

# 平成 30 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 2018 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協力して行う公募共同研究を実施している。本公募 共同研究では、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。

本報告書は平成 30 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、114 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を育成するよう 努めて参る所存である。今後ともご支援ご鞭撻をお願い申し上げると共に、本報告書につ いて、忌憚のないご意見を頂ければ幸甚である。

令和元年10月

東北大学流体科学研究所長 大林 茂

1. 平成 30	) 年度流体科学国際研究教育拠点活動のまとめ
1.1 材	既要
1.2	公募共同研究成果報告会
1.3	流体科学データベース
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
1.5	公募共同研究実施状況
1.6	研究成果の発表件数
1.7	平成 21 年度から平成 27 年度までの活動成果
2. 研究成	果報告書
<平成	30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>
J18I00	1 光駆動型マイクロ・ナノ流体デバイスの開発
	山田 昇(長岡技術科学大学)、小宮 敦樹(東北大学)
J18I002	2 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
	槙原 幹十朗 (東北大学)、大谷 清伸 (東北大学)
J18I003	3 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
	門脇 敏(長岡技術科学大学)、小林秀昭(東北大学)
J18I004	4 高賦形性プリプレグにより成形した炭素繊維強化複合材部材の非破壊評価
	水上 孝一 (愛媛大学)、小助川 博之 (東北大学)
J18I006	6 低温度感度高速応答 PSP の低速流れへの適用とその評価
	江上 泰広 (愛知工業大学)、永井 大樹 (東北大学)
J18I007	7 非真空プラズマ噴流による複雑形状材料への化学活性種輸送の調査
	市來 龍大 (大分大学)、岡田 健 (東北大学)
J18I008	3 ノッキング自着火・圧力波発生過程における負の温度係数領域の影響
	寺島 洋史(北海道大学)、中村 寿(東北大学)
J18I009	3 流体・構造・制御の異分野融合による展開翼モデリング法の確立
	槙原 幹十朗 (東北大学)、永井 大樹 (東北大学)
J18I01	1 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
	吉木 宏之 (鶴岡工業高等専門学校)、佐藤 岳彦 (東北大学)
J18I012	2 エッジトーンの音響流体解析
	高橋 公也(九州工業大学)、服部 裕司(東北大学)
J18I013	3 非侵襲熱伝導率計測時の皮膚悪性腫瘍の生体伝熱特性の解明
	岡部 孝裕 (弘前大学)、岡島 淳之介 (東北大学)
J18I015	5 高繰返しレーザーパルスを用いた超音速流体制御の数値解析
	岩川 輝(名古屋大学)、大林 茂(東北大学)
J18I016	5 量子ナノディスクのバンド構造制御とデバイス応用
	福山 敦彦(宮崎大学)、寒川 誠二(東北大学)
J18I019	9 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
	中山 昇(信州大学)、高木 敏行(東北大学)
J18I020	) Me-DLC ナノ構造によ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
	後藤 実(宇部工業高等専門学校)、高木 敏行(東北大学)
J18I02	1 氾濫流・津波の伝播解析における不確実性影響の高精度評価技術の確立
	山崎 涉(長岡技術科学大学)、下山 幸治(東北大学)

J18I022	実験的・数値的解析によるマルチコプタの飛行性能向上に関する研究
J18I026	Research on Surface Modification of OLED Materials via Neutral Beam Technology
J18I027	Application of Nanostructure Surfaces to Enhance the Thermal Performance of Heat Pipe
J18I028	Mixture of Experts in Bayesian Optimization for Complex Aerospace Designs
J18I029	Discharge Phenomenon in Laser-Induced Bubble and Formation Mechanism of Microjet by Cavitation Bubble 51 佐藤 兵彦 (東北大学) Mohamed Farbat (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPEL))
J18I030	Thermodynamic Property Gradients in Near-Surface Water Thin Film and its Impact on Liquid Flow in Microlayer
	Shalabh C. Maroo (Syracuse University)、徳増 崇 (東北大学)
J18I031	Multipoint Wind Turbine Blade Optimization by Utilizing Gradient Information for
	Maximum Power Coefficient 55
1101022	Lavi Rizki Zuhal (Bandung Institute of Technology)、下田 辛冶 (東北大字) 言次府水表安今等理に開えて連己敏振
J101032	同省度小系女王自理に因9 る連成時初 石本 淳(東北大学) Alain Combescure (INSA de Lyon)
J18I034	Estimation of Fracture Permeability by Integrating Microseismic Observational Data and
-	Reservoir Engineering Modeling
	椋平 祐輔 (東北大学)、Justin Rubinstein (United States Geological Survey)
J18I035	分子散乱現象を考慮した固体高分子形燃料電池触媒層酸素輸送抵抗の解析
	徳増 崇(東北大学)、杵淵 郁也(東京大学)
J18I036	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
	池田(向井)有理(明治大学)、太田 信(東北大学)
J18I037	脳型記憶集積システムと積層型アナログメモリ素子の研究
	森江 隆 (九州工業大学)、寒川 誠二 (東北大学)
J18I038	空力・構造・空力加熱を考慮した二段式再使用宇宙輸送機ブースタステージの最適形状設計 67 千葉 一永 (電気通信大学)、大林 茂 (東北大学)
J18I040	Interferometric Measurement of Temperature Fields in Turbulent Flows
	Juan Felipe Torres (Australian National University)、小宮 敦樹 (東北大学)
J18I041	Analysis of Transport Phenomena of Oxygen Ion in Dual-Phase Electrolyte Material
J18I042	Investigation of Centreline Shock Reflection and Viscous Effects in Axisymmetric Supersonic Flow 73 Hideaki Ogawa (RMIT University)、大谷 清伸 (東北大学)
J18I044	ナノスケール固液複合系の熱伝導メカニズム
J18I045	衝撃波照射による生体組織の機械的特性の推定
	橋本 時忠 (佐賀大学)、大谷 清伸 (東北大学)
J18I046	繊維強化複合材料の高度保全技術に関わる研究会
	高木 敏行 (東北大学)、伊藤 浩志 (山形大学)
J18I047	Solid Oxide Fuel Cells Replacement of a Traditional Catalytic Converter
	Jeongmin Ahn (Syracuse University)、中村 寿 (東北大学)

J18I048	Retrospective Study of Intracranial Aneurysms Treated with Flow-Diverting Stent:
	The Correlation between Haemodynamic Alterations and Treatment Outcomes
	太田 信 (東北大学)、Itsu Sen (Macquarie University)
J18I050	Evaluation of Thermal Flow Field in Closed Cavity under Temporally Variable Thermal Condition 85
	小宮 敦樹 (東北大学)、Nicholas Williamson (The University of Sydney)
J18I053	Study on Fracture Behaviour of Single Natural Fiber
	Zahrul Fuadi (Syiah Kuala Univeristy)、高木 敏行 (東北大学)
J18I054	Microcombustion for Clean and Efficient Syngas Formation and Fuel Cell Applications
	Jeongmin Ahn (Syracuse University)、丸田   薫(東北大学)
J18I055	Modelling Materials Behavior for Advanced Electromagnetic Non Destructive Testing Techniques 91
	Gael Sebald (ELyTMaX, CNRS – Univ. Lyon, Tohoku Univ.)、内一 哲哉 (東北大学)
J18I056	Mathematical Modeling and Simulations of Soft-Elastic Materials under Large Strain
	Jean-Yves Cavaille (ELyTMaX)、高木 敏行 (東北大学)
J18I057	Combustion Characteristics of Biogas at Various Pressures
	Willyanto Anggono (Petra Christian University)、早川 晃弘 (東北大学)
J18I058	Magnetic and Electric Properties of Diamond Like Carbon-Magnetic Metal Nano-Composite Films $\cdots 97$
	小助川 博之 (東北大学)、Zhang Yiwen (Tianjin University)
J18I059	Nanostructured Heusler Alloys and Related Compounds Prepared by Mechanical Alloying and
	Plasma Electrolytic Methods for Energy Saving Thermoelectric Power Generation and
	Protective Coatings 99
	Vladimir Khovaylo (National University of Science and Technology "MISiS")、高木 敏行 (東北大学)
J18I061	Evaluation of the Fluid Dynamical Effects on In-Flight Polymeric Particle Behavior during Cold-Spray $\cdots$ 101
	Chrystelle Bernard (Tohoku University)、高奈 秀匡 (東北大学)
J18I062	Kinetic Modeling of High-Pressure Surface Ionization Waves Generated by Ns Pulse Discharges 103
	高奈 秀匡 (東北大学)、Igor Adamovich (The Ohio State University)
J18I065	数値シミュレーションによる表面修飾ナノ粒子サスペンションの流動特性の解明に関する研究 105
	塚田 隆夫(東北大学)、小宮 敦樹(東北大学)
J18I066	電磁超音波による配管内の腐食の定量化
	中本 裕之 (神戸大学)、高木 敏行 (東北大学)
J18I067	ナノ粒子を母材に分散させた炭素繊維強化プラスチックの機能性向上に関する研究 109
	高山 哲生 (山形大学)、小助川 博之 (東北大学)
J18I068	水中ストリーマの開始・進展機構 111
	佐藤 岳彦(東北大学)、金澤 誠司(大分大学)
J18I070	キャビテーション不安定現象の遷移メカニズムの解明
	姜 東赫(青山学院大学)、伊賀 由佳(東北大学)
J18I071	火星探査航空機高高度試験機の動特性に関する数値的研究
	金崎 雅博(首都大学東京)、永井 大樹(東北大学)
J18I072	飛翔体物理の解明を目指した分子イメージング計測技術の開発
	沿田 大樹(東海大学)、大谷 清伊(東北大学)
J18I075	極超音速機周りで生じる高エンタルビー流れの特性解明
1101050	山田剛治(泉海大字)、大谷清仲(泉北大字)
J181078	乱流・非乱流共存流動場における流動構造とエネルキ・入力フ輸送機構
1101001	間井 康彦 (石白座天子)、早潮 戦辛 (東北天子) 指述 形式の 2000年1月1日 - 12-14日 - 12-14-14-14-14-14-14-14-14-14-14-14-14-14-
J181081	復和形状の空隙保体による水甲爆発気境の減衰効果
	北川 一 奴 ( 変 刈 上 美 入 子 )、 入 合

J18I082	バドミントンシャトルコックの非定常空力特性	125
	長谷川 裕晃(宇都宮大学)、永井 大樹(東北大学)	
J18I083	流体現象解明によるスポーツ分野への適用	127
	長谷川 裕晃 (宇都宮大学)、大林 茂 (東北大学)	
J18I084	スプレイノズルから噴射される過熱水の微粒化特性に関する研究	129
	渡邉 力夫(東京都市大学)、小林 秀昭(東北大学)	
J18I085	Investigation of a Time Response of cntTSP Sensor for a Dynamic Visualization of the	
	Laminar-to-Turbulent Boundary Layer Transition	131
	依田 大輔(German Aerospace Center - DLR)、永井 大樹(東北大学)	
J18I086	Development of Conservative Kinetic Force Method near Equilibrium	133
	Vladimir Saveliev (National Center of Space Researches and Technologies)、米村 茂 (東北大学)	
J18I089	Development of Aerodynamic and Propulsion System for High Performance Mars Exploration Aircraft $\cdots$	135
	Shinkyu Jeong (Kyunghee University)、永井 大樹 (東北大学)	
J18I090	Individual Effects of Plasma-Generated Electrical Field, Short-Life Species, and Long-Life	
	Species on Cell	137
	Yun-Chien Cheng (National Chiao Tung University)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J18I091	Characterization of Fatigue Damage using Electromagnetic NDT Methods	139
	Zhenmao Chen(Xi'an Jiaotong University)、高木 敏行(東北大学)	
J18I092	The Study on the Mechanism of Coupling Wall-Effect on Multidirectional Wings Based on	
	Multi-Objective Optimization	141
	Chenguang Lai(Chongqing University of Technology)、大林 茂(東北大学)	
J18I093	Investigation of Nanoparticle Additives in Bio-Lubricants Using Molecular Dynamic Simulation	143
	徳増 崇 (東北大学)、Nasruddin (Universitas Indonesia)	
J18I094	NBE-Treated Triboelctric Energy Harvesters	145
	Dukhyun Choi (Kyung Hee University)、寒川 誠二 (東北大学)	
J18I099	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	147
	高奈 秀匡 (東北大学)、藤野 貴康 (筑波大学)	
J18I101	Surface Pressure Measurement over Free Flight Object in Ballistic Range Facility using	
	Motion-Capturing Pressure-Sensitive Paint Method ·····	149
	坂上 博隆(University of Notre Dame)、永井 大樹(東北大学)	
J18I102	火星へリの実現を目指した同軸反転ローターの研究開発	151
	永井 大樹 (東北大学)、米澤 宏一 (電力中央研究所)	
J18I103	$Stability \ and \ Nonlinear \ Dynamics \ of \ Stably \ Stratified \ Vortices \ with \ Hyperbolic \ Stagnation \ Points \cdots \cdots$	153
	服部 裕司(東北大学)、Manish Khandelwal(Indira Gandhi National Tribal University)	
J18I104	The Development and Applications of Pressure-Sensitive Paint on the Investigations of	
	Gases Mixing in T-type Micromixers	155
	Chih-Yung Huang (National Tsing Hua University)、永井 大樹 (東北大学)	
J18I105	Electronic Structure of Semiconductor Nanostructure Array for Thermoelectric Applications	157
	Yiming Li(National Chiao-Tung University)、寒川 誠二(東北大学)	
J18I108	Effect of Wall Elasticity on Reduction of Wall Shear Stress in a Patient-Specific Aneurysm Model in	
	Middle Cerebral Artery	159
	田中 学(千葉大学)、太田 信(東北大学)	
J18I109	人工改変タンパク質バイオテンプレートによる大面積2次元高密度および	
	分散型ナノ粒子エッチングマスク作製の理論解析	161
	山下 一郎 (大阪大学)、寒川 誠二 (東北大学)	

J18I110 第一原理的手法を用いた酸水素混合系の熱輸送物性推算	163
<平成 30 年度审业大学流休科学研究所萌芽小葛井同研究採択課題>	
J18H001 流体問題における各種データ同化手法の比較検討	165
J18H002 バイオミティクスを応用した翼端デバイスの空力設計とその流れ場の特徴抽出 森澤 征一郎 (鳥取大学)、大林 茂 (東北大学)	167
J18H003 羽ばたき翼におけるコーティング材を用いた空力抵抗軽減	169
<平成 30 年度東北大学流体科学研究所国際連携公募共同研究採択課題>	
J18R001 Link between Tracer and Microseismic Analysis to Comprehensive Understanding of Hydraulic Feature of Fractured Geothermal Reservoir	171
鈴木 杏奈 (東北大学)、Roland N. Horne (Stanford University)、Michael Fehler (MIT)、 Takuya Ishibashi (AIST)、Peter Kang (University of Minnesota)	
J18R002 分子設計から実機を最適化するマルチスケール力学モデリングのための日米仏連携 大林 茂(東北大学)、Fumio Ohuchi (University of Washington)、	179
Anthony Waas (University of Washington), Christine K. Luscombe (University of Washington) J18R003 Micro Channel Burners for Energy Production on the Basis of Micro Combustion	183
Sergey Minaev (Far-Eastern Federal University)、丸田 薫(東北大学)、 Fursenko Roman (ITAM SB RAS)、Gubernov Vladimir (Lebedev Physical Institute RAS)、 Kirdvashkin Alexander (TSC)	
J18R004 Instability and Nonlinear Dynamics of Curved Vortices	191
Stefan Llewellyn Smith (UCSD)、Ivan Delbende (LIMSI)、Maurce Rossi (Université de Paris VI 福本 康秀 (九州大学)	)、
J18R005 配管減肉のモニタリングと予測に基づく配管システムのリスク管理	201
Pierre Calmon (CEA) J18R006 Modeling of Mixing of Plasma Species in Atmospheric-Pressure Argon–Steam Arc Discharge … Jiri Jenista (Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i.)、高奈 秀匡(東北大学)、 Murphy B. Anthony (CSIRO Materials Science and Engineering)	209
<平成 30 年度東北大学流体科学研究所重点公募共同研究採択課題>	
J18J001 Multiscale Flow and Interfacial Transport Phenomena at Phase and Material Boundaries 小原 拓 (東北大学)、Kwak Dongyoun (JAXA)、Hirotaka Sakaue (University of Notre Dame)、 和田 浩史 (立命館大学)、橋本 光男 (東北大学)、飯島 高志 (産業技術総合研究所)、	213
Alain Combescure (INSA de Lyon)、Lalita Udpa (Michigan State University)、Bernd Valeske (I J18J002 カーボンフリーエネルギーキャリア利用における科学と技術	ZFP) 215

<平成 3	0 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>	
J18L005	プラズマ-生体界面における活性種挙動の大規模数値解析	223
	内田 諭(首都大学東京)、佐藤 岳彦(東北大学)	
J18L010	プラズマ入射束制御技術を用いた酸化・窒化による機能性材料の形成	225
	竹中 弘祐 (大阪大学)、岡田 健 (東北大学)	
J18L014	爆風脳損傷の予防	227
	中川 敦寛 (東北大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J18L017	歪み速度テンソルの固有ベクトルを用いた乱流構造解析の応用	229
	石原 卓(岡山大学)、服部 裕司(東北大学)	
J18L018	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	231
	金子 智 (神奈川県立産業技術総合研究所)、徳増 崇 (東北大学)	
J18L023	混相流中における移動物体周りの流れの数値予測	233
	高橋 俊(東海大学)、大林 茂(東北大学)	
J18L024	自励振動ヒートパイプの設計高精度化に向けた気液二相流の熱流体解析の応用	235
	高橋 俊(東海大学)、永井 大樹(東北大学)	
J18L025	微小循環系における血球挙動の数値解析ならびに実験観察	237
	福井 智宏 (京都工芸繊維大学)、早瀬 敏幸 (東北大学)	
J18L033	ナノマイクロ粒子コーティングによるふく射伝播制御	239
	江目 宏樹 (山形大学)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J18L039	固体燃料の排出ガス生成機構の解明	241
	大上 泰寛 (秋田県立大学)、中村 寿 (東北大学)	
J18L049	Numerical Study on Gas Lubrication System Using Micro/Nanoscale Dimples	243
	米村 茂 (東北大学)、Yevgeniy Bondar (ITAM, SBRAS)	
J18L051	ナノ構造機能材料を用いた多機能ナノデバイス作成とその応用に関する研究	245
	高橋 庸夫 (北海道大学)、寒川 誠二 (東北大学)	
J18L052	Application of a Data Assimilation Methodology to a Numerical Simulation of Pedestrian Flow	247
	Fumiya Togashi (Applied Simulations Inc.)、大林 茂 (東北大学)	
J18L063	Application of Data Assimilation to Aviation Safety System	249
	Shinkyu Jeong (Kyunghee University)、大林 茂 (東北大学)	
J18L064	赤外線カメラによる高精度温度測定手法の確立	251
	古川 琢磨 (八戸工業高等専門学校)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J18L069	水中プラズマによる微細気泡の生成・安定化機構	253
	佐藤 岳彦 (東北大学)、中谷 達行 (岡山理科大学)	
J18L074	Upper Surface Blowing を利用した VS-TOL 機の提案とその空力特性	255
	川添 博光 (鳥取大学)、大林 茂 (東北大学)	
J18L076	MHD 攪拌を活用した水素生成プロセスの高度化	257
	岩本 悠宏(名古屋工業大学)、高奈 秀匡(東北大学)	
J18L077	飛翔体周りの非定常流れ場に対する密度計測	259
	太田 匡則 (千葉大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J18L087	Mathematical Modelling of Nanoparticles Production in Thermal Plasmas	261
	Pierre Proulx (Université de Sherbrooke)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J18L088	Aeroacoustics of Low Reynolds Number Flows Via Dynamic Hybrid RANS/LES and	
	Stochastic Noise Generation and Radiation	263
	Adrian Sescu(Mississippi State University)、服部 裕司(東北大学)	
J18L095	Molecular Dynamics Simulation of Droplet Shearing	265
	福島 啓悟 (福井大学)、徳増 崇 (東北大学)	

J18L098	離脱衝撃波脈動を利用した超音速飛行体の姿勢制御	267
	水書 稔治 (東海大学)、大林 茂 (東北大学)	
J18L100	水面への単発パルス放電後の水中電荷移動の数値解析	269
	上野 和之 (岩手大学)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J18L106	回転円すいを用いた遠心力場における高粘度液体の揚水遷移	271
	足立 高弘 (秋田大学)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J18L107	殺菌用大気圧低温プラズマ照射による水中の電荷輸送機構	273
	清水 鉄司 (産業技術総合研究所)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J18L111	数値流体力学を用いた脳血管内治療における流動現象の解明	275
	中嶋 伸太郎 (順天堂大学)、太田 信 (東北大学)	

- 1. 平成 30 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)基盤研究の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が採択された。

平成 30 年度公募共同研究は、平成 30 年 4 月 1 日から平成 31 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、平成 29 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。

平成 30 年 11 月には、運営委員会、共同研究委員会、公募共同研究成果報告会が開催 された。

1.2 公募共同研究成果報告会
平成 30 年 11 月 8 日に、公募共同研究成果報告会(IFS Collaborative Research)

Forum)を流体科学研究所主催の国際シンポジウム AFI-2018 において仙台国際センターにて開催した。本報告会では 102 件(重点公募共同研究 2 件、連携公募共同研究プロジェクト4件、萌芽公募共同研究3件、第15回流動ダイナミクス国際会議(ICFD2018) OS17 の5 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、126 人の出席者があった(写真1、2)。

発表は全て英語で行われ、海外からの共同研究者も交えて活発な議論が行われた。



写真1:ショートプレゼンテーションの様子



写真2:ポスターセッションの様子

1.3 流体科学データベース

学術論文等で発表された拠点における研究成果は、流体科学データベースに登録され、 流体科学研究所のホームページで公開される(http://afidb.ifs.tohoku.ac.jp/)。本デー タベースの登録件数とアクセス数を表1に示す。

表1:	流体科学デ	ータベー	-スへの	登録件数と	ア	クセス	数
-----	-------	------	------	-------	---	-----	---

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
公募共同研究成果の登録数	67	71	90
登録済みデータ総数	540	552	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

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

平成 31 年 2 月に、平成 29 年度の共同利用・共同研究拠点活動の成果を取りまとめた 共同利用・共同研究拠点「流体科学国際研究教育拠点」活動報告書を作成し、関係機 関、研究者に配布した。報告書の内容(著作権の都合により論文別刷りは除く)は流 体科学研究拠点ホームページに掲載されている。

(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)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の申請・採択状況を示す。表4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。

		平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
申請数(件)		99	101	105
採択	数 (件)	69	70*	77
	国内	44	44	38
	国際	25	33	32
	環境・エネルギー	27 (17/10)	44 (23/21)	29 (12/17)
分野別件数	人・物質マルチス ケールモビリティ	9 (4/5)		8 (4/4)
(国内/国際)	健康・福祉・医療	10 (6/4)	5 (3/2)	6 (3/3)
	基盤	23 (17/6)	22 (13/9)	27 (19/8)
採択率 (%)		70	69	73
申請金額(千円):a		30,396	30,546	43,460
採択金額(千円):b		16,819	17,065	19,847
平均充足率(金額)(%):b/a		55	56	45
平均採択金額(千円)		244	243	244

表2:一般公募共同研究の申請・採択状況

\*年度途中に1件取り下げあり

表3:国際連携公募共同研究プロジェクト、萌芽公募共	;同研究
および重点公募共同研究の申請・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
申請数(件)	6	6	6
採択数(件)	5	6	6
採択率(%)	83	100	100
申請金額(千円):a	8,140	8,135	8,011
採択金額(千円):b	4,869	4,470	5,010
充足率(金額)(%):b/a	60	54.9	62.5
<ul><li>一件あたりの採択金額</li><li>(千円)</li></ul>	974	745	835

萌芽	亚式 98 年度	亚成 20 年度	亚式 20 年度
公募共同研究	十成 20 千茂	十成 29 千茂	十成 50 千茂
申請数(件)	5	4	3
採択数(件)	5	4	3
採択率(%)	100	100	100
申請金額(千円):a	994	697	468
採択金額(千円):b	525	559	362
充足率(金額)(%):b/a	53	80	77.3
ー件あたりの採択金額 (千円)	105	140	120

重点 公募共同研究	平成 29 年度	平成 30 年度
申請数(件)	2	2
採択数(件)	2	2
採択率(%)	100	100
申請金額(千円):a	3,042	3,687
採択金額(千円):b	3,599	2,790
充足率(金額)(%):b/a	118	75.6
<ul><li>一件あたりの採択金額</li><li>(千円)</li></ul>	1,799	1,395

※採択額には、20%のインセンティブが含まれる。

		平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
実施	実施数(件)		31	28
日内, 日欧	国内	15	20	24
国内・国际	国際	13	8	7
	環境・エネルギー		14 (10/4)	14 (13/1)
分野別件数	人・物質マルチス ケールモビリティ	2 (0/2)	0 (0/0)	0 (0/0)
(国内/国際)	健康・福祉・医療	6 (3/3)	5 (5/0)	4 (4/0)
	基盤	13 (7/6)	9 (5/4)	13 (7/6)
申請金額	領(千円):a	11,825	12,217	9,186
採択金額(千円):b		2,894	2,905	2,508
平均充足率	(金額)(%):b/a	24	24	27
平均採択	皇金額(千円)	103	94	89

表4:リーダーシップ共同研究の実施状況

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 5 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。

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
国内	389	469	411
国外	625	628	927
合計 (延べ人日)	1,014	1,097	1,338

表5:研究者の受け入れ状況

#### 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6に示す。

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成30年度*
物件費(千円)	16,377	12,911	25,569
旅費 (千円)	16,177	18,201	34,323
合計 (千円)	32,554	31,112	59,892

表6:研究費の内訳

\*平成 30 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7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。

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
学術雑誌(査読つき国際会議、解 説等を含む)	99	119	73
国際会議、国内会議、研究会、口 頭発表等	291	439	303
その他(特許・受賞・マスコミ発 表等)	16	14	17
合計 (件)	406	572	393

#### 表7:研究成果の発表件数

1.7 平成 21 年度から平成 27 年度までの活動成果

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8から表14に記載する。

	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8:流体科学データベースへの登録件数とアクセス数

表9:一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
申請對	汝(件)	52	64	77	85	94	98	98
採択對	汝(件)	52	63*	77	85	93*	96*	97
国内,国欧	国内	32	35	47	51	59	60	58
	国際	20	28	30	34	34	36	39
	エアロ	7	7	10	12	13	16	16
	スペース	(5/2)	(5/2)	(7/3)	(9/3)	(10/3)	(12/4)	(3/13)
	エネルギー	16	14	18	20	21	21	21
		(8/8)	(5/9)	(6/12)	(7/13)	(7/14)	(7/14)	(7/14)
分野別件数	ライフ	7	13	13	14	19	17	15
(国内/国際)	サイエンス	(5/2)	(8/5)	(9/4)	(8/6)	(12/7)	(12/5)	(8/7)
	ナノ・	17	17	23	24	24	24	22
	マイクロ	(10/7)	(10/7)	(17/6)	(17/7)	(18/6)	(17/7)	(14/8)
	其般	5	12	13	15	16	18	23
		(4/1)	(7/5)	(8/5)	(10/5)	(12/4)	(12/6)	(16/7)
採択率	赵(%)	100	98	100	100	99	98	99
充足率(	金額)(%)	$26\sim$	$77 \sim 95$	$59 \sim 97$	$49 \sim 83$	$44 \sim 73$	$19 \sim 70$	$21 \sim 67$
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
平均採択会	を額(千円)	320	391	333	301	248	229	222

\*取り下げ

	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
<ul><li>一件あたりの採択金額</li><li>(千円)</li></ul>	7,000	4,650	3,445	2,936

表 10:分野横断プロジェクト申請・採択状況

表 11: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	<b>事共同研究プロ</b> :	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	
<ul><li>一件あたりの採</li><li>択金額(千円)</li></ul>	992	876	653	79	86	

表 12: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 13: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 14:研究成果の発表件数

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

# 2. 研究成果報告書

# <一般公募共同研究>

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

課題番号	J18I001
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2年目

## 光駆動型マイクロ・ナノ流体デバイスの開発 Development of Light-Driven Micro/Nano Fluidic Devices

# 山田 昇\*†,小宮 敦樹\*\*††,岡島 淳之介\*\* \*長岡技術科学大学工学部,\*\*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

近年、レーザー光などの光を照射するだけで流体中で駆動する光アクチュエータが注目されている.電気配線や複雑な機械機構が不要なことからマイクロ・ナノスケール用途での活用が期待されているが、駆動原理や製造方法を含めて発展途上にある.本研究では、回転型 光アクチュエータの光マイクロモータに着目し、その駆動原理とモータ近傍の流体との相互 作用をマイクロ・ナノスケール流体科学の観点から明らかにし、新規の光駆動型マイクロ・ ナノ流体デバイスの開発に繋げる.

#### 2. 研究成果の内容

今年度は、光マクロモータの形状とレーザー照射方法を工夫することにより、従来の単純 な自転のみの回転動作(自転モード)ではなく、自転と公転を伴う新規の回転動作(周転円 運動モード)の発現に成功した(未発表).また、CFD 解析により、周転円運動モードにお いて自転と回転が同じ向きの場合にマイクロスケールにおける攪拌効果に優れる可能性を明 らかにした.図1にアセトン液中で回転する周転円運動モードの光マイクロモータの回転の 様子を示す.図2に、前年度に引き続き小宮准教授らと共同で設計した温度場・濃度場可視 化計測システムを組み立てた様子を示す.現在、位相シフトによる定量化とマイクロスケー ルの可視化に向けた調整を行っている.



図1:周転円運動モード(自転+公転)を発現した光マイクロモータの回転の様子



図2:温度場・濃度場可視化計測システムの概要(上)と可視化テスト(下)の様子

#### 3. 研究目標の達成状況

本研究の実施により、光マイクロモータの駆動原理を流体科学的に明らかし、マイクロ流 体デバイスへの応用することを目標としており、今年度は攪拌性能に優れる回転モードを発 現できたことは大変有意義な成果である.本結果を流体解析結果ならびに可視化結果と詳細 に比較・考察することにより、マイクロ流体デバイス中での物質の高速攪拌等への指針を得 ることが期待できる.

4. まとめと今後の課題

新たなマイクロ流体デバイスへの応用が期待される光マイクロモータについて,新規の回転動作を実現できた.また,マイクロモータ周囲の温度場,濃度場の可視化に向けたシステム設計と組立を実施できた.次年度は,これらの成果をさらに発展させ,駆動原理と熱流体挙動の解明,マイクロ流体デバイスでの活用方法の提案に繋げたい.

- 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・ロ頭発表等
- \*[1] <u>Noboru Yamada, Vuong Van Thai</u>, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya : Development of Light-driven Microactuators for Microfluidic Devices, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, Japan, (2018), CRF-25, pp. 50-51.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I002
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目(発展)

#### 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

植原 幹十朗\*†,大谷 清伸\*\*†† 上蓑 義幸\*,藤原 路大\*,富崎 帆乃花\* \*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.まず,申請者の研究グル ープは,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テ ープ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

実験による中空円筒テザーの損傷を報告した例はなく、世界初の結果に繋がる.

- 両端を治具で固定した中空円筒テザーをチャンバー内に設置しアルミ球を衝突させた.
- プロジェクタイルとの衝突を逃さないように複数のテープを並べてターゲットとした.
- デブリクラウド発生や円筒内の複数衝突の物理現象を,高速度カメラで撮影した.

 高さ比 k=h/r 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. 撮影した画像を図1左に示す.このとき、中空円筒テザー内にデブリクラウドが発生したことが確認できた.デブリクラウドの前縁部を赤曲線で示した.実験後の中空円筒テザーでは、図1右のように小さな損傷領域と大きな損傷領域が確認できた.大きな損傷領域はテザー内に発生したデブリクラウドに由来する.この結果から、中空円筒テザーの損傷にはデブリクラウドが大きく影響を及ぼすと言える.

図2に、プロジェクタイルが、異なる高さ比 k (k= 0.06, 0.71) で衝突したときのデブ リクラウドの拡散と、損傷領域の比較を示す. 図4の弧状両端矢印は、デブリクラウドによ ってテザーが損傷した領域を表す. このとき、k=0.06 のときよりも k=0.71 のときの方 が、損傷領域は大きくなった. 図2のX 軸両端矢印に示されるように、デブリクラウドが中 空円筒テザーに衝突するまでの距離が関係していると考えられる. k=0.06 では衝突位置と 中空円筒テザー後方までの距離が長いため、デブリクラウドは拡散した後に中空円筒テザー に衝突する. 一方、k=0.71 では衝突位置と中空円筒テザー後方までの距離が短いため、デ ブリクラウドは十分に拡散しない密な状態で、中空円筒テザーに衝突する. よって、k が大 きい衝突の方が損傷領域は大きくなると考えられる.



3. 研究目標の達成状況

球状プロジェクタイルを用いて円筒テザー衝突実験を行い,円筒テザー内側の衝突現象を 把握した.円筒テザー内部でデブリクラウドが生成される様子を高速度カメラによって捉え た.「一回のデブリ衝突現象が複数回のデブリ衝突現象を引き起こす」などの衝突現象を実 証した.現在,実験結果をSPH数値計算と比較検証している最中である.斬新な考察が得ら れると期待する.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

円筒テザー衝突実験により円筒テザー内側の衝突現象を把握した.今後の課題は、球状プロジェクタイルを用いて円筒テザー衝突実験を行う.デブリクラウドによって損傷が起こる円筒テザー外側の二次破壊現象を把握する.斜め衝突の実験も行うことで斜め衝突角度の影響を明らかにし、損傷が大きくなる衝突形態を探査する.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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] <u>Uwamino, Y., Fujiwara, M.</u>, Ohtani, K., <u>Makihara, K.</u>: Concept of Hollow Cylindrical Tether under Space Debris Impact, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, Japan, (2018), CRF-13, pp. 26-27.
- [2] 藤原路大,上蓑義幸,富崎帆乃花,植原幹十朗:スペースデブリ衝突実験におけるカメラ 画像の解析に関する研究,日本機械学会東北支部第54期秋季講演会,(2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I003
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1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

近年,省エネルギーや低環境負荷の観点から,水素の希薄予混合燃焼が注目されている. 水素火炎は不安定な振る舞いを示し易いことが知られており,それを制御するには火炎のダ イナミクスに関する知見が不可欠である.これまでの数値計算では,高・低温度環境下にお ける火炎のダイナミクスにおけるスケールの影響を明らかにしてきた.しかし,熱損失の効 果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,水素 - 空気予混合火炎のダイナミクスに及ぼす熱損失の効果を調 べ,その基本メカニズムを明らかにすることを目的とする.

#### 2. 研究成果の内容

本数値計算では、支配方程式として詳細な化学反応を考慮した圧縮性ナヴィエ・ストーク ス方程式を採用し、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、申請者らがこれま でに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、断熱と非断熱の条件下における火炎の温度分布を示したものである.未燃ガス側 に凸な火炎面の温度は、断熱火炎温度より高くなっている.これは、拡散・熱的効果による ものである.計算領域を広くすると、不安定な挙動があらわれる.また、熱損失が存在する と、不安定挙動は顕著となる.これは、熱損失が火炎の不安定性を促進するためである.図 2は、セル状火炎の燃焼速度を示したものである.計算領域が広くなると、燃焼速度は単調 に増大することが示されている.

#### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、水素/空気予混合火炎の数値計算を遂行し、予混合燃焼における火炎のダイナ 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 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と考えられる.

#### 4. まとめと今後の課題

本年度は主に熱損失に着目し、火炎挙動に及ぼす影響を精査した.今後は、未燃ガス温度 の影響を考慮した数値計算を遂行し、火炎のダイナミクスに及ぼす影響を明らかにすると共 に、火炎の不安定機構を体系的に調べる予定である.



図1 断熱と非断熱の条件下における火炎の温度分布(当量比:0.5)



図2 断熱と非断熱の条件下におけるセル状火炎の燃焼速度(当量比:0.5)

- 5. 研究成果 (\*は別刷あり)
- 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] <u>Kadowaki, S., Uchiyama, T., Takahashi, T., Katsumi, T.</u>, and Kobayashi, H. : The effects of heat loss on the dynamics of hydrogen-air premixed flames, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, Japan, (2018), CRF-29, pp. 58-59.
  - [2] <u>門脇敏・内山努・勝身俊之</u>・小林秀昭,水素・空気予混合火炎の不安定挙動に及ぼす熱損失 とスケールの影響,第56回燃焼シンポジウム,D222,(2018)
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I004
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

#### 高賦形性プリプレグにより成形した炭素繊維強化複合材部材の非破壊評価

Nondestructive Evaluation for Carbon Fiber Composite Parts Fabricated by Prepreg with High Moldability

> 水上 孝一\*\*, 小助川 博之\*\*\*\* 高木 敏行\*\* \*愛媛大学工学部, \*\*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、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の中でも、スリットを挿入することで賦 形性を向上させた UACS (unidirectionally arrayed chopped strands)の成形欠陥の可視化 を目的とした、成形欠陥として、スリット間隔のずれ、繊維方向の不整があるため、これら を検出するための渦電流試験法を開発した.

#### 研究成果の内容

図1に示すように、励磁コイルと検出コイルからなる渦電流プローブを用い、UACS サン プルに対して渦電流試験を行った.得られた検出コイル電圧分布に対して2次元フーリエ変 換を適用し、繊維の粗密に起因する信号変化およびスリットによる信号変化を取得した.図 2に示す空間周波数領域のスペクトルが得られ、スペクトルの方向から、スリット方向、繊 維方向が特定できた。また、スリットによるスペクトルの強度が最も高い空間周波数はスリ ット間隔の逆数に対応する.これを用いて推定したスリット間隔は実際のスリット間隔に非 常によく一致していた.このため、渦電流試験により、UACS 中の特定領域内の繊維方向、 スリット方向、スリット間隔を同定することが可能であると示した.

1500





#### 3. 研究目標の達成状況

当初計画していた通り、UACS 成形品が設計した通りに作られているかを確認するための 検査法を確立できたといえる.さらに検査結果から得られる情報を健全性評価に生かすため には CFRP 内の層ごとの繊維方向の検出や、スリット方向・間隔の特定が必要になってくる. そのため、本研究の成果は、渦電流試験によって UACS で重要となる成形欠陥を簡単な積 層板の場合については示すことができ、渦電流試験の適用範囲の拡大や、複合材料分野での 新しい検査法の確立の一歩になったと考えられる.

4. まとめと今後の課題

これまで検査法が確立されていない UACS の CFRP 成形品を検査するための渦電流試験 の開発を行った.スリットの方向・間隔および繊維方向という成形欠陥では重要なパラメー タを渦電流画像から特定できることを示し、炭素繊維複合材料の新たな検査法の可能性を展 開できたといえる.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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] <u>Takahiro Ishibashi</u>, <u>Koichi Mizukami</u>, Hiroyuki Kosukegawa and Toshiyuki Takagi : Nondestructive evaluation for carbon fiber composite parts fabricated by prepreg with high moldability, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, Japan, (2018), CRF-34, pp. 70-71.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等 なし

課題番号	J18I006
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2018.4 ~2019.3
継続年数	2年目

低温度感度高速応答 PSP の低速流れへの適用とその評価 Application of Low-Temperature Sensitive Fast Response PSP on Low-Speed Unsteady Flow and Its Validation

> 江上 泰広\*†, 長谷川 敦也\* 松田 佑\*\*, 藤田 昂志\*\*\*, 永井 大樹\*\*\*††, \*愛知工業大学工学部, \*\*早稲田大学創造理工学部 \*\*\*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

感圧塗料(PSP)の研究は定常計測から非定常計測へ,圧力変化の大きな遷音速計測から微 小な低速域での計測へと進んできている.申請者らは,独自開発した世界最高速の時間応答 性をもつ PSP の評価試験を本共同研究のもと 2017 年度に行った.その結果,十分な時間応 答性や優れた圧力感度があることが確認された.その一方,発光強度や模型への付着性に関 しては改善の余地があることが分かった.この結果を受けて,より発光強度が高く,付着性 に優れた高速応答 PSP の開発を行った.本共同研究では,流体科学研究所検定風洞に於い て昨年と同様,50m/s以下の低速条件下で角柱の後流に形成されるカルマン渦列による圧力 変動を後流試験を行い,新規高速応答 PSP の評価を行った.

## 2. 研究成果の内容

高速応答 PSP の付着性を向上させるため、粒子径及び粒子割合、粒子の表面処理が異なる PSP を作成し、サンプルの表面や断面構造を SEM を用いて観察し、付着性や時間応答の特性試験を行った. その結果、粒径 15-30 nm 程度の酸化チタンを粒子割合 80-90 wt%で混

合し、膜厚 5µm で作成した PSP は高 い付着性を持ちながら、応答時間 6µs と高い応答性を示し、発光強度も昨年 の PSP の約 5 倍の高輝度化を実現し た. この PSP の実証試験を東北大学 流体科学研究所の小型検定風洞にて 行った.図1に示す通り測定部は開放 型とし、高速応答 PSP をスプレー塗 布した平板上に角柱を設置した.2 台 の高輝度 LED(HARDsoft IL-106UV) で励起した PSP からの燐光は高速度 カメラ(Photron SA-X2)を用いて撮影 レート 1kfps で各試験条件毎に 21,841 枚づつ撮影した.また、励起光



源の変動による影響が試験中に見出されたため,照射開始後,発光強度が十分安定してから 計測を行うように,手順を変更したところ,計測画像枚のバラつきが大幅に減少した.図2 は主流速度 50 ~20 m/s の低速流れにおいて,角柱後流に形成されるカルマン渦列による圧 力分布を捉えたものである. PSP の高輝度化により,取得画像の S/N も大幅に向上し,20 m/s においても カルマン渦を捉えることができた.



図2:角柱後流のカルマン渦による圧力変動の計測

#### 3. 研究目標の達成状況

PSP の模型表面への付着強度と発光強度の低さによる計測精度の低下を改善するため,新たに開発した高速応答 PSP の実証試験を行った.昨年度の PSP は角柱周りの渦により, PSP 表面の粒子のはく離が生じていたが,改良した PSP でははく離が生じず,付着性の向上が確認された.また,発光強度も昨年比で5倍と高輝度化を実現する事ができた.また,励起光の照射方法や手順の改善も行うことができ,取得画像の S/N を大幅に向上させる事ができ,研究目標は達成されつつあると言える.

#### 4. まとめと今後の課題

発光強度や模型表面への付着性が改良された高速応答 PSP を用いて低速領域の微小圧力 変動を計測する実証試験を検定風洞で行った.発光強度,及び計測のセットアップや手順を 見直しにより,取得画像の S/N を向上させることに成功し,平均化などの簡単な後処理だけ でも 20 m/s という低速流れにおいてもカルマン渦による圧力変化を計測する事ができた. 今後は,さらに基に微小な圧力変化の測定限界を高められるよう,高速応答 PSP の改良,計 測システムや計測手順,後処理法の高度化に関する研究を行っていく予定である.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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] <u>Y. Egami, A. Hasegawa, Y. Matsuda</u>, H. Nagai, K. Fujita : Verification test of novel fast-responding Pressure-Sensitive Paint to resolve small pressure fluctuation, Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018), Sendai, Japan, (2018), CRF-79, pp. 164-165.
- [2] <u>長谷川敦也</u>,松田佑,永井大樹,藤田昂志,江上泰広:微小圧力変動を計測する高速応答 PSPの実証試験,第14回学際領域における分子イメージングフォーラム,JAXA 調布航空 宇宙センタ,(2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I007
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

# 非真空プラズマ噴流による複雑形状材料への化学活性種輸送の調査 Radical Transportation to Complex Shapes by Non-Vacuum Plasma Jet Flow

市來 龍大\*†, 岡田 健\*\*†† \*大分大学理工学部, \*\*東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

#### 1. 研究目的

大分大学で開発が進む大気圧プラズマジェットによる金属材料の表面窒化技術により、これまでは処理が困難であった複雑形状材料の高強度化を達成する計画がある.このため、大気圧噴流により輸送されるプラズマ由来の窒素種ラジカルを、粘性流および化学反応素過程 を統合した視点から調査し、輸送が最適となるプラズマ噴流や圧力条件を明らかにする.

#### 2. 研究成果の内容

図1(a)に実験系の概略図を、図1(b)に実験中の写真を示す.本研究では、パルスアーク型 大気圧プラズマジェットのプルームを工具鋼 SKD61 に開けた貫通穴の上部から穴内部に向 けて噴射することにより、貫通穴の内部に窒素種ラジカルを輸送し、熱拡散により窒素原子 を内壁へドープする.窒素ドーピングの影響は内壁の硬化として観測され、硬化層の均一性 から窒素種ラジカルの到達距離が評価できる.また、貫通穴の裏面から真空ポンプにより穴 内部の気体をポンピングすることにより穴内部の圧力勾配を制御し、プルーム噴流の穴内部 への誘導(プラズマ流誘導)を行い、ラジカル輸送特性の改善を試みる.動作ガスは窒素/ 水素混合ガスであり、水素添加量は1%である.この条件により、窒素種ラジカルとしては パルスアーク内で NH ラジカルが生成されることが発光分光法により観測され、ジェットプ ルームにも NH の存在が確認される.生成したプラズマジェットの流速は約20 m/s である. 工具鋼は直径10 mm、長さ10 mm の円筒であり、貫通穴の寸法は直径1 mm、長さ10 mm で ある.これらの実験は石英製の簡易カバー内で行われ、カバー内を動作ガスでパージするこ とにより実験雰囲気の残留酸素量を低減し、窒素ドープを阻害してしまう酸化層の形成を抑



図1:大気圧プラズマジェット実験系.(a) 概略図.(b)写真.



図2:内壁断面の硬度分布.(a) プラズマ流誘導なし.(b) プラズマ流誘導あり.

制した.

図2は工具鋼内壁断面の硬度分布を示しており、マイクロ Vickers 硬度がグレースケール で表されている.母材硬度は550 HV である.横軸はジェットプルーム噴射面からの貫通穴 の深さ方向であり、縦軸は内壁最表面からの基材への深さ方向である.ポンピングによるプ ラズマ流誘導を行わない場合、穴の深さ8mm では明らかに硬化層厚さが減少しており、10 mm ではほぼ硬化が達成されていない.この結果は、プラズマ噴流のみではNH ラジカルを 貫通穴の最深部まで効率的に輸送できていない事実を示している.一方、プラズマ流誘導を 行った場合、穴の深さ8mm まではほぼ硬化層厚さが均一化しており、10mm においても最 表面は明らかに硬化していることが分かる.結果として、大気圧プラズマ噴流にプラズマ流 誘導を組み合わせることにより、細穴へのラジカル輸送が効率的に行われることが明らかと なった.

#### 3. 研究目標の達成状況

「予想される成果」として2mm以下の直径を有する細穴・スリットへの深部までのラジ カル供給を挙げており、今回は直径がその半分の1mmの条件下で長さ10mmまでのNHラ ジカル輸送を達成できた.本研究成果は、製造業で多用される押出成型金型の長寿命化・高 性能化のための新規材料プロセス技術の創成に貢献すると期待される.

#### 4. まとめと今後の課題

上述の産業応用について社会実装を目指すにあたり、今回の大気圧噴流によるラジカル輸送の考察のみならず、熱プラズマ噴流から鉄鋼材料が受ける熱流束についても併せて考察する必要がある. 窒素原子ドープ時の熱拡散係数をこれにより精密に制御できれば、外部熱源を必要としない極めて簡易な窒素ドーピング技術の提供が可能となる.

- 5. 研究成果
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[1] <u>R. Ichiki, K. Toda, S. Akamine, S. Kanazawa</u> and T. Okada: Nitrogen Doping to Narrow Holes by Atmospheric-Pressure Plasma Jet with Flow Induction, *Proceedings of 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2018), CRF-50, pp. 102-103.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I008
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

# ノッキング自着火・圧力波発生過程における負の温度係数領域の影響 Impact of Negative Temperature Coefficient Behavior on Autoignition and Pressure Wave Generation 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

自動車内燃機関におけるノッキング現象は、末端ガス自着火及び強い圧力波発生を伴う異 常燃焼として知られ、現在においてもエンジン高圧縮比化の大きな障壁となっている.本研 究では、ノッキング現象における燃料反応特性の影響、特に、負の温度係数領域として知ら れる negative temperature coefficient (NTC)領域の影響に着目した.申請者らが開発し てきた詳細反応機構/圧縮性流体シミュレーション技術を適用し、燃料 NTC 特性がどのよう にノッキング現象に影響を及ぼすのかを明らかにする.

#### 2. 研究成果の内容

まず,異なる NTC 特性(本研究では NTC 領域における温度に対する着火遅れ時間変化とす る)を再現するため,新たな反応機構の作成を試みた.異なる既存燃料の使用も考えられる が,NTC 領域の傾向のみが異なる燃料を選定するのは困難である.図1は、ベースとなる正 ヘプタンの反応機構(Base)と本研究で新たに作成された反応機構(Cases A and B)によ って得られた着火遅れ時間の比較である.反応機構 A,Bは、代表的反応である RH+0H=R+H20 及び Q00H+02=02Q00H において、活性化エネルギー値を意図的に修正することで作成した. 図1左により、反応機構 A,BはNTC 領域のみ着火遅れ時間の傾向がベース機構と異なり、 反応機構 A は急な NTC 勾配、反応機構 B は緩やかな勾配を有することを確認できる.図1右 に、初期温度 700 K における温度の時間変化を示すが、反応機構 A では低温酸化に起因する 温度変化が他の結果に比べ急峻となり、着火遅れ時間が短縮していることがわかる.



図1:反応機構の比較(左:着火遅れ時間;右:700Kの場合の温度時間変化)
これらの反応機構を用いノッキング解析で得られたノック強度を図2左に示す.共同研究 以前の解析結果から、ノック強度に違いが出ることを予想していたが、いずれの結果もほぼ 同じ傾向となった.つまり、この結果は、NTC 勾配の違いは末端ガス自着火に伴う圧力波発 達現象にほとんど影響を及ぼさないことを示す.図2右に、初期温度650 K における反応機 構Aで得られた圧力と温度空間分布を示す.自着火時の伝播火炎位置(末端ガス長さ)に着 目すると、x = 2.0 cm付近に位置しており、他の結果と比べ最も上流側に位置する(つまり 末端ガス領域が最も長い).異なる伝播火炎位置にも関わらず、圧力波発達の様子がほぼ同 じであることは、末端ガスの状態が NTC 特性の影響を受けていないことを示唆する.一方、 紙面制限により示すことができないが、図1 左の反応機構特性が直接的に反映されるのは、 末端ガス自着火タイミング及び伝播火炎位置となる.



図2:ノッキング解析結果(左:ノック強度;右:650Kの場合の温度・圧力空間履歴)

3. 研究目標の達成状況

燃料 NTC 特性を意図的に制御することで、ノッキング現象への影響を明らかにするという 目的は達成できた.しかし、ノッキング抑制(圧力波発達の制御)という観点では、NTC 特 性による効果を得ることができなかった.

4. まとめと今後の課題

本研究により,燃料NTC特性(勾配)は、ノック強度にほとんど影響を及ぼさず、ノック 発生時間と火炎位置にその特性が反映されることを明らかにした.本研究結果を踏まえ、他 の燃料との比較解析を加えることで、NTC特性の影響を更に明確化することが可能である.

- 5. 研究成果
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
  - なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[1] <u>H. Terashima</u> and H. Nakamura: Effects of negative temperature coefficient of reactivity on end-gas autoignition and pressure wave development during knocking combustion, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI-2018), Sendai, (2018), CRF-24, pp. 48-49.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I009
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	2018.4 ~2019.3
継続年数	2年目

# 流体・構造・制御の異分野融合による展開翼モデリング法の確立 Exploitation of Deployable Wing Model Fusing Interdisciplinary Fields: Fluid/Structure/Control

# 植原 幹十朗\*†, 永井 大樹\*\*†† 藤田 昂志\*\*, 大塚 啓介\*, Yinan Wang\*\*\* \*東北大学工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所, \*\*\*University of Warwick †申請者, ††所内対応教員

#### 1. 研究目的

次世代航空機は性能向上のために,飛行中に翼を折り畳み展開する可変翼を搭載することが期 待されている.可変翼開発は数値モデルが必須である.数値モデルを用いた流体構造連成解析に 加えて,可変翼は制御系設計が必要となる.流体,構造,制御の三者を適切に融合し,制御系設 計をも考慮した可変翼の流体構造連成モデリング法を確立することが研究目的である.

#### 2. 研究成果の内容

共同研究2年目として,流体と構造に焦点を当てたモデリング法の精度向上を行った.構築したモデリング法を用いた数値解析の妥当性実証の為に,下記の翼展開実験を流体研・低乱熱伝達風洞で行った.実施期間は2018年9月24-28日と2018年11月19-22日である.

図1に使用した実験系を示す.2つの塩ビ板を回転バネ付き蝶番で結合した平板矩形翼を風洞 内に鉛直に設置した.昨年度より測定データの精度を高めるため、図2に示す近距離高精度レー ザー変位計を導入した.さらに、昨年度は手動展開であったものを、電動展開に変更し、測定デ ータのバラツキを低減した.図3は流速と展開に要する時間の関係を示す.昨年度に提案したモ デルによる解析、今年度に精度を向上させたモデルによる解析、および実験を比較した.今年度 のモデルによる解析の方が実験値と良好な一致を示している.

#### 3. 研究目標の達成状況

昨年度に提案した可変翼モデルの精度向上を達成した. さらに、モデルの三次元化にも成功したことから、翼のみの展開解析だけでなく、飛行挙動と連成したより現実に即した解析が可能となった.

#### 4. まとめと今後の課題

今年度は、モデルの高精度化・三次元化と実験測定の高精度化を行った.提案する「流体・構造」連成モデリング法の信頼性を高め、適用範囲を広げることができた[1,2].しかし、「制御」に関して、提案モデルの自由度の多さが問題となっており、進捗に乏しいという課題がある.そこで、自由度が少なく済み、計測・制御フィードバックも行いやすい、歪情報に基づくモデリング法に取り組み始めている[12].

#### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- \*[1] <u>Otsuka, K., Wang, Y., and Makihara, K.</u>: Versatile Absolute Nodal Coordinate Formulation Model for Dynamic Folding Wing Deployment and Flutter Analyses, *Transactions of ASME, Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 141, No. 1 (2019), 011014 (10 pages).
- [2] <u>Otsuka, K.</u>, and <u>Makihara, K.</u>: Absolute Nodal Coordinate Beam Element for Modeling Flexible and Deployable Aerospace Structures," *AIAA Journal*, Vol. 57, No. 3 (2019), pp. 1343-1346.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

国際会議

- \*[3] <u>Otsuka, K., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K.</u>: Dynamic Simulation of Deployable Wing Mars Airplane, *Proc. of the 18th Int. Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-17, pp. 34-35. 【口頭+ポスター】
- [4] <u>Onuki, S., Otsuka, K., Suzaki, T.</u>, Nagai, H., Fujita, K., and <u>Makihara, K.</u>: Motion Analysis of Flexible Folding Wing with a Hinge Joint Loaded by Gust, *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2018), OS18-36, pp. 926-927. 【ロ頭+ポスター】
- [5] <u>Wang, Y., Otsuka, K.</u>, Fujita, K., Nagai, H., and <u>Makihara, K.</u>: Simulation and Control of Flexible Aero-Structures using Nonlinear Reduced-Order Models, *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2018), GS1-31, pp. 142-143. 【口頭】
- [6] <u>Otsuka, K.</u>, and <u>Makihara, K.</u>: ANCF-ICE Beam Element for Modeling Highly Flexible and Deployable Aerospace Structures, *SciTech Forum 2019*, San Diego, USA, (2019). 【口頭】

国内学会

- [7] <u>大塚啓介, 植原幹十朗</u>: 展開挙動シミュレーションと空力弾性解析のための展開翼モデル, 第 60 回構造強度 に関する講演会,福井, 8 月, (2018). 【ロ頭】
- [8] <u>大塚啓介</u>, <u>植原幹十朗</u>: 低次元化マルチボディ構造モデルを用いた展開翼の空力弾性解析, Dynamics and Design Conference 2018, 東京, 8月, (2018). 【口頭】
- [9] <u>須崎貴大,大塚啓介,小貫慧</u>,<u>植原幹十朗</u>: 歪量を要素変数とする3次元柔軟梁要素の研究,日本機械学会 東北支部第54期秋季講演会,宮城,9月,(2018).【口頭】
- [10] <u>須崎貴大</u>, <u>大塚啓介</u>, <u>小貫慧</u>, <u>植原幹十朗</u>: Strain Based Beam Formulation の発展手法に関する研究, 日本機 械学会東北支部第 54 期総会・講演会, 宮城, 3 月, (2019). 【口頭】
- 3) その他(受賞)
- [11] <u>大塚啓介</u>,<u>植原幹十朗</u>,若手研究奨励賞「全体座標表現に基づく柔軟展開翼の3次元マルチボディ解析法の 開発」,第60回構造強度に関する講演会,日本航空宇宙学会,徳島,8月2日,(2018).
- [12] <u>須崎貴大</u>,<u>大塚啓介</u>,<u>小貫慧</u>,<u>植原幹十朗</u>,若手優秀講演フェロー賞受賞「歪量を要素変数とする3次元柔 軟梁要素の研究」,日本機械学会東北支部第54期秋季講演会,日本機械学会,3月,(2019).





図1 風洞測定部へ供試モデルの設置図

図2 実験装置



図3 実験と解析の比較

課題番号	J18I011
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1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\*†, 乙坂 謙次\* 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はコスト・生産効率上有効である.大気圧マイクロプラズマは局所エッチ ングや成膜を可能にする.これまで内径 0.7 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. しかし, 大気圧プラズマではガス流制御が重要となり, エッチング形状や膜厚分布に影響を及ぼすと考えられる.

本研究では、シュリーレン法を用いて外径/内径: 0.9 mm/0.6 mm 細径ノズル電極から噴射される大気圧マイクロプラズマ流を可視化することで、ガス流量、投入電力、細径ノズル - 基板間距離 d とプラズマ流の状態を明らかにしてエッチング形状や膜厚分布の制御手法を確立する.

#### 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:1~9 W に設定した.自由噴流 と SUS 基板への衝突噴流(細径ノズル - 基板間距離 d 3.3~5.3 mm)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:5000 fps である.また,自由噴流プラズ マの様子を図2に示す.プラズマ発光部の長さは RF 電力の増加で変化して 10~15 mm である. 自由噴流と衝突噴流でのプラズマ off/on 時の流れの様子を図3示す.図3(A),(B)からガス流量 の増加で周囲の空気の巻き込みが生じ層流領域は減少する.また,プラズマ on によっても層流



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



図3:細径ノズルからの大気圧マイクロプラズマ流, (A) <u>0.6L/min</u>, 1.8W (B) <u>1.2L/min</u>, 1.8W (C) 0.6L/min (D) 0.6L/min, 8W (E) 1.4L/min, <u>2W</u> (F) 1.4L/min, <u>9W</u>

領域の減少が観察された. He 流量 1.8 L/min の細管内のレイノルズ数は 600 程度と層流域にある. さらに図3(C)から RF 電力を 1.5 倍に増加しても層流領域の減少が見られた. これは, 細径 ノズル電極近傍の電界強度の増加がプラズマ流の荷電粒子の加速を引き起こすためと考えられる. 図3(D),(E)の衝突噴流では,ガス流量の増加で衝突後のガス流に大きな乱れが生じていることが判る. 層流から乱流の移行点はノズル径と衝突距離 dに依存するが,図3(F)から明らかに RF 電力の増加で基板衝突後の乱流現象が見られなくなった. この原因はノズル電極 - 金属基板間の電界強度の増加が荷電粒子の速度分布を制限することで層流に移行したと考えられる.

#### 3. 研究目標の達成状況

大気圧マイクロプラズマ流に生じる"乱れ"のガス流速, RF 電力, 基板間距離依存性が明らかとなり, 大気圧プラズマのエッチング/CVD プロセス理解の観点では 65%以上の達成度である.

#### 4. まとめと今後の課題

シュリーレン法により大気圧プラズマ流の"乱れ"の要因を明らかにした. プラズマ流速の実 測および SF6, CF4, O2等のプロセスガスでの流れ解析が今後の課題である.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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] <u>H. Yoshiki</u>, <u>K. Otosaka</u>, T. Sato, T. Nakajima and S. Uehara: Fluid flow analysis of an atmospheric-pressure micro-plasma ejected from a narrow nozzle, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-41, pp. 84-85.
- \*[2] <u>吉木宏之</u>, <u>乙坂謙次</u>, 佐藤岳彦, 中嶋智樹, 上原聡司 : 細径ノズルから噴射される大気圧 µ プラズマの流体解析, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会(東京工業大学), (2019), DVD 06-132.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I012
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	3年目

# エッジトーンの音響流体解析 Acoustic Fluid Analysis on Edge Tone

# 高橋 公也\*†, 岩上 翔\*, 横山 博一\*, 小林 泰三\*\*, 服部 裕司\*\*\*†† \*九州工業大学情報工学府, \*\*帝京大学 \*\*\*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

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、エアリード楽器(リコーダー、フルート等)の音源となるエッジトーンに 注目する.エッジトーンは、振動するジェットが作り出す音源で、物体後流の乱流から出る流体 音と異なる性質があることが期待される.本研究では、圧縮性 LES および DNS を用いてエッジト ーンを数値的に再現し、Lighthill の音響的類推理論に用いて流体音発生のメカニズムの厳密な 解析を行う.さらに、エッジトーンを音源とする小型のエアリード楽器の DNS を用いた解析にも 挑戦する.厳密な意味での DNS を用いたエアリード楽器の発振状態の再現はこれまで行われてい ないので、成功すれば極めて重要な知見が得られる.さらに、LES を用いて高レイノルズ数領域 のエオルス音の性質を調べ、エッジトーンとの違いについて検討する.これらの研究を推進にあ たり、DNS と LES の結果比較と LES の精度改善法の検討を行う必要があり、圧縮流体の DNS につ いて豊富な知識を持つ服部教授との共同研究が必要である.

#### 2. 研究成果の内容

DNS を用いて2次元エッジトーンの解析を行い,流速を上げて行ったときに見られるモード遷移を再現することに成功した.さらに,エッジトーンの音響エネルギーが流速の5乗に従い増加することを数値的に示した.これは,エッジトーンが双極子音源であることを示す.図1に示すように,1次モードと2次モードは,ともに5乗則に従うが,異なる直線上にあり,2次モードからの音響エネルギーの放出が1次モードよりも小さくなる.2つのモードが発振可能な領域を遷移領域と言う.遷移領域では,1次モードと2次モードのどちらが発振するかは,初期条件によって変わるが,2つのモード間を行き来する間欠的な振る舞いをする場合も見られた.また,遷移領域では,1次モードからのエネルギー放出が抑制され,5乗則から外れる傾向が見られた. 1次モードと2次モードでは、ジェットのゆらぎの性質も変化する.

これらの結果を踏まえて、LES を用いたエッジトーンの解析を行なった.LES の解析では、メ ッシュを粗く取ると、流速の早い領域でも2次モードに遷移せずに1次モードの発振が起きる. しかし、メッシュを細かくすると2次モードの発振が見られた.どちらの場合も、数値的な破綻 は起きていない.したがって、LES の精度検証には十分な注意が必要である.

LES を用いたエオルス音の解析では、高レイノルズ数領域でも5乗則に従い、双極子音源であることを確認した.低レイノルズ数領域では、DNSの解析結果とほぼ一致し、5乗則に従うことが確認されている.



図1:DNSを持ちたエッジトーンの計算:流速と音響エネルギーの関係

#### 3. 研究目標の達成状況

申請時にあげた4つの課題の内の2つの課題 'DNS および LES を用いたエッジトーンの解析' と 'LES を用いた高レイノルズ数領域のエオルス音の解析' については、ほぼ計画通り達成でき、 原著論文執筆の準備を行なっている.一方, 'DNS を用いた小型エアリード楽器の発振状態の再 現'では、現在メッシュがほぼ完成した段階にある. 'Lighthill の音源と音響エネルギーとの関 係の解析' は手付かずであるが、エッジトーンおよびエオルス音の解析データより短期間で解析 可能であると考えられる.また、本共同研究を発展させた研究課題「大規模数値解析を用いた管 楽器の発音機構の解明とその応用」が基盤研究(C) (2019-2021 年度) に採択された.

#### 4. まとめと今後の課題

これまでの3年間の研究で,DNSを用いた空力音の計算法が確率できた.2019年度は,これまでの共同研究を発展させた新規課題「圧縮性DNSを用いた管楽器の流体音響解析」が採択された. 科研費の課題とともに,DNSを用いた管楽器の研究を発展させる予定である.

#### 研究成果(\*は別刷あり)

- 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・ロ頭発表等
- S. Iwagami, T. Kobayashi, K. Takahashi and Y. Hattori: Mode Jump of Edge Tone Captured by Direct Numerical Simulation, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS15-2, pp. 806-807.
- \*[2] <u>H. Yokoyama, S. Iwagami, T. Kobayashi, K. Takahashi</u>, Y. Hattori: Numerical Study on Aeolian Tone with Compressible LES, *Proceedings of the Eighteenth International* Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-86, pp. 178-179.
- [3] <u>岩上翔</u>,小林泰三,服部裕司,高橋公也:DNS を用いたエッジトーンの解析,12aPS-107,日本物理学会 2018 年秋季大会,2018 年 9 月,(2018),同志社大学.
- [4] <u>岩上翔</u>,<u>小林泰三</u>,服部裕司,<u>高橋公也</u>:DNS を用いたエッジトーンのモード遷移の再現, 15aG108-9,日本物理学会第74回年次大会,2019年3月,(2019),九州大学.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I013
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2018.4~2019.3
継続年数	1年目

# 非侵襲熱伝導率計測時の皮膚悪性腫瘍の生体伝熱特性の解明 Investigation of Bioheat Transfer Characteristics of Skin Tumor during Non-Invasive Measurement of Thermal Conductivity

岡部 孝裕\*†, 岡島 淳之介\*\*†† 藤村 卓\*\*\*, 圓山 重直\*\*\*\* \*弘前大学大学院理工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所 \*\*\*東北大学大学院医学系研究科, \*\*\*\*八戸工業高等専門学校 †申請者, ††所内対応教員

# 1. 研究目的

本研究では、パルス加熱中の皮膚腫瘍及び周辺組織の伝熱特性の解明を目的とし、提案する非侵襲熱物性計測による皮膚がん診断手法の精度向上を目指す.そのために、実際の皮膚がん患者に対する皮膚有効熱伝導率計測及び皮膚多層モデルを用いた生体伝熱解析、さらに 生体等価ファントムによる非臨床実験を実施することで、非侵襲熱物性計測時の生体内伝熱現象に関して定量的評価を行う.

#### 2. 研究成果の内容

本研究では、11名の皮膚がん患者に対して、健常皮膚と病変部において皮膚有効熱伝導率 測定を実施した.なお、事前に東北大学病院臨床研究倫理委員会の承認を得た上で、被験者 全員からインフォームド・コンセントを取得し、臨床実験を実施した.臨床実験の結果(図 1左図)、腫瘍が真皮層まで浸潤した場合、病変部の有効熱伝導率が健常部に比べて高い値を 示し、腫瘍の進行に伴い、その差異が大きくなることがわかった.数値計算結果(図1右図) によると、皮膚有効熱伝導率は腫瘍の進行に伴う腫瘍近傍の水分量や血流量の増加による腫 瘍熱伝導率の上昇が差異の原因である可能性が示された.ただし、生体等価ファントムを用 いた非臨床実験の結果、数値解析で使用した Pennes の生体伝熱方程式は血流の影響を過小 評価している可能性が示唆され、今後詳細な検討が必要である.

#### 3. 研究目標の達成状況

本研究の実施により、非侵襲熱伝導率計測時の皮膚腫瘍および周囲組織の伝熱特性を実験 的かつ数値解析的に評価し、腫瘍深さと有効熱伝導率の挙動の関係を明らかにできたことか ら、当初の研究目標をおおむね達成できたと考える.

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、パルス加熱中の皮膚腫瘍及び周辺組織の伝熱特性を臨床実験、数値解析、非 臨床実験を実施することで明らかにした.今後は組織学的解析を援用することによって、腫 瘍の進行に伴う腫瘍伝熱特性変化の詳細なメカニズムの解明を目指す.



- 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)
- \*[1] <u>T. Okabe, T. Fujimura</u>, J. Okajima, <u>Yumi Kambayashi</u>, <u>Setsuya Aiba</u> and <u>S. Maruyama</u>: First-in-human Clinical Study of Novel Technique to Diagnose Malignant Melanoma via Thermal Conductivity Measurements, *Sci. Rep.*, 9, (2019), 3853 (7 pages).
  - [2] <u>T. Okabe, T. Fujimura</u>, J. Okajima, <u>S. Aiba</u> and <u>S. Maruyama</u>: Non-invasive Measurement of Effective Thermal Conductivity of Human Skin with a Guard-heated Thermistor Probe, *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 126, (2018), pp. 625-635.
  - [3] <u>岡部孝裕</u>, 非侵襲熱物性計測による皮膚がんの定量的診断, JSME TED Newsletter, No. 85, (2018), pp. 2-7.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[4] <u>T. Okabe, T. Fujimura</u>, J. Okajima and <u>S. Maruyama</u>: Investigation of bioheat transfer characteristics of skin tumor during non-invasive measurement of thermal conductivity, *Proceedings of the Eignteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-66, pp. 138-139.
  - [5] <u>岡部孝裕,藤村卓</u>,岡島淳之介,<u>相場節也</u>,<u>円山重直</u>:熱物性計測による皮膚がん診断の有 用性検証に関する臨床実験及び数値解析,第55回日本伝熱シンポジウム,札幌,(2018), C321.
  - [6] <u>佐藤遥太,藤村卓</u>, <u>岡部孝裕</u>, <u>谷田佳世</u>, <u>神林由美</u>, <u>圓山重直</u>, <u>相場節也</u>: 非侵襲熱物性計</u> 測による皮膚腫瘍の早期診断手法の開発, 第 117 回日本皮膚科学会総会, p. 355.
  - [7] 藤村卓, 岡部孝裕, 神林由美, 佐藤遥太, 谷田佳世, 圓山重直, 相場節也: 非侵襲熱物性計 測による悪性黒色腫の早期診断手法の開発, 第 34 回日本臨床皮膚科医会総会・臨床学術大 会, 仙台, (2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
- (特許) なし

(受賞)

ポスター賞, 非侵襲熱物性計測による悪性黒色腫の早期診断手法の開発, <u>藤村卓</u>, <u>岡部孝裕</u>, <u>神林由美</u>, <u>佐藤遥太</u>, <u>谷田佳世</u>, <u>圓山重直</u>, <u>相場節也</u>, 2018.4.29, 第 34 回日本臨床皮膚科 医会総会・臨床学術大会.

(マスコミ発表)

デーリー東北,診断難しいほくろのがん 進行度判定 格段に早く 東北大, 弘大, 八戸高専 が新技術開発, 2019.3.8.

東奥日報,熱伝導率測定皮膚がん進行度即判定,2019.3.9.

陸奥新報, 皮膚がん"熱"で診断 新たな検査機器開発 進行度判定より容易に, 2019.3.19.

課題番号	J18I015
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	3年目

# 高繰返しレーザーパルスを用いた超音速流体制御の数値解析 Numerical Analysis on Supersonic Flow Control using High Repetitive Laser Pulses

# 岩川 輝\*†,大林 茂\*\*††,佐宗 章弘\* \*名古屋大学大学院工学研究科,\*\*東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

# 1. 研究目的

超音速旅客機の実用化に向けては、超音速で飛行する際に発生する衝撃波に起因する造波 抵抗やソニックブームが依然として大きな課題となっている.本研究では、これらの衝撃波 に起因する問題の解決に向けて、高繰返しレーザーパルスを用いて流れ場にエネルギーを与 えることで衝撃波を制御する非接触・局所的・能動的な高速流体制御を提案している.これ までに本手法を用いて、実験的に衝撃波低減効果及び境界層剥離の抑制効果が示されている. 一方で、その詳しいメカニズムは調べられておらず、本研究課題では、高繰返しエネルギー 付加による高速流体制御技術について、数値解析を用いたメカニズムの解明を目指すため、 これまでの研究から実験と数値解析がよく一致することが判明している「エネルギー付加を 用いた抗力低減」の手法について、モデル化を行う.

#### 2. 研究成果の内容

エネルギー付加によって形成される thermal bubble と衝撃波が干渉することによって衝撃波が緩和され、衝撃波背後の圧力場が変調されることによって、抗力が低減する. このメカニズムに対して、圧縮性流体力学に基づいたモデル化を行った. エネルギー付加による thermal bubble 形成の過程は、定積加熱および等エントロピー膨張を仮定する. bubble の 直径 $d_1$ は、 $d_1^3 = d_0^3 \left\{ 1 + [(\gamma - 1)\eta_a E] / \left[ \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d_0}{2} \right)^3 p_0 \right] \right\}^{\frac{1}{\gamma}}$ と表すことができる.  $d_1$ は実験によって 得られるため、 $d_0$ と $\eta_a$ のいずれかを実験及び数値解析によって決定することで、thermal bubble の状態量を決定することができるため、超高速度カメラを用いた breakdown の初期 過程の可視化を行い、 $d_0 = 2.8$  mm と決定した. これらの値を用いて、 $\eta_a$ を定めた結果、 $\eta_a = 0.25$ という値が得られた. 超音速抗力低減実験でも $\eta_a = 0.25$ と、可視化画像から得られた $d_1$ を用いて $d_0$ を評価した結果、 $d_0 = 2.26$  mm となった.

次に、衝撃波と bubble の干渉による衝撃波の挙動についてモデル化を行った。干渉中の 衝撃波の挙動はリーマン問題を解くことによって得られるため、bubble の状態量と衝撃波 マッハ数で決定される。干渉後の衝撃波の挙動は、緩和された衝撃波背後の圧力が初期の圧 力に回復する過程と考え、圧力場を時間の関数として $p(t) = (p_5 - p_2) \exp(-(t - t_f)/\Delta t) + p_5 を導入してモデル化を行った。 <math>\Delta t$ のみが未知のパラメータであったため、衝撃波の変形量  $x_f$ と干渉後の衝撃波速度 $U_t$ を用いて、 $\Delta t = U_t/x_f$ とした。これらの仮定と、圧力場の時間変化 の式を用いることで、衝撃波の位置を解析的に求めることができる。図 1 に解析、数値計算 および実験から得られた衝撃波の位置の挙動を示す。いずれの結果もよく一致しており、上 記のようなモデル化で衝撃波の挙動を再現することができた.

図1に示す解析では、各時刻の衝撃波前後の状態量が全て既知となっているため、繰返し 計算を行うことができる. 一例として, 繰返し周波数を 30 kHz とした場合の解析結果を図 2に示す。十分な繰返しを行うことで、衝撃波の位置が定在化しており、その位置は初期位 置よりも上流に移動している. 衝撃波が定在する位置は繰返し周波数とともに上流に移動す る傾向が得られ、これらの結果は過去の実験、数値計算結果と一致する.





incident shock

transmitted shock

 $M_{\rm t} = 1.68$ 

図 1 単一パルスのbubbleと衝撃波の干渉に よる衝撃波の挙動



#### 研究目標の達成状況

本申請課題では、繰返しエネルギー付加による抗力低減手法について、モデル化を行い、 実験,数値計算との比較を行った.衝撃波の挙動のモデル化については実験,数値計算とも よく一致する結果が得られたことから、繰返しエネルギー付加による衝撃波の変調について は本解析を用いることで実験、計算時間の大幅な短縮が可能となった.一方、空力的な性能 評価指標となる抗力低減量と繰返しの効果については十分なモデル化に至っていない.

4. まとめと今後の課題

「3研究目標の達成状況」に述べたとおり、繰返しエネルギー付加による衝撃波の変調に ついてはモデル化を行ったものの、空力的な性能評価指標となる抗力低減量と繰返しの効果 については十分なモデル化に至っておらず、今回モデル化した結果から、衝撃波の背後の状 態量を用いて 3 次元的な効果を踏まえた抗力低減量を評価するモデル化が今後の課題であ る.

- 5. 研究成果 (\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) たし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- \*[1] A. Iwakawa, A. Sasoh and S. Obayashi: Supersonic drag reduction model using repetitive pulse laser energy deposition, Proceedings. of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-75, pp. 156-157.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

課題番号	J18I016
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	2018.3~2019.3
継続年数	3年目

# 量子ナノディスクのバンド構造制御とデバイス応用

Control of Electronic Band Structure of Quantum Nanodisks for High-Efficiency Solar Cells and Laser Applications

> 福山 敦彦\*†,寒川 誠二\*\*†† 碇 哲雄\*,岡田 健\*\* \*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

量子ナノ構造が示すバンド構造,特にゼロ次元状態密度やドット構造間の電子相互作用は, 太陽電池やレーザー等エネルギー変換デバイスを飛躍的に向上させる可能性がある.しかし ながらこれまで良質の量子ナノ構造を得ることが困難であったため,具体的な研究は進んで いなかった.そこで,流体科学研究所において中性ビームとバイオテンプレートを用いて作 製に成功した規則配列ナノディスク構造(以下,QND)が形成するバンド構造を,宮崎大学 が所有する各種光学的手法を用いて解明する.更にはそのバンド構造を制御することで,従 来の太陽電池やレーザーの飛躍的な効率向上に寄与する知見を得る.

#### 2. 研究成果の内容

昨年度までの研究より、バイオテンプレートを用いた中性子ビームエッチング(以下NBE) 技術で作製した QND では面内方向の強い量子閉込め効果が存在することを、発光再結合を検 出するフォトルミネッセンス(以下PL)法と nextnano シミュレーションから実証した.本 年度は、QND をデバイス応用する際に問題となるエネルギー熱損失に注目した.議論の簡略 化を目的として、Si ナノサイズ柱状構造を流体科学研究所内で作製し、その非発光再結合を 宮崎大学の圧電素子型光熱変換分光(以下 PPT)法で測定した.

まず,140 nm の SiO<sub>2</sub>バッファ層を有する Si 基板上に無添加の Si 膜を分子線エピタキシ ー法で 90 nm 成膜させた. その後,NBE 技術によって直径 10 nm,高さ 90 nm の Si ナノサイ ズ柱状構造 (Si nanopilar: Si-NP) を作製した. 最後に,熱化学気相成長法によって Si-NP 間を Si<sub>0.7</sub>Ge<sub>0.3</sub> で埋め込んだ. 比較用に Si 基板上に SiGe 膜のみを成膜した試料も用意した.

図1に4KにおけるPL測定の結果を示す.Siのバンドギャップ(4Kで1.17 eV)付近に 多数のピークが観測され,文献との比較からSiにおけるTOおよびTAフォノンを伴う自由 励起子発光と同定できた.このことから,作製したSi-NPはSi結晶のバンド構造を保ってい ることが確認できた.図2に室温でのPPT測定結果を示す.両試料ともにSi起因のピーク が観測されたが,Si-NP試料はSiGe 膜試料に比べて信号強度が大幅に減少した.今回のPPT 測定配置では,Si基板での光吸収によって発生したフォノン(熱)が,Si-NP層あるいはSiGe 層を伝搬して試料裏面に貼り付けた透明トランスジューサに到達する.実験結果から,熱の 伝搬がSi-NPによって妨げられたことでPPT信号強度が減少したものと考えられる.より詳 細に解析するために,検出光を1150と1090 nmに固定し,断続周波数を20から3000 Hzま で変化させた. 断続周波数増加によって PPT 信号強度が減少し dip が現れるが, その dip は Si-NP と SiGe 膜試料でそれぞれ 700 と 2500 Hz に観測された. 焦電理論に基づく光熱変換信 号の理論計算より, Si-NP 構造の熱伝導率がバルク Si と比較して 10 分の 1 程度まで減少し たときに dip が 700 Hz 近辺に現れることが分かった. つまり, Si を量子ナノ構造にするこ とで, そのバンド構造(光学的特性)を変化させることなく熱伝導度のみを大幅に減少でき ることを実験的に実証した.



図1:4 KのPL スペクトル比較

図2: 室温のPPT スペクトル比較

18

#### 3. 研究目標の達成状況

本研究は、規則配列ナノディスク構造が形成するバンド構造を解明・制御し、太陽電池や レーザーの飛躍的向上に寄与する知見を得ることが目的であった.昨年度までに、Siをナノ ディスク化することでバンド構造を制御できることを明らかにした.今年度は、デバイス応 用の際に障害となる熱放出によるエネルギー損失に着目し、PPT 信号強度周波数依存性から 熱伝導率の評価を行ったところ、バルク Si の 10 分の 1 程度まで熱伝導率が低下したことが 分かった.これはデバイス応用に際して重要な知見であり、達成度は 9 割と判断する.

4. まとめと今後の課題

東北大流体研の作製技術によって欠陥の少ない規則配列ナノディスクを作製することがで きること、宮崎大の各種評価技術によってそれらのバンド構造および熱的特性の詳細評価が 可能であることが示された. 今後はデバイス応用を推進するため、ナノ構造と熱的特性の関係 性に焦点を絞って新たな共同研究を展開する.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [1] <u>松田真輝</u>, 大堀大介, 寒川誠二, <u>碇哲雄</u>, <u>福山敦彦</u>: 無欠陥 Si ナノピラー構造のキャリア 再結合過程評価, 平成 30 年秋季第 79 回応用物理学会学術講演会, (2018), 21p-PB4-2.
- \*[2] N. Matsuda, T. Nakamura, D. Ohori, S. Samukawa, T. Ikari, A. Fukuyama: Optical properties of Si nanopillar/Si0.7Ge0.3 composite film fabricated by using a neutral beam etching technique, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-46, pp. 94-95.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I019
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1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\*†, 高木 敏行\*\*††, 小助川 博之\*\* 三木 寛之\*\*\*, 小平 裕也\*\*\*\*, 長野 純季\*\*\*\*, 楠 秀遥\*\*\*\* \*信州大学工学部, \*\*東北大学流体科学研究所 \*\*\*東北大学学際科学フロンティア研究所, \*\*\*\*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

図1に CFRTP と A5052 の接合部品の概略図を示す. また, 図2に CFRTP と A5052 の 接合品の外観写真を示す.





図1: CFRTP と A5052 の接合品の概略図

図 2: CFRTP と A5052 の 接合品の 外観 写真

超音波映像装置を用いて CFRTP-A5052 接合体界面の超音波映像観察の可能性について 検討した.超音波探傷試験の検査方向を図3に示す.CFRTP-A5052 板材接合体の探傷を CFRTP 側,A5052 側から実施した.ストレート溝,テーパー溝サンプルの観察を50MHz の探触子で実施した.



図3:検査方向

図 4: CFRTP 側からの観察(15MHz) 図 5: A5052 側から探傷(50MHz)

CFRTP 側からの観察では、15MHz の探触子で観察可能であるが、全体波形ゲートでは CFRTP 母材のみの画像しか得られず、界面にゲートをかけた場合には母材の欠陥に影響さ れるが、ある程度観察可能であった(図4). A5052 側からは 50MH z の探触子である程度 観察可能であった. 接合界面にゲートをかけることである程度観察可能であるが、CFRTP 材はもちろん、アルミ素材にも欠陥があり観察しにくいサンプルであった(図5). 0.1mm 程度の欠陥を確実に探傷するのは現状の母材の程度から困難であった.

#### 3. 研究目標の達成状況

試験片の探傷実験を実施したが、0.1mm 程度の欠陥を確認することができなかったため 30%の達成であると考えられる.

4. まとめと今後の課題

CFRTP の塑性加工における内部欠陥の発生メカニズムを明らかにすることで、内部欠陥 のない CFRTP 製の製品を成形することが可能となる.本年度の成果では内部欠陥を確認す ることが困難であったため、今後も探傷方法を検討しなければならない.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- \*[1] 小平裕也,小林信彦,小平直史,西條甲一,武井敦子,中山昇: CFRTP の熱膨張を利用したアルミニウム合金との異種接合,塑性と加工, Vol. 59, No. 690 (2018), pp. 135-140.
- [2] <u>中山昇</u>, <u>小平裕也</u>: CFRTP とアルミニウムの接合技術, プラスチック・エージ, 3 (2019), pp. 34-39.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[3] <u>Yuya Kodaira</u>, Toshiyuki Takagi, <u>Hiroyuki Miki</u>, Hiroyuki Kosukegawa, <u>Noboru</u> <u>Nakayama</u> : Internal defect of plastic-fabricated Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-38, pp. 78-79.
- [4] 小平裕也,小林信彦,小平直史,西條甲一,武井敦子,中山昇:熱膨張した熱可塑性 CFRP の曲げ特性の評価,平成 30 年度塑性加工春季講演会,東京,(2018), pp. 299-300.
- [5] 小平裕也,小林信彦,小平直史,西條甲一,武井敦子,中山昇:オートクレーブ成形した熱可塑性 CFRP の熱膨張と強度評価,第69回塑性加工連合講演会,熊本,(2018), pp. 57-58.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

課題番号	J18I020
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2年目

Me-DLC ナノ構造によ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 Me-DLC Nano-Composite Coatings Acting as Thermo-Sensor in the Sliding Interface

後藤 実\***†**, 高木 敏行\*\***††** 

伊藤 耕祐\*\*\*, 三木 寛之\*\*\*\*, 小助川 博之\*\* \*宇部工業高等専門学校機械工学科, \*\*東北大学流体科学研究所 \*\*\*日本大学工学部, \*\*\*\*東北大学学際科学フロンティア研究所 †申請者, **†**所内対応教員

1. 研究目的

軟質金属と各種 DLC マトリクスからなるナノ複合硬質炭素膜(Me-DLC)のナノ構造に よる膜の電気抵抗率の温度依存性を明らかにし、摩擦界面における界面温度その場観察機能 を有する自己潤滑性薄膜しゅう動材料創製の可能性を探求し、過渡的な摩擦・摩耗過程にお ける摩擦界面反応の精密な制御を可能にすることで、Me-DLC しゅう動材料を使用したしゅ う動機構の高精度な設計手法の確立に資することを目的とする.水素非含有 DLC マトリク ス中に銀および銅を分散した Me-DLC の成膜と膜組成・構造評価は山口大微細加工プラッ トフォームおよび JST 拠点機器を使用し、電気的特性評価は東北大学の機器を利用する.

2. 研究成果の内容



図1:Ag-DLCおよびCu-DLCの金属含有量に対する抵抗率(大気中室温)

流体科学研究所高木研究室所有の4探針薄膜抵抗率測定装置を使用し、報告者が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水素非含有のAg-DLCおよびCu-DLCの金属含有量に対する抵抗率を求めた.その結果を図1に示す.軟質金属を含まない水素非含有DLCの抵抗率は10<sup>2</sup>Ωcm台であるが,Ag-DLC,Cu-DLC共に金属含有量の増加に伴い抵抗率は減少する.しかし、Cu含有量に対する抵抗

率減少率がほぼ一定であるのに対し、Ag-DLC は Ag 含有量が約 30 at.%付近で抵抗率減少率が急激に増加する結果となった. Cu-DLC の抵抗率は Cu 含有量 75 at.%付近で  $6 \times 10^{-4}$  Ωcm であるが、Ag-DLC は含有量 50 at.%付近で純銀膜とほぼ同等の  $10^{-6}$  Ωcm 台であった.

DLC 中の Ag および Cu の含有量に対する抵抗率変化挙動の差を調査するため,透過電子 顕微鏡 (TEM) による Me-DLC 膜断面のナノ構造観察を実施した. その結果を図 2 に示す. その結果, Ag または Cu 含有量が 50 at.%を越える Me-DLC の表面には添加した Ag または Cu による表面偏析層が形成されることを確認した. 50 at.%台の金属含有量において, Ag 偏析層は Cu 偏析層の 3 倍以上の厚さの連続膜であったが, Cu 偏析層は薄い不連続膜であ った. 従って, Ag-DLC, Cu-DLC 共に金属含有量の増加に伴って不連続な表面偏析層が形 成され, 偏析層の増加に伴って不連続膜から連続膜に変化し,見かけの抵抗率が急激に低下 したものとみられる.



図2:Me-DLC 薄膜断面の透過電子顕微鏡観察による Ag および Cu 表面偏析層

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に対する Me-DLC 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

Me-DLCのナノ構造と電気的性質の関係を表面偏析層に着目して調査した. 添加金属による表面偏析層が生じない添加濃度限界を明らかにすることが今後の課題である.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- \*[1] <u>Minoru Goto</u>, Toshiyuki Takagi, <u>Kosuke Ito</u>, <u>Hiroyuki Miki</u>, Hiroyuki Kosukegawa: Study on the function of Me-DLC nano-composite coatings acting as thermo-sensor in the sliding interface, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-33, pp. 68-69.
- [2] <u>後藤実</u>, <u>丸山将尚</u>: 軟質金属/DLC のナノ複合構造がトライボフィルムの形成と摩擦挙動に 与える効果, トライボロジー会議 2018 秋伊勢志摩予稿集, (2018), USB 配布 C26.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I021
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	2018.4 ~2019.3
継続年数	3年目

氾濫流・津波の伝播解析における不確実性影響の高精度評価技術の確立 Accurate/Efficient Uncertainty Quantification for Tsunami Inundation Flows

> 山﨑 渉\*†,下山 幸治\*\*††,大林 茂\*\* \*長岡技術科学大学工学部,\*\*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

近年数値解析において不確実性を考慮し、不確かさを持つ入力の影響を含めた解析を行う 不確実性解析技術が注目されている.数値解析は元来決定論的であるが、現実問題では初期 条件の変動やモデルパラメータのばらつきなどにより不確実性が生じうる.本研究で対象と する津波氾濫流について言えば、初期条件の水深・流速分布や海底地形データなどを不確か な入力変数と考える事ができる.不確実性解析の実行により、これまで単純にスカラー値と して得られていた任意の出力変数について、その平均・標準偏差・確率密度関数などを得る ことができる.これにより、より高度な津波氾濫流の災害予測が可能になると考えられる事 から、不確実性を考慮した津波氾濫流の数値シミュレーション技術を成熟させていくことに は、安全工学的な側面からも意義がある.

本研究課題ではこれまでに、多項式カオス法に基づいて津波氾濫流の支配方程式である2 次元浅水流方程式を不確実性の伝播も含むように拡張し、その拡張された支配方程式を直接 解くことで効率的な不確実性解析を実現できる事を示している.この開発手法を用い、実地 形データを用いた問題設定において不確実性解析を行い、その妥当性及び有効性について検 討した.

#### 2. 研究成果の内容

図1に示す新潟県長岡市の実地形データ(16×8km<sup>2</sup>)を用いた解析を行った.本問題で は海底の一部が瞬間的に隆起したと仮定した時のその後の津波の伝播についての解析を行 ったものである.この時の隆起の最大高さが平均 5m,標準偏差 1mの正規分布の不確実性 を有していると設定して,その影響に関する不確実性解析を行った.図2には解析初期条件 における水面高さ座標の平均値(μ)分布と水深の標準偏差(σh)分布を示した.解析開始時に隆 起している範囲の海底地形座標に不確実性が与えられ,その影響が時間の進行と共に水深や 流速といった変数にも伝播していく事になる.隆起から 500 秒後(海水が陸地側へ最も遡上 しているタイミング)の可視化図を図3に示した.遡上している海水の領域において,水深 が不確実性を有している事が確認できる.隆起した範囲においても強い不確実性が見られる が,これはその範囲の海底地形座標に与えられている不確実性を相殺し,平坦な海面を維持 するために生じているものである.このような不確実性を考慮した解析結果からは,各地点 での浸水確率を評価する事が可能であり,確率的なハザードマップ作成が可能である.本解 析結果から作成した浸水確率分布を図4に示す.今回の条件設定においては,100%浸水す る範囲と決して浸水しない範囲の間には数百メートル程度の幅が生じる事が確認できる.



図3:隆起500秒後の可視化図

図4:浸水確率分布可視化図

# 3. 研究目標の達成状況

当初の予想される成果として「浸水確率などを考慮した高度なハザードマップの作成」を 掲げていたが、上記の通り現実的な問題においても確率的なハザードマップ作成が効率的に できる事が示されており、当初の研究目標としては十分に達成された状況にある.

4. まとめと今後の課題

本研究では、二次元浅水流方程式を用いた津波氾濫流解析において、効率的な不確実性解 析を実現できる手法を開発した.実地形を用いた問題設定において確率的なハザードマップ を効率的に作成できることを確認しており、その有効性が示された.今後は複数の不確実性 入力を考慮して、更に現実的な問題設定に拡張していく予定である.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- W. Yamazaki, T. Kato, T. Homma, K. Shimoyama, S. Obayashi: Stochastic Tsunami Inundation Flow Simulation via Polynomial Chaos Approach, *Journal of Fluid Science* and Technology, Vol.13, Issue 4 (2018), p.JFST0025.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[2] <u>W. Yamazaki, T. Kato</u>, K. Shimoyama, S. Obayashi: Probabilistic Tsunami Inundation Hazard Map via Uncertainty Quantification Approaches, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-59, pp. 120-121.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I022
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	3年目

実験的・数値的解析によるマルチコプタの飛行性能向上に関する研究 Experimental and Numerical Study on Improvement of Flight Performance of a Multicopter

> 佐々木 大輔\*†,下山 幸治\*\*††,大林 茂\*\* 岡本 正人\*,赤坂 剛史\* 高橋 俊\*\*\*,三坂 孝志\*\*\*\* \*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,\*\*\*産業技術総合研究所 †申請者,††所内対応教員

# 1. 研究目的

近年注目を集めているマルチコプタ(ドローン)は、橋梁の点検や災害の監視等、様々な用途 での使用が始まりつつあるが、問題点も多く指摘されている. その一つが、運用時間の制限であ る.運用時間を延ばすためには、低レイノルズ数における回転翼周りの流れ場や機体近傍の複雑 な流れ場の理解が必要である.本研究では、マルチコプタの飛行性能向上を目的として、実験的・ 数値的に低レイノルズ数の流れ場の解明を行う手法を研究する.

#### 2. 研究成果の内容

近年注目されている超小型のドローンにおいては、非線形性の現れる低レイノルズ数での CFD 解析及びその検証のための実験が不可欠である.本年度、揚力曲線等に非線形性が現れる低アスペクト比翼の流体解析を昨年度に引き続き低レイノルズ数下で行った.特に翼端付近の格子解像 度を広く改善することで、図1に示すように翼端渦の効果をより正確に捉えることが可能となり、 失速迎角が実験値に近づく傾向が得られた.また、レイノルズ数 3,000 及び 10,000 での解析により、揚力曲線の傾向の相違を捉えられることを示した.



図1:レイノルズ数10,000 での矩形翼における翼上面及び翼端渦の様相 (左:迎角24度,右:迎角36度)

#### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、超小型のドローン等の飛行性能の向上を目的として、低レイノルズ数における低ア スペクト比矩形翼の空力特性解明のために必要となる解析手法の構築を行った。低レイノルズ数 下では流れ場が非常に複雑であることから、空力性能を正確に解析するためには、物理的な現象 を解像するための十分な格子密度が必要である。そのため、回転翼までの解析を実施するには至 らなかった。

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、特に超小型のドローン周りの流れ場を詳細に解明できる解析ツールの実現を目的 として、低レイノルズ数での流れ場解析を行った.アスペクト比1の矩形翼に対し、翼端付近の 解像度向上により、翼端渦がより正確に捉えられるようになり、高迎角での失速を防ぎ揚力の向 上の原因が翼端渦であること明らかにした.また、レイノルズ数を変化させることによる揚力特 性の変化も解析で捉えられた.今回の研究より、翼端を始めとして渦を解像するだけの十分な格 子解像度が必要であることは明らかである.そのため、超小型ドローンの回転翼周りの流れ場を 直交格子で詳細に解明するためには膨大な時間が必要となることから、回転翼を精度良く解析す るためには効率的な手法の検討が必要である.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[1] D. Sasaki, T. Miwa, Y. Yamaguchi, Y. Natsume, T. Iwafune, R. Fujii, T. Akasaka, M. Okamoto, S. Takahashi, T. Misaka, K. Shimoyama and S. Obayashi: Experimental and Numerical Investigation of Flow Phenomena Associated with Low-Reynolds Number Flow, Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-11, pp. 22-23.
- [2] Y. Yamaguchi, D. Sasaki, M. Okamoto, K. Shimoyama and S. Obayashi: Numerical Investigation of Geometrical Corrugation Influence to Vortex Flowfields at Low-Reynolds Number, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS18-52, pp. 958-959.
- \*[3] 山口裕也, 岡本正人, 佐々木大輔, 下山幸治, 大林茂: コルゲート翼における凹凸が空力性 能に与える影響の数値解析, 第50回流体力学講演会/第36回航空宇宙数値シミュレーショ ン技術シンポジウム, (2018).
- [4] <u>鹿田侑右,岩船翼,岡本正人,佐々木大輔</u>,小島貴哉,焼野藍子,下山幸治,大林茂:高揚 力翼型に対する CFD 解析における初期値の影響,日本機械学会北陸信越支部第56 期総会・ 講演会,(2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J18I026
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

Research on Surface Modification of OLED Materials via Neutral Beam Technology

Xijiang Chang \*†, Seiji Samukawa\*\*††

\*College of Electronic and Electric Engineering, Shanghai University of Engineering Science

> \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

Neutral beam technique has the advantages of low surface plasma induced damage, neutral beam energy controllable and low processing temperature so it is expected that low damage and accuracy controlled surface modification can be processed. Here we want to apply this technique on the surface modification of materials used for OLED. This is the first trying of NB technique on the OLED field.

2. Details of program implement

Reserch plan (in application): The neutral beam surface modification processing will be studied theoretically and experimentally. Some film properties like material composition, surface roughness, hydrophilic/hydrophobic, work function will be investigated with plasma neutral beam surface modification. For different film properties requirements, suitable processing recipes will be summaries with previous results. At last the neutral beam surface modification will be applied on organic light emitting device fabrication.

As the actural performance of this program, Dr. Chang visited Prof. Samukawa in Sendai in Aug., 2018, discussing about the exprimental plan. As the discussion, we modified priliminary expeiment on the plasma surface modification on orgarnic material/coatings and the following work were performed as the discussion. This change is due to experimental setup limitation in Chang's laborotary because most experiments were performed in Chang's lab. in Shanghai University of Engneering Science. As the target materials, h-BN nanoflakes and silicone-modified epoxy coatings were selected and treated with different plasmas. The experimental equitpment was homemade surface-wave plasma generator designed by Dr. Chang, which would be modified into neutral beam equipment with guidance of Prof. Samukawa for the future NB related experiments.

Silicone-modified epoxy coatings were prepared and treated under different plasma atmospheres in order to enhance their anticorrosion ability. The corrosion current density, corrosion potential and impedance of the modified coatings were measured by an electrochemical workstation. The results showed that the corrosion resistances of silicone-modified epoxy coatings were highly improved by surface-wave plasma treatment. Figure 1 is from accepted paper to explain this part.



Figure 1: Corrosion resistance mechanisms of the plasma-modified coatings on metal substrate.

h-BN nanoflakes were treated in plasma gase for surface modification. The structure characterization (XRD, IR, XPS etc.) of h-BN indicated that the plasma treatment not only enlarged the interlayer distance of h-BN, but also increased the NH/OH surface groups and the ratio of exfoliated h-BN planes. The plasma treated h-BN exhibited better dispersion and stronger Fe<sup>2+</sup> holding ability in acrylic resin than the pristine h-BN, resulting in smaller corrosion current density (icorr) and larger charge transfer resistance for the acrylic coating on low carbon steel, especially treated in Ar+NH<sub>3</sub> (4:1).Figure 2 is from accepted paper to explain this part.



Figure 2 : Sketch of h-BN change by plasma treatment.

As the experimental results, two manuscripts were finished and submitted, and already accepted in journal *Prog. Org. Coat.* (IF=3.05) and *Int. J. Electrochem. Sc.* (IF=1.54), separately.

#### 3. Achievements

Expected result (in application): New processing with neutral beam for OLED device will be created to enhance the device performence. The experimantal phenomenon will be studied theoretically. As the achievement, 2~3 paper will be published and patents are expected.

Actual result: As preliminary research, plasma surface modification has been applied on organic materials/coatings and the phenomenons have been discussed. Two papers have been accepted in journals.

# 4. Summaries and future plans

In this project, h-BN nanoflakes and silicone-modified epoxy coatings are selected as target materials for plasma surface modification experiments. The experiment plans were discused by researchers both in IFS and SUES and performed successfully. Two papers have been accepted.

Now the Cooperation continues and the next step is to modify the equipment with the neurtral beam function. When the setup is ready, the NB experiments will be processed and some parts we originally planned for the OLED materials will be tested and studied.

# 5. Research results (\* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- \*[1] <u>B. Zou, X. Chang, J. Yang, S. Wang, J. Xu, S. Wang</u>, S. Samukawa and <u>L. Wang</u>: Plasma treated h-BN nanoflakes as barriers to enhance anticorrosion of acrylic coating on steel, *Prog. Org. Coat.*, 133 (2019), pp. 139–144 (Accepted April 9, 2019).
- [2] <u>T. Xu, H. Li, J. Song, G. Wang</u>, S. Samukawa, <u>X. Chang</u> and <u>J. Yang</u>: Enhanced corrosion resistance of silicone-modified epoxy coatings by surface-wave plasma treatment, *Int. J. Electrochem. Sci.*, (2019), (Accepted March 29, 2019), doi: 10.20964/2019.06.18.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. Not applicable.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I027
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	2nd year

# Application of Nanostructured Surfaces to Enhance the Thermal Performance of Heat Pipe

Peng Zhang\*†, Hiroki Nagai\*\*†† \*Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

# 1. Purpose of the project

Slippery superhydrophobic and hydrophobic surfaces are introduced for performance enhancement of heat pipe that is widely used to dissipate high heat fluxes at larger scale industries. And thermal performance as well as heat transfer mechanism on condensing surface of heat pipe are experimentally investigated, leading to further applications, such as water harvesting, fog collection or icing/anti-icing, etc. Furthermore, the durability analysis of as-prepared surfaces is underway, which is aimed at resolving the cloaking challenges.

# 2. Details of program implement

Slippery surfaces can be prepared on a number of substrates using various slippery materials, including paraffinic materials, fatty acids and high viscosity GPL oil. As a preliminary plan, paraffinic materials, is used. Indeed, paraffinic materials are environmentally-benign, hydrophobic and oily, so they are potential candidates in domain of SLIPS. Following that, the SLIPS will be tested as condensing surfaces to understand temperature-dependent switchable wettability, nucleation density and droplet transport. Since the surface condition of paraffinic surfaces apparently seems to be different than that of less-viscous GPL oils, condensation mechanism is necessary to be evaluated as if it would be drop wise or film wise. The formation of pores onto the substrates can have different configurations, e.g., individual cylinder-like pores as obtained via anodizing process on steel substrate, or connected porous network as obtained via chemical etching on copper substrate. Consequently, the quality of SLIPS is prone to be affected by the geometry of porous structures. Therefore, substrates consisting of individual pores and network of pores was also be researched. This would provide understanding on durability of SLIPS, as well as droplet dynamics on various porous configurations.

Shown in Figure 1A and Figure 1C are the test facilities to study the performance of heat pipe and condensation heat transfer, respectively.



Figure 1 (A) The schematic of condensation heat transfer unit (B) Condensation patterns on paraffinic slippery surfaces, (C) Thermosiphon test facility.

#### 3. Achievements

The group at Tohoku University headed by Prof. Nagai has done intensive research about SLIPS and the corresponding applications in heat pipes. And the group at Shanghai Jiao Tong University headed by Prof. Zhang has conducted systematic research on SLIPS and reported enhanced performance of thermosiphon heat pipes. Further his team has carried out work regarding fabrication of SLIPS by applying paraffin waxes into porous superhydrophobic copper substrates, that provided satisfactory condensation patterns as shown in Figure 1B.

4. Summaries and future plans

From the research conducted so far, it has been proved that the nanostructured surface can be used in a thermosyphon to enhance the thermal performance. With quantative optimization of paraffin wax to surface voids, spin coating reported more uniform surfaces as compared with dip coating method. Paraffinic SLIPS provided no cloaking as predicted by theoretical models and FTIR analysis, however cloaking took place during preliminary condensation experiments, which will be studied in the future.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] <u>Raza Gulfam</u>, <u>Peng Zhang</u>, Hiroki Nagai: Heat transfer investigation of hydrophobic organo-metallic slippery surfaces, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, (2018), CRF-21, pp. 42-43.
- 3) Patent, award, press release etc.
  - (Patent) Not applicable.
  - (Award) Not applicable.
  - (Press release) Not applicable.

Project code	J18I028
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

Mixture of Experts in Bayesian Optimization for Complex Aerospace Designs

Rhea P. Liem\*†, Koji Shimoyama\*\*†† Pramudita Satria Palar\*\*, Timothy Jim\*\*, Yuan Lyu\* \*Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Hong Kong University of Science and Technology (HKUST), Hong Kong \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The main goal of the proposed research is to improve surrogate model's accuracy and sample-updating technique used in the context of the Bayesian optimization technique. In particular, we aim to make kriging and Gaussian Process surrogate models more capable of accurately and efficiently represent real-world engineering problems. This will be achieved by incorporating machine learning techniques in the procedure. To this end, we propose to construct an ensemble of Kriging surrogate models (mixture of experts), and a kriging model with multiple kernel functions, to provide better flexibility in modeling the engineering problem complexities. The developed method would then be demonstrated in two case studies in the context of aerospace engineering.

2. Details of program implement

We identify two main research directions: (1) benchmarking & method development, and (2) applications. For the application purpose, we are looking into aircraft mission analysis (HKUST) and supersonic system design analysis (Tohoku). These two case studies are still under development by the graduate students involved in this project, and thus we focus more on the benchmarking and algorithmic development. For the surrogate modeling development, we compared the performances of kriging model with multiple kernel learning (MKL) and the mixture of experts approach. The benchmarking data are from a transonic rotor problem (Fig. 1, from Tohoku University) and drag coefficient for a transonic aircraft (Fig. 2, from HKUST).

Gaussian		Gaussian	
Exponential	++++ +[•	Exponential	F ++ F
Matern-3/2	+ +++	- Matern-3/2	· ++ +++
Matern-5/2	+ + + + + + + + + + • +	- Matern-5/2	· +++ ++++
Cubic	+ + +++++++++++++++++++++++++++++++++++	- Cubic	- ⊦₩ ₩+ ⊢−-[●_]+ -
MKL-G,E,M3,M5	+ ++++	MKL-G,E,M3,M5	
MKL-G,E,M3,M5,C		MKL-G,E,M3,M5,C	+++ + ₩+ ⊢−− <b>@</b> ]+ -
MKL-E,M3,M5	ਮ∏∎−−⊣++++ +	MKL-E,M3,M5	+++ ++++[•]+ -
Best-AIC	+ ++ ++++ +	Best-AIC	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
Global-AIC	++ ++ ++ ⊢ – – – <b>_ ● _ )</b> +	- Global-AIC	· ++ +++++
Global-CV	++++ +++ { • }	- Global-CV	· ++ +++++ ⊢− <b>●</b> ]+ -
Best_CV	+ + + + +++++++++++++++++++++++++++++++	Best_CV	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
0	0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1	C	0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1
	R <sup>2</sup>	L	- R <sup>2</sup>

Fig 1. Results for the transonic rotor problem with  $nugget = 10^{-10}$  (left) and tuned nugget (right)



Fig 2. Results for the  $C_D$  approximation problem with nugget =  $10^{-10}$  (left) and tuned nugget (right)

From these results, we observe that MKL is shown to be more superior than conventional kriging model, especially on the transonic rotor problem with a large sample size. The MKL algorithm can optimally select the kernels to be included in the model; often, not all kernels are used. Work to include more case studies and using mixture of experts are currently underway.

#### 3. Achievements

During the project period, we submitted one conference paper, and are working on two journal articles.

#### 4. Summaries and future plans

The second IFS General Collaborative Research Project is granted (J191003). We will still focus on improving the accuracy and efficiency of surrogate modeling methods, focusing on those derived based on the Gaussian Processes, e.g., kriging and RBF. Our key motivation is the existing "gap" between the algorithmic development community (which is more mathematical and scientific) and the engineering community (more practical). Some of the more mathematically advanced methods might not be directly applicable to real-world problems. Likewise, some real-world problem complexities have not yet been properly modeled by existing surrogate modeling methods. Real-world engineering problems are typically stochastic in nature (with uncertainties and variations in operating conditions), multidisciplinary, and highly nonlinear. Moreover, the linearity and function characteristics may vary in the design space. Considering the limited capability of conventional kriging methods, we aim to develop kriging variants that offer more flexibility and thus are more suitable for the complex problems at hand. The variants would include using multiple kernels in the model structures, and incorporating the machine learning ensemble approach to derive the mixture of experts model. The proposed methods are aimed to combine the strength of each expert in order to boost the approximation accuracy and the search capability of Bayesian optimization. Next, we would apply the developed novel surrogate modeling methods in two case studies, one from each collaborating university. We expect to have more substantial research outputs in the following years.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal Not applicable.
- International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. Not applicable.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I029
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	2nd year

Discharge Phenomenon in Laser-Induced Bubble and Formation Mechanism of Microjet by Cavitation Bubble

> Takehiko Sato \*†, Mohamed Farhat \*\*†† Outi Supponen \*\*, Kiyonobu Ohtani \* Tomoki Nakajima \*, Takahito Akimura \*\*\* \*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL) \*\*\*Graduate School of Engineering, Tohoku University †Applicant, ††non-IFS responsible member

# 1. Purpose of the project

This project aims to elucidate the micro-jet formation occurring in the last stage of the primary and rebound bubble collapse processes of cavitation bubbles. 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

We have reported that an expansion wave generated by reflection of a compression wave at the surface of water produces cavitation bubbles and form the micro-jets when the bubbles collapse. It was also found that the direction of the micro-jets becomes the same direction of propagation of the secondary compression wave through the past collaborative research. To understand the interaction between cavitation bubbles and pressure waves in detail, the temporal change of the bubble radius is compared with the Rayleigh-Plesset model with adding the effect of propagating pressure waves, which is expressed as Eq. (1):

$$\rho\left(R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2\right) = p_B - p - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R}\dot{R}$$
(1)

where,  $\rho$  is the liquid density, R is the bubble radius,  $p = p_{\infty} + p_{wave}$  is the pressure around the bubble,  $p_{\infty}$  is the pressure in liquid,  $p_{wave}$  is the pressure of pressure waves,  $\sigma$  is the surface tension, and  $\mu$  is the liquid viscosity.  $p_B = p_g + p_v$  is the pressure inside the bubble, where  $p_v$  is the vapor pressure and  $p_g$  is the non-condensable gas pressure inside the bubble. Based on the pressure measurement in the past study,  $p_{wave}$ is simplified by a square function of a pulse width of 90 ns, the first amplitude of 16 MPa, and the reflection ratio from the water surface and the alumina plate is assumed to 70 % and 82 %, respectively. Assuming adiabatic compression,  $p_g$  is expressed as Eq. (2):

$$p_g = p_{g_{ini}} \left(\frac{R_{ini}}{R}\right)^{3\gamma} \tag{2}$$

where,  $p_{g_{ini}}$  is the initial pressure of the non-condensable gas inside the bubble,  $R_{ini}$  is the initial radius of the bubble, and  $\gamma \approx 1.33$  is the adiabatic index of the non-condensable gas inside the bubble.  $p_{g_{ini}}$  is determined by the initial equilibrium condition before the pressure wave propagation, expressed as Eq. (3):

$$p_{g_{ini}} = p_{\infty} - p_{\nu} + \frac{2\sigma}{R_{ini}} \tag{3}$$

This model agrees with the observation until the 5th pressure wave, as shown in Fig. 1.



Fig. 1: The temporal change of the bubble radius (circle). The dotted (red) and dashed (blue) lines indicate the timing of the compression and expansion wave's propagation, respectively. The arrows indicate each pressure wave's directions, respectively. The solid (green) line indicates the calculation result of Eq. (1).

3. Achievements

We succeeded in understanding the mechanism of the directed jetting of the cavitation bubbles under application of the multiple shock waves through the theoretical approach. We have published this research in the *Applied Physics Letters* in 2018.

4. Summaries and future plans

We will discuss and investigate behaviors and dynamics of micro-jets formation for development of a micro-jets array system for bio-medical applications such as micro injection system for cells.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- \*[1] <u>O. Supponen</u>, T. Akimura, T. Minami, T. Nakajima, S. Uehara, K. Ohtani, <u>T. Kaneko</u>, <u>M. Farhat</u>, and T. Sato: Jetting from Cavitation Bubbles due to Multiple Shockwaves, *Applied Physics Letters*, Vol. 113, Issue 19, (2018), 193703 (4 pages).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- \*[2] T. Akimura, T. Minami, <u>O. Supponen</u>, T. Nakajima, S. Uehara, K. Ohtani, <u>T. Kaneko</u>, <u>M. Farhat</u>, and T. Sato: Directional control of micro-jets from cavitation bubbles subject to multiple pressure waves, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, (2018), CRF-71, pp. 148-149.
- [3] T. Sato, R. Kumagai, <u>T. Miyahara, M. Oizumi, T. Nakatani, S. Ochiai, T. Miyazaki, H. Fujita, S. Kanazawa</u>, K. Ohtani, A. Komiya, <u>T. Kaneko</u>, T. Nakajima, <u>M. Tinguely</u>, and <u>M. Farhat</u>: Generation of Fine Bubbles by Underwater Plasma Discharge, 28th Annual Meeting of MRS-Japan 2018 (Symposium C-2: Plasma Life Science), Fukuoka, (2018), Presentation No. C2-I19-008. (Invited)
- 3) Patent, award, press release etc.
  - (Patent) Not applicable.
  - (Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

Project code	J18I030
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

# Thermodynamic Property Gradients in Near-Surface Water Thin Film and its Impact on Liquid Flow in Microlayer

Shalabh C. Maroo\*†, Takashi Tokumasu\*\*†† Manish Gupta\*, An Zou\* \*Department of Mechanical Engineering and Aerospace Engineering, Syracuse University \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

# 1. Purpose of the project

In this work, we aim to study the interfacial properties of thin liquid water film over metallic surface using Molecular Dynamics (MD) simulations in LAMMPS (S. J. Plimpton, J Comp Phys, 117, 1-19 (1995)). There are considerable evidences that properties of liquid water are significantly different at nanoscale. The interfacial properties of liquid water plays an essential role in many nanofluidic transport systems and depend on the surface properties, such as atomic interaction, chemical heterogeneity, etc. We focus on density and pressure gradient, and also explore the effect of hydrophilicity of surface. Understanding these properties will provide useful information about bubble nucleation and growth, and change in viscosity and thermodynamics properties.

2. Details of program implement

For simulations, we used Molecular Dynamics (MD) method with widely used open source software LAMMPS. The bulk liquid consists of 10 nm thick water layer over solid platinum surface (figure 1). The system is periodic in other two dimensions. The initial density of water corresponds to the saturation properties of water at 300 K.

Liquid water is modelled with SPC model over solid rigid surface at constant



Figure 1: Simulation domain for water platinum surface.

temperature with Nosé–Hoover thermostat at 300 K. The system is first equilibrated and then pressure and density profiles were calculated by dividing the domain into spatial bins of 0.2 nm. The solid-liquid interaction is modelled using Lennard-jones (12-6) potential function. Since the depth of potential well ( $\varepsilon$ ) represents the strength of interaction, we changed it from very hydrophobic ( $\varepsilon$  o-Pt = 0.086 kcal/mol) to hydrophilic ( $\varepsilon$  o-Pt = 1.0 kcal/mol) and observed the behavior in near surface region.

3. Achievements

The density and pressure variations near the surface are plotted in Figure 2 (b) and Figure 2 (c). We observed that when the wall is present, a high density layer of water is formed. The density of this layer increases with increasing strength of wall-liquid interaction ( $\varepsilon_{\text{O-Pt}}$ ). The bulk density in all cases remain equal to the saturation density of water at 300 K. The change in pressure can also be seen in the near wall region. A high pressure region forms for hydrophilic surfaces.

This effect is more dominant for polar surfaces as the long-range electrostatic forces are usually stronger and would cause thick high pressure region on the wall.



Figure 2: (a) Density gradient near surface and (b) pressure gradient near surface, for different hydrophilicity.

4. Summaries and future plans

Interfacial properties of thin water film is studied using molecular dynamics simulations. High density and pressure is found in monolayers near the surface. This effect becomes more dominant as strength of liquid-surface interaction is increased. Solid-liquid surface tension, disjoining pressure and their possible impact on nucleation and thermodynamics properties can be studied using this method. The change of water properties with electrostatic interaction between liquid water and polar surfaces will also be studied.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- \*[1] <u>M. Gupta, A. Zou</u>, T. Tokumasu, <u>S. C. Maroo</u>: Thermodynamic Property Gradients in Near-Surface Water Thin Film, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-35, pp. 112-113.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I031
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year (progressing)

# Multipoint Wind Turbine Blade Optimization by Utilizing Gradient Information for Maximum Power Coefficient

Lavi Rizki Zuhal\*†, Ghifari Adam Faza\*, Kemas Zakaria\* Pramudita Satria Palar\*\*, Koji Shimoyama\*\*†† \*Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Bandung Institute of Technology \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

# 1. Purpose of the project

To increase the power production of a wind turbine, it is necessary to optimize the blade shape and configuration. However, the use of expensive CFD codes is necessary for accurate design and this hinders the utilization of traditional optimization methods. This research aims to develop an efficient surrogate model-based optimization for aerodynamic optimization of wind turbines. To be specific, the long term goal of this research is to develop a general optimization framework for wind turbine design. Here, the optimization framework should be capable of handling cases with and without gradient information; however, attaining the latter is our primary objective.

# 2. Details of program implement

We developed a set computer code for multi-objective optimization that utilizes Kriging and Bayesian optimization techniques. Here, such an optimization technique is necessary since the evaluation of one wind turbine design is computationally expensive. This is primarily because a RANS-based CFD is used to accurately obtain the aerodynamic performance of wind turbines. The optimization codes that we used in this research were jointly developed by Bandung Institute Technology and Tohoku University. In this phase, we focused on a single-point and gradient-free optimization because it is the necessary phase before we continue to gradient-based optimization. In this research, we used the NREL Phase VI as the baseline shape and a geometry/mesh deformation technique based on radial basis function (RBF) (see Fig. 1). Here, the objectives of the optimization are to maximize torque (thus, higher power production) and minimize the volume/mass of the blade.



Figure 1 : The initial blade shape and the RBF points used for deformation.

#### 3. Achievements

By using the developed optimization codes, we obtained a set of new blade shapes that yield higher torque and lower volume as compared to the baseline design as shown in Figure 2. This means that new shapes are capable of producing higher power but with fewer materials for production. In particular, the torque-optimized and volume-optimized design produces over 5% increase in torque and a 7% decrease in blade value, respectively. Further analysis shows that the new shapes generate higher span-wise lift primarily in the middle section of the blade (see Figure 3).



Figure 2 : Results of optimization depicted in the objective space of torque vs volume.



Figure 3 : Pressure distribution of the baseline shape and optimized shapes.

4. Summaries and future plans

The optimization was successfully executed for the single-point and gradient-free case. This is an important step toward multi-point and gradient-based optimization because the codes that were developed in this research will be enhanced to incorporate gradient information. Although gradient-based optimization is on our agenda, we are also developing a gradient-free surrogate-based optimization method that will be capable of solving high-dimensional problems.

- 5. Research results
- 1) Journal Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- \*[1] <u>Zuhal, L. R., Faza, G. A.</u>, Palar, P. S., & Shimoyama, K.: Multi-Objective Kriging-Based Optimization for High-Fidelity Wind Turbine Design, *AIAA Scitech* 2019 Forum, (2019), 0539 (11 pages).
- \*[2] <u>Zuhal, L. R., Faza, G. A., Zakaria, K</u>, Palar, P. S., & Shimoyama, K.: Optimal Wind Turbine Design with Multi-Objective Kriging-Based Optimization, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2018), CRF-1, pp. 2-3.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J18I032
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	3年目

# 高密度水素安全管理に関する連成解析 Coupled Analysis of High-Density Hydrogen Safety Management

# 石本 淳\*†, Alain Combescure\*\*††, 松浦 一雄\*\*\*, 桑名 一徳\*\*\*\*, 中村 裕二\*\*\*\*\* \*†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(α=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 95%である. 高圧水素タンクのき裂伝播現象を解析する上で必要となる連続体 力学理論,線形破壊力学理論の基礎,粒子法の一種である Peridynamics モデルによる材料 き裂伝ば解析を実施した.また,3分間高速充填連成解析システムの開発を行い,70MPa 高 圧水素高速水素漏えい現象に関する流体-材料連成コンピューティングにより漏洩水素の 濃度予測が可能となった.



図1 正方形初期欠陥を有する脆性平板に生じるき裂伝ばならびに水素漏えい現象に関する粒子法-Euler 連成解析結果

# 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関するシミュレーションを実施す る. また、水素以外の水蒸気の拡散挙動との比較検討を実施し、拡散挙動の相違に関して検 討を加える必要があることが判明し、今後の課題となった.

# 5. 研究成果(\*は別刷あり)

### 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] Jun Ishimoto, Toshinori Sato and <u>Alain Combescure</u>: Coupled particle and Euler method for leaked hydrogen-air mixing with crack propagation of pressure vessel, *Proceedings of the 8th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting*, The Watson Hotel in Manhattan, 22nd – 26th, April, (2018), New York, USA. [in USB memory]
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] Jun Ishimoto and <u>Alain Combescure</u>: Coupled analysis of high-density hydrogen safety management, *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics* (ICFD2018), Sendai, Japan, (2018), OS17-4/CRF-93, pp. 846-847.
- [3] Jun Ishimoto : Coupled FSI computing for resilient energy systems and disaster science, 2nd Workshop Lyon Center (Organized with ELyT Global and ELyTMaX, with INSA Lyon and IFS, Tohoku University), November 20th, (2018), Ecole Centrale de Lyon, France.
- [4] S. Obayashi, S. Samukawa, T. Takagi, <u>H. Wada, Y. Watanabe, M. Hashimoto, T. Iijima, P. Guy, L. Udpa</u>, Y. Hattori, H. Nagai, K. Shimoyama, M. Hirota, A. Yakeno, G. Kikugawa, A. Komiya, T. Okada, J. Ishimoto, T. Uchimoto, H. Kosukegawa : Multiscale Flow and Interfacial Transport Phenomena at Phase and Material Boundaries, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, Japan, (2018), CRF-J1, pp. 192-193.
- [5] <u>嶋田悟</u>, 石本淳, 落合直哉, <u>Alain Combescure</u>: 高圧容器のき裂伝ぱを伴う水素漏えい現象 に関する連成解析, 混相流シンポジウム 2018, (2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J18I034
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

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

> Yusuke Mukuhira\*†, Justin Rubinstein\*\*†† Jack Norback\*\*\*, Meihua Yang\*, \*\*\*\* \*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*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 challenge 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 entire reservoir. Meanwhile, geothermal fluid circulates or flows in the existing/nucleated fracture system where permeability varies depending on condition of each fractures. Geothermal fluid is extracted from those permeable fractures very locally throughout production well drilled into the specific part of reservoir.

Therefore, we need to have the best estimates of permeability for each fracture (local permeability) beyond representative permeability (global permeability). In addition, it is important to consider how the hydraulic properties can be affected by changes in the state of stress in the subsurface. This information is beneficial for design of geothermal energy extraction system and understanding of hydrology in the reservoir.

2. Details of program implement

Visiting Ph.D. student Ms. Meihua Yang has joined this project in October 2018. She has become a leading player in this project. She has started using the multi-physics based reservoir simulation model CFRAC which was provided by the US collaborators. She uses the CFRAC to simulate the pore pressure distribution within the existing fracture of given permeability during stimulation and time series change of the pore pressure distribution of that.

I have estimated pore pressure distribution with microseismic data from Basel EGS project. Group of events (clusters) which occurred from the same single fracture are extracted, and pore pressure increase necessary for shear slip is estimated with insitu stress information. Then, I have observations that describe how pore pressure migrated within a single fracture. Since these observations are from the microseismic event, I can extract time series evolution of pore pressure and get a discrete distribution of pore pressure with time.
Therefore, we will use parameters from observational data as input parameters into hydromechanical model and estimate the best permeability which explain observed pore pressure distribution.



Figure 1: Left: model setup in a plan view. Horizontal line is the part for injection well. Orthogonal grey line is the existing fracture intersecting injection well. Right: Pore pressure distribution in the injection well and within the existing fracture.

3. Achievements

The project is ongoing a little bit behind schedule. We can estimate pore pressure distribution on very simple fracture model as Figure 1. We are working on the parameter study to estimate pore pressure distribution correctly.

4. Summaries and future plans

With the CFRAC code, we could simulate pore pressure distribution on single fracture in the very simple model. In next year, we made a more realistic model to compare the observed pore pressure distribution, and then we inverse the permeability of the fracture by fitting forecasted pore pressure distribution and observed pore pressure distribution.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- \*[1] Y. Mukuhira, <u>J. H. Norbeck</u>, and <u>J. L. Rubinstein</u>: Estimation of Fracture Permeability by Integrating Microseismic Observational Data and Reservoir Engineering Modeling, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium* on Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-32, pp. 64-65.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J18I035
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目(発展)

# 分子散乱現象を考慮した固体高分子形燃料電池触媒層酸素輸送抵抗の解析 Analysis of Oxygen Transport Resistance in Catalyst Layer of Polymer Electrolyte Fuel Cell Based on Molecular Scattering Phenomena

中内 将隆\*, 馬渕 拓哉\*\*, 吉本 勇太\*\*\*, 金子 敏宏\*\*\*, 杵淵 郁也\*\*\*†† 武内 秀樹\*\*\*\*, 徳増 崇\*\*\*\*\*†

\*東北大学工学研究科, \*\*東北大学学際科学フロンティア研究所, \*\*\*東京大学工学系研究科 \*\*\*\*高知工業高等専門学校, \*\*\*\*\*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

固体高分子形燃料電池カソード側触媒層はプロトン,酸素が白金触媒へと供給されることで発 電が行われており,燃料電池発電効率を決定する重要な部材となっている.触媒層は細孔径が数 +-数百 nm となっており,その表面をアイオノマーと呼ばれる高分子薄膜が覆っている.電池 効率向上のため触媒層内部の物質輸送現象,特に酸素輸送メカニズムの解明が求められているが 詳細なメカニズムは明らかになっていない.そこで本研究では触媒層内部の酸素輸送メカニズム を解明するために,内部の輸送現象の支配要因であるアイオノマー膜表面における酸素分子の散 乱・表面拡散現象を明らかにした上で触媒層内部の酸素輸送機構を明らかにすることを目的とし ている.分子動力学シミュレーションを用いたアイオノマー表面における酸素散乱・表面拡散現 象解析から得られた知見より分子散乱モデルを構築し,触媒層における DSMC 解析により酸素 輸送抵抗に対する表面散乱の寄与を明らかにしていく.

## 2. 研究成果の内容

今年度はアイオノマー表面での酸素散乱現象および微小流路における酸素拡散機構について分子動力学シミュレーションを用いた解析を行った.アイオノマー薄膜は膜の含水率によって表面 組成が変化しており,酸素分子が表面に入射した際の衝突分子種によって散乱過程が変化してい る.散乱現象解析では含水率による表面組成変化と入射分子の表面への適応具合を定量的に評価 し,高分子鎖に衝突した場合では入射時のエネルギー履歴を強く残して反射することを明らかに した.また,散乱現象が触媒層空孔における酸素輸送現象に与える影響を定量的に評価するため, アイオノマー膜で構成した微小流路における酸素拡散性について解析を行った.含水率が増加す るにつれ流路全体の酸素拡散性が低下しており,特に表面における酸素拡散性が著しく低下して いることが明らかとなった.

#### 3. 研究目標の達成状況

今年度はアイオノマー表面における酸素分子散乱現象および触媒層空孔における酸素輸送機構の支配要因について、アイオノマー膜構造と相関付けて明らかにすることが出来た.これまでの知見と合わせ、酸素分子の表面入射情報とアイオノマー膜構造を考慮することでアイオノマー 膜表面における酸素分子散乱・表面拡散モデルが構築できると考えており、当初の目的を達成し つつあると認識している.



図1:アイオノマー膜で構成された微小流路の計算系(左)および領域毎の拡散係数の比較(右)

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、燃料電池触媒層アイオノマー表面における酸素分子散乱・表面拡散現象について 分子動力学シミュレーションを用いて解析を行った.この解析により、含水率によって決定され るアイオノマー膜構造と酸素分子の散乱過程の相関および微小流路における酸素拡散性について 明らかにした.この知見からアイオノマー膜表面における酸素分子散乱・表面拡散モデルを構築 し、今後は実際の触媒層構造において散乱・表面拡散現象の寄与を定量的に評価していく.

## 5. 研究成果(\*は別刷あり)学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

## 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

\*[1] M. Nakauchi, <u>T. Mabuchi</u>, <u>T. Hori</u>, <u>Y. Yoshimoto</u>, <u>I. Kinefuchi</u>, <u>H. Takeuchi</u> and T. Tokumasu: Molecular Dynamics Study of Oxygen Scattering Behavior on Perfluorosulfonic Acid Ionomer Thin Films, *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 123, No. 12 (2019), pp. 7125-7133.

## 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] M. Nakauchi, <u>T. Mabuchi, T. Hori, Y. Yoshimoto, I. Kinefuchi, H. Takeuchi</u> and T. Tokumasu: Gas-Surface Dynamics of Oxygen Molecule on Nafion Ionomer Membrane, *31st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Glasgow, (2018).
- [3] 中内将隆,<u>馬渕拓哉</u>,<u>吉本勇太</u>,<u>金子敏弘</u>,<u>杵淵郁也</u>,<u>武内秀樹</u>,徳増崇:アイオノマー膜 表面における酸素分子拡散現象の分子論的解析,日本機械学会 2018 年度年次大会,大阪, (2018).
- \*[4] M. Nakauchi, <u>T. Mabuchi</u>, <u>Y. Yoshimoto</u>, <u>T. Kaneko</u>, <u>I. Kinefuchi</u>, <u>H. Takeuchi</u> and T. Tokumasu: Molecular Dynamics Simulation of Oxygen Diffusion on Ionomer Surface, Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-54, pp. 110-111.
- [5] 中内将隆,<u>馬渕拓哉</u>,<u>吉本勇太</u>,<u>金子敏弘</u>,<u>杵淵郁也</u>,<u>武内秀樹</u>,徳増崇: PEFC 触媒層に おける酸素拡散機構の分子論的解析,日本機械学会 2018 年度年次大会,大阪,(2018).
- 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	J18I036	
区分	一般共同研究	
課題分野	健康・福祉・医療分野	
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$	
継続年数	1年目(発展)	

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 \*\*産業技術総合研究所バイオメディカル研究部門・学振特別研究員 PD \*\*\*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. 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』は通常 10~30 残基の疎水 性アミノ酸からなり、小胞体標的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. しかしながら、小胞体膜から他の細胞内小器官への局在化メカ ニズムについてはほとんど解明されていない.

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インフォマティク 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

1) II 型膜タンパク質の細胞内局在経路の特定

従来の細胞内局在予測法のデータセットのように最終的な細胞内局在位置で分類するのではなく、本研究課題では最終局在位置に至るまでの経路ごとに、II型膜タンパク質を分類した.細胞内局在性既知のデータに関して局在経路の特定および分類を完全に終え、UniProt/KnowledgeBaseのアップデートに伴うデータの自動更新システムを整備した.

2)Ⅱ型膜タンパク質シグナルアンカー周辺配列の特徴抽出

細胞内局在経路ごとに、II型膜タンパク質シグナルアンカー配列の特徴抽出および判別解 析,検証実験を行う.検証実験のうち,共焦点レーザー顕微鏡による細胞内局在経路特定の ための実験は,流体研または産総研で行った.

小胞体膜からゴルジ体膜や細胞膜へ輸送される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、II型膜タンパク質の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積子領域のアミノ酸配列 を明確に判別することができた(学術雑誌 [1]).

予備実験では3種のシグナルアンカーとGFPの融合タンパク質をHeLa細胞内で発現させ、 共焦点レーザー顕微鏡を用いて蛍光観察を行ったところ、小胞体膜停留とゴルジ膜への輸送 との仕分けにシグナルアンカーが関与していることがわかっていた.今年度はさらに、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だけを導入したGFP タンパク質の細胞内局在性を詳細に観察したところ、小胞体・ゴルジ(シスゴルジ・トラン スゴルジ)および細胞膜へのII型膜タンパク質の局在化の区別にはシグナルアンカー配列が 本質的であることを明らかにした(論文投稿準備中).

- 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【進捗:75%】 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:<u>池田 有理</u>,研究分担者:<u>越中谷 賢治</u>,4,420千円.
  - 課題:実験検証および論文出版
- ◆ 膜タンパク質の細胞内局在予測精度の向上 【進捗:75%】 成果:論文出版
  - 5. 研究成果の[1]

課題:ゴルジ内位置ごとの判別精度の向上と実験検証および論文出版

- ◆ 世界初『細胞内局在化経路予測』法開発のためのパラメータ抽出 【進捗:40%】 成果:科学研究費採択への発展
  - 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:<u>越中谷賢治</u>,4,160千円.
     課題:タンパク質に修飾された糖鎖の種類をパラメータにした細胞内局在経路の逆見積もりと実験検証および論文出版
- 4. まとめと今後の課題

計画中のバイオインフォマティクステーマについては予定を上回る速さで進展したため、 次年度以降は、GFP 融合タンパク質を用いた検証実験に注力する.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- \*[1] <u>T. Kikegawa</u>, T. Yamaguchi, R. Nambu, <u>K. Etchuya</u>, M. Ikeda, <u>Y. Mukai</u>: Signal-anchor sequences are an essential factor for the Golgi-plasma membrane localization of type II membrane proteins, *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, Vol. 82, No. 10, (2018), pp. 1708-1714.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[2] <u>K. Etchuya, T. Kikegawa</u>, M. Ohta, <u>Y. Mukai</u>: The Role of Signal-anchor Region of Type II Transmembrane Protein in Subcellular Localization, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, (2018), CRF-62, pp. 130-131.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I037
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	2018.4 ~2019.3
継続年数	1年目(発展)

脳型記憶集積システムと積層型アナログメモリ素子の研究

Development of Brain-Like Memory Integrated Systems and Stacked Analog Memory Devices

森江 隆\*†,寒川 誠二\*\*†† 山下 健弥\*,原田 將敬\*, 大堀 大介\*\*,遠藤 和彦\*\*,大野 武雄\*\*\* \*九州工業大学生命体工学研究科,\*\*東北大学流体科学研究所 \*\*\*東北大学材料科学高等研究所 †申請者,††所内対応教員

# 1. 研究目的

人をサポートするロボット知能に必要な脳型記憶モデルを,超低消費電力・省サイズの脳 型集積回路で実現すると共に,その要素技術としてダメージフリーの中性ビームエッチング を利用した積層構造アナログメモリ素子作製技術を開発する.最終的には,アナログメモリ 素子を集積回路で制御するプロトタイプシステムを構築する.

## 2. 研究成果の内容

人に寄り添うロボットの知能に必要な機能として、各人の経験・記憶を表現するエピソー ド記憶に代表される脳型記憶を実現することを目指す.これは、現在の深層学習ベースの人 工知能(AI)では実現できない機能である.これを処理している脳内の部位として海馬とそ の周辺が知られており、このモデルを開発し、超低消費電力・省サイズの脳型集積回路(LSI) で実装することを目指す.このLSIの大規模化・実用化には新規のアナログメモリ素子が必 要である.そのため、申請者が北海道大学・高橋教授と東北大学・遠藤教授(産総研)の協 力で研究してきた抵抗変化型メモリ(ReRAM)素子を、所内対応教員(寒川教授)が流体 研で開発してきた中性ビーム粒子を用いたエッチング技術により積層構造化して、高精度の アナログメモリ素子を開発することを計画している.

一年目の今年度は、ReRAM 素子をアナログメモリ素子として高精度に動作させるために. MOSFET を接続する製造プロセスを検討した. 最終的には、微細化可能な FinFET と ReRAM との結合を目指すが、まずは平面型 MOSFET を作製し、その上部に ReRAM 素子 を形成する工程を検討した. ReRAM 素子の性能向上を図るために、素子を形成する表面の 段差やラフネスの低減が必要と考え、MOSFET 形成後に CMP(化学的機械研磨)工程を 実施するプロセスを考案した. 想定される構造断面図を図1に示す.

一方,脳型記憶システムにおける必須機能である積和演算を高効率で実現する時間領域ア ナログ集積回路方式を考案し、その有用性を実証した[1-4].また、脳型記憶モデルとして、 ラット脳の海馬・嗅内皮質モデルを提案し[5]、自己位置を表現する場所細胞アトラクタネッ トワークを抵抗ネットワークモデルで模擬することを考案して、それを実装する集積回路を 提案した[6,7](図2).このモデルを高効率で実現するために、アナログメモリ素子を用いた 回路アーキテクチャを考案した.



図1: ReRAM-MOSFET構造

図2: 脳型記憶モデル(海馬・嗅内皮質モデル)

## 3. 研究目標の達成状況

今年度は第一段階としてのアナログメモリ素子のための製造技術開発と基本的な脳型記憶 モデルの提案を行った.

# 4. まとめと今後の課題

ReRAM 素子と MOSFET を結合するための製造技術を提案するとともに, 脳型記憶モデルとして, 海馬・嗅内皮質モデルの提案を行った. 今後, 試作した ReRAM 素子の測定・評価を行うと共に, 脳型記憶モデルの改良と実装技術開発を進める.

# 5. 研究成果(\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- Q. Wang, H. Tamukoh, T. Morie: A Time-domain Analog Weighted-sum Calculation Model for Extremely Low Power VLSI Implementation of Multi-layer Neural Networks, arXiv, (2018), arXiv:1810.06819.
- [2] <u>M. Yamaguchi, G. Iwamoto, H. Tamukoh, T. Morie</u>: An Energy-efficient Time-domain Analog VLSI Neural Network Processor Based on a Pulse-width Modulation Approach, *arXiv*, (2019), arXiv:1902.07707.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[3] <u>K. Yamashita, M. Harada, T. Morie, A. T. Fukuchi, M. Arita, Y. Takahashi</u>, S. Samukawa: Analog Memory Devices for Time-domain Weighted-sum Calculation Circuits, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI-2018), Sendai, (2018), CRF-49, pp. 100-101.
  - [4] <u>森江隆</u>: 【招待講演】 脳型情報処理のための時間領域アナログ演算方式回路とアナログメモ リデバイス, JEITA 先端電子材料・デバイス技術フォーラム, 東京, (2018).
  - [5] <u>M. Kawauchi, K. Takada</u>, <u>K. Tateno</u>, <u>T. Morie</u>: A Hippocampal Spiking Neural Network Model for Path-Dependent Place Cells, 第 28 回日本神経回路学会全国大会 (JNNS2018), (2018).
  - [6] <u>下留諒</u>, <u>川内聖土</u>, <u>高田健介</u>, <u>立野勝巳</u>, <u>田向権</u>, <u>森江隆</u>: 家庭用サービスロボットのため の海馬-嗅内皮質の集積回路モデル, 電子情報通信学会 NC 研究会, Vol. 118, No. 414, (2019), pp. 5-10.
  - [7] <u>森江隆</u>, <u>立野勝巳</u>, <u>高田健介</u>, <u>川内聖土</u>, <u>下留諒</u>, <u>田向権</u>: 【招待講演】 次世代 AI のための脳 型記憶処理モデルと新デバイス技術への期待, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, (2019).
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I038
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

# 空力・構造・空力加熱を考慮した二段式再使用宇宙輸送機ブースタステージの最適形状設計 Design Optimization of Reusable Booster Stage of Two-Stage-To-Orbit In view of Aerodynamics, Structural Dynamics, and Aerothermodynamics

# 千葉 一永\*†, 住元 剛志\*, 大林 茂\*\*†† \*電気通信大学 大学院情報理工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

スペースシャトル後継機開発が俄に再び熱を帯び始めている.超小型人工衛星の開発スピードに対する数年の打ち上げ待ち時間に鑑みると、低コスト高頻度宇宙輸送の実現は喫緊の 課題である.次期宇宙輸送戦略としては、使い捨て、再使用、革新、の3手法があり、それ ぞれ申請者は研究を行っている.本研究では再使用分野を見直すべく、まだ手を付けられて いなかった、空力加熱を考慮したブースタステージの形状設計知識の獲得を目指す.これに より、現実的な設計戦略が明文化されるとともに、今後音速を優に超え高速化するであろう 航空機開発にも転用可能な知識を獲得する.

#### 2. 研究成果の内容

進化計算による最適設計を定義・実施し, 50世代の進化によって,およそ 300の最適個体 群を獲得した.これにより、マイニングによる設計情報獲得のための仮想データセットが準 備された.



図1:10集団サイズ・50世代で進化計算を実施した結果を示した Scatter plot matrices. (a) IBEA による全探索解,(b)SPEA2 による全探索解.

#### 3. 研究目標の達成状況

超/極超音速での形状と遷音速での形状とでは、抗力の減少を目指すのと揚力の増加を目指 すのとで大きく異なる設計戦略を要することが明らかとなった.また、目的関数間の相関が 詳らかになり、研究目標は十全に達せられた.さらに、複数の進化計算法を単純比較でき、 新たな進化計算アルゴリズム開発に結実した.

#### 4. まとめと今後の課題

今回得られたデータセットを用いて目的関数-設計変数間の関係性から新たな設計知見を まとめ、次の設計ステージに進む.

- 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] <u>Sumimoto, T., Chiba, K., Kanazaki, M., Fujikawa, T., Yonemoto, K.</u>, and Obayashi, S.: Fully automatic design optimization system for flyback booster considered from subsonic to hypersonic range, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-12, pp. 24-25.
  - [2] <u>Sumimoto, T., Chiba, K.</u>, and <u>Kanazaki, M.</u>: Hypervolume-based evolutionary many-disciplinary design optimization of blended-wing-body-type flyback booster, *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, Bangalore*, India, (2018), pp. 1331-1338.
  - [3] <u>Sumimoto, T., Chiba, K., Kanazaki, M., Fujikawa, T., Yonemoto, K.</u>, and <u>Hamada, N.</u>: Evolutionary multidiscipnary design optimization of blended-wing-body-type flyback booster, *57th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, San Diego, USA, (2019), AIAA Paper-2019-0703.
  - [4] <u>Chiba, K., Sumimoto, T.</u>, and <u>Sawahara, M.</u>: Completely automated system for evolutionary design optimization with unstructured computational fluid dynamics, *International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence*, Male, Maldives, (2019), Best Presentation Award.
  - [5] 住元剛志, 千葉一永, 金崎雅博, 藤川貴弘, 米本浩一: 最適飛行経路を持つ翼胴一体型フライバックブースタ段形状の空力/空力加熱/構造重量最適設計, 第50回流体力学講演会/第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 宮崎, (2018).
  - [6] 金崎雅博,渡邉真也,棟朝雅晴,米本浩一,藤川貴弘,伊藤貴之,千葉一永:大規模計算資源 を援用した有翼式宇宙往還機の実用的なエアフレーム・推進統合設計,学際大規模情報基盤 共同利用・共同研究拠点第10回シンポジウム,東京,(2018).
- [7] 住元剛志, 千葉一永, 金崎雅博: ハイパーボリュームベースの進化計算による翼胴一体フライバックブースタ形状設計, 航空宇宙流体科学サマースクール, 長瀞, (2018).
- [8] 住元剛志, 千葉一永, 金崎雅博, 藤川貴弘, 米本浩一: 翼胴一体フライバックブースタ段形状の空力/空力加熱/空虚重量最適設計, 日本機械学会第28回設計工学・システム部門講演会, 沖縄, (2018).
- [9] <u>住元剛志,千葉一永,金崎雅博</u>: 翼胴一体フライバックブースタ形状設計に資する進化計算 の差異の影響,進化計算学会進化計算シンポジウム 2018,福岡, (2018).
- [10] <u>千葉一永</u>, 住元剛志, 澤原雅隆: CFD 解析を伴う大規模多数目的最適化に対する進化計算法の選択指針・システム完全自動化と有翼フライバックブースタ設計への応用, 平成30年度航空宇宙空力シンポジウム,山口,(2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
- (特許)(マスコミ発表) なし
- (受賞) Best Presentation Award for making presentation of [4].
- (紀要)
- [11] <u>住元剛志, 千葉一永, 金崎雅博, 藤川貴弘, 米本浩一</u>: 最適飛行経路を持つ翼胴一体型フラ イバックブースタ段形状の空力/空力加熱/構造重量最適設計, 宇宙航空研究開発機構特別資 料, JAXA-SP-18-005, (2018), pp. 141-146.

Project code	J18I040
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

Interferometric Measurement of Temperature Fields in Turbulent Flows

Juan F. Torres\*†, Atsuki Komiya\*\*†† John Pye\*, Wojciech Lipinski\* \*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

The objectives of this project are threefold. First, to build and test an interferometric technique that measures temperature fields in turbulent flows.

Second, to validate the technique by comparing measurements of thermal boundary layers from isothermal flat surfaces for both laminar and turbulent convection with the interferometric setup and literature values (usually obtained with hot wire anemometry). Third, to measure temperature fields under air curtains for solar thermal applications.

#### 2. Details of program implement

The experimental setup is shown in Fig. 1 for the optical interferometer, i.e. phase-shifting interferometry (PSI) (a), water curtain experiment to reduce convection (b) and investigation of convection from rough surfaces (c). PSI follows the same layout as a Mach–Zehnder interferometer. The insets show two possible phase-shifting techniques, utilizing a rotating polarizer or an Arbaa prism, the latter was developed by the group of the collaborator at IFS and is more suitable for unsteady flow measurements as it allows the acquisition of instant phase-shifted data.

PSI can be used to (1) measure the temperature gradients on the wall-fluid boundary to extract convective heat losses and (2) measure temperature fields around the turbulent planar jet. Application to PSI to turbulent flows in encouraging based on the literature where holographic interferometry has been applied to a turbulent flow regime. Temperature fields measured with PSI have a higher spatial resolution than conventional methods, so PSI is suitable to estimate local heat fluxes or heat transfer rates. This allows the evaluation of possible reduction in convective heat losses by a fluid curtain (e.g. a water or air curtain). The effectiveness of the fluid curtain  $\varepsilon$  is

$$\varepsilon = 1 - \frac{\dot{Q}_{w}}{\dot{Q}_{w/o}},\tag{1}$$

where  $\dot{Q}_{\rm w}$  is the heat transfer rate from a section under the water curtain and  $\dot{Q}_{\rm w/o}$  is the heat transfer rate for the same section without the curtain, i.e. pure natural convection. Concerning the non-planar surface, the deviation  $\Delta$  from the flat configuration is

$$\Delta = 1 - \frac{h_{\text{flat}}}{h_{\text{rough}}},\tag{2}$$

where  $h_{\text{flat}}$  and  $h_{\text{rough}}$  are the heat transfer coefficients for the flat and rough surfaces, respectively.

The experiments will be aided by a computational fluid dynamics (CFD) model in OpenFOAM, which have been developed at ANU to study mixed convection and the effect of an air curtains on convective loss.



- Figure 1 : Experimental setup: (a) interferometer layout to measure temperature fields in turbulent flows; the insets show two technologies to produce high-resolution phase-shifted data, (b) water curtain experiments to capture buoyant flow, and (c) visualization of thermal boundary layers around near-isothermal rough surfaces.
- 3. Achievements

A Mach-Zehnder interferometer was built at ANU and will be used in the second year of the project by a student to test the accuracy of various phase-shifting equations.

4. Summaries and future plans

Phase-shifting capabilities at the ANU will be built and implemented in large convection setups after small-scale tests have demonstrated the possibility of measuring temperature fields in turbulent flows. The Arbaa prism will be tested. CFD simulations with OpenFOAM will accompany the experiments.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] <u>J. F. Torres</u>, A. Komiya, <u>J. Pye</u>, <u>W. Lipinski</u>: Interferometric measurement of temperature fields in turbulent flows, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-83, pp. 172-173.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I041
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

Analysis of Transport Phenomena of Oxygen Ion in Dual-Phase Electrolyte Material

Takashi Tokumasu\*†, Jeongmin Ahn\*\*††, and Hiroki Nagashima\*\*\* \* Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\* Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University \*\*\*Faculty of Engineering, University of the Ryukyus †Applicant, ††non-IFS responsible member

# 1. Purpose of the project

The 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  $SrSc_{0.1}Co_{0.9}O_{3-\delta}$  (SSC) having the perovskite structure and  $Sm_{0.2}Ce_{0.8}O_{2-\delta}$  (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 analysis, we examined the oxygen ion diffusivity in each direction to comprehend the effect of the grain boundary (GB) between SSC and SDC. As a result, we found the MSDs of oxygen ion in the direction existing GB reduces (see Figre1-b). This analysis clarified that the oxygen ion diffusivity reduces around the GB in DPEM and GB in DPEM has an effect of decreasing on the oxygen ion diffusivity.



Figure 1: a) A constructed MD simulation model of DPEM. b) MSD of oxygen ions in each direction of DPEM.

For the experimental analysis, the GBs of sintered SDC-SSC DPEM, 30-70 by volume fraction were studied using electron backscatter diffraction (EBSD) associated with a scanning electron microscope. The results of the EBSD experiment are illustrated in Figure 2. The DP membrane is still dense indicating the indicating the preservation of

the membrane's novelty with the addition of another material. The average misorientation angle is 40.7 degrees with a standard deviation of 10.5 degrees suggesting that most modeling efforts should be focused on high angle grain boundaries.



Figure 2: a) Phase map plot of the DP membrane (SSC-red SDC-green) b) Grain boundary fraction at various misorientation angles.

## 3. Achievements

Experimental analysis of the DP membrane using EBSD shows the structure of the membrane as well as the misorientation angles associated with grain boundaries. As for the simulation analysis, we clarified that the GB in DPEM affects the oxygen ion diffusivity by using the constructed MD simulation model as we expected.

4. Summaries and future plans

Regarding the simulation analysis, we constructed MD simulation models of DPEM and clarified the oxygen ion diffusivity reduces due to the GB between SSC and SDC. As plans, the molecular mechanism of reduction of oxygen ion diffusivity around the GB will be analyzed and we will propose a membrane showing high ionic conductivity. Regarding the experimental analysis, DPEM of 30-70 SDC-SSC by volume fraction were experimentally investigated using EBSD. It was found that the majority of grain boundaries occur with high misorientation angles. Further investigation into the grain boundary structure of the DPEM using EBSD and experimental techniques to keep misorientation angles low will be carried out.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] <u>H. Nagashima, R. Falkenstein-Smith, J. Ahn</u>, and T. Tokumasu: Analysis of transport phenomena of oxygen ion in dual-phase electrolyte material, *Proceedings* of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2018), Sendai, (2018), CRF-53, pp. 108-109.
- [2] <u>R. Falkenstein-Smith, V. DeBiase</u>, <u>H. Nagashima</u>, T. Tokumasu, and <u>J. Ahn</u>: Oxygen Transport Membranes for Oxy-Fuel Combustion and Carbon Capture Purposes, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-58, pp. 328-329.
- 3) Patent, award, press release etc.
  - (Patent) Not applicable.
  - (Award) Not applicable.
  - (Press release) Not applicable.

Project code	J18I042
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year (progressing)

Investigation of Centreline Shock Reflection and Viscous Effects in Axisymmetric Supersonic Flow

Hideaki Ogawa\*†, Sannu Mölder\*\* Georgy Shoev\*\*\*, Evgeny Timofeev\*\*\*\* Ben Shoesmith\*\*\*\*, Kiyonobu Ohtani\*\*\*\*†† \*School of Engineering, RMIT University \*\*Department of Aerospace Engineering, Ryerson University \*\*\*Khristianovich Inst. of Theo. and Applied Mechanics, Russian Academy of Science \*\*\*\*Department of Mechanical Engineering, McGill University \*\*\*\*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 capabilities are of crucial importance for efficient engine operation and reliable intake start. Shock wave interactions play a principal role in intake flow compression. Unique characteristics including a toroidal vortex ring structure were revealed for the shock reflection on the symmetry axis in axisymmetric supersonic intakes in our previous studies, suggesting substantial impact on the engine performance. The present project aims to scrutinise the characteristics of centreline shock reflection in numerical, experimental, and analytical approaches, and investigate the effects of viscosity by employing continuum and kinetic simulations. In so doing it will develop accurate physical modelling and new theories, and yield a valuable high-quality dataset for centreline Mach reflection.

2. Details of program implement

The implementation of the overall program consists of two stages, as outlined below:

(1) The first part will closely investigate the characteristics of centreline Mach reflection in in computational, experimental, and analytical approaches; (a) The shock structures and behaviour will be scrutinised by employing high-fidelity CFD codes; (b) The flowfield will be generated and visualised by utilising the ballistic range of the IFS Shock Wave facilities in this project; and (c) The shock structure will be examined by performing theoretical analyses including the curved shock theory (CST) and method of characteristics (MOC) in conjunction with shock polar analysis and Gudley's analogy.
(2) The second part will examine the effects of viscosity on centreline shock reflection computationally by employing continuum and kinetic modellings; (a) In the continuum approach, the intake flowfields will be calculated by performing Euler simulations for the viscous-corrected geometries; and (b) In the kinetic approach, the characteristics of the intake flowfield in axisymmetric supersonic intakes will be investigated by performing DSMC (direct simulation Monte Carlo) simulations.

## 3. Achievements

Numerical investigation has been conducted for the flowfields in stunted Busemann intakes at Mach 8 in a continuum regime. The incident shock shapes have then been

articulated by curve fitting (Fig. 1), resulting in two distinct classes; (i) shock reflection resembling regular reflection with the incident shock shape represented by a generalised hyperbola, indicative of the behaviour analogous to those of a convergent shock wave in cylindrical implosion prescribed by the Guderley singularity; and (ii) Mach reflection with a distinct Mach stem with the incident shock represented by a  $4^{\text{th-order}}$  polynomial function. Fig. 2 shows the gradients from CST analysis performed by using the local shock angle and flow deflection angle across the incident shock.



Fig. 1 Incident shock waves curve-fitted (shown by black solid lines) in stunted Busemann intakes ( $M_{\infty} = 8$ , close up).

Fig. 2 Gradients behind incident shocks.

x [m]

Further in-depth investigation has been undertaken to scrutinise the viscous effects on centreline shock reflection by means of CFD and DSMC in conjunction with theoretical approaches (details can be found in Ref. [1]). Preliminary experimental testing has been conducted in the IFS ballistic range to examine and visualise shock structures and behaviour in a ring type air intake in supersonic free flight, as reported in Ref. [3].

4. Summaries and future plans

Considerable advancement has been made in the understanding and characterisation of the behaviour of inward-turning axisymmetric shock waves reflected on the centreline in continuum and kinetic numerical approaches in the light of shock theories. Further investigation will be undertaken by accurately capturing the pseudo-steady/transient shock structures in the IFS ballistic range to be compared with computational results.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (including international conference with peer review and tutorial paper)
- \*[1] <u>G. Shoev</u> and <u>H. Ogawa</u>: Numerical study of viscous effects on centreline shock reflection in axisymmetric flow, *Physics of Fluids*, Vol. 31 (2019), 026105 (13 pages).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- \*[2] <u>H. Ogawa, B. Shoesmith, S. Mölder, E. V. Timofeev, G. Shoev</u>, and K. Ohtani: Characteristics of Centreline Shock Reflection in Stunted Busemann Intakes, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-3, pp. 6-7.
- [3] 大谷清伸,小川俊広,小川秀朗: 軸対称 Busemann 形状空気吸込み口流れ場計測のための弾道飛行装置実験,日本機械学会第 95 期流体工学部門講演会,(2018),室蘭, PM66, OS9-6.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J18I044
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	2018.4 ~2019.3
継続年数	3年目

ナノスケール固液複合系の熱伝導メカニズム Mechanism of Thermal Energy Transfer in Nanoscale Solid-Liquid Systems

> 小原 拓\*†, 芝原 正彦\*\*††, 菊川 豪太\* \*東北大学流体科学研究所, \*\*大阪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

固液界面における輸送現象,とりわけ,熱エネルギーが界面を通過する特性は,MEMS/ NEMS、微粒子が懸濁された液体、生体内の構造など、ナノスケールの液体-固体系が示す 特性を理解し設計するための重要な問題である。マクロな熱流体力学においては、界面にお ける熱輸送特性を定量化するための概念として、界面における温度ジャンプと熱流束との比 として与えられる熱抵抗が広く用いられており、 超雷導マグネットのクエンチなど従来から 存在する応用上の問題に加えて、高発熱機器からの熱回収・放熱問題に関連して、様々な応 用研究が始まっており、これを制御するための TIM(界面熱材料)など関連分野も萌芽期を 迎えつつある。固液界面の熱抵抗では、固体一固体界面とは異なり、固体一液体間で何らか の熱輸送メカニズムにミスマッチを生じることが因子となると考えられているが、その分子 動力学レベルのメカニズムは未だ詳細な検討が行われていない、本研究においては、分子・ ナノスケールの複雑な固液複合構造をもつ系における熱エネルギー輸送を解析するため、分 子動力学シミュレーションにより,(1)ナノ粒子混合液体,(2)ナノメートルスケールの構造を もつ界面,の両面からこの問題を解析する.非平衡分子動力学シミュレーション (NEMD) を用いて, (1)ではナノ粒子の特性がそれを含有する液体の有効熱伝導率およびエネルギー輸 送機構に及ぼす影響を明らかにするため、ナノ粒子混合液体のエネルギー伝搬の機構を調べ た.(2)では、ナノメートルスケールの凹凸構造をもつ固体表面における固液間界面熱輸送特 性を解析し、固体表面の幾何的性状と熱輸送との関連を明らかにした.

#### 2. 研究成果の内容

(1)ナノ粒子混合液体 液体分子,壁面およびナノ粒子構成原子には、それぞれアルゴン分子,白金原子を仮定し、ナノ粒子混合液体の平衡ならびに非平衡分子動力学シミュレーションを行った.非平衡シミュレーションでは平行な固体壁で液体相を挟んだモデルを用いた. これらのモデルに対して、ナノ粒子の特性スケールや濡れ性がナノ粒子混合液体の有効熱伝

導率やその構成成分に与える影響を 詳細に調べた.図1は、圧力やナノ粒 子の体積分率を一定として直径数 nm の FCC 結晶構造ナノ粒子を混合した アルゴン液体の有効熱伝導率に対す るナノ粒子-液体分子間相互作用強 さ(an)の影響を示す.図1より、an の増加によって、混合液体の有効熱伝 導率が上昇することが分かる.有効熱





伝導率をナノ粒子の寄与分(λ<sub>nano</sub>)と液体分子の寄与分(λ<sub>liquid</sub>)に分離した場合,固液間相互作 用が強くなるとナノ粒子に吸着する液体分子が増加し,ナノ粒子の寄与分だけでなく,液体 分子の寄与分も増加することが分かった.

(2)結晶格子界面[1] 金の FCC 結晶表面に 結晶格子の1~20 倍の大きさをもつ凹凸を作 成し,液体アルゴンに接触させた固液界面に 対して,温度勾配を与えて熱流束を発生させ て固液界面熱コンダクタンスを計測した.固 液分子間の親和性を様々な値に変化させて 現象を調べたが,図2に示すように濡れ性が 悪い場合(左)と良い場合(右)では凹部内 への液体の浸入の様相が大きく異なる.

図3は凹凸面における界面熱コンダクタン スを平滑面におけるそれと比較したもので ある.結晶格子の1~20倍のスケールをもつ凹凸面は, いずれも凹凸により平滑面の2倍の表面積をもってい るが,結晶格子スケールに至るまで平滑面の大略2倍 の熱コンダクタンスを示し,拡大伝熱面の効果がこの スケールにまで及んでいることがわかった.固液親和 性への応答を詳しく調べると特異な挙動が観察され, 凹凸のスケールと液体分子のスケールが関連した複 雑な現象が生じていることがわかった.

(a) 固液低親和性(b) 高親和性図 2: 凹凸近傍の固液界面[1]



#### 3. 研究目標の達成状況

固液界面の複雑な構造が熱輸送特性に及ぼす影響 について、東北大学・大阪大学の連携の下、それぞれ の機関において大小2つのスケールから解析を進め、 それぞれのスケールにおける特性を明らかにした.

4. まとめと今後の課題

様々なスケールの固液複合系に対して熱輸送特性を明らかにすることができ、本研究は所 定の成果をあげることができたものと考えている.今後は、固体表面構造と固液界面領域の 熱抵抗の相関などについて、さらにメカニズムを解明する研究を発展させたい.

## 5. 研究成果(\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌
- \*[1] D. Surblys, Y. Kawagoe, <u>M. Shibahara</u> and T. Ohara: Molecular dynamics investigation of surface roughness scale effect on interfacial thermal conductance at solid-liquid interfaces, *J. Chem. Phys.*, Vol. 150 (2019), 114705 (11pages).
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[2] <u>M. Shibahara</u>, G. Kikugawa, T. Ohara: Mechanism of thermal energy transfer in nanoscale solid-liquid systems, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-61, pp. 124-125.
- [3] 大茂昌史,藤原邦夫,植木祥高,芝原正彦,小原拓:ナノ粒子による液体の熱伝導率変化に 関する分子動力学的研究,第55回日本伝熱シンポジウム講演論文集,(2018),P1420.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I045
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

#### 衝撃波照射による生体組織の機械的特性の推定

Estimation of Mechanical Properties of Living Tissue by Shock Wave Irradiation

# 橋本 時忠\*†, 住 隆博\* 大谷 清伸\*\*†† \*佐賀大学理工学部, \*\*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

現在,衝撃波医療は衝撃波の強弱により幅広い症例に適用されるに至っている.実際に衝撃波を照射して治療を行う生体組織自体は粘弾性体であることは知られているが,粘弾性と 衝撃波の関係に関する深い考察はほとんど報告されていない.一般的に粘弾性の性質は衝撃 波のように瞬間的に高い圧力を付加すると歪み速度が大きくなり,その物性が変化すること が知られている.我々は衝撃波の強弱による医療効果の差はこの物性の変化で整理できる推 測している.従来から水と生体組織は音響インピーダンスが近く液体中の気泡と衝撃波の干 渉現象はよく調べられてきたが,粘弾性物質の場合,弾性の効果を理解する必要がある.本 研究では,粘弾性体に気泡を設置して衝撃波を照射した時の気泡振動現象を実験的に測定し て,粘弾性を考慮した数値解析により振動現象を逆問題的に解くことにより物性値の推測を 行う.特に,比較的弱い衝撃波の照射に対する解析モデルの妥当性について検討する.

## 2. 研究成果の内容

#### 実験方法:

本研究では粘弾性の性質を有する高分子材料であるポリビニルアルコールハイドロゲル (PVA-H) (PVA 濃度 9%)を使用した. PVA-H 中への単一気泡は,残存気泡を消去するために脱気しながら配合して,さらにゲル化後に再度脱気して気泡の設置した.水で満たされたタンク内に PVA-H を設置して上方から衝撃波を照射した. PVA 濃度 9%の PVA-H 内に設置した単一気泡に衝撃波を照射したときに生じる気泡振動を可視化した.

#### 粘弾性を考慮した Rayleigh-Plesset 方程式:

Rayleigh-Plesset 方程式は非圧縮性ニュートン流れにおける球状の気泡運動を支配する方 程式として知られているが、本研究では粘弾性体への拡張を前提として、粘性をダッシュポ ット、弾性をバネで表現して並列にした Kelvin-Voigt モデルを仮定した修正 Rayleigh-Plesset 方程式を適用した.

#### 粘弾性物性値の推定方法:

可視化結果から気泡振動の時系列データを得ることができる.その PVA-H 内の気泡振動 を Rayleigh-Plesset 方程式により逆問題的に解析して実験結果と等価なプロファイルが再 現できれば、粘性係数と剛性率を定量的に推定することが可能となる.具体的に、可視化実 験によって得られた気泡振動の時系列データに着目し Re 数および Ca 数を手動により試行 錯誤的に変化させて数値解析結果のフィッティングを行い、粘性係数と剛性率を同時に探査 した.方程式における各項の性質から、Re 数と Ca 数は気泡振動の振幅と周期にそれぞれ影 響するため、両者の依存関係は非常に弱いものと考えられる.

#### 実験結果及び解析結果:

実験で用いられた PVA-H 内に設置された気泡は、平衡半径 0.84 mm であった.実験結果 と数値解析結果の比較を図1に示す.上述のように実験で得られた気泡振動の時系列データの初期3周期のすべての点に対して数値解析のフィッティングを目指したが非常に困難であ



図1 実験結果と計算結果の比較

ったため、各周期の極大値へのフィッティングを 目指した.振幅に関しては、第1周期の極小値お よび第2周期以降、実験データとの差が現れたが、 一方で周期に関しては非常に良い一致を示した. これらのフィッティングから推定される濃度 9%PVA-Hの粘弾性物性を表1に示す.

表1 導出された粘弾性特性結果

Re 数	35
Ca 数	8
粘性係数	0.24 Pa·s
剛性率	28.5 kPa

#### 3. 研究目標の達成状況

算出された粘性係数と剛性率は実際の物性と比較して妥当な値である.従って、本研究で 提案した粘弾性体の物性特性手法は有効であると考えられる.今後、高ひずみ速度領域にま でこの手法を拡張できれば、今後の衝撃波治療に大いに貢献できるであろう.予想される成 果に対しては 30%の達成度と考えている.

## 4. まとめと今後の課題

本研究において、生体組織に衝撃波を照射したときの物性変化を解明する手段として、単 一気泡の振動に基づく粘弾性体の物性推定法について提案した. 模擬生体として使用した 9%濃度 PVA-H に設置した気泡に比較的弱い衝撃波を照射して実験的に得られた気泡振動 データに対して、粘弾性を考慮した Rayleigh-Plesset 方程式を逆問題的に解析して実験デー タとフィッティングを行った結果、実際の物性に対して妥当な値が得られた. 今後、精度向 上と高ひずみ速度領域での計測を実施して、強い衝撃波に対してのデータ取得が必要となる.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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・ロ頭発表等
- \*[1] <u>Takahiro Sumi, Tokitada Hashimoto</u> and Kiyonobu Ohtani : Estimation of Mechanical Properties of Living Tissue by Shock Wave Irradiation, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-67, pp. 140-141.
- [2] 橋本時忠, 住隆博: 衝撃波照射時における気泡振動を利用した粘弾性体の物性評価, 平成 30 年度衝撃波シンポジウム, (2019), USB 1A4-4.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I046
区分	共同研究集会
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

# 繊維強化複合材料の高度保全技術に関わる研究会 Seminar for Advanced Maintenance Technology of Fiber Reinforced Composites

高木 敏行\*†, 伊藤 浩志\*\*††

小助川 博之\*, 工藤 素\*\*\*, 藤島 基\*\*\*, 菊池 時雄\*\*\*\*, 島貫 智子\*\*\*\*\*, 佐久間 華織\*\*\*\*\* 久田 哲哉\*\*\*\*\*\*, 佐藤 勲征\*\*\*\*\*\*, 氏家 博輝\*\*\*\*\*\*, 浦 啓祐\*\*\*\*\*\*, 植松 充良\*\*\*\*\*\*\* \*東北大学流体科学研究所, \*\*山形大学大学院理工学研究科,

\*\*\*秋田県産業技術センター, \*\*\*\*福島県ハイテクプラザ, \*\*\*\*\*宮城県経済商工観光部 \*\*\*\*\*\*宮城県産業技術総合センター、\*\*\*\*\*三菱重工業株式会社

\*申請者, \*\*所外対応研究者

#### 1. 研究目的

航空機や自動車などの輸送機械や圧力容器等の一般産業用途で利用が拡大している炭素 繊維強化プラスチック(CFRP)に代表される繊維強化複合材料においては、その製造方法は確 立されているものの、検査・評価技術などの保全技術においては課題が多い.保全の最適化 は製品の信頼性だけでなく、歩留まりの向上にも寄与するため、その高度化が必要とされる. 本研究集会では繊維強化複合材料の保全技術の特に西欧における現状と課題と展望につい て調査し、東北域内の企業と川下企業を含めた産学官連携によるシーズ技術の発展と研究基 盤構築を目指す.

#### 2. 研究成果の内容

平成30年度は、自動車分野等で用いられる CFRP(CFRTP)の研究開発で活躍する講師を 招いて下記の講演会を開催し、今後 CFRP 成形品に求められる課題等について学ぶ機会を設 けた.また、川下企業と東北域内の企業が自由に討論し、ニーズとシーズがマッチングする 機会となるよう技術懇談会を設けた.

#### (1) 第八回 CFRP 研究会講演会 ~複合材料の用途とその課題について~

- 日時: 平成31年1月15日(火) 13:00-17:05
- 場 所 : 東北大学 流体科学研究所 2号館5階 大講義室

参加者数: 67名

講演:

「自動車分野における CFRP の適用と課題」

(株)本田技術研究所	主任研究員	漆山	雄太	先生
「工業製品やガラス繊維複合材料の長もち	の科学」			
京都工芸繊維大学	教授	西村	寬之	先生
「世界のエネルギー情勢と輸送用エネルギ	ーの今後について」			
京都工芸繊維大学	特任教授	久米	辰雄	先生
「CFRP の成形品質保証のための検査・モ	ニタリング技術の研究」			
愛媛大学	助教	水上	孝一	先生

## (2) 第一回 CFRP 研究会技術懇談会

日 時 : 平成31年1月15日(火) 11:00-12:30 場 所 : 東北大学 流体科学研究所 1号館2階 会議室 参加者数: 23名

## 3. 研究目標の達成状況

フェーズ I(J15097, J16018, J17I013)で進めた, CFRP の検査, 補修, リサイクルに関わる研究集会で得られた知見を基盤として, フェーズ II では CFRP の保全(検査, 評価, 補修)を中心にニーズの調査とシーズ技術の発展を目指した. これまで 8 回に亘って行った研究集会を通して CFRP 製品の品質保証に関する評価技術の産学共同研究が開始され, 高圧水素容器と航空機部材のマルチマテリアル接着接合部を対象とする画期的な非破壊評価技術の提案にも至った.

#### 4. まとめと今後の課題

本研究会は、平成26年10月に発足したものであり、これまでに8回の講演会と4回の 技術調査会を実施した.「検査・評価」分科会においては、宮城県の受託事業を受けて産学官 連携による共同研究が開始され、学術論文執筆と特許出願にまで至った.フェースIIとなる 本研究集会では対象とする技術分野を「検査・評価・補修」という保全活動の3技術に絞り 込み、複合材料の高度保全技術を中心に研究会の拡大を進める.ヨーロッパ、アメリカ、中 国で開催される複合材料の非破壊評価に関する国際会議にて当研究集会で得られた成果を 発表し、国際共同研究を行うなどして、最先端の知識を研究会にフィードバックできるよう 活動地盤の国際化を進める.

## 5. 研究成果(\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- H. Kosukegawa, R. Yamada, S. Tamonoki, <u>N. Sato, K. Ura</u>, T. Takagi: Nondestructive Evaluation of Hardening Degree of Epoxy Resin in CFRP with Eddy Current Testing, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XXI)*, Vol. 43 (2018), pp. 65-72.
- [2] H. Kosukegawa, Y. Kiso, Y. Yoshikawa, R. Urayama, T. Takagi: Characterization of laminated structure on scarfed slope of CFRP by utilizing eddy current testing with differential type probe, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 59 (2019), pp. 1227-1238.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- \*[3] <u>Tetsuya Hisada, Keisuke Ura, Noriyuki Sato</u>, Hiroyuki Kosukegawa, Toshiyuki Takagi: Seminar for Advanced Maintenance Technology of Fiber Reinforced Composites, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-36, pp. 74-75.
- [4] 高木敏行,小助川博之:CFRP 構造物の保全と電磁非破壊評価技術,NDE シンポジウム 2018 -構造健全性と非破壊評価-,東京,(2018).
- [5] 木曽雄太,小助川博之,橋本光男,浦山良一,高木敏行,Lalita Udpa: CFRP のミスアラ イメントを対象とする渦電流試験における磁場指向型プローブの検出性評価,第10回日本 複合材料会議,東京,(2018), 3C-11.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

Project code	J18I047
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st 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. The primary concern of the automotive industry was operation at extremely lean equivalence ratios, simulating a "fuel cut" scenario. A series of SOFC's were then tested on model exhaust against traditional catalytic converter material in a lab setting. The model exhaust was then sent to the anode chamber of the SOFC in a tubular furnace, upon leaving the anode, the exhaust was recirculated into the cathode chamber. The exhaust was then finally captured and measured with a Gas Chromatograph and a Mass Spectrometer (GC/MS).

For comparison, a section of catalytic converter material was removed from a commercially available automotive catalytic converter. The material was cut to match the total surface area of the SOFC. The catalytic converter piece was placed in a quartz tube within the same tubular furnace. The model exhaust was able to pass over the section of catalytic converter where it was then captured for GC/MS analysis.

3. Achievements

A baseline of gasoline exhaust composition was conducted. Syringes of exhaust samples were taken upstream of any emission control devices within the exhaust. The engine was able to reach operating temperature before the samples were taken. The samples were taken at idle while the temperature at the location of sampling was recorded via VAGCOM data logging software. Samples were analyzed with a GC/MS. The resulting exhaust composition and temperature indicate a possible environment for SOFC operation. There was found to be approximately  $\sim 2-4\%$  syngas, H<sub>2</sub> and CO, within the exhaust at 605°C at idle without engine tuning. Previous work has indicated that SOFC's have the potential to produce significant power in combustion exhaust at equivalence ratios only slightly rich.

Power generation, however, must be second to emission reduction. We must ensure that we limit the amount of harmful emissions entering the atmosphere as much as possible. Therefore a typical planar SOFC that could operate at temperatures near 600°C was tested for emission reduction in comparison to a section of catalytic converter. A Nickel- Gadolinium Dope Ceria (Ni-DGC) SOFC was compared against

a section of commercially available catalytic converter material at  $600^{\circ}$ C. Both specimens were tested under extreme simulated lean conditions. This is meant to simulate the fuel being stopped while the engine is still rotating, such as the driver lifting off the gas pedal and beginning to decelerate. This is known as the most challenging operation for a catalytic converter and also represents the most challenging environment for the SOFC.

The new design for the SOFC system performs better than the catalytic converter. The SOFC significantly outperforms the catalytic converter in oxygen utilization, carbon dioxide production, and NO, CO reduction. As shown in the table below:

Exhaust Simulation 1						
	02	CO %	CO <sub>2</sub> %	NO	NO <sub>2</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>
	%			ppm	ppm	ppm
Baseline	8	2.2	22.9	46	0	6625
Catalytic	7.57	1.36	23.6	39.17	1.83	6550
Converter						
SOFC	7.11	0.59	24.6	34.5	0	6656
Percent	5.62	35.2	4.73	10.1	NA	-1.6
Difference						
Exhaust Simulation 2						
Baseline	11.3	3	22.1	125	0	3100
Catalytic	10.9	2.79	23	122.8	0	3141
Converter						
SOFC	6.15	2.44	26.1	72.25	3	2615
Percent	42.3	11.6	14.1	11.6	NA	16.9
Difference						

Table 1: Emission Reduction Comparison

4. Summaries and future plans

The initial testing of the SOFC indicates the potential of the system as an emission control device with the potential for power generation. The SOFC was able to exceed the emission reductions of a traditional catalytic converter. The SOFC significantly outperforms the catalytic converter in oxygen utilization, carbon dioxide production, and NO, CO reduction at an equivalence ratio of 0.3 and 0.2.

Additionally, carbon deposition onto the surfaces of the SOFC anode may be able to be minimized through the manipulation of the SOFC's operating voltage. A higher operating voltage could result in less carbon deposition, allowing the SOFC longer operation in a CO rich environment. Further research is being conducted to investigate the phenomena of carbon deposition and operating voltage.

- 5. Research results
- 1) Journal Not Applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- T. S. Welles and J. <u>Ahn</u>: Novel Automotive Emission Reduction and Power Generation through Solid Oxide Fuel Cells, *The Eleventh U.S. National Combustion Meeting*, (2019).
- \*[2] <u>T. S. Welles</u>, <u>J. Ahn</u>, H. Nakamura: Solid Oxide Fuel Cells Replacement of a Traditional Catalytic Converter, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-57, pp. 116-117.
- 3) Patent, award, press release etc. Not Applicable.

Project code	J18I048
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

Retrospective Study of Intracranial Aneurysms Treated with Flow-Diverting Stent: The Correlation between Haemodynamic Alterations and Treatment Outcomes

> Makoto Ohta\*†, Itsu Sen\*\*†† Mingzi Zhang\*, Yujie Li \* \* Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*Faculty of Medicine and Health Science, Macquarie University †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The outcomes of patients with intracranial aneurysms vary from one to another after undergoing flow-diverting stent implantation. We seek to explore the dominant haemodynamic parameters that could predict favourable treatment outcomes prior to the real treatment, thereby assisting clinicians in identifying the best treatment mode.

2. Details of program implement

We first collected data of aneurysm patients (n = 15) underwent flow-diverting stent implantation from our collaborating hospital, and then reconstructed geometries of their cerebral vasculature before and after treatment. Using our previously developed virtual stenting technique, we modelled flow-diversion treatment for each patient following the same strategy as used in the real treatment, and compared the virtual stent structures to those implanted in vivo through cone beam computed tomography (cone-beam CT).



Figure 1 : Comparison of stent structures deployed in simulation (left) to those deployed in vivo (right).

After all stented aneurysm models were obtained, we classified them into two cohorts in accordance with their treatment outcomes — (1) complete aneurysmal occlusion and (2) residual aneurysm persisting, based upon the O'Kelly-Marotta grading scale at the 6 months' follow-up. (See Figure 1 for the representative reconstructed aneurysms and virtually deployed stents.) For each cohort, intra-aneurysmal haemodynamic parameters — aneurysmal inflow rate, energy loss, maximal velocity, mean velocity, and velocity curls — were assessed using computational fluid dynamics (CFD).

We observed in some treatment cases that incomplete stent expansion occurred when the stent was deployed in the location where the parent artery exhibits a large variation in curvature. Since incomplete stent expansion was reported to be a factor leading to incomplete aneurysm occlusion, we therefore modelled stents deployed at different levels of incomplete expansion, in comparison to the fully expanded condition, to examine the possibly associated adverse haemodynamic changes.

3. Achievements

We have successfully established a haemodynamic database for aneurysms after flow-diversion treatment. Consisting of aneurysm and stent structural characteristics, the corresponding haemodynamic simulation results, the clinical outcomes of each patient at the 6 months' follow-up, etc, this database is ready to be used to correlate aneurysm haemodynamics with the in vivo treatment outcomes.

Meanwhile, we have studied into the haemodynamic effects on aneurysmal haemodynamics of different severities of incomplete stent expansion occurring at various segments of the parent artery. Results of this study could readily be used as a reference for clinicians to assess the possible risks of flow-diversion treatment.

4. Summaries and future plans

At this moment, we are analysing the correlation of those haemodynamic parameters obtained from the two cohorts of aneurysm patients with their in vivo treatment outcomes, seeking for a valuable haemodynamic indicator that can be used to predict the rate of complete aneurysm occlusion.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] Y. Li, M. Zhang, <u>D. I. Verrelli, W. Chong</u>, M. Ohta, <u>Y. Qian</u>, Numerical simulation of aneurysmal haemodynamics with calibrated porous-medium models of flow-diverting stents, *Journal of Biomechanics*, 80 (2018), pp. 88-94.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- \*[2] M. Ohta, <u>Y. Qian</u>, Y. Li, M. Zhang: Planning Flow-Diversion Treatment for Intracranial Aneurysms: What Role Could Fluid Dynamics Play?, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2018)*, Sendai, (2018). CRF-63, pp. 132-133.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I050
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	3rd year

Evaluation of Thermal Flow Field in Closed Cavity under Temporally Variable Thermal Condition

Atsuki Komiya\*†, Nicholas Williamson\*\*†† 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 numerically analyze the transient natural convection problem in a two dimensional square cavity subjected to temporal change of thermal boundary condition of side wall. Quantitative measurements of the transient temperature field in a closed cavity are also performed using a phase-shifting interferometer, and the results used to validate the two dimensional numerical simulations. The possibility of thermal boundary layer control will be discussed using both numerical and experimental results.

## 2. Details of program implement

In the last year the comparison between the numerical simulation results made at the University of Sydney and the experimental results obtained at Tohoku University were made. Some of these comparisons are shown in figure 1 where the temperature field for the experimental results is shown on the top sequence of images and the numerical simulations are shown on the bottom. We attended the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai. We have made substantial progress in writing a Journal paper.



(b) numerical

Figure 1: Experimental (top) and numerical results (bottom) of temporal changes of temperature distribution.

3. Achievements

At the University of Sydney, two dimensional numerical simulations of temporal variation of temperature field were performed to analyze the natural convection

thermal boundary layer problem. The simulation results are complete and the analysis is also completed. We have prepared a draft Journal article for the journal `International communications in heat and mass transfer' which will be submitted in 2019.

Linjing Zhou, Steven Armfield, Nicholas Williamson, Michael Kirkpatrick, Wenxian Lin, Atsuki Komiya, and Takuma Kogawa. Evaluation of Flow Field in Closed Cavity under Temporally Variable Thermal Condition, International communications in heat and mass transfer (in preparation).

4. Summaries and future plans

In this fiscal year, we analyzed the results and prepared a draft journal paper. This publication is close to submission. The PhD student was the first author so this contributes to an educational activity in this research framework. In the future, we will modify the temperature control cell and quantitative evaluation will be achieved. Currently further numerical simulations are underway using three dimensional geometry.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] Linjing Zhou, Steven Armfield, Nicholas Williamson, Michael Kirkpatrick, <u>Wenxian Lin</u>, Atsuki Komiya, and Takuma Kogawa : Experimental Validation of Natural Convection Flow in a Cavity with Time-Varying Thermal Boundary Conditions, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-10, pp. 20-21.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I053
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

Study on Fracture Behaviour of Single Natural Fiber

Zahrul Fuadi\*†, Toshiyuki Takagi\*\*††

Sabri Sabri\*, Samsul Rizal\*, Hiroyuki Kosukegawa\*\*, Hiroyuki Miki\*\*\* \*Faculty of Engineering, Syiah Kuala University \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*\*Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University † Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

One of natural fibers that has a strong tensile property is Abaca (Musa Mepientum) fibers. It has been used as reinforced composite in automotive industry to improve the acoustic performances. However, Abaca single fibers are highly random in length and width, causing large distribution in its tensile strength. Therefore, the failure behavior of Abaca fiber reinforced composite could significantly be affected by the loading rate. The purpose of this research is to investigate the tensile property of single Abaca fiber in order to propose a design guideline for Abaca fiber reinforced composite for a broader engineering application.

2. Details of program implement

In order to evaluate the tensile property of the single fiber, a tensile test experiment apparatus is used (Figure 1). The apparatus consists a leaf spring equipped with a strain gage, a magnetic pull solenoid, and an xyz stage. The single fiber specimen of 10 cm is fixed on a piece of paper with adhesive tapes on their ends, as shown in Figure 2. The specimen is fixed to the tensile test apparatus using holders. Prior to a test, the paper is cut in the middle, as indicated in Figure 2.



Figure 1: Tensile test experiment apparatus Figure 2: Specimen of single fiber

3. Achievements

A typical result of the tensile test is given in Figure 3. In this particular case, the fiber broke at the tensile force of 3.5 N. A typical microscopic image of the broken single fiber given in Figure 4 reveal the existence of a weak point at the fiber. This

weak point existing at several locations along the fiber causes non uniform tensile strength of the single fiber. Figure 5(a) and 5(b) shows a cross section area of a single fiber after breakdown. It indicates that the failure started from the outer part of the fiber and propagated to the center part. The single fiber consists of capillary structure, as shown in Figure 5(b).





Figure 3: Tensile test result of a single fiber

Figure 4: Breakdown at weak point



Figure 5: Single fiber cross section (a) and (b)

- 4. Summaries and future plans
  - The existence of weak points at single fiber specimens resulted in fiber breakout at unexpected location. This become the main difficulty in obtaining the specific value of the single fiber tensile strength. In order to overcome the problem, a shorter test specimen will be used, especially to remove the weak point. For this purpose, a stronger pulling force is required. A new tensile test apparatus using linear actuating mechanism will be used for the tensile test. In addition, to discuss the mechanical properties of Abaca fibers by taking into account the distribution in tensile strength, Weibull analysis will be introduced.
- 5. Research results (\*reprint included)
- 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] <u>Z. Fuadi, S. Sabri, S. Rizal, H. Homma</u>, T. Takagi, <u>H. Miki</u>, H. Kosukegawa: Experimental study on the tensile strength and fracture behavior of single Abaca fiber, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-39, pp. 80-81.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J181054
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	2nd year

Microcombustion for Clean and Efficient Syngas Formation and Fuel Cell Applications

Jeongmin Ahn \*†, Kaoru Maruta\*\*†† Ryan Milcarek\*\*\*, Takuya Tezuka\*\*

\*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\*School for Engineering of Matter, Transport and Energy, Arizona State University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Recently a micro flow reactor with controlled temperature profile utilizing superadiabatic combustion was integrated with a Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) in a Flame-assisted Fuel Cell (FFC) setup [1]. Propane was investigated as the fuel in that work for equivalence ratios from 1 to 5.5. The fuel utilization was improved by an order of magnitude (up to 50% fuel utilization) compared to previous work, which shows potential for high overall efficiency of the system. Despite the potential with propane fuel, methane has the highest potential for hydrogen generation due to the higher hydrogen to carbon ratio. Natural gas, which primarily consists of methane, is also expected to have significant potential for use as a fuel with the micro flow reactor based FFC.

In this work a micro flow reactor with controlled temperature profile is integrated with a micro-Tubular SOFC operating in the FFC setup. Methane and natural gas are investigated as fuels for the setup. The setup is investigated in a furnace to assess the potential for high power density and fuel utilization. A long-term test is conducted to assess the stability of the power generation.

2. Details of program implement

Methane and natural gas (composition of 96.6% methane, 2.2% ethane, 0.5% H<sub>2</sub>O and 0.4% N<sub>2</sub>) were used as fuels in the experiment. Three total (i.e., fuel and air) flow rates were investigated in the experiment; 10 mL.min<sup>-1</sup>, 50 mL.min<sup>-1</sup>, and 100 mL.min<sup>-1</sup>. At each flow rate, the fuel flow rate and air flow rate were changed to achieve the desired equivalence ratio while maintaining the overall flow rate constant. Fuel/air equivalence ratios of 1.5, 2, 2.5 and 3 were investigated. The experimental setup was described previously. The flow rate of fuel and air were controlled with mass flow controllers. The fuel/air mixture was heated in a tube furnace at 800 °C to achieve superadiabatic combustion at equivalence ratios exceeding the upper flammability limit. This allowed for fuel-rich micro/meso-scale combustion to occur in the combustion chamber, which had an internal diameter of 3.6 mm. After combustion, the fuel-rich exhaust flowed to the mT-SOFC where the syngas in the exhaust flowed to the triple phase boundary of the anode. External air heated to 800°C flowed to the cathode. The remaining exhaust was released inside the furnace and combusted.



Figure 1 : SOFC polarization and power density curves with natural gas/air at equivalence ratios from 1.4 to 3.0 and a long-term test at an equivalence ratio of 3.0.

3. Achievements

A FFC was integrated with a micro flow reactor with controlled temperature profile to reform methane and natural gas fuel into syngas at high equivalence ratios using heat recirculation. The FFC was able to produce a high power density of 333 mW.cm<sup>-2</sup> using a total fuel/air flow rate of 50 mL.min<sup>-1</sup> at an equivalence ratio of 3. When exposed to the high amounts of fuel available at high equivalence ratios, the fuel cell had a high fuel utilization of 44%. Over a long-duration test at a current density of 350 mA.cm<sup>-2</sup>, total fuel/air flow rate of 50 mL min<sup>-1</sup> and an equivalence ratio of 3.0 the FFC power density did not decrease.

4. Summaries and future plans

A high power density, electrical efficiency, and fuel utilization were achieved with natural gas for the first time. The performance achieved led to thermodynamic models that demonstrate the potential for a self-sustained, high efficiency, micro power device. The results of the first years' work were published in an international peer reviewed journal [1].

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- R. J. Milcarek, H. Nakamura, T. Tezuka, K. Maruta, and J. <u>Ahn</u>: Microcombustion for micro-tubular flame-assisted fuel cell power generation and heat cogeneration, J. *Power Sources*, 413 (2019), pp. 191-197.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- \*[2] <u>B. B. Skabelund, R. J. Milcarek</u>, H. Nakamura, K. Maruta, <u>J. Ahn</u>: Meso/micro-scale Combustion of Natural Gas for Fuel Cell Applications, *The Eleventh U.S. National Combustion Meeting*, (2019).
- [3] <u>A. H. Khalid, R. J. Milcarek</u>, H. Nakamura, K. Maruta, <u>J. Ahn</u>: Low Temperature Soot Regime of Propane in a Micro Flow Reactor with Controlled Temperature Profile, *The Eleventh U.S. National Combustion Meeting*, (2019).
- \*[4] <u>R. J. Milcarek, M. Chu</u>, H. Nakamura, K. Maruta, <u>J. Ahn</u>: Microcombustion of Natural Gas for Solid Oxide Fuel Cells, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-23, pp. 46-47.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I055
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year (progressing)

# Modelling Materials Behavior for Advanced Electromagnetic Non Destructive Testing Techniques

Gael Sebald\*†, Tetsuya Uchimoto\*,\*\*,†† Bhaawan Gupta\*,\*\*,\*\*\*, Benjamin Ducharne\*\*\*, Toshiyuki Takagi\*,\*\* \*ELyTMaX UMI3757, CNRS- Université de Lyon - Tohoku University International Joint Laboratory, Tohoku University \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*\*Univ. Lyon, INSA-Lyon, LGEF, EA682, F-69621, Villeurbanne, France †Applicant, †† IFS responsible member

# 1. Purpose of the project

In the framework of Non Destructive Testing of metallic parts used in the field of thermal and nuclear power plants, physical insights of the behavior of the materials have to be better understood. In this frame, it is proposed in this project to model the magnetic properties of the materials on the one hand, and to model the NDT on the other hand. Doing so, it is foreseen that more accurate interpretations of NDT signals may be obtained for an enhanced reliability.

# 2. Details of program implement

Among others, the magnetic incremental permeability was chosen as a key NDT technique thanks to its great sensitivity to residual stresses.

During previous years, the following tasks were completed:

- Development of models for hysteresis in ferromagnetic materials. This task lied in the framework of the Double-Degree PhD of M. Bhaawan GUPTA, working since October 2016 at LGEF laboratory (INSA-Lyon), ELyTMaX laboratory, and IFS, under the supervision of Dr Benjamin Ducharne, Pr Gael Sebald, and Pr Tetsuya Uchimoto.
- Eddy current testing and Magnetic Incremental Permeability on representative aged and fatigued metallic samples. The different experimental results are as inputs for the theoretical effort. Especially, the parameters of the model are screened in order to establish discriminant and reliable structural health indexes.

During FY2018, the following tasks were started:

- Refinement of hysteresis models, in order to be able to simulate accurately typical signals encountered in Non-Destructive Techniques
- Comparison between model parameters determined by experiments, to microstructure information, such as Kernel Average Misorientation or number of precipitates.

# 3. Achievements

Experiments were conducted on chromium steel using Magnetic Incremental Permeability (MIP) technique. It was shown that some indicator – based on MIP signals – are especially sensitive to the number of precipitates, as well as stress during heat treatment of aged samples.

From the modeling attempts, Jiles-Atherton model was chosen for its limited number of

parameters, as well as their physical interpretation. It was especially shown that some parameters are especially sensitive to the number of precipitates in high chromium steels.

- 4. Summaries and future plans
- Further steps of this collaboration are:
  - Other materials should be tested, in order to check the validity of our newly developed techniques and interpretations.
- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- B. Zhang, B. Ducharne, B. Gupta, G. Sebald, T. Uchimoto : Dynamic Magnetic Scalar Hysteresis Lump Model Based on Jiles-Atherton Quasi-Static Hysteresis Model Extended With Dynamic Fractional Derivative Contribution, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, No.11, (2018), 7301605. *Proceedings of INTERMAG 2018, Singapore.*
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [2] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto, T. Takagi : Ferromagnetic Models for Electromagnetic Non-Destructive Techniques Improvement, *Non Destructive Evaluation 2018*, Mumbai, India, Dec. 17-21, (2018).
- [3] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto, T. Takagi : Magnetic Hysteresis Models for the Interpretation of Non-Destructive Testing Techniques based on Magnetic Incremental Permeability, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow*, Sendai, (2018), OS17-3/CRF-92, pp. 844-845.
- [4] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, T. Uchimoto, G. Sebald : Modeling and Experimental Magnetic Barkhausen Noise Non-destructive Evaluation of 12 Cr-Mo-W-V Steel Creep Test Samples, 4th Conference on Maintenance Science and Technology ICMST-Tohoku, Sendai, Japan, 23rd-26th October (2018).
- [5] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto : Modeling and experimental magnetic incremental permeability non-destructive evaluation of 12 CrMo-W-V test samples, 23rd International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2018), Detroit, USA, September 9 - 13, (2018).
- [6] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto : Magnetic non-destructive materials characterization of non-ferromagnetic materials using magnetic susceptibility, *INTERMAG 2018, Singapore*, (2018).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I056
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

Mathematical Modeling and Simulations of Soft-Elastic Materials under Large Strain

Hiroshi Koibuchi\*, Chrystelle Bernard\*\*,\*\*\*, Jean-Marc Chenal\*\*\*\*, Gildas Diguet\*\*

Gael Sebald<sup>\*\*</sup>, Jean-Yves Cavaille<sup>\*\*</sup>†, Toshiyuki Takagi<sup>\*\*,\*\*\*\*</sup>††, Laurent Chazeau<sup>\*\*\*\*</sup> \*National Institute of Technology (Kosen), Sendai College

\*\*ELyTMaX UMI 3757, CNRS-Universite de Lyon, Tohoku University, International Joint Unit, Tohoku University

\*\*\*\*Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences (FRIS), Tohoku University \*\*\*\*Materials Engineering and Science (MATEIS), CNRS, INSA Lyon, Universite de

Lvon

\*\*\*\*\*Institute of Fluid Science (IFS), Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

We aim at modeling the stress-strain behavior of natural rubber, in a wide range of deformation (up to 500%), accounting for loading and unloading sequences. It consists in a multiscale approach, from macromolecular behavior to macroscopic features, for which various type of damage may occur (chain scissions, local ruptures, etc.).

This will be done in collaboration with both a team form IFS and ELyTMaX lab at Tohoku University, and a French team (MATEIS) from INSA Lyon (Université de Lyon).

2. Details of program implement

(1) Skype meeting for collaborative research at ELyTMaX lab in IFS on 13 June 2018. Participants: Laurent Chazeau (MATEIS, France), Hiroshi Koibuchi (National Institute of Technology (Kosen), Ibaraki College: NITIC, Japan), Chrystelle Bernard, Gildas Diguet, Gael Sebald, Jean-Yves Cavaille, Toshiyuki Takagi (ELyTMaX, IFS).

In this meeting, L. Chazeau reported experimental results of rubbers including the strain induced crystallization (SIC), and H. Koibuchi reported mathematical modeling technique and preliminary results of stress-strain curves obtained by Monte Carlo simulations.

- Meeting for collaborative research at ELyTMaX lab in IFS on 13 June 2018. Participants: Hiroshi Koibuchi, Chrystelle Bernard, Gael Sebald, Gildas Diguet, Jean-Yves Cavaille, Toshiyuki Takagi. In this meeting, H. Koibuchi presented the intermediate results, which were presented in IC-Msquare 2018, and discussed on the topic and future direction of study with the participants.
- (3) Meeting for collaborative research at NITIC on 13-14 December 2018. Participants: Hiroshi Koibuchi, Chrystelle Bernard, Gildas Diguet. This meeting is not held in IFS, but C. Bernard and G. Diguet came to NITIC for a discussion about preparation of a manuscript for journal submission on their return from Tokyo to Sendai.

- (4) Skype meeting for collaborative research on 6 March 2019. Participants: Laurent Chazeau, Hiroshi Koibuchi, Chrystelle Bernard, Jean-Yves Cavaille. In this skype meeting, the participants discussed about the manuscript for journal submission.
- (5) (Informal) Meeting for collaborative research in ELyTWorkshop 2019 in Naruko during 10-12 March 2019. Participants for this informal and special meeting are: Hiroshi Koibuchi, Chrystelle Bernard, Gildas Diguet, Jean-Yves Cavaille, Toshiyuki Takagi. In this meeting, the participants discussed the future plan of this project especially on the modeling of SIC.
- 3. Achievements

Mathematical modeling based on Finsler geometry (FG) is successful, and several experimental data of stress-strain curves up to 1200% are successfully reproduced by Monte Carlo simulations. In the application form, only 500% of strains was expected to be reproduced, and therefore, the achievement level is more than this expectation. However, FG modeling is not always satisfactory for SIC phenomenon, though the obtained results are all consistent with the experimentally known facts on SIC.

4. Summaries and future plans

The next target is a modeling of SIC, which is at present not always sufficient even in FG modeling, though the results of FG modeling are consistent with SIC phenomenon. One of possible idea is to freeze the positional and/or the directional degrees of freedom of polymer in Monte Carlo simulations. The latter one; freezing the directional degree of freedom, was examined in (K. Osari and H. Koibuchi, Polymer 2018). We should check whether the first one is effective for SIC modeling and can reproduce the stress-strain curves influenced by SIC.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- \*[1] <u>Hiroshi Koibuchi, Chrystelle Bernard, Jean-Marc Chenal, Gildas Diguet, Gael</u> <u>Sebald, Jean-Yves\_Cavaille</u>, Toshiyuki Takagi, and <u>Laurent\_Chazeau</u> : Mathematical Modeling of Rubber Elasticity, *Journal of Physics: Conf. Series*, Vol. 1141, (2018), 012081 (8 pages), doi:10.1088/1742-6596/1141/1/012081 (open access).
- [2] <u>Hiroshi Koibuchi, Chrystelle Bernard, Jean-Marc Chenal, Gildas Diguet, Gael Sebald, Jean-Yves Cavaille</u>, Toshiyuki Takagi, and <u>Laurent Chazeau</u>: Monte Carlo Study of Rubber Elasticity on the Basis of Finsler Geometry Modeling, *Symmetry*, Vol. 11, (2019), 1124 (22 pages), doi:10.3390/sym11091124 (open access).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [3] <u>Hiroshi Koibuchi, Chrystelle Bernard, Jean-Marc Chenal, Gildas Diguet, Jean-Yves</u> <u>Cavaille, Gael Sebald</u>, Toshiyuki Takagi, and <u>Laurent Chazeau</u>: Mathematical modeling and simulations of soft-elastic materials under large strain, *Proceedings* of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2018), OS17-/CRF-94, pp. 848-849.
- [4] <u>Hiroshi Koibuchi</u>: Mathematical modeling of polymeric materials: Finsler geometry models and Monte Carlo simulations, *Book of Abstracts of XV International Workshop on Complex Systems*, Trent, Italy, March 17-20, (2019), p. 111. (https://event.unitn.it/complexsystems2019/Book\_2019\_cover.pdf)
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I057
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	2nd year

Combustion Characteristics of Biogas at Various Pressures

# Willyanto Anggono\*†, Akihiro Hayakawa\*\*†† \*Department of Mechanical Engineering, Petra Christian University \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

# 1. Purpose of the project

The availability of fossil fuels becomes the world attention as limited and non-renewable energy sources. A utilization of biogas is potential solution to this energy issue because biogas does not contribute to the increase in the amount of carbon dioxide in atmosphere. As for the application of biogas in a combustion facility, combustion characteristics, such as laminar burning velocity and the Markstein length, should be clarified. The biogas can be simulated by methane/CO<sub>2</sub> mixture. The results in last year clarified the effects of CO<sub>2</sub> dilution on laminar flame characteristics of stoichiometric methane flame under up to high pressure. However, combustion characteristics of lean and rich flame characteristics have not been clarified. In this year, the combustion characteristics of the artificial biogas, methane/CO<sub>2</sub> mixture, will be clarified using the high pressure constant volume combustion chamber at IFS.

## 2. Details of program implement

The experiments were carried out using a high pressure constant volume combustion chamber at the Institute of Fluid Science, Tohoku University. Methane and carbon dioxide  $(CO_2)$  mixture was employed as fuel while oxidizer was dry air. Although biogas also contains nitrogen  $(N_2)$ , the  $N_2$  concentration is negligible. The amount of CO2 in the fuel (methane+ $CO_2$ ) was defined as  $Zco_2$ . In actual biogas, the value of  $Z_{CO2}$  is approximately 0.3 to 0.5, and thus this CO<sub>2</sub> dilution ratio was varied from 0.3 to 0.5 in this study while the initial mixture pressure was set to 0.10 and 0.50 MPa are chosen as the initial mixture pressure. Equivalence ratios were 0.8, 1.0, and 1.2 and the initial temperature of mixture was 298 K. The evolution of flame radius during flame propagation was acquired using the Schlieren image photography. The flame speed,  $S_N$ , and flame stretch rate,  $\varepsilon$ , were obtained from the derivative of the flame radius with respect to time. The unstretched flame speed,  $S_{S}$ , was defined as the flame speed at zero stretch rate obtained by extrapolating the flame speed to zero stretch rate using a linear relationship between flame speed and stretch rate. The burnt gas Markstein length, Lb, was determined as the slope of the linear extrapolation. The unstretched laminar burning velocity, SL, was then calculated as the product of the density ratio of burnt gas to unburnt mixture and flame speed.

3. Achievements

The results obtained in this study was summarized in Fig. 1. The flame propagations were obtained for various equivalence ratios and pressures. Fundamental laminar flame characteristics of biogas, such as the unstretched laminar burning velocity and the burnt gas Markstein length, have been clarified for various equivalence ratios
and the value of  $Z_{\rm CO2}$  up to elevated pressure condition.



Figure 1: (Left) Schlieren image of flames. (Center) Unstretched laminar burning velocity, *SL*, (Right) Variations of burnt gas Markstein length, *Lb*, under various CO<sub>2</sub> dilution ratio, *Z*<sub>CO2</sub>, various pressures and various equivalence ratios

4. Summaries and future plans

An increase in the initial mixture pressure and  $CO_2$  dilution ratio in  $CH_4/CO_2/air$  mixtures leads to a decrease in the unstretched laminar burning velocity of the mixtures. An increase in initial mixture pressure results in a decrease in the burnt gas Markstein length. On the other hand, an increase in  $CO_2$  dilution ratio in  $CH_4/CO_2/Air$  mixtures leads to an increase in the burnt gas Markstein length. For future plans, the lean and rich mixtures combustion characteristics of the biogas will be experimentally examined at various temperature conditions using the high pressure constant volume combustion chamber at IFS. In addition, the numerical simulation of stretched flames will be conducted in order to clarify the effects of  $CO_2$  on stretched flame behavior.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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, E. C. Okafor, <u>W. Anggono</u>: Effects of CO<sub>2</sub> Concentration on Flame Propagation Characteristics of CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/Air Laminar Premixed Flames under Various Equivalence Ratios and Pressures, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-77, pp. 160-161.
- \*[2] <u>W. Anggono</u>, A. Hayakawa, E. C. Okafor, <u>G. J. Gotama</u>: Experimental and numerical investigation of laminar burning velocities of artificial biogas under various pressure and CO<sub>2</sub> concentration, *International Conference on Automotive*, *Manufacturing, and Mechanical Engineering*, Bali, (2018), p. 35.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I058
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

Magnetic and Electric Properties of Diamond Like Carbon-Magnetic Metal Nano-Composite Films

Hiroyuki Kosukegawa\*†, Yiwen Zhang\*\*†† Hiroyuki Miki\*\*\*, Toshiyuki Takagi\* \*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*Tianjin University \*\*\*Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

As the advent of internet of things (IoT), multi-functional devices with environment-friendly property and low energy consumption is required. Diamond Like Carbon (DLC) is non-toxic for environment and shows good mechanical properties. Moreover, it can be tuned in a broad range from metallic to insulating by different carbon structure, which could be applied to controlling the energy cost of devices. In this project, nano-composite films with DLC matrix-magnetic metal particles combination are produced. The structure, electrical and magnetic properties of DLC-magnetic metal particle films are discussed.

2. Details of program implement

The DLC-Co nano-composite films were deposited on Si (100), Pt/Si and quartz substrates by hybrid CVD-sputtering method, which consists of chemical vapor deposition (CVD) using methane (CH<sub>4</sub>) /argon gas mixture as a precursor and co-sputtering of a metal Co target. Flow rate of CH<sub>4</sub> of 3-9 sccm included to chamber was changed to control carbon content. The structure of as-deposited DLC-Co films was analyzed by X-ray diffraction (XRD, Bruker NEW D8 ADVANCE) using Cu Ka radiation and field-emission transmission electron microscopy (FETEM, Hitachi 4300E). DLC-Co nano-composite film had nanogranular structure (Figure 1). The composition of the films were identified by EDX (Ultra Dry, Thermo Fisher Scientific Inc.). Film thickness was measured by surface profile-meter (Dektak 8). Electrical resistivity was measured by a conventional four-point probe method. The magnetization curves were identified by a vibrating sample magnetometer (VSM, BHV-30SS, Rikendensi).



Figure 1 : HRTEM image of DLC-Co nano-composite film.

- 97 -

#### 3. Achievements

By increasing the CH<sub>4</sub> flow rate from 3 to 9 sccm, the Co content decreases from 80 to 35 at.% and C content increases from 20 to 65 at.%. The resistivity  $\rho$  increases from 2 to 54  $\mu\Omega$ ·m according to an increase of Co content (Figure 2). Figure 3 shows the magnetic properties of DLC-Co films with different Co content. The saturation magnetization (*B*) of films increases from 200 Gs to 5000 Gs, with the Co content increasing. When Co content is lower than 49 at.%, the films show good superpara-magnetic properties, with the B of 1500 Gs. These DLC-Co nano-composite films show both high resistivity and superpara-magnetic properties, which could be studied as magnetoresistance material in further research. When the Co content is higher than 80 at.%, the films show ferromagnetic property with high *B* of 5000 Gs. Considering the magnetic hysteresis loops of the films, the films exhibit ferromagnetic properties, which have potential for the high-frequency soft-magnetic properties.



Figure 2 : Resistivity of DLC-Co nano-composite film.



Figure 3 : Magnetization of DLC-Co nano-composite film.

4. Summaries and future plans

By controlling the gas flow rate, the Co content changes and the resistivity increases. The particles in DLC-magnetic metal nano-composite films can be controlled to several nm size. With deferent metal content, the films show good superpara-magnetic properties, and ferro-magnetic properties. These DLC-Co nano-composite films show both high resistivity and superpara-magnetic properties, which could be studied as magnetoresistance (MR) and dielectric response material in further research.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- \*[1] Y. Zhang, H. Kosukegawa, H. Miki, T. Takagi: Magnetic and Electric Properties of Diamond Like Carbon-Magnetic Metal Nano-composite Films, Proc. of the 18th Int. Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-37, pp. 76-77.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I059
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	3rd year

Nanostructured Heusler Alloys and Related Compounds Prepared by Mechanical Alloying and Plasma Electrolytic Methods for Energy Saving Thermoelectric Power Generation and Protective Coatings

Vladimir Khovaylo\*†, Toshiyuki Takagi\*\*†† Hiroyuki Miki\*\*\*, Hiroyuki Kosukegawa\*\*, Alexander Rakoch\*, Alexandra Gladkova\* Evgeniya Monakhova\*, Valeria Zueva\* \*National University of Science and Technology "MISiS" \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*\*Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Purpose of the project in 2018 was adaptation and transferring developed technology from laboratory samples to the industrial detail and experimental study of properties of these coatings obtained under optimal technological regime of plasma electrolytic oxidation.

### 2. Details of program implement

During the third year of the project, the research was focused on adaptation and transferring the developed technology from laboratory samples to industrial details and experimental study of properties of coatings obtained under optimal technological regime of plasma electrolytic oxidation (PEO). Since the adaptation and transfer of technology to the industry is a complex process which usually requires additional experiment, the following approach was used for this aim: i) formation of coatings on the surface of industrial details using optimal solutions (to adapt them to industrial details); ii) studying structure, morphology, corrosion resistance, porosity. microhardness, wear resistance, and surface roughness of the coatings obtained under optimal technological regime of PEO on industrial details; and iii) development of a methodology for wear-resistant coating formation and apply it to industrial details made of the functional materials.

A finite elements method which takes into account contact resistances, thermal expansion and thermoelectric effect was developed for numerical simulation of field assisted sintering of thermoelectric alloys. Distribution of electrical and thermal fields was analyzed numerically based on the experimental data collected by a spark plasma sintering instrument. For the case of Si-Ge alloy, quantitative estimate of the temperature distribution during the sintering pointed to a significant, up to 70 °C, temperature difference within the specimen volume for the case of sintering temperature 1150 °C.

### 3. Achievements

The main achievements can be summarized as follow. First, experiments revealed that the kinetic features of the coating formation, as well as a) tribological properties (microhardness, erosion resistance, surface roughness), b) structure and morphology, c) corrosion resistance, d) porosity, and e) adhesion of coatings to the substrate obtained

under optimal technological regime of plasma electrolytic oxidation on industrial detail are similar in all the samples studied. Second, transfer and adaptation of the methodology for wear-resistant coating formation from samples to the industrial details made successfully [Fig. 1]. Thus, a methodology for wear-resistant coating formation on industrial details made of the functional materials is developed. Beside, numerical simulation of field assisted sintering of thermoelectric alloys by a finite elements method which took into account contact resistances, thermal expansion and thermoelectric effect, was successfully performed.





Figure 1: Pictures of industrial details with wear-resistant coating formed in the electrolytes with various addition of salt of bivalent elements (a) 1-4 g·l<sup>-1</sup> Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, (b) 1-4 g·l<sup>-1</sup> Cu(OH)<sub>2</sub> into the base electrolyte.

4. Summaries and future plans

In summary, plasma electrolytic process method was developed for preparation of protective coatings of functional materials with a minimal thickness of the outer layer. Experimental sample of thermoelectric materials based on Fe-based Heusler alloys were prepared by Spark Plasma Sintering technique and their thermoelectric properties were evaluated. A finite elements method for numerical simulation of field assisted sintering of thermoelectric alloys was developed.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- \*[1] <u>A. Tukmakova, A. Novotelnova, K. Samusevich, A. Usenko, D. Moskovskikh, A. Smirnov, E. Mirofyanchenko</u>, T. Takagi, <u>H. Miki</u> and <u>V. Khovaylo</u> : Simulation of Field Assisted Sintering of Silicon Germanium Alloys, *Materials*, Vol. 12, (2019), 570 (13 pages).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- \*[2] A. A. Gladkova, V. V. Khovaylo, A. G. Rakoch, N. A. Predein, H. Kosukegawa, H. Miki, T. Takagi : Methodology for Multifunctional Coating Formation by Plasma Electrolytic Oxidation, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-40, pp. 82-83.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I061
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

Evaluation of the Fluid Dynamical Effects on In-Flight Polymeric Particle Behavior during Cold-Spray

Chrystelle Bernard\*†, Hidemasa Takana\*\*†† Olivier Lame\*\*\*, Kazuhiro Ogawa\*\*\*\*, Jean-Yves Cavaillé\*\*\*\*\*, Kesavan Ravi\*\*\*\* \*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 UMI3757, CNRS–Université de Lyon–Tohoku University, International Joint Unit, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Cold-spray process involves the acceleration of sub-millimetric particles though a convergent/divergent de Laval nozzle and its impact onto a substrate using a pressurized and pre-heated gas to form a coating. Under the influence of the gas, the particle is accelerated and heated-up. However, because of its strain rate and temperature dependences, and important viscoelastic behavior, the mechanical behavior of the particle evolves during its flight inside the nozzle. Thus, to improve polymer coating by cold-spray, it is needed to have an idea of the particle history (velocity and temperature) inside the nozzle until its impact onto the substrate.

### 2. Details of program implement

Under the supervision of Prof. Takana, a 2D plane nozzle was simulated by Ansys/FLUENT. It corresponds to the one used by Ravi et al. (2015). A single particle of Ultra-high molecular weight polyethylene was injected at the end of the 20 mm for the inlet and rapidly accelerates though the nozzle. Moreover because of the preheated gas, the particle heat-up. A parametric study was performed regarding the inlet gas pressure, inlet gas temperature and particle size.



Figure 1: a) Thermal gradient of a 60  $\mu$ m diameter particle after 1 ms. b) Temperature profile of several particle diameters at the nozzle exit.

We showed that during cold-spray the polymer particle is submitted to important thermal gradient. Coupling the results obtained from Ansys/Fluent with Comsol Multiphysics, we developed a simple thermal model to investigate the temperature gradient inside the particle during the in-flight behavior of the particle. Thus, we showed that before its impact onto the substrate, its temperature is non-homogeneous: the surface temperature of the particle increases of 30 K while its core increases by 15 K for a 60  $\mu$ m particle with inlet gas conditions of 0.4 MPa and 653 K as shown on Fig. 1.

## 3. Achievements

In this study, better understanding of the particle behavior during cold-spray is approached. We investigate the influence of the nozzle geometry, inlet gas pressure, inlet gas temperature and particle size. It appears that the nozzle geometry (continuous or discontinuous) affect the length of the supersonic flow, and so, the number of shockwaves. We also shown that, in the nozzle, polymeric particles are submitted to important thermal gradient which induces non-homogeneous heating of the particle. Moreover, the temperature increases of the particle is such that it is non-negligible for polymeric materials. This result is very important to improve polymer coating by cold-spray.

## 4. Summaries and future plans

During this year, we investigated polymer particles behavior during cold-spray process. The analysis performed here is a first step in the understanding of the evolution of the flow field and the particle history behavior during cold-spray. Two articles have been writing to report the findings made during this year. They will be submitted soon to international peer-review journals.

For this year too, we applied for an IFS collaborative research project, in order to continue and go further in this study. First, the 2D nozzle simulation will be replaced by a 3D nozzle with the modelling of the powder feeder. Then, the particles will be injected directly in the powder feeder. The particles will get sucked in the nozzle by suction. Moreover, the polymer particles will be considered as (i) single particle, (ii) several particles and (iii) flow field with properties of the polymer. In addition, the thermal model developed under Comsol Multiplysics will be improved to add the convection effects to the conduction ones.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] <u>C. A. Bernard</u>, H. Takana, <u>K. Ravi</u>, <u>O. Lame</u>, <u>K. Ogawa</u>, <u>J.-Y. Cavaillé</u>: Investigation of the Flow Field Dynamics during Cold-Spray of Polymers, *Proceedings of the 15th International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, (2018), OS17-6/CRF-95, pp. 850-851.
- [2] <u>C. A. Bernard</u>, H. Takana, <u>G. Diguet</u>, <u>K. Ravi</u>, <u>O. Lame</u>, <u>K. Ogawa</u>, <u>J.-Y. Cavaillé</u>: In-flight behavior of polymeric particle during cold-spray process, *ElyT Workshop* 2019, Naruko, March, (2019).
- Patent, award, press release etc. Non applicable.

Project code	J18I062
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	3rd year

Kinetic Modeling of High-Pressure Surface Ionization Waves Generated by Ns pulse discharges

Hidemasa Takana\*†, Hideya Nishiyama\*\* Marien Simeni Simeni\*\*, Yong Tang\*\*, Igor Adamovich\*\*†† \*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Ohio State 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 air plasmas and in hydrogen flames. Such insight is critical to predictive analysis of plasma-assisted combustion applications.

2. Details of program implement

The results have been presented at 18th International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Japan, November 7-9, 2018: I.V. Adamovich, "Electric Field Measurements in Nanosecond Pulse Discharges in Air and in Hydrogen Flame".



Figure 1. Left: horizontal electric field in a ns pulse, dielectric barrier discharge in a hydrogen flow below the flame during the positive polarity pulse, plotted together with pulse voltage and current waveforms. Hydrogen flow rate 1.5 slm, pulse repetition rate 20 Hz, discharge gap d=4.5 mm. Right: electric field vector components in the plasma actuator at x=1 mm, y=0 during the negative polarity pulse.

3. Achievements

Time-resolved electric field is measured in ns pulse and AC sine wave dielectric barrier discharges sustained in an atmospheric pressure hydrogen diffusion flame,

using picosecond second harmonic generation. Electric field is measured in a ns pulse discharge sustained both in the hydrogen flow below the flame and in the reaction zone of the flame. Peak electric field in the reaction zone is lower compared to that in the near-room temperature hydrogen flow, due to a significantly lower number density. In hydrogen, most of the energy is coupled to the plasma at the reduced electric field of  $E/N \approx 50{\text{-}}100$  Td. In both cases, the electric field decreases to near zero after breakdown, due to plasma self-shielding. The time scale for the electric field reduction in the plasma is relatively long, several tens of ns, indicating that it may be controlled by a relatively slow propagation of the ionization wave over the dielectric surfaces.

Electric field vector components in a nanosecond pulse, surface dielectric barrier discharge plasma actuator are measured by picosecond second harmonic generation, for positive, negative, and alternating polarity pulse trains. In all pulse trains, the measurement results demonstrate a significant electric field offset before the discharge pulse, due to the surface charge accumulation during previous discharges pulses. Peak electric field measured in the alternating polarity pulse train is lower compared to that in same polarity trains. However, the coupled pulse energy in the alternating polarity train is much higher, by a factor of 3-4, most likely due to the neutralization of the surface charge accumulated on the dielectric during the previous, opposite polarity pulses. This suggests that plasma surface actuators powered by alternating polarity pulse trains may generate higher amplitude thermal perturbations, producing a stronger effect on the flow field.

4. Summaries and future plans

The results demonstrate a significant potential of ps second harmonic generation diagnostics for non-intrusive measurements of the electric field in atmospheric pressure flames enhanced by electric discharge plasmas. Future work includes studies of flame stability during ns pulse discharge forcing and electric field measurements in atmospheric pressure plasma jets for applications in biology and medicine.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] <u>I. V. Adamovich</u> : Electric Field Measurements in Atmospheric Pressure Electric Discharges, *Seminar at Tsinghua University*, Beijing, China, June 13, (2018).
- [2] <u>I. V. Adamovich</u>: Electric Field Measurements in Atmospheric Pressure Plasmas and Flames By Ps Four-Wave Mixing and Ps Second Harmonic Generation, *Seminar at Laboratoire de Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique*, October 4, (2018).
- \*[3] <u>M. Simeni Simeni, Y. Tang, K. Frederickson</u>, H. Takana, H. Nishiyama and <u>I. Adamovich</u>: Electric Field Measurements in Nanosecond Pulse Discharges in Air and in Hydrogen Flame, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2018), CRF-43, pp. 88-89.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J18I065
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2018.4 ~2019.3
継続年数	1年目(発展)

# 数値シミュレーションによる表面修飾ナノ粒子サスペンションの流動特性の解明に関する研究 A Study on Flow Characteristics of Suspensions of Surface-Modified Nanoparticles Using Numerical Simulations

## 塚田 隆夫\*†, 小宮 敦樹\*\*††, 久保 正樹\*, 庄司 衛太\*, 薄根 真\* \*東北大学大学院工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

本研究では、有機溶媒あるいは高分子と表面修飾ナノ粒子からなる高濃度サスペンション を対象とし、気液界面を含む流体運動(CFD)と表面修飾鎖による粒子間相互作用力を考慮 したナノ粒子運動(DEM)の連成シミュレーションにより流動特性を理解するとともに、分 子動力学シミュレーションを用いた表面修飾ナノ粒子と周囲流体との親和性評価を行う.

### 2. 研究成果の内容

#### 2.1 せん断流中のナノ粒子の分散・凝集挙動およびナノ粒子サスペンションの流動特性の解明

粒径 25 nm の表面修飾 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ナノ粒子/トルエンからなるサスペンションを対象として,固 体平板間(間隔: 250 nm)のせん断流中におけるナノ粒子の分散・凝集挙動に及ぼす諸因子 (表面修飾有機分子の種類,表面修飾率,ナノ粒子体積分率,せん断速度)の影響について CFD-DEM 連成シミュレーションを行った.図1にせん断流中におけるナノ粒子の分散・凝 集挙動に及ぼす修飾鎖および修飾率の影響を示す.各修飾鎖のトルエンとの親和性およびそ の修飾率の違いによる分散・凝集挙動の違いが確認された.さらに本研究では,得られた数 値シミュレーション結果について,せん断流中のナノ粒子の分散・凝集メカニズムを粒子間 ポテンシャルエネルギーに基づき説明するとともに,修飾率とペクレ数(せん断速度)を軸 とするナノ粒子の分散・凝集構造に関る状態図を提示した.また,ナノ粒子の分散・凝集状 態によって,サスペンションの流動状態も大きく変化することを明らかにした.





### 2.2 MD 法よる表面修飾ナノ粒子/溶媒界面の親和性評価のモデル開発

表面修飾ナノ粒子/溶媒系の付着仕事を求める手法を確立することを目的として,表面修飾 無機固体平面/溶媒系に対して,分子動力学シミュレーションを用いた付着仕事の算出手法の 一つである Phantom-wall method の適用を試みた.今回はモデル物質として,デカン酸修飾金 平面と水の付着仕事の算出を行った.算出された付着仕事は,デカン酸未修飾の場合に比べ て大きな値を示した.今後は,申請者らの実験系が表面修飾金属酸化物ナノ粒子であること を考慮し,無機固体を金属酸化物(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> など)に,また溶媒を有機溶媒や高分子へと変更 し,計算を進めることが課題である.

## 3. 研究目標の達成状況

CFD-DEM 連成シミュレーションにより, せん断流中におけるナノ粒子の分散・凝集挙動 およびナノ粒子サスペンションの流動状態に及ぼす修飾有機分子等の諸因子の影響を明らか にすること,並びに表面修飾有機分子/溶媒間の親和性ーナノ粒子構造ーサスペンションの流 動特性との相関を解明することに関しては,ほぼ達成できたと考える.また,MD 法による 表面修飾ナノ粒子/溶媒界面の親和性評価については,モデル物質ではあるが,表面修飾無機 固体/溶媒間の付着仕事の算出が可能となったことから,目標としていた Phantom-wall method を用いた付着仕事算出モデルの開発は達成できた.

## 4. まとめと今後の課題

ナノ粒子表面の修飾有機分子による相互作用を考慮した CFD-DEM 連成シミュレーション を利用し、高濃度サスペンションのせん断流中におけるナノ粒子分散・凝集挙動、ナノ粒子 サスペンションの流動特性を明らかにした. 今後は本シミュレーションを固/気/液三相接触線 近傍の流体および粒子運動の解析に展開し、実験との比較を通して、ナノ粒子サスペンショ ンのミクロスコピックな濡れ性の詳細を明らかにする. また、今回 MD 法による表面修飾無 機固体/溶媒間の付着仕事を算出可能なモデル開発を行ったが、今後は、無機固体や表面修飾 有機分子,溶媒を変更し、これら影響因子と表面修飾ナノ粒子/溶媒間の親和性(付着仕事) との相関を明らかにすることが課題となる.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- \*[1] <u>Shin Usune, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Osamu Koike, Rei Tatsumi, Masahiro Fujita, Seiichi Takami, Tadafumi Adschiri</u>: Numerical simulations of dispersion and aggregation behavior of surface-modified nanoparticles under shear flow, *Powder Technology*, Vol. 343 (2019), pp. 113-121.
- [2] <u>Shin Usune, Munehiro Ando, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Ken-Ichi Sugioka, Osamu Koike, Rei Tatsumi, Masahiro Fujita, Seiichi Takami, Tadafumi Adschiri</u>: Numerical Simulation of Dispersion and Aggregation Behavior of Surface-modified Nanoparticles in Organic Solvents, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 51 (2018), pp. 492-500.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[3] <u>Shin Usune, Masaki Kubo, Eita Shoji</u>, Atsuki Komiya and <u>Takao Tsukada</u>: A study on flow characteristics of suspensions of surface-modified nano particles using numerical simulation, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-85, pp. 176-177.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I066
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

# 電磁超音波による配管内の腐食の定量化

Corrosion Characterization for Pipe Wall by Electromagnetic Ultrasound

中本 裕之\*†,高木 敏行\*\*†† 内一 哲哉\*\*,浦山 良一\*\*,梶 晃子\* \*神戸大学大学院システム情報学研究科,\*\*東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

## 1. 研究目的

原子力発電所内の配管内部では流体との機械的かつ化学的作用により腐食が生じ、その進行に より配管の破断リスクが高まる.このため特に配管の厚さと亀裂の検出に関してこれまで多くの 報告がある.しかしながら、配管の状態は厚さと亀裂のみで表されるのではなく、減肉に伴う他 の状態も検出することで破断リスク評価の高度化が期待できる.本研究では配管の厚さに加えて、 減肉部の性状、特に粗さを評価する新たな方法を提案する.粗面をもつ試験体に提案する方法を 適用することにより、提案方法の有用性を検証する.

### 2. 研究成果の内容

粗面で反射した超音波の振幅と平面で反射した振幅をそれぞれR,  $R_0$ とするとそれらの関係は式(1)で表される.

$$R = R_0 e^{-f(h)}. (1)$$

ここで、*f*(*h*)は粗面における反射時の減衰関数であり,*h*は粗面に対して高さ方向のパラメータ、 二乗平均平方根高さを表す.超音波は粗さ以外の他の要因、例えば伝搬距離、配管材質やその微 細構造などによっても減衰する.ここではそれらの影響は計測対象が変わっても一定とし、超音 波入射後、粗面で1回の反射を経て検出する反射波と2回の反射を経て検出する反射波の振幅を 用いて、粗さ以外の項を除去した式(2)にもとづいて粗さと減衰の関係を考える.

$$\beta = \ln \left( \frac{\frac{R^{2nd}}{R^{1st}}}{\frac{R^{2nd}}{R^{1st}_0}} \right) = -f(h).$$
<sup>(2)</sup>

ここで $R^{1st} \ge R^{2nd}$ は粗面でそれぞれ1回,2回反射した超音波の振幅, $R_0^{1st} \ge R_0^{2nd}$ は平面での1回,2回反射した場合の振幅を表す.

試験体を対象として、反射した超音波の振幅を計測した. 試験体は線状の模擬腐食を加工した 直方体であり、材料は炭素鋼である. 寸法は厚さが 20 mm, 模擬腐食のある面およびその対面は  $40 \times 40 \text{ mm}^2$ である. 計 10 個の試験体を用い、そのうち 1 個は粗さのない面において反射した 超音波を得るために模擬腐食を加工せず、他の 9 個の試験体にはピッチや深さの異なる模擬腐食 を加工した. さらに 1 つの試験体を 3 つの領域に分け、各領域における粗さhを形状測定器で計 測したプロファイルより決定した. Longitudinal wave(以下、L wave)用と Shear horizontal wave(以下、SH wave)用の超音波探触子を用いて、各試験体の粗さのない面から超音波を伝播 させ、それらの 1 回と 2 回の反射後の超音波の振幅を計測した. L wave と SH wave の周波数と 速度は、それぞれ 4.9 MHz と 5610 m/s, 4.0 MHz と 3239 m/s であった.

Lwave と SH wave の実験結果をそれぞれ図 1(a)と(b)に示す.縦軸は減衰関数に相当し、横軸 は粗さhである.いずれの結果においても、粗さがhが大きくなるにつれて減衰が大きくなる結果 となった.これは粗い面ほど超音波の散乱が大きくなり、反射波の強度、すなわち振幅を減じた と考えられる.図 1(a)と(b)には、粗さhを説明変数とした回帰分析を行った結果も示した.その 結果、L wave と SH wave について、それぞれ $h^2$ 、 $h + h^2$ が最小誤差となるモデル式であった. 振動の方向の異なる L wave と SH wave において同じ傾向があることを確認できた.



図1:実験結果と回帰分析による結果

#### 3. 研究目標の達成状況

粗さを評価するための計測方法を提案し実験を実施した.配管の評価に粗さというパラメータ を加えることを関連学会の国際会議,国内会議にて国際共同研究の成果として発表した.ただし, 特許出願までは至っていない.予想される成果に対して 80%の達成度と考える.

### 4. まとめと今後の課題

本研究は配管をターゲットにしているが,粗面をもつ炭素鋼ブロックを試験体としており,配 管を加工した試験体を用いていない.今後は配管の試験体を対象とした実験検証を行う.

- 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] <u>H. Nakamoto, P. Guy</u> and T. Takagi: Corrosion Induced Roughness Characterization by Ultrasonic Attenuation Measurement, *Proceedings of 4th International Conference on Maintenance Science and Technology*, Sendai, (2018), 2-3.pdf.
- \*[2] <u>H. Nakamoto, P. Guy</u> and T. Takagi: Corrosion Characterization for Pipe Wall by Ultrasound Reflection, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-31, pp. 60-61.
- [3] <u>中本裕之</u>, <u>GUY</u>, <u>Philippe</u>, 高木敏行: 配管検査のための粗面における反射時の散乱による超 音波減衰の影響, 第 27 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 東京, (2018), pp. 132-133.
- [4] P. Guy, B. Normand, <u>H. Nakamoto</u>, T. Takagi and D. Mallick: Recent advances in PYRAMID project : EMAT experimental results for corrosion characterization, *Abstract book of ELyT Workshop 2019*, Osaki, (2019), pp. 78-81.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I067
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	3年目

# ナノ粒子を母材に分散させた炭素繊維強化プラスチックの機能性向上に関する研究 A Study on the Functionality Improvement of Nanoparticulate-Filled Carbon Fiber Reinforced Plastic

# 高山 哲生\*†,小助川 博之\*\*††,高木 敏行\*\* \*山形大学大学院有機材料システム研究科,\*\*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

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は、軽量でありながら金属に匹敵する機械的性質を持ち、 様々な産業分野に応用されている. CFRP の母材となるプラスチックは、熱可塑性と熱硬化性に 大別される. 宇宙ロケットや航空機には、過酷な動作環境に耐えられる熱硬化性プラスチックが 使用されている. 燃料経済性の観点から、これらの部材はできるだけ軽量であることが望ましく、 比強度・比剛性の更なる向上が求められている. 近年、繊維強化プラスチックにナノサイズの微 粒子を分散させた複合材料の機械的特性に関する研究が行われている. これは、繊維に依存しな い方法で繊維強化プラスチックの機械的特性を改良する技術として提案されている. 以前の研究 によれば、これらの効果はマトリックスの熱可塑性および熱硬化性に依存しない.

また、このようにナノ粒子を母材に分散させる技術は、繊維強化プラスチックの機械的特性を 向上させるのみならず、電磁的特性や熱的特性などの機能性を付与する用途にも利用される.加 藤らは、磁性ナノ粒子を CFRP の母材に分散させることによって CFRP の比透磁率を上昇させ、 非破壊検査技術の一つである渦電流試験における欠陥検出性が向上することを示した(R. Kato, et al., Proceedings of ICFD2016, (2016) 698-699).

本研究ではこれまでに CFRP 中にナノサイズの微粒子を分散させることによる力学的特性の 向上に関する理論を構築し、実験的に明らかにしてきた. 今年度では、磁性ナノ粒子を母材に分 散させることによって得られる機能性 CFRP の力学的特性の評価を、上記成果に基づき試みた.

#### 2. 研究成果の内容

まず、動的光散乱法を用いてエポキシ樹脂中における磁性ナノ粒子(FEO07PB、高純度化学研究所)の凝集を評価した.微量の磁性ナノ粒子を計測セル中のエポキシ硬化剤(TB2131D,(株)スリーボンド)に加え、超音波を用いて均一に拡散させた.TB2131Dは低粘度硬化剤であり、25℃における粘度は0.9 Pa・s である.セルを粒径測定システム(ELSZ-2000ZS,大塚電子(株))の測定室に設置し、10 分毎に硬化剤中におけるナノ粒子の粒径の変化を計測した.

5 wt%の磁性ナノ粒子を自転公転ミキサを用いて 2 液混合系エポキシ樹脂液 (TB2023/TB2131D,(株)スリーボンド)に分散させ、一方向炭素繊維織物(UT70-60S,東レ(株)) を[0/90/0]の構成とした積層体に真空樹脂含浸法を用いて含浸させ、プリフォームとした.このプ リフォームを加熱炉内で 100℃,2時間加熱し、磁性を有する CFRP(以下、MagCFRP)を得た. 比較のため、磁性ナノ粒子を含まない CFRP(以下、NeatCFRP)も作製した.得られた板材を 100 × 15 mm<sup>2</sup>の矩形セグメントに切り出し、曲げ試験片とした.曲げ試験は、JIS K7074 に基づき 試験速度 5 mm/min で行い、曲げ弾性率を求めた.また、Neat CFRP と MagCFRP の曲げ弾性 率の理論値を,著者らが提案した理論式(T. Takayama, et al., Proceedings of AFI2017, (2017), 116-117)を用いて求めた.ここで理論計算に利用した磁性ナノ粒子の物性はヤング率を142 GPa, ポアソン比を 0.33 とし(浅田 実,大森 康男, 鉄と鋼, **69**(7) (1983), 739-745),炭素繊維の体積含 有率は Neat CFRP の場合が 50.7 vol.%, MagCFRP の場合が 39.7 vol.%であるとした.

動的光散乱法により、エポキシ硬化剤中における磁性ナノ粒子の粒径は480 nm から時間経過 とともに上昇し、測定開始後から80分後に800 nm まで上昇することが確認された.これは、 エポキシ樹脂液内では磁性ナノ粒子の凝集が進むことを表している.図1は NeatCFRP と MagCFRPの曲げ弾性率の実験値と理論値である.磁性ナノ粒子を分散させた CFRPは、ナノ粒 子を加えない CFRPよりも曲げ弾性率が低下することがわかる.これは母材中においてナノ粒子 が凝集し粒径が大きくなったために隣接する炭素繊維のギャップが広がり、堆積含有率が低下し たためであると考えられる.また、MagCFRPの体積含有率の低下を考慮に入れることで、曲げ 弾性率の理論値は実験値をよく再現できていることから、著者らが提案した理論はナノ粒子が凝 集する系に対しても有効であることがわかる.



図1:Neat CFRP と MagCFRP の曲げ弾性率

#### 3. 研究目標の達成状況

ナノ粒子の凝集効果を考慮に入れることで機能性を付与した磁性ナノ粒子含有 CFRP の力学 的特性を理論的に説明することに成功した.これにより、目標である「機能性付与を可能としな がら高剛性となる CFRP の開発」に必要となるナノ粒子含有 CFRP の学理構築に貢献できたも のと考える.

#### 4. まとめと今後の課題

炭素繊維と粒子間のヘテロ構造を考慮に入れることで、ナノ粒子を分散させた CFRP の力学的 特性の理論を構築することに成功した.本研究では、一方向織物を用いた炭素繊維積層体の中に 球状のナノ粒子が分散される系について説明したが、今後は3次元的に編み込まれた織物を用い る系とアスペクト比が大きいナノ粒子を用いる系についてのメカニズムを解明する必要がある.

- 5. 研究成果 (\*は別刷あり)
- 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] <u>T. Takayama</u>, H. Kosukegawa, T. Takagi: Nano-particle dispersion effects on the mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics, *Proceedings of the 18th Int. Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-35, pp. 72-73.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I068
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2年目

## 水中ストリーマの開始・進展機構 Mechanism of Inception and Propagation of Underwater Streamer

佐藤 岳彦\*†, 金澤 誠司\*\*††, 金子 俊郎\*\*\* 大谷 清伸\*, 小宮 敦樹\*, 中嶋 智樹\* \*東北大学流体科学研究所, \*\*大分大学理工学部, \*\*\*東北大学大学院工学研究科 †申請者, ††所外対応研究者

### 1. 研究目的

水中プラズマ流における放電現象は、相変化や熱流動場、電場、化学反応場を含む現象が 重畳する複雑流動場を形成している.特に、放電形態の一つであるストリーマが、水中をど のように進展するかについては、電離進展理論と気泡進展理論があり、申請者らの今までの 研究により正極性ストリーマにおいては電離進展機構を示唆する結果が得られている.しか しながら、水中を高速移動する電荷の挙動については未解明であり、電離進展機構であるこ とを確定できていない.そこで、本研究では電荷移動機構について明らかにすることを目的 とする.

### 2. 研究成果の内容

本年度は、平成29年度に撮影した水中負ストリーマの進展に伴い発生する圧力波の解析を 行った.図1(a)に t=200 ns に観察された圧力波の波面とその発生源を記した結果を示す. 黄色い円が圧力波の波面、赤いバツ印が圧力波の発生源である.この解析は、圧力波の波面 を定めることでその中心位置(波の発生源)を算出した.4 つの圧力波が識別されたためそ の発生順に半径を R1 - R4 とし、発生源を C1 - C4 で表した.発生源が針電極に近いものほ ど圧力波面の半径が大きいことから、ストリーマの進展に従い圧力波が生成されていること が示された.図1(b)に得られた波の発生源を t = 25 ns から t = 100 ns の写真上にプロッ トした結果を示す.ストリーマの先端に位置することが示されている.図1(c) に図1(a)



Fig. 1. (a) Wavefronts lined in yellow and origins of the pressure waves marked in red. (b) Photographs from t = 25 ns to t = 100 ns with plotted origins of pressure waves. (c) Sequence of origins of pressure waves and their occurrence time as calculated.

から求めた圧力波の発生源とその発生時間を並べた結果を示す.これより,負ストリーマは, 20 ns 程度の時間,また 20 µm 程度の距離を進む毎に方向を変え,分岐する場合も時間差が あることが明らかになった.

## 3. 研究目標の達成状況

本年度は、負極性ストリーマの進展は、20 ns 程度の時間、また 20 µm 程度の距離と極め て短い時間かつ短い時間毎に進展と停止を繰り返し、また停止する度に進展方向を変えるこ とを明らかにした.さらに、ストリーマ分岐において時間差があることを示した.これらの 成果は、世界初の重要な知見であり、J. Appl. Phys. への掲載、国際学会における招待講 演などの情報発信を行うことが出来たため、本年度の目標を達成している.

## 4. まとめと今後の課題

本年度は、以前よりその機構が不明であった、正極性2次ストリーマの進展速度が秒速20km以上になる現象について、実験的な検証を行いたい.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- \*[1] R. Kumagai, <u>S. Kanazawa</u>, K. Ohtani, A. Komiya, <u>T. Kaneko</u>, T. Nakajima, and T. Sato: Propagation and Branching Process of Negative Streamers in Water, *Journal of Applied Physics*, Vol. 124, Issue 16 (Published Online: October 22, 2018), Article No. 163301 (7 pages).
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
  - [2] T. Sato, R. Kumagai, <u>T. Miyahara, M. Oizumi, T. Nakatani, S. Ochiai, T. Miyazaki</u>, H. Fujita, <u>S. Kanazawa</u>, K. Ohtani, A. Komiya, <u>T. Kaneko</u>, T. Nakajima, <u>M. Tinguely</u>, and <u>M. Farhat</u>: Formation process of fine bubbles by plasma in water, *International Symposium on Application of High-voltage*, *Plasmas & Micro/Nano Bubbles (Fine Bubbles) to Agriculture and Aquaculture (ISHPMNB2018)*, Morioka, (2018), Abstract Book, pp. 45-46. (Invited)
- [3] 熊谷諒, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 金子俊郎, 中嶋智樹, 佐藤岳彦: 水中負ストリーマの進展過程の可視化解析, 放電/プラズマ・パルスパワー合同研究会, (2018), 電気学会研究 会資料, pp. 1-4.
- \*[4] R. Kumagai, <u>S. Kanazawa</u>, K. Ohtani, A. Komiya, <u>T. Kaneko</u>, T. Nakajima, and T. Sato: Mechanism of propagation of underwater negative streamer, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, (2018), CRF-69, pp. 144-145.
- [5] R. Kumagai, <u>S. Kanazawa</u>, K. Ohtani, A. Komiya, <u>T. Kaneko</u>, T. Nakajima, and T. Sato: Propagation process of underwater negative streamer, *5th Taiwan-Japan Workshop on Plasma Life Science and Technology (TJPL2018)*, Kaohsiung, Taiwan, (2018).
- [6] T. Sato, R. Kumagai, <u>T. Miyahara, M. Oizumi, T. Nakatani, S. Ochiai, T. Miyazaki</u>, H. Fujita, <u>S. Kanazawa</u>, K. Ohtani, A. Komiya, <u>T. Kaneko</u>, T. Nakajima, <u>M. Tinguely</u>, and <u>M. Farhat</u>: Generation of Fine Bubbles by Underwater Plasma Discharge, 28th Annual Meeting of MRS-Japan 2018 (Symposium C-2: Plasma Life Science), Fukuoka, (2018), Presentation No. C2-I19-008. (Invited)
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I070
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1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 由香\*\*††,胡 玭\*\* \*埼玉大学工学部機械工学科,\*\*東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

### 1. 研究目的

ポンプを高速回転,低流量,低吸込み圧力の状態で運転すると,様々なキャビテーション不安 定現象が発生することが知られている.液体ロケット用ターボポンプインデューサは小型かつ超 高速回転であるため,しばしばこのキャビテーション不安定現象が発生し,古くから多くの研究 がなされてきた.また,一般用産業ポンプでも小型化・高速化・高吸込み性能化が進むにつれて キャビテーション不安定現象が問題となり,遠心ポンプや斜流ポンプにおいて研究がなされてき た.

低吸込圧力では、キャビテーションの回転周波数がインペラーの回転周波数より大きい超同期 旋回キャビテーションと呼ばれるキャビテーション不安定現象が発生する.吸込圧力を更に下げ ると、インペラーの回転周波数と同じ同期旋回キャビテーション、インペラの回転周波数より小 さい亜同期旋回キャビテーションが発生する.これらの不安定現象の遷移メカニズムは未だに明 らかにされていない.そこで本研究では、キャビテーション不安定現象の遷移メカニズムを明ら かにすることが目的である.

#### 2. 研究成果の内容

図1に示すように、流体科学研究所のキャビテーションタンネルを用いて実験を行った. ポン プ下流のバルブにより流量を、タンクの真空ポンプにより吸込圧力を調節した. 図2に示すよう に、羽根車前縁から後縁まで容易に可視化できるように、羽根車側板と入口ボリュート壁面を全 面アクリル平板で設計した.

図3に、水槽実験から得られたポンプの圧力性能曲線を示す. 横軸は流量、縦軸はヘッドを示 す. ポンプの圧力性能は全て右下がりの勾配を持ち、最大効率の流量は約1.2 m<sup>3</sup>/min であるこ とが分かる. これより、サージもしくは旋回失速のような、ポンプの圧力性能の右上がり勾配に 起因する不安定現象が発生しないことが予測される.

図4に,水槽実験から得られたポンプの吸込性能曲線を示す. 横軸は正味吸込ヘッド(=NPSH) と縦軸はヘッドを示す. 流量が 1.2 m<sup>3</sup>/min の場合,低流量と比較し,ポンプの性能が急激に落 ち始める正味吸込ヘッド大きいことが分かる.

#### 3. 研究目標の達成状況

研究目標であるキャビテーション不安定現象の遷移メカニズムを調査する段階までは至って いないが、予備実験によりキャビテーション発生時のポンプ性能を測定することができた.



図1: キャビテーションタンネル



図2: 可視化用の窓



### 4. まとめと今後の課題

キャビテーション発生時の遠心ポンプの性能曲線と吸込性能が得られることができた.今後, 高速カメラを用いてキャビテーション流れの様子を撮影する.さらに,インペラの測壁に圧力セ ンサーを付けて,キャビテーションによる圧力変動を測定することにより,キャビテーション不 安定現象を同定する.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[1] D. Kang, P. Fu, H. Sasaki and Y. Iga: Clarification of the Transient Mechanism of Cavitation Instabilities, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on* Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-70, pp. 146-147.
- 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	J18I071
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2年目

### 火星探査航空機高高度試験機の動特性に関する数値的研究

Numerical Investigation of Dynamic Stability for the High-Altitude Experimental Model of Martin Airplane

# 金崎 雅博\*†,永井 大樹\*\*†† \*首都大学東京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

本申請研究では、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)に基づき、申請者ら により概念検討が行われた、実現できれば工学的には世界初となる火星探査航空機次期に向けた 次期高高度試験機(MABE-2)(表1、図1)について、フライトシミュレーションに用いるこ とができる空力データベースを構築し安定性・制御性の検証を進めることを目的とする。検証に あたっては、「水平尾翼を大きくした影響」「垂直尾翼位置を翼端に変更したこと」「主翼に対し て尾翼に-2°に取り付け角を設けたこと」に注意し、MABE-2の動微係数を取得して動的特性の 知見を得る.





図1:MABE-2の諸元と鳥観図、および軸の定義

### 2. 研究成果の内容

2018年度においては、主に CFD を用いて、縦横各方向における空力係数・微係数の取得を進めた. 図2にピッチ角速度 q に対する縦方向の力(揚力係数  $C_L$ とモーメント係数  $C_m$ )の微係数  $C_{Lq}$ ,  $C_{mq}$ の迎角(AoA)変化を示す. この図より、 $C_{mq}$ は調べた全AoA にわたって負値を示すことから、ピッチ角運動は何らかの擾乱に対して常に減衰運動となることがわかる. これらの計算から、縦の短周期運動の特性を概算した結果を表 2 に示す. 固有振動の周期は 1.2 秒程度であるが、一般的なグライダーが 1 秒程度であることから、およそ妥当な値が求められていると考えられることから、フライトシミュレーションのためのデータベースとして検討できる. また、減衰比は小さく、突風応答の収束性が悪いことが懸念される. また、無次元振動数は 0.00972 と小さく、定常空気力のみでもあるていど運動の評価ができるものと思われる.

図3にロール角速度 p に対するローリングモーメント係数の動微係数 C<sub>lp</sub>, とヨー角速度 r に対するヨーイングモーメントの動微係数 C<sub>nr</sub>をしめす. C<sub>lp</sub> は調べた全 AoA に対して負値を示すこと

から、ローリング運動は減衰運動となると予測される. Cm もおおむね同様であるが、 AoA が-12° 以下の時に、正となることから、注意が必要となると思われる.

図4にロール回転とヨー回転角速度を与えたときのスパン方向荷重と、回転角速度が0の時と の差分  $\Delta F_y$ を示す.これらから、ロール運動では主翼、ヨー運動では垂直尾翼の影響が支配的で あり、素直な特性となっていることがわかる.



図3:  $C_{lp} \cdot C_{nr}$ の迎角変化

図4: ΔFyの分布(左ロール速度,右ヨー速度)

#### 3. 研究目標の達成状況

当初計画に対して、「再設計機における空気力による動的特性の取得」はほぼ達成することができた.また、実験値との比較検討の遅れがあるものの、「空力データベース構築に基づく運動予測」も行うことができた.「空力制御の効果に関する知見の獲得」については、飛行力学計算実施の遅れがあり、 年度をまたいで実施中であるが、近く終了する予定である.

### 4. まとめと今後の課題

本研究では CFD を用いて MABE-2 の縦横方向の力に関する動微係数を取得し、動的特性について知見を得た.特に、およその迎角範囲において、機体の回転が減衰する方向に動的空気力がはたらくことが分かった.縦方向の力については、短周期モードの減衰比が小さいため、空力か制御で補償する必要があることなども同時に分かった.

#### 今後の方針

次年度の継続においては、操舵を伴う空力をデータベースに追加することをすすめ、飛行を連 成させた計算と空力操舵計画の最適設計を実施する.また、各振動モードを理解するために重要 な動微係数である High-fidelity 計算により、迎角が時間変化するときの力の取得も行う.

- 研究成果(\*は別刷あり)
- 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] <u>M. Kanazaki, K. Tomisawa, H. Kittaka</u>, K. Fujita, <u>A. Oyama</u>, H. Nagai : Aerodynamic Performance Investigations Around Control Surfaces of Mars Airplane Balloon Experiment Two, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2018)*, Sendai, (2018), CRF-18, pp. 36-37.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I072
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2 年目

## 飛翔体物理の解明を目指した分子イメージング計測技術の開発 Development of Molecular Imaging Technology for Investigation of Projectile Aerodynamics

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

本研究では、超音速で飛翔する物体に生じる諸現象について、自由飛行する物体上の非定 常圧力場を直接計測することによって明らかにすることを目指している.また、飛翔体上の 圧力場を定量的かつ面的に計測することにより, 飛翔体上に加わる空気力を定量的に明らか にすることも目指している.本目的の達成のため、本研究では分子イメージング技術に着目 しており、特に、物体上の圧力場を定量計測可能な感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint, PSP) 技術をバリスティックレンジ試験に適用可能な技術とする事を目指している.本目的 の達成のため、本研究では、充分な時間応答性を有し、かつ動的物体上の圧力場計測が可能 な高速応答型二色発光型 PSP を開発し、飛翔体上の圧力場計測を試みた.

## 研究成果の内容

図1に、本研究で開発した高速応答型二色発光型 PSP を適用した飛翔体の可視化結果を 示す.飛翔体形状は球として,速度はマッハ 1.9 とした.また,試験は大気圧下で行って おり, 露光時間は 2.5 マイクロ秒である. 二色発光型 PSP については, 感圧色素は Tris (4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline) ruthenium (II) dichloride であり、参照色素は Fluorescein である. 両色素は、リン酸型陽極酸化処理を飛翔体に適用した後、ディッピン グにより飛翔体表面に吸着させた.また,飛翔体素材はアルミニウムである.なお,図中に おいて,飛翔体は左から右に向かって飛翔している状態である.



Low

図1:マッハ 1.9 で飛翔する球状物体上の圧力場

図より,飛翔体上において,物体先頭部に高圧領域が形成されているのが分かる.その後, 下流側に行くに従い圧力は低下していく傾向が見える.本結果より圧力プロファイルを取得 すると,比較的圧力変化の小さい領域が複数存在することが分かり,それぞれの領域の境界 においては比較的急激に圧力変化が生じていることが分かった.つまり,圧力場は上流部よ り球の進行方向に対して帯状に分布しており,かつそれぞれの圧力差は比較的大きいことが 分かった.以上により,定性的には球状物体上の圧力場を可視化することに成功した.

### 3. 研究目標の達成状況

本年度の成果としては、高速応答型二色発光 PSP の特性を向上させることに成功しており、それを適用した超音速で飛翔する飛翔体上の圧力場を、従来よりも高い S/N 比で取得することに成功したことが挙げられる. 目標としていた定量計測には S/N 比の観点からはやや不足する点はあるが、その改善方法について本年度の研究成果により一定のめどがついた状況である.

### 4. まとめと今後の課題

定性的な飛翔体可視化については、時系列的なデータ取得を含めある程度の技術段階まで 到達することが出来た.上述したように、本年度の成果から S/N 比の改善、すなわち PSP の特性改善にめどがついた状況であり、次年度においては発光強度と圧力感度を更に高めた PSP により定量的な計測の実証試験を行う予定である.

### 5. 研究成果(\*は別刷あり)

- 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
- Daiju Numata, Kiyonobu Ohtani : Surface Pressure Measurement on Supersonic Free-Flight Projectiles Using Unsteady PSP Techniques, 2018 AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition (2018 AIAA AVIATION Forum), (2018), AIAA-2018-3315.
- \*[2] <u>Daiju Numata</u>, Kiyonobu Ohtani : Molecular Imaging Technology for Surface Pressure Measurement on Projectiles, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, (2018), CRF-80, pp. 166-167.
- [3] <u>沼田大樹</u>: 改良型超高速応答型感圧塗料を用いた二色 PSP 計測,日本機械学会第 96 期流体 工学部門講演会,(2018),GS5-4.
- [4] <u>沼田大樹</u>: 非定常感圧塗料による超音速現象の可視化, 平成 30 年度衝撃波シンポジウム, (2019), 3B2-1.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I075
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1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\*†,大谷 清伸\*\*†† 梶野 瑞基\*,川添 博光\*\*\* \*東海大学工学部,\*\*東北大学流体科学研究所 \*\*\*鳥取大学大学院工学研究科 †申請者,††所内対応教員

## 1. 研究目的

惑星探査機などの宇宙機が大気突入飛行する際には、強い衝撃波の生成を伴い厳しい熱空 力環境にさらされる.そこで宇宙機を空力加熱から守るためには、大気突入時に飛翔体周り に生成される衝撃層内の熱化学特性を明らかにすることが求められている.これまで主に衝 撃波管により飛行速度に相当する衝撃波を生成して、衝撃波背後の熱化学特性についての研 究が実施されてきた.しかしながら、衝撃波管で生成される衝撃波は一次元的であり飛翔体 周りに生成される衝撃層とは根本的に異なる.そこで本研究では、より現実の極超音速飛翔 体周りの流れ場を再現可能な弾道飛行装置を用いた極短時間光学計測を実施して、衝撃層内 の熱化学特性を解明することを目的とする.

### 2. 研究成果の内容

本年度は、衝撃波管を用いた衝撃層輻射光の計測と流れ場と輻射輸送を考慮した衝撃層輻射光の数値解析を実施した。衝撃波管観測部に集光レンズ、モノクロメーター及び光電子増倍管 (PMT)から構成される図1に示すような時間分解分光計測システムを用いて衝撃層輻射光の計測を実施した.本研究では、波長316nm付近のN<sub>2</sub>(2+)(1,0)、391nm付近のN<sub>2</sub>+(0,0)及び744nm付近のN3p4S<sup>0</sup>-3s<sup>4</sup>Pを計測対象としてモノクロメーターの中心波長を設定して単一波長における時間分解計測を行った.試験気体には窒素を用いて、衝撃波速度は秒速6km、試験気体圧力は50Paの条件で計測を実施した.

数値解析に関しては、最初に実験と同条件で衝撃波管内の流れ場の計算を1次元非平衡流 計算コードにより行った.そして得られた流れ場の数密度と温度を入力値として輻射解析コ ード SPRADIAN2 を用いて輻射強度の計算を行った.図2に輻射強度の計算値と計測値の 比較結果を示す.本図は、衝撃波面を基準としてそれぞれの波長における輻射強度の時間変 化を表している.これより、輻射強度の計測値と計算値は特に衝撃波前方領域において大き く異なっているのが分かる.計測した輻射強度は衝撃波前方領域から増加しているのに対し て、計算した輻射強度は衝撃波面付近から急激に増加する傾向にある.また衝撃波背後にお いて、計測した輻射強度の方が速く減少する傾向にあることが分かる.この原因としては、 衝撃波層内の輻射光をエネルギー源とした衝撃波前方領域で生じる熱化学過程や輻射輸送 現象(プリカーサ現象)であると考えられる.



図1:時間分解分光計測システム



図2:衝撃波面を基準として輻射強度の時間分布

3. 研究目標の達成状況

衝撃波管を用いた輻射強度の極短時間計測システムを構築して実際に数値解析と比較でき るデータを取得することができた.これにより、これまで数値解析で考慮されていなかった 衝撃波前方のプリカーサ現象が生じることが明らかになった.また最終的に実施する弾道飛 行装置を用いた飛翔体模型周りの輻射強度計測に用いる計測手法も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た飛翔体模型周りの輻射強度計測の予備試験として、衝 撃波管で生成した高速衝撃波を対象として輻射強度計測を実施した.これより、極短時間の 計測が可能な時間分解分光計測手法を確立して、また衝撃波前方でプリカーサ現象により輻 射強度が増加することを明らかにした.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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] <u>G. Yamada, J. R. Llobet Gomez, M. Kajino, H. Kawazoe</u> and K. Ohtani: Characterization of High Enthalpy Flows around a Hypersonic Vehicle, *Proc. of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-82, pp. 170-171.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I078
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1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・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\*\*\*, Yu Jihong\*\* \*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 \*\*\*南京科学技術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

工業装置や環境中に見られる流れの多くは、乱流と非乱流が共存する流れである。例えば 噴流や壁面乱流は、非乱流を取り込みながら乱流が発達する。また十分にレイノルズ数が高 い場合でも、初期段階は乱流と非乱流が共存する。このようないわゆる外部間欠性を有する 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、渦 スケール間でのエネルギー・スカラフラックスを明らかにすることにより、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

本年度はシングル格子乱流場における基礎特性を明らかにするとともに、エネルギーモー ド解析プログラムを構築した. 代表的な結果として、図1にスカラー変動の POD 解析結果 を示す. 図中の x=0 の位置に格子は配置されている. 図より、モードが上がる(エネルギー的 な支配率が下がる)につれてより細かい変動で構成されることがわかる.

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、シングル格子乱流場における数値シミュレーションコードおよびエネルギーモードを用いた解析プログラムの構築を行った.これは当初の予定とほぼ等しく、また下記のように学会で発表された.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

並行して行っている実験研究においては乱流エネルギおよびスカラに対する構造関数 を用いた解析を行い,格子の近傍と遠方でそれらの主たる輸送方向や間欠性に違いが出 ることを明らかにした.次年度以降は,同様の解析を数値シミュレーション結果にも適 応することにより,乱流・非乱流の共存場におけるエネルギ・スカラ輸送機構を明らか にする.



図1:スカラー変動のPODモード解析結果

5. 研究成果(\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- \*[1] <u>K. Takamure, Y. Sakai, Y. Ito, K. Iwano</u>, T. Hayase : Dissipation scaling in the transition region of turbulent mixing layer, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 75, (2019), pp. 77-85.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[2] <u>Y. Sakai, Y. Ito, K. Iwano, T. Hayase, Z. Yi, S. Nagaya, J. Yu</u>: Fluid Dynamics and Energy/scalar Transport in Coexisting Flows of Turbulence and Non-turbulence, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI-2018), Sendai, (2018), CRF-91, pp. 188-189.
  - [3] P. Kadu, Y. Sakai, Y. Ito, K. Iwano, M. Sugino, T. Katagiri, T. Hayase : Influence of Swirl on Coaxial Jets, *Proceedings of the 15th International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, (2018), OS14-12, pp. 776-777.
- [4] <u>柳志弘</u>, <u>酒井康彦</u>, <u>伊藤靖仁</u>, <u>岩野耕治</u>, 早瀬敏幸 : Numerical Study on Scalar Transport in Single-Square-Grid-generated Turbulence, *TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2019* (*TEC19*), Gifu University, (2019), CD-ROM.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I081
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	3年目

## 複雑形状の空隙媒体による水中爆発環境の減衰効果 Effect of Environment Attenuation of Underwater Explosion by Porous Complex Mediums

北川 一敬\*†, 大谷 清伸\*\*††, 小西 康郁\*\* \*爱知工業大学工学部, \*\*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

衝撃波の減衰法・緩和法の信頼性を向上のために、予測・実証・検証のサイクルで実行し ていくシステムが必要である.現状では、水中爆発の衝撃干渉問題と爆発環境の減衰効果の 検証と実証のための計測データが不足している.本研究では、衝撃波と気泡振動の減衰特性 を考慮した音響インピーダンスを持つ気泡構造の複雑媒体で、水中爆発時の衝撃圧減衰、爆 発ガスの気泡膨張収縮の抑制と水流ジェットの軽減による衝撃環境の減衰法の確立する.

### 2. 研究成果の内容

図1は、水中爆発実験時の物体の設置の模式図を示す.本実験では外寸340mm×300mm ×320m,内寸 300mm×300mm×300mm の水槽と約 18L の精製水を使用した.アジ化銀 ペレット(AgN3)は昭和金属工業㈱,円筒型(アスペクト比 1,直径 1.5mm),薬量約 10mg, 密度約 3,770kg/m<sup>3</sup> である. 起爆は光ファイバ他端から, Q-switched Nd:YAG レーザを 1 回照射し、つるし発破法により行った.爆薬は、中距離爆発条件(0.40<Z<5.55)とし、物体 表面から換算距離 Z=1.73, 2.24m/kg<sup>1/3</sup>(30mm)に設置した.本実験ではアルミ平板に凹凸, 半円形のオープンセル型フォーム(Foam13, 50, 80)を貼り付けた.



図2 入射衝撃波の最大換算過剰圧の関係

図2は入射衝撃波、図3はバブルパルスの最大換算過剰圧値、図4は入射衝撃波の弾性体 後端の最大過剰応力値を示す.

入射衝撃波の過剰圧抑制には,

半円 Foam50>凹凸 Foam13>凹凸 Foam80, 凹凸 Foam50>半円 Foam80 水流ジェット抑制には,

凹凸 Foam50>凹凸 Foam13>半円 Foam50>凹凸 Foam80>半円 Foam80 弾性体後端の過剰応力抑制には、半円 Foam50>半円 Foam80

の順番で効果的であり、可変空隙媒体の密度が高いほど最大過剰圧・応力が減衰した.これは、フォーム骨格固体の非定常抵抗により圧力減衰が誘発される.

従って、水中爆発に伴い衝撃波が発生し、爆発生成ガスの運動により発生する二次衝撃波 と水流ジェットなどの急激な現象を作り出す.衝撃波の直接波、二次衝撃波、水流ジェット の各成分に分けて水中爆発の減衰効果を利用することが有効な手段である.

1000





図3 バブルパルスの最大換算過剰圧の関係

図4 弾性体後端の最大換算応力値の関係

#### 3. 研究目標の達成状況

水中爆発時の衝撃圧・動的破壊挙動を,複雑構造媒体を用いた物体損傷軽減の評価法を導いた.この結果から,複雑形状の空隙媒体を利用し,水中爆発時の衝撃圧・動的破壊挙動と物体損傷軽減方法の有用性を示し,海底火山爆発,地震波,隕石衝突及び生体組織中の衝撃環境の減衰と水中爆発を用いた物体の洗浄技術開発と爆発処理技術への応用が可能となった.

4. まとめと今後の課題

3年間の研究期間において、水中爆発時の衝撃圧・バブルパルスと水流ジェットの減衰と 軽減効果を柔軟空隙媒体の利用によって、実用で使用可能な有効性を示した.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[1] <u>K. Kitagawa</u>, K. Ohtani : Visualization of Flow Field Around the Underwater Explosion, 18th International Symposium on Flow Visualization (ISFV18), Zurich, Switzerland, (2018), 053a.
- \*[2] <u>K. Kitagawa</u>, K. Ohtani, Y. Konishi, <u>A. Abe</u>: Attenuation and Reduction Effect of Underwater Explosion by Porous Materials, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, (2018), CRF-76, pp. 158-159.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I082
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2年目

バドミントンシャトルコックの非定常空力特性 Experimental Study on Unsteady Aerodynamic Characteristics of a Badminton Shuttlecock

> 長谷川 裕晃\*†,永井 大樹\*\*†† 藤澤 勇貴\*,小林 理輝\* \*宇都宮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

シャトルの独特な構造である隙間部により生じる流体力の違いを流れ場とシャトル表面圧 力分布から明らかにする.その際、シャトルに強制回転を与えた場合(カットショットを想 定)の挙動に関しても隙間部の影響を調べる.

### 2. 研究成果の内容

本研究では、反転挙動時におけるシャトルの隙間部が空力特性に及ぼす影響を迎角 a= 150°のシャトル表面に働く圧力から調べるために、PSP 計測を行った.

シャトルは他の球技にはない高減速特性を有している.この高減速特性について明らかに するために、通常シャトルモデル(Standard)とシャトルの隙間部を塞いだ隙間無しシャトル モデル(No gaps)の2つの金属シャトルモデルを用意し、表面圧力分布の比較を行った.図1 にシャトルの流体力を示す.図1に示すように迎角 a=150°のシャトルは隙間の有無によっ て揚力係数に大きく差が出る.そのため本研究では迎角 a=150°において隙間の有無で揚力 に差が出る理由を PSP 計測によって調べた.図2,3に迎角 a=150°での各シャトルモデル の圧力係数(C)分布を示す.図2の腹側の圧力分布について、通常シャトル模型は隙間を通 過した流れがあることでコルク部の圧力が低下している.一方、隙間無しシャトル模型は、 コルク部付近の圧力が高くなっている.しかし、隙間の有無で圧力の顕著な差は見られなか った.図3の背中側の圧力分布は、隙間の有無で大きな違いは見られなかった.また、シャ トル表面の全域で、圧力の顕著な差は見られなかった.迎角 a=150°では、隙間無しシャト ルは揚力係数が大きくなる.シャトルスカート側が上流側に向く迎角であるため、主流の動 圧が内部からシャトルを押し上げることで大きな揚力が発生する.

#### 3. 研究目標の達成状況

シャトルは打撃時に反転し、急激に迎角変化し飛翔する.反転挙動では、高迎角の特性解 明が重要となる.これまでは迎角0°において隙間が空力特性に及ぼす影響はわかっていた が、今回新規に高迎角時の隙間の役割がわかった.強制回転時の力評価に関しては、昨年度 の実験結果と比べて高迎角時の抗力が大きな値が出ているため、再度実験が必要となった.

#### 4. まとめと今後の課題

シャトルの高減速特性について、シャトル隙間部が表面圧力に大きく影響を及ぼさないこ



とが分かった.シャトル隙間部から内部に入り込んだ流れが後流の流れ場に影響を及ぼすこ とで大きな抵抗が生まれる.今後は強制回転時の力評価をし、スピン回転がシャトルの空力 特性に及ぼす影響を明らかにする.その際,隙間部が及ぼす影響についても調べる.

- 5. 研究成果 (\*は別刷あり)
- 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] <u>Y. Fujisawa</u>, <u>M. Kobayashi</u>, <u>H. Hasegawa</u> and H. Nagai: PSP Measurements for a Badminton Shuttlecock Model, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-15, pp. 30-31.
- [2] 小林理輝, 石戸勉, 加藤直人, 長谷川裕晃: OpenFOAM によるバドミントンシャトルコック 隙間部が抗力に及ぼす影響の評価, 日本流体力学会年会 2018, 大阪, (2018).
- [3] 小林理輝,長谷川裕晃,永井大樹:数値解析によるバドミントンシャトルコックの高減速特性,スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2018,京都,(2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I083
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2年目

## 流体現象解明によるスポーツ分野への適用 Elucidation of Fluid Phenomena and Its Application to Sports Fields

# 長谷川 裕晃\*†,大林 茂\*\*†† 瀬尾 和哉\*\*\*,前田 龍生\*,高橋 徹\* \*宇都宮大学大学院,\*\*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生地を対象とする.これまでの研究成果として通気量を規 定値よりも増加させることで失速遅れを確認することができた.こうした失速特性の違いは, 通気量の違いで物体からの剥がれの位置が変わることを意味しているが,通気量の違いで境 界層の様相がどう変化するは不明なことが多い.そこで,本研究では生地を透過し物体と生 地の間に入った流れが,発達する境界層に及ぼす影響を調べるために,物体に被せる生地の 通気量を部分的に変化させて空力特性を調べた.

### 2. 研究成果の内容

本研究では、オリジナルの生地の状態から中間層の穴を拡張、増加させたものと生地裏面 にテープを貼ることで通気性を無くしたものを組み合わせた生地を用いた.増加させた通気 量は 65.8 L/m<sup>2</sup>/s である.製作した生地の概略図を図 1 に示す.楕円柱前縁から 50%を通気 量 0 としたものを No-gap\_F,楕円柱前縁から 25%と後縁から 25%を通気性あり、残りを 通気量 0 としたものを No-gap\_M,楕円柱後縁から 50%を通気量 0 としたものを No-gap\_R とした.また、テープを貼っている部分の面積は全て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、通気量を部分的に変化させた生地を巻き付け た  $Re = 1.0 \times 10^5$ における楕円柱の揚力係数曲線である.生地の通気量を部分的に無くした場 合、最大揚力係数に変化は見られないが失速角に違いが生じた.No-gap\_F では失速遅れが見 られた.一方で、No-gap\_M、No-gap\_R では失速が早まってしまった.生地の通気量を部分 的に 0 にする位置によって失速特性が変化することは、生地を透過して物体表面に流出する 際の位置も重要であるということを示唆する.



図1: 使用した生地の概略図 (--:テープで塞いだ位置)



図2: 揚力係数曲線(横軸は迎角 α)

### 3. 研究目標の達成状況

通気量を部分的に変化させた生地を被せることで、生地と楕円柱の間に流れが入り込み、 その流れが楕円柱表面に流出する位置が変化するため失速特性に違いが生じることを明ら かにできた.スキージャンプ競技における飛距離延伸の可能性を示唆する結果が得られたこ とを考慮すると、目標は概ね達成できている.しかし、実際のジャンパーの体は楕円柱と比 較して複雑な形状をしていることから体の部位ごとに適正な通気量値が存在すると推測さ れる.したがってジャンパーが着用するスーツへ応用する際には詳細な検討が必要となる.

4. まとめと今後の課題

本研究では、生地の通気量を部分的に変化させることで楕円柱の空力特性にどのような影響を及ぼすかを調べた.また、これまで流体力測定では揚力と抗力の測定を行ってきたが、 飛距離計算にはモーメントも考慮した方がより正確になる.そのため、今後はモーメントに ついても取得・評価も行っていく予定である.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- H. Hasegawa, Y. Kawabata, M. Murakami, K. Seo and S. Obayashi : Effect of Air Permeability on the Aerodynamic Characteristics of Ski Jumping Suits, Advanced Experimental Mechanics, Vol. 3 (2018), pp. 118-122.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] <u>R. Maeta, H. Hasegawa, M. Murakami, K. Seo</u> and S. Obayashi : Effect of Air Permeability of Ski Jumping Suit on Aerodynamic Performances, *Asia-Singapore Conference on Sport Science 2018*, Singapore, (2018).
- \*[3] <u>R. Maeta, T. Takahashi, H. Hasegawa, K. Seo</u> and S. Obayashi : Aerodynamic Evaluation of Ski Jumping Suit Fabric - Effect of Different Air Permeability on Aerodynamic Performances -, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-14, pp. 28-29.
- [4] <u>前田龍生</u>, <u>長谷川裕晃</u>, <u>村上正秀</u>, <u>瀬尾和哉</u>, 大林茂: スキージャンプスーツ生地の通気性 と空力特性の関係, スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2018, 京都, (2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I084
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2年目

## スプレイノズルから噴射される過熱水の微粒化特性に関する研究 Atomizing Characteristics of Superheated Water Injected from a Fan Spray Nozzle

## 渡邉 力夫\*†,小林 秀昭\*\*†† \*東京都市大学工学部,\*\*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

東京都市大学では、液体窒素の気化膨張圧を利用した水/液体窒素ロケットエンジンの開発をしている.このエンジンの推進性能を向上させるためには、過熱水と液体窒素の熱交換効率を向上させるような噴霧混合を行う必要がある.そのため、エンジン内の高圧条件下に噴射する推進剤の噴霧特性を明らかにする必要がある.本研究では、貴研究所の「高圧環境噴霧試験装置」を利用して、高圧環境下に噴射した高圧過熱水噴流の微粒化特性を明らかにすることを目的とする.

### 2. 研究成果の内容

水/液体窒素ロケットエンジンにおける推進剤噴霧には、微粒化特性と噴霧分散特性に優 れているファンスプレイノズルを利用している.本年度は貴研究所「高圧環境噴霧試験装置」 を使用し、2018年10月9日から12日にかけて噴霧観測実験を実施した.噴霧の可視化に は高速度ビデオカメラによるバックライト撮影法により行った.水の温度が飽和温度以上で ある過熱水をノズルより噴射する場合、液体中の微小気泡がノズル噴出口付近で急速に膨張 し破裂する減圧沸騰現象が起こり、噴霧形態に大きな影響を与える.そのため、ノズル噴出 口付近の拡大撮影を実施することにより、噴流内気泡の状態を観察することとした.今年度 は特に、減圧沸騰が起こりやすい条件として、雰囲気圧力が低くて水温が高い状態を中心に 実験パラメータを選定し(表1)、減圧沸騰が噴霧様態に与える影響を調べた.

噴射圧力Pi, MPa	$0.4 \sim 1.2$
雰囲気圧力Pa, MPa	$0.1 \sim 0.7$
水温度Tw, K	393 ~ 433

表1:試験条件

図1に過熱水をスプレイノズル (ノズル出口径 1.0 mm)から噴射した場合の噴流可視化 画像を示す.高速度ビデオカメラのフレームレートは 75,000 fps,シャッタースピードは 1/1,000,000 s であった.図1はスプレイノズル噴霧を横から撮影している.前方から噴射し た場合は扇形の噴霧形状となるが、横から撮影するとシート状の噴流となっている.図1の 上段は常温水噴霧を、下段は水温が 423 K (150℃)の場合の結果を示す.噴射圧力は背圧と の差圧が 0.6 MPa となるようにするため、背圧に応じて変化させている.噴射差圧が一定 なので、噴流の流速は一定であるが、噴霧様態は大きく異なっている.常温水の場合は、背 圧上昇に伴って噴流の乱れが大きくなって微粒化が促進していることがわかる.これは、背 圧上昇に伴う噴流界面における剪断力増加による界面乱れの増強と、背景圧力増加に伴う空 気抵抗増大による液滴拡散の影響によるものと考えられる.過熱水においては減圧沸騰によ る噴霧の乱れが大きく影響していることから、背圧を増加させるほど噴霧形状は安定する. しかしながら、高背圧下においては界面せん断力と空気抵抗増大による乱れ現象とそれに伴 う微粒化促進現象が観察されている.



図1:背圧および水温が噴霧様態に与える影響(横から撮影)

### 3. 研究目標の達成状況

高圧過熱水をスプレイノズルから高背圧環境下に噴射した場合の噴霧様態について詳細 に調査することができた.特に、減圧沸騰現象が噴流に与える影響について明らかにするこ とができた.

### 4. まとめと今後の課題

今年度の流体科学研究所における噴霧観測実験結果から、過熱水噴霧の噴霧様態に対する 背圧と水温度の影響を明らかにすることができた.今後は、背圧と水温度が噴霧様態に与え る影響をモデル化し、噴霧様態解析に適用する予定である.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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] <u>R. Watanabe</u>, <u>D. Tsuchida</u>, T. Kudo, H. Kobayashi: Effect of Ambient Pressure on Superheated Water Jet from a Fan Spray Injector, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-28, pp. 56-57.
- [2] <u>D. Tsuchida, R. Watanabe</u>, T. Kudo, H. Kobayashi: Effect of Flash Boiling and Cavitation on Superheated Water Jet from a Fan Spray Injector under Ambient Pressure, *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS18-20, pp. 894-895.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J18I085
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	2nd year

## Investigation of a Time Response of cntTSP Sensor for a Dynamic Visualization of the Laminar-to-Turbulent Boundary Layer Transition

Daisuke Yorita\*†, Hiroki Nagai\*\*†† Christian Klein\*, Koji Fujita\*\*, Tsubasa Ikami\*\* \* Institute of Aerodynamics and Flow Technology, German Aerospace Center (DLR) \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

A dynamic visualization technique of the heat transfer has great potential to understand complex flow physics, e.g. the laminar-to-boundary-layer transition, vortex shedding, flow separation and reattachment. A combination of Temperature Sensitive Paint (TSP) and carbon nanotube (CNT) heater, we call cntTSP, has the potential to visualize the heat transfer distribution over the model. German Aerospace Center (DLR) has been developed this cntTSP sensor and applied to 'stationery' wind tunnel tests.

In this year, three following topics are investigated for improving cntTSP sensor in the dynamic wind tunnel tests; (a) improving the electric resistance and heating homogeneity, (b) relation of separation bubble and surface temperature, (c) quantitative heat transfer measurement. The cntTSP sensor was applied to 2D airfoil model in DLR and the wind tunnel test was conducted in the low-turbulence heat-transfer wind tunnel facility in Tohoku University.

## 2. Details of program implement

A new CNT coating application with a three-milling process was performed in DLR. This process enabled smoother and thinner CNT layer application on the model surface with lower electric resistance.

Evaluation of the cntTSP sensor was conducted at Tohoku University. The model was a 2D NACA0012 airfoil with an aspect ratio of 4 (prepared by DLR). Three airfoils with different thickness of the TSP layer were prepared for the comparison of the surface temperature responses to the heat transfer by the flow. Oil flow visualization was additionally performed for the comparison of surface flow structure and the temperature distribution.

Figure 1 shows the visualization results of the surface temperature distributions which are generated by the boundary-layer transition. The flow is coming from the left with 10 m/s. In the images, the darker areas towards the trailing edge of the wing indicate a higher heat transfer, which is caused by the turbulent flow. Figure 2 shows the oil flow visualization result at the model angle of attack of 5 degrees. The triangle and rectangular symbol show a location of the separation and the reattachment line of the flow. The relation between the temperature distributions and the separation bubble location is under discussion between the project members.


Figure 1: Temperature distributions



Figure 2: Oil flow visualization (AoA = 5°, model midpart)

3. Achievements

The wind tunnel test was successfully finished.

- (a) improving the electric resistance and heating homogeneity
- $\rightarrow$  Achieved
- (b) relation of separation bubble and surface temperature
- $\rightarrow$  Under discussion
- (c) quantitative heat transfer measurement
- $\rightarrow$  Under evaluating
- 4. Summaries and future plans

The purpose of the project in 2018 was partly achieved.

The response time of the cntTSP to unsteady flow phenomena is still not enough for the frequency of the several 10 Hz. Improvement of the sensor response time is one topic in future investigation. In 2019, the improved cntTSP sensor will be applied to an oscillating airfoil to understand the dynamic stall mechanism on the airfoil.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- D. Yorita, J. Lemarechal, C. Klein, K. Fujita and H. Nagai : Dynamic visualization of boundary layer transition in a pitchsweep test using a carbon nanotube TSP, 18th International Symposium on Flow Visualization, Zurich, (2018).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [2] <u>依田大輔</u>, Jonathan Lemarechal, <u>Christian Klein</u>,藤田昂志,永井大樹:カーボン ナノチューブ TSP を用いた翼のピッチスウィープ試験における境界層遷移の動的可視 化,第46回可視化情報シンポジウム,(2018),(口頭).
- [3] 伊神翼, <u>依田大輔</u>, <u>Christian Klein</u>, 藤田昂志, 永井大樹: cntTSP を用いた迎角スイー プ中の動的な境界層遷移計測, 第 14 回学際領域における分子イメージングフォーラム, (2019), (口頭).
- \*[4] <u>D. Yorita</u>, J. Lemarechal, <u>C. Klein</u>, K. Fujita, T. Ikami, H. Nagai : Investigation of Carbon Nanotube TSP for Dynamic Visualization of Boundary-layer Transition, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-81, pp. 168-169.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I086
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year (progressing)

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:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{r}_{1}} \cdot \boldsymbol{v}_{1} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{r}_{2}} \cdot \boldsymbol{v}_{2} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{v}_{1}} \cdot \boldsymbol{a}_{1} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{v}_{2}} \cdot \boldsymbol{a}_{2}\right) F = N \,\delta\left(\boldsymbol{r}_{1} - \boldsymbol{r}_{2}\right) \hat{\chi} f\left(\boldsymbol{v}_{1}\right) f\left(\boldsymbol{v}_{2}\right) \\ & f\left(\boldsymbol{v}_{1}, \boldsymbol{r}_{1}, t\right) = \frac{1}{N} \int d\boldsymbol{r}_{2} d\boldsymbol{v}_{2} F\left(\boldsymbol{v}_{1}, \boldsymbol{r}_{1}, \boldsymbol{v}_{2}, \boldsymbol{r}_{2}\right), \quad f\left(\boldsymbol{v}_{2}, \boldsymbol{r}_{2}, t\right) = \frac{1}{N} \int d\boldsymbol{r}_{1} d\boldsymbol{v}_{1} F\left(\boldsymbol{v}_{1}, \boldsymbol{r}_{1}, \boldsymbol{v}_{2}, \boldsymbol{r}_{2}\right) \end{aligned}$$

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  $\Omega$ , which depends on the velocity distribution function.

Near the equilibrium angular velocity depends only on the *covariance matrix* g, which, in turn, is determined by the first, and by the second-order velocity moments of the single-particle distribution function f(v).



Figure 1: Velocities of 1000 quasiparticles in 3D velocity space.

Figures 1(a), (b), and (c) illustrate that quasiparticles travel rather short distances in the velocity space during the process of relaxation from their initial positions to the final positions in the equilibrium.



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:

$$\hat{\chi} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} \cdot \left[ \mathbf{v} \times \mathbf{\Omega} \right], \quad \mathbf{\Omega}(\mathbf{v}, \mathbf{u}) = \frac{1}{8} \left\langle 1 - \mu^2 \right\rangle \left( \mathbf{v} - \mathbf{u} \right) \times g^{-1} \cdot \left( \mathbf{v} - \mathbf{u} \right)$$

The distribution function is entered into it only through the covariance matrix  $g = \langle (v - \langle v \rangle)(v - \langle v \rangle) \rangle$ . 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 between the relaxation of a covariance matrix q and an exact result.

#### 4. Summaries and future plans

Because of its extreme simplicity, we hope that our model scattering operator will be used successfully in the kinetic theory as BGK and Fokker-Plank operators do.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] <u>V. L. Saveliev</u>, Shigeru Yonemura and Clint John Otic: Rarefied Gas Simulations Using Quasiparticle Pairs and Velocity Moments, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-90, pp. 186-187.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I089
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility of humans and materials
Research period	April 2018 – March 2019
Project status	1st year

## Development of Aerodynamic and Propulsion System for High Performance Mars Exploration Aircraft

Shinkyu Jeong\*†, Hiroki Nagai\*\*†† \*Mechanical of Engineering, Kyung-hee University \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

## 1. Purpose of the project

The purpose of this project is to develop the aerodynamic and propulsion system of mars aircraft. This year, the stability and controllability of mars aircraft are investigated by using both CFD and wind tunnel experiment.

2. Details of program implement

To analyze the stability and controllability of previously designed mars aircraft, XFLR5 code was used. According to the result, the aircraft showed longitudinal instability. Thus, modification of aircraft shape was performed to increase the stability. The area of control surface was determined by historical guideline of sailplane data and aerodynamic performance analysis of control surface was executed by using XFLR5. To verify performance of stability and controllability, the wind tunnel test was performed using the 1/15.5 scale aircraft model at low-turbulence wind tunnel in Tohoku University.

3. Achievements

As shown in Fig. 1, longitudinal static stability of KHU-3 aircraft which was modified for the aircraft length, incidence angle, main wing twist angle, spanwise length of horizontal tail wing was stable compared with that of the previously design aircraft. (KHU-1).



Figure 1 : Cm-AoA graph of KHU-1 and KHU-3.

The aerodynamic coefficients of each control surface are also shown in Fig. 2. According to the result, the aircraft has a stable longitudinal performance and Cm is linear to the  $\delta_e$ . To guarantee lateral stability,  $\partial Cn \partial \beta$  must be negative. Fig. 2 shows  $\partial Cn \partial \beta$  is negative and the graph of *Cn* and  $\beta$  changes linear with  $\delta r$  where  $\delta r$  is rudder deflection angle. *Cl* is almost independent of the  $\alpha$  and  $\beta$  but dependent of  $\delta a$ . Moreover, *Cl* is linear of  $\delta a$ .



Figure 2 : Cm-AoA for elevator, Cl-B for aileron, and Cn-B for rudder.

4. Summaries and future plans

Based on the geometry of previously designed Mars exploration aircraft, the control surface was redesigned by referencing the historical guideline. The moment coefficient was analyzed by XFLR5. To confirm the validity of the design, wind tunnel test was also performed. The data of the moment coefficient is linear on each control surface angle and the stability of longitudinal and lateral axis is achieved.

For the future plans, propeller design for propulsion system will be conducted.

- 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] <u>S. Jeong</u>, <u>B. Won</u>, <u>K. Park</u>, <u>K. You</u>, H. Nagai, and K. Fujita: Design of Control Surface for Mars Exploration Aircraft, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-19, pp.38-39.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I090
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st 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 x. When the distance between cells and surface is less than x, the cell will be treated by short-life, long-life species and electric field, as shown in Fig.1 (a). When the distance is



Fig. 1 (a), (b), (c): An experimental setup was designed to investigate the effects of reactive radicals (Fig. 1 (a) (b)) and electric field (Fig. 1 (c)) on cell.

large than x, 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.

Fig.2 (a) shows that the relation between the PBS thickness and penetrated short-life species (OH) concentration measured by terephthalic acid. The OH concentration decreases as the PBS thickness increases and goes far to 0.6mm. Fig.2 (b) shows that adding an agarose gel on surface can block RONS penetration. When adding agarose gel, no  $H_2O_2$  in PBS was measured. When we remove agarose gel, the  $H_2O_2$  concentration will reach 30 µM with 80-second plasma treatment. Fig.2 (c) shows the measured voltage in PBS without agarose gel. The voltage is close to 90 V. Comparing it with the voltage of adding agarose gel (Fig.2 (d)), the voltage was not changed by agarose gel.

#### 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 OH is about 0.6mm. Agarose gel can block reactive species passing through and will not change the voltage inside the liquid.

4. Summaries and future plans

We will perform the cell experiment to investigate the effects of electrical field, short-life species, and long-life species on cells.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal
  - Not Applicable.

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

- [1] <u>H. H. S. Helal, C. Y. Chen, P. C. Chien,</u> <u>Y. C. Cheng</u>: The Effects of Atmospheric-pressure Cold Plasma Generated Short-life Species on A549 Cells, *Global Conference on Biomedical Engineering*, Taoyuan, (2018).
- \*[2] <u>H. H. S. Helal, C. Y. Chen, P. C. Chien,</u> C. H. Chang, <u>Y. C. Cheng</u>, <u>J. S. Wu</u>, T. Sato: The Effects of Atmospheric-Pressure Cold Plasma Generated Short-Life Species on A549 Cells, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, (2018), CRF-65, pp. 136-137.
- 3) Patent, award, press release etc.
- (Patent) Not applicable.
- (Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.



Fig.2 (a) shows the relation between the PBS thickness and penetrated .OH concentration. Fig.2 (b) shows that adding agarose gel on surface can prevent reactive species from penetrating through and Fig.2 (c) (d) show that agarose gel will not change the voltage inside the PBS.

Project code	J18I091
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year (progressing)

Characterization of Fatigue Damage using Electromagnetic NDT Methods

Zhenmao Chen\*†, Toshiyuki Takagi\*\*†† Tetsuya Uchimoto\*\*, Shejuan Xie\*, Manru He\*, Hong-En Chen\* \*School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

Based on the NDE system developed in previous year's projects, the aim of this research is to evaluate the feasibility of different electromagnetic NDE methods, such as the magnetic Barkhausen noise method, magnetic incremental permeability method, magnetic flux leakage method, eddy current testing method etc. for quantitative evaluation of the fatigue damage in carbon steel and/or stainless steel used in the nuclear power plants through experiments, and to investigate the influence of the fatigue damages on the NDE of plastic deformation through ENDE method.

#### 2. Details of program implement

In this year's project, the correlation of plastic deformation and fatigue damages with the eddy current testing (ECT) and pulsed ECT (PECT) signals for the SUS304 austenitic stainless steel was investigated experimentally. Test-pieces with different plastic strains and fatigue damages were fabricated through cyclic loads of different amplitude and cycle numbers, and the corresponding ECT and PECT signals were measured with the experimental equipment in both the XJTU and THU side. The correlation between the NDE signals and the mechanical damages was summarized based on the experimental results.

At first, experimental results for correlation between the pulsed ECT signals and the residual plastic strains and/or fatigue damages are illustrated in Fig.1 a) and b) for uniaxial test-pieces. Though there was a relative larger variation in signal values for cases of fatigue damage, the tendencies of both the correlation curves for plastic damage and fatigue damage are the same. These results reveal that there is a good possibility to evaluate the mechanical damage including fatigue with the PECT method.



Fig.1 Correlation of peak PECT signals with the residual strains and fatigue damages for uniaxial TPs (a and b), and Correlation of ECT signals with the mechanical damage for biaxial test-pieces (c and d)

Second, the experimental results for correlation of the ECT and PECT signals with the residual plastic strain for the biaxial test-pieces are shown in Fig.1 c) and d). The correlation of uniaxial TPs for fatigue damages are also given in the figures for reference. From these figures, it is clear that both the ECT and PECT signals get increased with the plastic and fatigue damages and applicable to evaluate the changing rate of residual plastic strain and fatigue damages.

3. Achievements

In this year's project, the influence of mechanical damage on ECT and PECT was studied experimentally for the 304 stainless steel. From experimental results, it is found that both the plastic and fatigue damage give similar influence on ECT and PECT signals, which reveals a good possibility to be applied for NDE of damage in 304 stainless steel. In addition, for case of biaxial TPs, though both the correlations of ECT and the PECT signals with the mechanical damages depend on the measurement direction, the correlations between the signals and the damage changing rates are almost independent of probe orientation.

4. Summaries and future plan

Based on the experimental results of this year's project, it was clarified that the plastic deformation and fatigue damage in SUS304 austenitic stainless steel are possible to be evaluated by using the PECT and ECT signals. The influence of fatigue damages on the NDE signals of the MFL, MBN and MIP methods are to be studies for a ferromagnetic material such as the RAFM steel. In the future, the nondestructive evaluation of fatigue damage in a ferromagnetic material will be studied by using the integrated electromagnetic NDE method and a signals fusion approach.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- \*[1] <u>S. Xie, L. Wu, Z. Tong, HE Chen, Z. Chen</u>, T. Uchimoto, T. Takagi: Influence of Plastic Deformation and Fatigue Damage on Electromagnetic Properties of 304 Austenitic Stainless Steel, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 54, No. 8 (2018), 6201710.
- [2] S. Xie, P. Xu, W. Cai, <u>HE Chen</u>, <u>H. Zhou</u>, <u>Z. Chen</u>, T. Uchimoto, T. Takagi: A Simulation method to evaluate electrical conductivity of closed-cell aluminum foam, *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, Vol. 58, No. 3 (2018), pp. 289-307.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- \*[3] <u>Z. Chen, S. Xie, M. He, HE Chen</u>, T. Uchimoto, T. Takagi: Influence of mechanical damage on electromagnetic NDE signals, *Proceedings of the 18th Int. Symposium Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-31, pp. 62-63.
- [4] <u>M. He</u>, T. Uchimoto, T. Takagi, <u>Z. Chen</u>: Nondestructive evaluation for small plastic deformation and deformation histories in reduced-activation ferritic/martensitic steel, 日本保全学会第 15 回学術講演会, 博多, (2018).
- [5] <u>M. He, P. Shi</u>, T. Uchimoto, T. Takagi, <u>S. Xie</u>, <u>Z. Chen</u>: Application of J-A model in FEM-BEM hybrid method for simulation of nonlinear magnetic flux leakage signals, *Proc. ICMST2018*, Sendai, (2018), pp. 1-2.
- [6] <u>S. Xie, Y. Zhao, HE Chen, Z. Chen</u>, T. Uchimoto, T. Takagi: Frequency band selecting pulsed eddy current testing method for detection of a certain depth range of defects, *Proc. ENDE2018*, Detroit, (2018), pp. 1-2.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I092
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

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

Chenguang Lai\*<sup>†</sup>, Shigeru Obayashi\*\*<sup>†</sup><sup>†</sup>, Yuting Zhou\*\*\*, Qingyu Wang\* Xiaoli Leng\*, Kaiping Wen\*\* \*Chongqing Institute of Automobile, Chongqing University of Technology \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*\*Institute of Chemical Engineering, Chongqing University of Technology †Applicant, <sup>†</sup>†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

The aerodynamic optimization design of LA203A is first carried out by using genetic algorithm and numerical simulation method, and the influences of the ground clearance and the attack angle on the drag, lift and lift-drag ratio of the unidirectional aero-train were obtained. And then, CFD used to investigate the aerodynamic characteristic of the aero-train model (AERO-1, as shown in Fig. 1) with initial wings and optimized wings and the flow field characteristics around the front and rear wing. Finally, the force test and flow visualization were carried out in Jilin University wind tunnel (as shown in Fig. 2) to verify the CFD results and observe the flow details.



Fig. 1: The research model AERO-1



Fig. 2: Wind tunnel test carried out in Jilin University

#### 3. Achievements

As shown in Fig. 3 and 4, the lift-drag ratio of the airfoil optimized by genetic algorithm method is higher than those of the initial airfoil in different attach angles and ground clearances. The optimization effect is more obvious in the range of attach angle from 5 to 6.5 degree, when the When the lift-drag ratio can be improved by about 26%; because the rear airfoils are immersed in the wake turbulence flow of the front airfoils, the nonuniform incoming flow will bring unstable effect on the aerodynamic characteristic of rear airfoils, which leads to the change of front and rear lifts, and may result in the flutter of airfoil.



43 40 35 30 25 20 15 0.5L 1.0L 1.5L 2.0L 2.5L 301.0L 1.5L 2.0L 2.5L

Fig. 3 *CL/CD* values with different angles of attach

Fig. 4 *CL/CD* values with different ground clearances

This work revealed the change low of state aerodynamic load for the wings of aero-train under different design proposal, and has important significance to build the theory model of boundary layer flow for unidirectional wing.

4. Summaries and future plans

Summaries: an airfoil was optimized by using genetic algorithm and numerical simulation method, and the optimized airfoil was installed in an aero-train model to numerical and experimental evaluate the aerodynamic performance with different attach angles and ground clearances. The results shows that the model with optimized airfoil can largely improve the lift-drag ratio, and the rear airfoils may be largely influenced by the wake flow of front airfoils.

Future plans: take appropriate methods to analyze, deepen and expand the bionics phenomenon of Wing-In-Ground phenomenon; clarify the dynamic characteristic of the boundary layer transition under the acting of Coupling Wall-effect on Multidirectional Wings (CWMW), obtain the transient topologies of the separated flow and the eddy motions generated on the end of the multidirectional wings and on the wake of the aero-train, define the inherent mechanism and the laws of the flow of CWMW, and structure the related theoretical modes.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- \*[1] <u>C. Lai, B. Lyu, Y. Chen, B. Hu</u>: Thermal Simulation and Analysis of a Water-Cooled Motor Controller Based on Star-ccm+, *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, Vol. 32, No. 8 (2018), pp. 8-13. (Chinese)
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [2] C. Lai, C. Yan, B. Ren, B. Lv, Y. Zhou: Optimization of Vehicle Aerodynamic Drag Based on EGO, International Conference on Mechatronics and Intelligent Robotics: Recent Developments in Mechatronics and Intelligent Robotics, (2018), pp. 379-385.
- \*[3] <u>C. Lai, H. Zhang, B. Zhao, Y. Zhou</u>, and S. Obayashi: Collaborative Optimization of Vehicle Low Aerodynamic Drag and Noise Reduction. *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2018), CRF-4, pp. 8-9.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I093
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

## Investigation of Nanoparticle Additives in Bio-Lubricants Using Molecular Dynamic Simulation

Nasruddin\*††, Rizky Ruliandini\*

Takashi Tokumasu\*\*†

\*Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Universitas Indonesia \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The project was submitted as a preliminary study in comprehending the agglomeration phenomena in biolubricant-nanoparticle solution. Using molecular dynamic simulation, we observed the dispersibility of nanoparticles through an MSD and RDF graphs. In order to get a good prototype of nano-biolubricant we tried to predict the most stable mixture.

2. Details of program implement

We spend nearly one month (26<sup>th</sup> October-24<sup>th</sup> November) in IFS to learn how to build molecules using Moltemplate properly. We took part in the group meetings so we have our work reviewed. We also tried their new developed AMBER FF for our fatty acid molecule. Below are the visualization of our Moltemplate works:





Figure 1 : (a) Single trimethylolpropane trioleate, TMPTO (long fatty acid) chain; (b) TMPTO system in 90A x 80A x 70A simulation box; (c) system is equilibrated in NPT ensemble

## 3. Achievements



Figure 2: (a) MSD graph (b) Density profile

4. Summaries and future plans

<i>T</i> [∘K]	Viscosity [cSt]	Viscosity [cSt]
	Simulation	Reference
313	49.69	45-55
373	27.99	9-10

Table 1 : Kinematic viscosities

Continuing the previous work, using the same approach, next plan will focus on the assessing the rheological properties of nano biolubricants under confined wall. By knowing the properties we can understand the mechanism of how nanoparticles can improve the anti-wear and reduce the friction. In most studies this mechanism is predicted by experiment phenomena without sufficient fundamental theory. This simulation is need to be done since rheological studies could not covered by experiments because of its small scale lubricant film. Molecular dynamic simulation allows us to study the micro flow beside its dynamic behaviour in atomic scale.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] <u>R. Ruliandini</u>, <u>Nasruddin</u> and T. Tokumasu: Molecular Dynamics Simulation on Dispersion of hBN Nanoparticles in TMP Ester Based Bio-Lubricants *Proceedings* of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-60, pp. 122-123.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I094
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year (progressing)

## NBE-Treated Triboelctric Energy Harvesters

## Dukhyun Choi\*†, Seiji Samukawa\*\*†† \*Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

## 1. Purpose of the project

Surface modification and control are most important techniques for enhancing output performance of triboelectric nanogenerators (TENGs). To improving performance, previously, the surface functionalization of triboelectric materials has been conducted using plasma, self-assembled monolayer, ionized gas injection and corona discharging methods. These techniques can dramatically enhance the output performance based on formation of active surface charges. However, this means that the surface is not stable and sustainable. In this project, therefore, we investigate a new way for enhancing both output performance and durability using neutral beams (NB). This project has three objectives: (1) Investigation of the effects of NB treatment on performance of TENGs; (2) Characterization and Optimization design of NB treated triboelectric materials; (3) Evaluation of NB treated TENGs (NB-TENGs).

## 2. Details of program implement

NB treatment was proceed to modify the surface properties of two different triboelectric materials. To understand the effects of NB treatment on TENG, the following actions were progressed:

(1) Fabrication of NB and plasma treated polymers:

Surface of two different polymers (i.e. Polydimethylsiloxane (PDMS) and thermoplastic polyurethane (TPU)) were modified by  $O_2$  and  $N_2$  gases based NB. To define the proper condition for modifying polymers, the beam energy was controlled by changing DC bias. For plasma treated polymers, the same gases were used and the beam energy was controlled by gas pressure.

(2) Triboelectric performance:

We controlled the contact area, frequency and load to be 300 mm<sup>2</sup>, 2.5 Hz, and 5 N, respectively. Based on the material group, the individual performance was evaluated and combination tests of NB treated polymers were conducted. Furthermore, we compared the triboelectric performance between NB and plasma treatment based TENGs.

## (3) Characterization:

Physical and chemical properties of NB and plasma treated polymers were obtained by XPS, KPFM and AFM. Chemical changes were analyzed by obtaining chemical bonding and physical changes were defined by surface roughness, surface image analysis, and surface potential measurement.



Figure 1 : Power density of (a) pristine PDMS-TPU composed TENG and (b) NB treated polymer based TENG, (c) aging issue of plasma and NB treated TENG

3. Achievements

Figure 1a and 1b show the power density of pristine PDMS-TPU based TENG and NB treated TENG. The pristine TENG could produce electricity of 0.097  $\mu$ W/cm<sup>2</sup> at load resistance of 7 M $\Omega$ . After NB treatment, the power density was measured as 19.2  $\mu$ W/cm<sup>2</sup> at load resistance of 40 MΩ, which is improved over 197 times than pristine TENG. This enhancement can be achieved by change of surface potential. $vN_2$  gas based NB treatment decrease the surface potential. This means that positive tribo-materials can donate more electrons to others. O<sub>2</sub> based NB treatment makes large surface potential. Therefore, negative tribo-materials can obtain more electrons on the surface. Figure 1c indicates the aging issue of NB and plasma treated TENGs. Right after fabrication, the output performance of plasma treated TENG was 1.4 times larger than NB treated TENG due to the additional surface charges from active site. However, the performance was significantly dropped during three months due to the loss of active site by air. Compared to plasma treated TENG, performance of NB treated TENG slowly decrease due to low electrical defect. In short time, thus, the plasma treatment has an advantage but the NB treatment is valid for long-time targeted TENGs.

4. Summaries and future plans

We confirmed optimum NB process for improving triboelectric behavior of TPU and PDMS. After NB process, the power density was enhanced over 197 times than pristine PDMS-TPU based TENG. NB treated TENGs has an advantage of long-time operation compared to plasma treatment. Based on these results, we will conduct an interfacial engineering for improving TENG performance.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] <u>W. Kim, H.-W. Park, H.J. Hwang, K.-B. Chung</u>, T. Okada, S. Samukawa, <u>D. Choi</u>: Neutral beam treatment improved contact electrification for dramatically enhancing triboelectric performance, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-47, pp. 96-97.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J18I099
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1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 CO<sub>2</sub> Absorption by Ionic Liquid Electrospray

高奈 秀匡\*†,藤野 貴康\*\*†† \*東北大学流体科学研究所,\*\*筑波大学 †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(CO<sub>2</sub>)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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>吸収が期待できる.これまでの研究により、微細イオン液滴の生成(200 nm 程度)を可能とする静電噴霧を利用した新規なCO<sub>2</sub>分離回収技術が提案され、その実験 的実証に成功している.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CO<sub>2</sub>の吸収速度の間の定量的関係に対する理解が不 十分であり、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CO<sub>2</sub>回収技術の実用化に大きく貢献するものと考える.

そこで、本研究では、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

図 1(a) に本シミュレーションにより得られたノズル・対向電極間の電場分布と噴霧開始から 10 ms 後における噴霧分布を示す. ノズル外径は 0.4 mm であり、ノズル先端から対向電極までの距離は 6.0 mm とした. また、ノズル・対向電極間電圧は 6.0 kV であり、液滴群の 平均直径および分散は実験結果を参照し、それぞれ  $d_{ave} = 500$  nm、 $\sigma = 1.0$  とした. 図より、ノズルを出た液滴は静電気力により下流に加速されるとともに、対向電極近傍には半径方向 に広がるため、ノズルー対向電極間には、円錐状の噴霧が形成されることが明らかとなった.また、小さな液滴は、噴霧外縁と中心軸との間に多く存在しており、噴霧内においては液滴径分布に偏りが生じる.

図 1(b) に印加電圧および平均液滴径に対する噴霧角を示す. なお, 噴霧角とは形成される円錐状噴霧の半頂角と定義する. 印加電圧の増加に伴い噴霧角が低下し, より噴霧形状はより先鋭化する. また, 平均液滴径が大きいほど噴霧角が小さくなることが分かり, 作動条件により噴霧形状が変化することが示された.



(b) 作動条件に対する噴霧角

3. 研究目標の達成状況

電場により帯電液滴に作用する静電気力および帯電液滴間の相互作用力を考慮して個々の 液滴挙動を明らかにすることに成功し、作動条件に対するイオン液体静電噴霧における噴霧 形状を解析することが可能となった.これより、本研究目標は概ね達成したと考えられる.

4. まとめと今後の課題

今後はイオン液体の二酸化炭素吸収過程を考慮した物理モデルを構築し、二酸化炭素濃度 分布の経時変化を明らかにすることで、印加電圧に対する二酸化炭素吸収特性を解明する.

- 5. 研究成果 (\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[1] H. Takana, K. Kawatani and <u>T. Fujino</u>: Numerical Modeling on Enhancement of CO<sub>2</sub> Absorption by Ionic Liquid Electrospray, *Proceedings of the Eighteenth International* Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-44, pp. 90-91.
- [2] <u>T. Makino, Y. Kohno, M. Kanakubo</u>, N. Hara and H. Takana: CO<sub>2</sub> Absorption Separation Using Acetate-based Ionic Liquids, *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018)*, Sendai, (2018), OS5-5, pp. 492-493.
- [3] 高奈秀匡:イオン液体静電噴霧の流体力学的特性解析と二酸化炭素分離吸収への応用,第1 回熱流体フォーラム,東京,招待講演,2018年5月10日,(2018).
- [4] 原望,山本和輝,高奈秀匡,<u>牧野貴至</u>,<u>金久保光央</u>: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向けて実験的研究,混相流シンポジウム 2018 講演論文集,(2018), P061 (USB).
- [5] 原望,山本和輝,高奈秀匡,<u>牧野貴至</u>,<u>金久保光央</u>:イオン液体静電噴霧の特性解析と高効率 CO<sub>2</sub> 分離回収への応用,日本機械学会第 96 期流体工学部門講演会講演論文集,(2018), AM58 (USB).
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
- (特許) なし
- (受賞)日本混相流学会ベストプレゼンテーションアワード,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向けた実験的研究,原望,山本和輝,高奈秀匡,<u>牧野貴至</u>, 金久保光央,2018.8.9,日本混相流学会.
- (マスコミ発表) なし

Project code	J18I101
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year (progressing)

## Surface Pressure Measurement over Free Flight Object in Ballistic Range Facility using Motion-Capturing Pressure-Sensitive Paint Method

Hirotaka Sakaue \*†, Hiroki Nagai \*\*††

\*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 is aimed to extract research challenges to capture pressure distribution of a free flight object in a ballistic range facility. There are mainly four challenges to overcome: #1 to shoot an aerodynamic model in a ballistic range, #2 to capture the free flight motion, #3 to capture luminescent images of the object during the flight, and #4 to obtain pressure distribution from the luminescent images. When successful, the measurement technique from the present study can be applied to understand unsteady aerodynamic phenomena in free flight.

Within the project term, we were successful to achieve #1 thorough #3: a luminescent image was successfully captured. The main challenge for the next step was extracted, which will be to improve the uniformity of two-luminescent outputs. The results obtained from the present study was valuable to continue to the next steps to achieve challenge #4.

## 2. Details of program implement

To establish a pressure measurement technique over a free flight object, we focused on a luminescent imaging technique. We can apply a chemical sensor called pressure-sensitive paint (PSP) over an object. It is non-intrusive so that an installation of mechanical and electrical instruments into an object can be avoided. We applied a motion-capturing method to capture a pressure distribution over a free flight object. It acquires two luminescent images to extract the pressure distribution over an aerodynamic object [H. Sakaue, K. Miyamoto, T. Miyazaki, Journal of Applied Physics, 113 (2013), 084901]. To apply this method for a ballistic range, it is necessary to overcome four challenges as follows:

- 1. To shoot a free flight object
- 2. To capture a free flight object with imaging device
- 3. To capture a luminescent image from the free flight object

4. To extract a pressure distribution from the luminescent image

Fig.1 shows the implementation of the program. The ballistic range facility at Institute of Fluid Science, Tohoku University, was used. The projectile was consisted of a sphere with 30-mm in diameter covered by a sabot. The test chamber was evacuated to 50 kPa, and the projectile was shot at Mach 1.5.

From an optical window of the test chamber, the luminescent images of the projectile were captured by a high-speed color camera. Two UV LED pulses with 1 ms in duration were given to illuminate the model trajectory. These LED sources were mounted inside the ballistic range facility to increase the illumination power to the projectile. The camera acquired the trajectory at the frame rate of 30,000 to 100,000

FPS with the camera exposure time of 2.5 to 30  $\mu$ s.

High-speed of camera AA-PSP coated sphere model Vacuum	1.07 1.06 1.05 1.04 1.00 1.00 1.04 1.00 1.07 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6	Low
Figure 1 :	Figure 2 : Pressure	Figure 3 : 30 $\mu$ s (left) vs. 5 $\mu$ s (right)
Implementation	sensitivity of the test	exposure time image ratios.
of the program.	article.	-

3. Achievements

A new two-color PSP based on pyrene was developed and used in the current study. With the current setup described in the previous section, we could improve the signal level of luminescent images to achieve the challenge #3: capturing luminescent images of the object during the flight. Fig. 2 shows an *a priori* pressure calibration of the developed two-color PSP. It was obtained by changing the pressure in the test chamber from 40 to 80 kPa. From the calibration, it is shown that our two-color PSP model has a good pressure sensitivity, given by the slope of the ratio curve in Fig. 2. Fig. 3 shows luminescent ratio images of the free-flight model. The left image shows an image using a 30  $\mu$ s exposure time, whereas the right image was produced with a 5  $\mu$ s exposure time. In both cases the model was moving at approximately 500 m/s, meaning that for every  $\mu$ s of exposure time the model moves approximately 0.5 mm. By using shorter exposure times blurring is greatly reduced, in this case reducing the apparent elongation by up to 25%. When the images are not blurred, a pressure calibration makes it possible to extract pressure distribution data over the model.

4. Summaries and future plans

The current project proved that it is possible to capture a clear luminescent image of a test model moving at Mach 1.5 in a ballistic range. In order to capture these images, a combination of a short exposure time and fast frame rate were used.

The next challenge is to apply the two-color PSP more consistently to the model to give a uniform coating. This would ensure more uniform emission intensity, allowing for a quantitative surface pressure analysis.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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. Kurihara, S. L. Claucherty, H. Sakaue, H. Kiritani, K. Fujita, and H. Nagai: Surface Pressure Measurement over Free Flight Object in Ballistic Range Facility using Pyrene based Two-Color Pressure-Sensitive Paint, Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-78, pp. 162-163.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J18I102
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	2018.4 ~2019.3
継続年数	1年目

## 火星へ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\*

#### 米澤 宏一\*\*††

## \*東北大学流体科学研究所, \*\*電力中央研究所地球工学研究所流体科学領域 ;申請者, ;†所外対応研究者

#### 1. 研究目的

本研究では、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を行うことである.現在、 火星は世界で注目されており、様々な探査が提案されている、その中でも飛行機を利用した飛行 探査がJAXAにより提案されて、我々も参画している.その開発の中で、我々は火星環境に特化 した特殊なプロペラの研究開発に成功した.今回の提案では、この成果に基づき、プロペラを利 用した新たなヘリコプタータイプの飛行探査も提案することを目指している.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、同軸二重反転方式に着 目し、検討を進めることとした.

本研究では、この二重反転ローターを製作し、推力計測の実験を行うことと、流れ場の解析を 行う.加えて、数値計算との比較を行うことで、より高推力を得られる、ロータ配置や形状を検 討し、全体システム設計にフィードバックすることを目的とする.

#### 2. 研究成果の内容

本年度は、初年度として(1)火星の縦穴地下空洞探査を目指した火星へリコプターの概念検討, (2)同軸二重反転ローターの設計および実験装置の製作,(3)ローターの推力計測試験、を行った。特にローターの推力試験では、まずシングルローターにおいて、ブレード翼型、アスペクト 比、枚数などを変えて、推力係数やトルク係数を計測した。この結果をもとに、同軸反転ロータ ーの諸元を決定し、その推力やトルク係数を計測した(図1).また、ヘリコプタを火星エントリ ーカプセルに収納すべく、上面/下面のローター距離を変えて試験も実施した(図2).その結果、 推力とローター間距離の関係が明らかとなり、火星へリコプターの概念設計に反映できる知見を 得ることが出来た。

#### 3. 研究目標の達成状況

今年度は試験装置の製作に想定以上の時間を要し、ロータ回りの流れ場を解析する予定であった CFD を実施するための条件設定まで到達できなかった.しかし、実験自体は一通り実施することができ、CFD 比較検証のためのデータは十分取得することができた.これにより、次年度の研究にスムーズに着手することが可能となった.

#### 4. まとめと今後の課題

今年度は、火星ヘリコプタの概念設計検討および実験装置の製作、実験まで実施することができた. その成果は、国内・国際会議において合わせて8件の発表を行い、また年度末には、関連する研究者を集め、第1回火星ヘリコプタ研究会を開催することができた.

次年度は、ヘリコプターのローターブレード周りの流れ場の可視化実験と CFD を実施し、推進 効率の向上を目指すとともに、実験結果をもとにシステム解析を進めることで、大型研究費への 提案準備を進めていく予定である.





- 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・ロ頭発表等
  - [1] <u>R. Aoki, A. Oyama, K. Fujita, H. Nagai, K. Kanou, N. Inoue, S. Sokabe, M. Kanazaki, K. Tomisawa, K. Uwatoko</u>: Conceptual Helicopter Design for Exploration of Pit Craters and Caves on Mars, *AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*, Orlando, FL, USA, (2018), AIAA 2018-5362, 2018/9/18, Oral Presentation.
  - [2] 藤田昂志, <u>Pomar Guillaume</u>, 永井大樹:火星縦穴探査用回転翼機の初期概念設計,第62 回宇宙科学技術連合講演会, (2018), JSASS-2018-4071, 2018/10/24, ロ頭.
- [3] K. Kano, K. Fujita, H. Nagai : Performance Test of Co-axial Rotor of Mars Helicopter for Vertical Hole Exploration on Mars, *Proceedings of the Fifteenth International Conference* on Flow Dynamics, Sedai, (2018), OS18-37, pp.928–929.
- \*[4] H. Nagai, K. Kanou, T. Ikami, K. Fujita, <u>K. Yonezawa</u>: Research and development co-axial rotor to realize Mars helicopter, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium* on Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-20, pp. 40-41.
- [5] 加納健佑,藤田昂志,永井大樹:火星縦穴探査のための同軸反転ローターの性能試験,第56 回飛行機シンポジウム,(2018),JSASS-2018-5177,2018/11/16,口頭.
- [6] K. Kanou, K. Fujita, H. Nagai : Experimental Study on High Efficiency of Aerodynamic Performance of Rotor Blades for Mars helicopter, *AIAA Scitech 2019 Forum*, (2019), AIAA 2019-2160, 2019/1/11, Oral presentation.
- [7] 大山聖, 永井大樹, 金崎雅博:回転翼機による火星縦穴地下空洞探査, 平成 30 年度航空宇 宙空力シンポジウム講演論文集, (2019), 1L5, 2019/1/25, 湯田温泉, ロ頭.
- [8] 永井大樹:火星の縦穴探査を目指したドローンの空力性能調査,平成 30 年度航空宇宙空力 シンポジウム講演論文集,(2019),1L6,2019/1/25,湯田温泉,ロ頭.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J18I103
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

## Stability and Nonlinear Dynamics of Stably Stratified Vortices with Hyperbolic Stagnation Points

## Yuji Hattori\*†, Manish Khandelwal\*\*†† \*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*Department of Mathematics, Indira Gandhi National Tribal University †Applicant, ††non-IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

気象現象や宇宙流体現象において強い渦の果たす役割が注目されている.われわれは最 近,密度成層流体中の周期的な渦流れの局所安定性解析により新しい型の不安定性を発見 した.これは双曲型不安定性に内部重力波の位相シフト効果が加わることで発現するパラ メタ共鳴不安定性である.本研究では、この成果に基づき、双曲型不安定性と波動の位相 シフト効果による新しい型の不安定性(成層双曲型不安定性)が強い渦のダイナミクスに おいて果たす役割を解明する.不安定固有モードとその成長率の成層強度依存性、非線形 領域における時間発展、乱流への遷移過程を明らかにする.

#### 2. Details of program implement

#### 2.1 Plan of the Project

双曲型よどみ点をもつ密度成層流について,双曲型不安定性と内部重力波の位相シフト 効果により発現する成層双曲型不安定性を,(1)固有モード安定性解析,(2)直接数値シミ ュレーションにより解析する.具体的な解析対象として,(a)2次元周期渦列(2次元テイ ラーグリーン渦),(b)1次元周期渦列(スチュアート渦列,混合層の不安定化により発生 する渦列のモデル)を扱う.

#### 2.2 Global stability analysis by Krylov method

与えられたパラメタに対して最も不安定なモードだけでなく複数の不安定モードを求めるために、クリロフ部分空間法とアルノルディ法により不安定性を支配する重要な固有値を求める方法を採用した.

Fig.1 に2次元周期渦列の不安定モードの成長率の波数依存性を示す.アスペクト比が1 で楕円型不安定性が発現しない場合であり、レイノルズ数は10<sup>5</sup>である.非成層(Fh<sup>-1</sup>=0)の場合には各波数について不安定モードは1個または2個のみであるが、成層している場合(Fh<sup>-1</sup>=5)には多数の不安定モードが捉えられていることがわかる.局所安定性解析で示されたように、成層双曲型不安定性のモードが多数あらわれ、純粋に流体力学的な双曲型不安定性よりも強いことがわかる.

また,1次元周期渦列についても同様に成層双曲型不安定性のモードが存在することが確 かめられた.ただし,この場合には純粋に流体力学的な双曲型不安定性の方が強いことが わかった.



Figure 1 : Growth rate obtained by Krylov method. (Left)  $Fh^{-1}=0$ , (right)  $Fh^{-1}=5$ .

#### 3. Achievements

気象現象・惑星大気・宇宙流体現象において重要である密度成層が流れの安定性に及ぼ す効果を解明することが本研究の目的であった.これにより、台風や竜巻の挙動・進路/成 長予測の精度向上に貢献し、木星の長寿命渦の維持メカニズムの解明の突破口を切り拓く ことを目標とした.さらに、密度成層流中の渦特有の不安定性として知られているジグザ グ不安定性の起源をも明らかにすることも目的であった.

今年度の研究では線形安定性の詳細を解明することに成功した.クリロフ部分空間法と アルノルディ法により複数の不安定固有モードを捉えることができ、不安定性の型とその 性質が成層の強さによってどう変化するかを明らかにすることができた.一方で,直接数 値シミュレーションによる非線形時間発展の研究は準備をするのみにとどまった.

#### 4. Summaries and future plans

双曲型よどみ点をもつ密度成層流について,双曲型不安定性と内部重力波の位相シフト 効果により発現する成層双曲型不安定性を,固有モード安定性解析により調べた.2次元 周期渦列および1次元周期渦列を対象とし,複数の不安定固有モードのあらわれ方が成層 の強さによってどう変化するかを明らかにした.

今後の課題は非線形時間発展の解明である.高精度直接数値シミュレーションにより, 非線形領域における不安定化過程・成長の飽和・乱流遷移の過程を解明する.

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

- 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)
- Y. Hattori, S. Suzuki, <u>M. Khandelwal</u>, M. Hirota : Global Analysis of Strato-Hyperbolic Instability of Stably-Stratified Vortices, *12th European Fluid Mechanics Conference*, Vienna, Austria, 9-13, September (2018).
- Patent, award, press release etc. Not Applicable.

Project code	J18I104
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	2nd year

The Development and Applications of Pressure-Sensitive Paint on the Investigations of Gases Mixing in T-type Micromixers

Chih-Yung Huang\*†, Hiroki Nagai\*\*†† \*Dept. of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

## 1. Purpose of the project

This project is a second year project and aims to investigate the design and improvement of gas mixing in micromixers using pressure-sensitive paint technique. Different designs of micromixers with boundary obstruction are applied to understand the mixing enhancement and further application with different gases.

#### 2. Details of program implement

This project is the continued collaboration project following the study of using pressure-sensitive paint (PSP) technique on the flow visualization and mixing quality measurement in micromixers. This year the continued research focuses on optimization of using boundary obstruction for gas mixing enhancement. Triangular structures were selected with different front and back angles and positioned at the side wall of micromixers in the mixing channel. The micromixers is a T-type micromixer with boundary obstruction. Numerical simulation with commercial software ANSYS has been used for understanding the effect of boundary obstruction and different gases mixing, as Fig. 1. The mixing qualities of oxygen and different gases have been investigated and the optimal font and back angles have been identified as Fig. 2. The triangular structure with front angle of 90 degree and back angle of 50 degree has been selected for further study which can provide the mixing quality over 90% at micromixer exit with less than 15 kPa drop between micromixer inlet and exit. The distance between each triangular structure has also been discussed and 1.8 mm was found as the best mixing quality improved to 97% and less pressure drop of 11 kPa.



Figure 1 : The contours of oxygen concentration of oxygen and nitrogen mixing in micromixers with different front and back angles.



Figure 2 : The mixing efficiency of oxygen and nitrogen mixing at micromixer exit with different front and back angles.



Figure 3: The comparison of PSP experiment and numerical simulation.

3. Achievements

Detailed mixing efficiency and flow field with different gases mixing in novel design of mixing channel with triangular obstruction have been studied with numerical simulation of ANSYS. Preliminary PSP results have been acquired with good agreement with simulation.

4. Summaries and future plans

In this project, the effect of triangular obstruction in micromixers has been identified with detailed information of mixing profile and pressure loss. To further improve the mixing efficiency and suitable for different kinds of gas mixing, the obstruction at center of mixing channel will be examined. However, it will require more advanced method using MEMS technology with precision fabrication.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] <u>M.-X. Yan, Y.-C. Wang, C.-Y. Huang</u>, and H. Nagai: Characterization of flow fields with different gases mixing in passive micromixers, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan (2018), CRF-88, pp. 182-183.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18I105
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

## Electronic Structure of Semiconductor Nanostructure Array for Thermoelectric Applications

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

According to the achieved results of the collaborative research projects in years 2015-2018, we in this project successfully explore the electrical and physical properties of neutral-beam-etching (NBE) fabricated nanodisks (NDs) by solving a set of electronic transport and quantum mechanical equations. The key findings of this project show promising characteristics of the explored nanometer-scaled materials for advanced applications of thermoelectric materials and devices.



Figure 1: (a) A high-density array of SiNWs with a 10-nm diameter embedded in SiGe<sub>0.3</sub> using bio-template mask, NB etching, and thermal CVD techniques. (b) The SiNW array with diameter of 10nm is simulated by the square superlattice with varied space 2 to 15nm. (c) List of parameters used in the simulation of phonic dispersion.



Figure 2 : (a) Energy dispersion for bulk Si along with the specific symmetric k-points. (b) Thermal conductance contributed from lattice dynamic for bulk silicon and SiNW.

2. Details of program implement

As shown in Fig. 1, we explore the electrical and physical properties of the NBE fabricated high-density array of SiNWs with a 10-nm diameter embedded in SiGe<sub>0.3</sub> using bio-template mask by performing 3D numerical simulation of electronic structure for the nanostructures. Fig. 2(a) is the calculated energy dispersion for bulk Si; it approximates the experimental data well under the same order with only three independent elastic constants. Fig. 2(b) shows the lattice thermal conductivity

with a comparison between bulk Si and SiNW. SiNW have reduction of thermal conductivity only 80%, which is much smaller than the experiment results. Our study benefits advanced applications in the field of thermoelectric devices.

3. Achievements

We have developed physical and transport models and 3D simulation methodology to explored NBE fabricated Si NDs. The achieved results well meet the target stated in the application form. Both the electrical and physical characteristics have been insensitively explored in this project. We have discussed interesting studies and have good joint publications in journals and conferences from both universities.

4. Summaries and future plans

In this work, we have applied the Landauer approach to investigate the quantum effect on thermoelectric properties for SiNW embedded in  $SiGe_{0.3}$ . The impact of SiNW on thermoelectric from electron, such as power factor and electronic thermal conductance, is less than that that from phonon, which is consistent with the observation in the experiment although the reduction of the lattice thermal conductivity is smaller than the experiment result. In the next project, we will control the energy of advanced NDs for thermoelectric devices.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- Yi-Chia Tsai, Blanka Magyari-Köpey, Yiming Li, Seiji Samukawa, Yoshio Nishi, and <u>Simon M Sze</u>: Contact Engineering of Trilayer Black Phosphorus With Scandium and Gold, *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, Vol. 7 (2019), pp. 322-328.
- [2] Daisuke Ohori, Takuya Fujii, <u>Shuichi Noda</u>, <u>Wataru Mizubayashi</u>, Kazuhiko Endo, En-Tzu Lee, <u>Yiming Li</u>, <u>Yao-Jen Lee</u>, Takuya Ozaki, and Seiji Samukawa: Atomic layer germanium etching for 3D Fin-FET using chlorine neutral beam, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol. 37 (2019), pp. 021003-1-021003-5.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [3] P.-J. Sung, C.-Y. Chang, L.-Y. Chen, K.-H. Kao, C.-J. Su, T.-H. Liao, C.-C. Fang, C.-J. Wang, T.-C. Hong, C.-Y. Jao, H.-S. Hsu, S.-X. Luo, Y.-S. Wang, H.-F. Huang, J.-H. Li, Y.-C. Huang, F.-K.Hsueh, C.-T.Wu, Y.-M.Huang, F.-J. Hou, G.-L. Luo, Y.-C. Huang, Y.-L. Shen, W. C.-Y. Ma, K.-P. Huang, K.-L.Lin, S. Samukawa, Y. Li, G.-W Huang, Y.-J. Lee, J.-Y. Li, W.-F. Wu, J.-M. Shieh, T.-S. Chao, W.-K. Yeh, Y.-H. Wang: Voltage Transfer Characteristic Matching by Different Nanosheet Layer Numbers of Vertically Stacked Junctionless CMOS Inverter for SoP/3D-ICs applications, *IEEE International Electron Devices Meeting*, (2018), pp. 504-507.
- [4] <u>Ming-Yi Lee</u>, <u>Yiming Li</u>, and Seiji Samukawa: Thermal Conductivity of Silicon Nanowire Using Landauer Approach for Thermoelectric Application, *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS1-3, pp. 198-199.
- \*[5] <u>Ming-Yi Lee</u>, <u>Yiming Li</u>, and Seiji Samukawa: Electronic Structure of Semiconductor Nanostructure Array for Thermoelectric Applications, *Proceedings* of the 18th International Symposium Advanced Fluid Information, Sendai, (2018), CRF-51, pp. 104-105.
- [6] <u>Niraj Man Shrestha, Yiming Li</u>, Seiji Samukawa, and <u>Tetsuya Suemitsu</u>: Electrical Characteristic of AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors with Recess Gate Structure, *Int. Electron Devices and Materials Symposium*, (2018), pp. 1-2.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project Code	J18I108
Classification	General collaborative research
Subject Area	Fundamentals
Research Period	April 2018 ~ March 2019
Project year	2nd year

Effect of Wall Elasticity on Reduction of Wall Shear Stress in a Patient-Specific Aneurysm Model in Middle Cerebral Artery

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

In the study of cerebral aneurysm, a lot of researchers assume to be rigid wall in CFD (Computational Fluid Mechanics). However, few experimental approaches were 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 and the frequency characteristics was examined for the comparison of elastic with non-deformable models in pulsatile blood flow wave *in vitro in* CFD. In the present study, the authors have tried the fabrication of elastic cerebral aneurysm model using several ways. The wall elasticity would realize a specificity of human vessel hardening.

2. Details of program implement

#### 2.1 Methods

Before fabricating the phantom model of cerebral aneurysm, it is necessary to select the material of mold. It is normal way to make the mold based on stl data constructed by DSA and MRA data from the patient. There are several materials of mold, i.e. wax, plaster and ABS resin. In the present study, the plaster and ABS resin are selected as the mold material.

#### 2.2 Material

The typical materials used in 3D printer are as follows.

Plaster: The merit is cheap and easily dissolved in water. The demerit is prone to collapse. ABS resin: The advantage is tight and is easy to construct the support structure for cerebral aneurysm. The demerit is difficult to remove the mold after coating by thin elastomer. When removing the mold consisting of ABS resin, the special chemicals such as xylene, 2-pro-panol need to apply.

2.3 Fabrication of phantom model

In fabrication of phantom model, the important factors are the material of phantom elastomer, temperature and keeping time in thermostatic chamber. First, it is important to fabricate the mold by media material which is based on stl data. As described above, it is easy to fabricate the mold using the plaster. Also, the it is easy to fabricate ABS resin. After dipping and then resolving mold inside of silicon elastomer, the geometry may be a little smaller than original morphology. The authors tried both materials. The model of plaster mold was suitable to fabrication using auxiliary support column as shown in Figure 2. After dipping, it is easy to remove the plaster of mold in water and the wall of aneurysm model is very smooth.

## 2.4 Phantom model

The phantom model from the plaster model is shown in Figure 3. This model was fabricated in same way except for the difference of rotation after dipping, i.e. vertically and horizontally.



Figure 1 Mold supported by column in ABS resin





Figure 2 Mold supported by column in plaster

Figure 3 Phantom model

Figure 3 was obtained in horizontal rotation. There is a tip in left side outlet vessel. This tip came from the liquid of extra silicone elastomer covered mold. The morphology is very smooth, and this fabrication has reproducibility. However, "how to rotate the mold" depends on mold morphology. The axis direction of mold rotation needs to try the several ways.

3. Achievements

According to the current study, the full-scale patient-specific phantom model was established with thin aneurysm wall simulating real aneurysm. Using this full-scale phantom model, we can clarify the effect of wall elasticity on flow behavior and flow instability globally.

4. Summaries and future plans

There are two another important factors. One is the elastic modulus and the other is the elongation ratio. Naturally, silicone elastomer has small elongation ratio, i.e. it is prone to rupture. So, thin wall silicone elastomer is prone to rupture.

The velocity vector in semi-symmetric plane inside the elastic and non-deformable aneurysms is measured in PIV. The distribution of WSS along the bleb wall from velocity vector will be estimated. In summary, the elasticity of the aneurysm wall may attenuate the absolute temporally- and spatially-averaged WSS and absolute WSSG.

- 5. Research Results (\*reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- \*[1] R. Yamaguchi, <u>T. Kotani</u>, <u>G. Tanaka</u>, S. Tupin, <u>K. Osman</u>, <u>N. Shafii</u>, <u>Ahmad Zahran</u> <u>Md Khudzari</u>, K. Watanabe, H, Anzai, A. Saito and M. Ohta: Effects of elasticity on wall shear stress in patient-specific aneurysm of cerebral artery, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, Vol. 7, No. 2, (2019), pp. 73-86.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [2] R. Yamaguchi, <u>G. Tanaka</u>, <u>T. Kotani</u>, <u>K. Osman</u>, <u>N. Shafii</u>, H. Anzai, M. Ohta: Characteristics of elasticity on flow behavior in middle cerebral aneurysm model, *8th World Congress of Biomechanics*, Dublin, (2018), #01699.
- \*[3] <u>G. Tanaka, T. Kotani, G. Takizawa</u>, R. Yamaguchi, S. Tupin, <u>K. Osman, N. Shafii</u>, H. Anzai, M. Ohta: How to Fabricate an Elastic Patient-Specific Aneurysm Model in Full-Scale, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-68, pp. 142-143.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J18I109
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	2018.4~2019.3
継続年数	3年目

## 人工改変タンパク質バイオテンプレートによる大面積2次元高密度 および分散型ナノ粒子エッチングマスク作製の理論解析 Analytical Development of Artificially Modified Bio-Template for 2D Ordered or Dispersed Nanoparticles Etching Array Mask

## 山下 一郎\*†,寒川 誠二\*\*†† \*大阪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

球殻状フェリチン同じく球殻状 DNA 結合性タンパク質 Dps にコア形成し,これをバンドギ ャップの異なる半導体層または絶縁層でサンドイッチした半導体層の単層または多層構造 の上に2次元配列した後,タンパク部分を熱処理オゾン処理等で除去して得られた分散型ナ ノ粒子配列をエッチングマスクとして中性粒子ビームナノエッチングを行い,これまで難し かった量子効果を持つ直径 10nm 級のナノディスク配列,ナノディスクの高密度積層構造を 作製している.このナノディスク構造ではディスク間距離制御が重要である.そのためには 球殻状タンパク質間の距離制御を行った分配置を実現しなければならい.そこで球殻状タン パク質の外周にポリエチレングリコール (PEG) 分子を結合させることを発想し,静電排除 距離の理論的解析を行うとともに実験的距離制御の確認を行う.

#### 2. 研究成果の内容

球殻状タンパク質の外表面に2-3個/サブユニット,全体で大よそ60個のPEGを修飾した. PEGの分子量は2000~5000ダルトンでPEG層は3-5nmと予想される.まずこのPEG修飾タンパク質を酸化シリコン上に展開したところ2次元分散吸着が見られた.QCMデータでPEG層がシリコン基板と強く相互作用し吸着することが示された.この吸着原理の詳細は不明だが,静電相互作用ではなく物理吸着と考えられ,その他の半導体表面にも利用可能である.

PEG 修飾フェリチンの配置は、揮発性で残滓の残らない酢酸アンモニウムに分散された球 殻状タンパク質溶液を基板上に滴下し、余分な溶液を遠心除去して行う.理論的には、粒子 間距離は塩濃度により制御できると予想される(図1).塩濃度が10mM 程度以下の静電遮蔽 距離(デバイ長λ)が3nm以上となる濃度では、フェリチン間の距離は静電反発有効距離= デバイ長により支配される.しかしながら酢酸アンモニウム濃度10mM 以上、デバイ長 3nm 以下では、PEG 層による立体障害で球殻状タンパク質間距離はほぼ一定となると予想される. これは、分散型ナノマスクを作製した場合の球殻状タンパク質密度として計測可能である. 図2は実際に PEG2000 層を形成した球殻状タンパク質における分散型ナノマスクのナノ粒子 密度のグラフである.デバイ長が3nm 以下となる10mM 以上のイオン濃度でタンパク質密度 が一定になる.また PEG2000 と PEG5000 では PEG2000 の方が吸着密度が高い.これは PEG 層 の厚みの予想とも一致する.さらに PEG 修飾タンパク質の吸着状況をランダム吸着と静電排 除でシミュレーションしたところほぼ同じ吸着状況が再現され、PEG 修飾球殻状タンパク質 の吸着はランダム吸着であり粒子間距離は静電反発力で規制されていると結論できる.



図1: PEG 修飾球殻タンパク質の吸着予測

図2: PEG 修飾球殻タンパク質の吸着密度とイオ ン濃度:静電遮蔽距離との関係. インセットは吸 着実験結果とシミュレーション

#### 3. 研究目標の達成状況

分散型ナノ粒子エッチングマスクを作製するために、ナノ粒子を担持して基板上表面に配置する球殻状タンパク質の外表面にポリエチレングリコールを修飾した. PEG 層の厚みと静電遮蔽距離がほぼ同じであるため両者のナノ粒子間への影響が懸念されたが、理論的予測の通り、PEG 修飾層以下のデバイ長環境では PEG 層がナノ粒子間距離を決定し、PEG 修飾層以上のデバイ長環境ではデバイ長がナノ粒子間距離を制御することが実験的に示された. また球殻状タンパク質の基板への吸着はランダム吸着であることもシミュレーションと実際の SEM 像から確認された.

4. まとめと今後の課題

分散型ナノ粒子エッチングマスクのナノ粒子間距離制御においては、数ナノメートル程度 の場合は球殻状タンパク質の外周修飾 PEG 分子量により制御ができ、長距離ではイオン濃度 でのデバイ長制御が有効である. 今後はコロイド結晶様の分散規則配列化の手法を検討する 必要がある.

- 5. 研究成果 (\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- Takeru Okada, <u>Golap Kalita, Masaki Tanemura, Ichiro Yamashita, M. Meyyappan</u>, and Seiji Samukawa: Role of Doped Nitrogen in Graphene for Flow - Induced Power Generation, *Advance Engineering Materials*, Vol. 20, No. 11 (2018), 1800387.

## 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[2] <u>Ichiro Yamashita, Naofumi Okamoto</u> and Seiji Samukawa: Artificial Cage-shaped Proteins for Nano-process, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2018), CRF-45, pp. 92-93.
- [3] Takeru Okada, <u>Golap Kalita, Masaki Tanemura, Ichiro Yamashita, M. Meyyappan</u>, and Seiji Samukawa: Electricity Generation by Water Flow on Nitrogen-doped Graphene, *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018)*, Sendai Japan, (2018), OS1-8, pp. 208-209.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18I110
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目(発展)

## 第一原理的手法を用いた酸水素混合系の熱輸送物性推算 Estimation of Thermal and Transport Properties of Hydrogen/Oxygen Mixture Employing an Ab-Initio Method

徳増 崇\*†,津田 伸一\*\*††,坪井 伸幸\*\*\*,髙橋 竜二\*\*\* \*東北大学流体科学研究所,\*\*九州大学大学院工学研究院,\*\*\*九州工業大学大学院工学研究院 †申請者,††所外対応研究者

#### 1. 研究目的

H-IIA などに代表される酸素と水素を推進剤とする大型液体ロケットエンジンの燃焼室につい て、その内部流れの CFD 精度向上に向けた流体力学的および反応化学的研究は多数展開されてき ているが、熱輸送物性モデルの精度向上を図る研究はほとんど行われてきていない.特に燃焼室 の条件を想定した酸水素混合系の熱輸送物性データは皆無に等しく、CFD 解析では未検証の経験 的な状態方程式(EOS)や輸送係数モデルを用いているのが現状である.そこで本研究では、エ ンジン内部の超臨界条件を想定した酸水素混合系の熱輸送物性を、高精度な第一原理計算に基づ いて構築された分子間ポテンシャルを用いた分子シミュレーションにより推算し、得られた結果 を数値実験値として、現行の EOS の精度検証を図ることを目的としている.

#### 2. 研究成果の内容

今年度は、まず経験的ポテンシャルを用いた分子動力学(MD)シミュレーションにより、超 臨界条件の音速について現行の EOS の精度検証を試行的に行った.その結果、EOS と MD の差 異は6%以内であり概ねよい一致を示すことがわかった.一方、水素の濃度が高くなるにつれて、 EOS と MD の音速の差異が増加する傾向が確認された.また、これは同じ実次元条件で比較する と、酸素よりも水素の対臨界圧力が高く、特に対臨界圧力が非常に高い条件では現行の EOS が *p-V-T* 関係(圧力 - 体積 - 温度の 3 つの関係)を定性的によく再現できないためであることがわ かった.次に、様々な分子間距離と分子配向に対する分子軌道計算を行い、この計算結果を反映 した高精度な酸素-水素間ポテンシャルを球面調和関数展開により構築し、本ポテンシャルを用 いたモンテカルロ(MC)シミュレーションを実施した.また、この MC を用いて、超臨界条件 の*p-V-T* 関係と定圧比熱について、現行の EOS の精度検証を行った.その結果、EOS と MC の差 異は約 5%以内であり、よい一致を示すことがわかった.図1は圧力 10MPa、温度 200K の超臨 界条件における *p-V-T* 関係と定圧比熱の比較結果を示したものであるが、非常によい一致を示し ていることが確認できる.

#### 3. 研究目標の達成状況

これまでの研究により, *p-V-T*関係,定圧比熱および音速については,現行の CFD に求められている計算精度に比べて,既往の EOS が概ね十分な精度を有していることが示された.なお,平成 30 年 11 月 7 日~9 日にかけて行われた ICFD2018 では,本課題の研究報告を行った.また,本学会中にメンバー間で議論を交わし,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、主として高精度な第一原理計算に基づいて構築した分子間ポテンシャルにより酸 水素混合系を模擬し、この混合系に対する分子シミュレーションの結果を用いて、現在ロケット エンジンの CFD 解析で使用されている EOS の精度検証を行った.その結果,現行の EOS は,*p-V-T* 関係、定圧比熱および音速の予測において、いずれも十分な精度を有していることが示された. 今後は、拡散係数をはじめとする輸送物性についても、同様の第一原理的な検証が必要である. これについては、MC ではなく MD シミュレーションの適用が必須であるが、本研究で構築した 第一原理的な分子間ポテンシャルに対する空間微分演算が非常に煩雑なこともあり、検討を要す る課題となっている.

#### 5. 研究成果(\*は別刷あり)学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

## 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- \*[1] <u>R. Takahashi, N. Tsuboi</u>, T. Tokumasu and <u>S. Tsuda</u>: Validation of classical mixing rule coupled with a van der Waals-type equation of state for supercritical mixture system of oxygen and hydrogen using molecular simulation, *Mechanical Engineering Letters*, Vol. 4 (2018), 18-00369 (8 pages).
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] <u>R. Takahashi, N. Tsuboi</u>, T. Tokumasu, <u>S. Watanabe</u> and <u>S. Tsuda</u>: Validation of classical mixing rule coupled with van der Waals type equation of state for sound speed of non-ideal gas mixture, *American Physical Society March Meeting 2019*, Boston, America, March, (2019), R18.00010.
- \*[3] <u>R. Takahashi, N. Tsuboi</u>, T. Tokumasu and <u>S. Tsuda</u>: Statistical mechanical evaluation of thermophysical properties of oxygen-hydrogen mixture system based on the differential hierarchy of a complete thermodynamic function, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2018), CRF-58, pp. 118-119.
- [4] <u>髙橋竜二</u>, <u>坪井伸幸</u>, 徳増崇, <u>津田伸一</u>: 酸水素混合系の音速に対する古典的混合則の精度 検証, 日本機械学会 2018 年度年次大会, 大阪, (2018), J0530401.
- 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 <萌芽公募共同研究>

課題番号	J18H001
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	2018.4 ~2019.3
継続年数	1年目

## 流体問題における各種データ同化手法の比較検討 Comparison of Data Assimilation Methods in Fluid Problems

## 三坂 孝志\*†, 大林 茂\*\*†† \*産業技術総合研究所, \*\*東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

データ同化は物理モデルと観測データを融合して、統計的に尤もらしい状態を推定する手 法である.もともとは気象予測モデルと組み合わせて数値天気予報を行うために研究・開発 されてきた手法であるが、近年、工学分野など他分野での利用が世界的に進んでいる.流体 工学分野においても先進的なデータ同化が利用されつつあるが、データ同化結果自体に関す る研究はなされているものの、適用したデータ同化手法の適切さに関する検討はほとんど行 われていないのが現状である.特に同一問題におけるデータ同化手法の適切性に関する系統 的な検討は行われていない.本研究では代表的なデータ同化手法である逐次型および変分型 手法が基礎的な流体問題においてどのように機能するかを比較することでデータ同化手法 選定における指針を獲得することを目的としている.

#### 2. 研究成果の内容

ローレンツモデル(40 変数)を用いて変分型データ同化手法である 4 次元変分法(4D-Var) と逐次型データ同化手法のアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)の比較を行った.図 1 にデータ同化ウィンドウサイズを変化させたときの状態変数の二乗平均平方誤差の変化を 示す.ここではそれぞれの手法に関して、データ同化の行われる時間間隔  $T_m$ を変化させて いる.この結果から、4D-Var ではデータ同化ウィンドウが短い場合に誤差が比較的小さく、 同化ウィンドウが長くなるにつれて誤差が増大することがわかる.また、 $T_m$ の影響はそれ ほど大きくないことが確かめられる.一方、EnKFではデータ同化期間が長くなるほど誤差 が減少し、また、 $T_m$ が小さいほど誤差が小さくなることがわかる.これらの誤差の傾向か ら、分岐点となるのはデータ同化ウィンドウが 1.0 程度のときである.この期間における変 数  $x_{21}$ の時間履歴を図 2 に示す.この結果から、状態変数の変化の仕方(主に周期)とデー タ同化によって推定したい現象の時間区間の長さに応じて、適切なデータ同化手法が異なる ことがわかる.このよう傾向は計測データ量や誤差の大きさによっても変化することが予想 されるため、より適切な指標の検討が今後の課題である.

#### 3. 研究目標の達成状況

低自由度ながら強非線形のローレンツモデルにおいて変分型と逐次型データ同化手法の 比較を行うことができた.主にデータ同化ウィンドウサイズに関する検討を行った.


図1:データ同化ウィンドウサイズに対する誤差の変化



図2: 変数 X21 の履歴

4. まとめと今後の課題

変分型および逐次型データ同化手法の特性を把握するために、4次元変分法とアンサンブ ルカルマンフィルターの比較をローレンツモデルにより行った.今後の課題としては、低レ イノルズ数の角柱後流において、ローレンツモデルの場合と同様の検討を行うことが挙げら れる.また、比較に適した問題設定を見出すことにより、データ同化手法の選定に役立つ情 報を得ることを目標としていきたい.

- 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] <u>Takashi Misaka</u>, Shigeru Obayashi : Comparison of Data Assimilation Methods in Flow Problems, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2018), CRF-6, pp. 12-13.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許) なし(受賞) なし(マスコミ発表) なし

課題番号	J18H002
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

バイオミティクスを応用した翼端デバイスの空力設計とその流れ場の特徴抽出 Study on the Aerodynamic Designs of Wingtip Device Based on Biomimetic Technologies and Its Feature Extraction of Dominant Flow Modes

> 森澤 征一郎\*†, 大林 茂\*\*†† 計倉 圭助\*, 西村 宗\*, 川添 博光\* \*鳥取大学, \*\*東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

近年,この翼端デバイスにバイオミティクスの応用が注目され,議論されている.本研究 では鳥類の翼端を模擬した wing\_grid と呼ばれる翼端デバイスに注目し,CFD を用いて空 力特性,及びその流れ場の関係を考察する.そして,最終的にはパラメトリックスタディを 実施することでより効率の良い形状の探索を目的とする.

# 2. 研究成果の内容

本研究では計算条件をマッハ数  $M_{\infty} = 0.8$ , レイノルズ数  $Re = 6.25 \times 10^6$ とし, CFD を実施 した. 図1に wing\_grid の計算格子を示す.本研究の計算格子は, Zonal 法によって格子を 生成しており,メインの翼部を zone1, 翼端部の wing\_grid を zone2, それ以外を zone3 と した計3つの zone から成る.この作成した格子を用いて空力特性を算出した結果を図2に 示す.その際に wing\_grid に用いた翼型(旅客機の標準モデル NASA-CRM の CRM.65 airfoil) の3次元計算を行ったものを比較対象とした.これは翼型であるため,翼端の効果 によって空力性能が低下分を無視した状態である.

図2(a)より wing\_grid の揚力係数は翼型の結果より全体的に大きな値を示す.これは翼型の計算が翼端を考慮しておらず,その結果の差が顕著に表れたと考えられる.しかし,高迎角側で翼力の低下が見られる.一方,wing\_grid に関しては迎角4°以降で若干の揚力傾斜の低下が見られるが,揚力の線形性という観点では優れていることが分かる.図2(b)より抗力係数に関しては,wing\_grid の方が全体的に高い値を示した.これも揚力係数のときと同様に翼端の影響による抗力増加が一因と考えられる.しかし,迎角が増加するにつれて,両翼間での差が小さくなることから迎角に対する抗力変化が小さいことがわかった.

最後に,迎角0°でのwing\_gridでの翼表面での圧力分布の結果を図3に示す.その結果, 前縁よりの後縁において顕著な低圧領域を確認した.この結果より前縁部で稼いでいたはず の揚力を得ることができず,後縁部の低圧領域が抵抗になったと考えられる.



図1 wing\_gridn の計算格子





図3 wing\_grid の翼表面での圧力分布

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では新たな翼端デバイスの新たな提案,及び設計情報の提案を目標として実施,本 年度はwing\_gridの基本特性としての計算を実施した.

4. まとめと今後の課題

本研究では鳥類の翼端を模擬した wing\_grid と呼ばれる翼端デバイスに注目し、CFD によるその空力特性,及びその流れ場の基本特性を調べた.基本特性を調べるにあたっては旅客機の標準モデル NASA-CRM の CRM.65 airfoil の 3 次元計算との比較を行った.その結果, 巡航時相当の高速飛行においての揚力の線形性や抗力増加が少ないなどの特徴を示した.今後は wing\_grid の形状を変化させたパラメトリックを通じ,その際の空力特性や流れ場との関係を調べる必要がある.

- 5. 研究成果 (\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[1] <u>S. Morizawa, K. Tokura, H. Kawazoe</u> and S. Obayashi: CFD Study on a Wing Grid for Improvement of Aerodynamic Characteristics, *Proceeding of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2018), CRF-9, pp. 18-19.
- [2] <u>K. Tokura, S. Morizawa, H. Kawazoe</u> and S. Obayashi: Optimum Design of Nonplanar Wings for Minimum Induced Drag at Low Reynolds Number, *Proceeding of the Fifteenth International on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2018), OS18-55, pp. 964-965.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18H003
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目(発展)

# 羽ばたき翼におけるコーティング材を用いた空力抵抗軽減 Aerodynamic Drag Reduction Using a Coating Material in Flapping Wing

石出 忠輝\*†,大林 茂\*\*†† 木村 幹\*\*\*,下山 幸治\*\* \*木更津高専機械工学科,\*\*東北大学流体科学研究所 \*\*\*木更津高専専攻科機械・電子システム工学専攻 †申請者,††所内対応教員

# 1. 研究目的

近年災害時における状況確認,沿岸監視等を目的として,小型飛行体(MAV: Micro Air Vehicle)の研究開発が盛んに行われている. MAV に要求される外形サイズ,飛行及び作業形態は,現存の航空機と異なるものであり,革新的な技術開発が必要とされる.このような背景下において,鳥や昆虫などの飛行生物の高度な空力性能に着目し,そのメカニズムを MAV に適用するバイオミメティクス的なアプローチが注目されている.一方で,流体抵抗軽減に関する社会的関心は高く,その一つの手法として水流中における撥水性材料の有効性が示されている.本研究では,これらの研究動向を背景として羽ばたき翼主翼に撥水性塗料を塗布し,その効果を調査する.

# 2. 研究成果の内容

# (1) 撥水性塗料の選択

表1に、本研究で用いるガラスコーテ ィング剤 HardoLass (ヤマモトホールデ ィングス(株))の主成分を示す.本コー ティング剤は主成分が空気中の水分と次 式のように反応し、緻密なガラス膜を形 成している.

	** * *	<u> </u>	$\sim n$
表し	Hardol ass		$\nabla \overline{A}$
XI	1 Iui uo Luoo	/~/	$\sim JJ$

type			
Hardolass A	dibutyl ether (53%)	perhydropolysilazane (3%)	ethyl silicate
Hardolass 9	dibutyl ether (50%)	organic polysilazane compound (40%)	ethyl polysilicate (10%)

 $(S_iH_2NH) + 2H_2O \rightarrow (SiO_2) + NH_3 + 2H_2$  (1) 本コーティング剤選択のきっかけは、当初防傷目的でゴルフクラブに塗布していたが、ゴルファ ーの飛距離自己ベストが平均10%向上したとの情報提供があり、適用するに至った.

### (2) 塗料塗布方法の選択

本コーティング剤適用による抗力軽減メカニズムとして,固体表面微細構造が流れ挙動に影響 を与えているものと考えられる.そのため、3種類の塗布方法をHardoLass開発技術者と考案し, 膜厚を変化できるようにした.一例を図1に示す.

# (3) 空気力測定

前年度まで実施していた萌芽公募共同研究(J17H002)において、最も CLmax が大きくなった翼 弦方向に主翼厚さのテーパを付けた ABS 樹脂翼(テーパ比 0.33)を用いて、本コーティング剤の 効果を試行的に測定した.コーティング剤は HardoLass 9を用い、マイクロファイバークロス及 びメラミンスポンジで塗布した.図2に模型駆動装置、図3に空気力測定結果を示す.この図を 見ると, 迎角 a=15°以上の領域で一定の効果を有するものと考えられる.

# (4) PIV 計測用レーザ光吸収材料の選定

本研究において、固体表面微細構造の流れ挙動への影響を詳細に調べるために、固体表面近傍における高精度の速度ベクトル分布の算出が必要となる.従来の PIV 計測では、ダブルパルス YAG レーザ(532nm)が固体表面で強く反射し、着目している壁面近傍の速度ベクトル分布の算出は困難であった.この対策として YAG レーザ吸収材料の選定を行い、色素紛体 FDG004

(山田化学工業)をプライマーにバインド させて溶液化する工程を,東京都立産業技 術研究センター表面科学グループ専門研究

# 3. 研究目標の達成状況

員の協力のもと考案した.

柔軟翼の有効性については,翼弦方向, 翼幅方向テーパ比の効果が再確認できたが, 翼幅及び翼弦方向共にテーパを有する主翼 の優位性は示されなかった.また撥水性塗料 の空力特性改善効果の可能性を提示し,今年 度の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, 撥水性塗料 の空力特性改善効果に関してさらなるモチ ベーションを得ることができた. 今後は, コ ーティング剤の種類, 塗布方法を変えて空力 測定を行い, YAG レーザ吸収材料を用いて PIV 計測を実施し, 流体力学的なメカニズム を明らかにしたい.

- 5. 研究成果 (\*は別刷あり)
- 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・ロ頭発表等
- \*[1] T. Ishide, M. Kimura, R. Fujii, T. Kaeriyama, K. Shimoyama, S. Obayashi: Aerodynamic drag reduction using a coating material in flapping wing, *Proceeding of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai,(2018), CRF-7, pp. 14-15.

0.1

0 4

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし



図1 HardoLass 塗布方法



図3 揚力曲線

15

20

25

a

30

# 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	J18R001	
Subject area	Environment and energy	
Research period	April 2018 ~ March 2019	
Project status	2nd year	

Link between Tracer and Microseismic Analysis to Comprehensive Understanding of Hydraulic Feature of Fractured Geothermal Reservoir

Anna Suzuki \*†, Roland N. Horne \*\*††

Michael Fehler \*\*\*††, Peter K. Kang \*\*\*\*††, Takuya Ishibashi \*\*\*\*\*†† \*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*Department of Energy Resources Engineering, Stanford University \*\*\* Earth Resources Laboratory, Massachusetts Institute of Technology \*\*\*\* Department of Earth Sciences, University of Minnesota \*\*\*\*\* Fukushima Renewable Energy Institute, AIST (FREA) †Applicant, ††non-IFS responsible member

# 1. Purpose of the project

Geothermal energy would provide sustainable energy systems and is abundant in the US and Japan. To assess the amount of resources and to design sustainable utilization of fields, it is crucial to estimate how water flows within reservoirs. Generally, tracer testing has been conducted to obtain the hydraulic properties between the two wells, such as connectivity, velocity, permeability. Microseismic monitoring observes fracture creation due to water injection and water movement to extract fracture properties (i.e., position, number, scale, etc.) in the whole reservoir. The results from tracer testing are influenced on connectivity of the fracture networks that can be apparent in micro seismic analysis. Both results should have correlations between each other. In this research, a new approach integrating tracer and microseismic analyses to evaluate comprehensive hydraulic properties is proposed for designs of sustainable geothermal development.

2. Details of program implement

Overview of this study is shown in Figure 1. We use tracer response curves and microseismic data obtained from the geothermal EGS site. Tracer and microseismic data will be analyzed separately. The applicant (Suzuki) is in charge of tracer analysis, and the MIT group is in charge of microseismic analysis.

Stanford group and Suzuki have conducted (1) tracer analysis using field data, (2) characterization of tracer transport in fractured media using 3D printing networks and direct simulation, and (3) flow experiment nano- and microparticle tracers using micromodel.



Figure 1: Overview of this study.

# 3. Achievements

3.1 Collaborative seminar

We held a seminar with 10 Ito lab members from IFS, Prof. Roland Horne, Dr. Adam Howkins, Ms. Ayaka Abe from Stanford University, Dr. Kyle Bahr and Mr. Aoi Yamaguchi from Environmental Studies at Tohoku Univ on Dec 20 and 21.



Figure 2: Photos of seminars: Prof. Roland Horne and Dr. Adam Howkins from Stanford University.

# 3.2 Journal paper

We conducted flow experiment for tracer analysis with Horne group at Stanford University and submitted our collaborative paper for a peer-reviewed journal: Suzuki A,

Cui J, Zhang Y, Li K, Horne RN, Ito T, Estimation of Fracture Apertures in Fractured Porous Media Using Nano-/Microparticles, *Rock Mechanics & Rock Engineering*, under review.

# Results

Water with nanoparticles was injected into the micromodel. The microscope could detect 500 nm nanoparticle movement. Figure 2 shows an image of the micromodel in the microscope during tracer injection test. Video was also recorded, which visualized the particle movement clearly. Fast flow was created in the fracture in the direction of flow, while some particles migrated to the pore spaces in the matrix. In the matrix, there were not only vertical flows from the fracture to the matrix but also horizontal flows between the inlet and the outlet. The patterns of pore space in the matrix give rise to complex nanoparticle transport behavior. More detailed analysis of nanoparticle movement will be done in further study (e.g., using Particle Image Velocimetry).



Figure 2: Image of the micromodel under microscope during flow experiment.

Tracer was collected in a tubing connected to the outlet at 46 moments in time. For preliminary analysis, concentration was calculated based on the images taken with SEM. Five droplets obtained at 6.7h, 13.4h, 20.2h, 26.9h, and 33.6h after the onset of the particle injection were used. The SEM images of the five droplets are shown in Figure 3. The concentration was calculated as the ratio of area of the particles to the total area where liquid would have existed in the SEM images, as shown in Figure 4(a). The temporal change of the concentration is plotted in Figure 4(b). High concentration was found at 13.4 h. A long tail was observed at late time. Some non-nanoparticle chunks were observed in the image at 26.9h. Because they were probably contaminant, the concentration at 26.9h is of low reliability. If the concentration at 26.9h is an outlier, the tracer response shows a long tail, as plotted in the dashed line in Figure 4(b). From direct observation under the microscope, some particles were seen to migrate into the matrix. They might have detoured through the pore space in the matrix leading to the retardation in the tracer response curve.



Figure 3: SEM images of droplet obtained at (a)(b) 13.4h, (c)(d) 20.2h, and (e)(f) 33.6h after injection.



Figure 4: Temporal change in concentration of nanoparticles at the outlet of the micromodel, measured by TRPS. (a) Size-independent tracer response and (b) size-dependent tracer responses for large particles (diameters > 1700 nm, cross) and for small particles (diameters < 1700, circle).

Particle concentrations were also measured by TRPS. The TRPS counts the number of particles in liquid while measuring the size of the particles. The particle diameter had a wide range between 400 nm and 2400 nm. Here, the maximum particle diameter

before the injection was 1500 nm. However, the maximum particle diameter measured after flowing in the micromodel was 2300 nm, which was larger than that of the injected particles. This suggests that some particles may have aggregated or been contaminated by attachment. 46 samples were collected at the outlet over time. Although SEM image analysis shows higher concentration around 14.4 hours after the injection, the concentration obtained from TRPS does not include any clear peak.

Thanks to the TRPS, particle size distributions at each time point can be obtained. We can divide the particle distributions into two groups by a certain threshold. The threshold is defined as a value below which significant differences can be observed in the concentration curves. In this study, the threshold was set to be 1700 nm. The temporal changes of the particle concentration with diameter larger or smaller than 1700 nm are shown in Fig. 4(b). The response curve for the particles with diameter larger than 1700 nm had a peak around 14 hours after the injection and no concentration was detected at late time. In contrast, the response for smaller particles was detected at early time and at late time.

# Discussion

The micromodel we used consisted of a single fracture and matrix. Because particles at the microscale travel along higher velocity streamlines, most particles were expected to flow with the fast-moving in the center of the streamlines within the fracture (Zvikelsky and Weisbrod, 2006). The fracture aperture was 50 µm, while the injected particle size was in the range between 500 nm and 1.5 µm. The fracture aperture was wide enough for all of particles to flow. According to Fig. 4(b), the tracer response for larger particles shows a peak at early time. These larger particles can be considered to flow through the fracture. On the other hand, the larger particles did not arrive after 20 hours, but the smaller particles arrived continuously before and after 20 hours. The particles arriving after 20 hours might have been delayed due to passing through the matrix. Then, the particles had to flow through the pore throats in the matrix. The range of the pore throat diameter was from 10 nm to 40 µm. The matrix in the micromodel included larger pore spaces, and spaces can be seen over 10 µm. Throats can be seen with sizes around 1 µm. We divided the tracer response into two response curves for different particle sizes in Fig. 9(b) and set the threshold of particle size to 1700 nm, which was defined as a value below which significant differences can be observed in the concentration curves. If particles flowed through the matrix, the streamlines had to pass through the throats with the size of the threshold, and the particles flowing through the throat should be smaller than the threshold. Thus, the threshold is expected to be the narrowest width of the throat in the streamline passing through the matrix.

By evaluating the particle sizes, we could estimate the two flow paths in the micromodel. One is characterized as a streamline that flowed only through the fracture, and the other as a streamline that flowed through the matrix at least once. In addition, the travel times corresponding to each streamline can be determined from the tracer responses. These data would provide useful information not achievable in conventional tracer testing.

We hereby propose a method using particle tracers to estimate critical apertures, as illustrated in Figure 11. Particles with a wide range of sizes are injected into an injection well, and the temporal changes of the size distributions are observed at the production well. The tracer response curve for each particle size may be different. As shown in Figure 5, *path* 1, *path* 2, and *path* 3 have the critical aperture  $b_1$ ,  $b_2$ , and  $b_3$ , respectively ( $b_1 > b_2 > b_3$ ). Let us assume that adsorption/desorption and diffusion of particles do not occur and that clogged particles do not affect other particles' movements. Some interactions between particle and rock surfaces (van der Waals forces) are neglected. If particles are larger than  $b_1$ , they cannot pass through any of the paths. The



Figure 5: Schematic of estimating fracture aperture and lengths using nano-/microparticles. (a) example image of flow paths between injection and production wells, (b) Enlarged image of inside of the flow path, (c) perspective of size-dependent tracer responses, and (d) estimates of flow path lengths.

upper tracer response curve in blue in Figure 5 is for the particles with size between  $b_2$ and  $b_1$ . Particles with size between  $b_2$  and  $b_1$  migrate through path 1 but not through path 2 and path 3. The tracer response curve includes a single peak at t. The first peak is an indication of the tracers passing through path 1 with a critical aperture of  $b_1$ . Although other particles that ranges from  $b_3$  to  $b_2$  (green line) or smaller than  $b_3$  (red line) were also detected at  $t_i$ , those are neglected. Next, only the particles with size smaller than  $b_3$  (red line) shows the second peak at  $t_{ii}$ . The second peak is an indication of the tracers passing through the *path* 3 with a critical aperture of  $b_3$ . The particles with a size between  $b_3$  and  $b_2$  (green line) showed a third peak at  $t_{iii}$ , suggesting tracers passing through the path 2. We consider that the time when each peak appeared (i.e., t<sub>i</sub>, tii, and tiii) is the representative travel time of particles for each flow path. In this example, the travel time  $t_i$  is for the path 1, the travel time  $t_{ii}$  is for the path 3, and the travel time *t*<sub>iii</sub> is for the *path* 2. The permeability can be estimated according to the cubic law by using estimated critical apertures. The flow velocity for each path can be obtained from the Darcy's law. Because the particles in the same flow path may have distinct velocity and travel time, it is possible to estimate the length of each actual flow path. Each length of flow paths can be useful to characterize fractured rocks.

This study used particles in the range between 500 nm and 1500 nm to confirm whether or not the particles can pass through the porous medium. In the next step, particles with a wider size distribution (e.g., 50 nm – 50000 nm) will be used. The fracture aperture in the micromodel will also vary. Further experiments would provide more obvious relationships between particle sizes and fracture structures. Although we assumed particle size does not affect flow speed, several studies reported that particle properties (e.g., size, materials, shape) affect the flow properties (Vilks and Bachinski, 1996). It has been widely observed that particles transport faster than conservative solutes in fractured media (e.g., Champ and Schroeter, 1988; Zvikelsky and Weisbrod, 2006; Tang and Weisbrod, 2009). We will investigate how the particle properties depend on flow by direct observation of the microscope.

### 4. Summaries and future plans

Nano- and microparticles are expected to have several functionalities, and the ability to control size and shape is an advantage of using nano-/microparticles. Our study showed that evaluation of particle size distributions may provide estimates of the sizes of the narrowest pore throats and minimum fracture apertures in the flow path. The tracer response curves for different particle sizes are expected to determine each travel time and to estimate each length of flow path, which is not obtained in conventional tracer tests. Fluid flow experiments using micromodels will clarify mechanisms of particle transport in fractured and porous media, which will help us analyze tracer response curves more thoroughly.

Current geological developments have studied in each field and technology independently. Comprehensive analyses and interpretations would achieve a novel breakthrough in the geoscience. The applicant (Suzuki) and Professor Horne developed a mass transport model in heterogeneous media that succeeded to analyze tracer responses in fractured reservoirs. They recently conducted tracer test by using 3D printed fracture networks and clarify correlations between fractures and hydraulic properties. This is the world's first research to verify experimental results that was not able in previous studies.

The MIT group (Fehler) succeeded to integrate crustal stress into micro seismic analysis first in the world and extract hydraulic properties by using micro seismic data. The Stanford group has been developed an integrated model for description of dynamic behavior. The collaborations among three research groups are most suitable for integrating tracer and micro seismic data analyses. The expected outcome of this research is contribution to the design of sustainable geothermal energy extraction system. The findings obtained in this research can contribute directly to geothermal energy production planning, position determination of production wells and reduction wells, and maintenance capacity planning of reservoirs.

- 5. Research results
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] 鈴木杏奈:地下資源開発における「かたち」と「ながれ」の推定, ながれ, Vol. 38, No. 1, (2019), pp. 21-25.
- [2] A. Suzuki, J. Minto, N. Watanabe, <u>K. Li</u>, and <u>R. N. Horne</u>: Contribution of 3D printed fracture networks to development of flow and transport models, *Transport in Porous Media*, (2018), DOI:10.1007/s11242-018-1154-7.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- \*[3] A. Suzuki, Y. Mukuhira, T. Ito, <u>R. Horne, M. Fehler</u>, and <u>P. Kang</u> : Link between tracer and microseismic analysis to comprehensive understanding of hydraulic feature of fractured geothermal reservoir, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-R1, pp. 66-67.
- [4] 鈴木杏奈: デジタル・テクノロジーを駆使した貯留層評価研究の挑戦,日本地熱学会 地熱貯留層に関する研究会, Tokyo, Japan, November 14, (2018), Invited talk.
- [5] A. Suzuki : 3D printing of controllable fracture network and evaluating of flow characteristics, 2018 Flow and Transport in Permeable Media (GRS), Newry, ME, USA, July 7-8, (2018), Invited talk.
- Patent, award, press release etc. (patent, award, press release, note should be listed here if applicable)

(Patent)

Not applicable.

(Award)

2017 WRR Editors' Choice Award, "A. Suzuki, N. Watanabe, <u>K. Li</u>, and <u>R. N. Horne</u>, Fracture network created by 3-D printer and its validation using CT images", Oct 30, (2018), Water Resources Research.

(Press release)

Not applicable.

International multiple collaborative research		
Project code	J18R002	
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials	
Research period	April 2018 ~ March 2019	
Project status	1st year	

# 分子設計から実機を最適化するマルチスケール力学モデリングのための日米仏連携 Japan-US-French Partnership for Multi-Scale Dynamic Modeling to Optimize Actual Machine from Molecular Design

Shigeru Obayashi\*†, Fumio Ohuchi\*\*†† Damien Fabregue\*\*\*, Gota Kikugawa\* Hidemasa Takana\*, TakanaMakoto Ohta\* Takashi Tokumasu\*, Tetsuya Uchimoto\* Anthony Waas\*\*††, Christine K. Luscombe\*\*†† \* Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*College of Engineering, University of Washington \*\*\*MATEIS, INSA-Lyon †Applicant, ††non-IFS responsible member

# 1. 研究目的

これまでに流体科学研究所とワシントン大学,リヨン大学が構築してきた研究ネットワークを活用し、分子スケールの材料設計と実機スケールのシステム設計を融合するマルチスケール・マルチフィジックス力学モデルを開発し実用展開を試みる.また、次世代の機械システムの理論設計に必要不可欠なマルチスケール・マルチフィジックス現象の力学モデリングに関する学術基盤の構築を目指す.

### 2. 研究成果の内容

### 2.1 共同研究

流体科学研究所,ワシントン大学,リヨン大学との共同研究により,以下のマルチスケール・フィジックスモデリングとその応用に関する研究がなされた.

(1) イオン液体静電噴霧による高効率二酸化炭素分離吸収システムの構築(University of Washington, IFS)

イオン液体はアニオンとカチオンのみで構成される常温で液体の塩であり、不揮発性・ 難燃性,熱・化学的安定性,さらには従来の吸収液よりも高いガス吸収能力を有しており、 それらを活かした CO<sub>2</sub>分離回収技術の開発が期待されている.本共同研究においては、静電 噴霧法により数 100 nm 程度の超微細液滴を生成し、比表面積効果により表面吸収反応を高 活性化することで二酸化炭素吸収システムの高効率化を目指した.二酸化炭素吸収実験に より、印加電圧の増加に伴って二酸化炭素吸収量が増加することが明らかとなり、無電場 時と比較して最大で 10 倍の吸収量が得られた.本共同研究により、イオン液体静電噴霧を 行うことで、CO<sub>2</sub>分離回収性能が顕著に向上し、より高い分離性能が得られることが実証さ れた.

# (2) 材料インフォマティクスおよび材料構造形成に関するシミュレーション (University of Washington, IFS, GSE)

ワシントン大学大内二三夫教授, Luna Huang 博士, Jimin Qian, Nam Phuong Nguyen, 東北大学岡部朋永教授,大矢豊大助教との共同研究として,多数の材料物性を扱うデータ ベースから金属やセラミックスなど無機系の材料インフォマティクスの研究を行った.特 に、教師なし学習である自己組織化マップ(SOM)を適用し、材料のグルーピングや特異 な性質を持つ材料のスクリーニングを行った.

ワシントン大学 Christine K. Luscombe 教授,東北大学岡部朋永教授,大矢豊大助教との共同研究として,半導体高分子を用いた有機薄膜太陽電池の高効率化を志向した高分子 材料の構造形成シミュレーションの研究を行った.自己無撞着場理論(SCF)に基づくシ ミュレーションを実施し,ブロックコポリマーの動的構造形成について基本的な結果を得た.

# (3) Proton Transport Mechanism in a Carbon Nanotube (CNT) (University of Washington, IFS)

Proton transport and electroosmosis of water molecule in a carbon nanotube is faster compared with bulk water. We analyze the mechanism of proton transport in a carbon nanotube by both simulation and experiment. IFS perform molecular dynamics simulations of proton transport in a carbon nanotube and UW perform experiment to measure proton conductivity of membrane made of carbon nanotubes. Now we discussed about the simulation system and determined it.

(4) Micromagnetic modeling for nondestructive evaluation (INSA, IFS, ELyTMaX)

Magnetic Incremental Permeability (MIP) being highly stress dependent proves to be very effective to evaluate materials non-destructively. In this article, modelling technique based on Jiles-Atherton model has been proposed to simulate the signature MIP butterfly loop for the 12 Cr-Mo-V-W creep test samples. Jiles-Atherton parameters imply physical interpretations. From these butterfly loops, a physical relation, based on the values of the J-A's parameters, with the microstructure such as precipitations, dislocations, Kernel Average Misorientation (KAM) has been investigated with experimental as well as simulation validations. It is especially observed that J-A's parameters are well correlated to the precipitation quantity and KAM.

# 2.2 ワークショップおよびサマースクールの開催

# (1) UW-TU: AOS-Planning Workshop 2018-Spring

The UW-TU:AOS-Planning Workshop 2018-Spring is held on April 23 and 24 at University of Washington, Seattle, USA. 6 IFS researchers and 2 researches in mechanical engineering division attended the workshop and discuss about their respective collaborative researches. After discussion, we visited e-science section in University of Washington and we have a seminar about data mining. over 30 researches including IFS and UW attended the seminar and present their research about data mining.

(2) ELyT School 2018

Since 2009, ELyT School is organized every year (alternating between Lyon and Sendai) with the aim of presenting the partner institutions to students from the other country (mainly Masters students, to encourage the creation of jointly-supervised Ph.D. research projects, and undergraduate students to promote Masters double-degree programs). School includes academic lectures, lab tours, industrial tour, student project work, cultural activities (cultural trip, social activities, photo contest, and some events are organized by local students. 10th ELyT School was held in Sendai from August 26th to September 5th, 2018, and 22 students from France, 2 students from Washington University and 23 students from Tohoku University joined.

### (3) ELyT Workshop 2019

In the framework of the cooperation between Université de Lyon, CNRS and

Tohoku University, materialized by the existence of a LIA (International Associated Laboratory) since 2008 and an UMI (International Joint Unit) from 2016, the 10th ELyT (Engineering Science Lyon / Tohoku) workshop was held from 8 to 11 March 2019. This annual workshop (alternatively in France and in Japan) gathers both researchers and students whose research projects, with the support of the LIA ELyT Global, are developed jointly in Lyon and in Tohoku. Thanks to the support of CNRS, INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, Université de Lyon, Tohoku University, but also of French Embassy in Japan and French region Auvergne Rhône Alpes, about 80 researchers and students presented their work on Saturday March 8th on Katahira campus of Tohoku University, and from Sunday March 9th to Tuesday March 11th in Naruko in Japan. This year, in addition to the scientific presentations (43 oral presentations and 32 posters), a dedicated session devoted to industrial partners (Nippon Steel, Michelin, Blue Practice) and also institutional partners (Miyagi Prefecture, French embassy) and to key projects in Tohoku University was successfully organized. This event sustains the Lyon / Tohoku partnership in a long-term scientific excellence approach, but also proves the strategy of being fully involved in the economic and societal stakes of both metropoles.

### 3. 研究目標の達成状況

学術的な観点からは、マルチスケール・マルチフィジックス現象の力学モデリングの基盤となる、高機能材料・流体のシミュレーション、モデリング等の研究領域について、共同研究研究を推進した.

上記の共同研究についての成果を共有するとともに、マルチスケール現象の把握や現象 理解のための学理の構築、解析手法の開発を行うために、日仏および日米間のワークショ ップを開催した.若手研究者の発掘と育成を目的として、リヨン大学、ワシントン大学、 東北大学の大学院生の参加のもとサマースクールを開催した.

### 4. まとめと今後の課題

マルチスケール・マルチフィジックス現象の力学モデリングの基盤となる高機能材料・ 流体のシミュレーション,モデリング等の研究領域で日仏米間の共同研究が開始され,成 果を挙げつつある.

今後これらの成果をふまえ,産学連携のためのインキュベーションとなるテーマの推進 と産学連携研究の開拓を行う.

5. Research results

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

- B. Zhang, B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto: Dynamic magnetic scalar hysteresis lump model, based on Jiles-Atherton quasi-static hysteresis model extended with dynamic fractional derivative contribution, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.54, No.11, (2018), 7301605.
- [2] B. Gupta, T. Uchimoto, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, <u>T. Miyazaki</u>, T. Takagi: Magnetic Incremental Permeability Non-destructive Evaluation of 12 Cr-Mo-W-V steel creep test samples with varied ageing levels and thermal treatments, *NDT&E International*, Vol. 104, (2019), pp. 42-50.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [3] 高奈秀匡:イオン液体静電噴霧の流体力学的特性解析と二酸化炭素分離吸収への応用, 第1回熱流体フォーラム, (2018), 2018 年 5 月 19 日, 招待講演.
- 3) Patent, award, press release etc.
- (Patent)

Not applicable.

# (Award)

原望,日本混相流学会ベストプレゼンテーションアワード,「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向けた実験的研究」,2018年8月9日. (Press release)

Not applicable.

International multiple collaborative research		
Project code	J18R003	
Subject area	Environment and energy	
Research period	April 2018 ~ March 2019	
Project status	1st year	

Micro Channel Burners for Energy Production on the Basis of Micro Combustion

Sergey Minaev\*†, Kaoru Maruta\*\*††

Roman Fursenko\*\*\*††, Alexander Kirdyashkin\*\*\*\*††, Vladimir Gubernov\*\*\*\*\*††

\*Far-Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\* ITAM SB RAS, Novosibirsk, Russia

\*\*\*\* Department Structural Macrokinetics, TSC, Russia \*\*\*\* Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

# 1. Purpose of the project

The study is targeted to perform fundamental and applied research, as well as design work aimed at creating compact, environmentally friendly and efficient microchannel matrix burners and new micro-burning technologies. On the basis of microchannel burners, effective infrared sources of radiation with controlled power can be developed for various industrial applications, as a replacement for electric heat sources, as well as burners for burning lean and extremely lean gas mixtures that will be used as gas afterburners or as devices for utilization of oil or mine gases. Creation and improvement of a new generation of microchannel radiating burners requires additional fundamental studies related to a deep understanding of the processes of micro combustion or gas combustion in micro channels. The purpose of these studies is to create models and numerical algorithms for determining of flame stabilization region in microchannel matrix burners, as well as experimental facilities aimed at verification of theoretical calculations, which are necessary for design and optimization of microchannel matrix burners. The complementary researches were performed by four Russian teams and team from IFS.

2. Details of program implement

The complementary researches were performed by four Russian teams and one team from IFS. The participants discussed current scientific problems related with project at the international conferences such as 37th International Symposium on Combustion held in August 2018 in Ireland and ICFD 2018 conference held in Japan in November 2018. The Russian teams discussed scientific problem of the project at the conferences and workshops held in Russian research Institutes involved in the project. The on-line seminars using internet were organized for discussion and approbation of the scientific results obtained by all teams involved in the project. The tasks of the project distributed among the teams and the all tasks will form complementary study. Generally, the teams from IFS and FEFU conducted experimental research of gas combustion in micro channels systems and investigations of flame structure in micro channel. The team from Moscow developed theoretical approach to create reduced chemical kinetics model of combustion of practical fuels. The team from Novosibirsk dealt with development of effective numerical algorithms for modeling of gas combustion and heat radiation in micro channel systems. The Tomsk team developed special materials for micro channel matrix using by self-propagating high temperature synthesis methods.

3. Achievements

The following results concerning gas combustion in microchannel were obtained by team from Far-Eastern Federal University in collaboration with ITAM SB RAS. The new configuration of slot-jet burner which allows investigation of stretched flames structure at very low flow rates was proposed. In this configuration two opposite gas flows from slot-jet burners are formed between two quartz parallel plates as it is shown at Figure 1. To get flow characteristic inside microchannel the particle image velocimetry (PIV) is used and the burner allows measurements of gas temperature by thermocouples using the small gap in quartz plates. The advantage of the proposed burner over the conventional counter current burners is the possibility to get information about stretched flame at small flow rates in the normal gravity conditions [1]. Experimental and theoretical investigations of the premixed flames in counter-flow slot-jet configuration reveal existence of the various stationary combustion modes including normal flame, near-stagnation plane flame, weak flame and distant flame. For the flames stabilized in the vicinity of stagnation plane at moderate and large stretch rates the effect of channel walls is basically reduced to additional heat loss. For distant flame characterized by large flame separation distance and small stretch rates intensive interphase heat transfer and heat recirculation are typical. It is shown that in mixture content / stretch rate plane the extinction limit curve has  $\epsilon$ -shape (see Figure 1), while for conventional counterflow flames it is known to be C-shaped. Analysis of the numerical results makes possible to reveal prime mechanisms of flame quenching on different branches of ε-shaped extinction limit curve. Namely, two upper limits are caused by stretch and heat loss. These limits are direct analogs of the upper and lower limits on conventional C-shaped curve. Two other limits are related with weakening of heat recirculation and heat dissipation to the burner. Thus, the study provides a satisfactory explanation for the experimental observations of stretched flames in narrow channel.



Figure 1: Scheme of the counterflow flames in planar microchannel (left) and stretch rate/mixture content diagram with  $\varepsilon$ -shape curves evaluated for different distances L between slot-jet burners (right) [1].

To examine the effect of Lewis number on the extinction boundary, flame regimes, and the formation of sporadic flames, microgravity experiments on counterflow flames for CH4/O2/Kr (Le  $\approx 0.7-0.8$ ) and CH4/O2/Xe (Le  $\approx 0.5$ ) mixtures, and three types of computations, which are one-dimensional computations with a

PREMIX-based code using detailed chemistry, and three- and one-dimensional computations with the thermal-diffusion model using an overall one-step reaction were conducted by **FEFU**'s and **IFS Tohoku** teams [2]. In the microgravity experiments, planar flames, planar flames with propagating edges, planar flames with receding edges, star-shaped flames, cellular flames, and sporadic flames were identified, and their regions of existence in the equivalence ratio-stretch rate plane were obtained. Sporadic flames were formed for mixtures diluted by Xe gas but the same is not observed for mixtures diluted by lighter Kr gas. Similarly, sporadic flames were formed at Le = 0.50 but not at Le = 0.75 in the three-dimensional computations with the thermal-diffusion model. Also, the flame regime of sporadic flames extended far beyond the extinction boundaries obtained in the one-dimensional computations in both experiments and the three-dimensional computations. Furthermore, a comparison of the sporadic flames are intermediate combustion modes that segue flame balls to propagating flames.

Laminar flame of low-Lewis-number premixtures are known can exist in two stationary combustion modes that are flat flame propagating with constant velocity and unmovable flame ball. The existence of others intermediate flame configurations between flat flame and the flame ball are still remains open theoretical problem. The theoretical study conducted by **FEFU** team is an attempt to find universal solutions within frame of diffusion-thermal model which describe the class of flame stationary modes that are transient between flat flame and the flame ball. The method of evaluation of propagation velocity and the shape of ball-like flame was proposed. In the limiting cases the obtained solutions transform into solutions describing flat nonadiabatic flame or unmovable flame ball.

Power generation usually requires removal of thermal energy from the system. The impact of the heat removal on the dynamics of a premixed flame in the case of a simple, but representative, counter-current micro burner was evaluated in paper [3] by theoreticians from **FEFU** and **ITAM SB RAS**. In this configuration, two opposed streams of fresh gases with the same equivalence ratio  $\phi$  are introduced, at the same velocity UF, in the burner through narrow, infinitely long channels. The channels are separated by the common wall from which the heat used for power generation is removed. A flame-sheet chemistry model and a realistic, specifically developed, one-step Arrhenius kinetics are used and compared in order to explore the importance of finite-rate chemistry effects. Finite-rate is found to play a significant role especially near the extinction limit (low velocities) and at high temperatures (high velocities) where distributed reaction can lead to autoignition. The changes in the flame stabilization position and operation limits of the micro burner are analyzed. Significant variations in combustor operation were found when energy is extracted from the system. Power generation efficiency is also studied, to conclude that an optimum level of energy extraction exists for each equivalence ratio and also that an optimum equivalence ratio exists.

Experimental and numerical results on premixed flame penetration and subsequent propagation in a multichannel burner are presented [4]. The burner consists of the set of planar straight quartz channels which transverse sizes can be varied. It is found that, depending on mixture flow rate, equivalence ratio and channels transverse sizes a big variety of combustion regimes can be observed. These regimes include burner-stabilized flames, upstream propagating flames, and flames stabilized under the burner external surface. The placement of different combustion regimes in equivalence ratio/flow rate plane is plotted by means of experimental and numerical studies. In wide range of parameters, the flame pulsations consisting of repetitive stages of flame ignition, upstream propagation, and quenching take place. Results of numerical simulations obtained in the framework of simplified thermal-diffusion model are found to be in a good qualitative agreement with experimental data and allow to explain experimental findings.



Figure 2. Photograph (a), assembly model(b) and scheme of examined configurations of the multichannel burner (c).

Experiments and numerical simulations demonstrate a big variety of combustion regimes in the multichannel burner including burner - stabilized flames, upstream propagating flames, and flames stabilized under the burner external surface (see Figure 3.).



Figure 3. Temperature, concentration, and chemical reaction rate distributions for different combustion modes in configuration I.

The placement of different combustion regimes in equivalence ratio/flow rate plane is plotted on the basis of experimental observations and numerical simulations.

It is found that in the wide range of moderate flow rates and equivalence ratios, the flame penetration and subsequent upstream propagation are accompanied with pulsations. These pulsations consist in repetitive flame ignition, upstream propagation and extinction, in perfect analogy to FREI phenomenon (*Maruta et al., 2005*). Flame pulsations are the origin of noticeable sound produced by the multichannel burner. Despite fast motion of oscillating flame fronts, the average propagation velocity of the combustion wave is typically of the order of mm/s. This fact points to the strong thermal coupling between gas and solid phase which is typical for filtrational gas combustion. Thus, presented results on FREI-type flame oscillations may provide possible explanation of the noise frequently appearing in porous burners. All these results have been obtained by **FEFU**'s, **ITAM SB RAS** and **IFS Tohoku** teams.

The radiative micro channels burners made of SHS porous materials were created in **TSC SB RAS**. This study has been motivated by the previous experimental findings on temperature and radiative characteristics of cylindrical porous burners made of Ni-Al alloy [5]. The findings reveal a significant improvement in the radiation efficiency of the burners operated in an internal combustion mode. In this combustion mode, the flame stabilizes in an internal cavity of a cylindrical burner that allows achieving the radiation efficiency of about 60%. The burners convert the combustion heat into an IR flux with the efficiency close to the maximum possible [5]. The radiation and NOx emission characteristics of new type of radiative burners were investigated. The novelty of the burners is the combination of conical steel reflector and cylindrical Ni-Al porous burner. Two operation modes have been investigated: with fuel-air mixture preheating by means of heat recuperation, and without preheating. The optimal operation regimes were found which allows rich 65-75% radiation efficiency and NOx emission less than 50 ppm in the range of firing rates of 50-400 kW/m2.



Figure 4. (a) Radiation burner configuration: 1 -housing; 2 - flow distributor; 3 - cylindrical emitter. (b) - Burner in operation. (c) - Porous matrix. Dependencies of the maximal radiation efficiency on the firing rate for different types of fuel-air mixtures are shown at the right diagram.

A global kinetic model which includes fuel, oxygen, products and two radical species involved into the reversible chain-branching, chain propagation and chain-termination reactions was proposed in paper [6] by LPI RAS team. The model extends the Zeldovich-Li n'an and the Zeldovich-Barenblatt-Dold models and can be applied to describe the deflagration wave of the hydrocarbon fuel/air mixture with arbitrary equivalence ratio under the simplifying thermal-diffusive approximation. This is probably the first global chain-branching reaction model, which has two active radicals: chain-branching and chain-propagating radicals with the additional inclusion of reverse reactions to describe the flame equilibrium products. It is of interest to mention that such a simplified approach with only inclusion of backward processes and a more accurate equilibrium description allows one to obtain the shift of maximum temperature. The dependence of equilibrium downstream species concentrations on the mixture composition qualitatively agrees with the corresponding behavior of the concentrations of reaction species in the products of the hydrogen-air flames. The equilibrium characteristics are shown to be strongly affected by the rates of the reactions: as a rule the forward reactions promote, while backward reactions inhibit the flame propagation. The generalized model facilitates numerical simulations gas combustion in complex flows and geometries of the combustion chambers. The developed model allows to use it in future work to investigate the effect of addition of chemical inhibiting agents and other factors (electric discharge or field, flame-wall interaction etc.) on the structure and the characteristics of premixed and diffusion flames.

# 4. Summaries and future plans

The results obtained by all teams give new fundamental knowledge on combustion in the porous media and micro channels that will facilitate the development of new eco-friendly combustion technologies. The outlined research plan was fulfilment in generally. The all obtained results will be presented at ICFD 2018 and submitted for publication in reviewed journals.

The future plan of the project proposes for the first time to use gas combustion technologies in small-sized flat channels to obtain fundamental knowledge of the combustion waves structure. Studies of combustion in flat channels will allow to create inhomogeneous gas flows in the space between parallel plates with specified characteristics, and the flame localization in the gap between the plates will allow optical and thermocouples measurements of the characteristics of the reacting gas mixture. Heating the walls of the channel with an external heat source will allow maintaining the specified temperature profile in the walls, which will make it possible to investigate the characteristics of the combustion waves at elevated initial temperatures. In addition, the relative simplicity of the organization of combustion at elevated initial temperatures and pressures and the convenience of visual and temperature measurements create advantages in the study of the flame structure in flat channels, compared with traditional methods. Particular importance for advanced gas combustion technologies is the development of global and reduced models of chemical reactions and the acquisition of data on the parameters of simplified models near the flammability limits and lean gas burning. To date, a large amount of kinetic data and models of different levels of complexity have been accumulated: from a detailed description (including thousands of elementary stages) to global phenomenological models that include a small number of stages. Note that even within the framework of one-stage kinetics, there is still no generally accepted phenomenological model describing the dependence of the normal flame velocity on the local curvature of the front and the flow stretch parameter. The absence of global kinetic models of the dynamic behavior of the flame in a wide range of physical parameters makes it ineffective or even impossible

to perform engineering calculations using conventional computational tools due to the large number of phenomena with a wide spread of characteristic times and spatial scales. For many reaction systems, reliable detailed kinetic models are missing, and the development of global kinetic models is probably the only way to model combustion in practical devices at the present time. The proposed project will allow verification of existing and newly created global flame propagation models for engineering calculations of gas combustion in practical devices.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- \*[1] <u>R. Fursenko, S. Mokrin and S. Minaev</u>: Stationary combustion regimes and extinction limits of one-dimensional stretched premixed flames in a gap between two heat conducting plates, *Proceedings of the Combust. Inst.*, Vol. 37, No. 2 (2019), pp. 1655-1661. DOI:10.1016/j.proci.2018.04.001
- [2] T. Okuno, H. Nakamura, <u>R. Fursenko, S. Minaev</u>, T. Tezuka, S. Hasegawa, <u>M. Kikuchi</u> and K. Maruta: Broken C-shaped extinction curve and near-limit flame behaviors of low Lewis number counterflow flames under microgravity, *Combustion and Flame*, Vol. 194 (2018), pp. 343–351.
- [3] <u>E. Fernandez-Tarrazo, M. Sanchez-Sanz, R.Fursenko</u> and <u>S. Minaev</u>: Multiple combustion regimes and performance of a counter-flow microcombustor with power extraction, *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, Vol. 13 (2018), pp. 52-58.
- [4] <u>A. Maznoy, A. Kirdyashkin, S. Minaev, A. Markov, N. Pichugin and E. Yakovlev</u>: A study on the effects of porous structure on the environmental and radiative characteristics of cylindrical Ni-Al burners, *Energy*, Vol. 160 (2018), pp. 399-409.
- [5] <u>V. V. Gubernov, V. I. Babushok</u> and <u>S. S. Minaev</u>: Phenomenological model of chain-branching premixed flames, *Combustion Theory and Modeling*, Vol. 23, No. 2 (2018), pp.261-278. DOI:org/10.1080/13647830.2018.1520305
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [6] <u>G. Grenkin, A. Chebotarev, V. Babushok</u> and <u>S. Minaev</u>: Inverse Problem of Finding the Parameters of the Combustion Model, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-10, pp. 232-233.
- [7] <u>T. Bolshova, V. Shvartsberg, A. Dmitriev, N. Alyanova</u> and <u>D. Knyazkov</u>: A Reduced Chemical Kinetic Mechanism for Combustion of Dimethyl Ether, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-13, pp. 238-239.
- [8] <u>E. Dats, T. Miroshnichenko, S. Minaev</u> and K. Maruta: Influence of Heat Conductivity and Pore Size of Porous Materials on the Efficiency of Cylindrical Radiative Burners, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-21, pp. 254-255.
- [9] <u>A. Kirdyashkin and R. Gabbasov</u>: Plasma-Chemical Support for the Ignition and Combustion of Powder Systems Forming Condensed Reaction Products, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-24, pp. 260-261.
- [10] <u>T. Miroshnichenko, G. Uruipin and S. Minaev</u>: Critical Stretch for the Flame Jet Propagating in Microchannel with Narrowing, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-49, pp. 310-311.
- [11] <u>A. Maznoy, A. Kirdyashkin, S. Minaev</u> and <u>N. Pichugin</u>: Gas-Fired Luminous Radiant Heater Based on Cylindrical Ni-Al Burner, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-53, pp. 318-319.

- [12] <u>R. Fursenko</u> and <u>S. Minaey</u>: Numerical Study of Counterflow Flames in Asymmetric Flows, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-74, pp. 360-361.
- [13] <u>V. Gubernov, V. Bykov</u> and <u>U. Maas</u>: Analysis of Diffusive-Thermal Instabilities of Hydrogen Flames, a Way to Verify the Reaction Mechanism, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-75, pp. 362-363.
- [14] S. Minaev, R. Fursenko and A. Chebotarev: Modeling of Transition from "Flame Ball" to the Flat Flame, Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2018), OS2-78, pp. 368-369.
- [15] S. Mokrin, R. Fursenko, E. Odintsov, D. Sharaborin, G. Uriupin, D. Tanygina, A. <u>Chernov, V. Dulin and S. Minaev</u>: Experimental Study of Flow Field and Premixed Gas Combustion in Planar Counterflow Reactor, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-82, pp. 376-377.
- [16] <u>E. Sereshchenko, R. Fursenko, S. Minaev</u> and K. Maruta: Numerical Simulations of Flame Ignition and Propagation in Spatially-Varying Straining Flow, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-100, pp. 412-413.
- [17] <u>A. Ponomareva, A. Triguba, K. Tcoi, V. Babushok</u> and <u>K. Shtym</u>: Combustion of Coal Particles under Radiation from Porous Burner, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS2-109, pp. 430-431.
- \*[18] <u>S. Minaev</u>, K. Maruta, <u>R. Fursenko, A. Kirdyashkin, V. Gubernov</u>: Microchannel Burners for Energy Production on the Basis of Microcombustion, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-R3, pp. 128-129.
- 3) Patent, award, press release etc.
- (Patent)

Not applicable.

(Award)

Not applicable.

(Press release)

Information about collaborative research between IFS Tohoku University and FEFU conducted in International Combustion and Energy Lab (FEFU) within project of Ministry of Education and Science of Russian Federation is placed at the site: <u>http://www.p220.ru/home/projects/item/790-14-y26-31-0003</u>

International multiple collaborative research	
Project code	J18R004
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	3rd year

Instability and Nonlinear Dynamics of Curved Vortices

Yuji Hattori\*†, Makoto Hirota\* Stéphane Le Dizès\*\*††, Thomas Leweke\*\*, Stefan G. Llewellyn Smith\*\*\*†† Ivan Delbende\*\*\*\*††, Maurice Rossi\*\*\*\*\*††, Yasuhide Fukumoto\*\*\*\*\*†† \*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*IRPHE and Aix-Marseille University \*\*\*MAE, UCSD \*\*\*\*LIMSI \*\*\*\*\*Université de Paris VI \*\*\*\*\*\*Institute of Math-for-Industry, Kyushu University †Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The vortical structures which appear in various flows are often curved as exemplified by vortex rings ejected from circular pipes and helical vortices emanated from rotating wings. Curved vortices are subjected to *curvature instability*, which is due to the curvature of the vortices, as first shown analytically for the vortex ring (Fukumoto and Hattori, 2005; Hattori and Fukumoto, 2003). Helical vortices with axial flow are also shown to be subjected to the curvature instability (Hattori and Fukumoto, 2009, 2012, 2014). However, this instability has been shown only for Kelvin's vortex ring which has constant vorticity inside the core at the leading order of the thickness. Vortices with smooth or continuous distribution of vorticity should be dealt with carefully since existence of critical layers change the situation significantly.

Recently Blanco-Rodríguez and Le Dizès (2017) analyzed the linear stability of a Gaussian vortex ring with axial flow and showed that it is also subjected to the curvature instability. They found that some important features of the instability are quite different from those of Kelvin's vortex ring owing to the presence of critical layers. Unfortunately, however, clear evidence of the curvature instability has not been observed in experiments or numerical simulations as far as the authors know.

The objective of the present project is to reveal the mechanism of instability, nonlinear evolution of the instability and transition to turbulence in the curved vortices encountered in various flows. The results would contribute to development of methods for predicting when the curved vortices are destabilized and controlling flows which have curved vortices.

# 2. Details of program implement

#### 2.1 Plan of the research project

In order to study the dynamics of vortical structures which appear in the nature and engineering applications we should deal with vortices which have continuous vorticity distribution like Gaussian vortices. The effects of buoyancy are also important in astrophysical and geophysical flows. Thus the research plan of the project consists of the following three sub-projects. (1) Nonlinear Dynamics of Vortex Rings with Continuous Vorticity Distribution

The destabilization of the vortex rings with continuous vorticity distribution is studied by DNS. In viscous flows the core radius of vortex rings grows as time proceeds to break the resonance condition for parametric instability; as a result the unstable growth saturates depending on the initial energy of the disturbance. We investigate how nonlinear evolution of vortex rings depends on the initial disturbance and the Reynolds number and clarify whether the vortex rings break up after becoming turbulent or turbulent vortex rings survive.

(2) Nonlinear Dynamics of Vortex Rings with Variable Density

Vortex rings having interface across which density has a jump is studied by linear stability analysis. A criterion for instability is derived based on the energetics of the waves on vortex rings; the theory developed by Hirota & Fukumoto (J. Math. Phys., 2008) is extended by taking account of density distribution and surface tension. (3) Nonlinear Dynamics of Helical Vortices

The stability of helical vortices is studied by DNS. Characteristics of linear stability including resonance condition and growth rate are compared to theory so that the effects of torsion and dependence on the Reynolds number are elucidated.

#### 2.2 Generalised helical vortex pairs

New solutions describing the interaction of helical pairs of counter-rotating vortices are obtained using a vortex filament approach. The vortices are assumed to have a small core size allowing the calculation of the self-induced velocities from Biot-Savart law using the cut-off theory.



Figure 1: Parameters defining the generalized helical vortex pairs.

These new vortex structures do not possess any helical symmetry but they exhibit a spatial periodicity (figure 1)

$$F(r, \theta + \phi, z + L) = F(r, \theta, z)$$

and are stationary in a rotating and translating frame. Their properties, such as radial deformation, frame velocity (figure 2) or induced flow, are provided as a function of the four geometric parameters characterizing each solution:

$$R^* = \frac{R_{int}}{R_{ext}}, \quad h^* = \frac{h_{ext}}{R_{ext}}, \quad \alpha = \frac{h_{int}}{h_{ext}}, \quad \varepsilon = \frac{a}{Rext}.$$

Approximate solutions are also obtained when the mutual interaction is weak. This

allows us to provide explicit expressions for the rotation and translation velocities of the structure in this limit.



Figure 2: Angular velocity (right) and axial velocity (right) of the frame where the solution is stationary as a function of  $\alpha$  and h\* for R\*=0.5 and  $\epsilon$ =0.03. Both quantities have been normalized using the external radius R<sub>ext</sub>, and the vortex circulation  $\Gamma$ .

The variation of the vortex core size induced by the helix deformation is also analysed. We show that these variations have a weak effect on the shape and characteristics of the solutions, for the range of parameters that we have considered.

The results are finally applied to rotor wakes. It is explained how these solutions could possibly describe the far wake of a helicopter rotor in vertical flight (figure 3).



Figure 3: Diagram of the different rotor flow regimes. White regions: windmill brake regime or wind turbine regime (both vortices are going upwards as the external wind).

Light gray regions: ascending regime (both vortices are going downwards as the external wind). Dark gray regions: slow descending regime and vortex ring state (both vortices are going downwards while the external wind is going upwards). Close to the line F = 0, there exists a small region where one vortex is going upwards while the other is going downwards: such a solution cannot describe the (far) wake of a rotor.

2.3 On the pairing instability in helical vortices

Single or multiple interlaced helical vortices, as found e.g. in the wake of rotors, are known to be unstable with respect to displacement perturbations, whose wavelengths are large compared to the characteristic vortex core size. Recent experiments have clearly shown the corresponding instability modes; examples can be seen in figure 4.



Figure 4: Experimental dye visualizations of unstable helical vortices in the wake of a one-bladed (a) and a two-bladed (b) rotor of diameter 16 cm.

The long-wave perturbations are characterized by a local pairing of consecutive helix loops, as can be seen at the top of figure 1(a) and the top and bottom of figure 4(b). The pairing instability of an infinite array of point vortices, representing straight parallel vortices in three dimensions, is a well-known phenomenon and the analytical treatment establishing the growth rate can e.g. be found in Lamb (1932). The most unstable perturbations involve an out-of-phase displacement of neighboring vortices. The analysis was extended in Robinson and Saffman (1982) to include three-dimensional perturbations, where the vortices are not only displaced, but can also deform in a sinusoidal way along their axes. The growth rate is still highest for out-of-phase perturbations between neighbors, but its value decreases with decreasing wavelength of the three-dimensional perturbations.

In the present work, we establish a link between the three-dimensional pairing of arrays of straight vortices and the long-wave instability of helical vortices. If one considers the developed plan view of the perturbed helical system (figure 5), its structure appears indeed as an array of (initially parallel) sinusoidal vortices. The





(a)

Figure 5: Idealized representation of the two-helix system undergoing the pairing instability. Three-dimensional view (a) and developed plan view (b). Pairing occurs locally at the gray circles.

condition of periodicity in the azimuthal direction of the helix (vertical direction in figure 5*b*), and the geometrical relations in the developed plane, allow formulating a correspondence between the parameters characterizing the helical system (radius, pitch, perturbation wave number k) and those used in Robinson and Saffman (1982) for the analysis of straight vortices (separation distance, deformation wavelength). The growth rate can then be predicted from the considerably simpler second analysis.



Figure 6: Non-dimensional growth rate  $\sigma^*$  of the pairing instability in a two-helix system, as predicted from (a) the three-dimensional pairing of straight vortices and (b) the full stability analysis of the double helix. In-phase (red) and out-of-phase (blue) perturbations between the two vortices.

The result for a two-helix system is given in figure 6, where it is compared to the one from the complete analysis, which takes the helical geometry fully into account. It is quite striking that both are nearly identical. The same is observed for the frequency spectrum of the perturbations for all cases with moderate helix pitch. These results, which are based on the assumption that the helical vortex system behaves locally like an array of straight vortices, are expected to become invalid for large helix pitch, for which the two-helix system locally tends towards a vortex pair configuration,

The present analysis shows that the growth rate of the long-wavelength displacement instability of interlaced helical vortices with moderate pitch and small core size can be predicted surprisingly well from the characteristics of three-dimensional pairing of arrays of straight vortices, which demonstrates once again that pairing is the underlying mechanism for this instability.

### 2.4 Current vortex sheets

Reduced-order models in vortex dynamics are an important tool in understanding fundamental processes, particularly in the case of inviscid flows where singular structures such as point vortices, vortex sheets and vortex patches keep their identity. One particular advantage of such models is their ability to reduce the dimensionality of the system, since the dynamics occur on zero- (point vortices) or one-dimensional (vortex sheets and patches) structures.

A natural further step is to add further physics to the starting point of inviscid fluid dynamics, including density differences, buoyancy (density differences with gravity) and magnetic fields. Llewellyn Smith *et al.* (2018) outlines a number of different models that are possible in this regard.

Matsuoka *et al.* (2017; hereafter MNS) present a set of equations for the evolution of two-dimensional MHD flows using current-vortex sheets. In these equations the vorticity and current density are supposed to be concentrated on sheets and absent off them in the bulk. We discuss these equations and point out an oversight that renders

them inapplicable.

The vorticity  $\boldsymbol{\omega}$  and current density **j** are taken to vanish initially in the bulk. The critical question is then whether this property is still true at later times, so that the flow is irrotational and current-free in the bulk for all times. The equations for two-dimensional MHD flow in the (x, y) plane can be written as

$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{1}{\rho} B \bullet \nabla j, \quad \frac{Dj}{Dt} = \Delta(B \times u)$$

where D/Dt is the Lagrangian derivative,  $\Delta$  is the Laplacian. and the magnetic permeability  $\mu$  has been scaled out of the equations. The right-hand side of the induction equation is a product of two terms that are not localized on current-vortex sheets, but are rather obtained from the Biot–Savart law and exist in the bulk.

This means that the equations of MNS are missing the contributions of bulk current density and vorticity, so that the evolution of the system cannot be obtained from the dynamics of quantities on the current-vortex sheets alone.

We can derive an explicit solution to the governing equations that satisfies the initial condition localized on the current-vortex sheets, but is non-zero in the bulk. This is a perturbative solution, but shows the present of non-zero bulk terms that will appear in a full solution. The fields are related to the linearized surface Alfvén waves of MNS. We consider an initial condition with a magnetic field parallel to the interface y=0 separating fluids 1 (below) and 2 (above), an irrotational velocity field and no currently density. Take the velocity to be small of  $O(\delta)$  and expand quantities in  $\delta$ .

$$B = (B_0, 0) + \delta b_1 + \delta^2 b_2 + L$$
,  $u = \delta u_1 + \delta^2 u_2 + L$ 

and so on. The leading-order quantities are satisfied automatically. Taking a wave solution and carrying out the expansion shows that

$$b_{1x}v_1 - b_{1y}u_1 = \frac{kB_0}{2v_{a0}}\sin 2\omega t \,e^{2y}$$

where  $v_{a0}^2 = 2B_0^2/(\rho_1 + \rho_2)$  is the Alfvén wave velocity in the present two-layer system. The quantity  $b_{1x}v_1 - b_{1y}u_1$  is not harmonic, so its Laplacian does not vanish and acts as a forcing that generates current density in the lower layer. Similarly current density is generated in the upper layer. This solution can be used to generate an arbitrary initial condition using Fourier synthesis.

To summarize, the evolution of the two-dimensional MHD cannot be reduced to the dynamics of quantities on current-vortex sheets. However, the numerical results of MNS indicate that this approximate model can still be useful as it matches the full simulations reasonably well.

# 2.5 Short-wavelength instabilities in helical vortices

Extending the methodology used for long wavelength instabilities, we have been able to simulate the linear growth of short wavelength instabilities in a helical vortex of fixed reduced pitch L=0.13. We have focussed on the instabilities arising from the resonant coupling of some azimuthal modes m1 and m2 with the elliptical deformation of the vortex core due to 3D effects. Following Blanco-Rodríguez et al. 2016, we have investigated three cases with different axial velocity magnitudes W0 inside the vortex core, for which three different mode structures are expected by the theory:

(1) a mode called (-1,1,1) involving azimuthal modes m1=1 and m2=-1 (first branch) around W0=0;

(2) a mode called (-2,0,2) involving azimuthal modes m1=-2 and m2=0 (second branch) around W0=0.2;

(3) a mode called (-2, 0, 1) involving azimuthal modes m1=-2 and m2=0 (first branch) around W0=0.4.

For the three cases, the unstable modes have been found exactly in the range of wavenumbers predicted by the theory (see figure 7), with a growth rate at the right order of magnitude. The analysis of the DNS data has also revealed a mode structure almost identical to what was predicted by the theory (figure 8).

Perspectives are:

- systematically scan other W0 values since other unstable modes might occur, overlooked by the theory;

- find the curvature instabilities arising from a coupling with a non-elliptical deformation of the core;

- extend to nonlinear effects and more general cases (several vortices...)



Figure 7: linear growth rate vs wavenumber k for the elliptical instability of a helical vortex of pitch L=0.13 and core size a=0.15. (a) Mode (-1,1,1) at W0 = 0 and Re = 5000; (b) mode (-2,0,2) at W0 = 0.22 and Re = 10000; (c) Mode (-2,0,1) at W0 = 0.4 and Re = 5000.

Red continuous: theory. Black with dots: present numerical simulations.



Figure 8 : strucure of the above mode (-1,1,1) at k = 52, respectively from left to right: 2D helical vorticity structure obtained in the present study in a plane perpendicular to the vortex cross-section; corresponding 3D structure; structure expected from the theory (Blanco-Rodríguez et al. 2016).

2.6 Self-organization and stability of horizontal shear flow driven by inverse stratification

If an inversely stratified fluid is restricted to two-dimensional dynamics and the Rayleigh number (Ra) is sufficiently large, the temperature gradient drives not only thermal convection but also horizontal shear flow. Such the self-organized shear flow has a role to suppress thermal convective turbulence and is likely stable at least in a certain time scale. This fundamental phenomenon is related to the so-called zonal flows observed in planetary atmosphere and magnetized plasma. Although the thermal conductivity is greatly affected by the presence or absence of the shear flow, theoretical understanding and prediction for it are very limited.

In this research, we performed a direct numerical simulation of two-dimensional thermal convection, which is periodic in the horizontal direction (x) and is bounded by two isothermal, free-slip walls at z=0 and 1. For Ra=10<sup>7</sup> and Pr=1, a Rayleigh-Taylor instability first occurs and nonlinearly saturates at t=250 (Fig. 9, left). Subsequently, a horizontal shear flow is generated spontaneously, whose structure at t=1000 is similar to the zonal flow (Fig. 9, right). Whereas the Nusselt number (Nu) becomes maximum when the convection cell is formed at t=250, it is significantly reduced when the zonal flow is present at t=1000 (Fig. 10, left).

The local Richardson number, denoted by J, is often an important index for the stability of stratified shear flows, where J<0 means inverse stratification. For example, the Couette flow is known to stabilize inverse stratification if -3/4 < J < 0. Figure 10 (right) shows the horizontally averaged profiles of temperature T, horizontal flow U and the corresponding  $J=(g/T)(dT/dz)(dU/dz)^{-2}$ . Although J becomes  $-\infty$  at the places where dU/dz=0, it is not so negatively large in the most part of the domain and partly above -3/4. This result indicates that the shear of zonal flow is strong enough to suppress the thermal convection (or the Rayleigh-Taylor instability). We have obtained a similar result even for the case of no-slip walls and hence the viscosity may not play an essential role for generating shear flow, given that Ra is large enough.

We expect that the aspect ratio of the domain would be the key parameter. We plan to survey the dependence of the generated shear flow on the aspect ratio and apply the linear inviscid stability theory by solving the Taylor-Goldstein equation.



Figure 9: Distributions of vorticities in the y direction when t=250 and 1000.



Figure 10: (Left) Instantaneous Nusselt number (evaluated at z=0). (Right) Horizontally averaged profiles of temperature, horizontal flow, local Richardson number.

### 2.7 Organized Session in ICFD2017

An organized session closely related to the present project was held in ICFD 2018 with Prof. Yuji Hattori and Prof. Stefan G. Llewellyn Smith as co-organizers. The name of the session was Vortex Motion. There were 17 talks including four invited talks from Profs. Crowdy, Le Dizes, Delbende and Leweke.

### 2.8 Satellite meeting on Instability and Nonlinear Dynamics of Curved Vortices

A meeting of the present project was held just after ICFD as a satellite meeting in Matsushima from 10th to 11th of November, 2018. Six project members gave talks and discussed a future plan of the project.

### 3. Achievements

Vortical structures are important since they often determine the properties of incompressible flows. They are curved in general owing to self-induced velocity, interaction with other vortices and boundary conditions in the presence of rigid bodies. Therefore, by exploring the effects of curvature in vortex dynamics the present project would contribute not only to understanding the mechanisms of flow phenomena in a wide variety of areas but also to development of control method of these flows. In particular, it would be possible to stabilize or destabilize the wing-tip vortices generated by rotating wings by changing the geometry of the wing tips based on the instability mechanisms of curved vortices which have continuous vorticity distributions. Moreover, understanding nonlinear dynamics and transition to turbulence and thereby clarifying the turbulent structures near the wing tips and wakes are indispensable for improving the performance of the wings and reducing the aeroacoustic noises. The combined effects of curvature and density change are important in understanding and prediction of vortices in aeronautical, astrophysical and geophysical flows.

This year the numerical method established previously was used to explore the linear stability of helical vortices with continuous vorticity distribution and nonlinear evolution. Numerical simulation of a buoyant vortex ring was performed by the numerical method for contour dynamics taking account of buoyancy established last year. The project has achieved the goal.

### 4. Summaries and future plans

We have investigated the curvature instability of Gaussian vortex rings and helical vortices by DNS. The linear stability of vortex rings and helical vortices with continuous vorticity distribution has been investigated in detail using the numerical method developed in the project. It is shown that the curvature instability can be dominant for thin vortex rings, while the elliptic instability is dominant nearly for all values of the wavenumber when  $\varepsilon = 0.18$ . Nonlinear evolution of the disturbance on vortex rings and helical vortices with continuous vorticity distribution was also studied. The process leading to the breakdown of the vortex ring was clarified. The numerical method for contour dynamics taking account of buoyancy has revealed some important features of the motion of a buoyant vortex ring.

Application of the results obtained by the present project is planned. In particular, further study of helical vortices, which appear in the wake of wind rotors and helicopter rotors, will be performed in a General Collaborative Research Project (J19I075).

# 5. Research results (\* reprint included)

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- Stefan G. Llewellyn Smith, Ching Chang, Tianyi Chu, Mark Blyth, Yuji Hattori, and <u>Hayder Salman</u>: Generalized Contour Dynamics: A Review, *Regul. Chaotic Dyn.*, Vol. 23 (2018), pp. 507-518.
- [2] <u>Stefan G. Llewellyn Smith</u>, Yuji Hattori: Generation of bulk vorticity and current density in current-vortex sheet models, submitted to *J. Nonlinear Sci.*
- [3] Yuji Hattori, <u>Francisco J. Blanco-Rodriguez</u> and <u>Stephane Le Dizes</u>: Numerical Stability Analysis of a Vortex Ring with Swirl, submitted to *J. Fluid Mech.*
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- \*[4] Yuji Hattori, Makoto Hirota, <u>Stéphane Le Dizès</u>, <u>Thomas Leweke</u>, <u>Stefan, G.</u> <u>Llewellyn Smith</u>, <u>Ivan Delbende</u>, <u>Maurice Rossi</u>, <u>Yasuhide Fukumoto</u>: Instability and Nonlinear Dynamics of Curved Vortices, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2018), CRF-R4, pp. 190-191.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

国際連携公募共同研究	
課題番号	J18R005
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

## 配管減肉のモニタリングと予測に基づく配管システムのリスク管理 Piping sYstem, Risk management based on wAll thinning MonItoring and preDiction (PYRAMID)

高木 敏行\*†, Philippe Guy\*\*††, Christian Boller\*\*\*††, Bernd Valeske\*\*\*\*†† Bernard Normand\*\*††, Pierre Calmon\*\*\*\*\*†† \*東北大学流体科学研究所, \*\*INSA de Lyon, \*\*\*Saarland University \*\*\*\*IZFP, Fraunhofer Institute for NDT, \*\*\*\*CEA †申請者, ††所外対応研究者

## 1. 研究目的

事故を起こした原子力発電所においてデブリ切り出しに伴うデブリ粉塵あるいは金属粉を 含む固液二相流の原子炉冷却循環システムにおいては、腐食・潰食減肉現象が明らかになって おらず、かつ高放射線量率や障害物のため配管減肉の測定・修理も困難であることから、漏洩 リスクを低減する新しい手法が求められている.本研究では、デブリ粉塵を含む固液二相流に よる配管減肉モデルを実験とシミュレーションの両面から検討するとともに、過酷環境におい て信頼性の高い減肉速度の評価が可能な電磁超音波センサを用いたオンラインモニタリング とを併用することにより、配管系のリスク管理を可能とする新しい方法論を確立する.

#### 研究成果の内容

## (1) 固液混相流のモデルと減肉予測

a. 流動下電気化学実験

粉末状固体が混在した固液混相流における流路壁面での物質移動係数を実測した.実測され た物質移動係数を再現した条件下で,配管材料の腐食速度を評価する測定系の構築と改良を行っ た.物質移動係数の再現は,回転電極法を中心に検討した.水質パラメータについては,廃止措置 工程に応じて想定される水質を考慮して設定した.

粉末状固体としてガラスビーズを含む固液混相流における壁面での物質移動係数を実測した ところ、液単相流と比較して物質移動係数が上昇する結果が得られた.次に、回転電極法を用いて、炭 素鋼の腐食速度を電気化学的手法あるいは重量法により評価する測定系を構築した.デブリ取り出し工 程において冷却水の溶存酸素濃度が上昇する事を考慮し、曝気環境を設定した.そのため、溶 存酸素濃度モニタリングループを接続することで試験装置を改良した.

b. 固液混相流の流動評価(実験の実施)

水流動試験装置を用いて,試験部であるエルボ流入条件を PIV 計測による流れの可視化実験 により評価し,偏流等がないことを確認した.偏流等が有る場合にはエルボ上流の直円管長さ やその上流のタンク流入部の設計を見直し,必要であれば整流部を設ける等して対応した.

エルボ流入条件が達成された後に、粒子供給部の最適化を行った.最適化は、配管内粒子の 分散状態をその判断基準として行い、配管内に供給された粒子が偏りなく分散するように、供 給配管の径や供給口の形状等を変えて評価した.粒子供給は既存の定流量ポンプを用い、固体 微粒子としては、燃料デブリを広範囲に模擬するため、鉛や鉄、酸化鉄等を用い、その大きさは 数 µm~数 百 µm を予定した.種々の粒子に対して供給速度等をパラメータとし、PIV 計測で最 適な粒子濃度等の知見を取得した.

c. 固液混相流の流動評価(シミュレーションの実施)

固液混相流の計算モデルにより、電気化学実験または流動評価実験の条件を踏まえて、固体粒

子の条件として粒子径・密度・濃度,水(液体)の条件として流速・配管形状等のパラメータを設 定して流動計算を実施した.また,得られた計算結果より,固液混相流の詳細挙動の把握・固体 粒子の影響を検討した.さらに実験の結果と照合して,評価結果の妥当性や解釈の検討を行った.

固体粒子モデルによりエルボ部周りの固液混相流の流動解析を実施した.エルボ部における 偏流や剥離等の傾向が実験結果と定性的に一致することを確認した後に,固体粒子条件が流動 場や減肉事象の流動因子となる物質移動係数に与える影響を評価した.その結果,配管内の流 速分布や物質移動係数の挙動に対しては,粒子径が最も影響することが分かった.また,液相 レイノルズ数やストークス数などの無次元数により,固体粒子が物質移動係数に与える影響を 整理できる可能性がある.

#### (2) EMAT モニタリングシステムの開発

電磁超音波共鳴法を用いた評価信頼度付き減肉評価法を開発するために,信号処理法とプロ ーブの開発を行った.様々な減肉模擬試験片に対して得られた実験信号について,超音波伝播 数値解析結果と比較することにより,配管肉厚,減肉の形状などのパラメータに対する依存性を評価し, 整理した.収束ビーム型プローブを試作した.また,試作プローブがつくる音場を評価し,ビ ームが設計通りに収束していることを確認した.また,開発するシステムの適用性を調査する ため,福島第一原子力発電所において,適用を想定する箇所における環境に基づいて,プロー ブの耐放射線性,耐候性などについての文献調査を行った.また,パルサーレシーバーや信号 処理部などについては、想定される環境において適切な防護システムの検討を行った.

フランス側研究チームで開発した CIVA ソフトウェア EMAT モジュールを用いて,超音波伝播数 値解析を行い実験信号との比較を行い,シミュレーションの検証を行った.また,減肉模擬試験片 についての実験結果から,肉厚や粗さに関して計測誤差との関係を整理した.試作した収束ビ ーム型プローブの音場を,超音波可視化システムを用いて測定し、ビームの収束を確認した.

プローブを構成するケーブル、樹脂材料、永久磁石のそれぞれについて耐放射線性について文献調査 を行った.ケーブル、樹脂材料については、y線、中性子線、a線について特に問題がないことを 確認した.また、永久磁石については、Nd系磁石が放射線環境下で減磁することが判明したが、 SmCo系磁石を用いれば、耐放射線性の問題がないことを確認した.パルサーレシーバーや信号処 理部などについては、想定される環境において適切な防護システムの検討を行った.

開発するシステムの適用性を調査するため、福島第一原子力発電所において、適用を想定す る箇所における環境に基づいて、プローブの耐放射線性、耐候性などについて文献調査した. また、パルサーレシーバーや信号処理部などについては、想定される環境において適切な防護 システムを検討した.

#### (i)適用が想定される箇所とその環境

EMAT モニタリングシステムの適用箇所としては原子炉圧力容器・格納容器注水設備の配管 を想定する. EMAT モニタリングシステムに影響を及ぼす要因は,温度・湿度・放射線が予測 される.特に配管に取り付けられる EMAT プローブはそれらの影響を受けやすい.

想定する配管システムは、原子炉圧力容器底部温度を概ね 100 ℃未満に維持できる機能を 有するように設計され、配管温度は最大で 66 ℃に設定している.また、湿度は外気の流入な どにより変化が大きく、結露などによる金属部の錆による劣化が考えられる.原子炉格納容器 内の原子炉給水配管での放射線濃度は、通常約 25 Bq/cm<sup>3</sup> (PCV 内気体)、約 100 kBq/cm<sup>3</sup> (内 部流体)である.事故後の原子力発電所では、毎時数 Sv の空間もあるが、人が作業するために は被ばく線量を数mSv/day 以下になる場所に EMAT プローブを設置することが望ましいと考え る.

#### (ii) プローブの耐放射線性及と耐候性

EMAT プローブは電磁現象を活用したもので、同様のセンサープローブとして高温超電導 SQUID、渦電流プローブが挙げられる.これらのプローブの軽水炉環境における耐放射線性を 調べるためのガンマ線照射試験が実施されている<sup>[1]</sup>.放射線性、耐熱性、耐水性の観点から、 プローブの樹脂部品や導線の被覆等をポリイミド樹脂製のものに交換することが有効である ことが示されている<sup>[2]</sup>. これを受けて、フェライトコアと巻き線から構成される非線形渦電流 プローブ, FG センサ, MI センサを用いてホットセルにおける放射線環境下で測定試験がなさ れた<sup>[3]</sup>. 0.18 MGy, 0.36 MGy, 2 MGy, 10 MGy までのガンマ線照射環境において、ノイズレベ ルは材料の磁気特性評価に問題のないレベルであることが確認されている. ポリイミド樹脂は 200 ℃の高温での安定性も兼ね備えていることから、配管が 100 ℃となっても耐えることが できる.

これらの文献調査から, EMAT プローブを構成するコイル銅線の被覆及び樹脂部分にはポリ イミド樹脂を使用することが望ましい.

#### (iii) 永久磁石の耐放射線性と耐候性

EMAT プローブを構成する永久磁石には,主にサマリウムコバルト磁石(SmCo<sub>5</sub>, Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>など) とネオジウム磁石((Nd, Dy)15Fe77B8, Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, Nd-Fe-Bなど)が挙げられる.サマリウムコ バルト磁石は,錆などの腐食に強くまたキューリー点が高く 200 ℃程度で減磁が少ない.

ネオジウム磁石とサマリウムコバルト磁石の耐放射線に関する文献調査の結果を以下にま とめる.表1は放射線による減磁に関する論文リストである<sup>[4]</sup>.下記の調査結果から使用する 永久磁石はサマリウムコバルト磁石とすることが望ましい.

衣 I 放射隊による陝陸に長りる開入ノハト		
	ネオジウム磁石	サマリウムコバルト磁石
<b>γ</b> 線	[5-11]	[5, 6, 8-11]
プロトン	[12-19]	[16, 19, 20]
中性子	[7, 21-23]	[24]
電子線	[5, 8, 11, 25-33]	[5, 8, 11, 25, 27, 30]

表 1 放射線による減磁に関する論文リスト

#### γ線

Boockmanらは、(Nd, Dy)<sub>15</sub>Fe<sub>77</sub>B<sub>8</sub>, SmCo<sub>5</sub>, Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>焼結磁石に対して<sub>60</sub>Coからの  $\gamma$ 線照射実験を 行った.サンプルサイズは、 $\phi$ 10-12×3-3.5 mm<sup>3</sup>である.50 Mradの照射に対して磁化、保 磁力とも大きな変化はなかった[6].unaらは、<sub>60</sub>Coからの  $\gamma$ 線照射実験を行った.サンプル サイズは、 $\phi$ 12×8 mm<sup>3</sup>である.磁場変化は照射前後でホール素子ガウスメータにより計測 した.Nd2Fe14B 磁石に対して最大69 Mrad、また、Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>に対して最大1.4 Gradまで照射さ れたが残留磁束密度の消失は見られなかった[11].0kudaらは、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B磁石、Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>磁石に 対して<sub>60</sub>Coからの  $\gamma$ 線照射実験を行った.サンプルサイズは、 $\phi$ 10×2 mm<sup>3</sup>である.磁束変化 は、200回巻き空芯コイルで計測した.照射量280 Mradで、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B石の磁束変化は、0.5%以 下であった<sup>[5]</sup>.Aldermanらは、Nd-Fe-B 磁石に対して<sub>60</sub>Coからの  $\gamma$ 線照射実験を行った.サン プルサイズは、50×47.5×7 mm<sup>3</sup>で表面はニッケルコーティングしてある.磁束変化は、8イン チのヘルムホルツコイルで計測した.700 Mradの照射で誤差内である0.2%以上の変化は見ら れなかった<sup>[7]</sup>.Kawakuboらは、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B磁石に対して<sub>60</sub>Coからの  $\gamma$ 線照射実験を行った.2個の 磁石の間に、アクリルの両側に鉄板を付けたスペーサを挟みこんだサンプルを作成し、アクリ ル板中心に開けた穴にホール素子を挿入して磁場を計測した.1250 Mrad以上の照射で変化は 見られなかった<sup>[21]</sup>.

## 2 中性子

Costらは、Los AlamosのOmega West reactorでNd-Fe-B磁石に対し、中性子照射を行った. サンプルサイズは、2×2×7 mm<sup>3</sup>である.磁東密度は、500回巻きコイルで計測した.また、ヒ ステリシスループをvibrating magnetometerで計測した.153 ℃で速中性子フルエンス5.0×  $10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>、77 ℃で 6.1×10<sup>16</sup> n/cm<sup>2</sup> の照射を行い、153 ℃における減磁が大きいことを示し た.照射初期に大きな減磁が起こり、 $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>で77 ℃では5%、153℃では10%であった.ま た、製造メーカによる減磁量の差は、あまりなかった.照射後、再着磁すると磁東密度は元に 戻り、保磁力は20%増加した<sup>[22]</sup>.さらに、SmCo<sub>5</sub>磁石、Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>磁石に対して中性子照射を行っ た.サンプルサイズは、 $\phi$ 6.3×0.75 mm<sup>3</sup>である.速中性子フルエンスは、最大1×10<sup>15</sup> n/ cm<sup>2</sup> である.磁束密度をピックアップコイルとホール素子で計測した.5.5k0eの逆磁場中で75K, 198 K, 281 Kの温度で照射を行った.放射線減磁の温度依存性は大きくはないが,281 Kより 75 Kの方が減磁は大きかった.75 Kで逆磁場のある方が,逆磁場がない場合より減磁は大きか った.製造メーカにより減磁量に差が見られた<sup>[24]</sup>.

Brownと Costは,5社のNd-Fe-B磁石について中性子照射を行った.サンプルは1辺1.9 mm以下の角柱で,サンプルの長さと径の比 (L/D)を変えて製作した.77 ℃で速中性子フルエンス4×10<sup>12</sup> n/ cm<sup>2</sup>の照射を行った.異なる製造業社の磁石は,異なる放射線減磁割合となることを示した.また,磁石成分のNdをDyまたはTbで置換し,保磁力を大きくすることにより耐放射線減磁を向上させることができることを示した.L/D比の大きい磁石ほど耐放射線性があることを示した.磁石9個を列に並べて照射すると,中央に比べ両端が最も減磁し,位置の依存性を示した<sup>[23]</sup>.

Aldermanらは、Oak Ridge National Laboratoryにおいて1-2 MeVの速中性子照射を Nd-Fe-B サンプルに対し行った.サンプルサイズは、50×47.5×7 mm<sup>3</sup>で表面はニッケルコーティング してある.磁束変化は、8インチのヘルムホルツコイルで計測した.25 ℃で速中性子フルエン ス1.61×10<sup>14</sup> n/cm<sup>2</sup>の照射を行い10%以上の残留磁束密度の変化があった.

また,熱中性子に対して同様の実験を行ったが,フルエンス3×10<sup>12</sup> n/cm<sup>2</sup>の照射で有意な変化は見られなかった<sup>[7]</sup>.

Kawakuboらは、JAERI-Tokaiの FNS (Fast Neutron Source)において14 MeVの中性子照射を保 磁力の異なる Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B磁石に行った.2個の磁石の間に、アクリルの両側に鉄板を付けたスペ ーサを挟みこんだサンプルを作成し、アクリル板中心に開けた穴にホール素子を挿入して磁場 を計測した.フルエンス3.65×10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>の照射を行い最大36%の磁場変化があった<sup>[21]</sup>.

#### ③ プロトン

Blackmoreらは、TRIUMFのサイクロトロンを用いて500MeVのプロトン照射を行った.サンプ ルは、Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>、SmCo<sub>5</sub>、(SmPr)Co<sub>5</sub>、Nd-Fe-Bが用いられた.サンプルサイズは、12.5×12.5×25 mm<sup>3</sup>、NdFeBについては、12.5×12.5×0.5 mm<sup>3</sup>である.磁場は50回巻きコイルで計測した.SmCo 磁石の平均照射量は450 Mradである.いずれも減磁したがNd-Fe-Bは4 Mradで50%以上磁束を 消失した.放射線減磁には製造メーカ依存性がある.SmCo<sub>5</sub>は照射後、再着磁すると照射前よ りわずかに磁場が増えた.再着磁した磁石を再び照射すると初回より早い減磁を示した. Nd-Fe-Bは照射後、再着磁すると元の値に戻った<sup>[19]</sup>.

Kähkönenらは、Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B磁石に20 MeVのプロトン照射を行った.サンプルサイズは、7.1×7.1×1.0 mm<sup>3</sup>である.Helmholz coil及びinduction coilにより磁場を計測した.照射量800 Mrad において、300 Kで照射した磁石に比べ、15 Kでの照射の方が1000倍放射線に対して強かった<sup>[12]</sup>.alvitieらによると照射前後でのヒステリシスカーブについて大きな差はなかった.また、ポジトロン寿命測定においてvacancyの集中は観測されなかった<sup>[15]</sup>.

さらに、20 MeVのプロトン照射をNd-Fe-B磁石に対して行った.サンプルサイズは、7.1×7.1×1 mm<sup>3</sup>及び 1×1×1 mm<sup>3</sup>である. 照射温度15 K-300 Kの間で温度と減磁量との間に依存性があった. 1000 Mradの照射で立方体のサンプルで磁化方向と照射方向が平行なものは70%、垂直なものは30%の磁束密度の消失があった. 磁石形状による依存性が見られた<sup>[14]</sup>.

さらに、Nd-Fe-B磁石に対して14, 16, 18, 20 MeVのプロトン照射を行った. サンプルサイズは、 $7.1 \times 7.1 \times 0.5 \text{ mm}^3$ である. 照射量 $1.63 \times 10^{13}$  protonsにおいて、順方向の外部磁場下で照射した磁石のほうが逆磁場下のものより減磁量が小さくなる線形の関係があった. 14-20 MeVの範囲で減磁量とプロトンのエネルギー依存性は、あまり見られなかった<sup>[13]</sup>.

Itoらは、200 MeVのプロトン照射を行った.20 Mradまでの照射でNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bは大きく減磁した がSm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>は変化がなかった.パーミアンス係数と保磁力が増加すると耐放射線性も増加した<sup>[17]</sup>. 照射後、再着磁するとほぼもとの強さに戻った<sup>[17]</sup>.また保磁力にも変化がなかった.再着磁 したサンプルを照射すると元と同じ放射線減磁を示した<sup>[18]</sup>.

#### ④ 電子線 (Bremsstrahlung)

Lunaらは, Lawrence Livermore National Laboratoryのライナックを使用して電子線照射を 行った. サンプルサイズは, φ12×8 mm<sup>3</sup>である. 82 MeVの電子線の磁石への直接照射, 照射量36 kradでNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B磁石は1.5%の変化が見られ たが, Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>磁石については変化が見られなかった.

85 MeVの電子線を2.5 mmへビーメタル+8 mm銅のターゲットへ打ち込み制動輻射 (Bremsstrahlung)を発生させた.最大2.5 Gradまでの照射に対して, Pr15Fe<sub>79</sub>B<sub>6</sub> > Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B > Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>の順に磁束密度の消失は大きかった.ただし,Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>については変化が見られなかった. 2種類のNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>Bについては大きな減磁量の差があったが,製造メーカが異なるためであると考 えられる<sup>[11]</sup>.

Colompらは、ESRF (European Synchrotron Radiation Facility)の線形加速器を用いて180 MeVの電子線照射を行った.サンプルサイズは、 $11 \times 11 \times 2 \text{ mm}^3$ である.列に並べたNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>, SmCo<sub>5</sub>に照射量70 Mradまで照射したが同じ磁石であっても列の場所により変化量は異なった.サマリウム磁石に比ベネオジウム磁石は大きく減磁した.残留磁束密度が大きく、保磁力が小さな磁石ほど大きな減磁を示した<sup>[26]</sup>.

0kudaらは、Osaka UniversityのISIR (The Institute of Science and Industrial Research) のL-bandライナックを用いて17 MeVの電子線を水流中の磁石に照射した.サンプルサイズは 10×2 mm<sup>3</sup>である.磁束変化は200回巻き空芯コイルで計測した.照射量2.1×10<sup>-3</sup> C/cm<sup>2</sup>でNd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 磁石は9%、1.4×10<sup>-3</sup> C/cm<sup>2</sup>でSm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>磁石は0.4%以下の磁束の消失であった.放射性減磁した サンプルは、再着時するとほぼもとの磁束に戻った<sup>[5]</sup>.

Ikedaらは,上記の実験に引き続き17 MeVの電子線照射実験を行った.照射量は2.1×10<sup>-3</sup> C/cm<sup>2</sup>である.照射量とともにNd-Fe-B磁石の磁束の消失は増加した.Sm-Co磁石については照射量1.4×10<sup>-3</sup> C/cm<sup>2</sup>までで変化が見られなかった<sup>[8]</sup>.

#### (iv) 装置の防護

本研究で検討しているシステムの装置は、パルサーレシーバー、プリアンプ内蔵プローブ切 替機、FFT変換装置及びノートパソコンである.これらの装置は、低放射線量の低い温湿度の 安定した空間に設置することが望ましい.EMATプローブから装置までの距離が20 m以下の場所 であれば、ノイズと受信信号の減衰の影響はすくない.ただし、プリアンプ内蔵プローブ切替 機はEMATプローブから2 m以内に置き受信信号を増幅し切替機の配線の本数を減らすことが望 ましい.温湿度の影響の大きい環境においては、収納庫を用意して断熱材で被い、また調湿剤 などにより温湿度を管理することが望ましい.

## 参考文献

- [1] 荒克之,永石竜起,糸崎秀夫,森田洋右,高温超電導SQUIDのガンマ線照射試験 (Gamma-ray irradiation tests of High-Tc SQUIDs,日本応用磁気学会,26巻,(2002),pp. 530-534.
- [2] 貴家恒男, 早川直宏, 吉田健三, 芳香族系耐熱性ポリマーの電子線照射効果(Electron beam irradiation effect of aromatic polyimide), JAERI-M83-064, 日本原子力研究所, 1983 年 4月.
- [3] 文部科学省原子力システム研究開発事業「超臨界圧水冷却高速炉の炉内構造劣化予兆診断 技術の開発」Development of non-destructive inspection method to predict degradation on internal structural materials in super critical water reactor, 平成 18 年度成果報告書.
- [4] 備前輝彦,北村秀男,挿入光源用永久磁石の放射線減磁について、日本放射光学会、Journal of JSSRR, 2004, Vol.17, No.2, pp.53-58, Japan.
   [5] Okuda, S., K. Ohashi and N. Kobayashi, Effects of electron-beam and γ-ray irradiation
- [5] Okuda, S., K. Ohashi and N. Kobayashi, Effects of electron-beam and  $\gamma$ -ray irradiation on the magnetic flux of Nd-Fe-B and Sm-Co permanent magnets. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 1994. 94: p. 227-230.
- [6] Boockmann, K., M. Liehr, W. Rodewald, E. Salzborn, M. Schlapp and B. Wall, Effect of  $\gamma$  -radiation on Sm-Co- and Nd-Dy-Fe-B-magnets. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1991. 101: pp. 345-346.
- [7] Alderman, J., P.K. Job, R.C. Martin, C.M. Simmons and G.D. Owen, Measurement of radiation-induced demagnetization of Nd-Fe-B permanent magnets. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002. 481: pp. 9-28.
- [8] Ikeda, T. and S. Okuda, Magnetic flux loss of the permanent magnets used for the wigglers of FELs by the irradiation with high-energy electrons or X-rays. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1998. 407: pp. 439-442.
- Instruments and Methods in Physics Research A, 1998. 407: pp. 439-442.
  [9] Zeller, A.F. and J.A. Nolen, Radiation and Temperature Effects on Sm-Co and NdFeB Magnets in Low Permeance Configurations. 9th International Workshop on Rare-Earth

Magnets and their Applications, 1987.

- [10] Zeller, A.F. Radiation Damage Mechanisms in NdFeB. in The Eleventh International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications. 1990. Pittsburg, PA: Carnegie Mellon University, Pittsburg, PA 15213, USA. p. W6.2.
- [11] Luna, H.B. and X.K. Maruyama, Bremsstrahlung Radiation Effects in Rare Earth Parmanent Magnets. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1989. A285: pp. 349-354.
- [12] Kähkönen, O.-P., S. Mäkinen, M. Talvitie, H. Rajainmäki and M. Manninen, Temperature Dependence of Irradiaton-Induced Magnetic Flux Loss in Nd2Fe14B Permanent Magnets. Europhysics Letters, 1990. 12(5): pp. 413-416.
- [13] Kähkönen, O.-P., M. Talvitie, E. Kautto and M. Manninen, Effects of proton and irradiations on permanent magnets. Physical Review B, 1994. 49(9): pp. 6052-6057.
- [14] Kähkönen, O.P., S. Mäkinen, M. Talvitie and M. Manninen, Radiation damage in Nd-Fe-B magnets: temperature and shape effects. Journal of Physics. Condensed matter, 1992. 4: pp. 1007-1014.
- [15] Talvitie, M., O.-P. Kähkönen, S. Mäkinen, H. Rajainmäki, M. Manninen and V. Lindross, Magnetic flux loss in Nd-Fe-B magnets irradiated with 20 MeV protons. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1991. 102: pp. 323-330.
- [16] Ito, Y., K. Yasuda, R. Ishigami, S. Hatori, O. Okada, K. Ohashi and S. Tanaka, Magnetic flux loss in rare-earth magnets irradiated with 200 MeV protons. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2001. 183: pp. 323-328.
  [17] Ito, Y., K. Yasuda, R. Ishigami, M. Sasae, S. Hatori, K. Ohashi, S. Tanaka and A.
- Yamamoto, Radiation damage of materials due to high-energy ion irradiation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2002. 191: pp. 530-535.
- [18] Ito, Y., K. Yasuda, M. Sasae, R. Ishigami, S. Hatori, K. Ohashi and S. Tanaka, Radiation effects of 200 MeV proton beams on Nd-Fe-B magnets. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2003. 209: pp. 362-366.
  [19] Blackmore, E. W., Radiation Effects of Protons on Samarium-Cobalt Permanent Magnetic UPER Transformer Physics Protons on Samarium-Cobalt Permanent
- Magnets. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1985. NS-32 (No. 5): pp. 3669-3671.
- [20] Coninckx, F., W. Naegele, M. Reinharz, H. Schoenbacher and P. Seraphin, Radiation Effects on Rare-Earth Cobalt Permanent Magnets. 1983, European Organization for Nuclear Research.
- [21] Kawakubo, T., E. Nakamura, M. Numajiri, M. Aoki, T. Hisamura and E. Sugiyama. Permanent magnet generating high and variable septum magnetic field and its deterioration by radiation. in 9th European Particle Accelerator Conference. 2004. Lucerne, Switzerland. pp. 1696-1698.
- [22] Cost, J.R., R.D. Brown, A.L. Giorgi and J.T. Stanley, Effects of Neutron Irradiation on Nd-Fe-B Magnetic Properties. IEEE Transactions on Magnetics, 1988. 24(3): pp. 2016-2019.
- [23] Brown, R.D. and J.R. Cost, Radiation-Induced Changes in Magnetic Properties of Nd-Fe-B Permanent Magnets. IEEE Transactions on magnetics, 1989. 25(No.4).
- [24] Cost, J.R. and R.D. Brown, Sm-Co Permanent Magnets: Effects of Fast Neutron Irradiation. Metallurgical and Materials Transactions A, 1990. 21(Number 7): pp. 1817-1821.
- [25] Colomp, P., T. Oddolaye and P. Elleaume, Demagnetization of Permanent Magnets to 180 MeV Electron Beam. ESRF Technical Report, 1993. ESRF/MACH-ID/93-09.
- [26] Bizen, T., Y. Asano, X.-M. Maréchal and H. Kitamura. Idea of Mechanism and Protection of Radiation Damage on Undulator Permanent Magnet. in Proceedings of the ninth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation. 2007. Daegu, Korea: American Institute of Physics. pp. 420-423. [27] Bizen, T., T. Tanaka, Y. Asano, D.E. Kim, J.S. Bak, H.S. Lee and H. Kitamura,
- Demagnetization of undulator magnets irradiated high energy electrons. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2001. 467-468: pp. 185-189.
- [28] Bizen, T., X. Maréchal, T. Seike, H. Kitamura, T. Hara, T. Tanaka, Y. Asano, D.E. Kim and H.S. Lee. Radiation Damage in Magnets for Undulator at Low Temperature. in Proceedings of the ninth European Particle Accelerator Conference. 2004. Lucerne, Switzerland. pp. 2089-2091.
- [29] Bizen, T., Y. Asano, X.-M. Maréchal, T. Seike, T. Aoki, K. Fukami, N. Hosoda, H. Yonehara, T. Takagi, T. Hara, T. Tanaka and H. Kitamura, High-energy electron irradiation of NdFeB permanent magnets: Dependence of radiation damage on the electron energy. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007. 574: pp.401-406.
- [30] Bizen, T., Y. Asano, T. Hara, X. Maréchal, T. Seike, T. Tanaka, H.S. Lee, D.E. Kim, C.W. Chung and H. Kitamura, Baking effect for NdFeB magnets against demagnetization induced by high-energy electrons. Nuclear Instruments and Methods in Physics

Research A, 2003. 515: pp. 850-852

- [31] Bizen, T., Y. Asano, T. Hara, X. Maréchal, T. Seike, T. Tanaka, H. Kitamura, H.S. Lee, D.E. Kim and C.W. Chung. Introduction of the high radiation resistance of undulator magnet. in Proceedings of the Eighth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation. 2003. San Francisco: American Institute of Physics. pp.167-170.
- [32] Bizen, T., X. M. Maréchal, T. Seike, H. Kitamura, T. Hara, T. Tanaka, Y.Asano, D.E. Kim and H.S. Lee, Radiation damage in permanent magnets for ID. Radiation Measurement, 2007. 41: pp. S260-S264.
- [33] Bizen, T., Y. Asano, T. Hara, X. Maréchal, T. Seike, T. Tanaka, H. Kitamura, H.S. Lee, D.E. Kim and C.W. Chung. Improvement of radiation resistance of NdFeB magnets by thermal treatment. in Proceedings of the Eighth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation. 2003. San Francisco: American Institute of Physics. pp. 171-174.
- (3) リスク評価

診断手法の評価誤差及び不確定要素による進行速度の不確実性を考慮したベイズ推定に よる確率的損傷進行速度評価を用いた将来の損傷状態の確率的評価法の構築を行った.対象 構造では,通常の構造を対象とする場合に比べ誤差が大きく,また損傷進行速度の不確実性が 大きくなると想定される.そのため,用いる各誤差の確率分布は本委託業務にて実施する減肉 評価を参考に検討した.進行予測にはベイズ推定にて進展速度候補の確信度を評価する手法を 用いた.また,構築した将来の損傷状態の確率的評価法により,将来の工学的リスクを評価す る手法の検討を行った.構築したシステムでは,複数点の計測時期の異なる計測結果をデータとし たベイズ推定により,将来の配管内面の減肉量を予測,そこから破損確率及びリスクの評価を行う. 計測手法は EMATを想定し, EMAT計測誤差を考慮した減肉進行を想定したシミュレーションから,構 築システムの有効性を明らかとした.さらに計測誤差が拡大・縮小した場合の影響を検討した. また同シミュレーションから, EMAT計測点数,計測誤差の破損確率へ与える影響を明かとした.

#### 3. 研究目標の達成状況

本研究では国際共同研究により,デブリ取り出し工程で発生する可能性のある固液混相流 下での配管減肉モデルを実験とシミュレーションの両面から検討するとともに,過酷環境に おいて信頼性の高い減肉速度の評価が可能な電磁超音波センサを用いたオンラインモニタ リングを併用することにより,配管系のリスク管理を可能とする新しい方法論について検討 した.

配管システムにおける腐食・潰食モードと減肉速度は、機構論的モデルに立脚したシミュ レーションと物質移動係数を制御した電気化学実験を組み合わせて評価した.さらに、配管 減肉を常時監視するための電磁超音波センサネットワークを設計、開発した.減肉評価方法 の信頼性を向上させるために、検出確率と減肉評価性能を評価し、改良を行った.改良点も 含めて、ほぼ目標を達成したと考えられている.

## 4. まとめと今後の課題

本研究は本公募共同研究に加え,文部科学省の英知を編集した原子力科学技術・人材育成 推進及びフランスのANRの支援により実施した.国内の専門家を招聘し,本研究課題の計画 と方法について意見を交換した.フランス側研究組織との研究打合せを行い,具体的な研究 実施項目の調整を行うとともに,研究進捗状況について情報を共有した.

- 研究成果(\*は別刷あり)
- 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] 手塚晃世,孫宏君,浦山良一,内一哲哉,高木敏行:配管減肉測定の高度化を目指した焦点型電磁超音波探触子の開発,日本保全学会第15回学術講演会,福岡,2018.7.11,

(2018), pp. 275-276.

- [2] A. Tezuka, H. Sun, R. Urayama, T. Uchimoto, T. Takagi : Development of thickness gauging method for pipe wall thinning inspection with Point Focusing EMAT, *The* 23rd International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Detroit, Michigan, USA, 2018.9.11, (2018), SP-1954.
- [3] <u>Christophe Reboud</u>, Sylvain Chatillon, <u>Pierre Calmon</u>, Philippe Guy, Tetsuya Uchimoto and Toshiyuki Takagi : Advanced simulation tools for nondestructive assessment of corrosion affecting steel pipes, *The 4th International Conference on Maintenance Science and Technology (The 4th ICMST Tohoku 2018)*, Sendai, 2018.10.23, (2018), 2-2.
- [4] <u>H. Nakamoto, P. Guy</u> and T. Takagi : Corrosion Induced Roughness Characterization by Ultrasonic Attenuation Measurement, *The 4th International Conference on Maintenance Science and Technology (The 4th ICMST Tohoku 2018)*, Sendai, 2018.10.23, (2018), 2-3.
- [5] Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, <u>Yutaka Watanabe</u>, Hiroshi Abe, Shinji Ebara, Atsushi Iwasaki, Ryo Morita, Shun Watanabe, Ryoichi Urayama, Hongjun Sun, Takayuki Aoki : Piping system, risk management based on wall thinning monitoring and prediction, *The 4th International Conference on Maintenance Science and Technology (The 4th ICMST Tohoku 2018)*, Sendai, 2018.10.23, (2018), I-2.
- [6] 高木敏行:保全の最適化を目指した電磁非破壊評価技術に関する国際共同研究,第十 二回東北原子カシンポジウム,青森県上北郡六ヶ所村,2018.10.30,(2018).
- [7] Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Yutaka Watanabe, <u>Philippe Guy</u>, <u>Christophe Reboud</u>, <u>Pierre Calmon</u>, <u>Nicolas Mary</u>, <u>Christian Boller</u>: International Joint Project for Risk Management of Piping Systems Based on Monitoring and Predicting Wall Thinning during Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS17-2/CRF-R6, pp. 842-843.
- [8] A. Tezuka, H. Sun, R. Urayama, T. Uchimoto, T. Takagi : Development of Point Focusing Electromagnetic Acoustic Transducer Aiming at the Local Pipe Wall Thinning Measurement, *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS18-87, pp. 1028-1029.
- [9] 高木敏行,<u>渡邉豊</u>,内一哲哉,<u>Philippe\_Guy</u>,<u>Christophe\_Reboud</u>:配管減肉のモニ タリングと予測,原子力学会 2019 年春の学会,茨城県水戸市,2019.3.21,(2019), 2L04.
- [10] T. Takagi, <u>P. Guy</u>: Piping system, risk management based on wall thinning monitoring and prediction, *ELyT Workshop 2019*, 大崎市, 2019.3.11, (2019).
- [11] <u>P. Guy</u>, <u>B. Normand</u>, <u>H. Nakamoto</u>, et al. : Recent advances in PYRAMID project: EMAT experimental results for corrosion characterization, *ElyT Workshop 2019*, 大崎市, 2019.3.11, (2019).
- [12] <u>P. Calmon, C. Reboud, E. Demaldent</u>: Advanced simulation tools for nondestructive assessment of corrosion affecting steel pipes, *ELyT Workshop 2019*, 大崎市, 2019.3.11, (2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

(特許)

(受賞)

- [1] 最優秀賞,配管減肉測定の高度化を目指した焦点型電磁超音波探触子の開発,手塚晃世, 孫宏君,浦山良一,内一哲哉,高木敏行,2018.7.11,日本保全学会.
- [2] Best Poster Award 1st place, Development of thickness gauging method for pipe wall thinning inspection with Point Focusing EMAT, Akitoshi Tezuka, Hongjun Sun, Ryoichi Urayama, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, 2018.9.11, The 23rd International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation.

<sup>(</sup>マスコミ発表) なし

International multiple collaborative research		
Project code	J18R006	
Subject area	Environment and energy	
Research period	April 2018 ~ March 2019	
Project status	1st year (progressing)	

## Modeling of Mixing of Plasma Species in Atmospheric-Pressure Argon-Steam Arc Discharge

Jiří Jeništa\*†, Hidemasa Takana\*\*††, Hideya Nishiyama\*\*, Milan Hrabovský\*, Shiu-wu Chau\*\*\*, Anthony B. Murphy\*\*\*\*††

> \*Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i., Czech Republic \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan \*\*\*National Taiwan University, Taiwan \*\*\*CSIRO Materials Science and Engineering, Australia †Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Numerical simulation of inhomogeneous mixing of plasma species in the hybrid-stabilized argon-steam electric arc for broad range of operational parameters. Comparison of the calculated results with our former calculations and available experiments.

2. Details of program implement

Further elaboration of the existing numerical code and its necessary testing for currents higher than 400 A. Investigation of the influence of the upstream argon mass fraction boundary condition on the plasma characteristics, double-peak radial velocity profiles in the downstream plasma region, and behavior of plasma plume.

3. Achievements



Figure 1. Radial profiles of dominant plasma species for 150 and 500 A and 32.5 slm of argon at the nozzle exit (slm = standard liters per minute).



Figure 2. Argon mole fraction contours for 150-600 A and 27.5 slm of argon. Contour increment is 0.05.



Figure 3. Temperature and enthalpy contours for 150 and 600 A and 27.5 slm of argon. Steam mass flow rates are 0.111 g·s<sup>-1</sup> (150 A) and 0.363 g·s<sup>-1</sup> (600 A). Contour increments are 1 000 K for temperature and  $1.6 \cdot 10^7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  (150 A) and  $2 \cdot 10^7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  (600 A) for enthalpy.



Figure 4. The combined temperature and ordinary diffusion coefficients  $\overline{D_{AB}^T}$  and  $\overline{D_{AB}^X}$  for 150 and 600 A and 27.5 slm of argon.

## 4. Summaries and future plans

Mixing of plasma species in argon-steam arc discharge with the combined stabilization of arc by gas and water vortex has been studied in this research. The principal results can be summarized as follows:

(a) Mixing of water and argon plasma species is inhomogeneous under all the studied conditions (150-600A, 15-40 slm of argon). Argon species are dominant in the central regions of the arc, water ones in arc fringes. The maximum amount of argon mole fraction at the outlet reaches up to 0.4.

(b) The results show a principal qualitative difference between lower and higher currents for argon mole fraction, mass flux of argon species and enthalpy within the discharge. It was numerically clarified that argon and steam must be premixed to some extent at the inlet region of the vortex-stabilized arc section in order to obtain a relevant agreement with available experiments. A model function for the inlet argon mass fraction profile has been found providing the best fit between simulation and experiments for currents higher or equal to 400A. A double-peak in the radial velocity profile under some operational conditions occurs due to a steeper radial gradient of argon species towards the discharge axis.

(c) All the combined diffusion coefficients exhibit highly nonlinear distributions of their values within the discharge, depending on temperature, pressure, and argon mass fraction in the plasma. Values of the combined diffusion coefficients are higher for temperatures below 15 kK.

(d) Reabsorption of radiation in the discharge is higher for low currents due to thicker low-temperature arc fringes. The dependence of amount of reabsorption on argon mass fraction for a given current is insignificant.

(e) The dominant chemical species in the discharge at the exit nozzle are the atoms and ions of hydrogen, oxygen, argon, and the OH molecule.

(f) Comparison with our former calculations based on the homogeneous mixing assumption showed the following facts:

• There is a difference in temperature distribution: Below 350 A the arc is slightly squeezed with higher temperatures at the axis and arc fringes are thicker, i.e. the regions with low temperatures are wider. For higher currents the opposite is true.

- The mixing model provides higher reabsorption of radiation at low currents (below ~350 A), and slightly lower at high currents.
- Enthalpy shows a qualitatively different distribution with maximum values shifted from the arc axis for currents higher than 400 A.
- Velocity at the outlet region does not exhibit a simple dependence, it can be higher or lower, depending on the conditions. The principle difference is appearance of a double-peak in the radial velocity profile for 500 and 600 A, but only for some argon mass flow rates, as a result of high radial gradient of the argon mass fraction towards the discharge axis. The Mach number is lower (higher) below (above) 300 A.

(g) Comparison with our former experiments was presented for the radial temperature and velocity profiles 2 mm downstream of the exit nozzle for 400-600 A. It shows very good qualitative and quantitative agreements for temperature with the maximum difference of about 1-2 kK. Velocity profiles calculated using the combination of experimental and calculated data (the so called "integrated approach") provide much better comparison than those obtained from the original experiment, with nearly overlapping peak velocity values but still larger differences in arc fringes. Calculations carried out under the assumption of zero premixing of species in the upstream discharge region for currents higher than 400 A provide the velocity profiles far from experimental values.

(h) The results of the present simulation elucidated our better understanding of mixing and diffusion of argon-oxygen-hydrogen species in atmospheric pressure plasmas under extreme radial temperature and mass density gradients. The validity of the obtained results can be generalized and adopted to other highly-radiating arc plasmas, especially to those using argon-oxygen and argon-hydrogen mixtures in a configuration with externally positioned anode when the plasma jet flows in the direction parallel to the anode surface.

(i) A paper to The European Physical Journal D (EPJ D) with the latest achievements is currently under preparation.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation, etc.
- \*[1] <u>J. Jeništa</u>, H. Takana, H. Nishiyama, <u>M. Bartlová</u>, <u>V. Aubrecht</u>, <u>A. B. Murphy</u> : Modeling of inhomogeneous plasma-species mixing in atmospheric-pressure argon-steam arc discharge for broad range of currents and argon mass flow rates, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-R2, pp. 126-127.
- [2] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, <u>M. Bartlová</u>, <u>V. Aubrecht</u>, <u>A. B. Murphy</u>: Modelling of diffusion of plasma species in argon-steam arc discharge for subsonic to supersonic flow regimes, *Proceedings of the 15th International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, (2018), USB Flash Disc, OS5-13, pp. 508-509.
- [3] J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, <u>M. Bartlová, V. Aubrecht, A. B. Murphy</u>: Modelling of plasma-species mixing in argon-steam arc discharge for broad range of currents and argon mass flow rates, 7th International Conference on Microelectronics and Plasma Technology (ICMAP 2018), Incheon, Korea, July 24-28, (2018).
- [4] J. Jeništa: Experimental and numerical research of plasma gas decomposition and gasification at IPP, 7th International Conference on Advanced Plasma Technologies (ICAPT-7), Hue, Vietnam, February 24 - March 1, (2019).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

# 2. 研究成果報告書 <重点公募共同研究>

Project code	J18J001
Classification	Priority collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility of humans and materials
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	2nd year

Multiscale Flow and Interfacial Transport Phenomena at Phase and Material Boundaries

Shigeru Obayashi<sup>1</sup>, Seiji Samukawa<sup>1</sup>, Toshiyuki Takagi<sup>1</sup>, Hirofumi Wada<sup>2</sup>, Yutaka Watanabe<sup>3</sup> Mitsuo Hashimoto<sup>1</sup>, Takashi Iijima<sup>4</sup>, Philippe Guy<sup>5</sup>, Lalita Udpa<sup>6</sup>, Yuji Hattori<sup>1</sup>, Hiroki Nagai<sup>1</sup> Koji Shimoyama<sup>1</sup>, Makoto Hirota<sup>1</sup>, Aiko Yakeno<sup>1</sup>, Gota Kikugawa<sup>1</sup>, Atsuki Komiya<sup>1</sup> Takeru Okada<sup>1</sup>, Jun Ishimoto<sup>1</sup>, Tetsuya Uchimoto<sup>1</sup>, Hiroyuki Kosukegawa<sup>1</sup>, Taku Ohara<sup>1</sup><sup>†</sup>

<sup>1</sup>Institute of Fluid Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University, <sup>3</sup>Graduate School of Engineering, Tohoku University, <sup>4</sup>Natioinal Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>5</sup>Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA de Lyon, <sup>6</sup>College of Engineering, Michigan State University, <sup>†</sup>Applicant

## 1. Purpose of the project

Boundaries between materials or phases are of critical importance in fluid science and technology. Various interfacial and boundary phenomena, such as boundary layer flow, electro- kinetics and mass transport, are analyzed here and the multiscale mechanisms are clarified. Some important applications, aircraft drag reduction by laminarized wing, electricity generation from flowing water-graphene interface for energy harvesting, and characterization of phase transition at hydrogen-metal material interfaces related to hydrogen energy equipment are studied.

## 2. Details of program implement

## 2.1 Aircraft drag reduction by laminarized wing

The optimal design of an aircraft is expected to achieve an extremely low viscous drag from the surrounding flow. About a half of the total drag of an aircraft is due to the air's friction, which is dramatically increased by the laminar-to-turbulent transition of boundary layer. Our goal is to propose a feasible method of delaying the transition and reducing viscous drag especially on the main swept wings, by utilizing the super high-performance computer of IFS. In this project, a direct numerical simulation (DNS) is performed by Tohoku University in collaboration with linear and nonlinear stability analysis by JAXA and practical advises by Mitsubishi Heavy Industry Co., LTD.

By using an immersed boundary method, arbitrary shapes of micron-size roughness on a wing are modeled in our DNS code and we have evaluated how much they can suppress the crossflow instability which is the main trigger of the transition. By optimizing the roughness shape, we found a new sinusoidal roughness shape that can delay the transition much more efficiently than the conventional discrete roughness elements (DRE). Recent surface processing technology would be possible to manufacture it on the real aircraft's wing.

## 2.2 Electricity generation from flowing water and graphene interface

Energy harvesting from the environment has been a topic of interest in recent years. Liquid-flow-induced generation of electricity adds to the portfolio of energy harvesting system. Ocean wave, waterfalls, and rain are abundant source of energy, showing potential for developing a novel electricity system. Electricity generation from the interface between graphene and flowing water has reported, however, the mechanisms are still not deterministic. Here, the effect of the surface condition of graphene on flow-induced electricity generation is demonstrated by heteroatom doping using neutral bean system, which tunes the wettability of the graphene surface in addition to modulating the electronic state including the surface potential.

The electricity generation from flowing water and graphene was demonstrated using single water droplet. The voltage generation by the droplet motion on graphene was observed. The generated voltage from pristine graphene (non-doped) was 0.08 V. In comparison, a high voltage of over 0.23 V, which is three times higher, was observed with the nitrogen-doped graphene. This surprising result can be explained by surface charge and hydrophilicity of the graphene, which is tuned by nitrogen doping without forming defect.

We found the doped-nitrogen plays a strong role in higher voltage generation. Our approach has

potential to realize novel electricity system in energy harvesting.

2.3 Characterization of phase transition at hydrogen-metal material interfaces

For austenitic stainless steels that are used for structural materials of components in hydrogen stations, hydrogen embrittlement (HE) is one of key issues for design and maintenance of hydrogen stations. So far, detailed mechanism of HE of austenitic stainless steels is not fully understood in view of phase transition.

In this study eddy current testing (ECT) is applied to evaluate the phase transition of hydrogen charged austenitic stainless steels and the effect of phase transition on hydrogen embrittlement is discussed.

Each specimen made of type 304 austenitic stainless steel was put in a high-pressure hydrogen container for 336 hours that was kept at a temperature of 300 °C and a pressure of 100 MPa. Next, a tensile test with the strain rate of  $5.0 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup> was performed. The hydrogen charged specimen was ruptured at the strain of 25% which is less than half of the uncharged material due to HE.

Eddy current testing was carried out and the relative permeability was estimated. In both cases with and without hydrogen charged, the amount of  $\alpha'$  phase increases with the increase of plastic strain. Focusing on the signals of 0% strain specimens, relative permeability is increased by hydrogen charging, which indicates that magnetic phase appears by hydrogen charging. Phase analysis by EBSD confirmed that increase of relative permeability is due to the martensite formation both for with and without hydrogen charged specimens.

#### 3. Achievements

The study is in progress as has been planned.

4. Summaries and future plans

Three subjects studied here covers a wide range of scale and physical mechanisms specific to interfaces and boundaries. Through this study, in-depth understanding of the mechanism will be derived which leads to novel technologies in the near future.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- \*[1] T. Okada, <u>G. Kalita, M. Tanemura, I. Yamashita, M. Meyyappan</u>, and S. Samukawa: Role of doped nitrogen in graphene for flow-induced power generation, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 20, (2018), 1800387 (6 pages).

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

- [2] H. Yamamoto, T. Uchimoto, T. Takagi, <u>H. Enoki</u>, and <u>T. Iijima</u>: Characterization of phase transition of hydrogen charged austenitic stainless steels under tensile test condition using eddy current testing, *15th Int. Conf. Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS18-90, pp. 1034-1035.
- [3] M. Hirota and Y. Hattori: Suppression mechanism of crossflow vortices in a three-dimensional boundary layer by triggering less unstable modes, *Proc. of the 15th Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS15-8, pp. 818-819.
- [4] T. Hayashida, M. Hirota and Y. Hattori: Suppression of instability in boundary layer on swept wing by DRE, *Proc. 15th Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS15-7, pp. 816-817.
- [5] A. Yakeno and M. Hirota: Three-dimensional global stability on Stuart vortex of free shear layer, *iTi conference on turbulence*, Bertinolo, Italy, (2018).
- [6] 廣田, <u>井手</u>, 林田, 服部: 第56回飛行機シンポジウム, (2018).
- [7] 廣田, 井手, 林田, 服部: 第32回数値流体力学シンポジウム, (2018).
- [8] 山本, 内一, 高木, <u>榎</u>, <u>飯島</u>: 日本機械学会東北支部第54期総会・講演会, (2019).
- [9] 徳田, 内一, 高木, 榎, 飯島:日本非破壊検査協会第22回表面探傷シンポジウム, (2019).
- [10] 廣田, 井手, 服部: 第64回「乱流遷移の解明と制御」研究会, (2019).
- \*[11] S. Obayashi, S. Samukawa, T. Takagi, <u>H. Wada, Y. Watanabe</u>, M. Hashimoto, <u>T. Iijima, P. Guy</u>, <u>L. Udpa</u>, Y. Hattori, H. Nagai, K. Shimoyama, M. Hirota, A. Yakeno, G. Kikugawa, A. Komiya, T. Okada, J. Ishimoto, T. Uchimoto, and H. Kosukegawa: Multiscale Flow and Interfacial Transport Phenomena at Phase and Material Boundaries, *Proc. of the 18th Int. Symp. on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-J1, pp. 192-193.

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

(Patent) 廣田, 服部, 井手, 髙見, 吉本:隆起構造および翼, 2019.3.29 特許出願.

課題番号	J18J002	
区分	重点公募共同研究	
課題分野	環境・エネルギー分野	
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$	
継続年数	2年目	

## カーボンフリーエネルギーキャリア利用における科学と技術 Science and Technology for Utilizations of Carbon Free Energy Carriers

小林 秀昭\*†, 橋本 望\*\*††, 小原 拓\*, 内一 哲哉\*, 高木 敏行\*, 丸田 薫\* 中村 寿\*, 早川 晃弘\*, 渡邉 豊\*\*\*, Dany Escudie\*\*\*\*††, Cedric Galizzi\*\*\*\*††, Olivier Emile Mathieu\*\*\*\*\*†† \*東北大学流体科学研究所, \*\*北海道大学大学院工学研究院 \*\*\*\*東北大学大学院工学研究科, \*\*\*\*CETHIL, INSA-Lyon \*\*\*\*\*Texas A&M University †申請者, ††所外対応研究者

## 1. 研究目的

地球温暖化物質である CO<sub>2</sub> の排出削減に寄与するエネルギーチェーンを構築することは我が 国にとって急務である.特に海外で製造された CO<sub>2</sub>フリー水素やアンモニアを国内に輸送しエネ ルギー源として更に輸送,貯蔵,活用するためのインフラストラクチャーの整備が不可欠であり 流体科学の役割は大きい.本研究ではカーボンフリーエネルギーキャリアの利用に関する研究を 流体科学の基礎と応用の両面から推進し大型研究費獲得を目指す.

## 2. 研究成果の内容

本研究は2年目となる重点公募研究であり,流体科学研究所,北海道大学大学院,東北大学大 学院,さらに INSA-Lyon の教員による国際共同研究体制による.研究課題は、1) 貯蔵・輸送 機器ならびに燃焼器等の材料技術、2) 燃焼等のエネルギー機器高度化の技術、3) エネルギー 機器から排出される窒素酸化物処理や航空機等への更なる応用展開に向けたシステム技術に大別 され、今年度は2) 3) の成果に加え1) の材料評価手法ついても研究が進展した.

研究対象となる主要なエネルギーキャリアはアンモニアである.アンモニアは常温液化圧力 10 気圧以下であり、常圧液化温度も-33.4℃と、広く流通しているプロパンと大差ない.水素の液化 温度-256℃と比較すると貯蔵、輸送の両面で非常に扱いやすい燃料である.大型火力発電所の脱 硝触媒に広く使われており、流通面でもコスト低減が可能である.課題として燃焼速度、着火温 度などで燃焼性が低いことや窒素原子を多量に含むため窒素酸化物(NOx)が生成しやすいこと があるが、これらを克服することによって温室効果ガスを排出しないエネルギーキャリアとして の可能性が格段に高まる.

本稿では、アンモニア燃焼における低 NO x 化に向けた基盤研究、燃焼器開発に重要な乱流燃 焼特性、科学的に重要なアンモニア反応機構の科学的成果、ならびにアンモニア利用機器におけ る金属材料劣化の評価技術に関する成果を述べる.

#### 2.1 アンモニアガスタービン模擬燃焼器の LES と低 NOx 化技術開発

アンモニア燃焼の特徴である Fuel NOx 排出を抑制する燃焼器開発において,詳細反応を考慮 した三次元燃焼数値解析は重要である.ガスタービン燃焼器のスワール流により燃焼速度の遅い アンモニア火炎を安定化させることができる.また,燃焼方式も予混合燃焼方式と拡散燃焼方式 の両方の技術開発が必要である.図1はスワール燃焼器に安定化されたアンモニア/空気乱流予 混合火炎の直接写真である.スワール流によりアンモニア火炎を安定化させることができる.図 2は詳細化学反応を考慮したLESによる拡散燃焼型スワール燃焼器内における乱流火炎の基部の 三次元数値解析結果であり,流れおよび濃度場の構造を詳しく予測可能であることを示している. 更に,産総研(AISTFREA)のマイクロガスタービン燃焼器と基本構造が同じモデル燃焼器に 対して高圧ラボ試験を行い,図3に示すように,雰囲気圧力2気圧の予混合型二段燃焼により酸 素濃度16%換算による NOx 排出濃度を50 ppm 以下に低減できる条件を見出した.これらは低 NOx 燃焼器開発の基盤的データとなる.



図1 スワールバーナに安定化された アンモニア/空気乱流予混合火炎



図2 乱流拡散火炎の火炎基部構造の 三次元数値解析結果(LES)



図3 高圧ラボ試験によるマイクロガスタービン燃焼器モデルの排出ガス特性

## 2.2 アンモニア乱流予混合火炎の火炎伝播限界

燃焼性の弱いアンモニア燃焼の基礎特性であるアンモニア/空気予混合気の乱流場における 火炎伝播限界を明らかにするため、乱流発生用のファンを上下に設置した定容容器を用い、様々 な当量比および乱流強度条件における火炎伝播実験を行った.

図4にアンモニア/空気予混合気の火炎伝播限界マップを示す.図中の点線が火炎伝播限界を示 している.層流燃焼場においては、当量比 1.1 程度の燃料過濃条件において最も燃焼速度が速く なるのに対し、乱流燃焼場においては、当量比 0.9 程度の燃料希薄条件において最も高い乱流強 度まで火炎が伝播することが分かった.これは、アンモニアの Le 数(熱拡散係数と物質拡散係 数の比)が燃料過濃条件では1よりも大きく、燃料希薄条件では1よりも小さいことに起因して いる.図5は、燃料希薄条件と燃料過濃条件における火炎のシュリーレン画像を示しており、ど ちらの条件においても乱流渦により火炎面に皺が発生しているが、燃料過濃条件に比べて燃料希 薄条件では火炎面の皺が細かく発達していることが分かる.Le 数が1よりも小さい燃料希薄条件 では、乱流渦によって形成された火炎表面の皺が拡散・熱的不安定性により増長され、火炎面積 が増大して燃焼速度が増加し、より高い乱流強度でも火炎伝播を維持できるものと考えられる.

図6に、Ma 数と乱流 Ka 数の関係を示す. 図中の点線は火炎伝播限界を示している. Ma 数は 火炎の伸長が火炎伝播速度に与える影響の感度を示しており、Ma 数が小さければ小さいほど、 拡散・熱的不安定性が強く、火炎面の変形が増長しやすいことを示している. 本研究の実験結果 から、火炎伝播限界における乱流 Ka 数(乱流渦によって火炎に与えられる伸長の度合いを示す) は Ma 数の減少と共に単調に増加するということが分かった. 本研究で得られた成果は、燃焼数 値シミュレーションにおけるアンモニアの乱流燃焼速度モデルの高精度化に活用され、アンモニ ア燃焼ガスタービンの開発に資することが期待される.



図4 アンモニア/空気予混合気の当量比 øvs. 乱流強度 u'の グラフ上における火炎伝播限界マップ



図5 当量比0.7の燃料希薄条件および当量比1.1の 燃料過濃条件における火炎のシュリーレン画像の比較 (どちらも消炎する条件)



図6 Ma 数と乱流 Ka 数の関係

#### 2.3 アンモニア反応過程のモデル予測精度の検証

アンモニア燃焼反応モデルの高精度化を目的とし、温度分布制御マイクロフローリアクタ(以下、マイクロリアクタ)を用いてアンモニア反応過程の化学種分布計測を行い、モデル予測の検証を行った.アンモニアの反応過程では N<sub>2</sub>O が中間体として多量に生成されることから、今年度はアンモニアと N<sub>2</sub>O の反応に着目して検証を進めた.図7に計測結果とモデル予測結果の比較を示す.モデルには中村らが過去にアンモニア/空気を対象に開発したものを用いた.図7より、N<sub>2</sub>O を酸化剤とした場合、実験ではある温度域でアンモニアがほぼ完全に消費される一方、モデル予測はその酸化反応を過小評価している.また、実験では NO がほとんど生成されず反応が進行している一方、モデルは多量の NO 生成を予測している.本実験結果を再現できるようにモデル改良を進めることで、アンモニア/空気燃焼の反応帯における火炎構造や NO 生成をより正しく

モデル化できるようになると考えられる.



図7 マイクロフローリアクタによる計測およびモデル予測結果

#### 2.4 高圧アンモニア雰囲気の金属材料劣化評価に向けた高温用 EMAT 開発

高圧アンモニア雰囲気においては金属材料の腐食が課題となり、特に燃焼器容器の減肉が懸念 される.この問題の解決のためには、窒化酸化競合環境における材料劣化メカニズムの解明と材 料劣化損傷のモニタリングの両面から検討し、アンモニア燃焼器の管理法を確立する必要がある. 本年度は、燃焼器材料の劣化損傷のモニタリングを高温環境で行うことが可能なセンサについて 研究開発を行った.

電磁超音波探触子(Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)は非接触での測定が可能な ため、高温での試験に適している. EMAT はバイアス磁場源および励磁・検出コイルによって構 成されており、従来の EMAT のバイアス磁場源には小型で大きな磁場が得られることから、ネ オジム磁石やサマリウムコバルト磁石のような永久磁石が使用されている. しかし、これらの使 用温度はキュリー温度によって制限されており、最高でも 100℃~300℃までとなっている. ま た、バイアス磁場源としてヨーク付きの電磁石を用いる方法も試みられているが、ヨークのキュ リー点による限界から、最高温度は 600℃に留まっている.

本研究ではバイアス磁場源として空芯のパルス電磁石を使用することで、従来の超音波探触子の使用最高温度を上回る高温環境に耐えうる EMAT を開発する. 耐熱材料を用いて空芯のバイアス磁場コイルおよび励磁・検出コイルを試作し、高温における超音波厚さ試験を行い、プローブの性能を評価した. 試作した EMAT を図8に示す. バイアス磁場源には多層ソレノイドコイルを用いる. 巻線には直径 1.0mm の銅線を使用し、巻き数は 156 とした. バイアス磁場コイルの下に取り付けられた励磁・検出コイルには単層の円形コイルを用いる. 巻線には直径 0.2mm 銅線を使用し、巻き数は 23 とした. 各コイルの線材は一定の間隔を空けながら巻くことで絶縁し、耐熱性セラミック系接着材を用いて固定する.

磁性体である炭素鋼(SS400)を用いて、同様にエコー波形の測定を行った. パルサーレシーバ ーの中心周波数は2MHz および3MHz に設定し、それぞれの周波数でエコー観測を行った. 材 料がキュリー温度(炭素鋼の場合、770℃)に近づくにつれ強磁性の性質を失うため、高温において は感度が低下したが室温から 700℃までの温度領域でエコーを確認した. 次に、得られた底面エ コーの時間間隔と試験片厚さを用いて、各温度における横波音速を評価した. 各温度における試 験片厚さは、熱膨張を考慮し、以下の式を用いて求める.

$$L=Lo \left[1+\alpha (T-T_0)\right]$$

(1)

ここで、Lo は室温における試験片の厚さ(20mm)、αは炭素鋼の熱膨張率(11.7×10-6/K)、T-To は室温からの温度変化を表す. 横波音速の計算結果を図9に示す. この図から、温度上昇に伴っ て音速が単調減少していることが分かる. 一般的に、弾性係数は温度上昇に伴って減少する傾向 があり、それによって音速も減少すると考えられる. したがって図9は、温度上昇に伴う試験片 の弾性係数の変化を反映しており、高温においても正確な底面エコーを観測できたといえる.





図9 炭素鋼に対して常温から700℃の範囲における横波音速

## 3. 研究目標の達成状況

2年目である本年度は、アンモニアの反応論や燃焼特性の研究に加え、貯蔵、輸送機器や燃焼 器における材料劣化特性を評価するための高温用 EMAT の研究にも着手した.本重点公募共同 では材料科学や物質科学の研究が重要であり研究が進展した.

## 4. まとめと今後の課題

エネルギー輸入国である我が国にとって温室効果ガス削減に向けた取り組みは急務であり、総 合エネルギー効率やコスト面で可能性が高いアンモニアについて、燃焼、流体、材料の各面から、 多角的に研究に取り組んでいきたい.

## 5. 研究成果

## 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- S. Ogata, T. Uchimoto, T. Takagi and <u>G. Dobmannd</u>: Development and performance evaluation of a high-temperature electromagnetic acoustic transducer for monitoring metal processing, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 58, No. 3, (2018), pp. 309-318.
- [2] K. D. K. A. Somarathne, S. Colson, A. Hayakawa, H. Kobayashi : Modelling of ammonia/air non-premixed turbulent swirling flames in a gas turbine-like combustor

at various pressures, Combustion Theory and Modelling, Vol. 22, (2018), pp. 973-997.

- [3] E. C. Okafor, K. D. K. A. Somarathne, A. Hayakawa, T. Kudo, <u>O. Kurata</u>, <u>N. Iki</u>, H. Kobayashi : Towards the development of an efficient low-NOx ammonia combustor for a micro gas turbine, *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol. 37, (2019), pp. 4597-4606.
- \*[4] H. Kobayashi, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somarathne, E. C. Okafor : Science and technology of ammonia combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 37, (2019), pp. 109-133.
- [5] A. Ichikawa, Y. Naito, A. Hayakawa, T. Kudo, H. Kobayashi : Burning velocity and flame structure of CH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub>/air turbulent premixed flames at high pressure, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 13, (2019), pp. 6991-6999.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- [6] <u>A. Mathieu, E.L. Petersen</u>, M. Shindo, H. Nakamura, T. Tezuka: Oxidation of Ammonia by N<sub>2</sub>O in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *37th International Symposium on Combustion*, Dublin, Ireland, 2P005, 2018/7/29-8/3, (2018).
- [7] 新藤光将, <u>O. Mathieu</u>, <u>E. L. Petersen</u>, 手塚卓也, 中村寿: NH<sub>3</sub>/空気および NH<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>O/Ar 予混合気の火炎・着火特性に関する研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2018, (2018), C123.
- [8] <u>R. Ichimura, K. Hadi, N. Hashimoto</u>, A. Hayakawa, H. Kobayashi, <u>O. Fujita</u> : Experimental Study of Turbulent Flame Propagation of Ammonia/Air Mixture in a Fan-Stirred Closed Vessel, *The 14th International Conference on Combustion and Energy Utilization*, Sendai, Japan, (2018) ,OS2-34, pp. 280-281.
- [9] A. Hayakawa, M. Tsukamoto, K. D. K. A. Somarathne, T. Kudo, H. Kobayashi : Flame structure characteristics of swirl stabilized ammonia/air premixed flames, 2nd European Power to Ammonia Conference, Rotterdam, Netherlands, 2018/5/17-18, (2018).
- [10] H. Kobayashi, A. Hayakawa : High-pressure turbulent premixed combustion of ammonia, 16th International Workshop on Premixed Turbulent Flame, Dublin, Ireland, 2018/7/27-28, (2018).
- [11] E. C. Okafor, K. D. K. A. Somarathne, A. Hayakawa, T. Kudo, <u>O. Kurata</u>, <u>N. Iki</u>, H. Kobayashi : Towards the development of an efficient low-NOx ammonia combustor for a micro gas turbine, *37th International Symposium on Combustion*, Dublin, Ireland, , 2018/7/29-8/3, (2018), 5F03.
- [12] K. D. K. A. Somarathne, E. C. Okafor, A. Hayakawa, H. Kobayashi : The Effect of Wall Heat Loss in a Gas Turbine-like Combustor on the Emission Characteristics of Ammonia (NH<sub>3</sub>)/air Swirling Flames, *37th International Symposium on Combustion*, Dublin, Ireland, 2018/7/29-8/3, (2018), 1P195.
- [13] S. Colson, Y. Hirano, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi, <u>D. Escudié</u>, <u>C. Galizzi</u>: Investigation of methane-ammonia chemistry from premixed and diffusion flame structures using a counterflow configuration, *37th International Symposium on Combustion*, Dublin, Ireland, 2018/7/29-8/3, (2018), 2P104.
- [14] A. Ichikawa, A. Hayakawa, T. Kudo, H. Kobayashi : Turbulent combustion characteristics of ammonia/hydrogen/air premixed flames at high pressure, 37th International Symposium on Combustion, Dublin, Ireland, 2018/7/29-8/3, (2018),

2P136.

- [15] A. Hayakawa, M. Tsukamoto, K. D. K. A. Somarathne, T. Kudo, H. Kobayashi : Flame Front Structure of Ammonia/air Turbulent Premixed Flames in Swirling Flows under Various Pressures, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018)*, Sendai, Japan, (2018), OS2-32, pp. 276-277.
- [16] E. C. Okafor, R. Rattanasupapornsak, K. D. K. A. Somarathne, A. Hayakawa, T. Kudo, O. <u>Kurata</u>, N. Iki, H. Kobayashi : Emission Characteristics and the Structure of Ammonia-Air Flames in a Micro Gas Turbine Swirl Combustor, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2018)*, Sendai, Japan, (2018), OS2-35, pp. 282-283.
- [17] K. D. K. A. Somarathne, A. Hayakawa, H. Kobayashi : Effect of Wall Heat Transfer on Emission Characteristics of Ammonia/air Swirling Flames in a Gas Turbine–like Combustor, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics* (ICFD2018), Sendai, Japan, (2018), OS2-36, pp. 284-285.
- [18] A. Ichikawa, T. Kudo, A. Hayakawa, T. Kudo, H. Kobayashi, Burning Velocity and Flame Structure of Ammonia/Hydrogen/Air Turbulent Premixed Flames at Elevated Pressures, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics* (ICFD2018), Sendai, Japan, (2018), OS18-24, pp. 902-903.
- [19] M. Tsukamoto, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somarathne, T. Kudo, H. Kobayashi : Burnt Gas Characteristics of Swirl Stabilized Ammonia/air Turbulent Premixed Flames for Various Mixture Inlet Velocity, *Proceedings of the Fifteenth International Conference* on Flow Dynamics (ICFD2018), Sendai, Japan, (2018), OS18-30, pp. 914-915.
- \*[20] H. Kobayashi : Science and Technology for Utilizations of Carbon Free Energy Carriers, Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018), Sendai, Japan, (2018), CRF-J2, pp. 194-195.
- [21] A. Hayakawa, K.D.K.A. Somarathne, M. Tsukamoto, T. Kudo, H. Kobayashi : Two stage ammonia combustion in a gas turbine like combustor for simultaneous NO and unburnt ammonia reductions, 2018 NH<sub>3</sub> Fuel Conference, Pittsburgh, USA, 2018/10/31, (2018).
- [22] E. C. Okafor, A. Hayakawa, T. Kudo, <u>O. Kurata, N. Iki</u>, H. Kobayashi : Achievement of Low NOx Emission on From Ammonia Micro Gas Turbine Combustor, 第55回日本伝熱 シンポジウム, 2018/5/26-31, (2018), A231.
- [23] 市川昌紀,内藤佑次,早川晃弘,工藤琢,小林秀昭: CH4/NH3/air 乱流予混合火炎の火炎 構造に与える圧力およびアンモニア濃度の影響,第 55 回日本伝熱シンポジウム, 2018/5/26-31, (2018), A232.
- [24] 早川晃弘, 塚本真章, K. D. K. A. Somarathne, 工藤琢, 小林秀昭: 旋回流中に保炎された アンモニア/空気乱流予混合火炎の火炎構造, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2018, 2018/10/20-21, (2018), C122.
- [25] E. C. Okafor, A. Hayakawa, R. Rattanasupapornsak, A. Hayakawa, T. Kudo, <u>O. Kurata</u>, <u>N. Iki</u>, H. Kobayashi : Efficient Low NOx Combustion Strategies for Ammonia-methane Fuel a Micro Gas Turbine Combustor, 第 56 回燃焼シンポジウム講演論文集, 2018/11/14-16, (2018), E114.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
- (特許)

なし

## (受賞)

A. Hayakawa, Y. Arakawa, K.D.K.A. Somarathne, T. Kudo, H. Kobayashi, "Effects of pressure on Combustion Characteristics of Ammonia/Air Premixed Turbulent Flames in Swirling Flows (JSME-KSME Thermal and Fluid Engineering Conference (TFEC9))", 講演論文表彰, 日本機械学会熱工学部門, 2018/10/20-21.

## (マスコミ発表)

東北大学プレスリリースならびにグローバル科学ポータルサイト「ResearchSea」に掲載 https://www.tohoku.ac.jp/en/press/minimizing\_ammonia\_fuel\_emissions.html http://www.researchsea.com/html/article.php/aid/12090/cid/2/research/technology/tohoku \_university/it\_s\_all\_in\_the\_swirl\_\_minimizing\_ammonia\_fuel\_emissions.html, 2018/10/9.

# 2. 研究成果報告書 <リーダーシップ共同研究>

課題番号	J18L005	
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	$2018.4 \sim 2019.3$	
継続年数	2年目	

プラズマー生体界面における活性種挙動の大規模数値解析 Numerical Analysis of the Active Species Dynamics between Discharge Plasma and Biological Surface

## 内田 諭\*†, 佐藤 岳彦\*\*\*†† \*首都大学東京理工学研究科, \*\*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

プラズマー生体界面の研究は、医療応用において臨床レベルに到達しているが、理論的な数値 検証が十分でない.また、細胞膜中における放電活性種の輸送は重要な工程であるが、プラズマ ー生体相互作用を加味した検証は極めて限定的である.ゆえに分子スケールから医療効果を定量 的に俯瞰することは、極めて有意義である.

本研究の目的は、生体膜内における放電活性種の力学的挙動について、分子動力学法(MD) に より輸送特性および構造変位を定量的にモデル化することである.具体的には、①放電活性種を 内在する生体膜モデルの構築、②生体膜中における酸素活性種の輸送係数の導出、③活性種投入 量に対する損傷膜の密度変化及び残存分布の推定、④複合細胞膜中の活性種輸送における電界重 畳効果の検証、を行った.

## 2. 研究成果の内容

生体細胞膜の全原子モデルとしてリン脂質(フォスファジチルコリン)二重膜を対象とし、放 電により生成した活性酸素窒素種(亜硝酸)および活性酸素種(一重項酸素分子、ヒドロキシル ラジカル、ヒドロペルオキシルラジカル、過酸化水素)の透過過程を古典的分子動力学法により 模擬した. 膜密度や膜厚が安定化した生物学的に妥当な膜モデルを構築するとともに、活性種の 極性(親水性や疎水性)による浸透局在部位の相違を明示した(図1参照).また、電界重畳に よる水チャネルの形成と浸透促進効果を理論的に明示した.



図 1: 各活性種に対する浸透局在部位の比較

また,上膜法線方向に対してアンブレラサンプリングシミュレーションを行い,各活性酸素種の膜内自由エネルギー,拡散係数および膜透過係数を導出した.水素結合次数に対応した位置依存性が示され,その結果は透過過程における挙動傾向と一致した.

## 3. 研究目標の達成状況

今回の研究目標において、新たに構築したプラズマ照射生体膜の数値モデルを用い、電界重畳 時における膜中チャネルの形成過程を詳細に模擬し、放電活性種の浸透変化を定量的に検証でき た.また、活性種毎の膜内自由エネルギーを導出して、特性比較を行えたことから、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分子動力学ソフトウエア(GROMACS および AMBER)で、より実際的な並列高速計算による大規模膜解析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、分子動力学解析における生体膜モデルの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、電界重畳時における生体膜へのチャネル形成や放電活性種の浸透変化を定量的に模擬することができた.今後、これらの成果を早急に論文等にまとめて、幅広い公開を行っていく予定である.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- \*[1] <u>Satoshi Uchida</u>, <u>Hayato Ohta</u>, <u>Ryota Imai</u> and <u>Fumiyoshi Tochikubo</u>: Numerical Investigation of Transport Characteristics of Reactive Oxygen Species in Biological Membrane with Molecular Dynamics, *Proceedings of the 15th International Conference* on Flow Dynamics, Sendai, Japan, (2018), OS8-10, pp. 590-591, Invited.
- [2] <u>太田隼人</u>, <u>内田諭</u>, <u>栃久保文嘉</u>: 放電活性酸素種における膜透過特性の分子動力学シミュレ ーション, 第 77 回応用物理学会秋季講演会講演予稿集,名古屋, (2018), 20p-PA6-3, 07-090 2018 年 9 月 18-21 日.
- [3] <u>Satoshi Uchida</u> and <u>Fumiyoshi Tochikubo</u>: Basic Transport Analysis of Reactive Oxygen Species in Biological Membrane with Molecular Dynamics, *The 28th Annual Meeting of Materials Research Society of Japan*, Fukuoka, Japan, (2018), C2-I19-007, December 18-20, 2018, Invited.
- [4] <u>戸田和希</u>, <u>内田論</u>, <u>杤久保文嘉</u>: 量子化学計算を用いた放電活性種と膜構成分子の反応解析, 第 66 回応用物理学会春季講演会講演予稿集, 札幌, (2019), 12a-PB2-3, 06-140, 2019 年 3 月 9-12 日.
- [5] 太田隼人,内田諭, 杤久保文嘉:細胞膜内における活性酸素種輸送の分子動力学解析 アンブレラサンプリングにおけるウィンドウ幅の影響 ,第 66 回応用物理学会春季講演会講演予稿集,札幌,(2019),12a-PB2-4,06-141,2019年3月9-12日.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18L010	
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	$2018.4 \sim 2019.3$	
継続年数	1年目	

プラズマ入射束制御技術を用いた酸化・窒化による機能性材料の形成 Formation of Functional Materials by Oxidation / Nitridation using Ion/Radical Flux Control Technique

竹中 弘祐\*†, 内田 儀一郎\*, 節原 裕一\*, 岡田 健\*\*†† \*大阪大学接合科学研究所, \*\*東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

本研究では、既存の材料に新たな機能を付与して適材適所に使用する機能性材料創成の革 新的なブレークスルーをもたらす技術開発に資するため、非平衡プラズマから入射するイオ ン・ラジカル入射束を制御し、材料表面とそれらとの反応過程を解明するとともに、その高 活性な反応場を用いた高性能な機能性材料形成と目的とする.

## 2. 研究成果の内容

高性能・高機能有機材料表面形成のための非平衡プラズマ制御技術として、マグネトロン スパッタリングと誘導結合プラズマの重畳による製膜粒子種とイオン・ラジカル入射束の能 動的制御技術を用いた、製膜材料へ入射束を制御し薄膜の化学的・物理的特性を制御する技 術を確立し、高機能材料創製プロセスの実現を目指した.これらのイオン・ラジカル制御技 術を用いて形成した酸化物・窒化物薄膜の特性変化の解析を行った.

#### 3. 研究目標の達成状況

イオン・ラジカルの入射束を制御するこ とにより,高い反応性と選択性を併せ持つ 高活性な反応場を用いて酸化物半導体薄 膜の形成を行った. 図1 にアモルファス IGZO 薄膜を用いて作製した薄膜トランジ スタ (TFT) の電気特性を示す. イオン・ ラジカルを精密に制御することにより,従 来用いられている製膜手法で作製された TFT を凌駕する高性能の IGZO TFT の作製 に成功した.図2に窒化物機能性薄膜AIN 製膜における製膜粒子とイオン・ラジカル 入射束を時間的に制御した際の AIN 薄膜 の結晶性への影響を調べた結果を示す. 製 膜粒子に対してイオン・ラジカル入射束を 増加させることによりよし結晶性の高い AIN 薄膜の形成ができることを明らかに







した.図3に製膜粒子に対するイオンの入射束の比を示す.製膜粒子種に対するイオン・ラジカル入射束の比が1以上になる条件において,入射束の比の増加が結晶性の向上に寄与していることが明らかになった.

4. まとめと今後の課題

マグネトロンスパッタリングと誘導結合プラズマの重畳による製膜粒子種とイオン・ラジ カル入射束の能動的制御技術を用いた,酸化物・窒化物機能性薄膜の形成を行った.今後は, 有機材料を含めた幅広い材料への展開を行う予定である.

## 5. 研究成果(\*は別刷あり)

## 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- K. Takenaka, M. Endo, G. Uchida, and Y. Setsuhara: Fabrication of high-performance InGaZnOx thin film transistors based on control of oxidation using a low-temperature plasma, *Applied Physics Letters*, Vol. 112, No. 15 (2018), 152103 (3 pages).
- [2] <u>K. Takenaka, M. Endo, G. Uchida and Y. Setsuhara</u>: Effects of post-deposition plasma treatments on stability of amorphous InGaZnOx thin-film transistors prepared with plasma-assisted reactive magnetron sputtering, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 58 (2019), SAAC03 (5 pages).
- [3] <u>K. Takenaka, M. Endo, G. Uchida, Y. Setsuhara, A. Ebe</u> and <u>Y. Setsuhara</u>: Influence of deposition condition on electrical properties of a-IGZO films deposited by plasma-enhanced reactive sputtering, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 772, (2019), pp. 642-649.

## 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[4] <u>K. Takenaka, G. Uchida, Y. Setsuhara</u> and T. Okada: Development of Low-Temperature Plasma Process for Nitride and Oxide Functional Films Formation, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-42, pp. 86-87.
- [5] <u>K. Takenaka, Y. Setsuhara, M. Endo</u>, and <u>G. Uchida</u>: Gate-bias instability of post-deposition plasma treated amorphous InGaZnOx thin-film transistors prepared with plasma-assisted reactive magnetron sputtering, 40th International Symposium on Dry Process (DPS2018), Nagoya University, Nagoya, (2018).
- [6] <u>K. Takenaka, M. Endo, T. Yoshitani, H. Hirayama, G. Uchida, A. Ebe and Y. Setsuhara</u>: Formation of Functional Thin Films at Low Temperature using Plasma-assisted Reactive Processes, 第 28 回日本 MRS 年次大会,西日本総合展示場 他, (2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18L014	
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	$2018.4 \sim 2019.3$	
継続年数	1年目	

## 爆風脳損傷の予防 Prevention of Blast Induced Traumatic Brain Injury

中川 敦寛\*†,大谷 清伸\*\*†† \*東北大学病院,\*\*東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

## 1. 研究目的

本研究の目的は、爆風のうち、衝撃波が生体損傷に及ぼす影響を細胞レベルから臓器レベルで明らかにした上で、爆風による脳損傷の予防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

模擬モデルに対して微小爆薬で発生させた衝撃波を印加し、高速度撮影、圧測定、理論解 析で衝撃波の生体内での挙動を解析した。衝撃波が生体損傷に及ぼす影響を細胞レベルから 臓器レベル検討を行った.また、衝撃波による組織、臓器損傷を防止する方法を明らかにす るために従来衝撃波過剰圧減衰効果を有するゴアテックス、ベンシーツ(綿片)、に加えた 材料の検討を行った.

#### 3. 研究目標の達成状況

衝撃波が生体損傷に及ぼす影響を細胞レベルから臓器レベルで基礎的知見を得ることが できた.また、衝撃波による組織、臓器損傷を防止する方法について、複数の材質において 過剰圧減衰効果に関して基礎的知見を得ることができた.爆風損傷全体において衝撃波が果 たす影響について明らかにし、爆風損傷による脳損傷の防止機序の開発に必要な基礎的知見 を得ることが最終的な目標であり、損傷機序解明、損傷防止機序解明、いずれにおいても爆 風損傷における先行衝撃波後の要素に関する影響を踏まえた検討はまだ着手できていない.

## 4. まとめと今後の課題

本研究の結果,撃波の細胞内伝播という超高速複雑ダイナミクスを捉え,衝撃波が細胞, 組織,臓器に及ぼす影響を明らかにする上で基礎的な知見を得ることができた.その一方で, 爆風損傷全体における衝撃波の果たす役割は,損傷機序解明,損傷防止機序構築の観点から 明らかになっておらず,引き続き,模擬モデル実験を用いた高速度撮影,圧測定,理論解析 実験を中心に検討を進める.撮影条件,材質条件など解決することが技術的な課題であり, 可視化および圧測定について引き続き検討を行うともに,実臨床で経験のある米国 Rocco Armonda 医師,イスラエル Guy Rosenthal 医師と相談し,全体を反映した実験系を構築す ることに拘らず,爆風損傷の臨床像を反映する簡易的な模擬モデルの構築を実現することに 注力することが今後の課題である.

本研究で得られた結果は、来年に控えた東京オリンピック・パラリンピックにおけるテロ対策において有用となる知見となることが期待される.細胞内の衝撃波伝播を可視化するこ

とが実現することにより、生体組織に対する音波作用に関する直接的かつ本質的な情報を提供することが期待できる. さらには、損傷機序解明を進めることで、血管新生や骨成長など 既知の衝撃波による臓器損傷あるいは治療効果をもたらす機序解明だけでなく、臨床現場で のアンメットメディカルニーズとのマッチングを図り、衝撃波の新たな再生・活性化効果を 演繹的に見出し医療へとつなげる可能性があるものと推察される.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- <u>中川敦寛</u>,, <u>Rocco Armonda</u>, <u>冨永悌二</u>: Blast injury, gun shot injury の診断・治療. 爆風 による外傷性損傷-テロ対応の観点から, 新NS NOW, 14 (2018), pp. 134-141, メディカ ルビュー.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[2] 大谷清伸, 小川俊広, <u>阿部淳</u>, <u>中川敦寛</u>: 金属円管内微小爆薬による発生衝撃波の数値模擬, 平成 30 年度衝撃波シンポジウム, 横浜, (2019), #1C2-2.
- [3] <u>中川敦寛</u>, <u>刈部博</u>, <u>麦倉俊司</u>, <u>今井啓道</u>, <u>久志本成樹</u>, <u>冨永悌二</u>: 頭蓋顔面外傷において知 っておきたい頭部外傷の基礎知識, 平成 30 年度第 7 回宮城県口腔外科研究会総会・講演会, 特別講演, 仙台, (2018).
- [4] <u>中川敦寛</u>, <u>Rocco Armonda</u>, <u>Guy Rosenthal</u>, 大谷清伸, <u>富田博秋</u>, <u>佐久間篤</u>, <u>八木橋真央</u>, <u>Geoffrey Manley</u>, <u>久志本成樹</u>, <u>冨永悌二</u>: 爆傷と銃創: 臨床, 診療体制, 第 10 回日本 Acute Care Surgery 学会学術集会, 教育講演, 仙台, (2018).
- [5] <u>中川敦寛</u>, <u>Rocco Armonda</u>, 大谷清伸, <u>Guy Rosenthal</u>, <u>富田博秋</u>, <u>佐久間篤</u>, <u>八木橋真央</u>, <u>Geoffrey Manley</u>, <u>久志本成樹</u>, <u>冨永悌二</u>:「東京オリンピック・パラリンピックにおける救 急医の役割」爆風損傷:臨床,診療体制, 医療以外の連携, 第 46 回日本救急医学会総会・ 学術集会, 横浜, (2018).
- [6] <u>A. Nakagawa, T. Tominaga</u>: Traumatic Brain Injury: Management Update and Current Topics, *Cipto Mangunkusumo National General Hospital*, Jakarta, (2018), invite.
- [7] <u>A. Nakagawa</u>, K. Ohtani and <u>T. Tominaga</u>: Mechanism of blast-induced traumatic brain injury. Insight from shock wave research, *Indian Institute of Science*, Bangalore, (2018), invite.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18L017	
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	2018.4 ~2019.3	
継続年数	1年目	

## 歪み速度テンソルの固有ベクトルを用いた乱流構造解析の応用 Applications of the Analysis of Turbulence Structure using Eigenvectors of Rate-of-Strain Tensor

石原 卓\*†, 櫻井 幹記\*\* Gerrit Elsinga\*\*\*, 服部 裕司\*\*\*\*†† \*岡山大学大学院環境生命科学研究科, \*\*名古屋大学大学院工学研究科 \*\*\*Delft University of Technology, \*\*\*\*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

歪み速度テンソルの固有ベクトルを用いた乱流構造解析の手法 (Elsinga & Marusic, JFM 662 (2010), pp. 514-539) により,レイノルズ数の増加に伴い乱流中の渦構造に遷移が起きることが 定量的に示された (Elsinga, Ishihara et al. JFM 829 (2017), pp. 31-64). 本研究ではこの解析 手法を応用して,乱流中の渦構造と関係する多様な統計量との関係について定量的な特徴付けを 行うことである.

## 2. 研究成果の内容

Elsinga&Marsic (2010)は乱流中の対称歪み速度テンソルの直交する固有ベクトルを用いた乱 流速度場の平均により,乱流中の小スケールに普遍的な流れ構造があることを見出した.その解 析手法を用いて,乱流中の流れ構造のレイノルズ数依存性を調べることにより,レイノルズ数の 増加に伴い乱流中の渦構造に遷移が起きることが定量的に示されている(Elsinga, et al (2017)). Sakurai & Ishihara, JPSJ 87 (2018)は同解析手法を応用して乱流中の慣性粒子の濃度分布を調 べ,乱流中の小スケールにおける普遍的な流れ構造に対応したパターンがあることを見出した. これは,非圧縮性乱流場における結果であり,乱流中の慣性粒子の濃度分布と流れ構造の関係に 対する圧縮性の影響についてはよく分かっていない.



図1 乱流中の上位 10%の高渦度領域における慣性粒子(St=1)の濃度分布を歪み速度テンソルの第1,第3 固有ベクトルの平面内で平均して求めたもの. 左:非圧縮性乱流場,右:圧縮性乱流場(Ma=0.4)(文献[1]より).

本研究では、圧縮性乱流の直接数値シミュレーションを用いて慣性粒子運動の追跡を行い、乱流場中の粒子の濃度分布について、歪み速度テンソルを用いた解析を実施した.得られた結果を非圧縮性乱流場の結果と比較し、乱流中の流れ構造と粒子分布の関係における圧縮性の影響を調べた.図1は圧縮性乱流(レイノルズ数 R~260、プラントル数 Pr=0.7、マッハ数 Ma=0.4)中の高渦度領域における慣性粒子(ストークス数 St=1)の分布を非圧縮性乱流の場合の結果と比較したものである.両者は定性的に一致する.定量的には圧縮性乱流では非圧縮性乱流の場合と比べ、高渦度領域の生成が抑制され、それに伴い高渦度領域における慣性粒子の低濃度領域の生成が抑制されることを示唆する結果となることが分かった.

## 3. 研究目標の達成状況

当初の目的を達成する結果が得られ、手法の有用性が確認できた.

## 4. まとめと今後の課題

本研究の解析により、乱流場の流れ構造と乱流中の粒子の分布(選択的濃集)の関係を定量的 に特徴つけることが可能であり、圧縮性乱流と非圧縮性乱流のわずかな違いも検出できることが 明らかとなった.解析結果により、圧縮性乱流中の慣性粒子の主要な動きは、乱流中の非圧縮性 成分が支配していることが示唆された.これを実証する数値実験を行うことが今後の課題のひと つである.また、圧縮性/非圧縮性に依らず、高レイノルズ数乱流場において、慣性領域のスケー ルの渦と慣性の大きい粒子の分布の関係の定量的な特徴付けを行い、乱流中における微粒子の衝 突付着成長の過程を明らかにすることが今後の課題である.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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

- Y. Sakurai and <u>T. Ishihara</u>: Relationships between Small-Scale Motions and Inertial Particle Clustering in Turbulence: Comparison between Incompressible and Compressible Turbulence, *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS14-16, pp. 784-785.
- \*[2] <u>T. Ishihara, G. Elsinga</u>, and Y. Hattori: Applications of the analysis of turbulence structure using eigenvectors of rate-of-strain tensor, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-74, pp. 154-155.

## 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(マスコミ	:発表)	なし
(受賞)	たし	
(特許)	なし	

課題番号	J18L018	
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	$2018.4 \sim 2019.3$	
継続年数	1年目(発展)	

## 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

徳増 崇\*†,金子 智\*\*††,須藤 理枝子\*\*\*,安原 重雄\*\*\*\* \*東北大学流体科学研究所,\*\*神奈川県立産業技術総合研究所 \*\*\*さがみはら表面技術研究所,\*\*\*\*(株)ジャパン・アドバンスド・ケミカルズ †申請者, ††所外対応研究者

## 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

シリコンウエハ表面はすぐに酸化し結晶性のないアモルファス(非晶質)な酸化膜で覆われる. そのためシリコン基板上に機能性を有する酸化膜を直接成長させるために緩衝膜が必須となる. 我々はシリコン基板上へ酸化マグネシウム薄膜を緩衝膜として成長させることに成功しているが(J. Appl. Phys. 107 (2010) 073523), 通常報告されている面内 45 度回転の成長ではなく,図1に示すような面内回転のない cubic on cubic と呼ばれる結晶成長であった.本研究では,格子不整合だけでは説明できない cubic on cubic 成長を化学的安定性で評価した.

密度汎関数法を用いてシリコン基板上での酸化マグネシウムの吸着エネルギーをところ, cubic on cubic 成長の方が安定している結果となり,実験結果と一致することが分かった. 以上の結果を国際会議(ICFD2018, ISPlasma2018)で報告し,論文雑誌へ投稿し受理された (J. Jpn. Appl. Phys., 58 (2019), SAAD06).



図1:シリコン基板上の酸化マグネシウムの成長
## 3. 研究目標の達成状況

今回,構造がシンプルな酸化マグネシウムについての検討を行い,国際会議での発表4件 と論文1本が掲載された.カーボン系材料についての成長過程についても図2のようなモデ ルで検討しているが,周期条件の最適化などが必要である.



図2:炭酸ストロンチウム基板上でのグラフェンの成長

4. まとめと今後の課題

今回, 面内回転は吸着エネルギーで説明できたが, 格子定数の収縮についても次年度以降 に検討していく予定である.

5. 研究成果(\*は別刷あり)

# 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- \*[1] <u>S. Kaneko</u>, T. Tokumasu, Y. Nakamaru, C. Kokubun, K. Konda, <u>M. Yasui</u>, <u>M. Kurouchi</u>, <u>M. Can</u>, <u>S. Shawuti</u>, <u>R. Sudo</u>, <u>T. Endo</u>, <u>S. Yasuhara</u>, <u>A. Matsuda</u>, <u>M. Yoshimoto</u>: Constriction of a lattice constant in an epitaxial magnesium oxide film deposited on a silicon substrate, *J. Jpn. Appl. Phys.*, Vol. 58 (2019), SAAD06 (4 pages).
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[2] <u>Satoru Kaneko, Rieko Sudo, Shigeo Yasuhara, Tamio Endo, Manabu Yasui, Masahito Kurouchi, Musa Can, Shalima Shawuti</u>, Yoshimi Nakamaru, Chiemi Kokubun, Kayoko Konda, Takashi Tokumasu: In-Plane relation between Epitaxial Magnesium Oxide Film and Silicon Substrate, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, (2018), CRF-56, pp. 114-115.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18L023
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目(発展)

#### 混相流中における移動物体周りの流れの数値予測

Numerical Prediction of Flow Characteristics around Moving Objects in Multiphase Flow

高橋 俊\*†,大林 茂\*\*†† 水野 祐介\*\*\*,川本 裕樹\*\*\* \*東海大学工学部,\*\*東北大学流体科学研究所 \*\*\*東海大学大学院 †申請者,††所内対応教員

# 1. 研究目的

固気混相流や固気液混相流の数値シミュレーションにより,流れと物体の相互干渉や物体 運動による二相流の流動挙動の現象解明と埋め込み境界法を用いた解析技術の確立を目的 とする.それぞれ工学的には 1)流体-構造連成解析によるショットピーニング加工の衝突現 象と 2)二相流体-構造連成解析による濡れた路面を走行する際のタイヤ摩擦力の評価を対象 とする.

## 2. 研究成果の内容

1)直交格子法と埋め込み境界法を組み合わせた流体解析と有限要素法と弾塑性体モデルを 組み合わせた構造解析を連成させて、微粒子(ショット)が構造物に衝突した際の現象のモ デル化を行った.流体解析のみで、提案したモデルを適用すると衝突時のエネルギ損失と構 造物で生じる変形量を評価可能であることを確認した.2)保存型レベルセット法を用いた流 体解析と超弾性体モデルを用いた構造解析を連成させて、実験結果との比較により解析アル ゴリズムの検証とマクロ視点での現象把握を行った.

#### 3. 研究目標の達成状況

各問題における連成解析手法を構築し、流体と運動物体、構造物の相互干渉メカニズムを 把握するための解析技術を開発した.解析結果から衝突モデルの構築や基礎現象把握を可能 とした.マクロ視点での現象把握を行うためのミクロ視点での現象把握と物理モデル構築の 技術開発を行った.

#### 4. まとめと今後の課題

混相流体と構造物の連成解析手法を開発し、衝突現象や流動特性の把握を行った.今後は 開発した手法を用いてパラメータスタディを行うことで各現象の特性を考慮した物理モデル 構築を進め、ミクロからマクロ視点における現象把握を進める.そのためには、多数の条件 での解析と解析手法の高速化が課題となる.



図1:衝突前後のショット周りの速度分布と構造物の応力分布

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- \*[1] Y. Mizuno, S. Takahashi, K. Fukuda and S. Obayashi: Direct Numerical Simulation of Gas–Particle Flows with Particle–Wall Collisions Using the Immersed Boundary Method, *Applied Sciences*, Vol. 8 (2018), 2387 (21 pages).
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- [2] Y. Mizuno, T. Kubota, S. Takahashi, K. Fukuda, S. Obayashi: Flow-Structure Coupled Simulation of Particle-Structure collision using Immersed Boundary Method and Finite Element Method, *The International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences*, (2019).
- [3] T. Kubota, Y. Mizuno, S. Takahashi, R. Asa, R. Sagara, Y. Kodama, S. Obayashi: Flow-Structure Coupled Simulation of Particle-Structure collision using Immersed Boundary Method and Finite Element Method, *The International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences*, (2019)
- [4] 水野裕介,高橋俊,野々村拓,永田貴之,福田紘大,大林茂:埋め込み境界法を用いた圧縮 性・非圧縮性固気混相流解析の並列性能比較,第32回数値流体力学シンポジウム,(2018).
- \*[5] <u>Y. Mizuno, Y. Kawamoto, S. Takahashi, K. Fukuda</u>, S. Obayashi: Numerical Prediction of Flow Characteristics around Moving Objects in Multiphase Flow, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, (2018), CRF-16, pp. 32-33.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18L024
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2年目

# 自励振動ヒートパイプの設計高精度化に向けた気液二相流の熱流体解析の応用 Application of Two-Phase Thermo-Fluid Simulation for Accurate Design of Oscillating Heat Pipe

高橋 俊\*†,永井 大樹\*\*†† 竹村 薫\*\*\*,佐藤 かおり\*\*\*,安達 拓矢\*\* \*東海大学工学部,\*\*東北大学流体科学研究所 \*\*\*東海大学工学部動力機械工学科 †申請者,††所内対応教員

# 1. 研究目的

近年はヒートパイプを熱輸送デバイスとして様々な機器に応用することが期待されてい るが、その中でも特に自励振動ヒートパイプは低消費電力かつ低質量な熱輸送デバイスとし てその汎用性と効率の高さから大きく注目されている.これは駆動源に加熱部と冷却部の温 度差のみを用いる外力を必要としない簡易なメカニズムと、管内部の圧力振動を駆動力とし た大容量の熱輸送を併せ持つ特性のためである.しかしながら安定な動作とその作動限界の 予測等にはいまだ困難な課題が残されており、現在も研究開発が盛んに行われている.そこ で本研究では高精度に性能予測を行える気液二相流の熱流体数値解析法の開発を行い、管内 部の二相流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.

#### 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の流体解析手法を開発した.本手法では気液界面の境界条件にはレベ ルセット法に基づいた保存形レベルセット法を用い、また物体と流体の間の界面には埋め込 み境界法の一種であるゴーストセル法を用いてそれぞれ界面の捕獲と境界の表現を行なっ た.解析例の一つとして流路内に設置した円柱状の障害物に二次元気泡が衝突・変形する様 子を図1に示す.図1ではそれぞれ0.5mm,0.6mm,0.7mmのピンが管内に設置されており その周囲の温度場の様子が可視化されている.今後はこの二次元解析を発展させて三次元解 析による熱輸送特性の比較検証し、最も効率的な設計を議論する.

#### 3. 研究目標の達成状況

ヒートパイプの構造上,数値解析と実験の直接的な比較は困難である.通常,ヒートパイ プには金属製のパイプが用いられるため内部の視認は難しい.また,一部にガラスなどの透 明な素材を使用した場合にも内壁の摩擦の変化により有益なデータの取得は期待できない. そのため実験で得られた温度データとの比較が行われる.本研究では解析結果からヌセルト 数等の理論値と比較や先行研究との比較を行った.また現在は三次元解析による検証を進め ている.今後は実際のヒートパイプと同条件での解析を行い,性能予測を進める予定である.



0.7[mm]

図1:各ピンサイズにおける気泡の挙動

4. まとめと今後の課題

気液二相流体解析手法を構築し、管内の中央断面における温度場の変化の様子とピンサイズの変更に伴う熱輸送特性の変化を可視化により確認した.今後は自励振動ヒートパイプと 同条件での解析を実施予定である.また、実験器からの入熱を想定した蒸発・沸騰モデルの 開発を行う.最終的には自励振動ヒートパイプの熱輸送特性の高効率化と安定作動条件を調 査していく.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[1] <u>K. Takemura, S. Takahashi, K. Sato</u>, H. Nagai, T. Adachi: Application of Two-phase Thermo-fluid Simulation for Accurate Design of Heat Pipe, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-2, pp. 44-45.
- [2] 竹村薫,高橋俊,佐藤かおり,岡崎俊,福家英之:GAPS 用ヒートパイプの開発のための気 液二相流解析の応用,第19回宇宙科学シンポジウム,(2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
  - なし

課題番号	J18L025
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	3年目

#### 微小循環系における血球挙動の数値解析ならびに実験観察

# Numerical Simulation and Experimental Observation of the Blood Cells Behavior in Microcirculation

福井 智宏\***†**, 早瀬 敏幸\*\***††** 

# 川口 美沙\*,船本 健一\*\*\*,宫内 優\*\*

\*京都工芸繊維大学,\*\*東北大学流体科学研究所,\*\*\*東北大学学際科学フロンティア研究所 †申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

懸濁液のレオロジー特性を知り、それを機能的に利用することは、粉体工学(潤滑剤)や 塗装工学(ペンキ)、土木工学(コンクリート)、さらには生体工学(血液)において重要で ある. 懸濁液のレオロジー的性質は、溶媒と分散体の流体力学的な相互作用によって決まる ことが知られているが、その全容は明らかではない.本研究では、懸濁粒子に作用する慣性 力が懸濁液の微細構造や、懸濁液の巨視的なレオロジー特性の時間的・空間的分布に与える 影響を考察した.

#### 2. 研究成果の内容

粒子に作用する揚力は粒子慣性力に依存する.このことは、流下する懸濁粒子の流路内半 径方向位置(微細構造に関連)が、粒子慣性力により制御可能であることを示唆している. 本研究では、粒子慣性力(流速や粒子の大きさ)が粒子の半径方向分布に与える影響を、数 値解析ならびに実験観察により考察したので報告する.

図1に、2次元数値解析による、流下する懸濁粒子の確率密度(存在確率)と流路幅方向 位置(流路中央、y/I=0;流路壁面、y/I=±1.)の関係を示す.懸濁粒子が流路幅方向に一 様に分散している時の確率密度のは0.05(図中の太い実線)となる.これにより、粒子の流 路幅方向の偏り(疎密さ)は、粒子慣性力(粒子レイノルズ数 Rep)の増大に伴い顕著とな

ることが分かる.また,その集中 位置(確率密度のピーク位置)は, ±0.6 ( $Re_p = 0.04$ )から±0.4付近 ( $Re_p = 0.32$ )へと,粒子慣性力 の増大に伴い,より流路中央側へ と移っていることが分かる.この ような粒子の流路内位置の変化 (微細構造の変化)は、懸濁液の マクロなレオロジー(実効粘度や 非ニュートン性)に大きな影響を 与えるため、今後さらに詳しく調 べる必要がある.



図2に実験観察により得られた, 懸濁粒子の確率密度と円管内半径 方向位置の関係を示す.粒子の半 径方向の分散が一様の場合,確率 密度 るは 0.04 (図中の太い実線) となる.数値解析結果と同様に, 粒子慣性力の増大に伴い,粒子の 半径方向位置の変化を捉えること に成功した.



#### 3. 研究目標の達成状況

本研究により,懸濁粒子に作用する慣性力が懸濁液の微細構造に与える影響を,数値解析 ならびに実験観察より考察した.これらの微細構造変化が,懸濁液の巨視的なレオロジー(実 効粘度や非ニュートン性)に与える影響評価を,国際会議にて発表予定である.

4. まとめと今後の課題

本プロジェクトにより、懸濁液のマクロなレオロジー特性を、ミクロな微細構造から考察 する方法を提案した.来年度以降、新たな研究プロジェクト「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」を立ち上げ、微細構造の制御による、懸濁液のス マートコントロールを目指す.

- 5. 研究成果 (\*は別刷あり)
- 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] <u>Misa Kawaguchi, Tomohiro Fukui, Kenichi Funamoto</u>, Suguru Miyauchi, and Toshiyuki Hayase: Numerical and Experimental Studies on Non-Newtonian Rheology of a Suspension, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-64, pp. 134-135.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18L033
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

# ナノマイクロ粒子コーティングによるふく射伝播制御 Control of Radiative Transfer by Nano-Micro Particulate Coating

# 江目 宏樹\*†, 岡島 淳之介\*\*†† \*山形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

本研究の目的は(1) 散乱性媒体におけるナノマイクロ構造体のふく射特性制御の理論構築による現象の詳細な解明,(2) 粒子形状及び粒子の分散配列状態による光学特性制御技術の開発である.

# 2. 研究成果の内容

散乱性媒体の一種であるコノハムシ(図1)の分光反射率を測定した(図2). 観察ではコ ノハムシの体表とグァバの葉の見た目は類似しているにもかかわらず,分光反射率が異なる ことを明らかにした. 散乱性媒体を活用したコノハムシの擬態を解明するにはナノマイクロ スケールから散乱特性を評価する必要があることを明らかにした.

#### 3. 研究目標の達成状況

流体科学研究所では分光測定による実験的評価を行い,所外では理論解析による現象評価 を行った.正確な理論の構築による幅広い現象への理論適用のため,局在型表面プラズモン 共鳴の干渉効果に関する知見を得た.また,工業的な応用のため,粒径を制御したふく射熱 遮断スプリンクラーを提案した.



図1:コノハムシ



図2:コノハムシの部位別の分光反射率の比較

4. まとめと今後の課題

本研究助成により、実験的評価を流体科学研究所で行い、解析による評価を所外で行うという体制を整え、円滑な研究の遂行が可能となった.本研究から得られた知見により、粒径を制御したふく射熱遮断スプリンクラーを提案したため、今後は微細液滴とふく射の関係性について研究を行う.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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] <u>江目宏樹</u>: 従属散乱における局在型表面プラズモン共鳴の影響, 第 39 回日本熱物性シンポ ジウム, (2018), p. E223.
- [2] 新井雄太,藤原和樹,河野貴裕,中村嘉恵,山田純,江目宏樹:方向制御したナノ繊維を含む散乱性媒体のふく射物性,第39回日本熱物性シンポジウム,(2018), p. E213.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18L039
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

# 固体燃料の排出ガス生成機構の解明 Elucidation of Emission Gas Formation Mechanism of Solid Fuel

# 大上 泰寬\*†,中村 寿\*\*†† \*秋田県立大学,\*\*東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

## 1. 研究目的

従来,固体の熱分解に関しては,熱重量計測や示唆熱量計測を用いた反応速度の測定が行われてきた.これらの手法は、「試料が熱的に十分に薄く、内部に均一な温度・密度分布を 有する」ことを前提としている.しかしながら、燃焼現象のように固体に対し高い熱流束が 発生する場においては内部の温度、密度の均一性が保たれているとは考えにくく、熱重量計 測が熱分解反応の測定に適した手法であるとは言い難い.

我々は、過去の研究において、高輝度放射光施設 SPring-8 を利用し高温窒素雰囲気中の 木質バイオマス内部のX線透過光計測を行った.本測定手法は、熱分解中の木質バイオマス 内部の密度変化をリアルタイムで測定するものである.反応が停止した固体に対する CT 計 測は数多く行われているが、本測定法のような固体内部の非定常計測は他に例がなく、世界 的に見ても極めて独創性の高いものである.

本研究では、この独自計測法を、固体廃棄物燃焼時に生成される各種規制物質の生成機構 解明に応用することを目的とする.しかしながら、規制物質の排出を伴う実験を実施するた めには、事前に生成される物質の濃度を定量的に予測し、それらに応じた安全対策を実施す る必要がある.本共同研究では、初めに塩素由来の塩化水素生成に着目し、特に木質系廃棄 物からの塩化水素生成メカニズム解明を目的とした実験実施にあたり、脱水過程や熱分解過 程で生成されうる塩化水素の濃度を、文献調査及び数値計算により検討することを目的とす る.

#### 2. 研究成果の内容

#### 2.1 既存の熱物性・化学反応機構の探索

初めに、本研究に利用可能な燃焼化学反応機構の探索を行った.固体廃棄物を想定した高 級炭化水素の反応系(H-C-O)はいくつか存在するものの、これらには塩素が関与する反応 が含まれていない.一方で、塩素が含まれている燃焼化学反応機構はいくつか存在するもの の、これらは高級炭化水素が含まれていない.そこで、本研究ではBurcatによる熱物性デ ータベース(http://garfield.chem.elte.hu/Burcat/burcat.html)を活用した平衡計算により、 生成されうる最大の塩化水素濃度を推定した.本データベースは約 2500 化学種の熱物性デ ータを収録しており、燃焼化学反応の数値計算でも広く用いられている.また、本研究が対 象とする高級炭化水素や塩化物の熱物性データも広く含んでいる.

#### 2.2 平衡計算による生成ガスの予測

前述の Burcat 熱物性データベースを用いて平衡計算を実施した.計算には ANSYS CHEMKIN-PRO を用いた.木質系固体廃棄物の主成分としてセルロース( $C_{6}H_{10}O_{5}$ )を想定し,廃棄物に含まれる塩素源として塩(NaCl)を想定した.酸素を含まない系で温度を変化させて計算を行った.低温条件は脱水過程,高温条件は熱分解過程に相当する.

計算の結果,主要生成物質として,改質ガスの主成分である水素および一酸化炭素が観察 された.これらのガスは温度が高いほど生成量が増加した.また,セルロース中の酸素と一 部酸化反応が進み,水蒸気および二酸化炭素も生成された.

微量成分として、塩化水素、水酸化ナトリウム、未反応で液化した塩が観察された.この うち塩化水素について、温度上昇に伴って生成量が減少する傾向が観察された.しかしなが ら、速度論的観点から低温で現実的な時間の範囲内で多量の塩化水素が生成されることは考 えにくいことから、これは平衡計算による特異的な結果の可能性がある.この点は今後の実 験で検証する必要がある.

また,生成される塩化水素の濃度を低下させるために,窒素で希釈した条件の平衡計算も 実施した.その結果,窒素希釈により濃度は低下するものの,温度依存性は希釈の有無で変 化がなかった.

#### 3. 研究目標の達成状況

高輝度放射光施設 SPring-8 における実験機会獲得の事情により,本研究では主に文献調査 や数値計算による検討を進めた.その結果,塩素を含む固体廃棄物模擬試料を用いた実験実 施に向けた基礎的検討を実施することができた.なお,本共同研究は,企業を含めた三者に よる共同研究へと発展する見込みを得ることができた.

#### 4. まとめと今後の課題

模擬試料に対する加熱および塩化水素濃度計測を行い,得られた塩化水素の濃度予測結果 と比較することで,予測値の妥当性を検証する.その結果を元に,高輝度放射光施設 Spring-8 での実験装置改良を進める.

また、固体廃棄物の燃焼排ガスに含まれる規制物質として、本研究で検討した塩素由来の 塩化水素のほかに、硫黄由来の硫黄酸化物などがある。今後は、X線透過光計測の対象とし て、こうした他の元素を含めることで、固体廃棄物の燃焼や熱分解過程において、さまざま な規制物質が生成されるメカニズム解明に本手法を応用展開していくことが期待される。

- 研究成果(\*は別刷あり)
- 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・ロ頭発表等 なし
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J18L049
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year (progressing)

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. In the case where liquid is used as a lubricant for microhydrodynamic bearings, the pressure cannot be lower than the pressure at which cavities are formed in the liquid. Therefore, the pressure rise will be greater than the pressure drop, and it has been explained that this asymmetric pressure distribution may make the pressure averaged over the whole surface higher than the ambient pressure. Since the cavitation does not appear in gas, the mechanism of gas lubrication is different from that of liquid lubrication and it had not been explained. Recently, the applicant clarified the mechanism of high gas pressure generation induced by a textured surface in micro/nanoscale. 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 and the influence of inner edge region connecting to the atmospheric air on pressure generation are important. And hence, we investigate those in the present study by 3D numerical simulations and by theoretical analyses.

#### 2. Details of program implement

The lubricated surface of the slider is given by the grid of 5x4 dimples cut out of the repeated dimple pattern. The lower counter surface is sliding in the x direction. Considering the bisecting plane along the x-axis as a symmetry plane, we only needed to simulate the flow field in the half of the lubricated region, as shown in Fig. 1a. Each dimple has the same shape of a rectangular parallelepiped. The dimensions of pattern are named as shown in Fig. 1. The dimensions  $L_1$ ,  $L_3$  and  $L_4$  were set as  $L_1=10\mu m$ ,  $L_3=L_4=1\mu m$ . The two values, 1 and 10 $\mu m$ , were considered as the distance  $L_5$  between the outer column of dimples and the side edge of the slider. The three values, 10, 20, and  $40\mu m$ , were considered as the distance  $L_2$  between neighboring dimples along the sliding direction. The maximum clearance d between the slider surface and the counter surface was fixed at  $1\mu m$ . The minimum clearance h between the surfaces was varied as 0.1, 0.05, 0.02, and 0.01µm. Temperature of ambient atmospheric air and temperature of all walls are set at 300K. Mean free path of air molecules is  $\lambda$ =0.065µm. The Knudsen numbers calculated with h are Kn= $\lambda$ /h =0.65, 1.3, 3.25, and 6.5 for each h. Gas/surface interaction is modeled by the diffuse reflection model. The software program SMILE++ was used for computations.

The pressure distributions along the dimple columns are shown in Fig. 2. The solid lines show the pressure on the counter surface along the symmetry plane. The dashed

lines show the pressure along the outer dimple column. In the case of narrower side flat region of  $L_5=1\mu m$ , the pressure along the outer dimple column is much smaller than that along the inner dimple column. The high average pressure successfully appeared over the first dimples next to the inlet of the lubrication system. But, in the second and latter dimples, the minimum pressure became lower and the pressure depression relative to the atmosphere at the position of the minimum pressure became as much as the pressure rise relative to the atmosphere at the position of the maximum pressure. Therefore, the average pressure over the region of the second and latter dimples became much smaller than the average pressure over the region of the first dimple. This pressure decline may be caused by the leakage of gas from the side of the lubrication system.



Fig. 1 Geometry of surfaces

Fig. 2 Pressure distribution

# 3. Achievements

We demonstrated that the side leakage leads to decrease of the average pressure distribution between the slider and counter surfaces by performing 3D simulations considering the side exit to the atmosphere. This is the important first step to solve the problem of side leakage to obtain the high pressure preferable for lubrication system.

4. Summaries and future plans

In 3D simulation of the lubrication system, the pressure generation and the side leakage were reproduced successfully. In the next year, we will investigate the side leakage to the atmosphere in detail for practical use of this lubrication system.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] <u>Pavel Vashchenkov</u>, Yoshiaki Kawagoe, Shigeru Yonemura: DSMC computations of 3D Flow in Textured Micro/Nano Channel, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, (2018), CRF-89, pp. 184-185.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J18L051
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目(発展)

# ナノ構造機能材料を用いた多機能ナノデバイス作成とその応用に関する研究 Research of Application of Highly Functional Nano Devices Fabricated by Using Functional Nanomaterials

高橋 庸夫\*†,寒川 誠二\*\*†† 有田 正志\*,大野 武雄\*\*\*,福地 厚\*,李 遠霖\* \*北海道大学情報科学研究科,\*\*東北大学流体科学研究所 \*\*\*大分大学理工学部 †申請者,††所内対応教員

# 1. 研究目的

まもなく Moore の法則の終焉を迎え,現在進展著しい AI (ニューラルネットワーク) 技術の停滞が予測される中で,これを打破し更なる高性能 AI を実現するため,共同して抵抗変化メモリ (ReRAM) などの研究を進める.特に,東北大流体研が持つ低損傷の中性粒子 ビームを用いた手法により形成した ReRAM 等を,北大が有する評価技術用いて評価し,ニューラルネットワーク構築に耐える ReRAM デバイスの実現を目指す.

#### 2. 研究成果の内容

流体研の独自技術である、中性酸素ビームによる酸化物形成法を用いると、極めて薄い絶縁層を有し、且つ損傷のない Cu/TaO<sub>x</sub>/Pt ReRAM が作製できる.ニューラルネットワーク 用アナログデバイスとしての高精度化を目指すためには、動作メカニズムを解明し、構造な どの最適化が不可欠である.そこで、北大の独自技術である、透過電子顕微鏡(TEM)内その

場観察法により,サンプルの断面からの高解像度観察を 行いながら電気的特性を評価することを目指している. しかし,用いている TaOx 層は極めて薄く,通常の方法 では観測が難しいことが判明した.図1(a)は従来型の評 価サンプルの形状模式図で,イオンビーム加工でナノス ケールの ReRAM に切り分けられている.TEM 内でピ エゾ駆動された電極針を ReRAM の上部電極に当てて電 流を流す際には,基板 Si に電流を流す構造になっていた. しかし,この構造では,基板 Si も薄層化されるために抵 抗が極めて高くなり,TEM 内で ReRAM 素子が良好な 動作をしないことが判明した.そこで,図2(b)の改良型 のサンプルに加工する技術を開発した.この構造では, 電流は下層金属電極を通って横に抜けるので,高抵抗の 半導体 Si を通らない.実際に,模擬構造のサンプルを作 製して,この動作の検証を行い低抵抗化できていること



図 1: TEM 内評価サンプルの 構造. (a)従来型, (b)改良型

を確認した.

この手法を流体研のサンプルに適 用する前に, Cu/MoO<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiN/Pt 構造の ReRAM 構造を用い, TEM の中で繰り返し Set-Reset 動作をさ せた場合の評価を行った.評価した 初期から 33 サイクル目までの代表 的な TEM 観察像を示す. この間, 良好な抵抗変化動作が繰り返されて いるが,赤丸の領域に変化が見え, 抵抗変化の原因となるフィラメント 形成が起きたことがわかる. 10 サイ クル目で,大きな構造変化が起き,



図2: Cu/MoO<sub>s</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiN/Pt 構造の ReRAM に おける繰返しメモリ動作中の構造観察

その後も引き続き抵抗変化は生じるが、電気的な特性評価だけでは観測できないひとつの劣 化機構が観察されたと考えられる.

#### 3. 研究目標の達成状況

抵抗変化メモリのアナログ多値特性実現とその極低消費電力ニューラルネットワーク応用 を目指して、低損傷の中性粒子ビームを用いた手法により形成したナノ構造 ReRAM の電子 顕微鏡内での特性評価のための測定技術を新たに開拓した. 電気的な特性評価だけからでは 見極めることが不可能な劣化の兆候やその対策も検討可能となることも明らかになった.

4. まとめと今後の課題

今後の ReRAM の評価に向けて,新たな評価法が開拓できたと考えている. 改善を始動し ている. アナログメモリ特性に関しては,ニューラルネット素子実現に向けて寒川研究室と 共同して進めていく.

5. 研究成果(\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- <u>有田正志, 福地厚, 高橋庸夫</u>: ナノスケール ReRAM デバイスの In-situ TEM 解析― ナ ノプローブによる電気測定と微細構造変化―, 表面と真空, Vol. 61, No. 12, (2018), pp. 766-771.(依頼執筆)
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[2] Y. Li, A. T.-Fukuchi, M. Arita, H. Andoh, T. Morie, Y. Takahashi, and S. Samukawa: Multilevel memory characteristics of Ta/Ta<sub>2</sub>O<sub>5-6</sub> ReRAM for the Application of Neural Network, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-48, pp. 98-99.
  - [3] <u>李遠霖,勝村玲音,M.K.Grönroos,福地厚,有田正志,高橋庸夫</u>,安藤秀幸,森江隆: Cu上部電極を用いた Ta<sub>2</sub>O<sub>5-8</sub>抵抗変化型多値メモリ特性の実現,秋季応用物理学会,名古屋 国際会議場,(2018), 20a-222-4, 2018.9.20.
  - [4] 石川竜介,有馬克紀,福地厚,有田正志,高橋庸夫,工藤昌輝,松村晶:低電流動作時の Cu/MoOx/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> CBRAM における Cu-CF の観察,春季応用物理学会,東工大,(2019), 10p-W641-17, 2019.3.10.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J18L052
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	2nd year

Application of a Data Assimilation Methodology to a Numerical Simulation of Pedestrian Flow

Fumiya Togashi\*†, Takashi Misaka\*\* Rainald Löhner\*\*\*, Shigeru Obayashi \*\*\*\*†† \*Applied Simulations Inc. \*\*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology \*\*\*College of Science, George Mason University \*\*\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

## 1. Purpose of the project

A data assimilation methodology has been proactively developed in atmospheric modeling. Since atmospheric conditions change drastically over time with even a tiny change of initial conditions, it is inevitable to utilize measurements to improve the accuracy of a prediction. The methodology must be useful in the prediction of pedestrian flow that shares common difficulties such as a sensitivity of the initial conditions and difficulty in the prediction of human motion. The objective of this project is to apply a data assimilation methodology that has been developed at IFS, Tohoku University to our numerical simulation code to improve the accuracy of pedestrian flow simulation

2. Details of program implement

Ensemble Kalman Filter (EnKF), which is a type of the data assimilation methodology, was applied within a computational pedestrian and crowd dynamics simulation tool. The co-author at IFS has developed the EnKF source code, while the computational pedestrian and crowd dynamics code has been developed by the co-author at George Mason University. The codes have been incorporated by the author.

The real observation data of pilgrims around the Kaaba was utilized to improve the accuracy of the numerical simulation. Figure 1 shows the snapshot of the numerical simulation of pilgrims at the Kaaba. Pilgrims enter from a gate on the left, walk around the Kaaba 7 times, and, after Sunna prayer, exit at the gate on the right. EnKF was applied to improve 11 parameters: desired pedestrian velocity, variability of velocity, relaxation time to achieve desired velocity, variability of relaxation time, variability of pedestrian radius, pushiness (min/max), comfort zone, the pilgrim's will force, and tolerance to high densities. 32 parameter sets were prepared as the initial ensemble members. The total computational time was about 20 hours using 576 cores of the SGI ICE X system. Figure 2 shows the comparison of the pilgrim density along the distance from the Kaaba for the observation, the computed result using the original parameter set, and the computed result using the estimated parameter set. The computed result using the estimated parameter sets by the EnKF shows an excellent agreement with the observation.



Figure 1 : Snapshot of the numerical simulation of pilgrims around the Kaaba using the new parameter set.



Figure 2 : Comparison of the pilgrim density along the distance from the Kaaba between the observation (triangle) and the computation using the original parameter set (diamond), and the computation using the estimated parameter set (circle)

3. Achievements

EnKF was applied to estimate the empirical parameters required by the pedestrian and crowd dynamics simulation code PEDFLOW. The new runs using the estimated parameter set provided much closer results to the experimental data than the results using the original parameters. The application of EnKF to pedestrian flow simulation will be a useful approach for future pedestrian flow simulations.

4. Summaries and future plans

A numerical simulation code for pedestrian flow which has a data assimilation capability has been developed. The demonstration on unidirectional experimental pedestrian flow was performed in the first year. In second year, the methodology was applied to realistic pedestrian flow prediction. In both scenarios, the new runs using the estimated parameter set provided much closer results to the observed data than the results using the original parameters. The advantage of the EnKF is the capability of dynamically utilizing the observation data. Parameters, initial conditions, and boundary conditions are updated whenever the new observation data is available. Thus the accuracy of the numerical simulation keeps improving along the environmental conditions such as season, weather, time, temperature, etc.

5. Research results (\* reprint included)

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

- Fumiya Togashi, Takashi Misaka, Rainald Löhner, Shigeru Obayashi: Using ensemble Kalman filter to determine parameters for computational crowd dynamics simulations, *Engineering Computations*, Vol. 35, No. 7, (2018), pp. 2612-2628. https://doi.org/10.1108/EC-03-2018-0115.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- \*[2] <u>F. Togashi, T. Misaka, R. Lohner</u>, and S. Obayashi: A Data Assimilation Application to Computational Crowd Dynamics Simulation, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, Japan, (2018), CRF-2, pp. 4-5.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18L063
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	3rd year

Application of Data Assimilation to Aviation Safety System

Junho Cho\*, Takashi Misaka\*\*, Shigeru Obayashi\*\*\*†† Kwanjung Yee\*, Shinkyu Jeong\*\*\*\*† \*Department of Aerospace Engineering, Seoul National University \*\*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology \*\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University \*\*\*Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University †Applicant, ††IFS responsible member

# 1. Purpose of the project

Air traffic has been forecasted to be the largest on record in this year and has grown steadily by about four percent every year. The airport capacity has reached its limit with the steady increase of aviation demands. Thus a method for improving the efficiency of airport capacity has been required. Considering the environment of an airport, it is possible that a pair of vortices is generated in the atmosphere where another pair of vortices from the preceding aircraft still exists. For example, runways are parallel so that a pair of vortices from an aircraft moves to another runway path due to crosswind. Also, the flight paths may cross each other. In such cases, the vortices of the following aircraft are influenced by interacting with the other vortices remained in the atmosphere. Therefore, it is necessary to clarify the transport and decay mechanism of the vortices considering the interaction with another pair of vortices.

# 2. Details of program implement

This study analyzes wake vortex transport when multiple wake vortices are located in close proximity to find out issues associated with wake vortex interaction. The issues are mutual induction for transport of multiple wake vortex, vortex linking and decay process, vortex lifespan, and finding the characteristics of multiple wake vortex interaction cases. The two wake vortex pairs are located in the same lateral position except for vertical displacement. Vertical displacement was set from 0.5 to 3 times the initial vortex spacing. This is arbitrarily set by assuming that the aircraft wake vortices move to other places because of various factors such as crosswind, or the crossing of the flight path resulting in the interaction among vortices. The wake vortex circulation strength is 530 m<sup>2</sup>/s and 360m<sup>2</sup>/s considering heavy and medium size of aircraft. The vortex spacing is set to 47.1m. and the core radius was set to  $r_c = 2.8$  m. The statistical steady state isotropic turbulence was generated using the SNGR and artificial external forcing. The velocity profile of multiple wake vortex was added to pre-calculated turbulence field.

# 3. Achievements

During the interaction of two pairs of wake vortices, instability develops and transports and decays. Therefore, analysis of the energy spectrum according to the wave spectrum can be used to quantify and analyze changes in long- and short-wave instability over time. Figure 1 a-c) shows the wave spectra of longitudinal mode energy over time. The dashed line represents the rigid motion, which means average longitudinal averaged flow, and the initial 64 modes from wavelength 8 to

0.125 times the initial vortex spacing were analyzed over time. Crow, Crouch, and Widnall type instability were visualized and compared according to the previous studies in each wave component. The development of long-wave (Crow type) instability, a key feature of single wake vortex interactions, develops when interactions between counter-rotating vortexes in wake vortex pairs are suppressed. When interactions between two wake vortex pairs occur, medium-wave (Crouch type) instability increases when interaction between wake vortices occurs somewhat away. The short-wave (Widnall type) instability increases dramatically when co-rotating vortices interact with each other in close proximity.



Figure 1 : a-c) Longitudinal modal energy evolution according to non-dimensional time; d) Classification for two-vortex-pair wakes

Behavior characteristics of wake vortex interaction cases can be classified into merging, strong interaction and forced interaction, and weak interaction. The behavior characteristics according to the initial parameters of the wake vortex interaction cases are classified and shown in Figure 1 d). In the wake vortex interaction analysis, the behavior characteristics are dominantly influenced by the vertical distance, and the vertical distance by which the behavior characteristics are classified according to the circulation ratio is changed.

# 4. Summaries and future plans

Among vortices generated from different aircraft, the interaction can happen for various reasons such as overlapping routes or due to crosswind. Three different characteristics depending on the distance between two pairs of wake vortices are found. The upper wake vortices were initially moved toward each other and showed a fast descending speed, while the lower wake vortices were initially spread to both sides and showed a slow descending speed. The upper wake vortex was dissipated faster by the effect of the wake vortex below. Two pairs of vortices are merged into single strong vortex when the distance is half of initial vortex spacing. The positions of upper and lower vortex pairs are switched without being merged and rapid decay by formation of vortex ring when the vertical displacement is up to twice of initial spacing. When the vertical displacement is three times the initial spacing, rapid dissipation of the upper wake vortex occurs, and the lifespan of lower wake vortex increased because the spacing becomes distant.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- \*[1] Junho Cho, <u>Takashi Misaka</u>, Shigeru Obayashi, <u>Yee Kwanjung</u>, <u>Shinkyu Jeong</u>: Flowfield reconstruction from surface pressure using data assimilation method, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, Japan, (2018), CRF-5, pp. 10-11.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J18L064
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1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.本目的を達成する ために、カメラの分光感度特性の予測方法を数値解析、実験の観点から議論する.

#### 研究成果の内容

本研究では本手法による分光感度特性が予測可能かを評価するために、赤外線カメラに入射す る赤外線量を評価する解析モデルの構築をした.カメラの分光感度特性およびふく射性媒体の吸 収係数の波長依存性を考慮したモデルを構築した.構築したモデルを用いて赤外線吸収フィルム を用いた黒体炉の校正実験を数値解析的に評価した.図1に校正実験の概念図を示す.校正実験 では黒体炉と赤外線カメラの間に赤外線吸収フィルムを設置する.



図1:赤外線吸収フィルムを用いた校正実験の概念図

フィルムによる赤外線吸収によって赤外線カメラは黒体炉の実際温度より低いみかけの温度 で検出される.黒体炉から放出される赤外線はフィルム及び、カメラの分光感度特性によって減 衰して赤外線カメラに入射される.この赤外線量はフィルムを挟めない時の、黒体炉が見かけの 温度であるときに赤外線カメラに入射される赤外線量と同一であるとも言える.カメラの感度特 性をパラメータとして評価する時、上述した2つの赤外線量の差が0となる時の感度特性の条件 が実験で予測したい赤外線カメラの感度特性となる.本研究では本校正実験を数値解析的に評価 することで、本実験手法によってカメラの感度特性が把握可能かどうかを評価した.解析実験で は赤外線カメラの分光感度特性がガウス分布上に広がっていると仮定した.そして、上述した2 つの赤外線量の差を目的関数として評価を行った.図2に本解析における目的関数の分布を示す. 保目的関数が有用であるかどうかを評価するために、解析実験で仮定したパラーメータの真値の 位置も示す.図2に示されるように、今回の実験系では目的関数が複数の局所解を有しているこ とが分かり,真値を予測することは難しいことが分かった.以上のことから,本実験系では赤外 線カメラの分光感度特性を一義的に把握することは難しく実験系の手順を改善する必要性がある と考える.



Average  $\mu$  [ $\mu$ m]

# 3. 研究目標の達成状況

本研究期間ではカメラの分光感度特性および、ふく射性媒体の吸収係数の波長依存性を考慮した数値解析モデルを構築した.本研究の最終目的はカメラの分光感度特性を把握し、赤外線カメラの性能を向上させることである.本研究期間では構築したモデルを用い、カメラ性能を把握する校正実験の具体的な方法について数値解析的に議論することができた.今後は分光感度特性をより正確に把握できる校正実験について議論していく予定である.

#### 4. まとめと今後の課題

本研究期間においては、考案した校正実験を数値解析的に評価した.今回の実験系では赤外線 吸収フィルムを一枚しか用いておらず目的関数の精度が低下していると考える.今後は複数枚の 吸収フィルムを用いた校正実験を数値解析的に評価し、校正実験における目的関数の精度向上を 図っていく.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- T. Kogawa, E. Shoji, J. Okajima, A. Komiya, <u>S. Maruyama</u>: Experimental evaluation of thermal radiation effects on natural convection with a Rayleigh number of 10<sup>8</sup>–10<sup>9</sup> by using an interferometer, *Int. J. Heat and Mass Trans.*, Vol. 132 (2019), pp. 1239-1249.

## 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等

- \*[2] <u>T. Kogawa</u>, J. Okajima, A. Komiya, <u>S. Maruyama</u>: Development of accurate temperature method by infrared camera, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-26, pp. 52-53.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

図2:校正実験から作成した目的関数の分布(赤い四角は求めたい真値を示す.)

課題番号	J18L069
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目(発展)

## 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

平成 30 年度は、水中ストリーマ進展後の気泡チャネルの成長・収縮崩壊過程について可 視化を行った.図1にストリーマ気泡チャネル生成から崩壊までの連続写真を示す.写真は フレーム間隔1 µs で連続 255 枚撮影した.ストリーマ進展は電圧印加後2 µs 程度で終了す るが、9 µs まではストリーマ生成時の熱で膨張を続ける.その後、ストリーマ気泡チャネル は収縮を始め崩壊を始めるが、電極近傍のストリーマの起点周辺では、気泡は周囲の気泡チ



Fig.1 A series of shadowgraphs of positive streamer propagation taken using a laser backlight with an exposure time of 50 ns at 1 Mfps at an applied voltage of 13 kV.

ャネルと合体しながら成長を続ける. 19 µs に電極近傍の気泡は最大となり,その後収縮に 転じる.一体化した気泡は,43 µs に崩壊しリバウンドをしながら微細化する.気泡崩壊時 に発生する衝撃波が水面で反射すると膨張波に変化するため,膨張波が通過すると残留気泡 のは膨張する.このような現象を繰り返し最終的に微細な気泡が残留することが明らかにな った.

# 3. 研究目標の達成状況

本年度は、水中放電による微細気泡生成過程の可視化に成功し、微細気泡が水中ストリーマによる気泡チャネルの成長・崩壊により生成することを明らかにした.これより、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、微細気泡の生成過程の可視化に成功したが、さらに帯電気泡の持つ特徴や挙動 について検証をし、プラズマが生成する微細気泡が何故安定して残留するのかなどの機構の 解明を目指す.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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・ロ頭発表等 なし
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
- (特許) なし
- (受賞) なし
- (マスコミ発表) なし

課題番号	J18L074
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

Upper Surface Blowing を利用した VS-TOL 機の提案とその空力特性 Proposal of VS-TOL Aircraft Concept using USB and its Aerodynamic Characteristics

> 川添 博光\*†, 大林 茂\*\*†† 坂本 憲一\*, 西村 宗\*, 奥村 太貴\* \*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

将来のファミリーユース V/S-TOL 機の開発を目指している. そのフィジビリティスタディ として USB 機能を有する V/S-TOL 機の主翼(NACA0015)について, CFD 解析と風洞試験で その空力特性を評価する.

# 2. 研究成果の内容

#### 2.1 CFD による成果

計算モデルは、定常飛行及び垂直離着陸時の2パターンである.それぞれ半裁モデルで、ファンの代用として体積力を投入する Disc を片翼に2つ設置した.これは USB 推力及び VTOL 装置として作動する.定常飛行時の Disc は翼上面の接線に対して垂直とし、垂直離着陸時は Disc 下端を支点として後方に 90°回転させた.計算条件を表1に示す.

 $\cdot$  STOL

定常飛行時の揚抗比を図1に示す. Disc 位置が前縁から 0.1C(C:Chord)で *Co*最小となるため *L/D*は最大となる. *C*<sub>L</sub>は USB 効果により向上し,また Disc の後方移動に伴い増加する. • VTOL

速度ベクトルを図2に示す.地面からの高さ0.5Cにおいて,地面に衝突した噴流は左右に 分かれ,中央部とファン間で一対の渦が形成される.この現象により翼下面の圧力が減少し, 揚力が低下することがわかった.



図 2 速度ベクトル 上: 0.5C 下: 2.0C

#### 2.2 風洞試験による成果

低速風洞を用いて,STOL 形態の主翼模型にか かる空気力を計測した. *Re*=9.87×104(代表長さ: 翼弦長)とし,迎角 *a*=-6°~10°(2°刻み)で計 測を行った. 流速は 5m/s である.

#### ・風洞試験模型の設計と製作

**STOL** 実験機「飛鳥」の主翼データをベースに 風洞試験模型を設計,製作した. USB 装置 (ファ ン) 搭載位置は CFD 結果を基に前縁から 0.1C と した. 図 3 に風洞試験模型を示す.

#### • STOL

 $C_L$ は迎角が増加すると線形的に上昇し、ファン ON で USB 効果により増加する (図 4). このとき  $a = 4^{\circ}$  で  $\Delta C_L = 0.11$  の上昇となる.





#### 3. 研究目標の達成状況

CFD 解析により、STOL 形態における翼上面へのファンの最適取り付け位置を明らかにした. この結果を基に風洞試験模型を設計,製作して試験を行い、 $a=-6^{\circ}\sim10^{\circ}$ における空気力 データを得た.また、VTOL 形態における CFD 解析も実施し、地面からの高さが影響する噴 流の渦形成について明らかにした.これにより V/S-TOL 機開発における初期目標となる有益 な情報を得た.

#### 4. まとめと今後の課題

V/S-TOL 機の主翼模型について CFD 解析を行い,STOL 及び VTOL 性能について空力特性を評価した.また,STOL 性能評価の結果から風洞試験用モデルを設計,製作して風洞試験を行い,USB 効果による空力特性を明らかにした.

今後の課題として,STOL性能の追加評価及びVTOL性能を持つ模型の設計,製作とその風 洞試験がある.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- \*[1] <u>So Nishimura, Taiki Okumura, Kenichi Sakamoto, Seiichiro Morizawa, Hiromitsu Kawazoe</u>, Shigeru Obayashi: Feasibility Study on a V/S-TOL Aircraft with Upper Surface Blowing, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-8, pp. 16-17.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

課題番号	J18L076
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2年目

# MHD 攪拌を活用した水素生成プロセスの高度化 Development of Hydrogen Production Process by MHD Mixing

岩本 悠宏\*;, 高奈 秀匡\*\*;;

# \*名古屋工業大学 電気・機械工学科, \*\*東北大学流体科学研究所

**†**申請者, **††**所内対応教員

## 1. 研究目的

水素エネルギー社会の形成に向けた機運が高まる中,再生可能性エネルギーを用いた水素 生成プロセスの高度化が期待されている.そこで本研究では、電気化学分野で注目されてい る水電解プロセスにおける MHD 攪拌効果を電磁流体力学の観点から数値解析的に明らか にし、水素生成プロセスの高度化を目指すとともに、電磁流体力学と電気化学の分野横断型 新学術領域の開拓を目指す.  $\varphi = -0.5$  [V]

## 2. 研究成果の内容

水電解プロセスにおける MHD 攪拌効果を電磁流体力学の観点か ら数値解析的に明らかにするため に, MHD 効果と電気二重層 (Gouy-Chapman model)を考慮 した混相流方程式を構築した.また, 初期解析として,電解溶液内部(電 解溶液は静止系として仮定)に複数 の気泡を想定した誘電率の異なる 剛体球が存在する系(図1参照)の 解析を行った.方程式系は,



図1:解析領域

Gouy-Chapman model を考慮したポテンシャル方程式,マクスウェル方程式,イオン移流 方程式であり、これらを連成解析することで静的過程における MHD 効果を調査した. 図1 に解析領域を示す.解析領域は軸対象とし、40 × 40  $\mu$ m<sup>2</sup>の領域に、半径 4  $\mu$ m の気泡(剛 体)が2つ存在するものとした.気泡の中心間距離を、10、16、24  $\mu$ m と変化させた.また、メッシュ数は、150 × 150 である.

図2に電解溶液に作用するローレンツ力分布の解析結果を示す.電気泳動によりカチオン とアニオンの濃度は、電極近傍で大きくなる.また、電解溶液と気泡との誘電率の差により 気泡表面付近で電気ポテンシャルが高くなる.これらの空間的に非平衡なポテンシャル分布、 特に電極側の気泡界面のポテンシャルが高くなることで、ローレンツ力は気泡を電極から離 脱する方向に作用することが明らかとなった.特に、気泡と電極間の距離が短いほど、この 気泡離脱効果は大きくなる.以上の結果から、静的過程の水電解における MHD 効果を明ら かにした.



図2:電解溶液に作用するローレンツカ分布(気泡中心間距離:(a)10 µm, (a)16 µm, (a)24 µm)

3. 研究目標の達成状況

1年目において、水電解プロセスにおける MHD 攪拌効果の理論体系を調査し、MHD 効果と電気二重層(Gouy-Chapman model)を考慮した混相流方程式系を構築した.また、静止系における混相流での電気ポテンシャル分布を計算し得るコードを開発した.2年目では、1年目に開発した解析コードをさらに発展させ、イオンの移流方程式を混相流系に発展させ、静的過程における水電解での MHD 効果を明らかにした.以上より、2年目の研究計画を十分に達成した.

4. まとめと今後の課題

今後は開発した解析コードをさらに発展させ、イオンの拡散方程式とローレンツ力を考慮 したナビエ・ストークス方程式を連成解析することで、水電解プロセスにおける MHD 攪拌 効果を電磁流体力学の観点から数値解析的に明らかにする.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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・ロ頭発表等
- \*[1] <u>H. Mi</u>, <u>Y. Iwamoto</u>, <u>Y. Ido</u> and H. Takana: Distribution of Electric Potential Around a Spherical Bubble Considering Electric Double Layer, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS18-83, pp. 1020-1021.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18L077
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

# 飛翔体周りの非定常流れ場に対する密度計測 The Quantitative Density Measurement of Unsteady Flow around a Projectile

太田 匡則\*†, 永井 大樹\*\*†† 栗原 健\*, 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

実験モデルを自由飛行させることができる弾道飛行装置(バリスティックレンジ)ではス ティングなどの支持部の影響を排除した実験を行うことができ、衝突試験や空力試験など 様々な目的で使用されている.自由飛行試験ではこれまでにシュリーレン法による可視化計 測や圧力センサによる計測などが行われているが、飛翔体まわりの3次元的な密度計測は殆 ど報告例がない.弾道飛行装置では一般的な風洞のように模型を支持する必要がないため、 飛翔体の後流領域における現象を計測することも可能である.そこで本研究では背景設置型 シュリーレン(Background Oriented Schlieren)法を利用して、後流領域を含む飛翔体ま わりの非定常密度場を3次元的に計測することを目的として計測実験を試みた.

# 2. 研究成果の内容

本実験では図1に示すように、12台のデジタルカメラ(Canon EOS Kiss Digital X3,有 効画素数4752×3168 pixels)を試験部内に設置した.撮影のためのレンズは通常の望遠ズ ームレンズ(SIGMA 70-300mm F4-5.6 DG MACRO)を利用した.背景画像は縦方向に青 色,横方向に赤色の格子を配したグリッドパターンとし、背景画像の後方から飛翔体の通過 にタイミングを合わせて白色 LED によって照射される.図2に、これまでに取得すること



図1:多方向同時撮影系の概要



図2:非定常密度場の3次元再構成結果の例

ができた3次元再構成結果の一例を示す.飛翔体は直径 15mm の球であり,飛行マッハ数 は約1.5 である.同図は等密度面表示によって後流領域の3次元的形状を示している.今年 度は計測精度の更なる向上を目的として,LED 光源の改良と,撮影のための新たなトリガ システムの構築を行ったが,十分な計測データを取得するまでには至らなかった.

3. 研究目標の達成状況

本研究では、従来のシュリーレン法による定性的な計測から BOS 法を利用した定量的な 密度計測へ発展させること、非定常流れ場の3次元密度場の取得を実現し、飛翔体まわりの 密度場を3次元的に捉えることを目標として取り組み、前節の図2に示す通り、これを達成 することができている.

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次元密度計測のための計測システムの構築をまずは実現することができた.これまでに得られた実験データ数が限られている. これは、計測システムの設置と調整に時間を要すること、本計測系の撮影可能領域が狭く、 実験毎に生じる、飛翔体の速度および弾道のわずかなずれの影響が大きく、実験成功率が低くなってしまっていることによる.このため、今後は実験模型の形状、サイズ、トリガシステムの改良などを進めて、より高精度かつ、高効率での定量密度計測の実現を目指す.

- 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
- M. Ota, K. Kurihara, K. Ishikawa, Y. Ishimoto, T. Nagashima, T. Inage, T. Ukai, K. Ohtani, H. Nagai: Three-Dimensional Density Measurement in the Ballistic Range, *Proceedings* of the Eighteenth International Symposium on Flow Visualization, Zurich, (2018), No. 196, pp. 1-6.
- \*[2] <u>K. Kurihara, K. Ishikawa, Y. Ishimoto, T. Nagashima, M. Ota, T. Inage</u>, H. Kiritani, K. Fujita, K. Ohtani, H. Nagai: Quantitative Density Measurement of Unsteady Flow Field around the Projectile, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-72, pp. 150-151.
- \*[3] <u>太田匡則</u>, <u>廣瀬裕介</u>, <u>石川和樹</u>, <u>石本祥之</u>, <u>永島拓己</u>, <u>矢作祐輔</u>, <u>藤田一輝</u>, <u>稲毛達朗</u>, 桐 谷英樹, 藤田昴志, 大谷清伸, 永井大樹: 弾道飛行装置における3次元密度計測, 平成30年 度航空宇宙空力シンポジウム, 山口県, (2019), No. 2L7, pp. 1-2.
- 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	J18L087
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year

Mathematical Modelling of Nanoparticles Production in Thermal Plasmas

Pierre Proulx\*† Hidemasa Takana\*\* †† \*Université de Sherbrooke, Canada \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective is be to compare different moments methods (QMOM, EQMOM, and others) that enable to condense nanoparticles in the tail of a plasma and further include the circulation of these nanoparticles including possible evaporation of some nanoparticles when they recirculate in the flow separations, a problem which was not solved in our previous models.

2. Details of program implement

The result of the collaborative work has been presented at the ICFD 2018, Sendai by Maxim van Cappellen and here von Karman Institute supervisor Silvania Lopes in collaboration with the Takana and Proulx. Among the difficulties that are frequent in the modelling of nanoparticle nucleation and growth in a thermal plasma reactor is that the presence of recirculations in the flow fields entrains nanoparticles from colder regions where they grow through surface growth to hotter regions where the clusters may experience evaporation. Such a situation frequently leads to instabilities due to non-physical moments distributions. The model proposed in this work used a technique where the order of the moments was selectively chosen in order to satisfy a physical moments distribution. One of the important results of the collaborative work is shown in the following figure.



1.00 2.94 5.88 8.82 11.75 14.69 17.63 20.57 23.51 26.45 29.39 32.32 35.26 38.20 41.14 44.08 47.02 49.96 52.89 55.83  $D_{vot} = \left[\frac{604}{2}\right]^{\frac{1}{2}}$  (nm)



Figure 1 : Comparison of the nanoparticle production in a thermal inductively coupled plasma using the novel method for taking into account condensation during the recirculation of the flow.

3. Achievements

A novel method for controlling the numerical convergence of the model for predicting the nanoparticles size and morphology in a thermal plasma has been proposed and implemented and shows very stable numerical properties.

4. Summaries and future plans

The applicant's group presented a second talk at ICFD-2018 in Sendai than could result in further collaborations between the applicant and professor Takana. The contribution of the applicant's group in the use of open-source CFD developments, in particular for multiphase flows and Population Balance Modelling is clearly of interest for both groups since Takana's group at the IFS has a very strong background in the development of technologies where multiphase flows are involved and are not limited to the application of thermal plasmas or nanoparticles. The use of OpenFOAM for fluid dynamics and OpenQBMM for Population Balance Modelling has been discussed thoroughly during the period of the collaboration.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- \*[1] <u>Van Cappellen M., Proulx P., Lopes S.</u>, Takana H. : Modeling Nanoparticle Synthesis in an ICP Reactor Using QMOM, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2018)*, Sendai, Japan, (2018), CRF-84, pp. 174-175.
- [2] <u>St-Pierre-Lemieux G., Askari E., Groleau D., Proulx P.</u>: Modeling of Non-Newtonian Flow in Inverted Cone Foam Breaker, *Proceedings of the 15th International Conference on Fluid Dynamics (ICFD2018)*, Sendai, Japan, (2018), OS5-2, pp. 486-487.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18L088
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	3rd year

Aeroacoustics of Low Reynolds Number Flows Via Dynamic Hybrid RANS/LES and Stochastic Noise Generation and Radiation

Adrian Sescu\*†, Xiao Wang\*\*, Joshua Blake\*, Shanti Bhushan\*\*\*, David Thompson\* Yuji Hattori\*\*\*\*††

\*Department of Aerospace Engineering, Mississippi State University Center for Advanced Vehicular Systems, Mississippi State University \*\*\*Department of Mechanical Engineering, Mississippi State University \*\*\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

# 1. Purpose of the project

The progress on the application of the coupling between hybrid RANS/LES method and stochastic modeling to aeroacoustics calculations is reported here. Within this approach, the low frequency content of the acoustic source is predicted via hybrid RANS/LES approach, while the high frequency content, representing contributions from unresolved flow scales, will be modeled using stochastic modeling. The research was focused on two sets of simulations: the sound generation by a cylinder at low Reynolds number, and the prediction of noise from an axisymmetric jet. The numerical results from the former test case were compared to results obtained from direct numerical simulations at different Reynolds numbers.

# 2. Details of program implement

The acoustic signature of a cylinder in flow at different Reynolds numbers have ben studied extensively using a number of hybrid RANS/LES methods and DNS. As an example, the sound directivity plot in figure 1 shows that the pressure fluctuations peak in the wake at  $\theta = 0$ . The fluctuations are lowest upstream of the cylinder. Least-Square scheme seems to be the least effective in capturing the correct sound directivity among different models, especially when applied in the framework of MILES, HRL and DHRL that show a considerable under-prediction. The results obtained using the OGRE scheme are much closer to the DNS data. The MILES solution matches the DNS solution very well. The HRL model underestimates, while SST and DHRL overestimate the sound directivity. Note that numerical scheme has limited impact on the propagation of sound pressure predicted by SST model.

Progress on the validation of the linearized Euler equation solver was also achieved;



Figure 1: Directivity of sound pressure at r=80D for  $\Delta \vartheta = 15^{\circ}$  obtained using different turbulence models.

this solver will be used to predict the radiation of sound generated by a jet to the farfield. The case of a co-rotating vortex system was investigated numerically by Bogey et al. [1] with the same LEE formulation and source terms as our current implementation, allowing a better comparison. Figure 2a shows the setup of the initial velocity distribution; conceptually, the co-rotating case produces a quadrupole sound distribution. Figures 2b and 2c show the dilatation field from Bogey et al. [1], with levels from -15 to +15 and preliminary results obtained from the current LEE formulation.



Figure 2: a) 2D Co-Rotating Vortex Setup; b) Dilatation Contours from Bogey et al. [1]; c) Dilatation Contours from our LEE solver.

[1] C. Bogey, C. Bailly, and D. Juve, "Computation of Flow Noise Using Source Terms in Linearized Euler's Equations," AIAA, vol. 40, 2002, pp. 235-243.

# 3. Achievements

In the third year, some momentum has been achieved in both research topics. Two conference papers have been presented at international conferences, and one abstract was presented at the most popular fluid dynamics meeting. One journal article was submitted, and there is currently effort on preparing the second article.

4. Summaries and future plans

As part as this project, one PhD student, residing at Mississippi State University, and one postdoc, residing at the Institute of Fluid Sciences, were involved in the research. The PhD student is currently working on his dissertation, with the topic being one of the research topics that were undertaken under this project. The PhD student will publish his work in two journal articles.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- \*[1] X. Wang, S. Bhushan, B. Manshoor, E. Luke, A. Sescu, Y. Hattori, D. Thompson, K. Walters: Dynamic Hybrid RANS/LES Assessment of Sound Generation and Propagation from Flow of a Circular Cylinder, 2018 AIAA/CEAS Aeroacoustic Conference, (2018), AIAA Paper 2018-3592.
- [2] X. Wang, S. Bhushan, B. Manshoor, E. Luke, A. Sescu, Y. Hattori, D. Thompson: Dynamic Hybrid RANS/LES Simulation of the Flow and Acoustic Fields of a Circular Cylinder, AIAA Journal, (2018), submitted.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [3] J. Blake, A. Sescu, D. Thompson, Y. Hattori: Enhancing Jet Turbulence and Acoustics via a Coupled LES - Stochastic Model, *Proceedings of the 15th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2018), OS14-4, pp. 780-781.
- \*[4] X. Wang, S. Bhushan, E. Luke, D. Thompson, A. Sescu, Y. Hattori: Aeroacoustics of Low Reynolds Number Flows Via Dynamic Hybrid RANS/LES and DNS, Proc. of the 18th Int. Symp. on Advanced Fluid Information, (2018), CRF-87, pp. 180-181.
- [5] J. Blake, A. Sescu, A., D. Thompson, and Y. Hattori: Continued Development of a Coupled LES-Stochastic Approach to Jet Noise Prediction, 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Atlanta, GA, (2018).
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J18L095
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2018 ~ March 2019
Project status	1st year (progressing)

Molecular Dynamics Simulation of Droplet Shearing

Akinori Fukushima\*†, Takashi Tokumasu\*\*†† \*Faculty of Engineering, University of Fukui \*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

The phenomenon of momentum and energy transfer between two different kinds of material is an important issue for both theoretical and applied fields. The transfer of momentum and heat between liquids and solids is a particular focus in a variety of fields of study. Moreover, as a result of developments in microfabrication, nano-scale mechanical devices can be realized, and the transfer of heat and momentum between liquids and solids on the nano-scale can therefore be studied. Among the various phenomena, we focused on liquid bridge shearing by solid walls. The dynamics of a liquid bridge is more complex than that of filled liquid, which has no liquid-vapor interface. In this study, we focus on effects of liquid-vapor interface onto the momentum and heat transport phenomena seen in the interface region. In the last year, we focus on the droplet shearing along the parallel direction of the interface and improve the channel size dependence of the shear stress on the wall. In this year, we focus on the argon droplet shearing phenomena by the solid walls as shown in next section and evaluate the shape of the interface.

2. Details of program implement



Figure 1: Simulation condition and its schematic image

In this study, we evaluate the dynamics of the liquid-vapor interface by micro scale and macro scale methods. The first one is molecular dynamics (MD) simulation and the later one is the simulator based on the Navier-Stokes (NS) equation and Cahn-Hilliard (CH) equation. Comparing results obtained by two methods, we will clarify whether the macroscopic scale method can be applied to the micro scale situations or not. The simulation procedure is shown as follows. At the first step, by changing the channel size, we make the droplet sheared condition and evaluate the shape of the interface by the function, Q, defined as follows,

$$Q(z) = \cos \theta_R(z) - \cos \theta_A(z)$$

Where z is the coordinate along the perpendicular direction of the solid wall,  $\theta_{\rm R}$  and  $\theta_{\rm A}$ 

are the advancing and receding angles defined in figure 1. The channel size is changed in 6 patterns, 5, 6, 7, 8, 9, and 10 nm. The liquid droplet is constructed by argon atoms. At the next step, parameters for NS and CH equations are set by adjusting the shape of the interface in the case that the channel size is in 10 nm. Using these parameters, the channel size dependence of the function, Q, by NS and CH equations is clarified.

## 3. Achievements



Figure 2: Simulation results of the shape of the interface. (a)NS and CH equations (b) MD simulation (c)Channel size dependence of the characteristic value,  $Q_c$ .

Figure 2(a) and 2(b) show the shape of the interface normalized by the channel size W and the the value of  $Q_c$ , which is Q at the position where z is zero in each cases. Normalized shapes obtained by NS and CH equations don't depend on the channel size. In the case of the MD simulations, normalized shapes are almost same and thus it can be said that results don't depend on the channel size. Moreover, both normalized results agree well, and the values of  $Q_c$  are almost same between two different simulations and increase with the channel size as shown in figure 2(c). From these results, it can be concluded that the dynamics of the liquid-vapor interface depend on the channel size and can be normalized by the channel size.

4. Summaries and future plans

In this study, we consider the condition that droplet shared by solid walls which moves along the perpendicular direction against the liquid-vapor interface and evaluate the shape of the interface by macroscopic and microscopic methods. As a result, the shapes of the interface obtained by two results agree well and can be normalized by the channel size and the characteristic value. In the future work, we will clarify the slip length and the static contact angle dependence of the shape of the interface and the effects of the interface dynamics on the friction force between the solid wall and the droplet.

- 5. Research results (\* reprint included)
- 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] <u>A. Fukushima</u>, <u>N. Fillot</u>, T. Tokumasu, <u>P. Vergne</u>: Molecular dynamics simulation of a nano droplet in a nm-order channel, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-52, pp. 106-107.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J18L098
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	基盤流体科学
研究期間	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2年目

# 離脱衝撃波脈動を利用した超音速飛行体の姿勢制御 Attitude Control of Supersonic Projectile by Detached Shock Pulsation

# 水書 稔治\*;,大谷 清伸\*\* 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

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ょ 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

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、初年度の実験結果を元に、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2. 弾道飛行実験装置による衝撃波脈動および模型飛しょう姿勢可視化計測実験系


(g)Shot#812 (Model 1-N)

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

研究目標(申請時の予想される結果)は、前向きキャビティ模型に旋転運動が生じ、慣性モー メントが発生することで飛しょう体の姿勢が安定する効果を得ること.また、模型本体に施した 小孔から発せられる噴流により模型本体の旋転が期待されたが、可視化画像の範囲においては、 明確な旋転は計測できなかった.

## 4. まとめと今後の課題

実験では、模型本体側面の小孔直径、設置数について変更を加えて再実験したが、いずれも旋転が明りょうに認められなかった.可視化範囲が約0.3mであり、旋転を確認する観測時間が小さいことが観測を困難にしていると推察された.CFDによる解析も含め、旋転を明りょうに計測するための計測時間間隔の見積が課題である.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 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] <u>Mizukaki, T.</u>, Ohtani, K., and Obayashi, S.: Attitude Control of a Supersonic Projectile by Pulsation of Bow Shock, *Proceedings of the Eighteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2018), CRF-73, pp. 152-153.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18L100
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

## 水面への単発パルス放電後の水中電荷移動の数値解析 Numerical Analysis on Charge Transport in Water after Single Pulsed Discharge to the Water Surface

## 上野 和之\*†, 佐藤 岳彦\*\*†† \*岩手大学理工学部, \*\*東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

空気中の電極から絶縁体容器内の水の水面に向かう単発パルス放電により与えられた電荷による電位が、電極から離れた位置において時間を遅れをともない上昇することが計測されているが、そのメカニズムは十分には明らかにされていない.本研究は、どのように電荷が水中で輸送されるのかについて理論および実験から解明することを目的としている.

### 2. 研究成果の内容

図 1 に実験装置を示す. 超純粋を直径 90 mmの容器に注入し,深さ10 mmとした. 容器中心の水面近傍に針電極を設置し, +7.5 kVを印加し放電させた. 電圧の変化 は、コンデンサーを接続した静電探針を水 中に挿入し、コンデンサーの電圧計測する ことで求めた. 数値解析は、ネルンスト・ プランクの式とイオンの質量保存則から 導出した拡散・泳動方程式からイオン数密 度の時間発展を解析した[1].



Fig. 2 Computational result of the potential change against time.



Aluminum plate(Earth electrode)





Fig. 3 Experimental result of the potential change against time.

図2に半径位置が10 cm の時の電位の時間変化の数値解析結果を示す.中心で与えられ た電荷により形成される電位が,時間と共に減少する結果が得られた.図3に示す実験結果 においても,電位が時間と共に減少する様子が示されている.今回は,容器の大きさや計測 位置,接地電極の配置などが数値解析と実験において同じではないため,定性的な比較とな ったが,いずれも時間と共に電位が減少する傾向が見られたことより,定性的に数値解析で 用いたモデルで理解できる現象が起きていると考えられる.

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、水中の電荷輸送機構を解明するために数値解析モデルと実験計測結果の比較 を行い、構築したモデルが定性的に実験結果を説明できる可能性を示唆できた.これより、 当初の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

本研究で得られた結果では、定性的な比較を行うことができたが、さらに定量的な検証を 行えるモデルの構築を検討したい.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[1] A. Sato, <u>K. Ueno</u>, and T. Sato: Numerical Analysis on Charge Transfer and Potential Change in Water after Single Pulsed Discharge to the Water Surface, *International Symposium on Application of High-voltage, Plasmas & Micro/Nano Bubbles (Fine Bubbles) to Agriculture and Aquaculture (ISHPMNB2018), Morioka, (2018), Abstract Book, pp. 95-96.*
- 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	J18L106
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目

# 回転円すいを用いた遠心力場における高粘度液体の揚水遷移

## Transition of Pumping-Up Flow Patterns with High Viscosity in a Centrifugal Force Field by Rotating Cones

# 足立 高弘\*†,秋永 剛\*,近江 春祐\*,金森 潤\* 岡島 淳之介\*\*†† \*秋田大学大学院工学資源学研究科,\*\*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

頂角を下にした円すいを水に浸し回転させると、円すい外表面を膜状流れが揚水される. 水より粘性の大きなニュートン流体では曵糸性の影響により、円すい外表面には糸状の揚水 が現れる.このとき、円すい外表面の揚水流には遠心力が作用するにも拘らず液が飛散する ことはない.膜状揚水から糸状揚水への遷移現象を利用して液体から液糸をうまく生成する 機構について調べる.一方で、高粘度であるが非ニュートン性を有する高分子流体の場合に は、分子の配向により液が揚水されない現象が見られる.そこで本研究では、ニュートン流 体と非ニュートン流体の両方について、回転数と粘度の変化に対して膜状揚水と糸状揚水の 発生条件を明らかにすること、及び揚水に必要な動力および周囲へ放出される液滴や液糸の 分布特性を明らかにすることが目的である.

## 2. 研究成果の内容

平成 30 年度は、作動媒体としてグリセリン水溶液を用い、粘度の変化および円すいの浸水半径に対して液膜流および糸状流の揚水が生じる揚水開始回転数を調べた.図1にその結果を示す.*d*は、円すいの浸水半径である.粘度が水に近い場合には液は膜状に揚水され、粘度が大きくなると揚水開始回転数の値が大きくなる.さらに粘度が大きくなると糸状に揚水される現象が観察された.浸水半径が増加すると、円すいの回転による遠心力が大きくな





$$Fr = 6.30 \times 10^{-3} \text{Re}^{1.11} (\text{d/L})^{-1.79}$$
(3)

るので、揚水の開始回転数は小さくなる.

この結果に対して、レイノルズ数とフルー ド数を式(1)、(2)のように定義し、無次元整理 式の導出を試みた.式(3)が、糸状揚水の場 合の無次元整理式であり、図2に示すように 整理式から算出される値は、実験結果と30% の誤差でよく一致している.

#### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、ニュートン流体と非ニュートン流体の両方について、回転数と粘度の変化に 対して膜状揚水と糸状揚水の発生条件を明らかにすること、及び揚水に必要な動力および周 囲へ放出される液滴や液糸の分布特性を明らかにすることが目的としていた.その中で、平 成 30 年度は、作動媒体としてはニュートン流体であるグリセリン水溶液を用いて実験を行 った.そして、膜状揚水と糸状揚水が起きる発生条件を明かにした.ただし、必要な動力や 周囲に放出される液滴や液膜の分布特性の特定や非ニュートン流体については調べるまで に至らなかった.全体の 20%程度の達成状況と考える.

4. まとめと今後の課題

今後は、揚水に必要な動力を調べる必要がある。特に、糸状揚水の場合には円すいの数本 の糸状流が揚水されるのみであり、揚水に必要となる動力が極端に小さい可能性が考えられ る.必要な動力が小さければ、本現象を用いて、繊維を作り出す装置の開発への途が開ける。

- 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- \*[1] J. Kanamori, T. Adachi, J. Okajima: Correlation of Rotation Rate, Viscosity and Immersed Diameter on the Threshold of Pumping-up Phenomena using Rotating Cones, *Journal of Mechanical and Production Engineering (IJMPE)*, Vol. 6, No. 10, (2018), pp. 51-55.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- \*[2] J. Kanamori, T. Adachi and J. Okajima: Transition of pumping-up flow patterns with high viscosity in a centrifugal force field by rotating cones, *Proceedings of the 18th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2018), CRF-27, pp. 54-55.
- [3] J. Kanamori, T. Adachi and J. Okajima: Correlation of rotation rate, viscosity and immersed diameter on the threshold of pumping-up phenomena using rotating cones, 397th International Academic Conference on Development in Science and Technology, Taipei, Taiwan, (2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18L107
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	1年目(発展)

## 殺菌用大気圧低温プラズマ照射による水中の電荷輸送機構 Mechanism of Charge Transport in Water by Irradiation of Cold Atmospheric Plasma for Disinfection

清水 鉄司\*†, 上原 聡司\*\*, 佐藤 旭\*\*\*, 佐藤 岳彦\*\*†† \*産業技術総合研究所 電子光技術研究部門, \*\*東北大学流体科学研究所 \*\*\*東北大学大学院工学研究科 †申請者, ††所内対応教員

### 1. 研究目的

院内感染が社会的に大きな問題となり、細菌のコントロールが強く望まれている.また, 抗生物質に対し耐性を持つ薬剤耐性菌が増加しているため,抗生物質に代わる新しい殺菌方 法が様々な分野で望まれている.その一つとして低温大気圧プラズマ照射が挙げられる.ほ ぼ室温で照射可能な低温大気圧プラズマは、必要な活性種を生成することができるため,抗 生物質耐性菌を含めた様々な細菌を不活化させる能力を持っている.

低温大気圧プラズマの適用を最適化するためには、プラズマ生成、プラズマ化学、および 生成した反応種の輸送を適切に制御することが不可欠である.特に生体へプラズマを適用す る場合、そのターゲットは皮膚や傷などの表面となる.特に傷の表面は、血液などの液体で 覆われていることが多い.そのため、プラズマ中で生成された荷電粒子により表面が充電さ れる.この充電は電界分布を変化させるためプラズマの生成に影響を与えるほか、表面に存 在する電荷そのものが生体応答に強く影響を与える場合もある.さらに、プラズマ自体が、 存在する電界により気体流(イオン風)を生成するため、生成された活性種の輸送にも影響 を与える.

この研究では、低温大気圧プラズマを用いた滅菌装置を最適化することを目指し、プラズマにより処理された水中に形成される電荷分布の時間発展を解析・理解することを目標とする.

### 2. 研究成果の内容

本研究では、放電プラズマにより形成される電荷分布を検討するため、針電極一水面間に 放電を生成し、放電より離れた地点における電位を測定した.実験装置の概略を図1に示す. 接地電極上に直径約220 mmの円筒形ガラス容器を設置した.容器内には超純水を500 ml注 いだ.高電圧針電極を先端・水面間の距離が1 mmになるように設置し、高電圧を印加するこ とで針電極と水面との間に放電プラズマを生成した.高電圧は、ファンクションジェネレー タ及び高電圧アンプを用い、振幅 6.5 kV、半値幅 8 µ s の電圧パルスを生成し、針電極に印 加した.

水中の電位計測のため、放電電極から100mm離れた地点にプローブ電極を設置した.プロ ーブは直径0.3mmのステンレスロッドで、先端を5mm水中に沈めた.プローブ電位の計測 にはオシロスコープを用い、放電生成のための高電圧パルスと同期して測定した.なお、実



験中の純水の導電率は 20 µ S/cm, また水 温は 23 ℃で一定であった.

高電圧パルスを用いて放電を形成する ことにより、120 mAの電流スパイクが観 察された.このスパイクの幅は約100 ns である.プローブの電位は、放電電流ス パイクが流れた時点から,約200 µ s の間 上昇し、その後緩やかに減少した.これ は、高電圧パルスによる電位形成を測定 したことを示し、電荷の動きをとらえて いる.なお、観測された電位を用いて、 放電部直下の電位を等価回路を用い推測 した結果、理論計算で導いた値とほぼ一 致することを確認した.

### 3. 研究目標の達成状況

予想される成果として以下の2つを目標に研究を行った.

- (1) 大気圧低温プラズマにより供給された電荷の水中の輸送機構を明らかにする.
- (2) 大気圧低温プラズマの最適化により殺菌装置の高効率化を検討する.

そのうち(1)の電荷の輸送機構については、実験観測および理論計算を用い検証した. 放電部 直下の電位に対して、実験結果から導出される値と理論計算のものがおおむね一致したことから、 電荷の水中の輸送機構のモデルを立てることができたと考えている.また、この結果を用いるこ とにより、液中の活性種の輸送及びプラズマ生成の最適化を図る上で重要なデータを得ることが できたと考えており、(2)の検討のための材料がそろったと思われる.

## 4. まとめと今後の課題

針電極・水面間のプラズマ放電を用いることにより、低温大気圧プラズマ照射に対する水中 における電荷輸送の検討を行った.その結果、水中の電荷輸送モデルを立てることができたと 考えられる.血液などは純水と異なる導電率を持つため、今後はPBSなどの純水以外の液体 を用い同様の実験をする必要があると考えられる.また、今回得られた電位形成モデルを用い 放電プラズマ周辺の電位分布を計算することにより、活性種生成及び輸送に最適なプラズマ生 成条件を探索する予定である.

- 5. 研究成果 (\*は別刷あり)
- 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] 上原聡司, 佐藤旭, <u>清水鉄司</u>, 佐藤岳彦: 針-水面放電に伴う水中電荷移動計測, 第42回静 電気学会全国大会, (2018).
- [2] 上原聡司,佐藤旭,<u>清水鉄司</u>,佐藤岳彦:表面電位計を用いた放電に伴う水中電荷量計測, 第 20 回静電気学会春期講演会,(2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J18L111
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	$2018.4 \sim 2019.3$
継続年数	2年目

# 数値流体力学を用いた脳血管内治療における流動現象の解明 Computational Fluid Dynamics Study of Neuro-Endovascular Treatments for Cerebrovascular Diseases

中嶋 伸太郎\*†, 杉山 慎一郎\*\* 太田 信\*\*\*†† \*順天堂大学医学部脳神経血管内治療学講座, \*\*東北大学医学部脳神経外科 \*\*\*東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

数値流体力学を用いた脳血管内治療における流動現象の解明

## 2. 研究成果の内容

2015 年 10 月から 2018 年 5 月の期間で内頚動脈海綿静脈洞部・傍前床突起部動脈瘤に Flow Diverter 治療 (Pipeline 留置術)を施行した 22 例の患者 (22 動脈瘤)を retrosepctive にCFD解析した.治療後6ヶ月後に脳血管撮影検査を行い,O'Kelly-Marotta(OKM) grading scale を用いて上記患者群を振り分けた.結果は,9例 (9 動脈瘤)が OKM scale D (動脈瘤 完全閉塞)で,13 例 (13 動脈瘤)が OKM scale B (動脈瘤体部描出あり)であった.

	OKM D	OKM B/C	total
Patient N	10	12	22
Aneurysm N	10	12	22
Age	61.7 (range, 48-86)	65 (range, 45-81)	63.5
Sex	Female10: Male0	Female11: Male1	Female21: Male1
with coil	4	3	7
Symptomatic	3	7	10
Saccular/Fusif	10/0	12/0	22/0

今回の結果を患者因子,動脈瘤の形状因子,術前の血行力学的因子,外科治療因子の4因子の要素で検討した.患者全体の平均年齢は62.5(48-86)で, $21 \land (95.4\%)$ が女性であった.動脈瘤の平均体積は125mm<sup>3</sup>(33.0-351mm<sup>3</sup>)で,OKM scale B で有意差が得られた(OKM scale D=83.3mm<sup>3</sup>,OKM scale B=160mm<sup>3</sup>, p=0.0313).また,OKM scale D では、動脈瘤内の平均流速が scale B よりも有意に速かった(OKM scale D=208.4mm/s,OKM scale B=115.0mm/s, p=0.0056). Pipeline 留置後の metal coverage ratio(MCR)は、僅かにOKM scale D で高かったが、有意差は得られなかった(OKM scale D=22.54,OKM scale B=19.69, p=0.0662).



## 3. 研究目標の達成状況

術前の数値流体力学的解析で動脈瘤と上記因子との関係が示せた.しかし臨床に応用していくためにはさらなる症例の積み重ねが必要である.

## 4. まとめと今後の課題

さらなる症例の積み重ねが必要である.

- 5. 研究成果(\*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) **国際会議・国内学会・研究会・口頭発表**等 なし
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

足立 高弘	271	鈴木 杏奈	171
飯島 高志	213	高木 敏行	37, 39, 79, 87, 93, 99, 107, 139, 201
伊賀 由佳	113	高奈 秀匡	101, 103, 147, 209, 257, 261
石出 忠輝	169	高橋 公也	29
石原 卓	229	高橋 俊	233, 235
石本 淳	57	高橋 庸夫	245
市來 龍大	21	高山 哲生	109
伊藤 浩志	79	竹中 弘祐	225
岩川 輝	33	田中 学	159
岩本 悠宏	257	千葉一永	67
上野 和之	269	昌 錫江	45
内田 諭	223	塚田 隆夫	105
内一 哲哉	91	津田 伸一	163
江上 泰広	19	寺島 洋史	23
太田 信	63, 83, 159, 275	徳増 崇	53, 61, 71, 143, 163, 231, 265
大谷 清伸	13, 73, 77, 117, 119, 123, 227	姜 東赫	113
大林 茂	33, 67, 127, 141, 165, 167, 169, 179, 233, 247, 249, 255, 267	永井 大樹	19, 25, 47, 115, 125, 131, 135, 149, 151, 155, 235, 259
岡島 淳之介	31, 239, 251, 271	中川 敦寛	227
岡田 健	21, 225	中嶋 伸太郎	275
岡部 孝裕	31	中谷 達行	253
大上 泰寛	241	中村 寿	23, 81, 241
太田 匡則	259	中本 裕之	107
小原 拓	75, 213	中山 昇	37
門脇 敏	15	沼田 大樹	117
金崎 雅博	115	服部 裕司	29, 153, 191, 229, 263
金澤 誠司	111	橋本 時忠	77
金子 智	231	橋本 望	215
川添 博光	255	橋本 光男	213
北川一敬	123	長谷川 裕晃	125, 127
杵淵 郁也	61	早川 晃弘	95
古川 琢磨	251	早瀬 敏幸	121, 237
小助川 博之	17, 97, 109	福井 智宏	237
後藤 実	39	福島 啓悟	265
江目 宏樹	239	福本 康秀	191
小林 秀昭	15, 129, 215	福山 敦彦	35
小宮 敦樹	11, 69, 85, 105	藤野 貴康	147
酒井 康彦	121	槙原 幹十朗	13, 25
坂上 博隆	149, 213	丸田 薫	89, 183
佐々木 大輔	43	三坂 孝志	165
佐藤 岳彦	27, 51, 111, 137, 223, 253, 269, 273	水書 稔治	267
寒川 誠二	35, 45, 65, 145, 157, 161, 245	水上 孝一	17
芝原 正彦	75	池田 (向井) 有理	63
清水 鉄司	273	椋平 祐輔	59
下山 幸治	41, 43, 49, 55	森江 隆	65

森澤 征一郎	167
山﨑 渉	41
山下 一郎	161
山田 剛治	119
山田 昇	11
吉木 宏之	27
米澤 宏一	151
米村 茂	133, 243
依田 大輔	131
和田 浩史	213
渡邉 力夫	129

Adrian Sescu	263	Roman Fursenko	183
Alain Combescure	57, 213	Sergey Minaev	183
Alexander Kirdyashkin	183	Shalabh C. Maroo	53
Anthony B. Murphy	209	Shinkyu Jeong	135, 249
Anthony Waas	179	Stefan G. Llewellyn Smith	191
Bernard Normand	201	Stéphane Le Dizès	191
Bernd Valeske	201, 213	Takuya Ishibashi	171
Cedric Galizzi	215	Vladimir Gubernov	183
Chenguang Lai	141	Vladimir Khovaylo	99
Chih-Yung Huang	155	Vladimir Saveliev	133
Christian Boller	201	Willyanto Anggono	95
Christine K. Luscombe	179	Yevgeniy Bondar	243
Chrystelle Bernard	101	Yiming Li	157
Dany Escudie	215	Yiwen Zhang	97
Dukhyun Choi	145	Yun-Chien Cheng	137
Fumio Ohuchi	179	Zahrul Fuadi	87
Fumiya Togashi	247	Zhenmao Chen	139
Gael Sebald	91		
Hideaki Ogawa	73		
Igor Adamovich	103		
Itsu Sen	83		
Ivan Delbende	191		
Jean-Yves Cavaille	93		
Jeongmin Ahn	71, 81, 89		
Jiří Jeništa	209		
Juan Felipe Torres	69		
Justin Rubinstein	59		
Kwak Dongyoun	213		
Lalita Udpa	213		
Lavi Rizki Zuhal	55		
Manish Khandelwal	153		
Maurice Rossi	191		
Michael Fehler	171		
Mohamed Farhat	51		
Nasruddin	143		
Nicholas Williamson	85		
Olivier Emile Mathieu	215		
Peng Zhang	47		
Peter K. Kang	171		
Philippe Guy	201		
Pierre Calmon	201		
Pierre Proulx	261		
Rhea P. Liem	49		
Roland N. Horne	171		

# 東北大学流体科学研究所 平成 30 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2年3月発行

編集·発行: 東北大学流体科学研究所 所長 大林 茂

〒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 : shomu\_kb@fmail.ifs.tohoku.ac.jp URL : http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/koubo/index.html

印刷: 株式会社 仙台共同印刷