) Established the noninvasive calculation model cardiovascular function parameters by using the machine learning. The network contains an input layer, an output layer and five hidden layers. Architecture of machine learning network is shown in Figure 1.

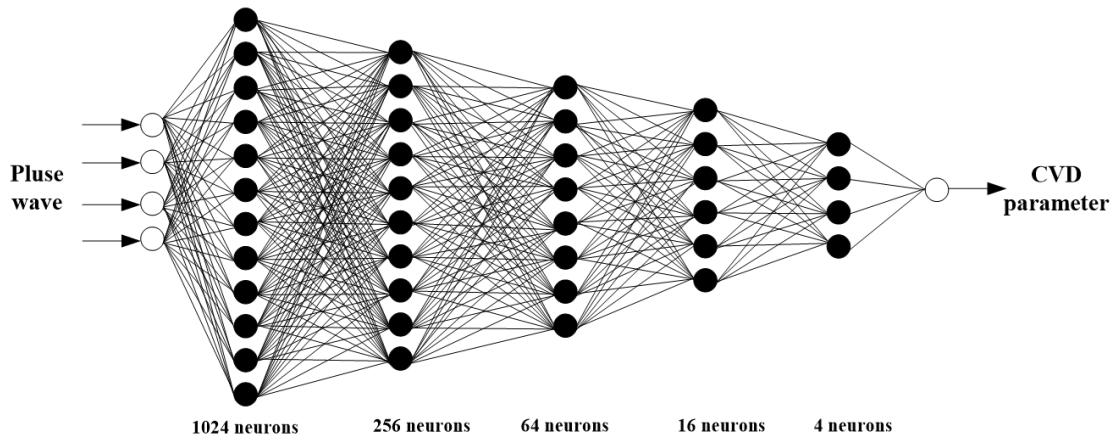


Figure 1: Machine learning network architecture

2) Obtain the characteristic parameters of waveform of limbs that can affect cardiovascular function parameters. Figure 2 shows that the waveform characteristic points change with different cardiovascular diseases. Therefore, the waveform characteristic points that can reflect the cardiovascular function.

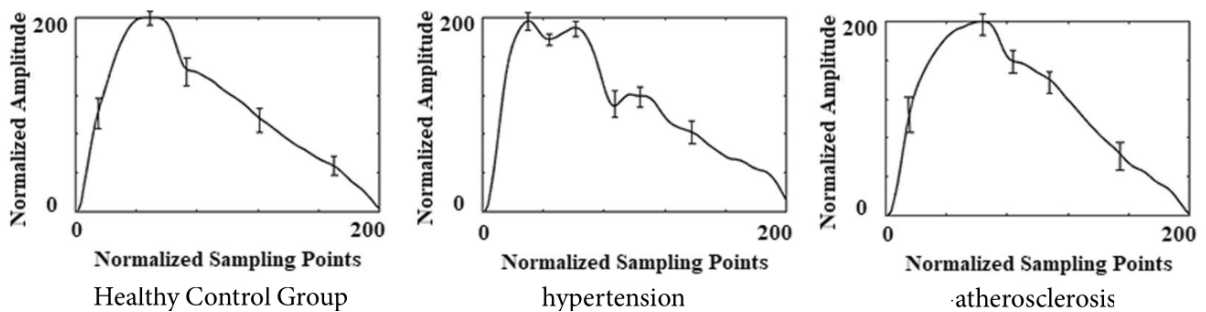


Figure 2: Waveforms of different cardiovascular diseases

3) Discussed the practical value of machine-learning algorithm in community physical examination. Consistency of cardiovascular function parameter shows a good agreement between the ML prediction results with the clinical measuring values, which further proved the effectiveness of our ML model. The consistency verification of SV shows in Figure 3. The calculation results of stroke volume, peripheral resistance and vascular compliance are shown in Table1.

Table 1: The calculation results of stroke volume, peripheral resistance and vascular compliance

	CO _{CR}	CO _{MR}	TPR _{CR}	TPR _{MR}	AC _{CR}	AC _{MR}
1	99.22	102.39	867.7	894.55	2.26	2.56
2	92.72	91.18	1243.89	1391.6	2.22	2.94
3	98.99	100.7	1673.44	1609.16	2.74	2.47
4	116.31	113.89	1269.92	1241.48	2.12	2.91
5	99.10	100.44	1137.55	1218.11	2.67	2.48
6	108.40	109.00	1010.4	968.17	1.74	2.72
7	105.71	103.07	909.33	889.35	2.14	1.76
8	103.35	102.68	1137.51	1166.86	2.25	2.01
9	111.86	107.65	779.16	948.02	2.79	2.29
10	121.91	122.41	1011.76	966.68	2.25	2.35

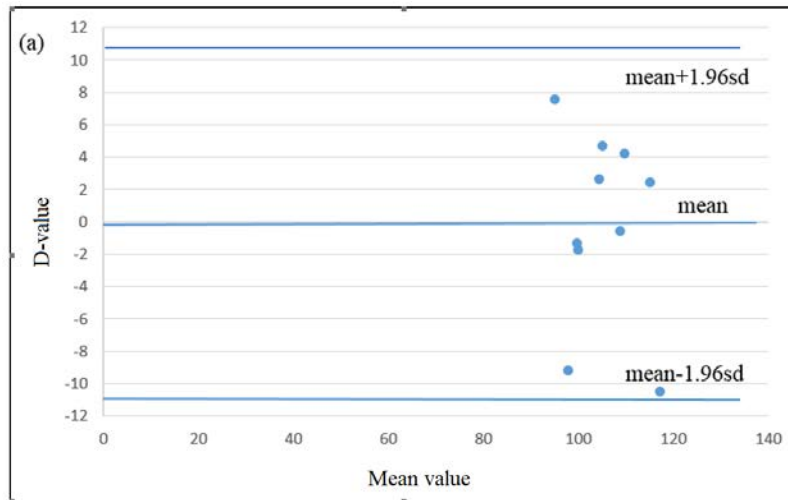


Figure 3: The consistency verification of SV

4) 1-2 research papers, including journal papers and conference presentations. Oral: Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2020). The research paper is under review, but not be published.

4. Summaries and future plans

Consistency of cardiovascular function parameter shows a good agreement between the ML prediction results with the clinical measuring values, which further proved the effectiveness of our ML model. To our knowledge, this is the first study that achieved

accurate prediction of cardiac function parameters based on the pulse wave. The statistical analysis result indicates the universality of our ML model that in predicting TPR and SV. Namely, it has achieved high accuracy. To our knowledge, this is the first study that achieved accurate prediction of cardiac function parameters based on the pulse wave. Therefore, the noninvasive detection algorithm based on limbs blood pressures and pulse can be used to calculate the cardiovascular function parameter, and it can be used in cardiovascular noninvasive detection.

The main limitation is that we do not consider the impact of certain specific cardiovascular diseases and other cardiac function parameters due to insufficient data. We will keep the data collection to improve our ML model in future work.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] Xiaorui Song, Xuezheng Wang, Shigang Wang, Chunyu Zhu, Gaoyang Li, Aike Qiao, Hitomi Anzai, and Makoto Ohta : A machine-learning approach for computation of cardiovascular function parameters from pulse wave, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-8, pp. 13-14.
- 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	J20H001
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	2020.4~2021.3
継続年数	1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*†, 大林 茂**††

高木 保鑑***, 大坪 咲智***, 下山 幸治**

*木更津工業高等専門学校機械工学科, **東北大学流体科学研究所

***木更津工業高等専門学校専攻科機械・電子システム工学専攻

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年、大規模災害時の的確で迅速な調査や、宇宙航空研究開発機構を中心に検討されている遠隔探査用小型飛翔体を用いた火星探査システムの開発において、鳥や昆虫の飛翔に見られるような高度な飛行形態を実現することが提言されている。本研究は、このような背景のもとで実際の鳥の主翼構造を取り入れた羽ばたき翼模型を製作し、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 羽ばたき翼模型の製作

2.1.1 主翼の設計製作

本研究において、鳥の飛行に関して着目しているバイオミメティクスの観点は2つある。第1の観点は、鳥の主翼を構成する要素である正羽の断面はS字形をして、隣の正羽に重なっており、羽ばたき運動（フラッピング運動）の振り下ろし、振り上げ時における初列風切羽まわりの気流の挙動が図1のように変化する。すなわち、振り下ろし時において風切羽下面側から気流がきた時、正羽はお互いに重なり合って気流を捉え、振り上げ時において風切羽上面側から気流がきた

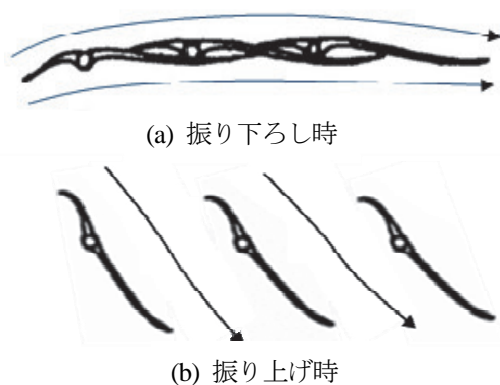


図1：初列風切羽まわりの気流

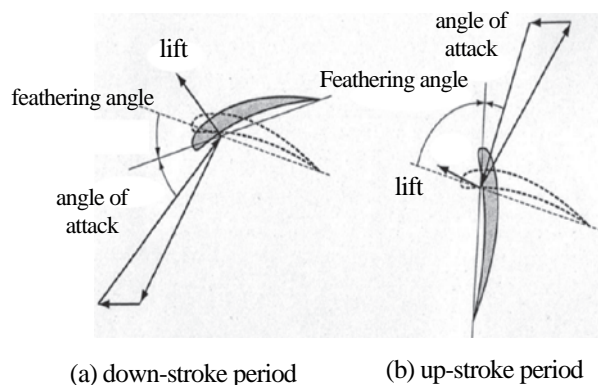


図2：フェザリング運動

時、正羽は羽軸のまわりに前縁が上がる方向にねじられて、それぞれが独立して気流が上面から下面に通る抜けている。この構造によって、効果的に揚力及び推進力を獲得しているものと考えられる。第2の観点、鳥の翼の動きの中で空力性能に最も影響を及ぼすフラッピングとフェザリングの協調的な動きの実現である。すなわち、振り上げと振り下ろし時では、風切羽の運動方向が異なるので第1の観点で述べたように、羽ばたき運動一周期内の迎角が大きく変化する。この傾向は、特に離着陸時の低速飛行において顕著となる。この傾向を緩和するために、すなわち迎角変動範囲を狭めるために、鳥は図2に示すように翼をひねって振り下ろし時で負に、振り上げ時で正に傾きを変えている(フェザリング運動)。この構造によって、失速現象を防止し、特に振り下ろし時において大きな揚力及び推進力を得ているものと考えられる。

本研究では、図1に示す鳥の翼挙動を実現するために、主翼を図3の様に製作した。初列風切羽において、中空円柱を取り付けた正羽を羽軸に差し込むことにより、羽ばたき時に羽弁が開閉する構造になっている。本主翼は3Dプリンタを用いて製作し、羽弁の厚さは100 μm 、最大翼厚は4mm、初列風切羽枚数は10枚としている。

2.1.2 駆動システムの構築

図4に羽ばたき駆動システムを示す。DCモータの回転運動を、リンク機構を介して往復運動として歯車に伝えることで、翼のフラッピング運動に変換している。また、翼根元部に設置されたサーボモータによってフェザリング運動を行う。使用したアクチュエータは、エンコーダ付きDCモータ(Lynxmotion 12V 450 rpm 733g-cm 1:5.2)及びサーボモータ(HS-645MG)であり、Arduino Uno、モータドライバ(Arduino モーターシールド Rev3)を用いて駆動する。フラッピング及びフェザリング運動の同期は、DCモータに付属しているエンコーダ信号を割り込み信号として用いる事によって行う。DCモータの回転数はPWM制御によってプログラム上で調整でき、0Hz~7Hzの範囲で任意に設定できる。同様に、サーボモータの動作角度範囲(0~180°)及び回転速

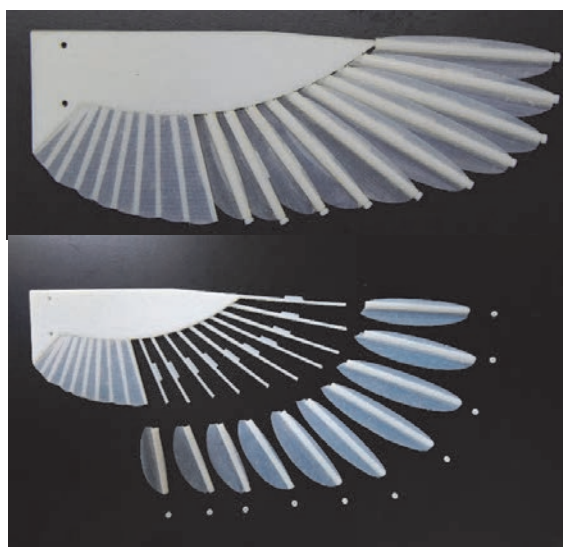


図3：製作した鳥型主翼



図5：羽ばたき模型

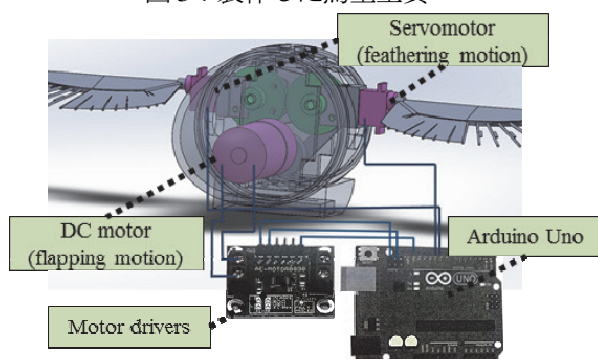


図4：羽ばたき駆動システム

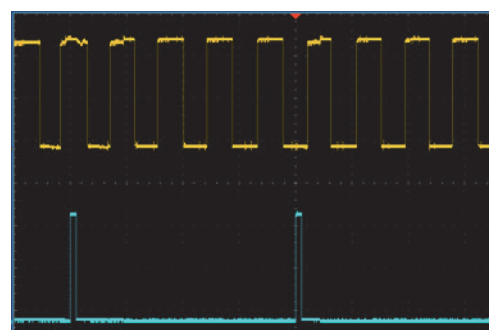


図6：エンコーダ出力及びサーボモータ入力信号

度も調整可能である。図5に製作した羽ばたき模型を示す。胴体最大直径は100mm, 胴体長さは280mm, フラッピング運動における振幅は 20° とした。図6は, デジタルオシロスコープにおけるエンコーダA相出力信号(上段黄色信号)及びサーボモータへの入力信号(下段青色信号)を示しており, A相出力4周期毎にサーボモータ回転方向が切り替わっている様子が確認できる。

2.1.3 主翼挙動の可視化

主翼にフラッピング運動を与え, 振り上げ及び振り下ろし時における翼の挙動を可視化した。実験条件は, 一様流速 $U=7\text{m/s}$, 羽ばたき周波数 $f=5\text{Hz}$, 羽ばたき振幅 $FA=20^\circ$ とした。可視化手法としては, デジタルストロボスコープ(DT-315N, 日本電産シンポ)とフラッピング運動を同期させ, デジタルカメラを用いて撮影している。図7にフラッピング運動時における初列風切羽の挙動を示す。この図を見ると, 振り下ろし時には, 正羽一枚一枚がお互いに重なり合っており, 振り上げ時には正羽間にすき間が生じている様子が確認できる。

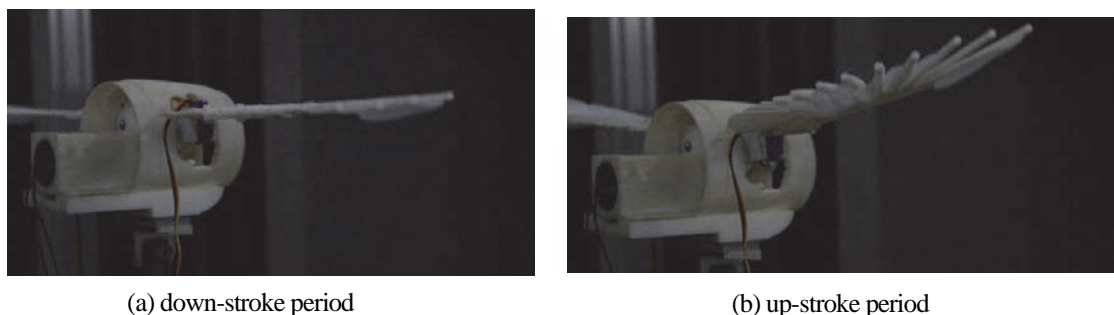


図7：初列風切羽の挙動

3. 研究目標の達成状況

本公募共同研究1年目として, 鳥の風切羽構造を採り入れた主翼の製作及びフラッピング及びフェザリング運動を同期させる主翼駆動システムを構築でき, 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, 鳥型羽ばたき翼模型を対象とした風洞実験が可能になったものと考えられる。今後は, フラッピング運動とフェザリング運動の位相差を変えて空気力測定を実施し, 本羽ばたき翼模型の空力的有効性を示していきたい。

5. 研究成果

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

[1] 石出忠輝, 高木保鑑, 大坪咲智, 下山幸治, 大林茂: 複数の前縁フラップの組合せによるデルタ翼の空力特性の改善, 日本実験力学会誌, Vol. 20, No. 2, (2020), pp. 101-108.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Tadateru Ishide, Yasuaki Takagi, Sakichi Otsubo, Hajime Izumi, Koji Shimoyama and Shigeru Obayashi: Development of a small birdlike high-performance flying robot, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-39, pp. 65-66.

3) その他(特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J20H002
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療
研究期間	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

パルスジェットメスの生体硬組織への応用に関する基礎研究
Pulsed Water Jet for Hard Tissue Application

中川 敦寛*†, 大谷 清信**††

*東北大学病院臨床研究推進センター, **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

パルスジェットメスは水流での物性値の違いによる組織選択性を生かした手術用治療器として開発を進めている。本研究の目的は、物性値の高い骨等の硬組織での応用に関する基礎的知見を得ることである。

2. 研究成果の内容

パルスジェットメスを歯模擬モデル、歯石模擬モデルに照射し、病的な部分と健全な部分の物性値の差により組織選択性を得ることができるか検討した。模擬モデルとしては、普通石膏（アドバストーン、株式会社GC）、硬質石膏（ニュープラストーンII、株式会社GC）、および超硬質石膏（ニューフジロック、株式会社GC）を用いた。パルスジェットを噴射した歯の断面の切削深度はマイクロSCOPE（TG500PC、株式会社松電舎）で測定した。普通石膏に対する移動噴射後の切削深度は、150 Vでは2.69（±0.23）mm、200 Vでは3.23（±0.18）mm、250 Vでは3.54（±0.33）mmで、いずれの電圧間にも統計学的有意差がみられた。硬質石膏では、150 Vは0.92（±0.08）mm、200 Vは1.15（±0.16）mm、250 Vは1.39（±0.13）mmで、250 Vは150 Vに比較して有意に高い深度であった。超硬質石膏では、150 Vは0.38（±0.04）mm、200 Vは0.29（±0.21）mm、250 Vは0.49（±0.06）mmで、いずれの電圧間にも統計学的有意差は認められなかった。石膏の種類による切削深度の比較では、いずれの電圧においても、普通石膏が最も深く、次いで硬質石膏、超硬質石膏の順で、いずれの石膏の種類別の比較においても有意差がみられ、硬組織においても組織選択性が得られる可能性が示唆された。

流体プロファイルは高速度撮影、圧計測を行った。パルスジェット噴流の特性を把握するため、噴流圧力のピーク圧と駆動電圧の関係を水晶圧力センサ（601A、日本キスラー株式会社）を用いて測定した。パルスジェットノズル径と同径のピンホールにジェットを噴射することで、ノズル径よりも大きなセンサの受圧面に均等に圧力がかかるようにし、さらに気泡の影響によるノイズを除去した正確な水压を測定するため水中にて測定を行った。水晶圧力センサの測定面に対し垂直に0.5 mmの隙間を設け、ノズル先端を水中に固定し駆動電圧50 V、100 V、150 V、200 Vにてパルスジェットを噴射、各電圧における連続パルスでの噴射1発のピーク圧測定を行った。その結果、駆動電圧50～250 Vの範囲において、電圧を上げるに従いパルスジェットの圧力も上昇、高い正の相関が認められた。

3. 研究目標の達成状況

パルスジェットメスを歯模擬モデル、歯石模擬モデルに照射し、病的な部分と健全な部分の物性値の差により組織選択性を生かした病的組織を選択的に削除できる可能性が示唆されたことから、物性値の高い骨等の硬組織での応用に関する基礎的知見を得る、という本研究目標は達成できたものと考えられる。

4. まとめと今後の課題

歯科二大疾患の一つであるう蝕は、歯科医学・歯科医療の進歩とともに全体としては減少傾向にあるが、近年、不適切な口腔・健康管理や社会的要因から小児の一群に生ずる早期小児う蝕、高齢者における保有歯の増加と加齢による歯肉退縮に伴う歯根面う蝕など、これまでみられなかった特徴を持つう蝕の増加が見られるようになった。早期小児う蝕においては、う蝕の進行が急速であるため、う蝕病巣が歯冠部最表層のエナメル質を容易に越え、その下層の象牙質にまで到達してしまう。一方、歯根面う蝕においては、歯根面最表層のセメント質が脆弱であるため、直ちにその下層の象牙質にまで病巣が進行してしまう。これらのう蝕の治療のためには、う蝕に罹患した象牙質病巣（軟化象牙質）のみを除去し、健全な象牙質を温存することが必要である。しかし、軟化象牙質の構造は複雑であるため、術者が歯科用切削機器を用い、手指の感覚に基づいて軟化象牙質のみを除去することは容易ではない。本研究では、従来の脳神経を含めた軟部組織だけでなく、歯（硬組織）においても組織選択性が得られる可能性が示唆され、術者の手技に依らない標準化された軟化象牙質除去法の開発につながりうる点で意義がある。

今後の課題としては、規制対応を見据えた効果、安全性のデータ蓄積、さらに事業化に値するワークフローからビジネスモデルを実現できるパルスジェット発生機器の開発を伴走企業とともに推進する点である。

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] [Sato Y.](#), [Iikubo M.](#), [Nishioka T.](#), [Yoda N.](#), [Kusunoki T.](#), [Nakagawa A.](#), [Sasaki K.](#), [Tominaga T.](#): The effectiveness of an actuator-driven pulsed water jet for the removal of artificial dental calculus: A preliminary study, *BMC Oral Health*, Vol. 20, (2020), 205.

*[2] [Kusunoki T.](#), [Kawaguchi T.](#), [Nakagawa A.](#), [Noguchi Y.](#), [Osawa S.I.](#), [Endo H.](#), [Endo T.](#), [Saito R.](#), [Kanamori M.](#), [Niizuma K.](#), [Tominaga T.](#): Effect of endoscope flexibility on tissue dissection profile assessed with pulsed water jet device: Ensuring safety, efficacy, and handling of thin devices for neuroendoscopic surgery, *BMC Research Notes*, Vol. 14, (2021), 64.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[3] 大谷清伸, 小川俊広, [中川敦寛](#), [阿部淳](#): 円管内形状の異なる閉空間内発生水中衝撃波挙動に関する研究, 日本機械学会 2020 年度年次大会, 名大 (オンライン), (2020), #J02405.

[4] 大谷清伸, 小川俊広, [阿部淳](#), [中川敦寛](#): 多層網媒体との干渉による衝撃波低減に関する研究, 火薬学会 2020 年度秋季研究発表会, (オンライン), (2020), #29.

[5] 大谷清伸, 小川俊広, [阿部淳](#), [中川敦寛](#): 多層網媒体干渉による衝撃波圧力低減に関する研究, 2020 年度衝撃波シンポジウム, 千葉大 (オンライン), (2021), #2A4-3.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20H003
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2020.4.1 ~ 2021.3.31
継続年数	2年目

湿り蒸気の流動状態の解明
Elucidation of the Flow State of Wet Steam

丹澤 祥晃*†, 大木 眞一*

石本 淳**††

*日本工業大学, **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

熱エネルギー供給媒体として、産業革命以来広く活用されている飽和水蒸気の、乾き度と気液二相流としての流動状態との定量的な相関関係、および流動様式の解明を目的とする。

本研究は、飽和蒸気の流動状態を定量可視化することを実現して、ボイラから供給される蒸気量と2次側で消費されるエネルギー量との関係を明らかにすることにより、産業界での飽和蒸気使用時のエネルギー効率の大幅な向上、CO2削減に貢献することを目指す。

2. 研究成果の内容

本研究においては、飽和蒸気流の代表的な事例として水平管中の流動状態を調査する。

このため飽和蒸気を生成する実験装置を構成し、蒸気配管系に設置した熱交換器部分で一定の飽和蒸気の流動状態に制御するシステムとした。このとき、飽和蒸気の乾き度は熱交換器における蒸気と供給する冷却水との間の熱交換量を計算することにより算出する。また、水平管に流出された飽和蒸気を可視化するため、流路にサイトグラスを設置した。サイトグラス部にて観察される流動状態は、高速度カメラを使用して詳細に解析した。

(2020年度成果報告書 J19H004)

流動様式が観察される範囲を座標上に図示した、いわゆる流動様式線図として図1左に示す線図がある。横軸 V_{SG} =気相の見かけ速度、縦軸 V_{SL} =液相の見かけ速度である。

$$V_{SG} = \frac{m_s \cdot x_s}{\rho_{(T_s, x=1)} \cdot A}$$

$$V_{SL} = \frac{m_s \cdot (1-x_s)}{\rho_{(T_s, x=0)} \cdot A}$$

ここに、 m_s : 蒸気流量 kg/s, x_s : 乾き度 kg/kg, T_s : 温度°C, A : 配管口径 ft²,
 ρ : 密度 kg/ft³

3. 研究目標の達成状況

上記2に述べた実験装置、および実験方法により図2に示すような流動様式画像を観測した。またサンプルデータを図1の流動様式線図を適用した場合、測定時における飽和蒸気の状態量から層状波状流(図1右)の領域であることが分かった。

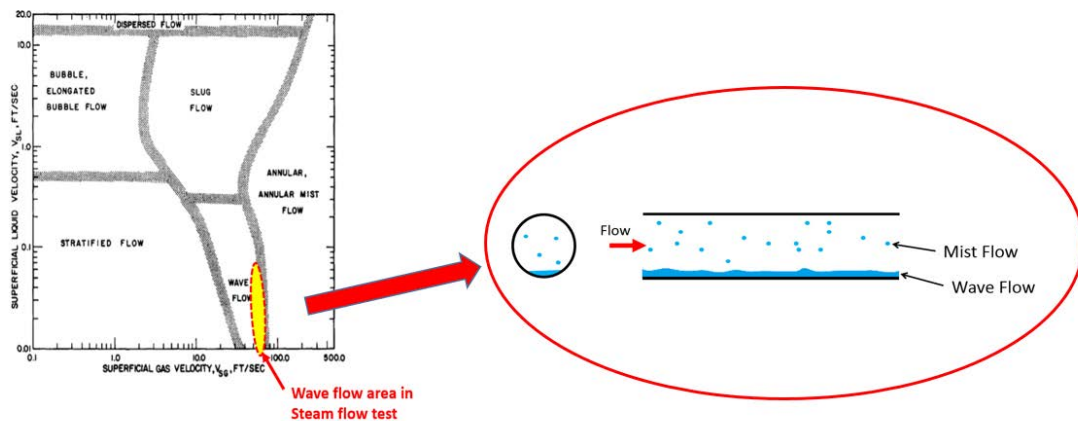


図1 飽和蒸気実験で明らかになった流動様式（層状波状流）



図2 流動様式サンプル画像（カメラ仕様：FASTCAM NOVA、Max. 解像度 1024X1024、撮影速度 6400 コマ/秒）
（水平管サイズ 40A、飽和蒸気流量 357 kg/h、蒸気圧力 0.68 MPa、乾き度 0.906）

4. まとめと今後の課題

飽和蒸気の乾き度等の状態量を制御して気液二相流としての流動様式サンプルを調査した。今後、飽和蒸気の乾き度と流動様式との相関関係を詳細に調査、解析することにより効率的な蒸気運転方法を示す。

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] S. Oki, Y. Tanzawa and J. Ishimoto: Visualization of Flow Pattern of Saturated Steam for Gas-Liquid Two-Phase Flow, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS1/3-3, pp. 96-97.

[2] 大木眞一, 丹澤祥晃: 湿り蒸気の流動状態の解明, 2020年度JSME年次大会, 先端技術フォーラム動力エネルギーシステム部門企画蒸気流計測の高度化に関する研究会, (2020), 【F08104】 (<https://doi.org/10.1299/jsmemecj.2020.F08104>) .

- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20H004
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	2020.4 ~ 2021.3
継続年数	1年目

深層学習を用いたマルチスケール格子の多目的最適化
Multi-Objective Optimization of Multiscale Grid Using Deep Learning

北村 拓也*†, 下山 幸治**††
*長崎大学, **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

1.1 研究の背景と目的

流体工学的なアプローチとしての乱流分野に共通する研究課題は、混合促進といった利点を伸ばしつつ、騒音低減や圧力損失低減といった問題点を抑える工業装置の開発であり、その抜本的な技術革新が社会のニーズとして求められている。Hurst and Vassilicos (2007)のフラクタル格子の実験に始まり、格子乱流の研究は新しい時代に突入しようとしている。例えば、従来の正方格子乱流に比べ、フラクタル格子乱流の方が乱れ強さが大きいこと、圧力損失が小さいこと、騒音が小さいことが報告されており、乱流の問題点を抑え、利点を生かした最適な格子形状が存在することが示唆されている。しかし、用途に適した格子形状の最適化はこれまで遂行されていないのが現状である。乱流格子の最適形状探索は、高性能混合デバイス等の工業装置への応用、航空機におけるエアスポイラーや低圧力損失オリフィスなどの新規開発につながるだけでなく、流れ場が一樣等方に近いことから流体力学の基礎的観点からも興味深い。乱流の有す非線形性、非定常性、非平衡性のため、高レイノルズ数流れに関連した熱流体工学デバイスに関する設計は非常に難しいことが知られている。例えば、現在認知されているフラクタル格子は、概念の導入(Queiros-Conde and Vassilicos (2001))から約6年の歳月をかけて設計されている。また、Nagata et al. (2017)は、フラクタル格子における乱流場の性質に基づいて複数の格子を提案し実験により調べているが、流体力学的特性における著しい改善は見出されてるとは言い難い。

一方で、近年ニューラルネットワークやクリギングモデルを応答曲面として用いた高効率な多目的最適化手法が熱流体工学デバイスへ適用され、産業界において注目されている。熱流体工学デバイスに関する形状最適化は、これまで様々な既往研究がなされてきたが、レイノルズ数が低い流れ場(Pingen et al. (2007))や乱流モデルを用いた流体機械(Mueller et al. (2013))などに限られている。実問題で見られる流れ場はレイノルズ数が高い場合が多いことから、乱流モデルを用いた最適化が一般的であるが、乱流モデルの不確定性などにより最適化結果と実験結果が整合しないことが多く、最適化の信頼性において懐疑的な点が挙げられる。このような背景から、近年の人工知能分野の技術を導入した最適化手法の開発およびそれらの技術と乱流モデルを用いない信頼性ある最適化の遂行は、挑戦的かつ切望された研究課題である。2020年度は乱流格子の形状最適化を行うための初期データベースを作成することを目的とする。

1.2 研究期間内の最終目標

2020年度は乱流格子の形状最適化を行うための初期データベースを作成することを目的

とし、最適化手法の確立と代表形状に対する直接数値計算(DNS)を実行した。本研究の最終目標は、最適な格子形状の探索と異なる流体力学的特性を有す代表的な格子形状に対して乱流の普遍法則を見出すことである。

2. 研究成果の内容

最適化を行うための初期データベース作成

本研究では、直接数値計算(DNS)を利用して最適な格子形状の探索をおこなうことを目的としている。DNSは計算コストが高いため、ニューラルネットワークを応答曲面として利用することで計算工数を減らすことができる。しかしながら、ニューラルネットワークを利用するためには初期データベースが必要となるため、本研究では初期データベースの作成する必要がある。

本研究では、混合促進を可能とし、圧力損失を減らすことが可能とする乱流格子の探索を試みる。そのため、速度場とスカラー場を同時に解く必要がある。解法には、4次精度中心差分を空間差分に用い、低用量型3次精度Runge-Kutta法を時間積分に用いた。任意の格子形状に対して計算を可能とするため、直接埋め込み境界法を用いた。2048×256×256のサイズのDNSを計61の格子形状に対して実行した。その結果、混合促進と圧力損失にはトレードオフの関係があることが見いだされた(図1参照)。代表的な乱流格子(フラクタル格子, combined格子, 正方格子)により生成された流れ場およびスカラー場の様子を図2に示す。図2に示すように、フラクタル格子の方が正方格子に比べて、スカラー場の混合が上手くいっていることが見てとれる。

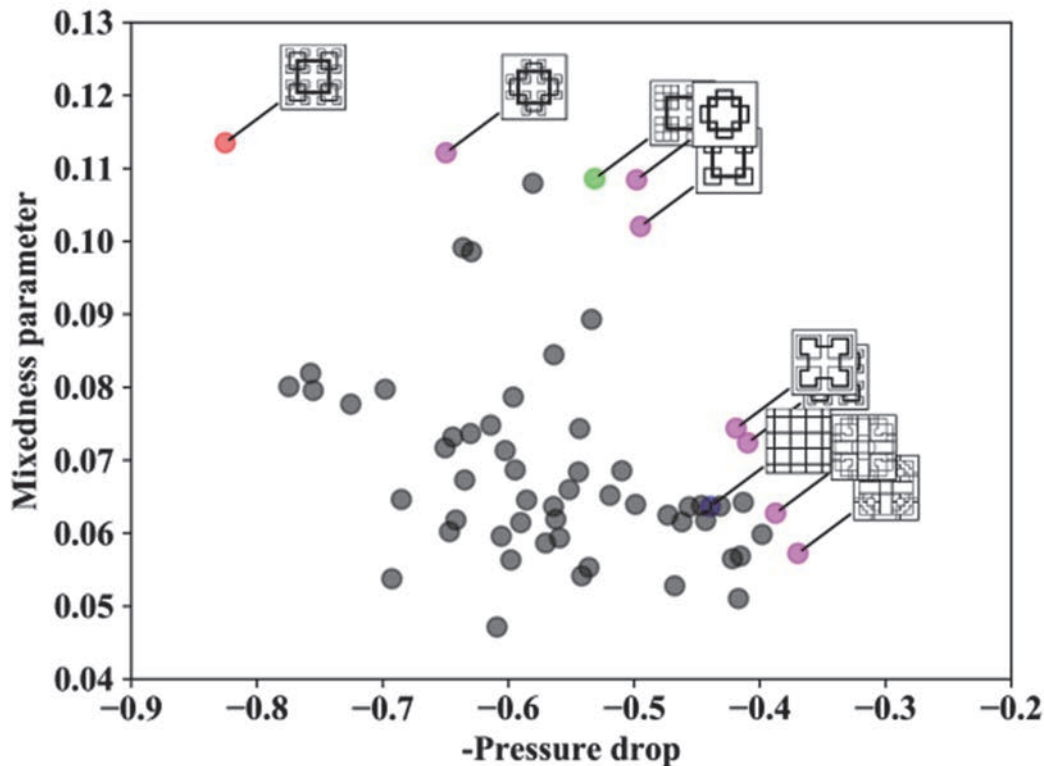


Figure 1 Trade-off relation between mixing promotion and power consumption

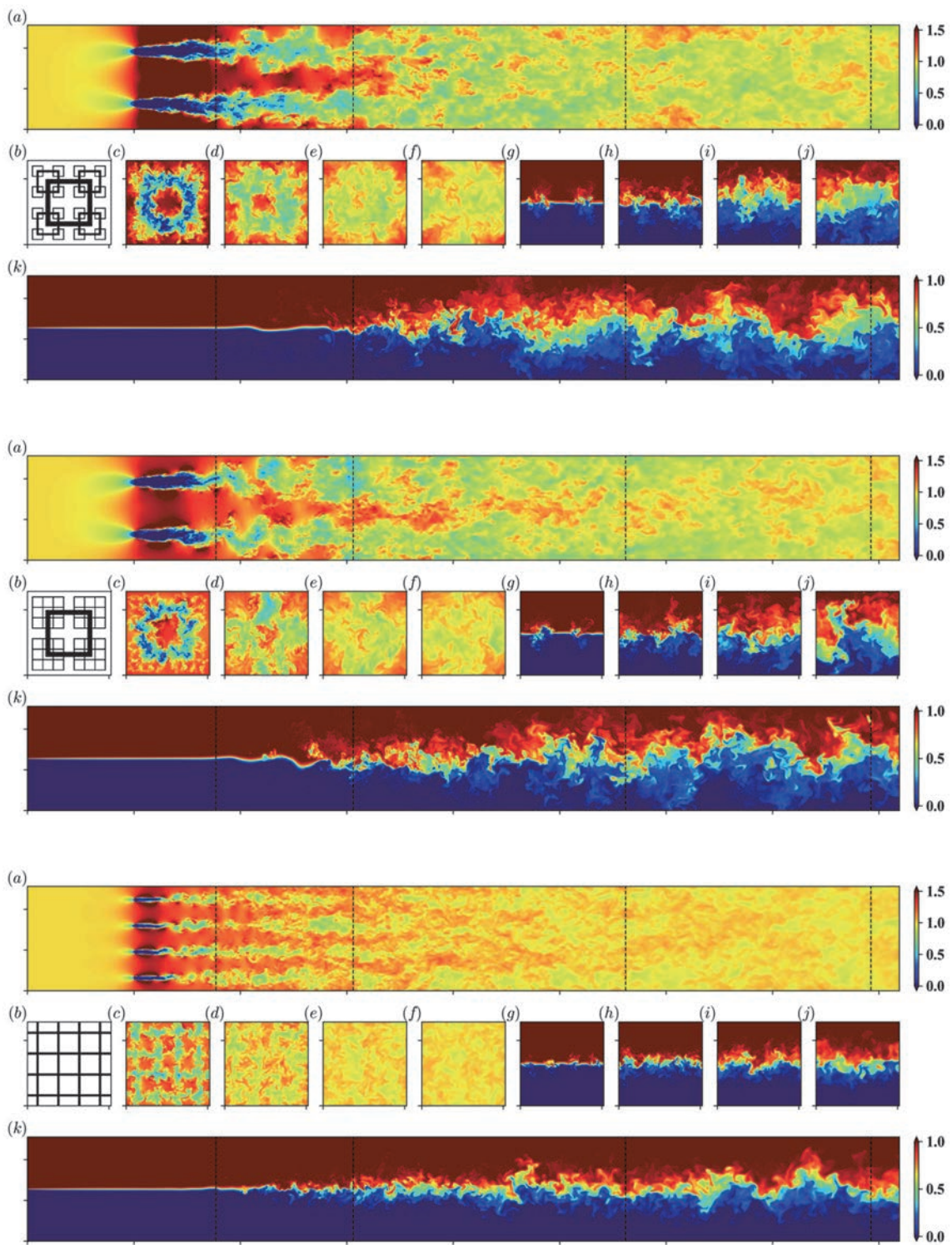


Figure 2 Instantaneous snapshots of streamwise velocity and passive scalar for three representative turbulence-generating grids.

3. 研究目標の達成状況

最適化の初期データベースを作成するという当初の目標は達成できた。また、いくつかの混合を特徴づけるパラメータについても同様の傾向が見られたことや混合パラメータの収

支やスペクトルから混合促進についていくつかの有効な情報を得ることができたことは評価できる。一方で、トポロジーを変更可能な乱流格子の形状を開発できたが、初期データベースでは期待していたほど流れ場が大きく変わるといったような結果は得られなかった。その意味で、詳細なデータ解析の必要性が分かった。この点は今後の課題として残される。

4. まとめと今後の課題

本研究では、乱流格子の形状最適化を行うための初期データベースを作成することを目的とし、最適化手法の確立と代表形状に対する DNS を実行した。その結果、混合促進と圧力損失にはトレードオフの関係があることが分かり、いくつかの混合を特徴づけるパラメータに対しても同様の傾向が見られた。

今後の課題は、最適化の遂行およびデータ解析の充実性が挙げられる。前者に関しては、深層学習の最適なアーキテクチャを調べる必要が挙げられる。この点に関しては試行錯誤を繰り返す必要があるため、多少の時間がかかることが推測される。後者に関しては、二点相関に関するスカラー収支式や固有値直交分解のプログラムを作成しており、積分幾何学に基づいた Minkowski 汎関数のアルゴリズムを現在作成中である。これらを利用することで最適化結果の詳細なデータ解析が可能であると考えている。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] T. Kitamura: Single-time Markovianized spectral closure in fluid turbulence, *J. Fluid Mech.*, Vol. 898, (2020), A8.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] T. Kitamura and K. Shimoyama: Multi-objective optimization of multiscale grid using deep learning, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-20, p. 32.

[3] 北村拓也：混合促進に向けた乱流格子の形状最適化，日本機械学会年次大会，(2020)，S05429.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

2. 研究成果報告書

<国際連携公募共同研究プロジェクト>

International multiple collaborative research	
Project code	J20R001
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Endovascular Stent and Vessel Remodeling

Aike Qiao*†, Hanbing Zhang*, Qianwen Hou*, Sicong Liu*, Hongfang Song**
Wenyu Fu***, Hitomi Anzai****, Makoto Ohta****††

*College of Life Science and Chemistry, 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

(1) Promote the Sino-Japan bilateral communication on the study of biomechanics on cardiovascular diseases. (2) Jointly investigate the hemodynamics of stent intervention in blood vessels, including but not limited to: biodegradable stent and its mechanical performance both in vivo and in vitro; braided stent (flow diverter) and its hemodynamics impact; modeling and simulation of stent degradation and vessel remodeling. (3) Then, obtain the stent structure design rules, stent degradation simulation approach, and modeling and simulation approaches to the dynamic mechanical and physiological coupling of stent and vessel wall tissue.

2. Details of program implement

During the past year, the project group carried out detailed collaborative research on novel structure design of biodegradable endovascular stent and hemodynamics of cardiovascular system. Both sides have endeavored to promote the progression of the project. Applicants and members from overseas attended online the 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020), Oct. 28-30, 2020, Sendai, Japan.

(1) A new index for the evaluation of coupling between stent degradation and vessel remodeling was proposed.

The dynamic coupling of stent degradation and vessel remodeling can influence not only the structural morphology and material property of stent and vessel, but also the development of in-stent restenosis (ISR) and late stent thrombosis (LST). The ideal procedure for stent intervention is that the gradual vessel remodeling matches the stent degradation during the service time of a bioresorbable stent so as to avoid ISR or LST (Fig. 1). During this procedure, the interaction force between stent and vessel play a critical role in the initiation and development of stent degradation and vessel remodeling.

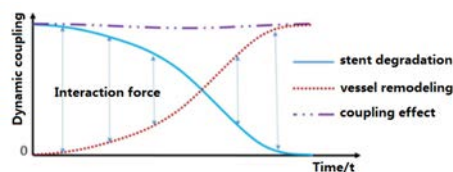


Fig.1 Schematic diagram of the temporal change of mechanical performance of stent and vessel.

How to describe the process of stent degradation and vessel remodeling is a key issue both in the scientific research field of biomechanics and in the clinical application of surgical planning.

A stent-vessel coupling model was developed based on stent mass loss function and vessel mass growth function, and then a concept of matching ratio and an ISR risk factor were proposed so as to evaluate the dynamic support performance of stent during the service period, which may lay the scientific foundation for the structure design, mechanical analysis and clinical application of biodegradable stent.

We suppose to simplify the two processes of stent degradation and vessel remodeling with preliminary mathematical models so as to intuitively describe their coupling relationship.

The stent degradation process can be summarized as a mass loss function $D(t, \sigma)$, while the vessel remodeling process can be summarized as a mass growth function $G(t, \sigma)$, where t and σ are time and stress respectively. Then, the ideal status of stent intervention is $D=G$. i.e. the vessel remodeling finished when the stent degradation completed. The coupling of stent degradation and vessel remodeling may mismatch if $D \neq G$, which may increase the risk of ISR and LST.

The mass loss function $D(t, \sigma)$ of stent degradation can be obtained by modeling the corrosion process of stent induced by stress corrosion, uniform corrosion, pitting corrosion, etc. according to the theory of Continuous Damage Mechanics (CDM). The mass growth function $G(t, \sigma)$ of vessel remodeling can be obtained by modeling the generation and remodeling process of vessel induced by mechanobiological and chemical stimuli according to the theory of Agent-Based Models (ABM).

D and G can be normalized according to the maximum mass loss and mass growth. We then proposed a novel dimensionless index – matching ratio M (Eq. 1) to express the matching effect between stent degradation and vessel remodeling.

$$M = \frac{\min(D, G)}{\max(D, G)} \times 100\% \quad (1)$$

$M \in [0,1]$, where $M=1$ means satisfactory match and M much less than 1 means bad match.

We further proposed a novel dimensionless index – risk factor R (Eq. 2) to express the occurrence risk of ISR and LST.

$$R = |1 - M| \times 100\% \quad (2)$$

Large R means great risk of ISR and LST.

(2) An algorithm for simulating nonuniform corrosion of biodegradable stent based on element adjacent relationship was developed.

Regarding the problem that the simulation of uniform corrosion model of degradable stents does not distinguish between exposed and non-exposed elements, a method of setting the corrosion properties of independent elements was proposed. Based on an element adjacent relationship that is closer to the real corrosion situation, an element adjacent relationship database was established. Through the development of in-house code, the elements were degraded in the order of exposure to the corrosive environment. The results verified the feasibility of this method in the simulation of uniform corrosion model of the stent.

The data records of the extracted C3D8R elements and the corresponding nodes were processed in the element adjacent procedure (Fig. 2), and the face-adjacent elements of each element were sorted by sequentially comparing the number of shared nodes between the two elements, and the results of face-adjacent elements of all elements were saved in the database.

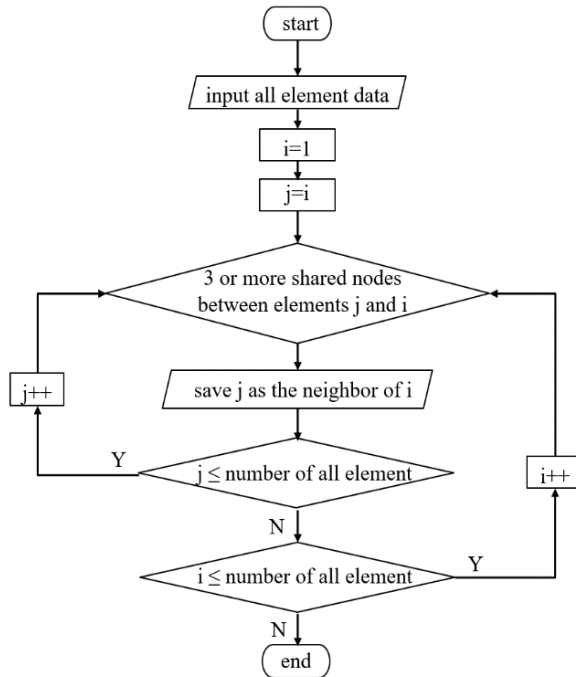


Fig.2 Flow chart of the element adjacent procedure.

In the first corrosion step of the corrosion procedure, an element was selected as the initial corrosion element which drove the corrosion process. When a corrosion element was deleted due to corrosion, the corrosion properties of all its adjacent elements were changed to be exposed elements for the next corrosion step. For the sake of showing the element corrosion sequence, the element number of each corroded element was displayed in each corrosion step, and the number of corroded elements was counted. The corrosion element was updated for the new corrosion step, and then the corrosion loop went on and the elements were deleted sequentially due to corrosion. The degradation was completed until the number of corroded elements equaled to the total number of elements (Fig. 3).

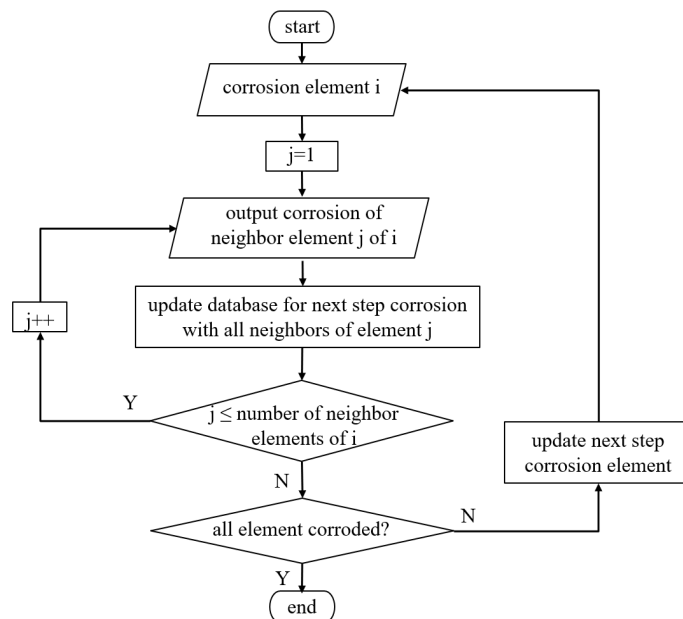


Fig.3 Flow chart of the corrosion procedure.

The corrosion sequence of the elements of a cube is shown in Fig. 4 according to the running results.

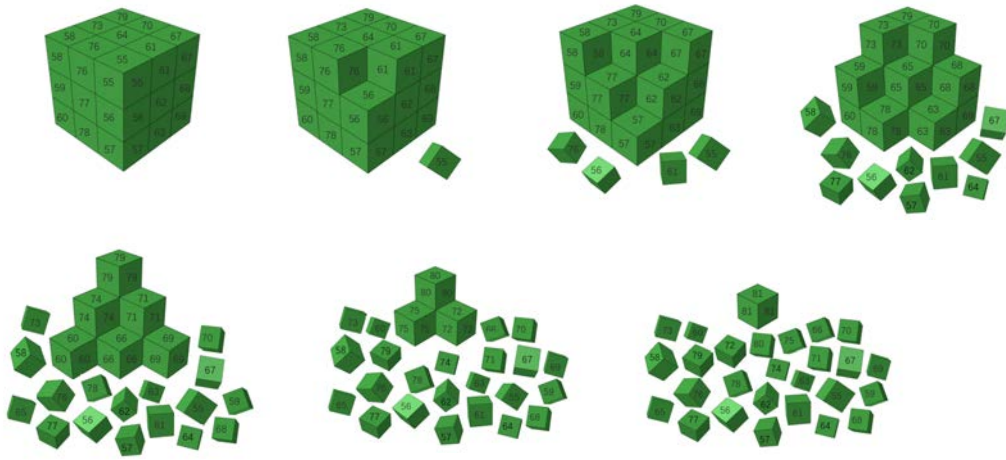


Fig.4 Elements degrade according to the order in which they are exposed to corrosive environment.

In the finite element analysis of the bioabsorbable stent, the non-exposed elements originally located inside the stent are exposed to the corrosive environment and begin to corrode when a previously exposed adjacent element is deleted because of corrosion. As the elements are sequentially deleted due to corrosion, more and more non-exposed elements are exposed to the corrosive environment and suffered to the uniform corrosion (Fig. 5). If the stent fractured prematurely (before vessel remodeling completed), it will lead to adverse events such as vessel collapse and thrombus.

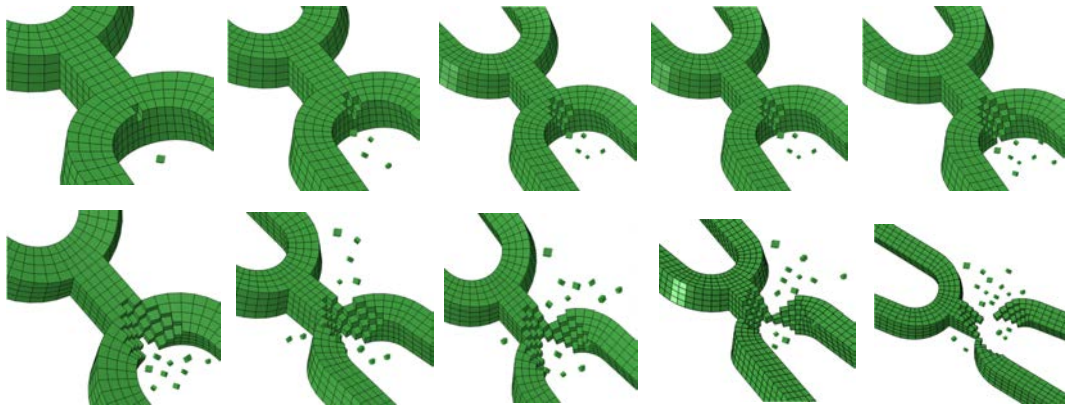


Fig.5 Deletion of stent element causes more non-exposed elements to join uniform corrosion.

3. Achievements

Expected results stated in the application form: (1)Obtain the influencing factors with regards to the flattening effects of braided stent in severely tortuous vessels, and the related hemodynamics.(2)Hemodynamic parameters and flow field characteristics of blood vessels after biodegradable stent implantation.(3)A simulation approach to vascular remodeling after stent implantation.(4)2-3 research papers.

(1) The coupling of stent degradation and vessel remodeling was intuitively described by stent mass loss function and vessel mass growth function and related matching ratio and risk factor. To investigate the dynamic process of the interaction between the

damage degradation of stent and the growth and remodeling of biological tissue by means of modeling simulation and experimental verification, to reveal the mechanical influencing factors and the action rule of biodegradable stent in service process, and to evaluate the dynamic support performance and therapeutic effect of stents in service, lay a scientific foundation for the structural design, mechanical analysis and clinical application of biodegradable stent and provides an important technical means for biomechanical research.

(2) An approach of setting the corrosion performance of independent elements was proposed to distinguish the element exposed to the corrosive environment from the unexposed element in the simulation of uniform corrosion model of the degradable stent. In-house code was developed to sort out adjacent elements and corrode in the order of exposure to the corrosive environment. This research can provide a non-uniform corrosion process in which biodegradable stent elements are sequentially exposed to corrosive environment, and verify the feasibility of this approach in finite element simulations for degradable stents.

4. Summaries and future plans

A new index for the evaluation of coupling between stent degradation and vessel remodeling was proposed, and an algorithm for simulating nonuniform corrosion of biodegradable stent based on element adjacent relationship was developed.

In future work, endovascular stent degradation and vessel remodeling will be coupled to establish an integrated model. Hemodynamics will be included in the stent degradation process, and more mechanobiological factors should be considered to model the vessel growth and remodeling process.

5. Research results

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

*[1] K. Peng, A. Qiao, J. Wang, M. Ohta, X. Cui, Y. Mu: A novel structure design of biodegradable zinc alloy stent and its effects on reshaping stenotic vessel, *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, Vol. 20, No. 6, (2020), 2050022. DOI: 10.1142/S0219519420500220.

[2] H. Wang, H. Anzai, Y. Liu, A. Qiao, J. Xie, M. Ohta: Hemodynamic-Based Evaluation on Thrombosis Risk of Fusiform Coronary Artery Aneurysms Using Computational Fluid Dynamic Simulation Method, *Complexity*, Vol. 2020, (2020), 8507273. DOI: 10.1155/2020/8507273.

*[3] H. Wang, H. Anzai, Y. Liu, A. Qiao, J. Xie, M. Ohta: A Hemodynamic-Based Evaluation of Applying Different Types of Coronary Artery Bypass Grafts to Coronary Artery Aneurysms, *Complexity*, Vol. 2020, (2020), 9359340. DOI: 10.1155/2020/9359340.

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

*[4] A. Qiao, H. Zhang, S. Liu, H. Song, W. Fu, H. Anzai, M. Ohta: New Index for the Evaluation of Coupling between Stent Degradation and Vessel Remodeling, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, (2020), CRF-3, pp. 4-5.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

International multiple collaborative research	
Project code	J20R002
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd 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 or non-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 (methane, ethane, propane, natural gas, n-butane) 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 [1,2]. The microcombustion based FFC setup uses an experimental apparatus that allows for preheating of the fuel while applying heat to the fuel cell; thus, increasing the flammability limit of the microcombustion process and fuel cell performance simultaneously. However, the current experimental apparatus requires an additional heat source in form of a furnace to have the process function. Because of this, the current experimental apparatuses have limited the ability for further research in FFC and heat cogeneration systems. To conduct this research, this project utilized the Syracuse University-Arizona State University-Tohoku University collaboration. The work analyzed a new experimental apparatus that allows for further research in self-sustained micro-combustion and FFC power generation.

2. Details of program implement

In order to verify the plausibility of creating a self-sustained microcombustion system, a thermodynamic analysis was performed. The theoretical self-sustained FFC system includes two combustion chambers for fuel-rich microcombustion and fuel-lean combustion at the FFC inlet and outlet, respectively. The overall equivalence ratio of the system is fixed by the fuel lean combustion equivalence ratio. Therefore, the natural gas/air mixture enters the system premixed at an equivalence ratio greater than stoichiometric and the remaining air needed to achieve an equivalence ratio of the fuel lean combustion has another entrance. The heat generated from the fuel-lean combustor at the FFC outlet could be utilized to heat the fuel/air mixture to 800°C prior to the fuel-rich combustor. The heat generated from the fuel rich microcombustion heats the excess air required for the FFC to 800°C. The microcombustion exhaust passes to the FFC anode and the preheated air to the FFC cathode. The remaining fuel not consumed in the FFC would then enter the fuel-lean combustor where the heat generated would be utilized to heat the incoming natural gas/air mixture. The exhaust of the fuel-lean combustor would then exit the system.

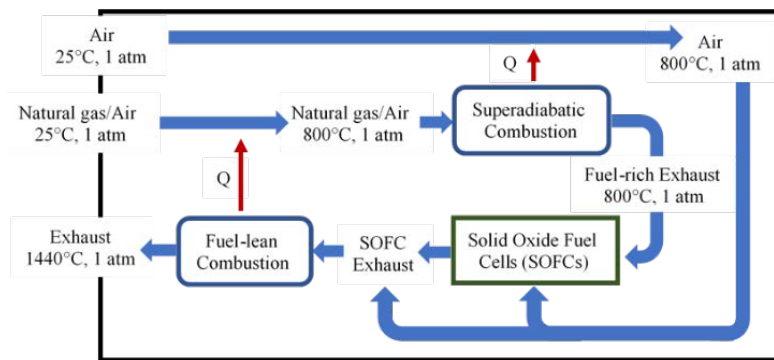


Figure 1: Proposed self-sustained system for microcombustion and FFC power generation.

3. Achievements

The proposed system was found to be thermodynamically possible to be self-sustained without any additional energy input. The natural gas/air mixture would be heated by a fuel-lean combustor to 800°C. The natural gas/air mixture would flow to the superadiabatic combustor. The heat produced would transfer to the cathode air. Using performance data of a previously tested FFCs, the heat generated by the fuel cell was estimated and integrated into the model. Using the experimental data for the fuel/air flowrate and equivalence ratio used, it was determined that 30% of the syngas that entered the fuel cell would remain to be combusted. The fuel-lean combustor would then combust the remaining fuel and providing heat for the fuel/air mixture entering the system. The overall system would have an electrical efficiency of 20%.

4. Summaries and future plans

A concept for self-sustained power and heat generation was derived. Thermodynamic analysis was used to show that the heat release from the microcombustion, FFC and fuel-lean combustion could be used to preheat the incoming fuel and air needed. The total electrical efficiency was calculated to be 20%. The results of this years' work are being added to an international peer reviewed journal manuscript for a future publication.

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: Impact of Low Concentration Hydrocarbons in Natural Gas on Thermal Partial Oxidation in a Micro-flow Reactor for Solid Oxide Fuel Cell Applications, *J. Power Sources*, Vol. 477, (2020), 229007.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - *[2] B. B. Skabelund, H. Nakamura, K. Maruta, J. Ahn, and R. J. Milcarek: Thermodynamic Model of a Self-Sustained Microcombustion Power Generation System, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-80, pp. 138-139.
- 3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

International multiple collaborative research	
Project code	J20R003
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Modeling on Boiling and Bubble Dynamics Induced by Laser Emitted from Optical Fiber

Junnosuke Okajima^{*,**†}, Roman Fursenko^{***††}
Sergey Mokrin^{****††}, Vladimir Gubernov ^{*****††}, Sergey Minaev^{**,**††}
^{*}Institute of Fluid Science, Tohoku University
^{**}Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
^{***}Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
^{****}Engineering School, Far-Eastern Federal University
^{*****}Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
[†]Applicant, ^{††}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 μm , 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 μm can reach 400 W / 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 2020, we had web-based meetings to discuss the results and future direction. The online meetings were held 7 times (30 April, 29 May, 5 and 29 June, 16 September, 25 December 2020, and 12 March, 2021).

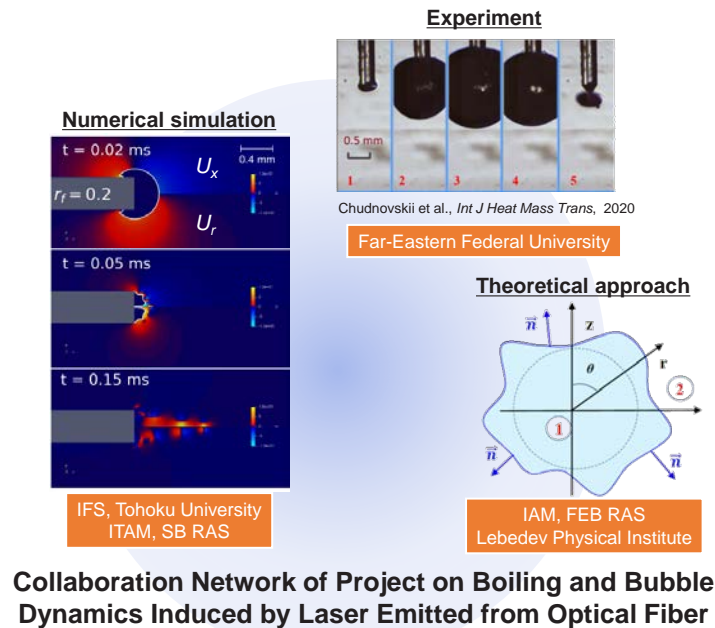


Fig. 1 Framework of collaboration research

3. Achievements

To clarify the mechanism of jet formation, the bubble collapse process by condensation was simulated. Figure 2 shows the computation domain for this problem. In this simulation, the geometrical effect on jet formation was evaluated.

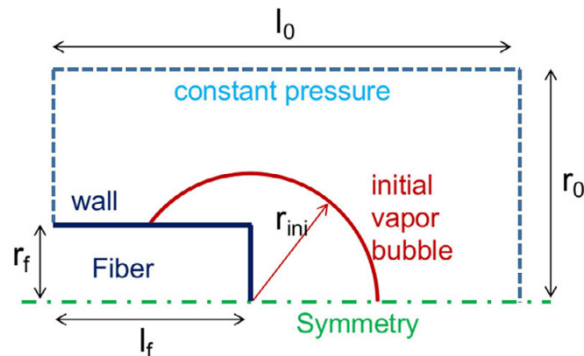


Fig. 2 Scheme of computation domain [1]

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. The initial vapor bubble was located at the tip of the fiber and the temperature of the surrounding liquid was set less than the saturation temperature.

Figure 3 shows the axial (top half of each snapshot) and radial (bottom half) distributions of water velocity at different time moments. The radius of the initial bubble was 0.4 mm. The collapse behaviors were strongly affected if the bubble shrinks near the fiber of finite thickness. Even in the case of very wide fibers which radius significantly exceeds the initial radius of the vapor bubble the pronounced water jet in the axial direction is formed as a result of liquid motion induced by the bubble shrinking.

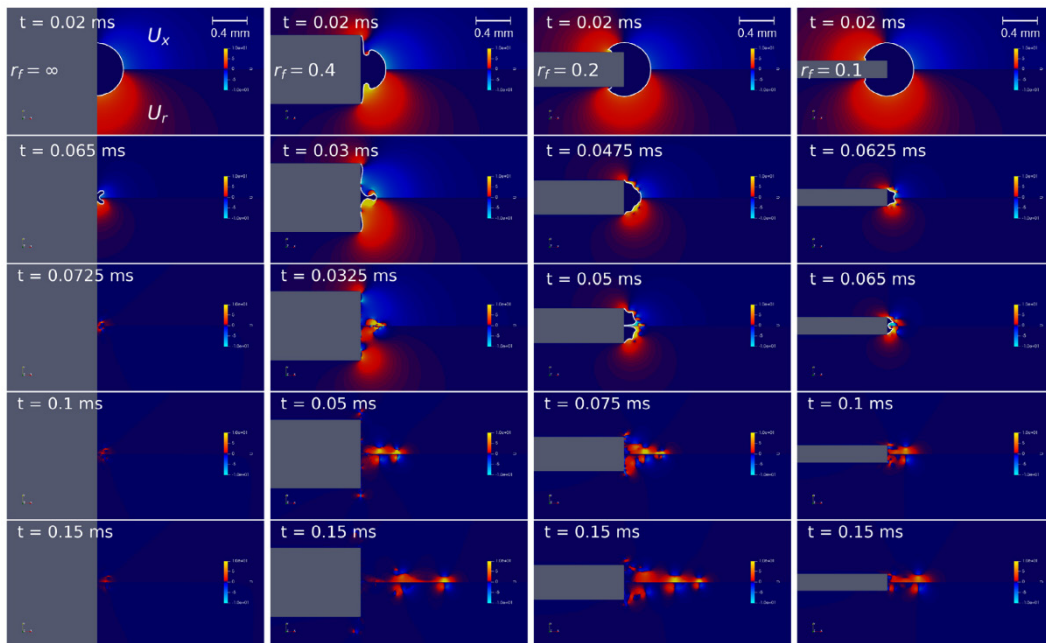


Fig. 3 Geometrical effect of the fiber on the jet formation [1]

Figure 4 describes the mechanism of jet formation. 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 (seen in Fig.4 and Fig. 5) 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.

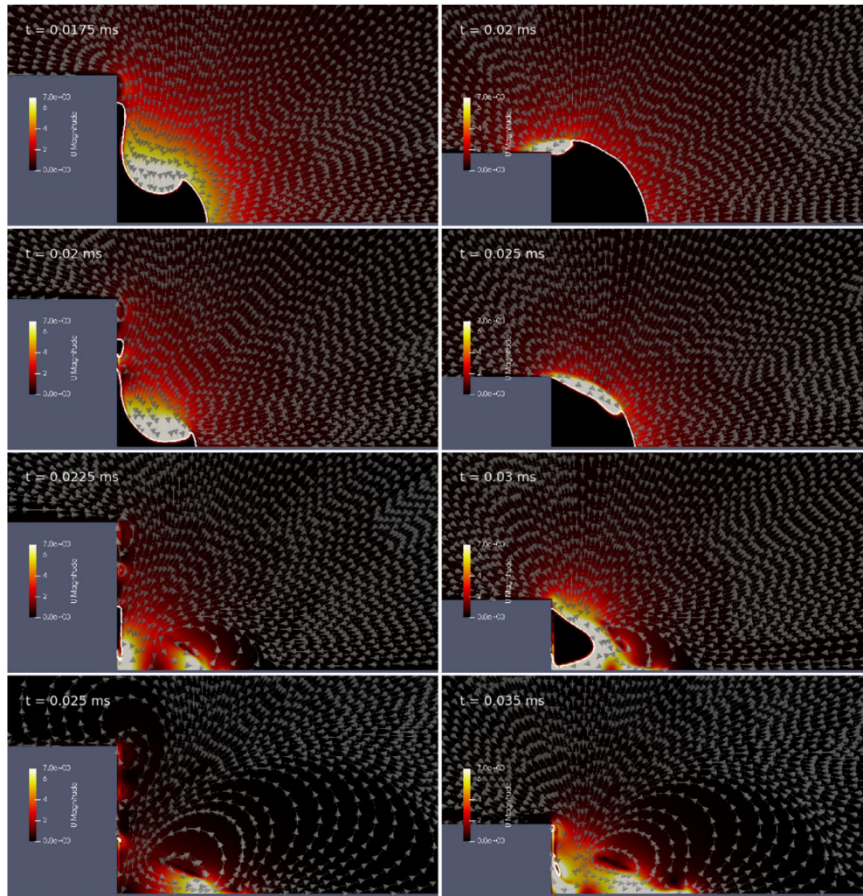


Fig. 4 Water velocity magnitude and streamlines:
 $r_{ini} = 0.2 \text{ mm}$ and $r_f = 0.2 \text{ mm}$ (left) and $r_f = 0.1 \text{ mm}$ (right) [2]

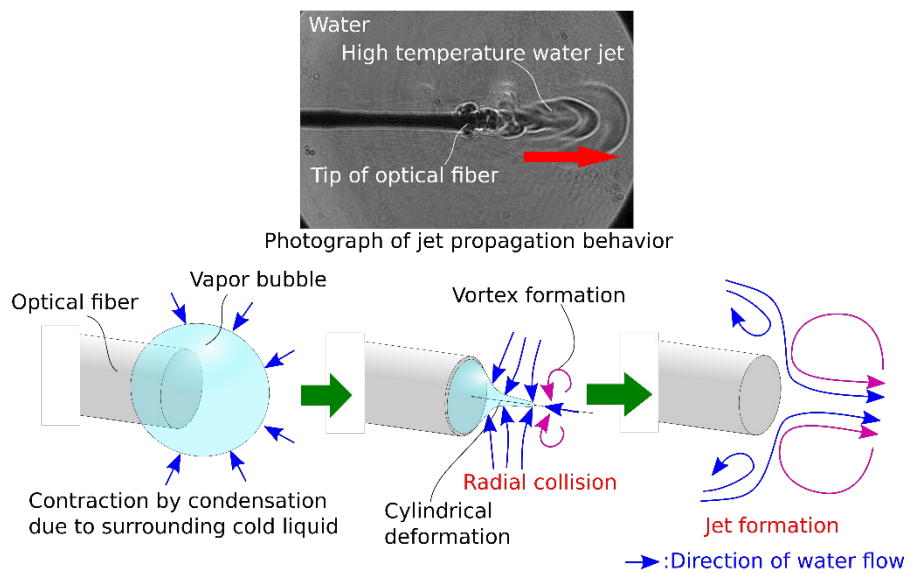


Fig. 5 Schematic of the jet formation mechanism [Tohoku University Global Site, Revealing the Reason Behind Jet Formation at the Tip of Laser Optical Fiber, 2020. 10. 9.]

In the numerical simulation, the typical case of bubble collapse was evaluated; however, this phenomenon consists of the bubble expansion phase due to evaporation and the contraction phase due to condensation. The evaporation process determines the maximum size of the vapor bubble; therefore, this process also affects the jet velocity. To investigate the whole process of bubble dynamics, the experimental system was developed at Far-Eastern Federal University.

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, as shown in Fig. 6. With this experimental system, the bubble formation process was successfully observed as shown in Fig. 7. Now, the detailed experiment is undergoing to evaluate the actual jet velocity and the frequency of these phenomena.



Fig. 6 Experimental system to observe bubble dynamics around the optical fiber

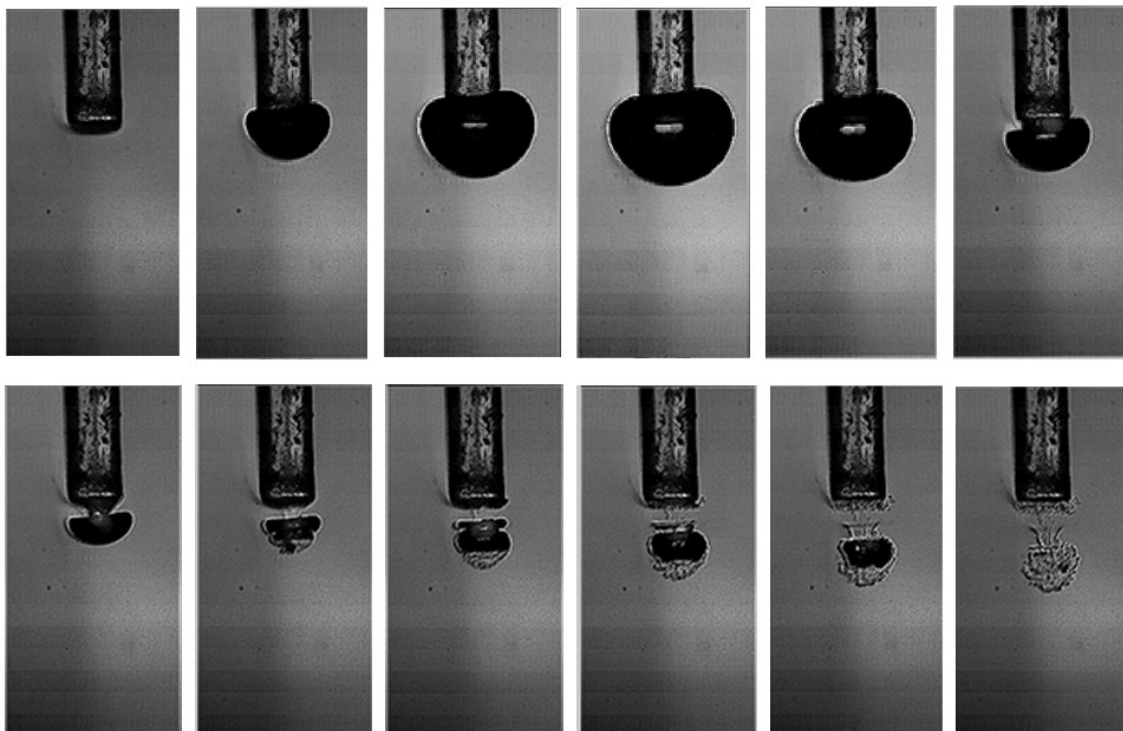


Fig. 7 Time series of photographs of bubble and jet formation at the tip of fiber
(Time interval: $40\mu\text{sec}$)

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.

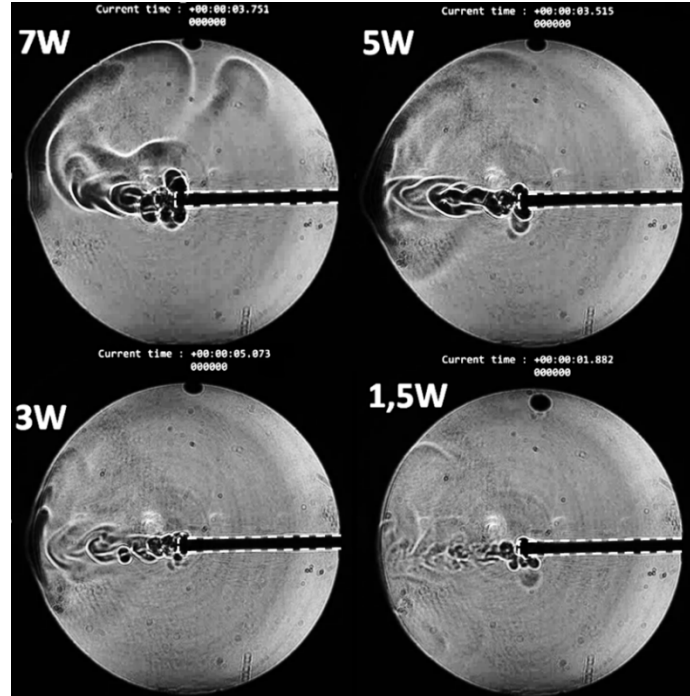


Fig. 8 Direct photos of hot liquid jet propagating inside of cuvette obtained for various values of laser power.

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-Stocks equations and energy equation 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.

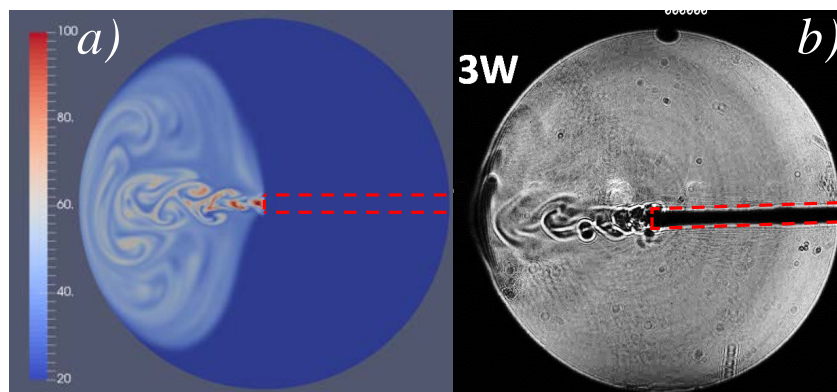


Fig. 9 Hot liquid jet propagation. a) 2D temperature field, b) experimental result

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.

In the next stage, we will simulate the whole process of bubble dynamics containing the evaporation and condensation process and compare it with the experimental data. In addition, theoretical modeling of this phenomenon will be conducted and discuss the interface stability. Furthermore, the application of jet formation to medical treatment will be discussed.

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] 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.*, Vol. 163, (2020), 120420 (9 pages), DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120420.

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

- *[2] J. Okajima, R. V. Fursenko, S. Mokrin, V. Gubernov and S. Minaev: Modeling on Boiling and Bubble Dynamics Induced by Laser Emitted from Optical Fiber, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-73, p. 127.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release)

東北大学, レーザーによる高速水ジェット発生メカニズムを解明～より安全なレーザー治療の実現にむけて～, 2020.10.2,

<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2020/10/press20201002-03-jet.html>.

Tohoku University Global Site, Revealing the Reason Behind Jet Formation at the Tip of Laser Optical Fiber, 2020.10.9.

https://www.tohoku.ac.jp/en/press/reasons_behind_jet_formation.html

AlphaGalileo, Revealing the Reason Behind Jet Formation at the Tip of Laser Optical Fiber, 2020.10.12.

<https://www.alphagalileo.org/en-gb/Item-Display/ItemId/198341>

EurekaAlert, Revealing the Reason Behind Jet Formation at the Tip of Laser Optical Fiber, 2020.10.12.

https://www.eurekaalert.org/pub_releases/2020-10/tu-rtr101220.php

Asia Research News, Revealing the Reason Behind Jet Formation at the Tip of Laser Optical Fiber, 2020. 10. 12.
<https://www.asiaresearchnews.com/content/revealing-reason-behind-jet-formation-tip-laser-optical-fiber>

International multiple collaborative research	
Project code	J20R004
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2021
Project status	2nd year

An Efficient Algorithm of Inlet Turbulence Generation for Cross-Platform-Based Parallel Computation and Its Application for Flows over a Low-Pressure Turbine Cascade

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), 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) will be described, and its performance will be investigated.

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.

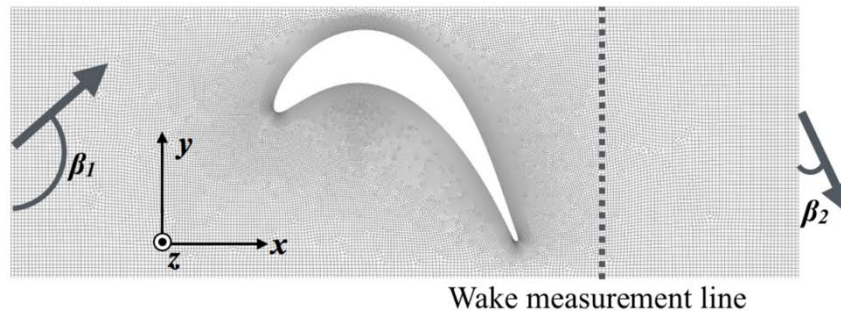


Figure 1 : Computational domain and mesh

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:

$$p_{t;\pm} = p \left\{ c_{PT_t} / \left[c_{PT_t} - \frac{1}{2} u_2^2 \left\{ \tanh \left(\frac{\eta_{ref} a_{bl} (h_z \pm z)}{\delta_{bl}} \right)^{n_{bl}} \right\}^{2/n_{bl}} \right] \right\}^{\gamma/(\gamma-1)}, \quad (1)$$

$$p_{t,mid} = p \left\{ c_{PT_t} / \left[c_{PT_t} - \frac{1}{2} u_2^2 \right] \right\}^{\gamma/(\gamma-1)}, \quad (2)$$

$$p_t = p_{t,+} + p_{t,-} - p_{t,mid}. \quad (3)$$

Note that c_{PT_t} is a constant ($= 3.5$); z is a spanwise coordinate ($-hz \leq z \leq hz$); η_{ref} corresponds to 99% thickness of the boundary layer profile approximated by $[\tanh\{(a_{bl} \eta)^{n_{bl}}\}]^{1/n_{bl}}$, where η 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 2 (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. 2, 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. 2, 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.

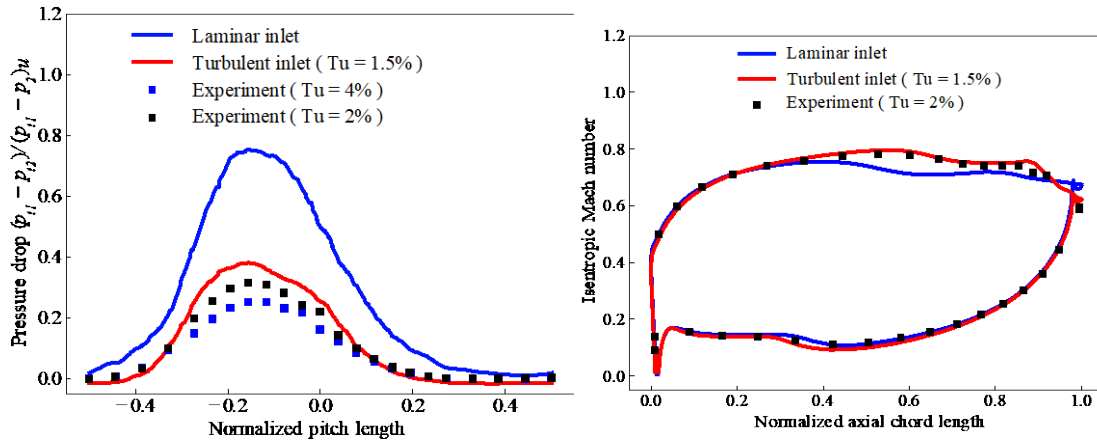


Figure 2 : Pressure drop in the wake (left) and isentropic Mach number on the blade surface (right).

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. 3 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. 3, 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 VeoKernelGenerator(BaseKernelGenerator):
    def render(self):
        if self.ndim == 1:
            inner = '''
                int cb, ce;
                loop_sched_id(_nx, align, &cb, &ce);
                int nci = (ce - cb) / SOA_SZ * SOA_SZ;
                for (int _xi = cb; _xi < cb + 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 VeoKernelGenerator(BaseKernelGenerator):
    def render(self):
        if self.ndim == 1:
            inner = '''
                int cb, ce;
                loop_sched_id(_nx, align, &cb, &ce);
                #pragma_NEC ivdep
                for (int _xi = cb; _xi < ce; _xi++)
                {{
                    {body}
                }}
            '''.format(body=self.body)

```

Figure 3 : Example of the code change in PyFR for fully vectorizable code on NEC SX-Aurora

Figure 4 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 was achieved. This is still slower than GPU ($t=0.57$), but the order of the speed becomes the same and considered reasonable in terms of the difference in the performance of TitanV and SX-Aurora.

Hardware	PyFR version	SoA size	OMP_NUM_THREADS	p=3	p=4	p=5
Titan V	Original		N/A	0.52	0.57	0.83
Aurora	Original	512	1	99.14	61.41	54.33
Aurora	Vectorized intcflux/ tflux	512	1	10.42	6.53	7.30
Aurora	Vectorized intcflux/ tflux	8	1	8.18	4.60	5.27
Aurora	Vectorized intcflux/ tflux	8	6	3.31	1.67	1.98

Figure 4 : 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

4. Summaries and future plans

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 50 times speed-up has been achieved.

- [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 Touber 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

- 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] Yoshiaki Abe: Simulations of Flow over Low-Pressure Turbine Blades with PyFR, PyFR Symposium 2020, (2020), (invited).
 - *[2] Yoshiaki Abe, Freddie D. Witherden, Kazuhiko Komatsu, Brian C. Vermeire, Peter E. Vincent, Kozo Fujii: High-fidelity Flow Simulation around a Low-pressure Turbine Blade and Cross-platform Implementation with PyFR, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-28, p. 46.
- 3) Patent, award, press release etc.
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	J20J001
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	2020.4～2021.3
継続年数	2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*, 早瀬 敏幸*, 石本 淳*
 太田 信*, 小宮 敦樹*, 高奈 秀匡*, 米村 茂*, 大谷 清伸*
 岡島 淳之介*, 上原 聡司*, 宮内 優*, 安西 眸*
 *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
 †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

研究分担者の渡部、矢野、伊賀、小林を主たるメンバーとし、令和2年3月に申請した学術変革領域研究Aにおいて構築した研究体制の強化ならびに学術変革領域研究Aの採択に向けた活動を進めた。本申請における総括班メンバーによるミーティングをオンラインで31回開催し、研究領域の目的、運用、成果、社会貢献などについて討論を行った。また、本申請に関わるメンバーによる全体会議を2回実施し、研究方針などを検討し了承を得た。これらの成果を踏まえ、令和3年1月に科研費学術変革領域研究Aの申請を行った。

研究グループの形成と方針策定と平行して、主たる研究対象となる高速ミストの研究を進めた。図1に高速ミスト発生装置を示す。高速ミストはガスボンベからガスを容器に供給し加圧し、容器内の水を加熱し水蒸気を発生させ、ノズルから噴出することで生成した。噴出

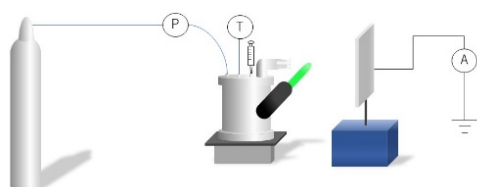


図1 高速ミスト発生装置

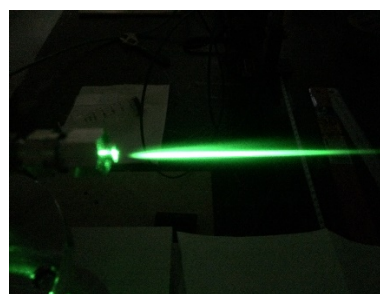


図2 高速ミスト可視化写真

したミストは、レーザー照射による可視化や下流の基板に衝突させたときの特性について測定できるように準備した。図2にレーザー光を照射したときのミストの散乱光の写真を示す。散乱光はジェット状に広がるが、下流域で周辺域が狭まり、さらに下流において散乱光は観察できなくなる。これらの結果よりミストが下流域において蒸発し消滅することが示された。また、ミストを構成する液滴径や速度を高速カメラの撮影による可視解析により検証を進め、可視化できる最小径の液滴速度は最大で300 m/s程度に達することを確認した。これらの成果をまとめ、特許出願を行った。

3. 研究目標の達成状況

本年度は、目標とした大型予算に向けた研究体制の構築を進めた。また、大型予算（科研費学術変革（A））への申請を行い、ヒアリングまで進むことができた。さらに、令和3年度に向けて新たなメンバーを招聘し、同予算の申請を行った。これより、当初の目標を十分達成した。

4. まとめと今後の課題

本年度構築した研究体制の発展と、研究課題の深化、さらに大型予算の採択に向けた対応を行う。

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] T. Sato, M. Watanabe, T. Yano, Y. Iga, K. Kobayashi, T. Hayase, J. Ishimoto, M. Ohta, A. Komiya, H. Takana, K. Ohtani, J. Okajima, S. Uehara, S. Miyauchi, and H. Anzai: Science of Ultrafine Droplet and High Speed Impact, *Proceeding of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, オンライン開催, (2020), CRF-17, p. 27.

[2] Yunchen Xiao, Siwei Liu, Tomoki Nakajima, and Takehiko Sato: Experimental Observation on Characteristics of High-Speed Mist, *Proceeding of the 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020)*, Sendai, オンライン開催, (2020), OS18-54, p. 589.

[3] Xiao Yunchen, Liu Siwei, 中嶋智樹, 佐藤岳彦: Generation of water vapor condensing mist, 日本機械学会東北支部第56期総会・講演会, オンライン開催, (2021), 講演番号: 109.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）

高速ナノミストおよびその生成方法と生成装置、処理方法と処理装置および計測方法と計測装置, 佐藤岳彦・中嶋智樹・ショウ インシン・藤村茂, 特願2020-179943, (2020).

（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>

Project code	J20Ly01
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd 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 (O_2) tension and change their behaviors accordingly either by regulating gene expression. However, it is less known that they can also move to regions of favorable O_2 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 was covered by a coverglass, cells quickly consumed the available O_2 and moved outward of the hypoxia area, forming a dense expanding ring moving at constant speed. 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_2 -directed migration as well as the detection and sensing mechanisms (sensitivity to a threshold or to a gradient, response time, and cell adaptation). In order to obtain further insight in the O_2 sensing mechanisms, we design a new microfluidic device to study aerotaxis adapted from Funamoto's microfluidic devices for observations of cancer and endothelial cells [R. Koens, et al., APL Bioeng, 4 (2020)]. The cell responses to various types of O_2 gradient as functions of gradient steepness and absolute O_2 level are investigated.

2. Details of program implement

We have fabricated very efficient microfluidic devices for observation of Dicty under controlled O_2 concentration (Fig. 1). The O_2 concentration in the media channel is controlled by O_2 exchange through the PDMS within 15 min. By using the developed device, Dicty behaviors were observed and quantified under an O_2 gradient from 0.4% to 21% O_2 and uniform O_2 concentrations.

The project was greatly affected by the COVID situation as JP RIEU could not visit IFS in 2020. We were planning to realize a second generation of devices or to adjust protocols to control more precisely gradient in the O_2 concentration range 0.1-0.5%. S. HIROSE in Sendai could however establish a cell culture room for Dicty at IFS and measure both aerokinetic and aerotactic behaviors in Dicty. We took the advantage of the COVID situation to model and submit experiments to eLife.

3. Achievements

We successfully observed changes of Dicty behaviors by hypoxic exposure (Fig. 1). Under the O_2 concentration gradient, the Dicty on the hypoxic side showed a different migration tendency compared with those on the normoxic side. On the hypoxic side, the Dicty tended to migrate toward the normoxic side, and the cell density was decreased as time progressed. Compared with the computed O_2

concentration profiles in the device, Dicty changed their migration under a hypoxic environment with an O₂ concentration of 2% or lower. Under uniform hypoxic conditions less than 2% O₂, the increased migration of Dicty was also observed.

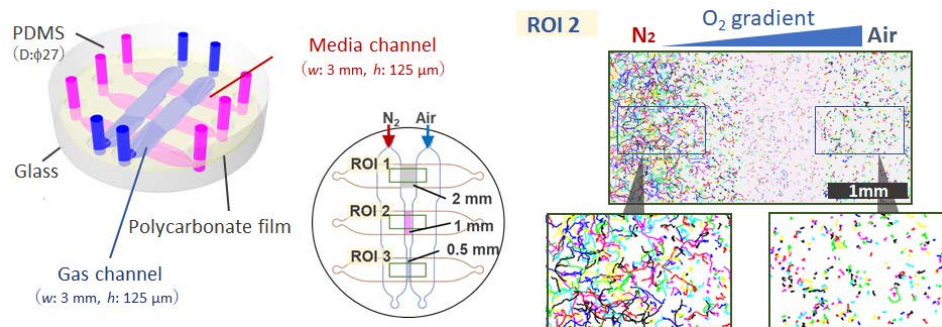


Figure 1: Design of the microfluidic device and observed trajectories of Dicty migration under an oxygen gradient.

4. Summaries and future plans

We still need to validate the microfluidic device using several cell lines and improve it for Dicty, especially for mutants associated with proteins involved in the O₂ detection and response pathways. Our preliminary results indicate that Dicty cells become aerotactic when O₂ concentration is lower than 2%. The current device can barely not control the O₂ concentration down to 0.5%. Hence, we work on a second generation of devices or to adjust protocols to control more precisely gradient in the O₂ concentration range 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, J.-P. Rieu: Hypoxia Triggers Collective Aerotactic Migration in *Dictyostelium Discoideum*, bioRxiv, (2020), DOI: 10.1101/2020.08.17.246082. (in revision to eLife)
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
 - [2] 廣瀬理美, Jean-Paul Rieu, 船本健一: マイクロ流体デバイスによる酸素濃度勾配下の細胞性粘菌の運動解析, 日本機械学会第31回バイオフィロンティア講演会, (2020), 2B11.
 - [3] N. Takahashi, S. Hirose, J.-P. Rieu, K. Funamoto: Measurement of Oxygen Tension in Microfluidic Device by Using Oxygen-Sensing Film, *Proceedings of the 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020)*, (2020), OS11-4, pp. 339-340.
 - [4] S. Hirose, J.-P. Rieu, K. Funamoto: Evaluation of Dictyostelium Migration under Oxygen Concentration Gradient, *Proceedings of the 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020)*, (2020), OS11-3, p. 338.
 - *[5] O. Cochet-Escartin, S. Hirose, K. Funamoto, C. Anjard, J.-P. Rieu: Hypoxia Triggers Collective Aerotactic Migration in Dictyostelium Discoideum, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, (2020), OS20-7, pp. 190-191.
 - [6] 廣瀬理美, Jean-Paul Rieu, 船本健一: 酸素に依存する細胞運動の機序解明を目的とした細胞性粘菌の走気性の観察, 生体医工学シンポジウム 2020, (2020), 2A24.
- 3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J20Ly02
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Ionic Liquid Polymer for Corrosion Resistance Applications

Nicolas Mary*†, Tetsuya Uchimoto**††
 Sebastien Livi,***, Pierre Bertrand ****, Lucas Ollivier-Lamarque*
 *ELyTMaX, CNRS-UdL-Tohoku University
 **Institute of Fluids of Science, Tohoku University
 IMP, INSA Lyon, * MATEIS, 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 application of the coating 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.

2. Details of program implement

Polymer materials were produced at IMP (INSA, France). Samples consisted only of polymer discs. The metallic substrate was avoided to focus only on epoxy behavior. A Devanathan and Stachurski was set up at MATEIS (INSA France). The first trial was performed on a metal-coated polymer disc to promote hydrogen entry. In Parallel, NDE measurements were developed at IFS (TU, Japan) to increase sensor sensitivity regarding water penetration since hydrogen charging is performed in an aqueous solution.

2.1. Sample and technique

The reference sample was manufactured using BADGE LY556 as prepolymer and jeffamine D-230 as a curing agent (Huntsman). LY 556 is an unmodified liquid type epoxy resin from Sohman used in high-performance composite parts. Both components were added in stoichiometric quantities, which corresponds to a mass of amine equals to 0.3 the mass of epoxy.

Once the epoxy plates were manufactured, the discs were extracted, and samples dedicated to H-charging were coated with palladium (Pd). A 20nm Pd layer was deposited using ionized argon gas in a vacuum chamber (CCU-010).

Immersion tests were carried at 30°C in 0.1M NaCl solution. Electrical impedance spectrum was recorded to extract capacitance and dielectric properties of samples along with the water uptake. Mass variation was also recorded at the same time.

H-permeation solution consisted of sulfuric acid (H₂SO₄) solution at 98% with potassium sulfate (K₂SO₄). The desired concentrations were respectively 0.02mol/L and 0.1mol/L (pH=2.08).

2. 2. H-charging

Charging potentials (in cathodic range) were deduced from cathodic polarization curves on the coated sample. Since polymer material is insulating in volume, a high cathodic potential was applied to $-3\text{V}/\text{MSE}$. Figure 1a shows a current increase for a sample undercharging condition. The current jump is then normalized, and diffusion coefficient is deduced from the slope at 63% of the time. The first estimation gave $3.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ which is significantly higher than the value found in the literature ($1.10^{-12} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$). Such difference can be related to the different experimental conditions (in gas or in liquid medium).

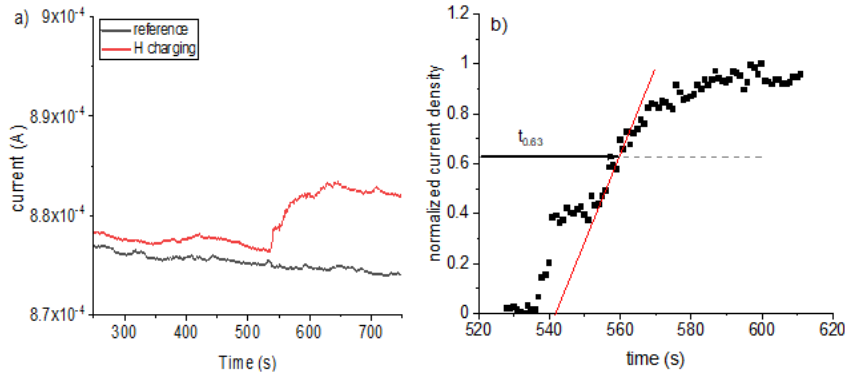


Figure 1. a) charging current and no charging current versus time. b) determination of H diffusion coefficient at 0.63.

In parallel, the relative mass increase of the sample in the 0.1M NaCl solution was followed by gravimetry and capacitance measurements to develop the mixing rule model to describe the water uptake in the material. Results show a good correlation between experiment and model based on capacitance analysis. A two-phase model (epoxy and water) is prone to follow the water uptake and access water saturation and water diffusion coefficient.

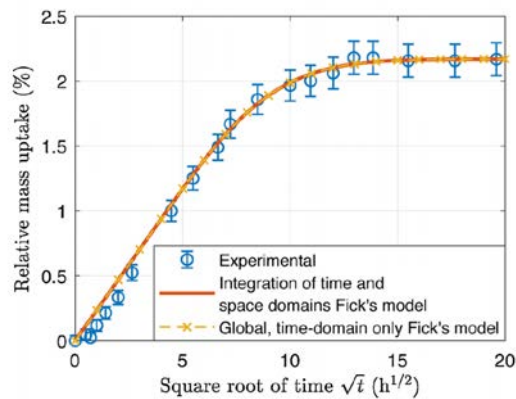


Figure 2. Comparison between gravimetric results and mixing rule model.

3. Achievements

During this project year, polymer discs were prepared to regard hydrogen charging experiments. Thin Pd coating was deposited by sputtering to ensure electrical contact to force hydrogen entry to one side and hydrogen output to the other side.

The issues (temperature, leakage, electrical contact) with the Devanathan's cell were also solved. Electrochemical characterization of surface reactivity was obtained. Base on them, a first permeation was achieved, showing the setup potentialities. In parallel, a mixing rule model was developed to access water penetration profile and diffusion coefficient in polymer disc during immersion tests.

4. Summaries and future plans

The development of a mixing rule model for water uptake was validated on epoxy resin, and H-charging tests were performed. In both cases, results were obtained. For water uptake, the methodology can be applied to other polymer materials containing ionic liquid. For H-charging, reproducibility tests are needed to validate the first diffusion coefficient calculated.

5. Research results

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

[1] L. Ollivier-Lamarque, M. Lallart, N. Mary, T. Uchimoto, S. Livi, S. Marcelin, H. Miki : Dielectric analysis of water uptake in polymer coating using spatially defined Fick's law and mixing rule, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 148, (2020), 105846. DOI : 10.1016/j.porgcoat.2020.105846

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

[2] L. Ollivier-Lamarque, M. Lallart, T. Uchimoto, N. Mary, S. Livi, S. Marcelin, H. Miki : Water Uptake Assessment in Polymer Coating from Dielectric measurements Using Local Mixing Rule Coupled with Cole-Cole Equation, *Eurocorr2020*, Brussel, Belgique, (2020).

[3] L. Ollivier-Lamarque, T. Uchimoto, M. Lallart, N. Mary, S. Marcelin, S. Livi : Water Uptake Monitoring in Epoxy-amine Polymer by Combining Dielectric and Gravimetric analysis, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020)*, Sendai, Japan, (2020), OS18-64, pp. 611-612.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J20Ly03
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Numerical Modelling of Particle-Laden Effect on Supersonic Flow for Cold-Spray Polymer Coating

Chrystelle Bernard*†, Hidemasa Takana**††

Olivier Lame***, Kazuhiro Ogawa****, Jean-Yves Cavallé*****

*Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***MATEIS, INSA de Lyon, Université de Lyon

**** Fracture and Reliability Research Institute, Tohoku University

*****ELyTMaX UMI 3757, CNRS — Université de Lyon — Tohoku University,

International Joint Unit, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

This study aims to simulate and understand the complex gas dynamics occurring during cold spray process while focusing on polymer coating. One of the key parameters in the formation of a polymer coating by cold spray lies in the particle temperature. Thus, long nozzle is needed to increase the particle residence time, and therefore the particle temperature.

2. Details of program implement

Continuing last year study, in collaboration with Pr. Takana, we resolved the numerical issues in the implementation of the 3D model which includes the powder feeder. The long nozzle developed by Ravi et al. (2015) is composed of two 120 mm long nozzle with a step-like reduction of nozzle cross section at the interface. The boundary conditions are represented in Figure 1. Because of the sudden reduction of the cross section, the particles can rebound at the intersection between the two nozzles leading to the increase in their residence time and therefore temperature.

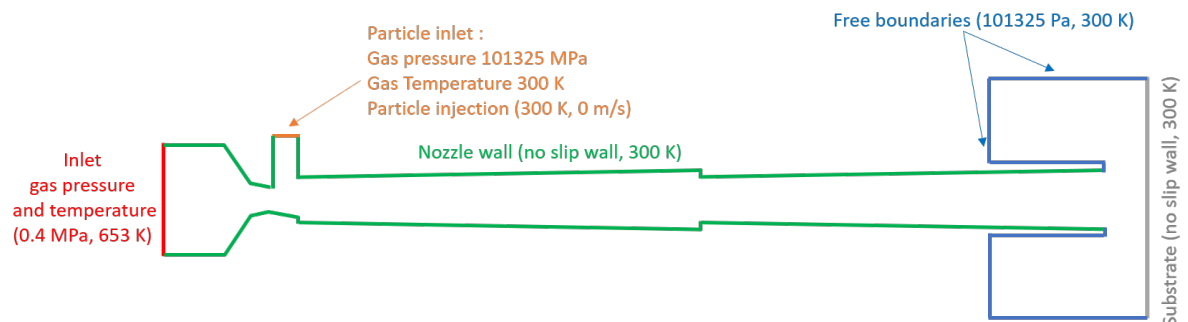


Figure 1: Schematic representation of the boundary conditions.

3. Achievements

The particles trajectory was analyzed. The results are presented in Figure 2. At their entrance into the nozzle, all particles follow the same path. At the intersection between

the two nozzles, rebounding of some particles leads to higher particle temperature.

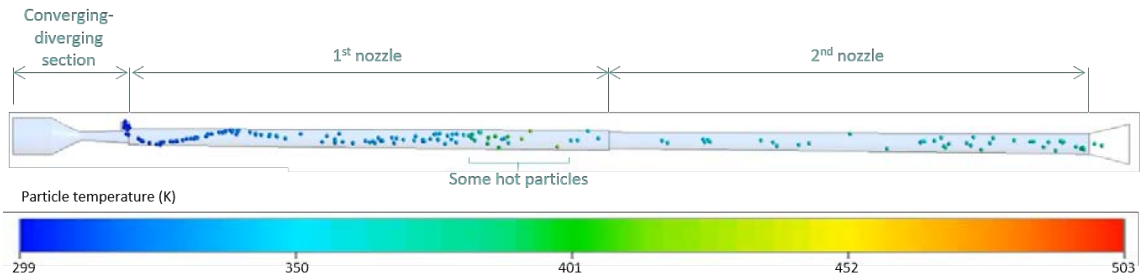


Figure 2: Evolution of the particles' trajectories along the nozzle. All particles are 60 μm .

By investigating the number of rebounded particles, it appears that around 20 to 30% of the particles injected inside the nozzle can experienced rebounding at the intersection between the two nozzles, as shown in Figure 3. In addition, the particles rebound more than once inside the nozzle due to the 20% sharp decrease in the nozzle section. Here, an interesting point lies in the existence of an initial particle size (between 30 and 45 μm) for which the probability of rebound of the particle at the nozzle intersection will greatly increase from 5 to around 30%.

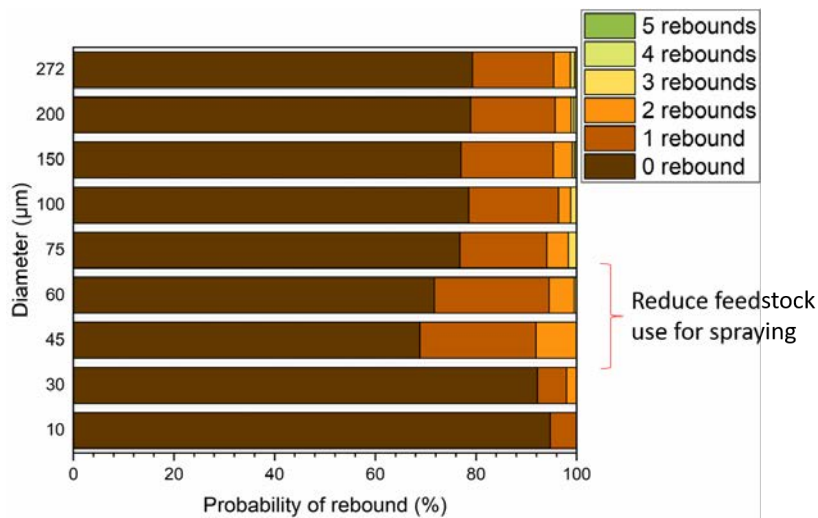


Figure 3: Probability of rebound of the polymer particles in function of the particle size. In its experiments, Ravi et al. (2015) uses a reduce feedstock including particle size between 45 and 63 μm .

The particle velocity seems unaffected by the particle rebound inside the nozzle (see Figure 4a). The rebounding of the particles inside the nozzle increases their residence time and therefore, significantly increases the particle temperature as shown in Figure 4b.

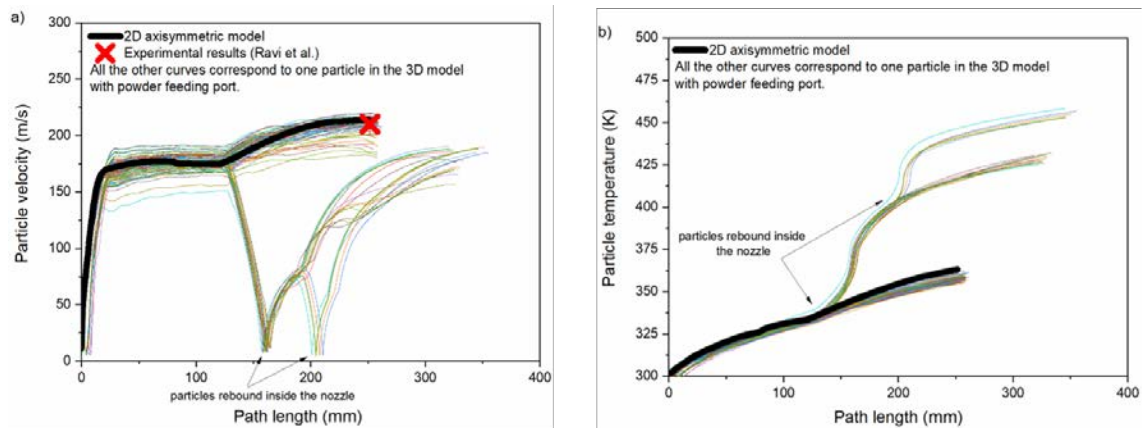


Figure 4: Evolution of the particle a) velocity and b) temperature inside the nozzle.

4. Summaries and future plans

In this study, we demonstrated the strong influence of the nozzle inner shape on the particle trajectory, velocity and temperature evolution inside the nozzle. A paper is in preparation regarding this study and will be submitted by the end of June.

In the next step of this study, we will continue to investigate the particle history inside the nozzle and in particular the thermal gradient generated within the polymer particle due to the heat transfer from the gas.

5. Research results

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

[1] C. A. Bernard, H. Takana, G. Diguët, K. Ravi, O. Lame, K. Ogawa and J.-Y. Cavaille: Thermal gradient of in-flight polymer particles during cold spraying, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 286, (2020), 116805 (10 pages), doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116805

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

*[2] C. A. Bernard, H. Takana, O. Lame, K. Ogawa and J.-Y. Cavaille, Computational simulation on particle-laden flow during polymer cold-spray process, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFT-2020)*, Sendai, Japan, (2020), OS20-1, pp. 178-179.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

Project code	J20Ly04
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Response Characteristics of Cellulose Nanofibril under AC Electric Field

Hidemasa Takana*†, Laurent Chazeau**

Florent Dalmas**††, Cavaille Jean-Yves**

Dichiara Anthony***, Heather Wise***

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**INSA Lyon, Université de Lyon

***School of Environmental and Forest Sciences, 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 CNF alignment process by an alternating electric field in the presence of elongational flow will be clarified. Through optimization of operating conditions and channel geometries, the effect of electric and flow fields assisted CNF alignment on the fabrication of strong single cellulose fiber will be shown.

3. Achievements

Figure 1 shows tensile test results of the fabricated single cellulose fibers with CNF enhanced alignment by AC electric field and elongational flow. The effect of applied electric field on the enhancement of mechanical properties of the fabricated fiber is clearly shown for applied voltage at 600 V. The tensile strength and toughness increase by 63 % and 120 %, respectively by applying the

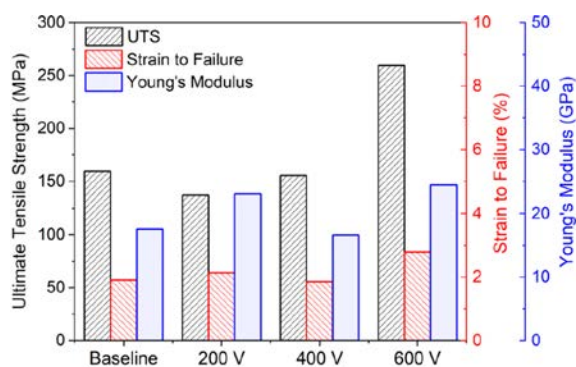


Figure 1: Mechanical properties of fabricated cellulosic filaments.

electric field. This is because the nanoscale ordering is realized with the assist of electrostatic torque and elongational flow, which is revealed by XRD analysis and SEM observation. The obtained results are published by journals, and also introduced in the media.

4. Summaries and future plans

The CNF behavior under the electric field in a flow system will be further investigated by solving the momentum equations of individual fibrils. The effect of fibril size distributions on the fibril alignment will be discussed.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - [1] H. Wise, H. Takana, F. Ohuchi and A. Dichiara: Field-Assisted Alignment of Cellulose Nanofibrils in a Continuous Flow Focusing System, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12 (2020), pp. 28568-28575, doi: 10.1021/acsami.0c07272.
 - [2] 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 (2021), pp. 134-141.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [3] H. Takana and R. Sato: Numerical Simulation on Orientation Control of Cellulose Nano Fibril by Electric Field during Flow Focusing, *Proceedings of the 17th International Conference on Flow Dynamics*, online, (2020), OS5-15, pp. 231-232.
 - [4] H. Wise, H. Takana and A. Dichiara: Aligned Conductive Composite Filaments using Field Assisted Flow Focusing System, *Proceedings of the 17th International Conference on Flow Dynamics*, online, (2020), OS5-13, pp. 227-228.
 - *[5] H. Takana and M. Guo: Response Characteristics of Cellulose Nanofibril under AC Electric Field during Flow Focusing, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, online, (2020), OS20-2, pp. 180-181.
 - [6] 福森賢, 高奈秀匡: ナノ繊維配向における流路形状依存性に関する数値シミュレーション, 混相流シンポジウム 2020 講演論文集, オンライン開催, OS-5, 0085, (2020).
 - [7] 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依存性, 日本機械学会第 98 期流体工学部門講演会講演論文集, オンライン開催, OS08-04, (2020).
 - [8] 薄井拓巳, 佐藤瞭, 高奈秀匡: セルロース分散流におけるナノ繊維の電場配向制御特性, 日本機械学会東北支部第 56 期総会・講演会講演論文集, オンライン開催, 106, (2021).
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.
 - (Award) Not applicable.
 - (Press release)
 - Press release from Tohoku University, 「夢の新素材セルロースナノファイバーを原料とした革新的セルロース単繊維創製法を開発 ―電場と流れ場による繊維配向制御で高強度化に成功―」, Oct. 5th, 2020.
 - 日本経済新聞電子版, 「東北大、セルロースナノファイバーを原料としたセルロース単繊維の高強度・高靱化に成功」, Oct. 5th, 2020.
 - 日経 XTECH, 「電場と流れ場で CNF を整列、セルロース繊維の強度もじん性も向上」, Oct. 13th, 2020.

Project code	J20Ly05
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Thermal Actuation and energy harvesting using MultiPhysics alloys (TATAMI)

Mickaël Lallart*†, Hiroyuki Miki**††, Gaël Sebald***

*Univ. Lyon, INSA-Lyon

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***ELyTMaX UMI 3757, CNRS – Université de Lyon – Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

TATAMI aims at investigating innovative routes for thermo-mechano-electrical and electro-thermo-mechanical energy conversion systems. The objective of the project is to use commercial (or ready-made) or homemade alloys that feature the ability of coupling up to four physical domains (thermal, mechanical, magnetic and electrical – Figure 1) for application in thermal energy harvesting apparatus or actuators. In that framework, TATAMI proposes 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. Materials under consideration will at least present thermomagnetic coupling such as ferromagnetic devices (e.g., Phytherm from Aperam - <https://www.aperam.com/product/>), but may also be possibly homemade, yielding new MultiPhysics Memory Alloys (MPMA, coupling thermal, magnetic and mechanical physical domains) tailored thanks to a fine analysis and modeling of their properties.
- 2) The development of energy harvesting systems, encompassing the structural aspect (e.g., mechanical heat engines showing mechanical oscillations triggered by temperature gradients) as well as the energy conversion aspect (electromechanical coupling or direct electrothermal coupling – e.g., through pyroelectric effect). The ultimate goal of this part is to provide devices competing with conventional thermoelectric modules (TEGs), by providing alternative approaches addressing the issue of high thermal conductivity of TEGs.
- 3) The design and implementation of innovative small-scale actuation devices triggered by temperature (for instance through Joule heating of Peltier modules). Taking advantage of bistable behavior enabled at different levels (e.g., thermomagnetic, through first-order phase transition, or mechanical, through buckling), the aim is to provide energy-efficient device competing with conventional Shape Memory Alloy (SMA) based systems.
- 4) The development of associated electrical interfaces. On the energy harvesting aspect, this includes ultralow power interfaces able to provide high energy extraction and/or constant power extraction whatever the connected load. Ultimately this could lead to the development of self-powered sensor demonstrator. For the actuation application, the purpose is to provide small-scale driving electrical circuits.

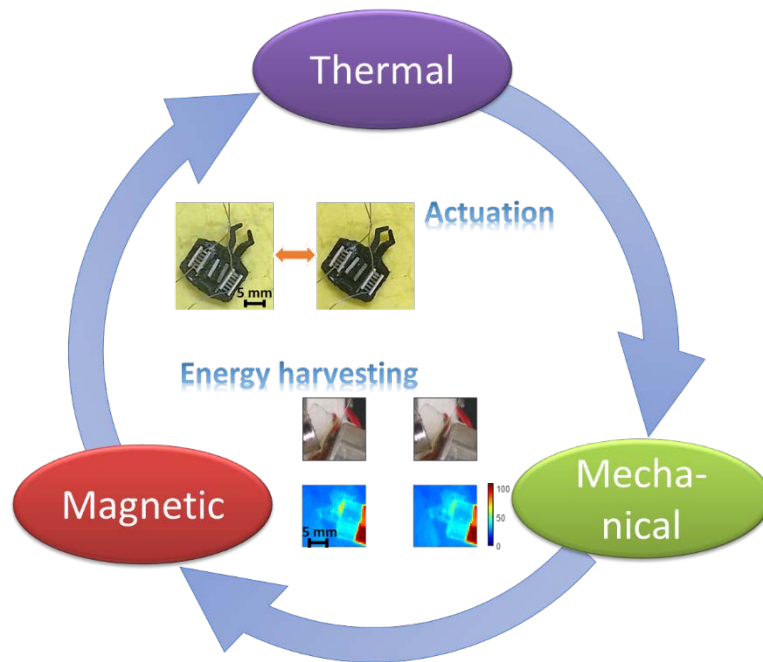


Figure 1: TATAMI concept.

2. Details of program implement

TATAMI finds its roots in previous collaborative projects involving, among other institutions, TU-IFS and INSA-LGEF. MISTRAL networking project, part of the ELYT Global international research network and former Core-to-Core JSPS project, was devoted to the preliminary demonstration of MPMA for thermal to mechanical energy conversion. Later, on 2019, Prof. Lallart was awarded a JSPS invitational fellowship to pursue the application of MPMA to energy harvesting, as well as investigating the modeling of such materials. Benefiting from the excellent knowledge and complementarities of the partners and using as basis such previous collaborations, TATAMI aims at going beyond current results.

To achieve the project's goals, a global and interconnected approach, driven by the "material and system by design" philosophy, is proposed, declined into tightly interacting work packages as follow:

- WP1 - material selection, fabrication and optimization: the first step consists in selecting materials for the fabrication of the alloy, and/or use commercial compounds (after adapted screening) or previously elaborated materials. The optimized material and associated process are selected in accordance with lessons drawn from the other work packages. In particular, the tailoring of phase transitions, in accordance with target applications, is investigated. For example, for an application working at given temperature range, the material is processed in order to show strong response in this particular region.
- WP2 - MPMA modeling and characterization: in order to deeply understand the physics behind the MPMA response, modeling aspects are further developed, potentially including microscale characterization and theoretical developments. This definitely helps the material development or selection by emphasizing key parameters and correlating the latter to the composition or process for instance. This Work Package also provides valuable resources in terms of characteristics and ways to change them for the next work packages dedicated to the device development.
- WP3 – energy harvesting device: based on the material characteristics, but also based on applicative environment constraints, this work package consists in the

development of innovative heat engine, aiming at converting temperature gradients into time-domain variation of the temperature associated with mechanical motion. Most suitable ways of converting this energy into electricity by means of piezoelectric, electromagnetic or pyroelectric transduction, are investigated, along with the associated electrical circuit able to output DC voltage as required by electronic sensors. Also, this work package provides feedbacks to WP1 for material tailoring.

- WP4 – actuation system: while WP3 investigates thermal to electrical energy conversion, WP4 aims at developing devices able to provide mechanical output from thermal input (typically obtained from Joule’s effect through a resistive element; the latter possibly being the MPMA itself). Hence, the underlying objective of this work package, in tight bidirectional interaction with WP1, is to provide an actuator (such as a microgripper) with high performance (e.g., sufficient holding force), while consuming as little energy as possible. Indeed, while typical Shape Memory Alloy-based actuation is usually monostable, requiring continuously supplying the device for at least one of its positions (therefore consuming energy), TATAMI considers bistable systems for energy savings.

Thanks to the support of JSPS, research was conducted by the whole team in Tohoku until June, 2020. Later on (Sept. 2020-Apr. 2021), IFS LyC (Lyon Center) environment in Lyon allowed to pursue the collaborative research work in conjunction with Tohoku team. This antenna abroad thus provided a wonderful support, especially during the pandemic outbreak that prevented from travelling.

3. Achievements

Works done in the framework of the first year of TATAMI project and associated actions allowed progresses at several scales. This included (i) material modeling and understanding, (ii) energy harvesting application and (iii) preliminary development of actuators.

Material modeling and understanding

The first steps towards this research were to **understand the underlying mechanisms** behind the unique behavior of MPMA. To this end, a model explaining the origin of such remarkable characteristics was established based on two simultaneous phenomena:

1. **First-order structural phase transition** with temperature (Shape Memory characteristics), with however the properties of showing a reversed martensite-austenite transition.
2. **Second-order ferromagnetic phase transition** of the austenite phase, with a loss of magnetic properties with the temperature (the low-temperature martensitic phase being considered as almost paramagnetic).

Model principles and results are summarized in Figure 2, showing very good agreement between theoretical results and measurements on an actual MPMA sample using SQUID magnetometer¹. Based on this successful modeling of the MPMA behavior, ways of **optimizing** the material with respect to requirements and constraints (*i.e.*, environment) have also been investigated, considering for instance the initial magnetic susceptibility of the austenite phase, ferromagnetic transition temperature (austenite phase) or hysteresis width (structural transition). This study and the associated findings have led to a communication in ICFD 2020 [2].

¹ These experiments were performed before the project.

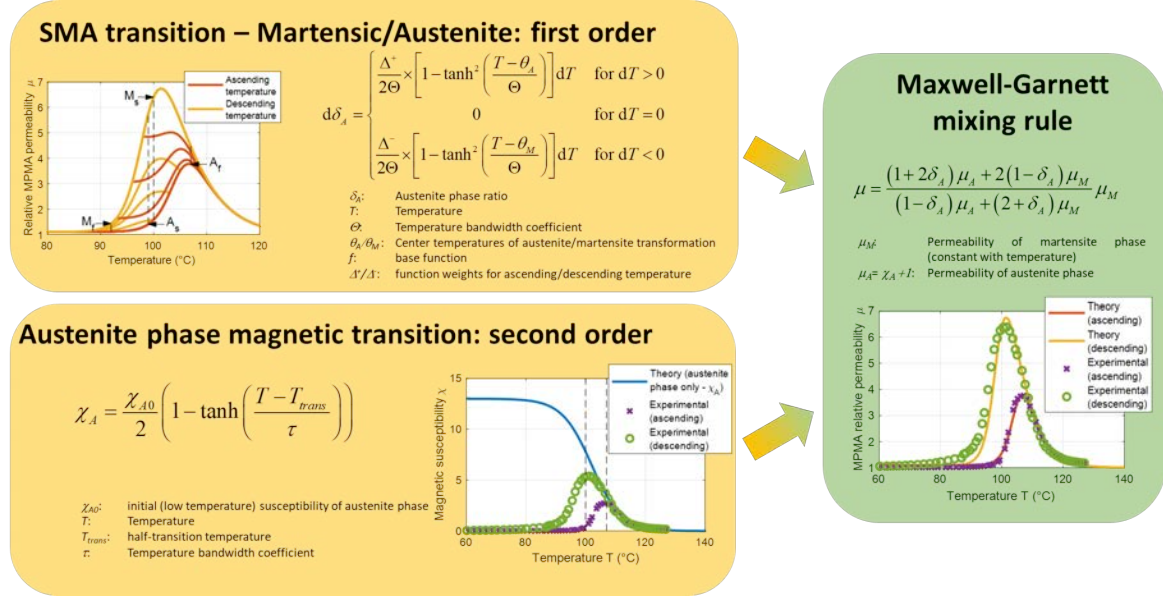


Figure 2. MPMA model principles and results.

Energy harvesting

The first application of MPMA taking advantage of its remarkable properties considered the design of a **thermal energy harvesting** device exploiting the concept of **heat engine**. The principles behind this idea lie in taking advantage of phase transitions to trigger **mechanical oscillations associated to local temperature time-domain variations** at the MPMA level. Going further into these considerations, this concept has been enhanced by considering **pyroelectric elements** as energy conversion materials (Figure 3(a)). This allows **direct thermal to electrical energy flow**, providing much higher efficiencies compared to conventional heat engines that usually consider electromechanical conversion. In addition to this energy path optimization, the heat transfer from the MPMA to the pyroelectric element permits **cooling down the MPMA in a quicker way**, therefore increasing the operating frequency of the engine and thus the output power. Finally, the MPMA unique characteristics allows using the **magnet on cold side**, hence not necessitating high temperature magnets with high cost and lower performance than conventional ones.

The experimental implementation of this device is shown in Figure 3(b), and experimental results in terms of MPMA temperature, thermal imaging and pyroelectric element voltage response are shown in Figure 3(c). Hence, these results confirmed the ability of the system to provide **mechanical and thermal oscillations from a given temperature gradient** (the hot source being at approximately 115° C here, while the cold side is left at room temperature). Additionally, theoretical modeling undertaken in order to predict the system behavior allowed giving insights for future **optimizations and developments**.

Such results yielded a publication in a high-IF (8.848) Journal (Applied Energy) [1].

Actuation

Another attractive aspect of Shape Memory Alloys (SMA) and Ferromagnetic Shape Memory Alloys (FSMA) is their **integrability**. Unlike MPMA, FSMA shows a loss of magnetic properties with temperature, but still originating from combined first-order structural transition (austenite at low temperature and martensitic at high temperature, in a converse way than MPMA) and second-order ferromagnetic phase transition for the austenite phase (the martensitic one being almost paramagnetic). Hence, these two combined transitions permit a **much sharper change of magnetic properties** compared to conventional ferromagnetic materials.

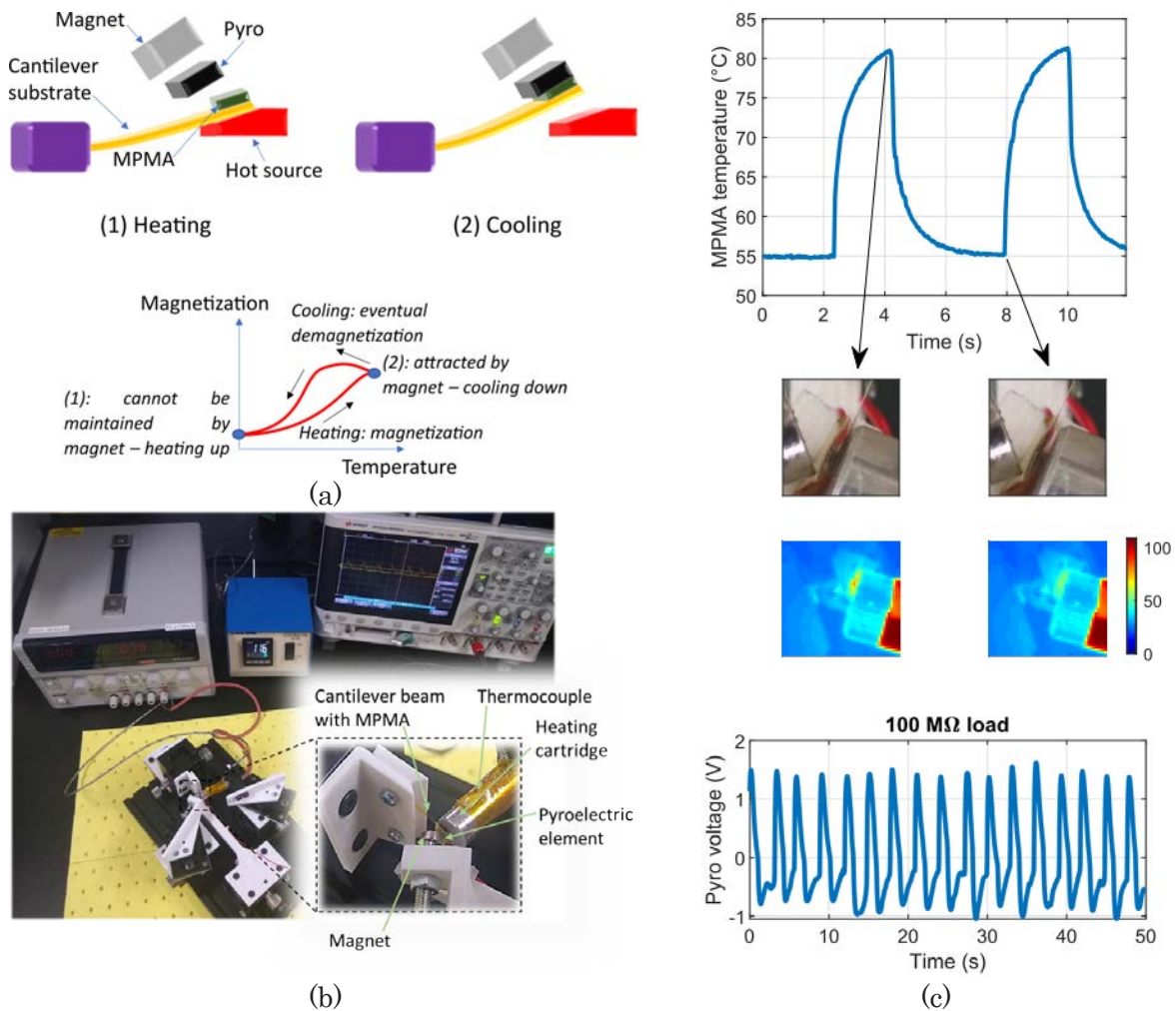


Figure 3. MPMA/pyroelectric heat engine: (a) schematics, (b) implementation and (c) experimental response

Preliminary developments on actuation such in the form of a **microgripper** has been undertaken using ferromagnetic materials with transition temperature close to room temperature (Figure 4). The interest in the developed structure first lies in the **bistability** feature enabled by two ferromagnetic elements on each side and moving magnet, so that when one ferromagnetic alloy is heated the magnet is attracted by the other, while at rest the magnet is kept attracted by the closest alloy. This bistability thus **permits no energy consumption** when the system is at rest. The second interesting aspect of this device is the use of Peltier modules, which also permit cooling the other ferromagnetic alloys for faster cooling down and higher susceptibility, both effects contributing to **lower response time**.

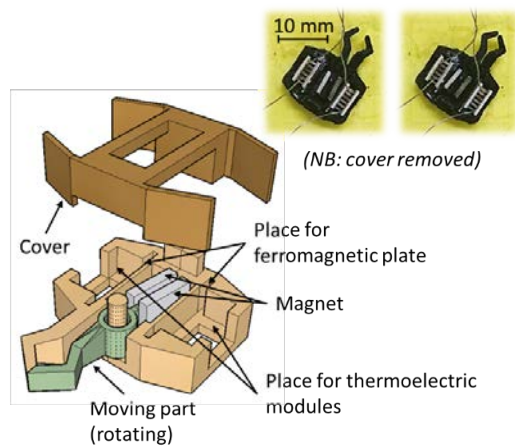


Figure 4. Preliminary design for microgripper application.

4. Summaries and future plans

TATAMI, as a multiphysic and multiscale project, aims at providing **advances at several levels**. First, the project aiming at a global approach driven by “**material and device by design**” philosophy, it is expected that progresses in the **comprehensive understanding of the global operation** of coupled devices for actuation or energy harvesting, for instance trade-off arising between input energy and extracted one (in other words, energy harvesting should not “kill” the source in order to have an efficient microgenerator). This **global systemic methodology** would also permit a fine perception of the interface between each stage/discipline involved in a complete device (e.g., thermal/magnetic/mechanical/electrical), with a global efficient optimization that would not be possible when considering all the stages separately due to the coupled nature of the envisioned devices.

In addition to these global progresses, TATAMI also addresses comprehensive analyses into each considered aspects. On the material and modeling aspects (WP1 and WP2), the project will permit envisioning **new routes for the design or selection of materials and their associated systems and structures** to ensure their good integration and response with respect to the target application. Such unique characteristics will then be taken into advantage for the development of **new architectures for energy harvesting** (WP3) **or actuation** (WP4). Regarding the former, **heat engines** able to transform thermal gradients into mechanical oscillations and time-domain local temperature variations will be considered. In particular, optimization of thermal and energy paths will be considered in order to dispose of devices able to compete with conventional small-scale thermal energy harvesting devices. Concerning actuation, alternatives to conventional devices based on SMAs (Shape Memory Alloys) will consist of **taking advantage of the thermo-magneto-mechanical coupling** of the selected/developed materials in order to obtain energy-efficient yet performant devices. Realistic and effective application-specific devices will be developed to demonstrate the interest in such structures.

Going from the physics behind the mechanisms of the unique considered materials to their application in energy harvesters or in actuators, this work has unveiled exciting new research routes for material and device development, raising stimulating scientific questioning along with application insights. As a transdisciplinary research work, the study covered **material physics aspects and device development involving thermal, magnetic and mechanical analyses**, along with particular attentions to the **interfaces** between these fields. Many research opportunities have been opened by this collaborative work. At the material aspect, the investigation of the **high-magnetic field response**, yielding saturation issues, is an example of future developments. At the device level, using **multifunctional materials and devices** in order to convert thermal energy to electricity (*i.e.*, hybrid pyroelectric/piezoelectric) is also an envisioned route. Regarding **actuator** applications, next steps will be the **experimental implementation and investigation** of a full proof-of-concept and integration study along with **theoretical analysis**. All of these research fields, thanks to their novelty and strong link with application, will therefore enable **continuous dissemination for many years** (journal papers, conferences...) and possible **valorization** through technology transfer (patenting) as a result of the initiated long-term collaboration thanks to the fellowship.

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 (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. Diguët, M. Ohtsuka and G. Sebald: Low-Field Modeling of Heusler MultiPhysic Memory Alloys, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, Japan, (2020), OS20-5, pp. 186-187.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

Project code	J20Ly06
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st year

Stability of Jet Diffusion Flames Cofiring with Carbon-Free Ammonia

Hideaki Kobayashi*†, Dany Escudie**††
 Cedric Galizzi**, Manuel Kuhni**
 Akihiro Hayakawa*, Sophie Colson*
 *Institute of Fluid Science, Tohoku University
 **CETHIL, INSA de Lyon
 †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The research momentum in the use of ammonia (NH_3) as a carbon-free fuel has been increasing internationally, following the first breakthrough achieved during the SIP project in Japan. The use of ammonia combustion is expected to play an important role in reducing CO_2 emissions in energy sectors such as power generations, industrial furnaces, and transportation. However, ammonia-only combustion is challenging in terms of flame stabilization. This issue is particularly critical when considering applications such as power generations and industrial furnaces and should thus be investigated. Therefore, to reduce CO_2 emissions while promoting flame stabilization, ammonia co-fired with methane (CH_4), which is the main component of conventional natural gas, should be investigated as a mean to enhance flame stabilization.

In this study, we clarified the flame stabilization characteristics of a CH_4 jet diffusion flame with the gradual introduction of ammonia in the fuel mixture. More specifically, the evolution of the dynamics of stabilization of the flame base with ammonia addition was considered, with particular attention to the evolution of flame position and flame-burner interaction up to liftoff.

The objective of this research is to understand how the aero-thermo-chemical balance corresponding to stabilization of the flame is affected by ammonia addition. In addition to those experimental observations, the experimental and numerical study of the counterflow diffusion flame and its extinction limit were investigated to clarify the flame structure and understand how ammonia addition affects the flame structure and in turn the stabilization dynamics.

2. Details of the implemented program

This research is a joint research between the Tohoku University Institute of Fluid Science and INSA-Lyon, started with the joint guidance of Sophie Colson, as a double degree student. Sophie Colson stayed in the CETHIL laboratory in INSA-Lyon under the co-supervision of Prof. Escudie and Prof. Galizzi for one year from October 2018 to September 2019 and again in January 2020 to perform experiments on ammonia/methane jet flames using the local experimental setup.

The CETHIL combustion group has recognized expertise in the study of the jet diffusion flames stabilization and flame-wall interactions, as demonstrated by the publication of several journal articles on this topic (for example, D. Escudie et al., On preheating and dilution effects in non-premixed jet flame stabilization, Combustion

and Flame, 160 (2013), 1102-1111).

On the other hand, the group of the principal investigator, Prof. Kobayashi, has demonstrated expertise in the field of ammonia combustion, with numbers of publications related to the reaction mechanisms of ammonia combustion and three-dimensional numerical analysis (for example, H. Kobayashi et al., Science and technology of ammonia combustion, Proceedings of the Combustion Institute, 37 (2019), 109-133).

Therefore, taking advantage of the strengths of both groups, we started joint research on the stabilization characteristics and mechanism of ammonia co-firing jet flame. In this joint research, the following points were more specifically investigated to clarify the main stabilization mechanisms:

- Experimental data on both local and global flame stabilization parameters were obtained in INSA-Lyon, using the jet flame configuration in the CETHIL. Global flame stabilization regimes and their evolution with ammonia addition as represented in Fig 1, were clarified for the first time. Local flame stabilization regimes before liftoff and their evolution with ammonia addition were also investigated.
- The extinction limits of both counterflow premixed and non-premixed flames, which are an index of flame reactivity of particular importance to flame stabilization, were acquired using a counterflow configuration in the Institute of Fluid Science. Flame structure and chemistry were investigated and main differences with conventional methane flame were highlighted.

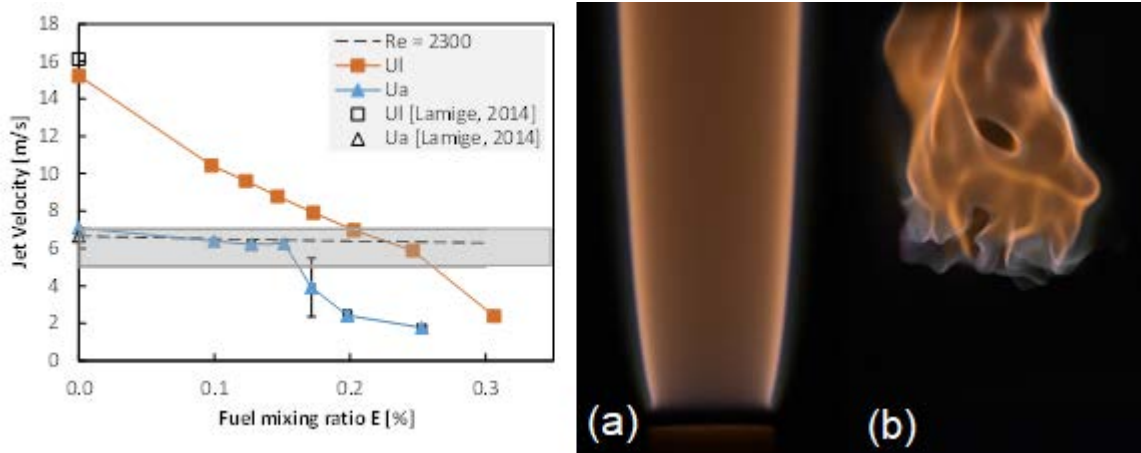


Figure 1: Observation of the transitions between the different global stabilization regimes (liftoff and reattachment). On the right side: (a) an attached ammonia/methane flame before liftoff; (b) a lifted ammonia/methane flame.

Besides, to clarify the stabilization mechanisms observed during the experiments, further analysis, utilizing the experimental data obtained, is performed. More specifically, 3D numerical analysis of the base of the flame is carried out at the Institute of Fluid Science to clarify the impact of ammonia addition on the local stabilization mechanisms. Indeed, and in complement of the experimental observations, numerical analysis allows access to a large number of parameters, including velocity flow fields or local mixture fraction which are difficult to obtain experimentally without using intrusive measurement systems.

3. Achievements

Ammonia/methane non-premixed jet flame stabilization was investigated for the first time. Both global and local experimental approaches were undertaken to get a complete understanding of the effect of ammonia addition on stabilization in this academic configuration. This highlighted the aero-chemical-thermal coupling at stake and how they are impacted by ammonia introduction. This can be used as a tool for understanding stabilization of such type of flame in a more complex industrial environment such as furnaces or gas turbines.

More specifically, during the year 2020, a temperature mapping of the flame close to the burner was undertaken in the CETHIL in Lyon to bring additional information on the thermal coupling with the burner up to liftoff in the local approach. Besides, velocity measurements were performed as a complement of the global approach developed in our previous study to analyze the combined effect of air coflow velocity and ammonia addition on velocity profiles for lifted flames before the re-attachment transition. The results of this work were published in international peer-reviewed journals.

4. Summaries and future plans

From previous research on jet diffusion flame conducted by Prof. Escudie's group of INSA-Lyon, the change in the flame base position until the blow-off changes mostly with the variations in local flow velocity and the local fuel concentration. To these parameters, mostly associated with the local aerodynamics variations in the wake of the burner lip with jet velocity changes, should be added the thermal interaction with the burner. Previous work has shown that the influence of the burner lip temperature is also large, and the thermal interaction between the heat generated by the flame and the heat loss to the burner lip plays an important role in flame stability.

Ammonia has a lower heating value of about 50% compared to methane, which is a conventional fuel and the main component of natural gas. Moreover, its laminar burning velocity in a stoichiometric mixture is close to 4 times smaller. Ammonia addition to a methane flame is thus likely to greatly modify the stabilization process through the lower reactivity of the mixture, but also the changes induced in both the mixture transport and thermal properties.

In the case of methane, the active chemical species that plays the most important role in the combustion reaction is H radical, whereas OH is dominant for ammonia flame and has a much lower diffusivity. When ammonia is co-fired with methane, the relative importance of OH radicals is expected to increase as the ammonia mixing ratio increases, and it is expected to affect the thermal and reactive interactions between the flame and burner lip. To analyze these phenomena, a study dedicated to the observation of local flame stabilization, particularly local mixture fraction, active radical distribution as well as local velocities and stretch rate at the burner lip will be continued in 2021. Such study on the effect of differences in the active chemical species that play a major role in combustion chemistry on the stability of the flame has never been performed.

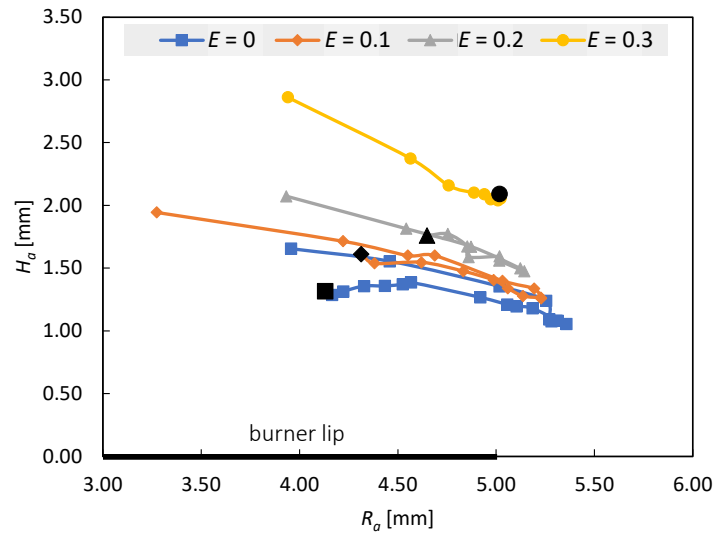


Figure 2: Evolution of flame position with increasing jet velocity, and for various ammonia mixing ratios E . Black symbols represents the flame tip position just before liftoff.

Based on the experimental work on the local stabilization characteristics of the ammonia mixed combustion jet diffusion flame acquired at INSA-Lyon, including temperature mapping, velocity measurements, and flame position tracking as shown in Fig. 2, numerical analysis of the jet flame will be performed in the coming year.

5. Research results

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

[1] S. Colson, Y. Hirano, A. Hayakawa, T. Kudo, H. Kobayashi, C. Galizzi, and D. Escudie: Experimental and Numerical Study of NH_3/CH_4 Counterflow Premixed and Non-premixed Flames for Various NH_3 Mixing Ratios, *Combust. Sci. Technol.*, (2020), published online 21 May 2020, doi: 10.1080/00102202.2020.1763326.

[2] S. Colson, M. Kuhni, C. Galizzi, D. Escudie, and H. Kobayashi: Study of the Combined Effect of Ammonia Addition and Air Coflow Velocity on a Non-premixed Methane Jet Flame Stabilization, *Combust. Sci. Technol.*, (2020), published online 12 October 2020, doi: 10.1080/00102202.2020.1830276.

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

[3] S. Colson, Y. Hirano, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, D. Escudie, and C. Galizzi: Ammonia/Methane Chemistry Evaluation using a counterflow burner, *KAUST-TU Workshop*, (2020), online.

*[4] S. Colson, M. Kuhni, C. Galizzi, D. Escudie, H. Kobayashi: Study of the Effect of Ammonia Addition on the Stabilization of a Non-premixed Methane Jet Flame in an Air Coflow, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, (2020), OS20-11, pp. 198-199.

[5] S. Colson, M. Kuhni, C. Galizzi, D. Escudie, H. Kobayashi: Effect of ammonia addition on a non-premixed methane jet flame expanding in an air coflow, *58th Japanese Symposium on Combustion*, (2020), online, Paper ID 189q (Presentation C312).

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award)

Best Presentation Award for Young Researcher, “Study of the Effect of Ammonia Addition on the Stabilization of a Non-premixed Methane Jet Flame in an Air Coflow”, S. Colson, October 30, 2020, 17th International Conference on Fluid Dynamics ICFD2020.

(Press) Not applicable.

課題番号	J20Ly07
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	2020.4～2021.3
継続年数	2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*†, Thomas Elguedj**††, 松浦 一雄***, 桑名 一徳****
 中村 裕二*****, 松岡 常吉*****

*†東北大学流体科学研究所, **INSA de Lyon LaMCoS, ***愛媛大学工学部

****山形大学工学部, *****豊橋技術科学大学工学部

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

水素は、低炭素社会を実現するために大いに貢献すると考えられているものの改質が必要とされる二次エネルギーであり、かつ常圧でのエネルギー密度は従来の化石燃料に比べて非常に小さいため、高密度水素として貯蔵輸送を行う必要がある。また、高圧に充填された水素を安全に運用するためには、水素の引火限界濃度や安全性を十分考慮した水素ステーション設計、ならびに水素脆化や繰り返し応力の発生に基づく材料劣化の影響を考慮した高圧水素タンクの設計が必須となる。そこで本研究では、高圧水素容器が破壊されたときに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、高圧容器の隔壁のき裂破壊時に発生する水素の漏えい拡散現象を連成解析する計算手法を開発することにより、安全性の高い水素設備の設計に貢献することを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究では、き裂伝播に伴う水素漏えい現象を二つのステップに分けて解析を行う。高圧容器にき裂が発生・伝播するまでの材料側の解析と、き裂伝播後の隔壁から高圧水素が漏えいする流体側の解析の2ステップである。本年度においては粒子法により得られたき裂形状データを基に混相流体解析を実施した。図1に水素の体積分率 ($\alpha=0.5$) の等値面の時間変化を示す。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、高圧容器から常圧の大気に放出された水素が急速膨張しているためであると考えられる。

3. 研究目標の達成状況

達成度は76%である。高圧水素タンクのき裂伝播現象を解析する上で必要となる連続体力学理論、線形破壊力学理論の基礎、粒子法の一つである **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 高圧水素高速水素漏えい現象に関する流体－材料連成コンピューティングにより漏洩水素の

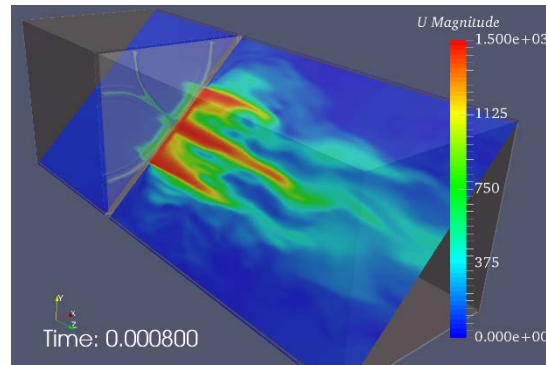


図1 漏えい水素の流速分布 に関する時間発展計算結果

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

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

- [1] Eitaro Koya, Masahiko Nakagawa, Shinya Kitagawa, Jun Ishimoto, Yoshikatsu Nakano, Naoya Ochiai: CFD Analysis of Mechanisms Underlying the Porosity-reducing Effect of Atomized Flows in High-pressure Die Cast Products, *MATEC Web Conf*, Vol. 326, (2020), 06006, DOI: 10.1051/mateconf/202032606006.
- [2] Yusuke Naito, Romain Montini, Hirochika Tanigawa, Jun Ishimoto, Masami Nakano and Katsuya Hirata: Experiment and Numerical Analysis of a Rotating Hollow Cylinder in Free Flight, *Advances in Hydroinformatics*, (2020), pp. 923-936, Springer Singapore.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] 大槻拓史, 小笠原直樹, 石本淳, 仲野是克, 福田葉一郎: マイクロ溝部における溶融ろう材の表面張力流れに関する数値解析, 混相流シンポジウム 2020 オーガナイズドセッション (OS-5 マルチスケール混相流と異分野融合科学), (2020), オンライン (Zoom ウェビナー会議).

- *[4] J. Ishimoto and T. Elguedj: Coupled Computing of Fluid-Structure Interaction Problems for Multiphase Energy Systems, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, (2020), OS20-12, pp. 200-201, [On-line meeting].

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J20Ly08
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Elucidation of the Pathophysiology of Skin Sodium and Water Metabolism

Asadur Rahman*†, Akira Nishiyama*
Thomas Elguedj**, Jun Ishimoto ***††

* Department of Pharmacology, Faculty of Medicine, Kagawa University

**Mechanical Engineering, INSA-Lyon & LaMCoS Lab, Mechanical Engineering
Department, INSA-Lyon Multiscale Mechanics for Solids (MIMESIS) Team

***Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Since the local disturbances in the sodium ion (Na^+)/moisture balance of dermal tissue caused various diseases, elucidation of the mechanism of control behind these disturbances would be crucial to manage these pathological conditions in clinics. Aiming this, the purpose of the present study is to establish the fixation method of dermal tissue to evaluate the in vivo Na^+ accurately by imaging mass spectrometry (IMS).

2. Details of program implement

In this project, we planned to apply Ishimoto laboratory's vitrification method using a cryogenic solid particulate spray, and use a next generation integrated research system (supercomputer) to achieve dermal tissue fixation by a method that does not alter the water content of skin, and thereby allow accurate evaluation of the Na^+ concentration distribution in dermal tissue by IMS.

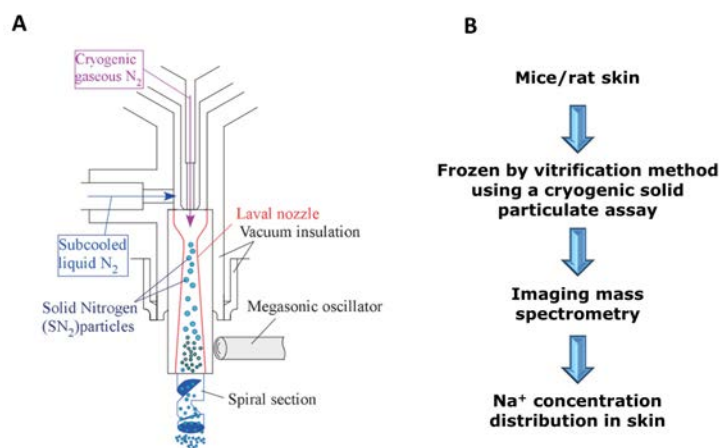


Figure 1 : A. Principle of two-phase Laval nozzle for continuous SN_2 production;
B. Scheme of workflow.

3. Achievements

We have measured the distribution of sodium in dermal tissues by IMS. But due to the difficulties in tissue fixation step, shrinkage in dermal tissue was obvious in hematoxylin and eosin staining (Fig. 2A). Therefore, the tissue distribution of sodium by IMS in the dermal tissue of high salt diet-fed CKD rats (Fig. 2B) may not reflect the real distribution of sodium. To overcome these difficulties, we are planning to use the vitrification method to fix the dermal tissue before performing IMS.

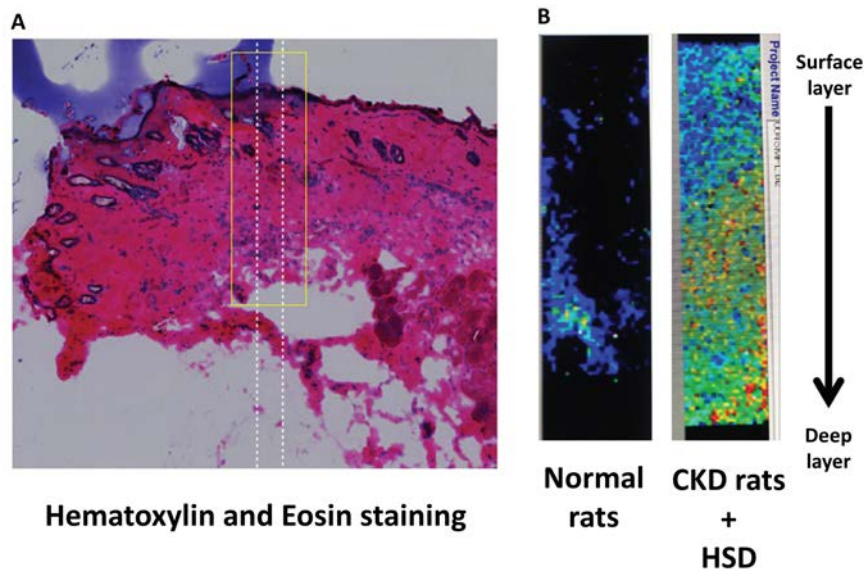


Figure 2 : A. Hematoxylin and Eosin stain of frozen dermal tissue (OCT sample); B. IMS to detect the distribution of Na^+ .

4. Summaries and future plans

By applying the vitrification method, we may measure the Na^+ concentration distribution accurately in skin by IMS. This technique will help to identify the local disturbances in the Na^+ /moisture balance of dermal tissue, and to elucidate the mechanism of control behind these disturbances.

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. Rahman, A Nishiyama, T. Elguedj and J. Ishimoto: Elucidation of the Pathophysiology of Skin Sodium and Water Metabolism, *Proceedings of the 20th International Symposium on Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, (2020), OS20-8, pp. 192-193, [On-line meeting].
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J20Ly09
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

原形質流動の速度分布に関する確率論的流体力学シミュレーション
Stochastic Fluid Dynamics Simulations for Velocity Distribution of Protoplasmic Streaming

鯉渕 弘資*†, 内一 哲哉**††, Rieu Jean-Paul***
Maksimowa Olga****, Egorov Vladislav****, Andreeva Irina*****
本郷 哲*, 永弘 進一郎*, 井海 寿俊*, 中山 まどか*
*仙台高等専門学校, **東北大学流体科学研究所, ***リヨン大学
****チェレポベツ国立大学, *****サンクトペテルブルグ工科大学
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

植物細胞内の原形質流動の駆動力は、アクチンフィラメントの上を移動するミオシン分子であることが分かってきた。このため、原形質流動に関しても最近詳しい研究がなされるようになってきたが、速度分布に現れる2つのピークについては、実験結果の報告はあるものの、数値計算の結果の報告はない。そこで、本研究ではこの速度分布のピークを数値計算で再現することを目的とする。この目的のために、確率論的な Langevin Navier-Stokes(LNS) 方程式を用いた数値シミュレーションを行う。

2. 研究成果の内容

Brown 揺動力を仮定したモデリングの方法で、2次元クウェット流れを対象とし、渦度と流れ関数を用いた2次元のLNS方程式の数値計算を行った(図1)。

$$\nu = 1 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} : \text{kinematic viscosity}$$

$$d = 500 \mu\text{m} : \text{diameter of cell}$$

$$V_B = 50 \frac{\mu\text{m}}{\text{s}} : \text{boundary velocity}$$

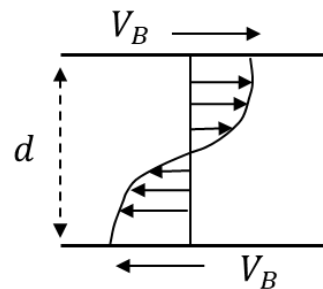


図1：原形質流動に関連する物理量と、原形質流動を模擬した2次元のクウェット流れ

その結果、既に報告されている速度分布における2つのピークを確認できた(図2, 論文[1])。

論文[1]で述べたことは次のステートメント(定理)である：“渦度と流れ関数を用いたLNS方程式の解が数値計算に用いるパラメータの組に対するあるスケール変換に対して変わらないという状況の下で、もし「あるパラメータの組を用いて行った数値計算結果がある与えられた物理的な系の実験結果をうまく再現している」ならば、その他どんな物理系の実験結果もこのパラメータの組を用いて、ブラウン揺動力Dをある特定の値に変化させるだけで再現できる。”しかし、この定理は、仮定の部分「あるパラメータの組…」が正しいといえな

ければ論理的に正しくとも実際には何の意味もない. この仮定が正しそうなこと, 即ち, 定理の有用性, を確かめたのが図 2 を含む数値計算結果である.

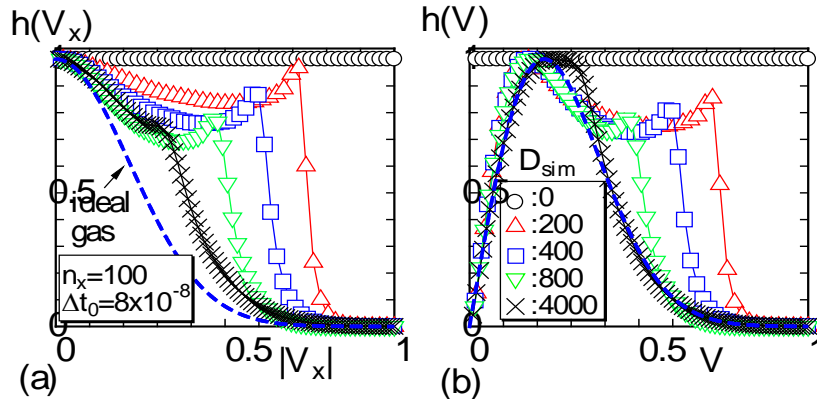


図 2 : 速度分布における 2 つのピークとそのブラウン揺動力 D_{sim} 依存性

3. 研究目標の達成状況

2 に記載の「定理」によって, LNS 方程式の解に関してある程度の情報が得られるようになった. 即ち, ブラウン揺動力 D を変化させることと, 図 1 に記載の物理パラメータ (粘性係数, 直径, 速度) を変化させることとの間の関係などである. この関係の詳細 (論文[1]) はここでは省略する.

当初の目的に含まれていた「生体物質と流体の相互作用」は一般には複雑すぎる問題ではあるが, この「定理」と申請者らが研究開発してきた Finsler 幾何モデルの方法を組み合わせることで, この難しい問題に取り組めるようになって考えている. 即ち, もし相互作用によってピークの位置が変化したとすると, 実効的に D がどう変化したことになるのか, またそれは物理パラメータのどのような実効的な変化になると考えられるのか, などである. 実際に確認される速度分布のピークは当然この相互作用を反映しているから, 相互作用の影響の確認はモデル実験か数値計算による外はない. 次年度以降にこの問題に取り組む予定である. ただし, 原形質流動を 2 次元クウェット流れとみなしてよいかどうかという問題もあり, 3D シミュレーションも望まれる. なお, この定理は, 原形質流動のみならず 2 次元クウェット流れとみなせる系に対して適用可能である.

4. まとめと今後の課題

今年度は流体とその流体中に含まれる微粒子の熱運動を Navier-Stokes 方程式でシミュレートするために, 乱雑揺動力を加えた Langevin-Navier-Stokes(LNS)方程式を数値計算した. 対象とする現象は原形質流動の速度分布である. この現象は 3 次元の現象であるが, 2 次元に単純化して, 流れ関数と渦度の LNS 方程式を用いて速度分布を求めた. その結果, 実験結果にみられる速度分布のピークが再現され, そのピークの起源が生体物質の熱運動にあることが分かった.

実際の現象では生体物質と流体の相互作用も影響しているはずであるが, この相互作用は以上で述べた LNS 方程式には取り入れられていない. そこで, 今後の課題としては, この相互作用を Finsler 幾何(FG)モデルの方法で LNS 方程式に取り込むことである. これは簡単のために 2 次元で行う. これ以外の課題としては, 3 次元のシミュレーションが必要なことである. しかし, 3 次元では流れ関数と渦度の方法は使えないため, 速度と圧力を使った LNS 方程式を用いる必要がある. この LNS 方程式は, 流れ関数と渦度を用いた LNS 方程式と解が同じとは限らないため, 初めに 2 次元の計算を行って, すでに得られている結果と比較し, 次に 3 次元の数値計算に進む.

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] Vladislav Egorov, Olga Maksimova, Irina Andreeva, Hiroshi Koibuchi, Satoshi Hongo, Shinichiro Nagahiro, Toshiyuki Ikai, Madoka Nakayama, Shuta Noro, Tetsuya Uchimoto and Jean-Paul Rieu: Stochastic Fluid Dynamics Simulations of the Velocity Distribution in Protoplasmic Streaming, *Physics of Fluids*, Vol. 32, (2020), 121902 (16 pages), <https://doi.org/10.1063/5.0019225>.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Vladislav Egorov, Olga Maksimova, Irina Andreeva, Hiroshi Koibuchi, Satoshi Hongo, Shinichiro Nagahiro, Toshiyuki Ikai, Madoka Nakayama, Shuta Noro, Tetsuya Uchimoto and Jean-Paul Rieu: Stochastic Fluid Dynamics Simulations of the Velocity Distribution in Protoplasmic Streaming, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2020)*, Sendai, (2020), OS20-3, pp. 182-183.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J20Ly10
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	2nd year

Active Control of Protein Mass Transfer by Membrane Utilizing Variation of Surrounding Condition

Atsuki Komiya*†, Sébastien Livi**††
Hani Alkitabi Aldaftari * ***, Ryo Watanabe* ***

* 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 microchannel and pore size 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. The main point of this research in Tohoku University is to perform visualization experiments and numerical simulation. Accurate measurement system for mass diffusion coefficient is designed and hindered diffusion process are visualized. For the evaluation of membrane performance, total mass flux through the material is quantitatively evaluated. The contribution from Lyon end is to make a special membrane. By utilizing several characteristics of polymers or porous media, a special membrane which has a function of changing representative diameter of micro channel due to the surrounding conditions such as temperature, pH value or electric and magnetic fields is fabricated. The evaluation of the characteristics of the special membrane is also done in the French end. In this year, we fabricated several types of iso-pore membranes that has same aperture ratio (=4.9%), and the mass flux through the membrane was evaluated.

Figure 1 shows the visualized images of evolution of diffusion fields in case of the micropore diameter of 100 and 200 μ m by phase-shifting interferometer. As is obvious from Fig. 1 that slight difference of penetrated mass could be obtained between 100 and 200 μ m pore diameters even though the aperture ratio was equal. It means that the micropore patterning on the membrane is one of potential parameter to control the penetrated solute in aqueous solution. The experimental results also reveal that the constant mass flux condition could be achieved by using micropore membranes. In case of micropore diameter of 200 μ m, the constant mass flux condition was achieved from the elapsed time of 4900s as shown in Fig.1.

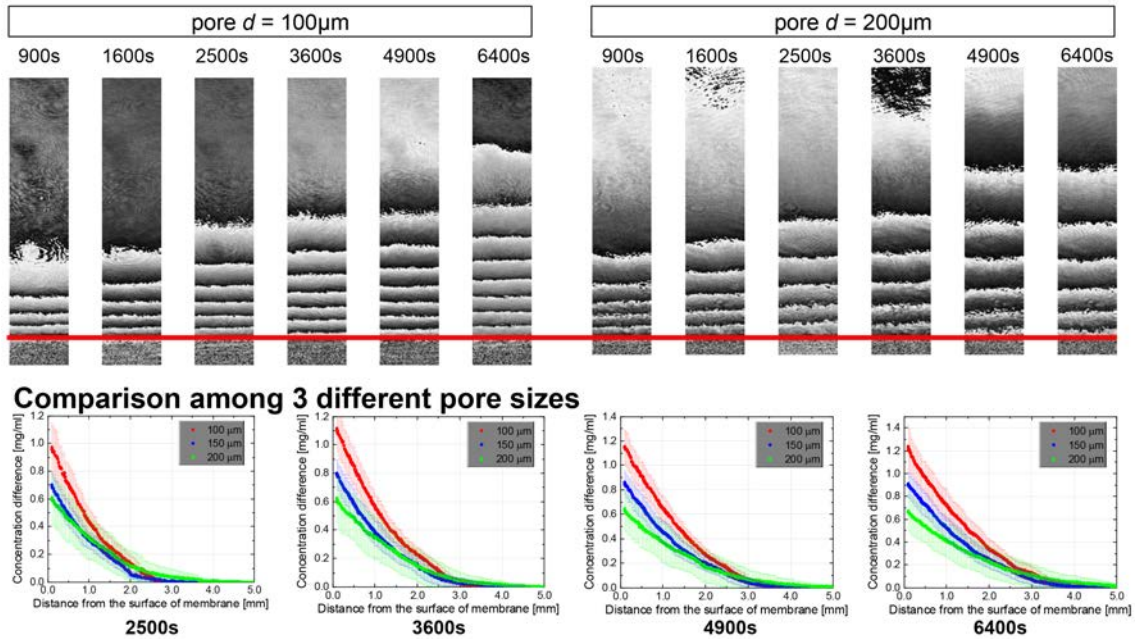


Figure 1 : Comparison of penetrated mass and concentration field between different patterning of micropore membranes.

3. Achievements

The transient mass diffusion field was precisely visualized. The achievement of our activity in this year was 80%. The difference of penetrated mass between 100 and 200µm cases were quantitatively discussed. This might be good contribution to discuss the active control of solute in aqueous solutions.

4. Summaries and future plans

This study focuses on the evaluation of active mass transfer control through several types of special membranes. A series of clear visualized images of concentration profiles of diffusion fields was obtained. The experimental results show that the patterning of micropore on membrane is one of potential parameter to make active control of mass transfer. 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)
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
*[1] A. Komiya, R. Watanabe, Y. Kanda, J. F. Torres and S. Livi: Effect of Micropores Patterning in Separated Plate on Protein Hindered Diffusion Phenomena, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), OS20-9, pp. 194-195.
- 3) Patent, award, press release etc.
(Patent) Not applicable.
(Award)
Certificate of Merit for Thermal Engineering Best Paper, “Evaluation of the Relations between Hindered Diffusion Process of Protein and Membrane Structure”, A. Komiya, October 11, 2020, JSME.
(Press release) Not applicable.

課題番号	J20Ly11
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	2020.4～2021.3
継続年数	2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***

*秋田大学理工学部/理工学研究科, **東北大学流体科学研究所, ***リヨン大学 INSA

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

流体に回転運動を与えたときの不安定現象についての研究は、混合を考慮するような多くの産業用途にとって重要である。例えば、回転システムの研究はあらゆる同心駆動装置やタービンロータなどの回転機械設計に役立つだけでなく、小型の回転熱交換器やミキサーなど化学装置の最適化にも役立つ。これらの流れをより良く制御するためには、流れの不安定性が発生する臨界パラメータや、不安定性による流れのパターンの遷移メカニズムを解明する必要がある。本研究では、ミキサー等のモデルとして、同心同軸で回転する二重円すい間の流れを取り扱う。

先行研究として、二重円筒間のテイラー・クエット流に関する研究は数多くなされている。その中でも、内側の円筒のみを軸中心に回転させて円筒間の流れ挙動を調べた研究では、内円筒の回転速度に応じたある臨界点で周方向の回転流が不安定となり円筒間にはテイラー渦が発生する。この遷移の形態は、円筒長さと同径の幅の比で表されるアスペクトを無限大(円筒が無限長)としたときに、完全なピッチ・フォーク分岐となることがわかっている。しかし、アスペクト比が有限の大きさ(上下に蓋のある系)の場合には、渦の発生形態は不完全分岐となり、さらに回転数を大きくすることで複雑な分岐現象を示す。アスペクト比の変化に対して、豊富な遷移現象が現われるため分岐理論を用いた観点から多くの研究が行われている。

一方で、本研究ではアスペクト比が有限で容器の上下に蓋のある系において、円筒の側壁が傾斜した同心二重円すいの場合を取り扱う。上述のように分岐の様相は不完全分岐となり複雑となることが予想される。また、回転による遠心力の斜面成分により、このシステムでは回転と同時にテイラー・クエット流と似た渦が生じることが先行研究より分かっているが、それらの渦の遷移条件等については不明な点が多い。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

側壁が傾斜していない同心二重円筒の場合について、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分岐点を内外円筒半径比 Γ とレイノルズ数 Re を用いて示したものである。流れ場に現れる渦の個数により3つの領

域に分類される。内外円筒半径比が小さい方から、渦1対、2対、3対の領域が存在する。2対と3対の領域では、一部がオーバーラップするすることが明らかとなった。他の研究者の既存の結果との比較を行ったところ、これまでに見付かっていなかった分枝の存在が明らかになりつつある。

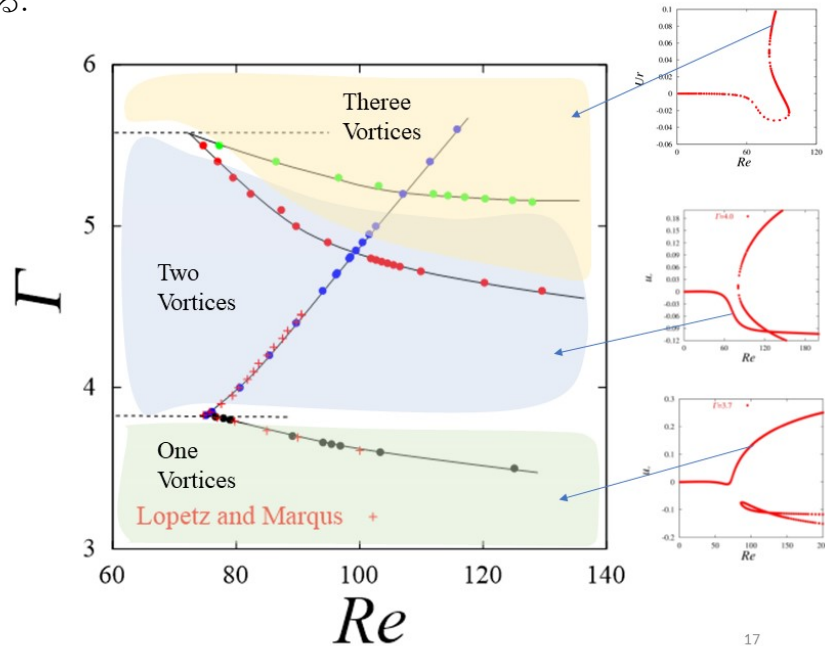


図1：内外円筒半径比 Γ とレイノルズ数 Re による分岐ダイアグラム

3. 研究目標の達成状況

円すい形状の流路を取り扱う前段階として、円筒形状を取り扱った。分岐の構造が、円筒の傾斜により大きく変化することは現段階としては考え難いので、研究目標の達成に向け順調な進展途上にあると考えている。ただし、円筒の場合に関しても分岐の様相は複雑である。

4. まとめと今後の課題

傾斜を持たない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ある程度完成させることができた。最終的には、側壁が傾斜を持つ同心円すい間の流れの大域的な分岐ダイアグラムを求めることとなるが、傾斜のない二重円筒の場合においても、その分岐ダイアグラムは複雑なことが明らかとなり、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

- 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 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), OS20-10, pp. 196-197.

- 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

2. 研究成果報告書

<リーダーシップ共同研究>

Project code	J20L006
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	3rd year

Development of Conservative Kinetic Force Method near Equilibrium

Vladimir Saveliev*†, Shigeru Yonemura**††
 *Institute of Ionosphere, NCSRT, Kazakhstan
 **Institute of Fluid Science, Tohoku University
 †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

For small Knudsen numbers near the equilibrium, difficulties of direct numerical modeling of gas flow in the kinetic regime increase enormously. On the other hand, near the equilibrium to reduce computational cost we can use differential approximation for scattering operator and obtain simple equation for angular velocity of rotation for quasiparticle pairs.

2. Details of program implement

The kinetic equation for the two-particle distribution function reads:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}_1} \cdot \mathbf{v}_1 + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}_2} \cdot \mathbf{v}_2 + \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}_1} \cdot \mathbf{a}_1 + \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}_2} \cdot \mathbf{a}_2 \right) F = N \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \hat{\chi} f(\mathbf{v}_1) f(\mathbf{v}_2)$$

$$f(\mathbf{v}_1, \mathbf{r}_1, t) = \frac{1}{N} \int d\mathbf{r}_2 d\mathbf{v}_2 F(\mathbf{v}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{r}_2, t), \quad f(\mathbf{v}_2, \mathbf{r}_2, t) = \frac{1}{N} \int d\mathbf{r}_1 d\mathbf{v}_1 F(\mathbf{v}_1, \mathbf{r}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{r}_2, t)$$

Instead of collision integral in the right hand side of the Boltzmann equation, the above equation contains the scattering operator $\hat{\chi}$. After renormalization of the scattering operator and presenting it in a divergence form, the two-particle kinetic equation describes the interaction in pairs of quasiparticles in terms of their rotation around the centers of mass with angular velocity Ω , which depends on the velocity distribution function. To test our method, we considered the problem of relaxation of two colliding antiparallel beams of Maxwellian molecules.

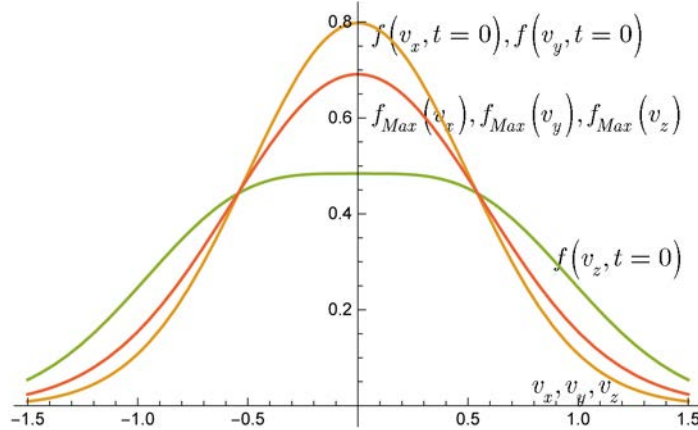


Figure 1 : Initial distribution functions of 1000 quasiparticles in 3D velocity space.

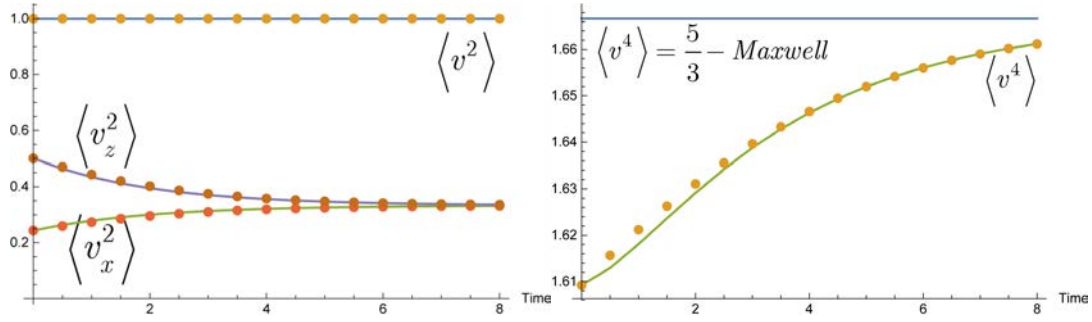


Figure 2 : Comparison of calculated moments (dots) with exact ones (lines)

3. Achievements

We presented a model scattering operator, obtained from the exact Boltzmann scattering operator on the basis of clear physical assumptions:

$$\hat{\chi} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} \cdot [\mathbf{v} \times \boldsymbol{\Omega}]$$

The angular frequency of rotation of pairs of quasiparticles $\boldsymbol{\Omega}(\mathbf{v}, \mathbf{u})$ depends on the distribution function $f(\mathbf{v})$. Near equilibrium, we approximate the distribution function with the first terms of the optimized Grad expansion. As a result, we obtain an expression that depends on the covariance matrix $g = \langle (\mathbf{v} - \langle \mathbf{v} \rangle)(\mathbf{v} - \langle \mathbf{v} \rangle) \rangle$ and the fourth moment of the form $\langle [(\mathbf{v} - \langle \mathbf{v} \rangle) \cdot g^{-1} \cdot (\mathbf{v} - \langle \mathbf{v} \rangle)]^2 \rangle$. The model scattering operator explicitly takes into account the two-particle nature of the molecular interactions and ensures the exact conservation of energy and momentum. Our simulation shows very good agreement with the exact result in terms of the relaxation of first seven velocity moments $\langle \mathbf{v} \rangle$, $\langle \mathbf{v}\mathbf{v} \rangle$ and $\langle v^4 \rangle$.

4. Summaries and future plans

Because of its simplicity, we hope that our model scattering operator will be used successfully in the kinetic theory as BGK and Fokker-Plank operators are.

5. Research results

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

Project code	J20L012
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Environment and Energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	3rd year

Analysis of Transport Phenomena of Oxygen Ion in Dual-Phase Electrolyte Material

Takashi Tokumasu*†, Jeongmin Ahn**††, 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 key properties of oxygen ion transport membranes are mixed ionic and electronic conductivity (MIEC) that allows oxygen ions to permeate through the material at various conditions while simultaneously maintaining chemical stability. A dual-phase (DP) electrolyte material (EM) consisting of perovskite-type and fluorite-type materials has shown promising results but requires more extensive evaluation concerning MIEC properties. To evaluate the oxygen ionic conductivity, the DPEM was investigated experimentally and through simulation. From these results, we suggest a new DP membrane concept which exhibits high ionic conductivity.

2. Details of program implement

Regarding the simulation analysis, we have constructed a DPEM 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 (see Figure 1-a). The mean square displacements (MSD) of oxygen ions in the constructed DPEM model were analyzed. In this year, we analyzed the position-dependent diffusivity of oxygen ions by dividing the simulation system into four regions: SSC/Bulk, SSC/GB, SDC/Bulk, and SDC/GB (see Figure 1-a). The width of the SSC/GB and SDC/GB was 2.0 Å. As a result, we found that the slope of MSD in SSC/GB and SDC/GB regions are smaller than that in Bulk regions. In other words, the diffusivities of oxygen ions reduce in vicinity of GB. Moreover, it was clarified the diffusion of oxygen ions hardly occurs in SDC/GB region, because the slope of MSD is almost zero. Therefore, oxygen ions can hardly diffuse from

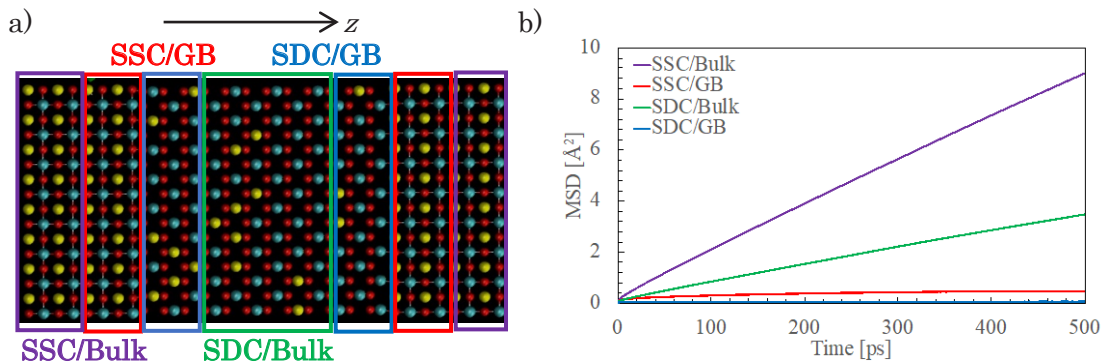


Figure 1: a) Analyzed MD simulation model of DPEM. b) MSD of oxygen ions in the z direction of each divided region.

SSC/GB region to SDC/GB region, and the low diffusivity in vicinity of GB causes the reduction of oxygen ion conduction of DPEM.

Regarding the experimental analysis, to analyze the ionic diffusivity, surface exchange coefficients, and general morphology of the DPEM, a 70 wt. % SSC and 30 wt. % SDC membrane has been manufactured. In comparison to a single-phase EM, the DPEM exhibits lower oxygen chemical diffusion and lower surface exchange coefficients. The addition of the SDC causes this reduction in ionic transport. The exclusive ionic conductivity of the SDC reduces the pathways for electronic transport which are necessary for effective oxygen ion transport. Scanning electron microscopy has shown the membranes to be non-porous, allowing for effective sealing of gases as well as structural rigidity. Work has also been completed investigating methods for improving the durability of ceramic materials by utilizing creep stress relaxation. This added technique will help to ensure the DPEMs do not experience cracking as a result of residual stresses within the material during manufacturing or operation.

3. Achievements

As for the simulation analysis, we clarified that how the diffusivity of oxygen ions in vicinity of GB in DPEM changes due to the GB by using the constructed MD simulation model. Experimental analysis has confirmed the effect of addition of SDC to the DPEM as well as improved methodologies for highly robust ceramics.

4. Summaries and future plans

Regarding the simulation analysis, we constructed MD simulation models of DPEM and clarified how the GBs between SSC and SDC in DPEM reduce the oxygen ion conduction. In experimental analysis, a DPEM has been manufactured and analyzed with regards to electrochemical performance.

5. Research results

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

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

*[1] H. Nagashima, J. Ahn, and T. Tokumasu: Analysis of Transport Phenomena of Oxygen Ion in Dual-Phase Electrolyte Material, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-89, pp. 155-156.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

課題番号	J20L013
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	2020.4～2021.3
継続年数	3年目

水中プラズマによる微細気泡の生成・安定化機構

Mechanism of Generation and Stabilization of Fine Bubbles Generated by Plasma in Water

佐藤 岳彦*†, 中谷 達行**††

宮原 高志***, 大谷 清伸*, 上原 聡司*, 中嶋 智樹*

*東北大学流体科学研究所, **岡山理科大学フロンティア理工学研究所

***静岡大学学術院工学領域数理システム工学系列

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

水中で放電させる際に形成される微細気泡の生成過程や安定化機構について可視化実験を通し明らかにする。

2. 研究成果の内容

令和2年度は、生成された微細気泡の生成過程について検討した。微細気泡は主としてストリーマガスチャネルが崩壊するとき、すなわち気泡が最小化するときに微細化することを明らかにしてきた。本年度は、気泡が収縮している最中における気泡の状態についても検討した。図1は気泡発生および帯電量を評価するための実験装置である。気泡が収縮する過程を高速カメラで可視化し、その挙動について解析した。図2に負ストリーマが生成したガスチャネルの収縮過程の様子を示す。 $t = 18 \mu\text{s}$ において二股状の枝気泡が形成され、 $t = 20 \mu\text{s}$ において左側の枝気泡が主気泡の部分から分離する。上側の枝気泡が消滅したことから、この枝気泡は主気泡と一体化せずに気泡同士が近接している状況であることが示唆された。さらに、分離した枝気泡は細かいいくつかの微細気泡に分解し

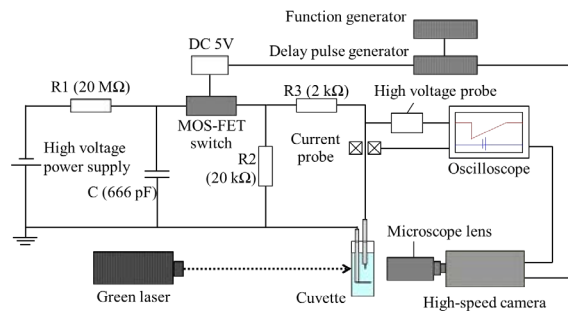


Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

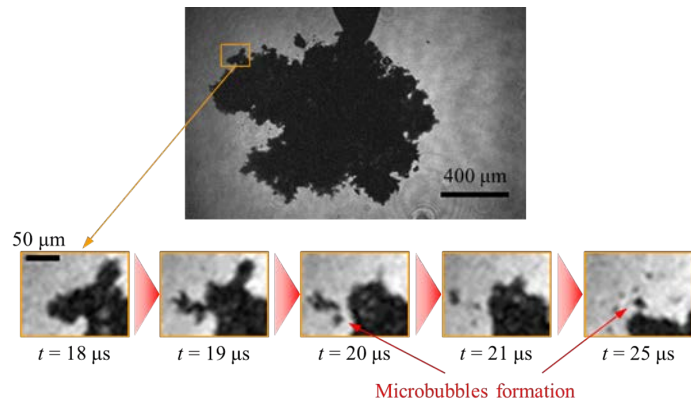


Fig. 2 Microbubbles formation process at the tip of streamer between $t = 18 \mu\text{s}$ and $t = 25 \mu\text{s}$.

ながら収縮を続ける。これらの気泡も残留気泡生成の一因と考えられる。 $t = 25 \mu\text{s}$ においてはさらに主気泡の突出部分が分離収縮し、さらに微細気泡が生成された。このように細部の可視化から、負ストリーマが形成する気泡は多数の気泡群の固まりであり、収縮時に各気泡が収縮することで分解し微細化する過程があることが示された。これらの結果は、気泡が帯電していることと密接に関係すると考えられ、各気泡の帯電によるクーロン反発が一因であると推察している。

3. 研究目標の達成状況

本年度は、水中放電により生成した微細気泡の生成に収縮過程の気泡の分解収縮があることを明らかにした。また、負ストリーマが形成する気泡チャンネルは多数の気泡からなる気泡群であり、これらが独立して収縮することが示された。これらの結果は、気泡の帯電現象と密接に関係していると考えられ、微細気泡の安定性にも寄与していると考えられる。よって、本年度の目的は達成したと考えている。

4. まとめと今後の課題

本年度は、水中放電により生成される微細気泡の新しい生成過程について明らかにした。プラズマが生成する微細気泡の安定性と帯電量の関係を明らかにする起点となる現象を発見したことから、これらの解明をさらに続けたい。

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

なし

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許） なし

（受賞） なし

（マスコミ発表） なし

Project code	J20L017
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	3rd year

Surface Pressure Measurement of a Re-Entry Model in Ballistic Range Facility
using Motion-Capturing Pressure-Sensitive Paint Method

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

Hiroki Nagai **††, Naoki Tanaka**, Kazuma Yomo**, Koji Fujita**

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

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

† Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The present study focuses on the challenges of capturing surface pressure data on a free-flight object in a ballistic range facility. There are four main challenges: (1) shooting an aerodynamic model in a ballistic range; (2) capturing the free-flight trajectory; (3) capturing luminescent images of the object during the flight; and (4) obtaining the surface pressure distribution from the luminescent images. We have achieved approximately all the items in the previous studies. In this year, we aim to improve the accuracy further. In addition, we will investigate a measurement method with an improved method so that many users can use this method in ballistic range facilities.

2. Details of program implement

In this fiscal year, we will develop a pressure distribution measurement method using a single camera, in contrast to the conventional motion capture method. For this purpose, we have been working on enhancing emission intensity (improvement of AA-PSP, increase of excitation source), acquisition of effective reference images, and image processing method. In order to obtain the required signal-to-noise ratio, we also investigated the relationship between the exposure time and the luminance value (Figure 1) and selected the optimal conditions. The ballistic flight test was performed using a cylinder that simulates a re-entry capsule. The resulting pressure distribution image is shown in Figure 2. The pressure distribution on the surface of the free-flying cylinder was successfully obtained. However, the signal-to-noise ratio was poor, and the difference between the theoretical value and the experimental value was large. However, the signal-to-noise ratio was poor, and the difference between the theoretical and experimental values was large, mainly due to the deviation from the reference image. It was found that it is important to improve the luminescence intensity to shorten the exposure time.

3. Achievements

This year, we were challenged to formulate the pressure distribution on the surface of a ballistic flying object using a single camera in addition to the conventional measurement method. As a result, we were able to measure the pressure distribution, but many problems became clear. However, since the problems were clarified, we could start planning a new proposal for the following year.

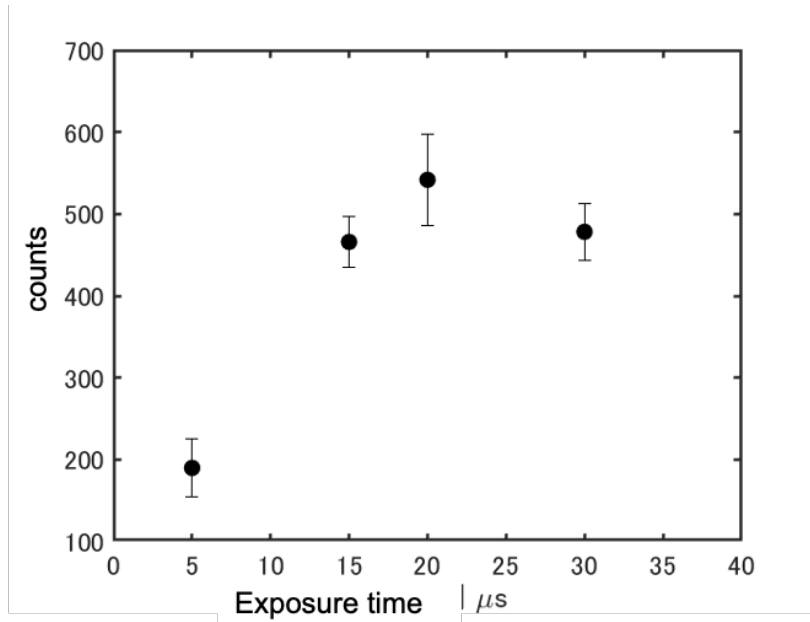


Fig.1 Relationship between exposure time and luminance value

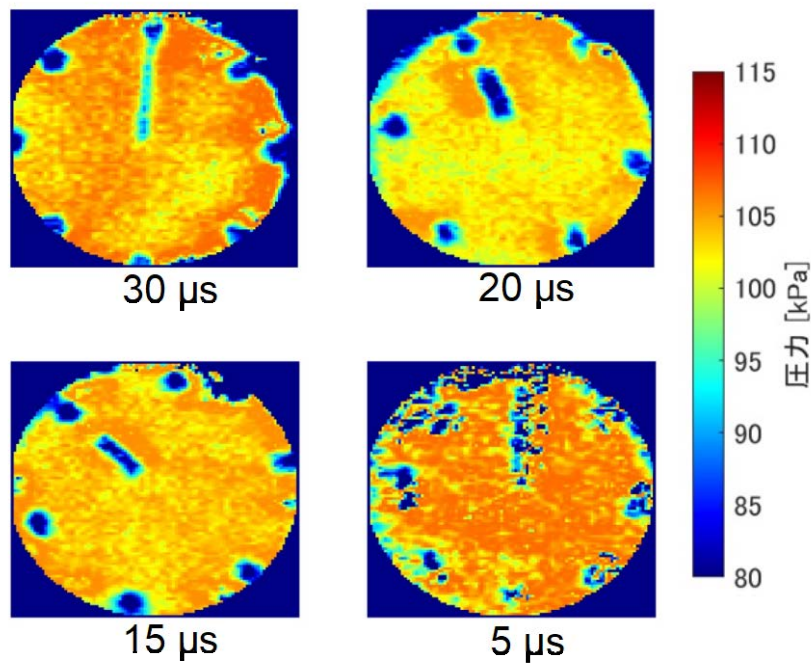


Fig.2 Pressure distribution in front of a cylinder

4. Summaries and future plans

For measuring pressure distribution on the surface of a free-flying object using a ballistic flight device, we have achieved a certain level of success using the motion capture method. We also worked on a single-camera measurement method and were able to extract issues for the future. In the future, we aim to improve both techniques further and establish the technology to be used as one of the measurement methods of choice for researchers who use ballistic range.

5. Research results

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

- [1] Daiki Kurihara, Joseph P. Gonzales, Steven L. Claucherty, Hideki Kiritani, Koji Fujita, Aleksandar Jemcov, Hiroki Nagai, Hirotaka Sakaue: Sub-millimeter resolution pressure measurement on free flight model at Mach 1.5 using novel non-intrusive optical technique, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 120, (2021), 110243, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110243>.

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

- [2] Naoki Tanaka, Koji Fujita, Hiroki Nagai: An Attempt to Measure Pressure Distribution on a Free-Flight Object, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS18-39, pp. 559-560.

- *[3] Daiki Kurihara, Joseph Gonzales, Hirotaka Sakaue, Naoki Tanaka, Kazuma Yomo, Koji Fujita, Hiroki Nagai: Surface Pressure Measurements using Two-Color PSP over a Free Flight Object in a Ballistic Range Facility -2, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-52, pp. 91-92.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

Project code	J20L019
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	3rd year

Comparison between h-BN and MXene as Promising 2D Materials for Biolubricant Additives: Molecular Dynamic Simulation Perspective

Takashi Tokumasu*†, Nasruddin Yusuf Rodjali**††

* Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Mechanical Engineering Department, Universitas Indonesia

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

2D nanomaterials are considered as a novel additive in lubrication, in this study the established 2D nanomaterial, hBN is compared with novel material, MXene (Ti_2CO_2). Along with fatty acid methyl ester (FAME) molecules ($\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2$) as base oil, both 2D nanomaterial were simulated using molecular dynamics simulation.

2. Details of program implement

All of the simulation's works were conducted using IFS supercomputer facilities. Everything related with the molecular dynamics simulations procedures and methods were carried out under IFS responsible member supervisions. For the same number of FAME molecules, we varied 2 different temperature for each 2 wt% hBN and 2 layers of MXene.

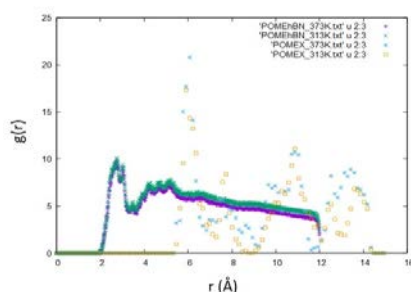


Figure 1 : Radial distribution function between nanomaterials and fluid molecules

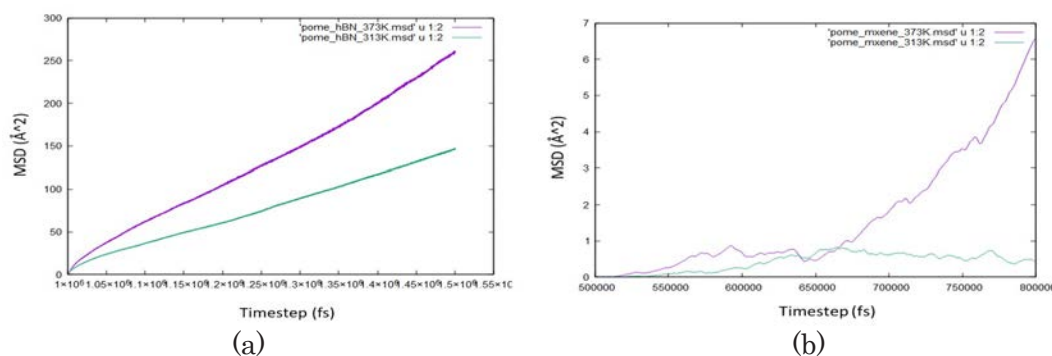


Figure 2 : (a) MSD graph for hBN in fluid (b)MSD graph for MXene in fluid



Figure 3 : The snapshot of (a) MXene-Fluid and (b) hBN-fluid at the same timestep. Mxene-fluid tend to form more clusters than hBN fluid

3. Achievements

Nanoparticles addition to plant-based oil has succeeded in increasing thermal conductivity. The thermal conductivity trends are elevated with the temperature. In the same way, for the fluid-MXene samples, due to its the complex bonding of the constituents, the increases are very distinctive compare with the fluid-hBN.

4. Summaries and future plans

Apparently, the nobel material MXene also have sufficient characteristics for lubrication purpose, the further plan we possibly perform a proper parametric studies regarding MXene-bio oil interaction so as to achieve a comprehensive research.

Table 1 : Thermal conductivity and diffusion coefficient

Properties	Pure FAME		FAME+hBN		FAME+MXene	
	313K	373K	313K	373K	313K	373K
K (W/mK)	0.14	0.2	0.2	0.5	0.49	0.62
D (cm ² /s)	7.6e-7	15.1e-7	2.7e-5	4.8e-5	2.2e-7	1.7e-6

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] Rizky Ruliandini, Nasruddin and Takashi Tokumasu: Performance of 2D Nanomaterials as an additive in Fatty Acid Methyl Ester (FAME) based Biolubricant: Molecular Dynamic Simulation, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-94, pp. 163-164.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J20L027
区分	リーダーシップ共同研究
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	2020.4~2021.3
継続年数	3年目

火星ヘリの実現を目指した同軸反転ローターの研究開発
Study of Coaxial Inversion Rotor Aimed at Realizing Mars Helicopter

永井 大樹*†, 藤田 昂志*, 山口 敦士*
 大山 聖 **, 米澤 宏一***††, 北村 圭一****, 古澤 善克****
 佐藤 允*****, 金崎 雅博*****
 *東北大学流体科学研究所, **宇宙航空研究開発機構, ***電力中央研究所
 ****横浜国立大学, *****工学院大学, *****東京都立大学
 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、火星ヘリコプタの実現を目指した同軸反転ローターの空力性能を調査する。近年、火星表面には直径及び深さが数百メートルの縦穴が発見されており、探査対象として注目されている。この火星縦穴の探査手法として火星ヘリコプタが提案されている。ただし、火星の大気密度は地球の 1/100 程度であること、また、他の探査機とともに火星に運ぶ必要があることから、できる限りコンパクトで高推力な方式が必須である。そこで我々は、昨年度より同軸反転ローター式に着目し、検討を進めてきた。

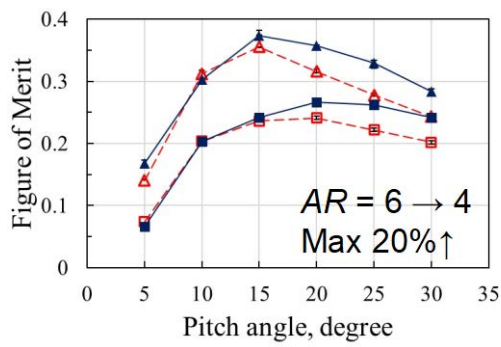
本研究では、これまでに同軸反転ローターの空力性能を調査してきた。また今年度より、共同研究者を追加し、数値解析 (CFD) との比較により、より高性能なローターの開発を目指すこととした。このため、実験では、これまでの実験で選定した翼型において、レイノルズ数やアスペクト比を変えた実験を行い、さらに粒子画像流速計測法 (PIV) を用いて、ローター間の流れ場を計測することで、CFD と直接比較できるデータの取得を目指すこととする。

2. 研究成果の内容

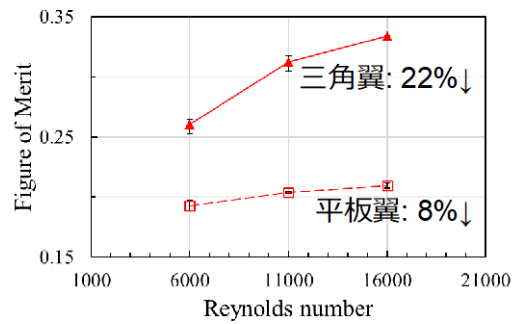
今年度は、同軸反転ローターにおける (1) アスペクト比, (2) レイノルズ数, (3) ブレード枚数, が空力特性に与える影響の調査を行った。その実験結果を図 1 に示す。その結果, (1) では、同一のブレード面積では、 $AR=4$ のブレードが $AR=6$ のブレードより推力係数と FM が高いことが明らかとなった。また(2)については、三角翼は平板翼よりもレイノルズ数の影響を受け、推力係数と FM が低下した。(3) については、ブレード枚数の増加により単位ソリディティあたりの推力係数は低下するが、最大推力係数と最大 FM は増加する、などが明らかとなった。特に (3) については、その原因を明らかとするために、PIV 計測により流れ場の可視化を行った。その結果を図 2 に示す。可視化結果から、枚数の増加によって、翼端渦を含むローター後流の影響が大きくなり、ブレード 1 枚当たりの性能が悪化していることが分かった。

3. 研究目標の達成状況

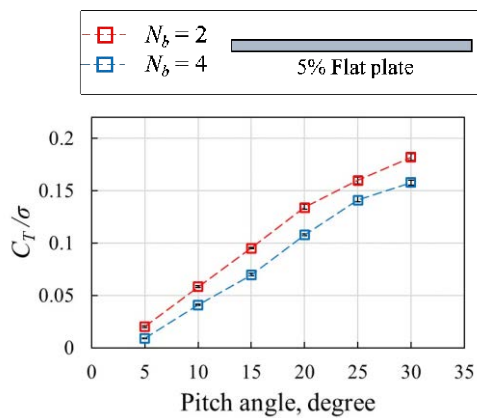
今年度は、同軸反転ローターの空力特性を調査する実験に加え、流れ場の可視化を行う実験系を構築し、現象の理解出来るほどのセットアップや実験結果であることを確認した。今後は様々な条件において可視化実験を行い、共同研究者が実施する数値計算との比較を行っていく。



(a) Effect of Aspect ratio



(b) Effect of Reynolds number



(c) Effect of Number of blades

Fig.1 Coaxial Rotor aerodynamic performance

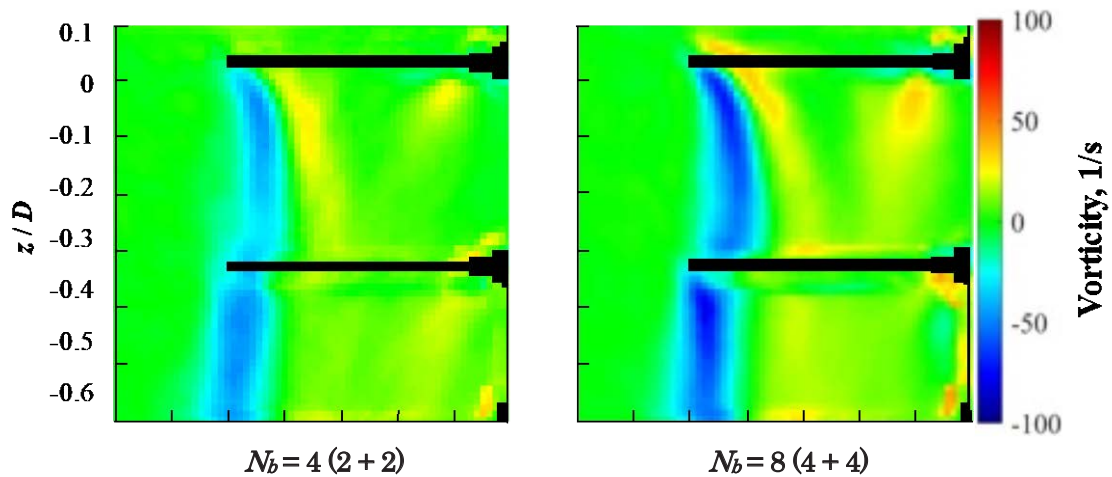


Fig. 2 Relationship between the number of blades and the flow field of the rotor wake

4. まとめと今後の課題

今年度は、同軸反転ロータの空力性能調査に加えて、流れ場の可視化による現象の理解も深まった。その成果は、国際会議において合わせて3件の発表を行い、また関連する内容において多数の国内外の発表を行うことが出来た。また数値解析や構造解析を主とする研究者とチームを結

成し、他の助成金（主として計算リソース）を獲得できたことにより、次年度以降の研究開発を加速できる準備が出来た。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] Tsubasa Ikami, Koji Fujita, Hiroki Nagai: Low-Reynolds-Number Flowfield of Wing with Control Surface in Propeller Slipstream, *Journal of Aircraft*, Vol. 58, No. 2, (2021), pp. 228-235. <https://doi.org/10.2514/1.C035880>

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] Atsushi Yamaguchi, Koji Fujita, Hiroki Nagai: Experimental Investigation on Rotor Performance of Mars Helicopter for Pit Crater Exploration, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS18-24, pp. 523-524.

- [3] Kosuke Hayashi, Koichi Takahashi, Koji Fujita, Hiroki Nagai: Investigation of the Effect of Propeller Thickness-wise Position on Aerodynamic Performance in Fixed Wing at Low Reynolds Number, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS18-36, pp. 553-554.

- [4] Yoshikatsu Furusawa, Keiichi Kitamura, Hiroki Nagai, Akira Oyama: Numerical Investigation on Three-Dimensional Flow Structure over Fixed Wing within Propeller Slipstream, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS18-31, pp. 538-543.

- *[5] Hiroki Nagai, Koji Fujita, Atsushi Yamaguchi, Akira Oyama, Kouichi Yonezawa, Keiichi Kitamura, Yoshikatsu Furusawa, Makoto Sato, Masahiro Kanazaki: Study of Coaxial Inversion Rotor Aimed at Realizing Mars Helicopter (3), *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-54, pp. 95-96.

- [6] 山口敦士, 藤田昂志, 永井大樹: 火星ヘリコプタ実現に向けた同軸反転ロータの空力性能に対する翼型の影響, 第64回宇宙科学技術連合講演会, (2020), 1D13.

- [7] 林孝亮, 高橋幸一, 藤田昂志, 永井大樹: 低レイノルズ数でプロペラ後流が固定翼の層流剥離泡形成に与える影響の調査, 第58回飛行機シンポジウム, JSASS-2020-5048, (2020).

- [8] Atsushi Yamaguchi, Raoul S. Golani, Koji Fujita, Hiroki Nagai: Experimental Investigation on Aerodynamic Performance of Coaxial Rotor at Low Reynolds Numbers, *AIAA SciTech 2021 Forum*, (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	J20L031
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

タンパク質 GPI 修飾機構の解明および予測法の開発
Development of Prediction Method in Protein GPI Modification Prediction

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

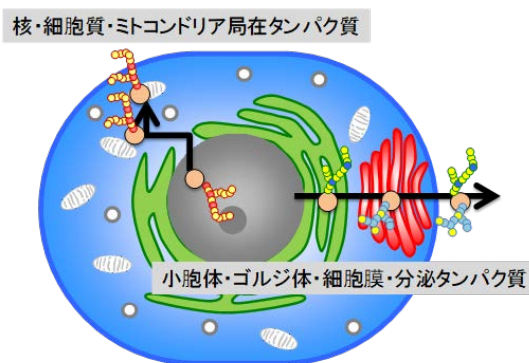
1. 研究目的

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

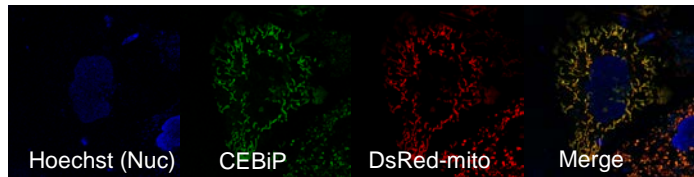
植物タンパク質を利用した、ヒト培養細胞内の様々なオルガネラに輸送可能な評価モデルの構築

0型糖鎖修飾を受けている糖タンパク質について、細胞内局在・糖鎖修飾情報をもとに、細胞内での局在化経路および糖種に応じて分類した。糖タンパク質をシグナルペプチドや膜貫通領域の有無で、細胞内在型・分泌型・シグナルアンカー型・膜貫通型の4グループに分類し、0型糖鎖修飾の糖種を調査した。シグナルペプチドもしくは膜貫通領域を有する分泌型・シグナルアンカー型、あるいはその両方を有する膜貫通型の糖タンパク質は、トランスロコンから小胞体に挿入され、小胞体を経由する局在化経路（小胞体・ゴルジ体・細胞膜・細胞外分泌）を通る。小胞体経由の3グループにおいては、主として Fuc・Xyl・GalNAc の修飾が見られた。一方、小胞体を経由しない局在化経路（核・細胞質・ミトコンドリア）を通る細胞内在型タンパク質においては、0型糖鎖修飾の100%がGlcNAcによることがわかった。上記の結果は、0-Fuc・0-Xyl・0-GalNAc・0-GlcNAc 転移酵素の細胞内局在性とよく一致した。

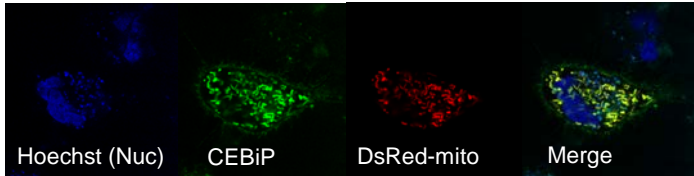


上記の研究内容からモデルタンパク質を作成し、実験的に検証を行った。植物由来の GPI アンカー型タンパク質 CEBiP をもとに、局在性に関与するシグナル領域前後に AcGFP を導入し、最適な条件を検討した。GPI 修飾に寄与する AS 領域の前に GFP を導入することで、適切にオルガネラを経由し細胞膜に局在化することが本研究で示された。

(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、タンパク質の細胞内局在性と糖種との相関を、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

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. Etchuya, M. Ohta, Y. Mukai: Development of sugar type distribution by glycosylation based on protein subcellular localization, *Proceedings of the 20th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), CRF-6, pp. 10-11.

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	J20L038
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

中性粒子ビームを用いたプラズマと触媒の相互作用機構の解明
Clarifying Interaction Mechanisms between Plasma and Catalysis by Using Neutral Beam

白谷 正治*†, 都甲 将**††, 寒川 誠二**
 *九州大学工学部, **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

ゼロエミッション社会の確立を目指し、二酸化炭素 (CO₂) のメタン化技術が世界中で注目されている。一般的には、触媒を用いて反応が促進されるが、過熱による触媒の失活が原因で、長期的なプロセスが困難であることが課題である。プラズマ触媒反応は低温下でのプロセスを可能とし、本課題を解決しうるとして注目されている。しかし、プラズマ、触媒それぞれが複雑な反応機構を有するため、プラズマによる触媒能の変化や、プラズマ中で生成された反応種の挙動、触媒による放電形態の変化といった相互作用機構は未解明なままである。本研究では、プラズマと触媒の相互作用機構の解明を目指し、プラズマ触媒反応系における触媒の役割の解明を目的とする。

2. 研究成果の内容

容量結合プラズマ装置を用いて、低温、低圧下においてプラズマ触媒反応系における触媒が CO₂ のメタン化に与える影響を調査した。評価の指標として、CO₂ 変換率 η を以下の式で導出したものを用いた。

$$\eta = 1 - [\text{CO}_2](t) / [\text{CO}_2]_0 \quad (1)$$

[CO₂](t)は放電開始から t 秒後の CO₂ 分子の密度を示し、[CO₂]₀は放電開始前の CO₂ 分子の密度を示す。

図1は触媒として Cu, SUS, Ni を用いたときの η の時間依存性を示したものである。 η の立ち上がりは、触媒の種類によらずほぼ一定であるが、定常状態では触媒ごとの差が表れる。これは、1. 低温、低圧では CO₂ はプラズマ中の電子衝突によって分解され、触媒は CO₂ の分解に寄与していないこと、2. 逆反応 (CO₂ 生成反応) は触媒上で促進されるため、逆反応の影響が顕著となる定常状態において触媒による差が現れたこと、を示していると考えられる。図2は CO₂ 変換率の放電開始直後の時間変化の傾き $d\eta/dt$ の放電電力依存性について示したものである。 $d\eta/dt$ は触媒の種類によらずほぼ電力に対して線形であり、本結果からも CO₂ の分解に触媒が寄与していないことがわかる。また、電力はプラズマ中の電子密度と線形比例の関係にあるので、CO₂ 分解は電子衝突によっておこり、反応速度定数は電力によって変化していないといえる。

一方、定常状態では触媒によって CO₂ 変換率に差が現れる。図3は定常状態の η の電力依存性と、これらの結果より導出した反応速度定数 K の電力依存性について示したものである。反応速度定数は以下のレート方程式の定常状態から導出した。

$$d[\text{CO}_2]/dt = [\text{CO}_2]_0/\tau_{\text{res}} - K n_e [\text{CO}_2](t) - [\text{CO}_2](t)/\tau_{\text{res}} \quad (2)$$

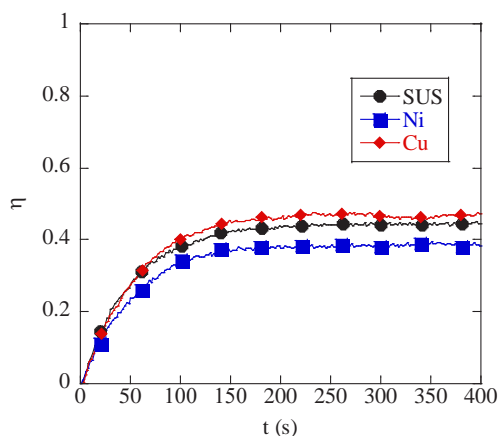


図1. プラズマ触媒法における触媒のCO₂変換率への影響

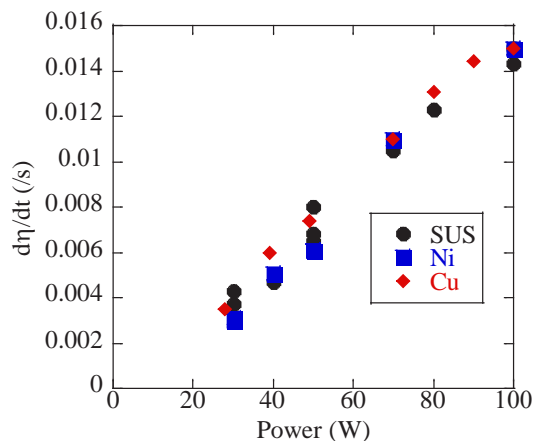


図2. 放電開始直後の $d\eta/dt$ の放電電力依存性

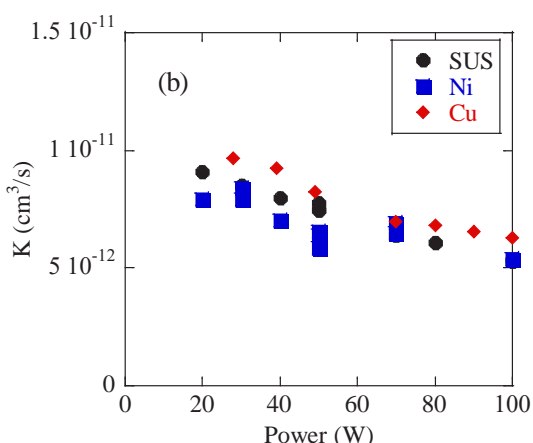
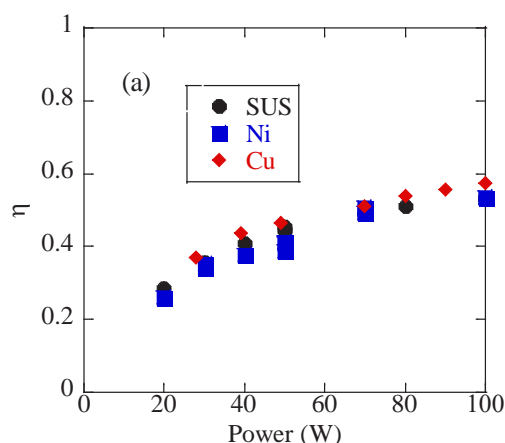


図3. (a)定常状態における η と (b)反応速度定数の放電電力依存性

ここで、 K は反応速度定数、 τ_{res} はガス滞在時間である。図に示される通り、Cu が最も高い η を示し、Ni が最も低い η を示す。したがって、式(2)より導出される反応速度定数 K は Cu が最も高くなり、Ni が最も低くなる。高電力ほど逆反応の寄与が大きくなるため、電力の増加とともに見かけの反応速度定数が小さくなる。以上の結果より、低温下でプラズマ触媒を用いた CO₂ のメタン化反応の高効率化においては、一般的な律速段階と考えられている CO₂ の分解に有用な触媒より、逆反応を抑えられる触媒がより有用である可能性が示された。

3. 研究目標の達成状況

本研究ではプラズマと触媒の相互作用を明らかにできるだけでなく、プラズマ触媒反応に適したプラズマ生成法や触媒を発見するといった成果が期待できる。今回は触媒上での逆反応が変換効率に大きな影響を持つため、低温下でのプラズマ触媒反応に適した触媒は逆反応を抑制できる触媒であることまでを明らかにした。

4. まとめと今後の課題

上述の結果から、低温下のプラズマ触媒反応系においては、CO₂ の分解反応はプラズマ中

で、逆反応は触媒上で促進されていることが分かった。したがって、二酸化炭素のメタン化反応においては最もよく使われる Ni 触媒であるが、プラズマ触媒反応系には適切ではなく、逆に本反応では有効でないと考えられてきた Cu 触媒が高い効率を示した。

逆反応が触媒上で促進される以上、プラズマ照射による触媒能の変化は無視できない。今後は、触媒表面の状態を微細に制御可能な中性粒子ビームを利用した、プラズマによって表面修飾された触媒が逆反応に及ぼす影響について調査することが求められる。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 都甲将, 寒川誠二, 出口雅志, 鎌滝晋礼, 古閑一憲, 白谷正治: プラズマ触媒反応系における触媒の CO₂ 生成反応への影響, 2020 年第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, (2020), オンライン, 11a-Z05-2.

*[2] Masaharu Shiratani, Susumu Toko, Seiji Samukawa: Clarifying Interaction Mechanisms between Plasma and Catalysts by Using Neutral Beam, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-64, pp. 113-114.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20L046
区分	リーダーシップ共同研究
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

島間を結ぶ飛行車両についての実現性の検討

Feasibility Study of the Transportation System with a Flying Vehicle for Improvement of Isolated Islands

森澤 征一郎*†, 坂井 玲太郎**, 菊地 亮太***, 山端 大智*, 大林 茂****††

*沖縄工業高等専門学校, **宇宙航空研究開発機構**, ***京都大学

****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

地方都市間・離島間では、100席以下の小型航空機で2地点を結ぶコミューター航空会社が存在する。特に沖縄、鹿児島、北海道などではこの航空輸送は重要な移動手段である。しかし、人口減少に伴う利用者の減少が進むことで赤字路線が目立ち、縮小や廃止された路線も現れた。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、離島などの移動手段としても検討が進められている。本研究では、沖縄県の本島及び周辺の離島間での航空輸送の利便性改善を目標とし、飛行車両を投入した際の利点・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、飛行車両の機体形状の性能評価を実施するとともに、那覇空港に離発着する航空機の運航状況を分析する。

2. 研究成果の内容

本研究では、飛行車両の機体形状の性能評価と空港間の運航状況を分析について行った。前者の機体形状では、過去にバージニア工科大学とラフバラー大学によって検討された飛行車両「Pegasus」の形状を対象に、機体形状のモデリング及びその性能評価を行った。これらの手順を図1に示す。具体的にはOpenVSPによって機体形状のモデリングを実施し、OpenVSPに内蔵されたVSPAEROによるパネル法でその機体形状の空力特性を求めた。後者の空港間の運航状況を分析には、国土交通省が公開しているCARATS Open Dataを用いて沖縄本島に台風が通過した年（2016年）とそうでない年（2015年）のデータを比較することで那覇空港に離発着した航跡の違いを調査した。

図2に飛行車両の迎角 $\alpha=0^\circ$ の圧力係数 C_p と流線によって可視化した流れ場、及び迎角 α に対するVSPAEROの結果（揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D ）と風洞試験の結果を示す。図2(a)より、Outboard Wingに比べ、Inboard Wingの中央部の C_p が小さくなっている。この結果は、胴体と垂直尾翼の存在により、Inboard Wingへの空気流入領域が狭いことから、Outboard Wingに比べ、Inboard Wingの流れ場の加速することで空気流入領域で低圧領域が生じたと考えられる。

図2(b)より、VSPAEROと風洞試験結果の C_L は $\alpha=-6^\circ\sim 10^\circ$ の範囲で右肩上がりのグラフとなっており、同様の傾向を示している。そのため、 C_L は $\alpha=-6^\circ\sim 10^\circ$ の範囲で定性的に議論することができる。一方、 $\alpha=11^\circ\sim 16^\circ$ の範囲で、風洞試験結果は失速により C_L が下

がっているのに対し、VSPAEROは $\alpha = -6^\circ \sim 10^\circ$ の範囲と同じように C_L が単調に増加している。この差は、VSPAEROがパネル法で計算し、粘性抗力を無視していることにより、剥離による失速を捉えることができなかったために生じたと考えられる。

次に、抗力係数 C_D について述べる。図2より、VSPAEROと風洞試験結果の C_D は $\alpha = -6^\circ \sim 10^\circ$ の範囲で緩やかに増加しており、同様の傾向を示している。しかし、VSPAEROの C_D が風洞試験結果の C_D を全 α において下回っており、一定の間隔が空いている。この間隔は、VSPAEROが粘性抗力を無視して計算し、その分VSPAEROの C_D の値が小さくなってしまったためと考えられる。そのため、 C_D はこの一定の間隔を補間することにより、 $\alpha = -6^\circ \sim 10^\circ$ の範囲で定性的に議論することができる。また、 $\alpha = 10^\circ$ 以降では、 $\alpha = -6^\circ \sim 10^\circ$ に比べ、風洞試験結果の C_D の傾きが大きくなり、間隔がより開いている。これは失速による風洞試験結果の抵抗の増加が原因だと考えられる。

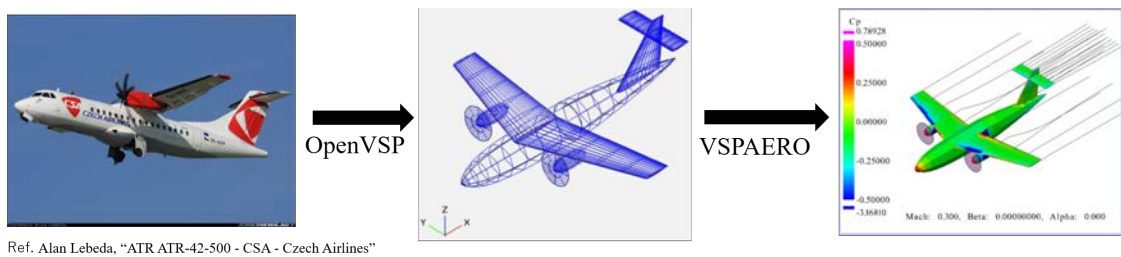
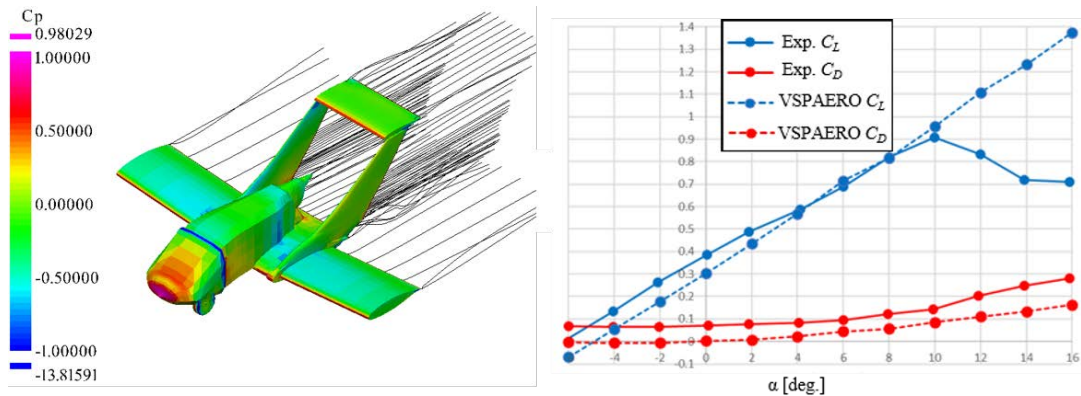


図1：OpenVSPによる機体形状モデリングと性能評価の手順



(a) $\alpha = 0^\circ$ での流れ場 (b)VSPAEROと風洞試験の比較結果(揚力係数 C_L , 抗力係数 C_D)

図2：飛行車両周りの流れ場と空力特性

次に、那覇空港を離発着した航空機の一例としてBoeing737-300の2015年(台風の発生なし)と2016年(台風の発生あり)での航空路の違いを図3に示す。これらの航空路の範囲は沖縄県の本島及び周辺の離島を表示するためそれぞれ北緯 $25.5\sim 27.5$ [$^\circ$]、東経 $127\sim 129$ [$^\circ$]とした。図3より、台風が沖縄本島付近で発生しなかった2015年に比べて、台風が沖縄本島に接近した2016年では航空機の軌跡が大きくばらついていることが確認できる。特に、那覇空港への着陸は南側から行っているが、図中に矢印で示すように2016年では那覇空港に着陸する航空路図は那覇空港への北側から進入している。これは台風16号の経路と照らし合わせると、沖縄の西側を通過しており、那覇空港での風向が北であることが予想される。航空機は追い風が風速15ktを超えれば離着陸は禁止となる。一方、向かい風については風向、風速の変動がなければ風速に制限はない。そのため、離着陸の方向を逆の南側から行うことで、風向が向かい風となる状態として離着陸したと考えられる。この内容については、今後詳細に

分析していく予定である。

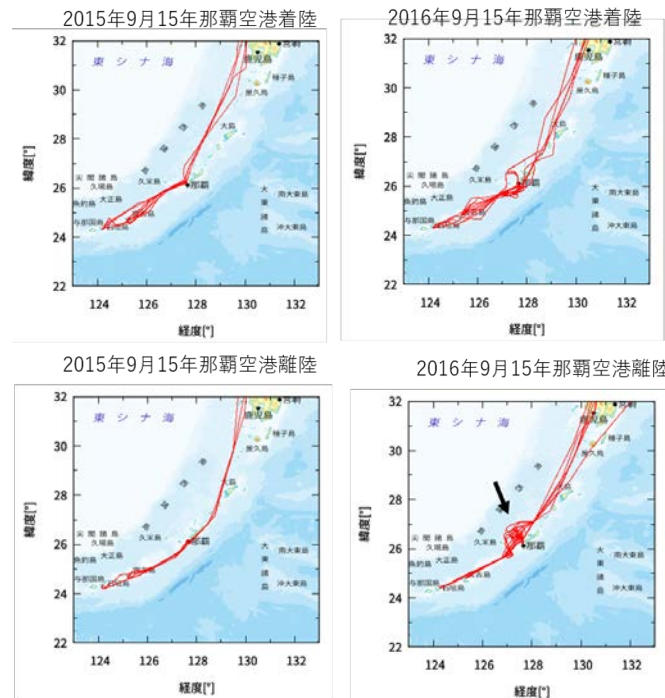


図3：Boeing737-300の航路図の違い

3. 研究目標の達成状況

本研究では、沖縄県の本島及び周辺の離島間での航空輸送の利便性改善を目標に、既存の飛行車両「Pegasus」の機体形状についての性能評価を実施するとともに、那覇空港間の運航状況を分析した。これらを実施したことにより、我々が採用したOpenVSPによる機体形状のモデリングとその機体性能を評価する方法の妥当性を示せた。さらに、沖縄県での台風の有無による航空路の違いを明らかにした。一方で、当初は、本研究で得た成果を基に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行う予定であった。しかし、本年度はコロナ禍による大打撃を受け、十分な連携ができておらず十分な議論に至っていない。[達成度：90%]

4. まとめと今後の課題

本年度は、沖縄県の本島及び周辺の離島間での航空輸送の利便性改善を目標に、飛行車両の機体形状の性能評価を実施するとともに、沖縄県内の空港間の運航状況を分析した。前者は、過去にバージニア工科大学とラフバラー大学によって検討された飛行車両「Pegasus」の形状を対象にその機体形状の性能評価を行った。後者は、国土交通省が公開しているCARATS Open Dataを用いて沖縄本島に台風が通過した年(2016年)とそうでない年(2015年)のデータを比較することで那覇空港に離発着した航跡の違いを調査した。

今後は、飛行車両の機体形状の性能評価を実施に関しては飛行車両「Pegasus」を初期形状としてOpenVSPにより得られた空力特性を基に、離陸・巡航・着陸性能をそれぞれ変更して機体の成立に必要な条件を調べ、機体のサイジングを進めている。加えて、今後の失速特性を捉えていないVAPAEROによるパネル法に代わるナビエ・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を行う。また、沖縄県内の空港間の運航分析を進めるとともに、気象庁が公開しているの数値予報データ・観測データ、及びより詳細な時空間データを入手す

るため気象シミュレーションを実施することで、航空機運航と気象条件の関係を分析し、気象要因による運航制約条件の精緻化を目指す。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] D. Yamabata and S. Morizawa: Evaluation of the Predictive Accuracy of Aerodynamic Characteristics on Roadable Aircraft using OpenVSP, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS18-45, pp. 571-572.

*[2] S. Morizawa, R. Sakai, R. Kikuchi, D. Yamabata, and S. Obayashi: Proposal for the Transportation System with a Roadable Aircraft between Isolated Islands in Okinawa, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CFR-36, pp. 60-61.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J20L050
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2020 ~ March 2021
Project status	1st 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 conferential 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. This year we are holding the World Geothermal Congress, which is a world level conference, and information is being exchanged as needed. We will have individual meetings and wait for COVID-19 to settle down.

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. Suzuki and R. Horne: Geothermal onsen seminar, *Proceedings of the 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), Online, CRF-44, pp. 75-76.
- 3) Patent, award, press release etc.
(Patent) Not applicable.
(Award) Not applicable.
(Press release) Not applicable.

課題番号	J20L051
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	2020.4～2021.3
継続年数	3年目

塑性加工された炭素繊維強化熱可塑性プラスチックの内部欠陥に関する研究
Internal Defect of Plastic-Fabricated Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics

中山 昇*†, 三木 寛之**††, 内一 哲哉**, 武田 翔**
小平 裕也***, 青木 冬威***, 宮川 知大***
*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
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は軽量であり高強度であるため、航空・宇宙部品や F1 等の部品に多く用いられてきている。しかし、CFRP はオートクレーブなどの成形装置を用いて温度と圧力を制御して成形する必要があるため、成形に時間が必要である。今後、炭素繊維強化プラスチックを自動車などの部品に使用するためには、成形時間を短縮化してコストを削減させる必要がある。近年、熱可塑性樹脂を母材とした炭素繊維強化プラスチック (CFRTP) が開発されてきている。CFRTP は加熱すると軟化するため、これまで自動車部品を成形してきたプレス成形やせん断加工などの塑性加工が可能である。従って、コスト削減が期待されている。しかし、熱可塑性樹脂は変形しやすい材料であるが、炭素繊維は変形しにくい材料であるため、その差から内部に空孔が発生する。

本研究では、成形温度を変化させてアルミニウム部品と CFRTP を塑性加工した際の内部欠陥の発生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

本研究では、電磁成形による Al パイプと CFRTP パイプの接合の有用性を確認することを目的とし、まずはアルミニウムパイプと CFRP の接合強度に及ぼすクリアランスの影響を明らかにした。さらに一般的な接着剤による接合と比較した。

供試材は、3K 平織りの CFRP パイプ (SHINA 社製) と、接合する金属材料としてアルミニウム (A1070) パイプを用いた。概略図を図 1 に示す。CFRP パイプは外径 6mm, 内径 4mm, 長さ 100mm である。Al パイプは外径 8mm 一定であるが、内径 D を $D=6.03, 6.05, 6.10, 6.20, 6.40\text{mm}$ と変化させた。本研究では Al パイプの内径 D と CFRP パイプの外径 d の差の半値をクリアランス c と定義し、 $c=0.015, 0.025, 0.050, 0.100, 0.200\text{mm}$ と変化させて成形した。CFRP パイプと Al パイプの重なり合う範囲 s を電磁成形機の磁束集中器の幅と同じになるよう $s=10\text{mm}$ 一定とした。

Al パイプと CFRP パイプの接合には電磁成形機を用いた。電磁成形機のコイル部分の大きさは幅 230×高さ 200×厚さ 90mm であり、ソレノイドコイルを樹脂で固めたブロックを 2 枚のベークライトで挟む構造である。さらに、縮管用のコイルであるが内径が大きいため、平行部は 10mm の銅製の磁束集中器を用いた。電磁成形の条件は、コンデンサの静電容量 C を $C=200\mu\text{F}$, 充電電圧 V を $V=7\text{kV}$ と設定することで充電エネルギー $E=1/2CV^2$ を

E=4.9kJ 一定とした。接合した Al パイプと CFRP パイプの一例を図 2 に示す。

電磁成形により接合した Al パイプと CFRP パイプの試験片の引張試験の結果, Al パイプと CFRP パイプのクリアランスを減少させることで最大せん断応力は増加することがわかった。Al パイプと CFRP パイプの異種接合においては二液性常温硬化型エポキシ系接着剤による接合強度が最も高いことがわかった。しかし, 電磁成形機で接合した試験片の接合強度は一液性常温硬化型弾性接着剤による接合強度よりも高いことがわかった。さらに図 3 に示のように CFRP パイプに Al パイプが接合されていることがわかった。

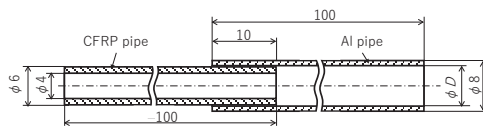


図 1: 試験片の模式図

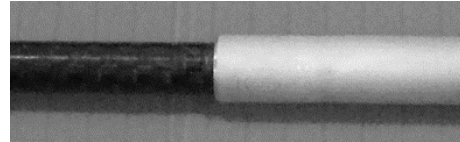


図 2: 接合した Al パイプと CFRP パイプ ($c=0.050\text{mm}$)

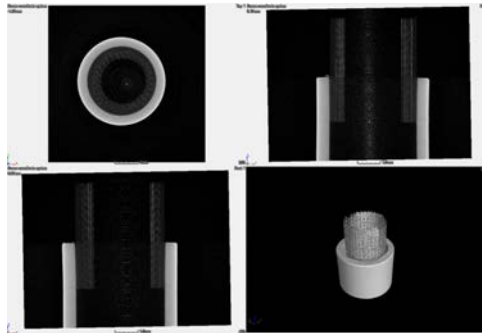


図 3: X 線 CT 検査の結果

3. 研究目標の達成状況

新型コロナウイルスの影響により CFRTP パイプでの実験ができなかったことから 90% 程度の達成度であるが, CFRP パイプと CFRTP パイプはほぼ同じ結果であると考えられる。

4. まとめと今後の課題

電磁成形による Al パイプと CFRP パイプの接合では, 接着剤による接合と比べ, せん断応力は低いものの, 短時間の接合プロセスで接合強度が得られることがわかった。

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] Yuya Kodaira, Nobuhiko Kobayashi, Naofumi Kodaira, Atsuko Takei, Noboru Nakayama: Development of Joining Method by Cylindrical Pin Using Thermal Expansion of CFRTP, *Advanced Experimental Mechanics*, Vol. 5, (2020), pp. 110-115.
- [2] 中山昇, 小平裕也: CFRTP の熱膨張を利用したアルミニウム合金との異種接合, 軽金属溶接, Vol. 58, No. 4, (2020), pp. 121-124.
- [3] 小平裕也, 中山昇: 電磁成形による異素材の接合技術: アルミニウムパイプの縮管を利用した CFRP パイプとの異種接合, 配管技術, Vol. 62, No. 12, (2020), pp. 15-18.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[4] 中山昇, 小平裕也, 小林信彦, 濱勉, 松崎邦男 : 電磁成形を用いたアルミニウムパイプと CFRP の接合に及ぼすクリアランスの影響, 第 71 回塑性加工連合講演会, (2020), pp. 375-376.

[5] 小平裕也, 小林信彦, 小平直史, 濱勉, 中山昇 : CFRTP の熱膨張を利用した円柱ピンによるアルミニウム板材の接合, 第 71 回塑性加工連合講演会, (2020), pp. 405-406.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J20L058
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	2020.4～2021.3
継続年数	2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[†], 徳増 崇^{**††}, 永島 浩樹^{***}, 高橋 竜二^{****}

*九州大学大学院工学研究院, **東北大学流体科学研究所

琉球大学工学部, *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、気泡の核生成速度（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、分子スケールで生じる液体水素中の気泡初生速度の解明を行うとともに、マクロな混相流解析に導入可能な気泡初生モデルを提示するのが目的である。

2. 研究成果の内容

本年度はまず、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) 法および古典分子動力学 (MD) 法を用いて、初期条件 (分子の初期位置・初速度) の異なる 100 個の系に対してそれぞれ気泡初生の解析を実施し、昨年度よりも統計精度を確保した気泡初生速度の評価を行った。結果として、臨界温度 (T/T_c) と無次元過熱度 ($\Delta\mu/\Delta\mu_{spn}$) を揃えた条件では、水素の量子性を考慮すると気泡初生速度が小さくなることが再確認された。次に、水素に対する既往の気泡初生モデルの適用妥当性を確認することを目的として、密度汎関数理論 (DFT) を用いた解析を行った。古典 MD 法および CMD 法を用いたシミュレーションから得られる熱物性データをよく反映する状態方程式 (EOS) を構築した上で、それぞれの EOS を適用した DFT による解析を実施し、水素の量子性が気泡初生速度に及ぼす影響を評価した。その結果、対臨界温度と無次元過熱度を揃えた条件では、量子性を考慮することで気泡初生速度は小さくなり (図 1)、定性的には MD シミュレーションの結果と整合することが確認された。また、対臨界温度と無次元過熱度を揃えた条件で比較する限り、水素の量子性は気泡初生に必要なエネルギー (エネルギー障壁) を上昇させるため、古典系の場合に比べて気泡初生速度が小さくなることがわかった (図 2)。

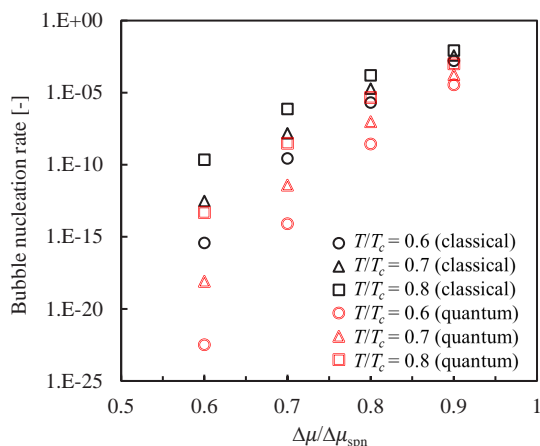


図 1: 気泡初生速度の古典系と量子系の比較

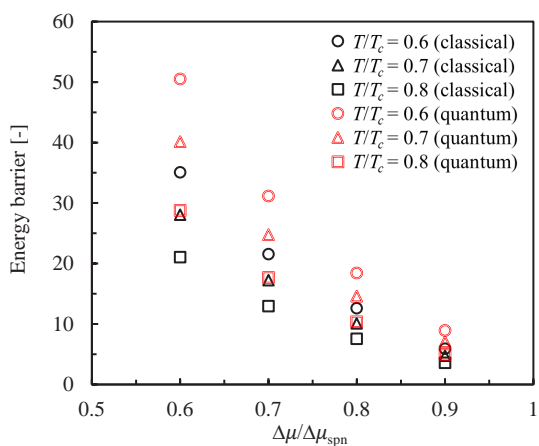


図 2: エネルギー障壁の古典系と量子系の比較

3. 研究目標の達成状況

これまでの研究により、対臨界温度と無次元過熱度を揃えた条件では、液体水素の量子性を考慮することで気泡核生成速度が小さくなることが示唆された。なお令和2年10月28日～30日にかけて行われたICFD2020では、本課題の研究報告を行った。また、メンバー間にて定期的に議論を交わすことで、本研究目標の達成状況と今後の課題を共有してきている。

4. まとめと今後の課題

本研究では、液体水素の量子性が気泡初生に及ぼす影響を評価することを目的として、MDおよびDFTを用いた気泡の核生成速度（初生速度）の解析を行った。その結果、対臨界温度と無次元過熱度を揃えた条件においては、量子性を考慮することによって気泡核生成速度が小さくなることが確認された。これは水素の量子性によってエネルギー障壁が高くなることに起因している可能性がDFTから示唆された。また、DFTは気泡核生成速度に対する水素の量子効果を定性的に再現できることが確認された。今後は、CMDとDFTの詳細な比較を通して、本年度実施したDFTよりもさらに精度の高い液体水素中の気泡初生モデルを提示する予定である。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[1] H. Nagashima, S. Tsuda, T. Tokumasu: An evaluation of the self-diffusion coefficient of liquid hydrogen via the generic van der Waals equation of state and modified free volume theory, *Chemical Physics*, Vol. 539, (2020), 110952, 10.1016/j.chemphys.2020.110952.

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 20th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Online, Sendai, Japan, (2020), CRF-91, pp. 158-159.

[3] 高橋竜二, 永島浩樹, 徳増崇, 渡邊聡, 津田伸一: 液体水素の量子性が気泡核生成の微視的過程に及ぼす影響の分子論的検討, 第57回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2020), D324.

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	J20L060
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	2020.4～2021.3
継続年数	3年目

細径ノズルから噴射される大気圧マイクロプラズマの流れ解析
Fluid Flow Analysis of an Atmospheric-Pressure Micro-Plasma Ejected from a Narrow Nozzle

吉木 宏之*†, 西村 涼汰*
 佐藤 岳彦**††, 中嶋 智樹**, 上原 聡司**
 *鶴岡工業高等専門学校, **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

次世代自動車, 自立型ロボット, プロジェクター等の光学機器に搭載される加速度センサー, ジャイロセンサー, マイクロアクチュエーター等の MEMS デバイスは微細加工技術で作製される. 多品種少量生産の MEMS 作製ではエッチング, 成膜等の多段階プロセスの一部を非真空プロセスへ置換えることでコスト削減・生産性向上が期待できる. 大気圧マイクロプラズマは局所エッチングやオンサイト成膜を可能にする. これまで外径 1.2 mm 以下の細径 SUS パイプ (注射針) 電極を RF (13.56 MHz) 励起して大気圧マイクロプラズマ流を生成して Si ウエハやポリアミド薄膜の局所エッチング, DLC 成膜に応用した. エッチングや成膜の制御に高密度ラジカルを含むプラズマガス流の解析が必要である.

本研究では, 大気圧マイクロプラズマの衝突噴流をシュリーレン法で可視化して, ガス流量, 投入電力, 細径ノズル - 基板間距離 d とプラズマ衝突噴流の状態を明らかにした.

2. 研究成果の内容

シュリーレン装置を用いた大気圧マイクロプラズマ (AP μ P) 流の可視化実験の概略図を図 1 に示す. プラズマガスは一般ヘリウム, ガス流量: 0.6~1.8 L/min, RF 電力: 2~14 W, 細径ノズル - 基板間距離 d : 3~5 mm に設定してアルミニウム基板への衝突噴流を観察した. ハイスピードカメラは Photron, FASTCAM SA5, フレームレート: 7500 fps とした. AP μ P 流の観察の様子を図 2 に示す. 基板距離 $d = 3$ mm, He 流量: 1.4 L/min として衝突噴流の様子を観察した.

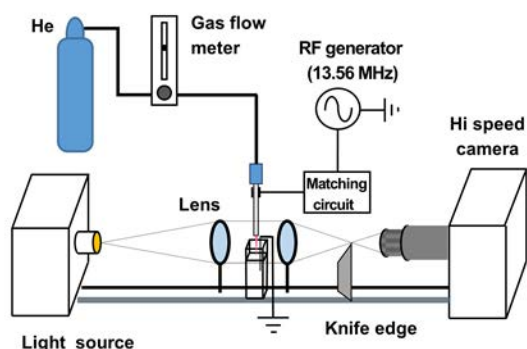


図 1 : 流れの可視化実験装置の概略図

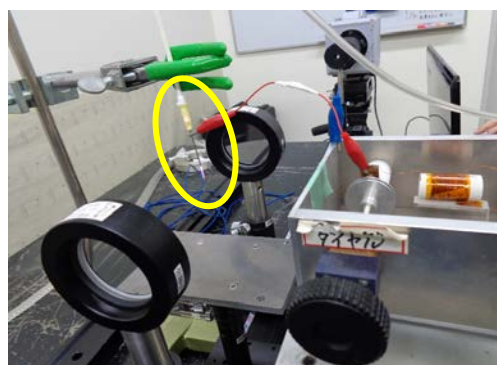
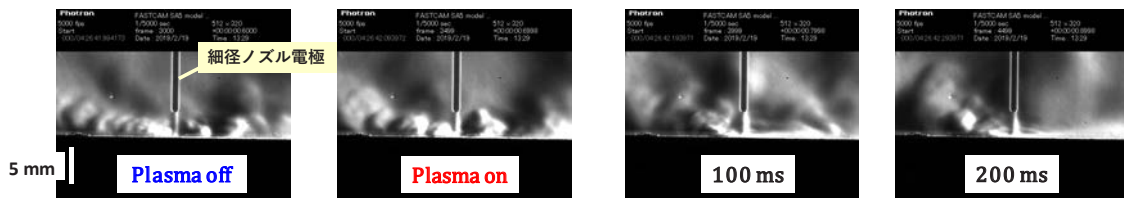


図 2 : 細径ノズルから噴射する大気圧プラズマ流

1) He flow rate: 1.4 L/min (V_{inside} : 82 m/s), RF power: 5.0 W



2) He flow rate: 1.4 L/min (V_{inside} : 82 m/s), RF power: 9.0 W

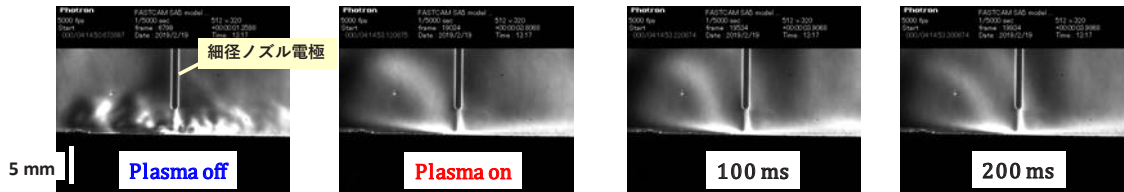


図3 プラズマ点灯前・後の衝突噴流の乱れの様子の RF 電力依存性 (ノズル-平板間距離: 3 mm)

図3 にプラズマ点灯前・後の衝突噴流の乱れの様子を示す。プラズマ点灯前は、衝突噴流が周囲の空気を巻き込むことで乱れが発生している。これに対して、プラズマ点灯後は RF 電力 9.0 W 時に乱れが消失しているが、一方で 5.0 W 時は若干の乱れが確認できる。プラズマ衝突噴流における乱れの発生・消滅は He 流量およびノズル-平板間距離にも依存しており、ノズル-平板間の電界強度により衝突噴流内のイオンの運動が影響を受けることが原因と推測している。

3. 研究目標の達成状況

AP μ P 流の基板への衝突噴流の“乱れ”発生とその抑制現象の基板間距離, RF 電力, ガス流量依存性が明らかとなり, 大気圧プラズマプロセス理解の観点では 60%程度の達成度である。

4. まとめと今後の課題

シュリーレン法による AP μ P 衝突噴流の可視化で基板での“乱れ”発生とその抑制現象が明らかとなった。今後の課題は、プラズマ流速や、電磁場強度測定等から乱れ制御機構を明らかにする。

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] 吉木宏之, 乙坂謙次, 佐藤岳彦, 中嶋智樹, 上原聡司: 細径金属パイプ電極から噴出する大気圧 He マイクロプラズマの流れの可視化, 静電気学会誌, Vol. 45, No. 3, (2021), pp. 120-121.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] K. Otosaka and H. Yoshiki: Carbon Nanotube-Gold Nanoparticle Composites Synthesized by Gas-Liquid Interfacial He Microplasma Irradiation, *ISPlasma2021/IC-PLANTS 2021*, Virtual Symposium, (2021), 09pC100.

[3] 吉木宏之, 乙坂謙次, 佐藤岳彦, 中嶋智樹, 上原聡司: 細径金属パイプ電極から噴出する大気圧 He マイクロプラズマの流れ解析, 静電気学会東北・関西・九州支部合同研究会/第 435 回生存圏シンポジウム, オンライン, (2020).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J20L066
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目（発展）

数值的・実験的研究による低レイノルズ数領域での回転翼・運動翼における動的空気特性の解明
 Experimental and Computational Study on Unsteady Aerodynamic Characteristics of Rotating
 and Moving Wing Under Low Reynolds Number Region

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、低レイノルズ数域における非定常空気特性を理解することで解決することが期待されている。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気特性が大きく変化することが知られている。本研究では、運動翼・回転翼を対象とした動的空気特性を解明することを目的として、数値解析及び風洞実験を通して非定常空気特性について調べる。

2. 研究成果の内容

直交格子法 CFD を用いて、コルゲート翼をヒービング運動させた流体解析を実施した。図 1 は、運動に伴う流れ場の変化について可視化した図であり、ヒービング運動に伴う複雑な流れ場の変化が確認できる。本解析において、揚力係数の変化を調べると、平板よりも平均して高い揚力係数を得ていることが確認できた。

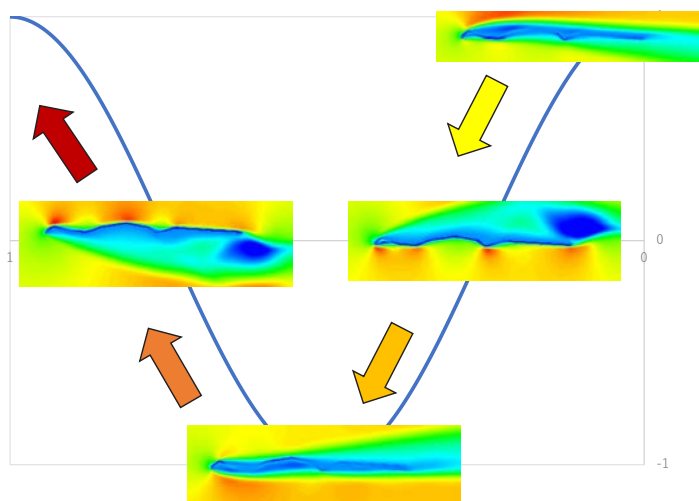


図 1：コルゲート翼におけるヒービング運動の解析結果

3. 研究目標の達成状況

本研究により、直交格子法 CFD を用いて、コルゲート翼周りの運動解析を実施することができ、詳細な流れ場把握に向けた準備が整ったと言える。実験との比較等、検証を今後進める必要があるが、今期の研究目標は概ね達成できたと考えている。

4. まとめと今後の課題

今回の研究では、コルゲート翼周りのヒービング運動の解析を行うことができたが、今後実験との比較を通じた妥当性検証や現象の理解が必要となる。そこで、現在運用されているヒービング風洞(図2)を用いて取得した実験値との比較・検証を進めている。検証後、CFD と実験で得られた結果を元に、コルゲート翼の優位性等について詳細な理解が可能となる。

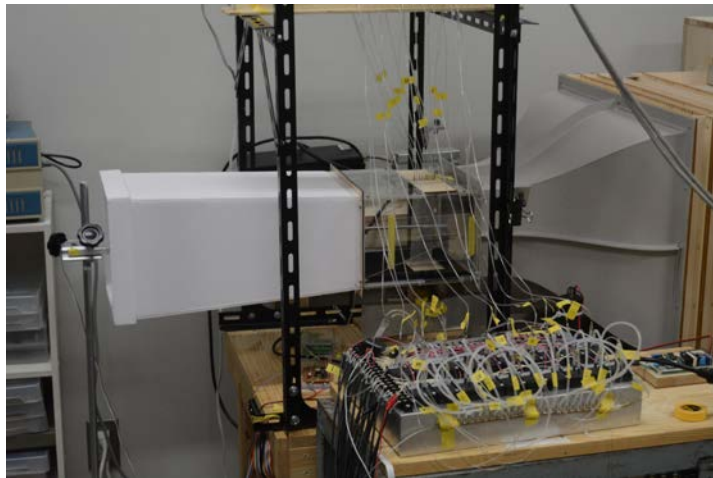


図2：開発したヒービング風洞

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] D. Sasaki, R. Naganuma, T. Takase, N. Hayashi, K. Mizumoto, T. Akasaka, M. Okamoto, S. Takhashi, S. Obayashi and K. Shimoyama: Study on Aerodynamic Effect of Corrugation at Low Reynolds Numbers, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-34, pp. 56-57.

[2] 佐々木大輔, 宮崎紗弥香, 鹿田侑右, 喜多琉歩, 長橋昌平, 高瀬拓海, 下山幸治: ブロック構造型直交格子法による流体解析, 第1回直交格子 CFD ワークショップ講演集, JAXA-SP-20-006, (2021), pp.119-132. <http://id.nii.ac.jp/1696/00047364/>

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20L067
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	2020.4～2021.3
継続年数	2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

石本 淳*††, 平田 勝哉***†
 中野 政身**, 野口 尚史***, 永田 麻王***
 *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
 ***同志社大学理工学部
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は、空気力学的な観点から、回転しながら飛行する中空円筒の飛行メカニズムを明らかにすることである。そのために、射出装置を用いた運動解析と、三次元数値解析を行う。

2. 研究成果の内容

本年度は、主に実験結果と比較するための三次元数値解析法を検証した。ハーゲン・ポアズイユ流れや一様流などの基本的な流れに関する計算を行い、円筒座標系において特異である中心での値の処理について検討した。

3. 研究目標の達成状況

運動解析においては、射出装置を完成させ、これを用いて実験を行うことで、さまざまな回転速度、迎角での多数の実験データを取得することが出来た。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。また、モデルの歳差運動の周期、振幅と角速度の関係についても検証を行った。

数値解析においては、実験結果と比較するための三次元数値解析の検証の為、基本的な流れに関する計算を行った。

4. まとめと今後の課題

運動解析においては、様々な回転速度、迎角におけるモデルに作用する流体力、モーメントを算出した。今後は、モデルの抗力算出時の誤差を減らすことに加え、モデルの形状効果についても調査を行う必要がある。加えて、風洞を用いた実験を行い非回転時のモデルの揚力、抗力、形状効果も確認する必要がある。

数値解析においては、実験結果と比較するための三次元数値解析の検証の為、基本的な流れに関する計算を行った。今後は、さまざまな状況下での中空円筒外部の流れに関する計算を行う予定である。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] Yusuke Naito, Romain Montini, Hirochika Tanigawa, Jun Ishimoto, Masami Nakano and Katsuya Hirata : Experiment and Numerical Analysis of a Rotating

Hollow Cylinder in Free Flight, *Advances in Hydroinformatics*, (2020), pp. 923-936, Springer Singapore.

- [2] 平田勝哉, 貴田洋輔, 中井俊宏, 内藤悠介, 谷川博哉, 中野政身, 野口尚史: 回転しながら飛行する中空円筒について, 同志社大学ハリス理化学研究報告, 第 61 巻, 第 3 号, (2020), pp. 33-43.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] M. Nagata, H. Tanigawa, J. Ishimoto, M. Nakano, T. Noguchi and K. Hirata: On a Rotating Hollow Cylinder in Flight, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2020), OS1/3-2, pp. 94-95.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J20L072
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目（発展）

分子シミュレーションを用いた固液界面のナノスケール気泡形成の解析
Analysis of Formation of Surface Nanobubbles by Molecular Simulation

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、ナノカプセルへの応用などの可能性から工学的に価値が高いため、広く研究されている。特に分子シミュレーションを用いた、界面ナノバブルの形成や安定性、成長に関する研究はこれまで数多く報告されている。一方で、それらのシミュレーションは2次元での系、または現実の水を再現しないモデルを用いている。より現実的な振る舞いについては、この2つの要因を取り入れることが欠かせない。具体的には、界面ナノバブルにおいて界面活性剤はコンタミネーションの形で意図せず混入することもあるため、この安定性への影響の理解は工学的に必要不可欠である。

そこで、より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、界面活性剤が界面ナノバブルへ与える影響を明らかにする。特に、気泡が水分子からのみなる蒸気泡を対象とする。

2. 研究成果の内容

グラファイト-水の系において、分子動力学法を用いて蒸気泡の生成シミュレーションを行った。この系では、底面のグラファイト中央に疎水性サイトを設け、また天面にも圧力制御のためにグラフェンを設けた。この結果、負圧を系に課すことにより図 1(a)にあるように、疎水性サイト上に蒸気泡が形成した。

さらに、この系に界面活性剤を加えることにより、蒸気泡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、界面活性剤には、1-ペンタノールを用いた。図 1(b)は円筒座標系での水分子の数密度分布を表しており、それぞれ界面活性剤が存在しない場合と、導入した場合を表している。この図から、界面活性剤の存在により、界面の蒸気泡の体積は減少し、また平たい形状をとることがわかった。一方で、一定の値以上の数の界面活性剤を導入した場合は、蒸気泡の存在できる領域が失われ、界面ナノバブルが生成されなかった。また、界面活性剤は気液界面よりも固気液の境界に集まる傾向があることが明らかになった。

以上のようにして求めた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、蒸気泡の曲率を求めた。その結果、図 1(c)のように界面活性剤の分子の数が增えるに従い、曲率半径が増加することが分かった。このように、界面活性剤の存在により、界面に生成される蒸気泡の体積や曲率半径が制御可能であることが分かった。

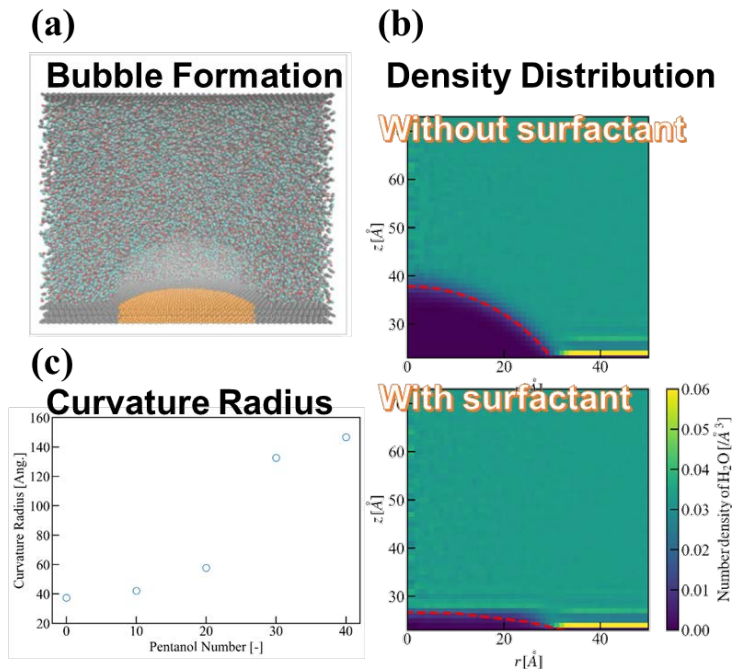


図 1 : (a) グラファイト基板上の疎水サイトに形成する蒸気泡の分子動力学シミュレーション, (b) 界面活性剤の有無による水分子密度分布の違い, (c) 形成した界面の蒸気泡の曲率と界面活性剤分子の数の関係.

3. 研究目標の達成状況

これまでのナノバブルの分子動力学シミュレーションにより, 界面に生成される蒸気泡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を明らかにした. 一方で, 研究目標にとって重要な要素である, 実際の界面ナノバブルには含まれている不凝縮ガスが存在した場合の研究に関しては, まだ達成できていない. こうした研究を今後行う際に, これまでの研究成果の技術および知見が大いに役立つと考える.

4. まとめと今後の課題

本研究では固体壁面上に形成した蒸気泡の形状が, 界面活性剤の存在によりどのように変化するかを明らかにした. 一方で今後は従来のシミュレーションとは異なり, 不凝縮ガスによるナノバブルの形成や界面活性剤の影響を明らかにする. これにより, これまで蒸気泡で見られた界面活性剤による気泡形状の変化が, 不凝縮ガスの量によりどのように影響を受けるかを明らかにし, 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

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 simulation on surface nanobubble at the graphite-water interface with pentanol surfactants, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, online, (2020), CRF-87, pp. 151-152.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J20L080
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

セルロース単繊維創成法に向けた濃度勾配下におけるナノ繊維・静電流動場相互作用系の
理論構築

Developing an Interaction Model of Fibers and Electric Flow Field for Nanocellulose
Mono-Fiber Creation using Flow Focusing

石本 志高*†, 大岡 愛貴*, 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

高奈らにより, Flow-focusing 法の十字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ファイバー (CNF) の配向度の向上が報告された. しかしながら, Flow-focusing 流路において, 合流部の極端な配向度減少が問題となっており, 電場制御と併せて更なる配向度の向上が期待される. 本研究では, Flow-focusing 法による配向制御に向けて, 流路内の流れにおいて CNF の配向がどのような影響を受けるかを解明することを目的とする. 濃度勾配下への拡張や各種数値流体計算を用いて実験・理論両面より詳細に明らかにし, 高精度高濃度 CNF 創成の端緒とする.

2. 研究成果の内容

本研究では, Flow-focusing 流路内の流れ場を ANSYS Fluent でシミュレーションし, 合流部のデータから CNF の 3 次元配向オーダーパラメータを数値計算した.

流路内の流れ場シミュレーションの結果 (速度場) を図 1 に示す.

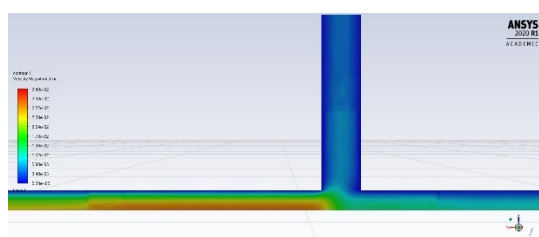


図 1: 流れ場のシミュレーション結果.

この結果から流線を抽出し, 流れに追従する CNF 粒子の配向分布をラグランジュ描像のスマルコフスキー方程式を元に数値計算し, 配向オーダーパラメータを求めた. 求めた結果と先行実験研究との比較を図 2 に示す.

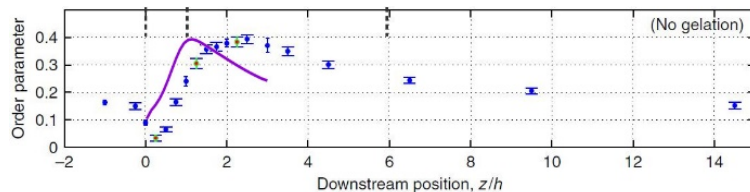


図 2：先行研究[Hakansson, Nat. Comm. 5 (2014)]との比較. 実線が数値計算結果.

計算結果より，流路中心付近と外側で配向度の違いが見られた．合流部の配向度上昇と下降という傾向に定性的な一致があるが，発現位置にずれが生じた．原因として，位置非依存の初期条件の影響や，密度，相互作用を省略した影響が考えられる．

3. 研究目標の達成状況

当初の目的に則し，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，濃度勾配下への拡張は未達成である．全体的な達成度としては 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を見たが，定量的な一致のために更なる改良が求められる．今後は，より上流からのシミュレーションを用い，実測値 CNF 濃度を用い，未解明な分子間相互作用をいくつかシミュレーションし，実験との比較から相互作用形の同定を行うことが期待される．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Y. Ishimoto, A. Oooka: Theoretical Analysis of Orientation Order Profile in Nanocellulose Mono-fiber Creation Using Flow Focusing, *Proceedings of the Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020)*, Sendai, Japan, (2020), OS5-14, pp. 229-230.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20L085
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	2020.4～2021.3
継続年数	3年目

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 機械科学コース
 **東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

遠心ポンプで発生するキャビテーションを実験において可視化し、その特徴を調査することである。可視化用遠心ポンプにおいて、軸方向から各翼におけるキャビテーションを観察することにより非定常で非対称な挙動を捉える。

2. 研究成果の内容

本研究では、軸方向から撮影したハイスピードカメラの画像からキャビティを検出し、高速フーリエ変換による周波数解析を行った。検出には画像の輝度値を使用し、キャビテーションを2値化した領域をキャビテーション体積とみなした。そして、各翼でキャビテーション体積変動に対して周波数解析を行った。

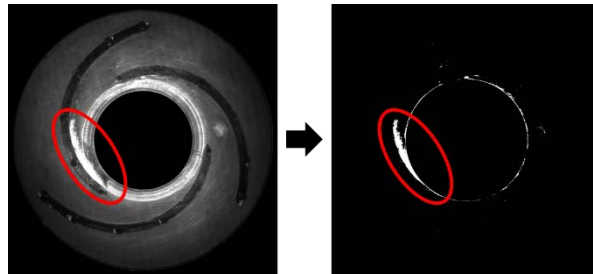


図1：キャビテーション可視化 (850rpm, $\phi=0.033$, $\sigma=0.050$)

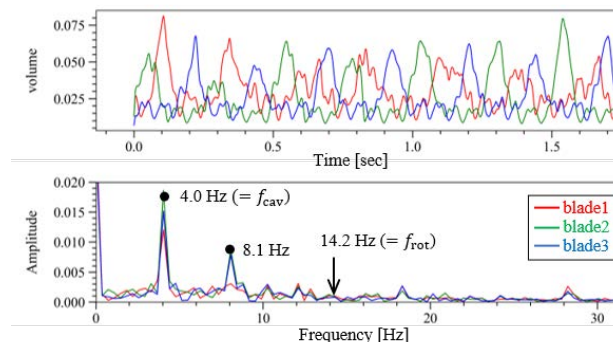


図2：キャビテーション体積の時間変動及び周波数解析結果 (850rpm, $\phi=0.033$, $\sigma=0.050$)

図1は、試験ポンプで発生するキャビテーションを撮影した画像と、それを輝度値から2値化した画像であり、赤く示したキャビティが捉えられていることがわかる。

図2は、は850rpmの設計流量より低流量での減圧実験のキャビテーション体積の変動を移動平均でスムージングした波形と、周波数解析を行った結果である。また、キャビテーション体積変動と周波数の波形の色は各翼に対応している。各翼のキャビティの変動のタイミングが1/3の位相差を持っており、非対称な非定常キャビテーションの発生が確認できる。キャビティの変動がblade3-blade2-blade1の順に並んでいるため、キャビティはインペラ回転方向に旋回していた。また、周波数解析の結果より、850rpmでは4.0Hzとその高調波の8.1Hzにピークが存在していることがわかる。4.0Hzと3.3Hzはともにキャビティの旋回周波数であるため、伝播速度比が850rpmでは1.28の超同期旋回キャビテーションが発生したことがわかる。

3. 研究目標の達成状況

本年度の成果によって、遠心ポンプで発生する旋回キャビテーションを定量的に捉えることができた。しかし、ある限られた流量とキャビテーション数における結果であり、来年度には、広い範囲の流量とキャビテーション数で実験を行う予定である。今年度では、実験を行うことができず、達成状況としては研究目標の20%程度である。

4. まとめと今後の課題

今後は、様々な条件でのキャビテーションの挙動を調査すること、また、画像からキャビテーションを検出する際に、適切に識別できているか検証する必要がある。

5. 研究成果

- 1) 学術雑誌（査読付き国際会議、解説等を含む）
なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
なし
- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）
なし

課題番号	J20L086
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

局所軸幾何理論による渦軸の解析と定義
Analysis and Definition of Vortical Axes by Local Axis Geometry Theory

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

1. 研究目的

本研究は、渦軸の幾何・トポロジーを分析して渦軸の特性の解明と定義を確立することを目的としている。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・安定性に大きく影響する。渦軸の同定は、渦の速度構造の解明、並びに渦の安定性や特性の解明につながる。また、渦軸の挙動の解析は、渦領域の変化や渦抑制の重要な知見となる。

一方、渦軸にはまだ統一的な定義は確立されておらず、諸々の物理的側面から渦軸定義が提案されているが、定義によっては渦軸が渦領域から逸れたり渦コア領域で螺旋軌道となる場合もある。最近、渦のトポロジーを定める物理量を用いて渦領域中の渦軸のトポロジーを定める local axis geometry theory (局所軸幾何理論)が提案され、このような渦軸の特性を定量的に分析することが可能となった(Nakayama, ICFD2019; Nakayama, APS-DSFD2019)。

本研究では、渦度、ローカルトポロジーに着目した渦軸の定義を用いて一様等方性乱流の渦軸を同定し、これらの挙動と特性を local axis geometry theory により分析する。これにより、渦コア領域の物理特性を定量的に分析し、統一的な渦軸の定義を構築することを最終目標とする。

2. 研究成果の内容

本研究と並行して進められた申請者による渦線と渦伸長(vortex stretching)における理論研究において、渦領域では渦伸長が渦線の軌道を渦状にする作用を与えていることが示された。そこで、本研究では、一様等方性乱流における渦線バンドルの local axis geometry 解析により、渦コア領域における渦線のトポロジーが前述した特性を有することを示した。更に、渦線は渦の旋回流れに対して同方向・逆方向に旋回する場合があります。これには渦のトポロジーのダイナミクス、即ち渦の発達・減衰に関連したメカニズムによるものであることが判明した。渦流の旋回平面上において、旋回の強さを示す swirlity の極大点を中心とし、この点における渦度ベクトルを基準としたときの渦度ベクトル分布を半径方向・周方向成分に分解してそれぞれの渦伸長によるトポロジカルな力の作用に着目する。この分解した渦度ベクトルの半径方向成分は小さいものの、この成分に対する渦伸長の作用が渦度ベクトル・渦線の旋回方向を定めており、渦(swirlity)の発達と減衰によりその方向が変化する。これらの理論的予測もまた本研究の解析にて示した。

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渦領域(swirlity $\varphi=2.7$ 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 η はコルモゴロフ長さである。

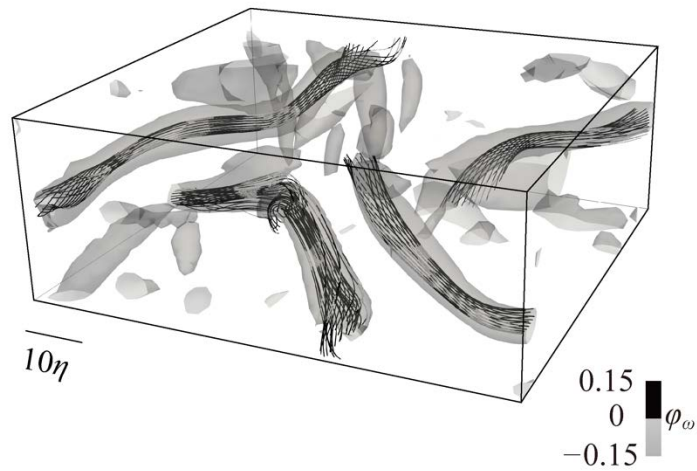


図 1 : DNS の部分領域における渦領域 ($\varphi = 2.7$ の 3 次元コンター) 並びに渦線の swirlity (φ_ω) のコンターにて表した渦線バンドル

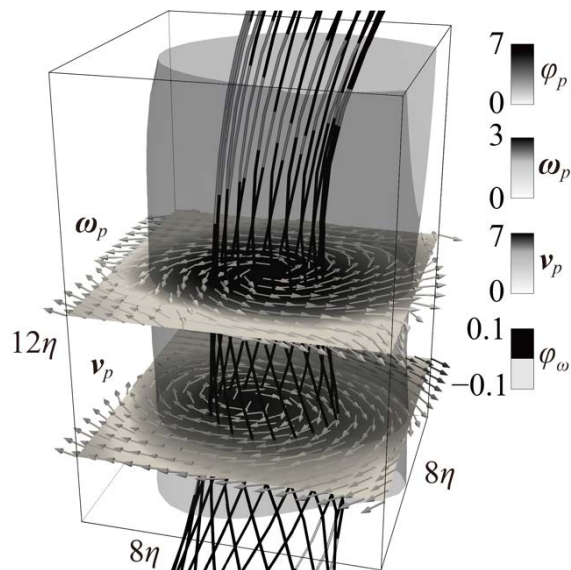


図 2 : ある渦領域 ($\varphi = 3$ の 3 次元コンター) 中を通る渦線バンドル (φ_ω のコンター), 並びに φ の 2 次元コンター φ_p で示した旋回平面における渦度ベクトル分布 ω_p (上段) と渦流れ v_p (下段). 本渦領域では, 渦の φ が図の下方 (渦度ベクトル方向) に向かって弱くなり, 渦線バンドルは全周の湧出し成分を有する. このとき, 渦伸長により渦流 (時計回り) と反対の方向 (反時計回り) に旋回する.

渦線バンドルは, 本バンドルの旋回の強さを示す swirlity (φ_ω) のコンターにて表しており, 渦領域中で本バンドルが旋回している部分が多い.

次に, ある一つの渦領域の旋回平面において, swirlity の極大点の周りを通る渦線バンドルの様相を図 2 に示す. 本図では, swirlity の極大点での速度ベクトル, 渦度ベクトルを基準とした渦流れ, 渦度ベクトル場も併せて示している. この渦領域では, 渦度ベクトルは図の下側を向いており, この方向に swirlity が減衰している. このときの渦線バンドルは, 時計回りに旋回する渦流とは反対の方向に旋回している. これは,

旋回強さの減少に応じ、渦度ベクトルの半径方向成分が渦伸長により反時計回りの力を受けていることによるものである。

3. 研究目標の達成状況

研究当初は、渦線よりも高い渦度領域を通る性質を有する渦軸定義 Eigen-vortical-axis line (Nakayama and Hasegawa, FDR2018)を渦線と併せて local axis geometry の解析を行い、それぞれの特性を比較・分析することを検討していた。しかし、渦伸長が渦線を渦状にする数理的な知見が別途得られたことから、渦線バンドルの特性のメカニズムを明らかにし、理論的な予測が正しいことを示すことができた。Eigen-vortical-axis line の旋回平面上の接ベクトル成分は、同平面上の渦度ベクトルの線形変換によって表される。従って、まず渦線・渦度ベクトルのトポロジー特性の根本原理を明らかにできたことは、Eigen-vortical-axis line のトポジカル特性のメカニズムを解明する上で大きな進展となった。この点では予想される成果以上にメカニズムの深い解明ができた。

本研究結果により、Eigen-vortical-axis line が渦線と異なる性質となるメカニズムを探るアプローチの方針が明確になり、本 line のトポロジーのメカニズム解明の為の研究基盤が築けたと考えられる。最終目的である統一的な渦軸の定義に向けて着実に近づくことができた。

4. まとめと今後の課題

局所軸幾何理論の解析により、渦領域を通る渦線バンドルのトポジカル特性を明らかにし、渦伸長により渦流と同方向或いは反対方向に旋回する渦軌道を描くメカニズムが解明された。今後は、Eigen-vortical-axis line において同様な解析を行い、このトポジカル特性、並びに旋回平面で渦中心・強旋回の方角を示すベクトルとの関わりを明らかにすることができれば、渦コア領域での諸々の物理特性が渦流トポロジーと関連付けて明らかとなり、統一的な渦軸の定義の条件が明確になると考えられる。統一的な渦軸定義が確立されると、気象や海洋、また発電や航空、交通機械、構造物等の様々な分野の渦解析や渦の抑制技術に貢献できると考えられる。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Katsuyuki Nakayama, Kazuma Doi, and Yuji Hattori: Analysis of a Vortical Axis Based on Local Axis Geometry, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-98, pp. 171-172.

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	J20L098
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目（発展）

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、管内の流体挙動に着目して、一次元モデルの開発と検証、ならびに相変化 CFD による気泡成長模擬解析を行うことを研究目的とした。

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予測する、一次元解析手法を開発した。本手法では流体部分を Euler 法で気泡部分を Lagrange 法で解析する連成解析を行う。この手法を用いて得られた気泡の成長過程の解析結果（図 1）と単一ループのヒートパイプの内部流動解析結果（図 2）を示す。気泡成長は加熱されたダクト内部での半径の増加率を先行研究と比較しており、単一ループ内のヒートパイプの解析では加熱部で生じた気泡が駆動力となって一方向の速度を誘起した結果、顕熱輸送が顕著になる様子が確認された。今後はこの解析手法の検証をさらに進めて本手法の妥当性と応用性を示す。

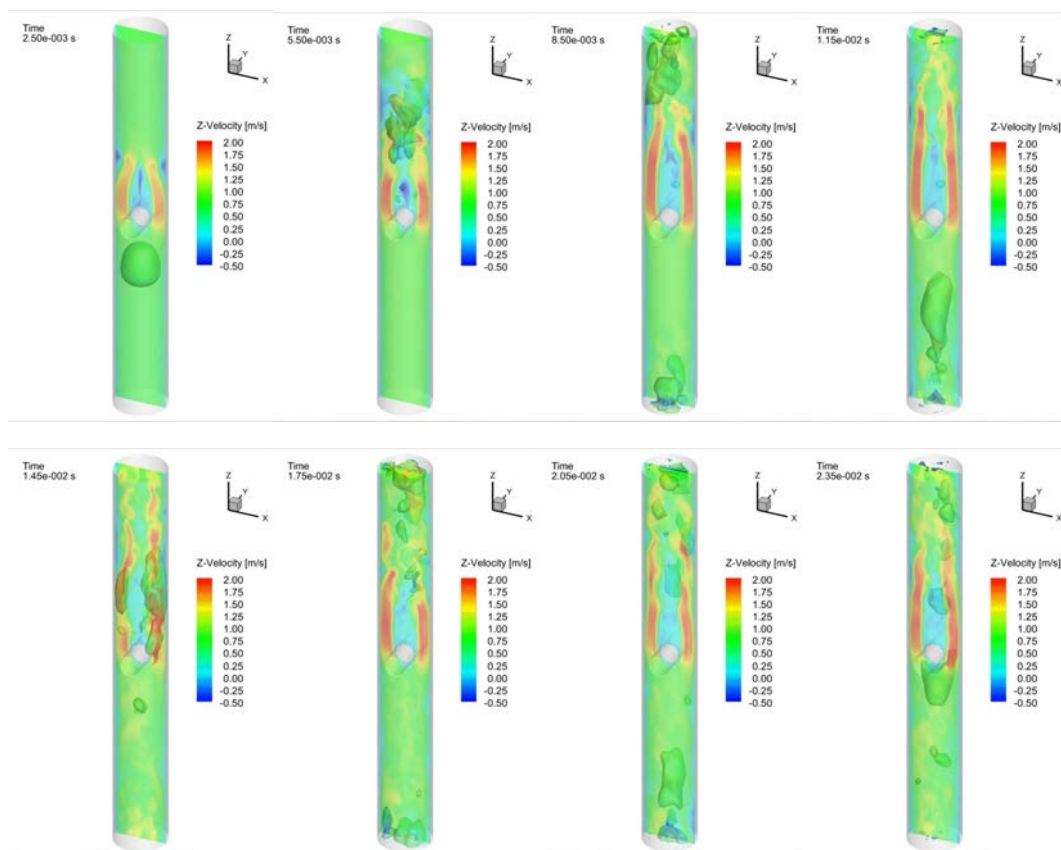


図 1：抗体が存在する円管内部で後流に捕獲される気泡の時系列の解析結果

3. 研究目標の達成状況

本研究では、1D 解析、実験、CFD の全てを導入して多角的に自励振動ヒートパイプに関して研究を行うことで、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、学術論文への投稿を狙った。結果として、1D 解析の検証解析による気泡挙動の妥当性の確認と、図 1 に示す CFD を応用した相変化模擬解析を達成した。

具体的には、1D 解析では気泡の運動の妥当性が確認されたことから、先行研究も存在していた分散気泡モデルによって運動量の授受に関しては妥当な結果が得られたと考えられる。しかしながら、分散気泡モデルと同様に 1D 解析の根幹を成す相変化と熱授受のモデルに関しては分散気泡モデルのような今回のモデルに合致した数理モデルが存在しなかったため、クラウジウス-クラペイロンの式に基いた相変化モデルの式と、別のヒートパイプの力学モデルで用いられる熱授受モデルを採用して 1D 解析全体を構築していた。これらのモデルの検証結果で妥当な結果が得られず、この点で改良が必要であったことが明らかになった。また本モデルでは相変化で生じた体積変化は考慮するものの、基本的に流体を非圧縮性近似した点も、内部の圧力変化から生じる駆動力再現に対して適切な動作を示さなかったように見受けられた。これらの点については先行研究の優位性が明らかとなったため、それらを導入することでモデルの妥当性と革新性を向上させることは可能と考えられた。これについては国内学会で 1 件、基礎的なモデルの構築を終えたことの報告を行った。

CFD 解析を応用したモデル化へのフィードバックについては、レベルセット法を応用した体積保存性が良好な気液二相流解析を応用し、熱授受を考慮しない一定速度の体積変化に

基いた相変化模擬解析を実施して、力学的な流れに対する作用を検討した。ヒートパイプ内部に抵抗体を設けた際に流れに生じる変化などを、埋め込み境界法を応用することで再現して、実際の状況に近い形状を再現して解析結果を図1のように示したことは一定の成果であった。だがその一方で、熱授受を考慮することで、さらに正確な物理現象を把握する必要があることがより明確になった。具体的には、気泡の成長が流れ中の圧力変化と連成することで非常に急激な圧力変化を引き起こす可能性があり、現在の非圧縮性近似下でそのような現象が生じるかについての検討が必要とわかった。この点は1D解析モデルと同様の課題である。これについては国内学会で1件、現状と課題について報告を行った。

1DモデルとCFD解析の両者についての共通の課題点が、熱授受と相変化の高精度化と、圧縮性流体の影響による急激な内圧の変化を捉えることと浮き彫りになった。1Dモデルの方は詳細な物理現象をモデル化するため、論文化までには今しばらくの検証が必要であると考えられるが、CFDの方は熱授受と相変化をモデル化した段階で、実際のヒートパイプ内部の流動が捉えることが出来れば論文化は可能であると考えており、現在もそれに向けて歩を進めている。

4. まとめと今後の課題

本研究では、1D解析、CFDにより多角的に自励振動ヒートパイプに関して研究を行うことで、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、学术论文への投稿を狙った。結果として、1D解析の検証解析による気泡挙動の妥当性の確認と、図1に示すCFDを応用した相変化模擬解析を達成した。今後は1DモデルとCFD解析の両者についての共通の課題点として見つかった、熱授受と相変化の高精度化と、圧縮性流体の影響による急激な内圧の変化を捉えることに注力する。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] K. Takemura, S. Nara, S. Takahashi and H. Nagai and T. Adachi: Development of Prediction Model for Heat Pipe Performance Using One Dimensional Discrete Bubble Model, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-55, pp. 97-98.

[2] 高橋俊, 奈良祥太郎, 長島弘明, 竹村薫, 安達拓矢, 永井大樹, 岡崎峻, 福家英之: ヒートパイプの流動予測に向けた気泡モデルの開発, 第57回日本伝熱シンポジウム, (2020).

[3] 奈良祥太郎, 本木誠人, 川本裕樹, 竹村薫, 高橋俊, 河内明子, 岡崎峻, 福家英之: 埋め込み境界法を用いたヒートパイプ管内における気液流動メカニズムの調査, 第34回数値流体力学シンポジウム, (2020).

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

課題番号	J20L106
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目（発展）

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, **東北大学流体科学研究所

***愛知工業大学工学部

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

感圧塗料（Pressure-Sensitive Paint; PSP）計測法に着目し、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と共に計測対象の変形の定量計測を実現することを目指す。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。この励起光には、一般に空間的に均一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上記目的を達成する。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 に照明する。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。

2. 研究成果の内容

2.1 衝突噴流実験

外乱光除去計測の実証実験として、図 1 のように外乱光下での PSP 計測を実施した。ここでは、PSP を塗布した平板上に空気噴流を衝突した際に生じる圧力分布を計測した。このような実験系において、従来の PSP 計測手法によって計測した結果を図 2 に示す。図 2 から明らかのように、従来の PSP 計測法では外乱光の影響が大きな計測誤差となっていることが分かる。次に、構造化光として 3 種類の明暗パターンを照明し、これらの照明下において得られた PSP データから外乱光を除去した圧力データを再構成した。図 3 に結果を示す。また噴流中心部の流れ方向の PSP 計測データと圧力孔を通じて半導体圧力センサで計測した圧力の比較を図 4 に示す。以上から、提案手法によって外乱光の影響を除去し、圧力が計測できることが実証された。これらの成果は[2]において発表した。

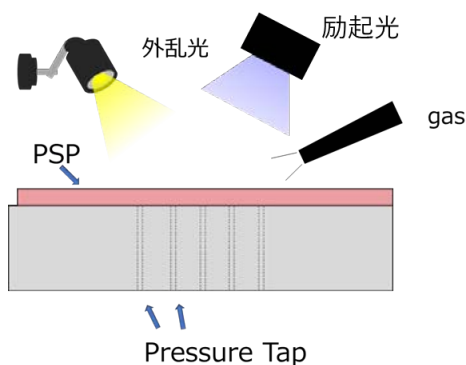


図 1 : 実験装置概要

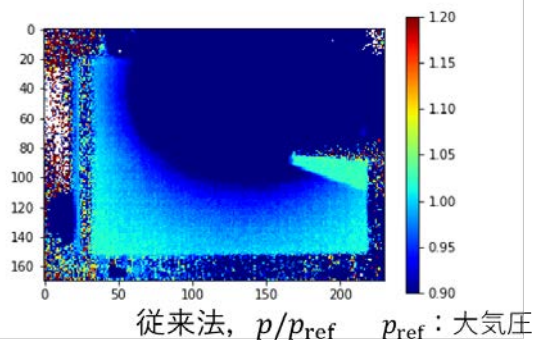
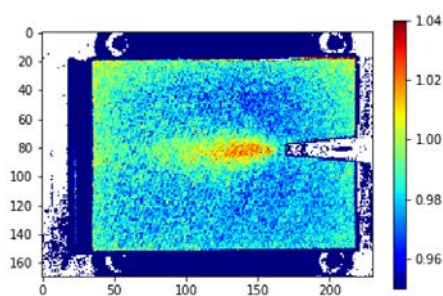


図 2 : 外乱光下 PSP 計測 (従来法)



提案手法, p/p_{ref} p_{ref} : 大気圧

図 3 : 外乱光下 PSP 計測 (提案手法)

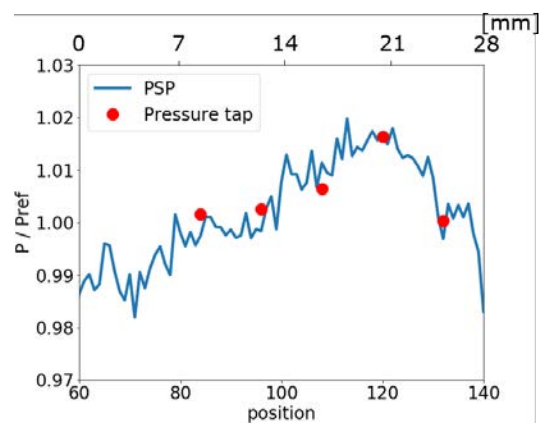


図 4 : 圧力孔データとの比較

2.2 風洞実験

2.1 において構築した計測法を風洞試験において実証する前に、本年度では昨年度までに開発した Ru ベースの色素分子によって作成した PSP を用いた非定常 PSP 計測を実施した。具体的には角柱後流に生じるカルマン渦の計測を実施した。この結果、新たに開発した Ru ベースの PSP によってカルマン渦場の壁面圧力の微小圧力変化を高精度に計測できることを実証した。これらの成果は[1], [3]~[7]において発表した。

3. 研究目標の達成状況

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。そこで PSP 計測は、PSP の励起光源と PSP 発光以外に光を発するものが何もない暗室内で行い、カメラレンズに光学フィルタを取り付け PSP の励起光を遮断して計測を行う。しかし、実際の風洞試験においては、暗室にするのが難しい場面が多くある。また、実機などを用いた室外での実験では、街明かりや実験設備の影響を受ける。そこで、外乱光の影響を抑制する手法の開発を目指した。本研究では、卓上実験において提案手法の有効性を示すことができた。

4. まとめと今後の課題

本研究では、昨年度までに開発した PSP によって微小圧力変化を高精度に計測できることを示した。また構造化光を用いることで、外乱光下においてもその影響を抑制して圧力分布計測が実施できることを確認した。次年度以降は、同技術の風洞試験での有効性の実証を目指した研究を推進する。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

*[1] Y. Egami, A. Hasegawa, Y. Matsuda, T. Ikami, H. Nagai: Ruthenium-based fast-responding pressure-sensitive paint for measuring small pressure fluctuation in low-speed flow field, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 32, No. 2 (2021), 024003 (12 pages). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abb916>

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] S. Katayama, Y. Matsuda, Y. Egami, T. Ikami, H. Nagai: Development of PSP Measurement Technique using Structured Illumination, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-59, pp. 104-105.

[3] 江上泰広, 長谷川敦也, 松田佑, 伊神翼, 永井大樹: ルテニウム型高速応答感圧塗料を用いた低速流れ場の微小圧力変動計測, 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2020, オンライン, (2020), 1B08.

[4] 森重聡一郎, 山崎遊野, 松田佑, 伊神翼, 永井大樹, 江上泰広: 非定常 PSP 計測における固有直交分解と動的モード分解のノイズ除去効果, 第 48 回可視化情報シンポジウム, Online, (2020), 009.

[5] 伊神翼, 藤田昂志, 永井大樹, 松田佑, 山崎遊野, 江上泰広: 非定常 PSP 計測における動的モード分解のデータ取得条件の調査, 第 48 回可視化情報シンポジウム, Online, (2020), 037.

[6] 片山哲, 松田祐, 江上泰広, 伊神翼, 永井大樹: 構造化照明を用いた感圧塗料計測実験の提案, 第 16 回学際領域における分子イメージングフォーラム, Online, (2020), P7.

[7] 伊神翼, 藤田昂志, 永井大樹, 松田佑, 江上泰広: 非定常 PSP 計測でのデータ取得条件が動的モード分解に与える影響の調査, 第 16 回学際領域における分子イメージングフォーラム, Online, (2020), P16.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許） なし

（受賞）

第 48 回可視化情報シンポジウム・ベストプレゼンテーション賞, 非定常 PSP 計測における動的モード分解のデータ取得条件の調査, 伊神翼（東北大）, 2020 年 9 月 26 日.

（マスコミ発表） なし

課題番号	J20L108
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	2020.4～2021.3
継続年数	1年目

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

本研究では分子動力学法を用いて二次元の微細流路内を運動する液滴内部の剪断応力分布を計算し、気液界面に相当する部分の応力を用いて接触線近傍に働く摩擦力を評価した。液滴が固体壁面によって剪断され、内部に Couette 流が生じている状態と液滴が一定の速度で運動し内部に Poiseuille 流が生じている状態の 2 つを考えた。流路幅と固体-液体間の相互作用パラメータを変化させ接触角及び液体-固体間の滑り長さを変化させた。

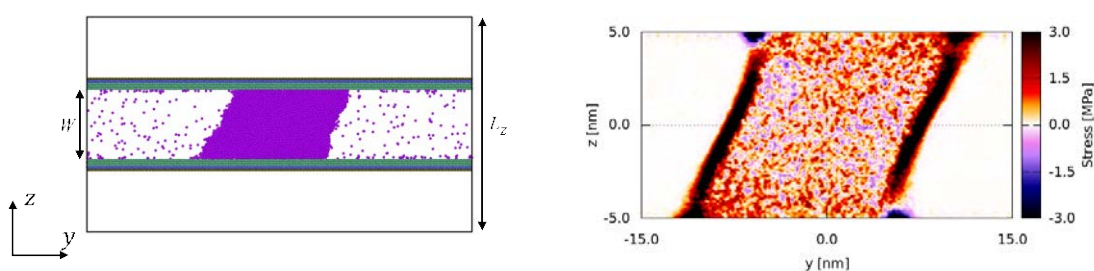
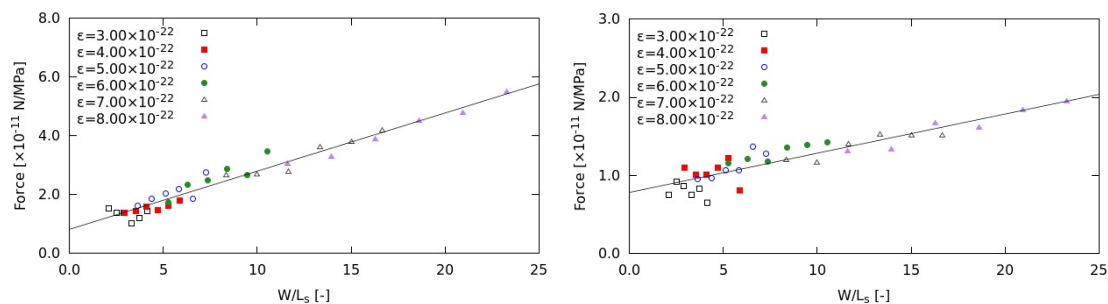


図 1: 計算系のスナップショット及び液体内部に生じている剪断応力分布

図 1 に計算系と剪断応力分布を示す。中心の分子は液体分子で本研究では Ar 原子を用いている。その他は固体壁面原子を表す。気液界面近傍における剪断応力が Bulk 部分の剪断応力と比較して大きくなっている事がわかる。この剪断応力が大きくなっている部分を積分し、接触線近傍に働く摩擦力を評価した。図 2 に各流路幅及び相互作用パラメータにおける接触線近傍の摩擦力を表す。摩擦力は前進接触角及び後退接触角近傍に働く摩擦力の和であり、中心領域に生じている剪断応力で除して規格化した。また、流路幅は滑り長さで除して規格化した。



(a) 液滴を切断した場合

(b) 液滴が等速で運動する場合

図 2：接触線近傍に働く剪断応力の流路幅依存性

規格化された摩擦力は流路幅を滑り長さで除したパラメータに対して線形に増加しているのがわかる。Bulk に働く剪断応力は流路幅を滑り長さで除したパラメータの逆数に比例する事から、流路幅が滑り長さに対して十分に大きな状態になれば流路幅に依存しない事がわかる。

3. 研究目標の達成状況

本研究では、接触線領域の輸送特性を解析するための数値モデルを作成することが目標である。輸送特性に大きな影響を与える摩擦力のモデル化ができた為、目標は達成できたと言える。また、流路幅が滑り長さと同程度の nm 程度の場合接触線に働く剪断応力は流路幅に依存するが、流路幅が滑り十分に大きい場合は流路幅に依存しない可能性があることがわかった。

4. まとめと今後の課題

本研究では、分子動力学シミュレーションを用いて接触線近傍に働く摩擦力を解析し流路幅依存性を評価し、モデル化を行った。現在、本研究の内容を用いて論文を執筆している、今後は、液体の種類を変更するなどして今回作成した数値モデルの比例係数が何によって決まっているのかを明らかにする。

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Akinori Fukushima, Takashi Tokumasu: Modeling of the Contact Line and Contact Angle Dynamics based on the Molecular Dynamics Simulation, *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2020), CRF-88, pp. 153-154.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

索引

- | | | | |
|------------|--|--------|--|
| 足立 高弘 | 114, 300 | 高奈 秀匡 | 11, 49, 136, 147, 176, 207, 220, 274, 277, 341 |
| 阿部 圭晃 | 260 | 高橋 公也 | 171 |
| 安西 眸 | 16 | 高橋 俊 | 67, 348 |
| 伊賀 由佳 | 225, 343 | 竹内 希 | 147 |
| 池田 (向井) 有理 | 127 | 武内 秀樹 | 36 |
| 石出 忠輝 | 233 | 立川 正憲 | 191 |
| 石本 淳 | 238, 291, 293, 337 | 田中 学 | 86 |
| 石本 志高 | 341 | 丹澤 祥晃 | 238 |
| 伊藤 高敏 | 204 | 千葉 一永 | 187 |
| 鶴飼 孝博 | 178 | 塚田 隆夫 | 168 |
| 内田 諭 | 161 | 津田 伸一 | 331 |
| 内一 哲哉 | 51, 271, 295 | 寺島 修 | 194 |
| 越中谷 賢治 | 317 | 寺島 洋史 | 97 |
| 太田 信 | 86, 99, 127, 228, 245, 317 | 徳増 崇 | 36, 140, 181, 305, 312, 331, 354 |
| 太田 匡則 | 55 | 都甲 将 | 319 |
| 大谷 清伸 | 57, 72, 84, 116, 159, 178, 189, 202, 236 | 鳥井 亮 | 138 |
| 岡島 淳之介 | 29, 74, 111, 114, 142, 252 | 永井 大樹 | 21, 55, 59, 76, 216, 309, 314, 348, 351 |
| 岡部 孝裕 | 142 | 中川 敦寛 | 236 |
| 大林 茂 | 33, 67, 79, 124, 174, 187, 223, 233, 322 | 仲田 典弘 | 134 |
| 門脇 敏 | 105 | 中谷 達行 | 307 |
| 金崎 雅博 | 216 | 中村 寿 | 47, 97, 155 |
| 金澤 誠司 | 40 | 中山 雄行 | 345 |
| 金子 智 | 140 | 中山 昇 | 328 |
| 姜 東赫 | 343 | 沼田 大樹 | 57 |
| 菊川 豪太 | 339 | 長谷川 裕晃 | 79 |
| 北川 一敬 | 189 | 服部 裕司 | 64, 70, 129, 171, 345 |
| 北村 拓也 | 240 | 早川 晃弘 | 19 |
| 鯉淵 弘資 | 295 | 早瀬 敏幸 | 152 |
| 古川 琢磨 | 74 | 平田 勝哉 | 337 |
| 後藤 実 | 107 | 福井 智宏 | 122 |
| 小西 康郁 | 194 | 福島 啓悟 | 354 |
| 江目 宏樹 | 111 | 福山 敦彦 | 82 |
| 小林 秀昭 | 105, 286 | 藤野 貴康 | 136 |
| 小林 宏充 | 176 | 船本 健一 | 102, 122, 138, 191, 269 |
| 小宮 敦樹 | 62, 168, 200, 209, 298, 300 | 古川 怜 | 220 |
| 酒井 武治 | 72 | 古館 美智子 | 76 |
| 酒井 康彦 | 152 | 堀 琢磨 | 339 |
| 坂上 博隆 | 309 | 槇原 幹十朗 | 202 |
| 佐々木 大輔 | 335 | 松下 洋介 | 62 |
| 佐藤 岳彦 | 38, 40, 161, 163, 165, 267, 307, 333 | 松田 佑 | 351 |
| 寒川 誠二 | 82, 131 | 丸田 薫 | 250 |
| 下山 幸治 | 23, 42, 44, 240, 335 | 三木 寛之 | 25, 107, 279, 328 |
| 白谷 正治 | 319 | 三坂 孝志 | 59 |
| 鈴木 杏奈 | 53, 89, 213, 326 | 水書 稔治 | 84 |

宮内 優	109
椋平 祐輔	134, 149
森澤 征一郎	322
焼野 藍子	145
矢野 猛	267
山下 博	174
山田 剛治	116
吉木 宏之	333
米澤 宏一	314
米村 茂	120, 303
若嶋 振一郎	181
渡部 正夫	267

Adamovich, Igor V.	49	Rahman, Asadur	293
Ahn, Jeongmin	47, 250, 305	Raisee, Mehrdad	23
Anggono, Willyanto	19	Rieu, Jean-Paul	269
Bernard, Chrystelle	274	Rodjali, Nasruddin Yusuf	312
Bondar, Yevgeniy	120	Rubinstein, Justin	149
Britcher, Colin P.	124	Saqr, Khalid M.	95
Chen, Zhenmao	51	Saveliev, Vladimir	303
Cheng, Yun-Chien	165	Sescu, Adrian	64
Choi, Sooseok	11	Smith, Stefan Llewellyn	129
Dalmas, Florent	277	Song, Xiaorui	228
Dats, Evgeniy	29	Torres, Juan F.	209
Delbende, Ivan	70	Tupin, Simon	93, 95
Dichiara, Anthony B.	207	Ventikos, Yiannis	109
Dzieminska, Edyta	223	Vermeire, Brian C.	260
Elguedj, Thomas	291	Vincent, Peter E.	260
Escudie, Dany	286	Williamson, Nicholas	200
Farhat, Mohamed	38	Witherden, Freddie D.	260
Fursenko, Roman	252	Wu, Jong-Shinn	163
Gubernov, Vladimir	252	Zuhal, Lavi Rizki	44
Horne, Roland N.	326		
Kadivar, Ebrahim	225		
Khovaylo, Vladimir	25		
Lai, Chenguang	33		
Lallart, Mickaël	279		
Lee, Bok Jik	21		
Li, Yiming	131		
Liem, Rhea P.	42		
Livi, Sébastien	298		
Ma, Xiaodong	204		
Maes, Julien	89		
Mary, Nicolas	271		
Mathieu, Olivier	155		
Mazeau, Karim	93		
Milcarek, Ryan	250		
Minaev, Sergey	252		
Minto, James	213		
Mokrin, Sergey	252		
Nicholson, Ruanui	53		
Nugroho, Bagus	145		
Ogawa, Hideaki	159		
Osman, Kahar	99		
Poiré, Eugenia Corvera	102		
Putra, Narendra Kurnia	16		
Qiao, Aike	245		

東北大学流体科学研究所
令和2年度共同利用・共同研究拠点「流体科学国際研究教育拠点」
活動報告書

令和3年2月発行

編集・発行：東北大学流体科学研究所 所長 丸田 薫

〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目1番1号
電話：022-217-5302（総務係） FAX：022(217) 5311

E-mail：ifs-kyodo@grp.tohoku.ac.jp
URL：http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/koubo/index.html

印刷：株式会社センキョウ

