

令和元年度 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 2019 Joint Usage / Research Center "Fluid Science Global Research and Education Hub"

東北大学 流体科学研究所

Institute of Fluid Science Tohoku University



はしがき

東北大学流体科学研究所は、「流動現象に関する学理及びその応用の研究を行うこと」を 目的としており、平成 22 年度より流体科学分野の共同利用・共同研究拠点「流体科学研究 拠点」として文部科学省に認定され、平成 28 年度には同拠点「流体科学国際研究教育拠点」 として認定更新を受けている。本拠点では、物質のみならずエネルギーや情報の流れなど、 人間生活の中で避けて通れない「時間軸」と「空間軸」上で展開されるあらゆる「流動」 を対象とする「流体科学」を核として、人類社会のさまざまな重要問題を解決するため、 国内外の研究者と本研究所の教員とが行う「公募共同研究」を実施している。本公募共同 研究では、その成果の適用先としての観点から、環境・エネルギー、人・物質マルチスケ ールモビリティ、健康・福祉・医療、基盤研究の 4 分野における流体科学に係わる研究課 題を公募し、共同研究委員会の審査を経て、所外研究者と本研究所の教員が共同研究を推 進している。得られた研究成果は、毎年 11 月に流体科学研究所主催で開催される国際会議 における公募共同研究成果報告会(IFS Collaborative Research Forum)において発表さ れ、また共同利用・共同研究拠点「流体科学研究拠点」活動報告書(平成 21 年度実施分に ついては公募共同研究報告書)として公表されている。

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

本報告書は令和元年度(平成31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、125件の公募共同研究およびリーダーシップ共同研究の成果報告書、主 な発表論文の別刷等を収録している。本拠点は、本公募共同研究を通じて、国内外の様々 な異分野の英知を結集させ、流動現象の基礎研究とそれを基盤とした先端学術領域との融 合ならびに重点科学技術分野への応用によって、世界最高水準の多様な流動現象に関する 学理の探求及び研究を推進し、社会に貢献するとともに、次世代の若手研究者及び技術者 の育成にも努めている。今後ともご関係各位のご支援ご鞭撻をお願い申し上げると共に、 本報告書について、忌憚のないご意見を頂ければ幸甚である。

令和2年12月

東北大学流体科学研究所長 丸田 薫

1. 令和元年	E度流体科学国際研究教育拠点活動のまとめ
1.1	概要
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. 研究成界	寻報告書 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一
<令和元	在度東北大学流体科学研究所一般公募共同研究採択課題>
J19I001	Towards Next Generation CFD Models of Intracranial Aneurysm (NX-CFD):
	In-vitro Validation Studies and In-Silico Benchmarking of Intracranial Transitional Flow
	Khalid M. Saqr (Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport)
J19I002	Chemical Interpretation of the Two-Stage Cool Flame of Diethylether
J19I003	Mixture of Experts in Bayesian Optimization for Complex Aerospace Designs
	Rhea P. Liem(Hong Kong University of Science and Engineering (HKUST))、下山 幸治(東北大学)
J19I004	Discharge Phenomenon in Laser-Induced Bubble and Formation Mechanism of Microjet by Cavitation
	Bubble 1
	佐藤 岳彦(東北大学)、Mohamed Farhat(Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL))
J19I005	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)
J19I006	Application of Core-Based Inversion to Reconstruct Stress Field in an Underground
	Geoscience Laboratory ·····2
	伊藤 高敏(東北大学)、Xiaondong Ma(ETH Zurich)
J19I007	Thermal Conductivity Reduction and Carrier Concentration Optimization for Development of
	Nanocomposite Materials with Enhanced Thermoelectric Figure of Merit
	Vladimir Khovaylo(National University of Science and Technology "MISiS")、高木 敏行(東北大学)
J19I008	Efficient Uncertainty Quantification of Fluid Flow Problems via Combination of Kriging Surrogate
	Modeling and Proper Orthogonal Decomposition 2
	Mehrdad Raisee Dehkordi(University of Tehran)、下山 幸治(東北大学)
J19I009	Estimation of Fracture Permeability by Integrating Microseismic Observational Data and Reservoir
	Engineering Modeling 22
	椋平 祐輔(東北大学)、Justin Rubinstein(United States Geological Survey)
J19I010	Mechanical Analysis of a Patented Biodegradable Zinc Alloy Stent Based on a Degradation Model 29
	Aike Qiao(Beijing University of Technology)、太田 信(東北大学)
J19I011	人工改変球殻状タンパク質による外表面ポリマー修飾と内包ナノ粒子距離制御
	山下一郎(大阪大学)、寒川誠二(東北大学)
J19I012	カルマン渦列周波数を決定する特異点の同定
	髙木 正平(首都大学東京)、小西 康郁(東北大学)

J19I013	プラズマ-生体界面における活性種挙動の数値動力学的考証
1101014	「山田
J151014	Lavi Rizki Zuhal (Bandung Institute of Technology)、下山 幸治(東北大学)
J19I015	Development of Conservative Kinetic Force Method Near Equilibrium
5	Vladimir Saveliev (National Center of Space Researches and Technologies)、米村 茂(東北大学)
1191017	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
5	植原 幹十朗(東北大学)、大谷 清伸(東北大学)
1191018	飛行する回転中空円筒の実験と数値解析 43
	平田 勝哉(同志社大学)、石本 淳(東北大学)
J19I019	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)
J19I020	圧縮性 DNS を用いた管楽器の流体音響解析
	高橋 公也(九州工業大学)、服部 裕司(東北大学)
J19I021	弾性体の変形 - 周囲流 - 遠方場音情報の複合動的解析による空力音発生メカニズム解明 49
	寺島 修(富山県立大学)、小西 康郁(東北大学)
J19I022	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)
J19I024	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)
J19I026	固気液混相流解析による工業製品の設計開発
	高橋 俊(東海大学)、大林 茂(東北大学)
J19I027	高感度非発光再結合検出による量子ナノ構造におけるフォノン物性の評価
	福山 敦彦(宮崎大学)、寒川 誠二(東北大学)
J19I028	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
	福井 智宏(京都工芸繊維大学)、早瀬 敏幸(東北大学)
J19I029	Combustion Characteristics of Biogas at Various Pressures
	Willyanto Anggono(Petra Christian University)、早川 晃弘(東北大学)
J19I030	Investigation of a Time Response of cntTSP Sensor for a Dynamic Visualization of the Laminar-to-
	Turbulent Boundary Layer Transition 63
	依田 大輔(German Aerospace Center - DLR)、永井 大樹(東北大学)
J19I031	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
	永井 大樹(東北大学)、米澤 宏一(電力中央研究所)
J19I032	イオン液体の二酸化炭素吸収による光学特性の解明
	古川 怜(電気通信大学)、高奈 秀匡(東北大学)
J19I033	Thermodynamic Property Gradients in Near-Surface Water Thin Film and Its Impact on Liquid Flow in
	69
1101004	Shalabh C. Maroo (Syracuse University)、德增 奈(東北大学)
J19I034	Multifunctional Hybrid Filaments Comprising Aligned Nanocellulose and Carbon Nanotubes Synthesized
	by a Field-Assisted Flow Focusing Method
1101000	Antnony B. Dichiara (University of Washington)、尚余 今臣(東北大字)
1191036	Nonondro Kurrio Rutro (Insitut Tolucolari Pardura) (73
1101027	Ivarenula Rulfila Fulla (Illistitut Teknologi Balluurig)、 天四 阵 (東北大子)
1191031	Experimental and Chemical Kinetics Modeling Study of Mitromethane in Shock Tubes and a Mitro-Flow
	Olivier Mathieu (Texas A&M University) 中村 寿 (市北大学)

J19I039	Evaluation of Natural Convection Flow under Spatiotemporally Variable Thermal Condition	· 77
	小宮 敦樹(東北大学)、Nicholas Williamson(The University of Sydney)	
J19I041	流体現象解明によるスポーツ分野への適用	· 79
	長谷川 裕晃(宇都宮大学)、大林 茂(東北大学)	
J19I042	実際の構造を反映させた多孔質材料内部の固気反応を伴う物質移動と構造変化の	
	大規模シミュレーション	· 81
	松下 洋介(東北大学)、小宮 敦樹(東北大学)	
J19I044	The Study on the Mechanism of Coupling Wall-Effect on Multidirectional Wings Based on	
	Multi-Objective Optimization	· 83
	Chenguang Lai(Chongqing University of Technology)、大林 茂(東北大学)	
J19I046	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	· 85
	森江 隆(九州工業大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J19I047	Understanding Tribological Behaviour of hBN Nanoparticles in TMP Ester Based Biolubricant by	
	Assessing Its Rheological Properties	· 87
	徳増 崇(東北大学)、Nasruddin Yusuf Rodjali(Universitas Indonesia)	
J19I049	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	· 89
	徳増 崇(東北大学)、杵淵 郁也(東京大学)	
J19I050	Solid Oxide Fuel Cells Replacement of a Traditional Catalytic Converter	• 91
	Jeongmin Ahn(Syracuse University)、中村 寿(東北大学)	
J19I051	水中プラズマによる微細気泡の生成・安定化機構	• 93
	佐藤 岳彦(東北大学)、中谷 達行(岡山理科大学)	
J19I052	Electric Field Measurements in Nanosecond Pulse Discharges in Atmospheric Pressure Flames for	
	Plasma Assisted Flameholding	• 95
	高奈 秀匡(東北大学)、Igor Adamovich(Ohio State University)	
J19I053	ふく射熱遮断スプリンクラーの開発	· 97
	江目 宏樹(山形大学)、岡島 淳之介(東北大学)	
J19I055	Clarification of the Transition Mechanism of Cavitation Instabilities	· 99
	姜 東赫(埼玉大学)、伊賀 由佳(東北大学)	
J19I056	ソニックブーム波形の立ち上り時間に及ぼす乱流干渉の影響	101
	鵜飼 孝博(大阪工業大学)、大谷 清伸(東北大学)	
J19I057	光駆動型マイクロ・ナノ流体デバイスの開発	103
	山田 昇(長岡技術科学大学)、小宮 敦樹(東北大学)	
J19I059	表面修飾ナノ粒子サスペンションのナノスケール界面現象に関する研究	105
	塚田 隆夫(東北大学)、小宮 敦樹(東北大学)	
J19I060	Development of Aerodynamic and Propulsion System for High Performance Mars	
	Exploration Aircraft	107
	Shinkyu Jeong(Kyunghee University)、永井 大樹(東北大学)	
J19I061	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	109
	後藤 実(宇部工業高等専門学校)、高木 敏行(東北大学)	
J19I062	Characterization of Fatigue Damage using Electromagnetic NDT Methods	111
	Zhenmao Chen(Xi'an Jiaotong University)、高木 敏行(東北大学)	
J19I063	Numerical Study on Gas Lubrication System Using Micro/Nanoscale Dimples	113
	米村 茂(東北大学)、Yevgeniy Bondar(ITAM, SBRAS Russian Academy of Science)	
J19I064	Effect of Wall Elasticity on Reduction of Wall Shear Stress in a Patient-Specific Aneurysm Model in	
	Middle Cerebral Artery	115
	田中 学(千葉大学)、太田 信(東北大学)	

J19I065	Unsteady Aerodynamics of Axially Oriented Low Fineness Ratio Cylinders	117
J19I066	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	119
J19I070	ナノ構造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	121
-	高橋 庸夫(北海道大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J19I071	バドミントンシャトルコックの非定常空力特性	123
	長谷川 裕晃(宇都宮大学)、永井 大樹(東北大学)	
J19I072	ノッキング末端ガス自着火現象における燃料反応特性の影響	125
	寺島 洋史(北海道大学)、中村 寿(東北大学)	
J19I074	誘導加熱を用いた回転円すいディスク式薄膜揚水蒸発機構を用いた液糸生成装置の開発 足立 高弘(秋田大学)、岡島 淳之介(東北大学)	127
J19I075	Instability and Wave Interactions in Helical Vortices	129
	服部 裕司(東北大学)、Ivan Delbende(LIMSI)	
J19I076	非構造数値流体解析を伴う進化的最適設計システムの完全自動化	131
	千葉一永(電気通信大学)、大林 茂(東北大学)	
J19I077	Magnetic and Electric Properties of Diamond Like Carbon-Magnetic Metal Nano-Composite Films \cdots	133
	張 亦文(天津大学)、小助川 博之(東北大学)	
J19I078	Active Control of High-Speed Boundary Layer Flows	135
	服部 裕司(東北大学)、Adrian Sescu(Mississippi State University)	
J19I079	Analysis of Transport Phenomena of Oxygen Ion in Dual-Phase Electrolyte Material	137
1401000	徳増 崇 (東北大学)、Jeongmin Ahn (Syracuse University)	100
1191080	The Effect of Hypertension and Anti-Coagulant to Aneurysm Rupture	139
1101001	Kanar Osman (Universiti Teknologi Malaysia)、太田 信(東北大字)	1 / 1
J191081	Interferometric Measurement of Temperature Fields in Turbulent Flows	141
1101082	近面目前は水麦山における気泡初生の鼻子分子動力学解析	1/13
J151062		145
1191084	Thermal Conductivity of Silicon Nanowire Using Landauer Approach for Thermoelectric Application ···	145
9101001	Yiming Li (National Chiao Tung University)、寒川 誠二 (東北大学)	1 10
J19I086	Investigation of Centreline Shock Reflection and Viscous Effects in Axisymmetric Supersonic Flow ···	147
•	Hideaki Ogawa(RMIT University)、大谷 清伸(東北大学)	
J19I087	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	149
	高奈 秀匡(東北大学)、藤野 貴康(筑波大学)	
J19I088	Experimental Investigation on Atomization Process in Electro-Sprays by Surface Disturbance	
	Measurements ·····	151
	高奈 秀匡(東北大学)、Friedrich Dinkelacker(Leibniz University Hannover)	
J19I089	パルス放電プラズマによる電位刺激を用いた生細胞内への物質輸送機構の解明	153
	奥村 賢直(一関工業高等専門学校)、佐藤 岳彦(東北大学)	
J19I090	離脱衝撃波脈動を利用した側面噴流発生による飛行姿勢安定	155
	水書 稔治(東海大学)、大谷 清伸(東北大学)	
J19I091	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	157
	金崎 雅博(首都大学東京)、永井 大樹(東北大学)	
J19I094	極超音速機周りで生じる高エンタルピー流の特性解明	159
	山田 剛治(東海大学)大谷 清伸(東北大学)	

J19I096	Study on Fracture Behaviour of Single Natural Fiber	161
	Zahrul Fuadi(Syiah Kuala Univeristy)、高木 敏行(東北大学)	
J19I097	電場によって変形する強誘電体ポリマーの数学的モデル化と MC シミュレーション	163
	鯉渕 弘資(仙台高等専門学校)、高木 敏行(東北大学)	
J19I098	火星大気突入カプセル周り流れの数値解析	165
	古館 美智子(Chungnam National University)、永井 大樹(東北大学)	
J19I100	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	167
	酒井 康彦(名古屋大学)、早瀬 敏幸(東北大学)	
J19I101	繊維強化複合材料の高度保全技術に関わる研究会	169
	高木 敏行(東北大学)、伊藤 浩志(山形大学)	
J19I102	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	171
	中山 昇(信州大学)、高木 敏行(東北大学)	
1191106	水中ストリーマの開始・進展機構	173
0	佐藤岳彦(東北大学)、金澤誠司(大分大学)	
<令和元	年度東北大学流体科学研究所萌芽公募共同研究採択課題>	
J19H001	流体問題における各種データ同化手法の比較検討	175
	三坂 孝志(産業技術総合研究所)、大林 茂(東北大学)	
J19H002	乳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	177
	石出 忠輝(木更津工業高等専門学校)、大林 茂(東北大学)	
J19H003	バイオミメティクス技術による翼端渦の抑制を目指した翼端デバイスの空力設計	179
	森澤 征一郎(沖縄工業高等専門学校)、大林 茂(東北大学)	
J19H004	湿り蒸気の流動状態の解明	181
	丹澤 祥晃(日本工業大学)、石本 淳(東北大学)	
J19H005	Numerical Analysis of a Morphing Jet-Flap under Ground Effect	183
	Edyta Dzieminska(上智大学)、大林 茂(東北大学)	
/今和元	年度市北十学法体科学研究所国際連進公費社同研究プロジェクトゼロ運動へ	
	中度来北八子伽体科子明九別国际建筑ム泰兴问明九ノロノエク「沐沢环忠/	105
J19R001	Joongmin Abn (Surgeuse University) カ田 黄 (東北大学) Dyan Milearek (Arizona State University)	10J
1100002	Micro Channel Dumans for Energy Dreduction on the Desis of Micro Combustion	107
J19K003	Sengery Mineary (Ten Eastern Endered University) 九田 著 (古北十学)	107
	Sergey Millaev (Fal-Eastern Federal University)、入田 黑 (東北八子)、	
	Alexandra Kird arkhine (TSC)	
1100004	Alexander Kirdyashkin (150)	
J19R004	An Efficient Algorithm of Inlet Turbulence Generation for Cross-Platform-Based Parallel	105
	Computation and its Application for Flows over a Low-Pressure Turbine Cascade	195
	阿部 主兇(東北大学)、Peter E. Vincent(Imperial College London)、	
	Freddie D. Witherden (Texas A&M University), Brian C. Vermeire (Concordia University),	
	Niki Loppi (Imperial College London)	
J19R005	Link between Tracer and Microseismic Analysis to Comprehensive Understanding of	
	Hydraulic Feature of Fractured Geothermal Reservoir	201
	鈴木 杏奈(東北大学)、Roland N. Horne(Stanford University)、Michael Fehler(MIT)、	
	Peter K. Kang (University of Minnesota)、石橋 琢也 (産業技術総合研究所)、	
	Adam J. Howkins (Stanford University)	

<令和元	年度東北大学流体科学研究所重点公募共同研究プロジェクト採択課題>	
J19J001	Multiscale Flow and Interfacial Transport Phenomena at Phase and Material Boundaries	209
	小原拓(東北大学)	
J19J002	超微小液滴と高速衝突の科学	213
	佐藤 岳彦(東北大学)、渡部 正夫(北海道大学)、矢野 猛(大阪大学)	
J19J003	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	215
	小林 秀昭(東北大学)、橋本 望(北海道大学)、渡邊 豊(東北大学)、Dany Escudie(INSA Lyon)、	
	Cedric Galizzi (INSA Lyon)	
<令和元	年度東北大学流体科学研究所リヨンセンター公募共同研究採択課題>	
J19Ly01	Numerical Modelling of Particle-Laden Effect on Supersonic Flow for Cold-Spray Polymer Coating \cdots	225
	Chrystelle Bernard(Tohoku University)、高奈 秀匡(東北大学)	
J19Ly02	Ionic Liquid Polymer for Corrosion Resistance Applications	227
	Nicolas Mary(ELyTMaX, CNRS, Tohoku University, Universite de Lyon)、内一 哲哉(東北大学)	
J19Ly03	混相エネルギーシステムにおける流体-構造体連成コンピューティング	229
	石本 淳(東北大学)、Thomas Elguedj(INSA de Lyon)	
J19Ly04	回転二重円すい間に発生するテイラー渦の安定性と乱流遷移	231
	足立 高弘(秋田大学)、小宮 敦樹(東北大学)	
J19Ly05	Modelling Materials Behavior for Advanced Electromagnetic Non Destructive Testing Techniques \cdots	233
	Gael Sebald(CNRS, Universite de Lyon, INSA-Lyon, Tohoku University)、内一 哲哉(東北大学)	
J19Ly06	超音波による配管内の腐食の定量化	235
	中本 裕之(神戸大学)、高木 敏行(東北大学)	
J19Ly07	Response Characteristics of Cellulose Nanofibril under AC Electric Field	237
	高奈 秀匡(東北大学)、Laurent Chazeau(INSA Lyon)	
J19Ly08	Elucidation of the Pathophysiology of Skin Sodium and Water Metabolism	239
	Asadur Rahman(香川大学)、石本 淳(東北大学)	
J19Ly09	Active Control of Protein Mass Transfer by Membrane Utilizing Variation of Surrounding Condition \cdots	241
	小宮 敦樹(東北大学)、Sébastien Livi(INSA Lyon)	
J19Ly10	Eddy Current Magnetic Signature (EC-MS) Micro-Magnetic Nondestructive Method for the	
	Evaluation of Fe-Si Electric Steel	243
	Benjamin Ducharne(LGEF INSA Lyon)、内一 哲哉(東北大学)	
J19Ly11	Microfluidic Tools to Study Aerotaxis in Eukaryotic Cells	245
	Jean-Paul Rieu(Claude Bernard University Lyon 1)、船本 健一(東北大学)	
J19Ly12	Sensitivity Analysis for Fast and Efficient CFD Design under Unsteady Flow Behavior	247
	焼野 藍子(東北大学)、Frederic Gillot(Ecole Centrale Lyon)	
<令和元	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>	
J19L016	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	249
	金子 智(神奈川県立産業技術総合研究所)、徳増 崇(東北大学)	
J19L023	超小型航空機周りの非定常空気力学特性に関する数値的・実験的研究	251
	佐々木 大輔(金沢工業大学)、下山 幸治(東北大学)	
J19L025	乱流の階層スケールにおける Eigen-vortical-axis line に関する研究	253
	中山 雄行(愛知工業大学)、服部 裕司(東北大学)	
J19L040	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	255
	沼田 大樹(東海大学)、大谷 清伸(東北大学)	

J19L043	Neutral Beam Based Interface Engineering for Triboelectric Nanogenerators	257
	Dukhyun Choi(Kyung Hee University)、寒川 誠二(東北大学)	
J19L045	Application of Nanostructure Surfaces to Enhance the Thermal Performance of Heat Pipe	259
	Peng Zhang(Shanghai Jiao Tong University)、永井 大樹(東北大学)	
J19L054	Analysis and Modeling of the Transport Properties of the Contact Line Based on the Molecular	
	Dynamics Simulation	261
	福島 啓悟(福井大学)、徳増 崇(東北大学)	
J19L067	爆風脳損傷の予防	263
	中川 敦寛(東北大学)、大谷 清伸(東北大学)	
J19L069	Upper Surface Blowing 機能を有する将来型垂直・短距離離着陸小型機の主翼開発と	
	その空力特性に関する基礎研究	265
	川添 博光(鳥取大学)、大林 茂(東北大学)	
J19L073	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	267
	高橋 俊(東海大学)、永井 大樹(東北大学)	
J19L083	界面ナノバブルの形成過程および安定性に関する分子動力学解析	269
	堀 琢磨(東京農工大学)、菊川 豪太(東北大学)	
J19L085	飛翔体周りの非定常流れ場に対する密度計測	271
	太田 匡則(千葉大学)、永井 大樹(東北大学)	
J19L092	赤外線カメラによる高精度温度測定手法の確立	273
	古川 琢磨(八戸工業高等専門学校)、岡島 淳之介(東北大学)	
J19L093	中赤外吸収分光法を応用した燃焼中間生成物計測手法の高度化研究	275
	田中 光太郎(茨城大学)、中村 寿(東北大学)	
J19L095	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	277
	吉木 宏之(鶴岡工業高等専門学校)、佐藤 岳彦(東北大学)	
J19L099	水中爆発を用いた物体洗浄効果の研究	279
	北川 一敬(愛知工業大学)、大谷 清伸(東北大学)	
J19L103	タンパク質の細胞内局在に基づく糖鎖修飾知識ベースの開発	281
	越中谷 賢治(青山学院大学)、太田 信(東北大学)	
J19L105	Surface Pressure Measurement of a Re-Entry Model in Ballistic Range Facility using	
	Motion-Capturing Pressure-Sensitive Paint Method	283
	坂上 博隆(University of Notre Dame)、永井 大樹(東北大学)	
J19L107	Establishment of High-Accuracy Aanalysis Method of Spacecraft Thermal System Using	
	Data Assimilation	285
	永井 大樹(東北大学)、三坂 孝志(産業技術総合研究所)	

1. 令和元年度流体科学国際研究教育拠点活動のまとめ

1.1 概要

流体科学国際研究教育拠点では、公募共同研究の実施にあたり、関連学会内におけ る専門性および国際性の観点から選任した外部委員を過半数含む共同研究委員会を設 置している。研究者コミュニティの意向と関連研究分野の動向を反映させながら公募 共同研究の実施方法を決定し、1)環境・エネルギー、2)人・物質マルチスケールモ ビリティ、3)健康・福祉・医療、4)基盤流体科学の4分野における流体科学に関わ る国内外研究者との一般公募共同研究を実施した。

また、異分野融合型の共同研究プロジェクトとして分野横断型公募共同研究プロジ ェクト(略称:分野横断プロジェクト)が平成22年度より開始された。これは、本拠点 が設定したテーマ「次世代反応流体科学」に対して、本研究所所属の複数の研究者と 外部研究機関の複数の研究者が、本研究所の施設・設備等を利用して行う分野横断型 の共同研究プロジェクトである。本プロジェクトは、ライフサイエンス・燃焼科学・ 高応答性流体科学の三つの研究領域からなるプロジェクトを推進し、各種反応性流動 に関する異分野融合型次世代反応流体科学の学理創成を目指して実施され、一定の成 果が得られたことから平成25年度をもって終了した。

平成25年度より開始された本研究所所属の研究者と本研究所以外の複数の研究機関 の研究者が行う連携公募共同研究は、平成28年度より、国際化を強く意識し、複数の 海外研究機関との共同研究である国際連携公募共同研究プロジェクトとして実施され ている。平成26年度より開始された萌芽公募共同研究は、これまで本研究所との共同 研究実績はないが、本研究所の研究者との共同研究や、共同研究の前段階の議論を希 望されている国内の研究者をサポートする目的で継続実施されている。また、平成29 年度より、社会が直面する諸問題の解決を強く意識した重点公募共同研究プロジェク トが採択された。

平成 30 年度に設置されたリヨンセンターでは、フランス・リヨン大学(INSA de Lyon, École Centrale de Lyon) に教員と学生がユニットとして滞在しており、同センターで 共同研究を推進するリヨンセンター公募共同研究が令和元年度に新設された。

令和元年度公募共同研究は、平成 31 年 4 月 1 日から令和 2 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 30 年 12 月から翌年 1 月末に かけて、本研究所のホームページで日本語と英語で広く国内外に公開するとともに、 関連学会および本研究所の関連研究者メーリングリストを利用して電子メールで広く 国内外に通知した。公募共同研究の採択は、共同研究委員会に過半数が外部委員の審 査委員会を結成して行った。採択された研究課題には、評価結果に基づき研究経費を 措置した。

令和元年 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

令和元年 11 月 7 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-2019 において仙台国際センターにて開催した。本報告会では 119 件(重点公募共同研究プロジェクト 3 件、国際連携公募共同研究プロジェクト 4 件、萌芽公募共同研究 4 件、第 16 回流動ダイナミクス国際会議(ICFD2019) OS20 の 14 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、145 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:浙	讠体科字デー	タベー	スへの	登録件数	とア	クセ	ス数
------	--------	-----	-----	------	----	----	----

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度
公募共同研究成果の登録数	67	71	90	90
登録済みデータ総数	540	552	442	442
流体科学データベースへの アクセス件数	7,154	6,042	5,132	8,337

※平成 30 年度分より集計方法を変更

1.4 共同利用·共同研究拠点「流体科学国際研究教育拠点」活動報告書

令和2年3月に、平成30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、 基盤流体科学)と国内/国際の別を分類した。表 3 には国際連携公募共同研究プロジェ クト、萌芽公募共同研究および重点公募共同研究プロジェクトの申請・採択状況を示 す。表 4 にはリヨンセンター公募共同研究の申請・採択状況を示す。表 5 には拠点活 動の一部(自己負担によるもの)として開始したリーダーシップ共同研究の実施状況 を示す。

		平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和元年度
申請数(件)		99	101	105	104
採択数 (件)		69	70*	77	82
国内, 国際	国内	44	44	38	44
国内・国际	国際	25	33	32	38
	環境・エネルギー	27 (17/10)	44 (23/21)	29 (12/17)	47 (23/24)
分野別件数	人・物質マルチス ケールモビリティ	9 (4/5)	6 (5/1)	8 (4/4)	4 (2/2)
(国内/国際)	健康・福祉・医療	10 (6/4)	5 (3/2)	6 (3/3)	7 (4/3)
	基盤流体科学	23 (17/6)	22 (13/9)	27 (19/8)	24 (15/9)
採択率(%)		70	69	73	79
申請金額(千円):a		30,396	30,546	43,460	41,819
採択金額(千円):b		16,819	17,065	19,847	22,409
平均充足率(金額)(%):b/a		55	56	45	54
平均採打	_{尺金額(千円)}	244	243	244	273

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

国際連携公募共同研究 プロジェクト	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度
申請数(件)	6	6	6	4
採択数(件)	5	6	6	4
採択率(%)	83	100	100	100
申請金額(千円):a	8,140	8,135	8,011	5,600
採択金額(千円):b	4,869	4,470	5,010	3,795
充足率(金額)(%):b/a	60	54.9	62.5	67
一件あたりの採択金額(千円)	974	745	835	948

表3:国際連携公募共同研究プロジェクト、萌芽公募共同研究 および重点公募共同研究プロジェクトの申請・採択状況

萌芽 公募共同研究	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度
申請数(件)	5	4	3	5
採択数(件)	5	4	3	5
採択率(%)	100	100	100	100
申請金額(千円):a	994	697	468	816
採択金額(千円):b	525	559	362	643
充足率(金額)(%):b/a	53	80	77.3	78
一件あたりの採択金額(千円)	105	140	120	128

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

※採択額には、20%のインセンティブが含まれる。

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

表4:リヨンセンター公募共同研究の申請・採択状況

表5:リーダーシップ共同研究の実施状況

		平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和元年度
実友	拖数(件)	28	31	28	19
国内,国際	国内	15	20	24	16
国内・国际	国際	13	8	7	3
	環境・エネルギー	7 (5/2)	14 (10/4)	14 (13/1)	10 (9/1)
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)	1 (1/0)
(国内/国際)	健康・福祉・医療	6 (3/3)	5 (5/0)	4 (4/0)	2 (2/0)
	基盤流体科学	13 (7/6)	9 (5/4)	13 (7/6)	6 (4/2)
申請金	額(千円):a	11,825	12,217	9,186	6,600
採択金額(千円):b		2,894	2,905	2,508	1,847
平均充足率(金額)(%):b/a		24	24	27	27
平均採持	尺金額(千円)	103	94	89	97

2) 研究者の受け入れ状況

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

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度
国内	389	469	411	577
国内	(94)	(60)	(123)	(196)
国め	625	628	927	533
国21	(53)	(230)	(74)	(55)
合計	1,014	1,097	1,338	1,110
(延べ人日)	(147)	(290)	(197)	(251)

表6:研究者の受け入れ状況

()の数字は大学院生の人数で内数

3) 研究費

本公募共同研究にて使用した研究費の内訳を表7に示す。

表7:研究費の内訳

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成30年度*	令和元年度*
物件費 (千円)	16,377	12,911	25,569	$20,\!275$
旅費(千円)	16,177	18,201	34,323	35,974
合計 (千円)	32,554	31,112	59,892	56,249

*平成 30 年度および令和元年度については、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8に示す。これらの成果の内、主要な論文の別刷り等が、 本報告書の後半に掲載されている。

表8:研究成果の発表件数

	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	令和元年度
学術雑誌(査読つき国際会 議、解説等を含む)	99	119	73	85
国際会議、国内会議、研究 会、口頭発表等	291	439	303	295
その他(特許・受賞・マス コミ発表等)	16	14	17	23
合計 (件)	406	572	393	403

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9から表15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9:流体科学データベースへの登録件数とアクセス数

表 10:一般公募共同研究の申請・採択状況

中請数 (件)平成 21 年度平成 22 年度平成 22 年度平成 23 年度平成 24 年度平成 25 年度平成 26 年度平成 27 年度申請数 (件)52647785949898採択数 (件)5263*778593*96*97国内 · 国際 国際国内32354751596058国際20283034343639 $\chi \gar{\gamma} \u03bbra (10)^3)$ (10/3)(12/4)(3/13) $\chi \u03bbra (12)^3$ (5/2)(5/2)(7/3)(9/3)(10/3)(12/4) $\chi \u03bbra (12)^3$ 16141820212121 $\chi \u03bbra (12)^3$ (5/2)(5/2)(7/3)(9/3)(7/14)(7/14)(7/14) $\chi \u03bbra (12)^3$ 131419171515(8/7) $(\u03bbra (10)^7)$ (10/7)(10/7)(17/6)(12/7)(12/5)(8/7)(16/7) $\chi \u03bbra (10)^7)$ 10098100100999899完 $\chi \u03bbra (10)^7)$ 23/3335/40538,89541,34943,35944,091採択金 (1) \u03bbra (15)16163822222222222222平/ (10) (10)1009998999935,40538,89541,49943,35944,091採択金 (1) \u03bbra (16)163823,00722,00421,66325,550									
申請数 (件)52647785949898採択数 (件)5263*778593*96*97国内・国際国内32354751596058国際20283034343639エアロ771012131616スペース(5/2)(5/2)(7/3)(9/3)(10/3)(12/4)(3/13)ク野別件数ライフ7131314191715ウイノン7131314191715ウイフ717172324242422マイクロ(10/7)(10/7)(17/6)(17/7)(18/6)(17/7)(14/8)基盤5121315161823(4/1)(7/5)(8/5)(10/5)(10/5)(12/4)(12/6)(16/7)採択率(%)10098100100999899充足率(金額)(%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額 (千円):a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均充足率(金額((千円)):b//320391333301248229222			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
採択数 (件)5263*778593*96*97国内・国際国内32354751596058国際20283034343639エアロ771012131616スペース(5/2)(5/2)(7/3)(9/3)(10/3)(12/4)(3/13)エネルギー16141820212121マネルギー16141820212121ウボア7131314191715ウボア7131314191715サイエンス(5/2)(8/5)(9/4)(8/6)(12/7)(12/5)(8/7)ナイェンス(5/2)(8/5)(9/4)(8/6)(12/7)(12/5)(8/7)ナイェンス(5/2)(8/5)(9/4)(8/6)(12/7)(12/5)(8/7)ナイェンス(5/2)(8/5)(10/7)(17/6)(17/7)(18/6)(17/7)(14/8)ウボ17172324242422マイクロ(10/7)(10/7)(17/6)(17/7)(18/6)(17/7)(14/8)基盤5121315161823(年)10098100100999899充足率(金額)(%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額(千円):b16,63924,637 <t< td=""><td>申請数</td><td>汝(件)</td><td>52</td><td>64</td><td>77</td><td>85</td><td>94</td><td>98</td><td>98</td></t<>	申請数	汝(件)	52	64	77	85	94	98	98
国内・国際国内32354751596058国際20283034343639エアロ771012131616スペース(5/2)(5/2)(7/3)(9/3)(10/3)(12/4)(3/13)エネルギー16141820212121エネルギー16141820212121(5/2)(8/8)(5/9)(6/12)(7/13)(7/14)(7/14)(7/14)(第四/国際)ライフ7131314191715サインス(5/2)(8/5)(9/4)(8/6)(12/7)(12/5)(8/7)サインス(5/2)(8/5)(9/4)(8/6)(12/7)(12/5)(8/7)サインス(5/2)(8/5)(10/7)(17/6)(17/7)(18/6)(17/7)(14/8)セイクロ(10/7)(10/7)(17/6)(17/7)(18/6)(17/7)(14/8)基盤5121315161823(4/1)(7/5)(8/5)(10/5)(12/4)(12/6)(16/7)採択率 (%)10098100100999899充足率 (金額)(%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額千円):b1663924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率 (金額)(%):b/a8284726656 </td <td>採択對</td> <td>汝(件)</td> <td>52</td> <td>63*</td> <td>77</td> <td>85</td> <td>93*</td> <td>96*</td> <td>97</td>	採択對	汝(件)	52	63*	77	85	93*	96*	97
国内・国际国際20283034343639エアロ スペース771012131616スペース(5/2)(5/2)(7/3)(9/3)(10/3)(12/4)(3/13)エネルギー16141820212121エネルギー16141820212121サイエンス(5/2)(8/8)(5/9)(6/12)(7/13)(7/14)(7/14)サイエンス(5/2)(8/5)(9/4)(8/6)(12/7)(12/5)(8/7)サイ・1717172324242422マイクロ(10/7)(10/7)(10/7)(17/6)(17/7)(18/6)(17/7)(14/8)基盤5121315161823低和(%)10098100100999899充足率(金額)(%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額(千円):a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091採択金額(千円):b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均东足率(金額)(%):b/a320391333301248229222	日内, 日欧	国内	32	35	47	51	59	60	58
分野別件数 (国内/国際)エアロ スペース7 (5/2)7 (5/2)10 (7/3)12 (9/3)13 (10/3)16 (12/4)16 (3/13)分野別件数 (国内/国際) $\overline{7}$ 16 (8/8)14 (5/9)18 (6/12)20 (7/13)21 (7/14)21 (7/14)21 (7/14) $\overline{7}$ 7 $\pm 4 \pm 2 \times 3$ 13 (5/2)14 (8/5)19 (9/4)17 (8/6)15 (12/7)15 (8/7) $\overline{7}$ 7 	国内・国际	国際	20	28	30	34	34	36	39
分野別件数 (国内/国際) $スペ-ス$ ($5/2$) $(5/2)$ $(7/3)$ $(9/3)$ $(10/3)$ $(12/4)$ $(3/13)$ 分野別件数 (国内/国際) $\overline{\gamma}$ 16 ($8/8$)14 ($5/9$)18 ($6/12$)20 ($7/13$)21 ($7/14$)21 ($7/14$)21 ($7/14$) $\overline{\gamma}$ 7 $\overline{\gamma}$ 13 ($5/2$)13 ($8/5$)14 ($9/4$)19 ($8/6$)17 ($12/7$)15 ($8/7$) $\overline{\gamma}$ 7 $\overline{\gamma}$ 17 ($10/7$)17 ($10/7$)23 ($10/7$)24 ($12/7$)24 ($12/7$)22 ($12/7$) $\overline{\gamma}$ 7 $\overline{\gamma}$ 17 ($10/7$)17 ($10/7$)23 ($10/7$)24 ($12/7$)24 ($12/7$)22 ($12/7$) $\overline{\gamma}$ 7 $\overline{\gamma}$ 17 ($10/7$) 17 ($10/7$) 17 ($11/7$) 15 ($11/7$) $8/7$ ($11/7$) 15 ($11/7$) \overline{K} 5 $4(41)$ 12 ($7/5$) 13 ($8/5$) 16 ($10/5$) 18 ($12/4$) 23 ($12/4$) \overline{K} $\%$ 100 98 100 100 99 98 99 \overline{K} 26 (77 $955997749884473197021767\overline{R}(\%)10098100100999899\overline{K}\overline{K}2677779559979749884473197021767\overline{R}\overline{R}166392463725,657$		エアロ	7	7	10	12	13	16	16
分野別件数 (国内/国際)エネルギー16 (8/8)14 (5/9)18 (6/12)20 (7/13)21 (7/14)21 (7/14)21 (7/14)分野別件数 (国内/国際)ライフ サイエンス7 (5/2)13 (8/5)13 (9/4)14 (8/6)19 (12/7)17 (12/5)15 (8/7)ウイフ サイエンス17 (5/2)(8/5)(9/4)(8/6)(12/7) (12/7)(12/5)(8/7) (8/7)ナノ・ マイクロ17 (10/7)17 (10/7)23 (17/6)24 (17/7)24 (18/6)24 (12/7)22 (14/8)基盤5 (4/1)12 (7/5)13 (8/5)15 (10/5)16 (12/4)18 (12/6)23 (16/7)採択率 (%)10098 26~10010099 38,89599充足率(金額)(%)26~ 20,17777~95 29,30359~97 35,40544~73 38,89519~70 43,35921~67申請金額(千円):a 平均充足率(金額)(%):b/a26,37 26,65725,550 25,55023,079 23,07922,00421,563平均充足率(金額)(%):b/a 平均充足率(金額)(%):b/a82 32084 333301248 229222		スペース	(5/2)	(5/2)	(7/3)	(9/3)	(10/3)	(12/4)	(3/13)
分野別件数 (国内/国際)ブイブ サイエンス(8/8)(5/9)(6/12)(7/13)(7/14)(7/14)(7/14)グサブ サイエンス7131314191715ウイブ サイエンス(5/2)(8/5)(9/4)(8/6)(12/7)(12/5)(8/7)ナノ・ マイクロ17172324242422マイクロ(10/7)(10/7)(17/6)(17/7)(18/6)(17/7)(14/8)基盤5121315161823(4/1)(7/5)(8/5)(10/5)(12/4)(12/6)(16/7)採択率(%)10098100100999899充足率(金額)(%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額(千円):a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091採択金額(千円):b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均系状金額(千円)320391333301248229222		エラルゼー	16	14	18	20	21	21	21
分野別件数 (国内/国際)ライフ サイエンス7131314191715(生内/国際)サイエンス(5/2)(8/5)(9/4)(8/6)(12/7)(12/5)(8/7)ナノ・ マイクロ17172324242422マイクロ(10/7)(10/7)(17/6)(17/7)(18/6)(17/7)(14/8)基盤5121315161823(4/1)(7/5)(8/5)(10/5)(12/4)(12/6)(16/7)採択率 (%)10098100100999899充足率 (金額) (%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額 (千円):a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091採択金額 (千円):b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率 (金額) (%):b/a82847266565149平均採択金額 (千円)320391333301248229222		エイルイー	(8/8)	(5/9)	(6/12)	(7/13)	(7/14)	(7/14)	(7/14)
(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・17172324242422マイクロ(10/7)(10/7)(17/6)(17/7)(18/6)(17/7)(14/8)基盤5121315161823(4/1)(7/5)(8/5)(10/5)(12/4)(12/6)(16/7)採択率(%)10098100100999899充足率(金額)(%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額(千円):a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091採択金額(千円):b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均採択金額(千円)320391333301248229222	分野別件数	ライフ	7	13	13	14	19	17	15
ナノ・ マイクロ17 (10/7)17 (10/7)23 (17/6)24 (17/7)24 (24 (18/6)24 (17/7)22 (18/6)基盤5 (4/1)12 (7/5)13 (8/5)15 (10/5)16 (12/4)18 (12/6)23 (16/7)採択率 (%)10098100100999899充足率 (金額) (%)26~ 26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額 (千円) : a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091採択金額 (千円) : b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率 (金額) (%) : b/a82847266565149平均採択金額 (千円)320391333301248229222	(国内/国際)	サイエンス	(5/2)	(8/5)	(9/4)	(8/6)	(12/7)	(12/5)	(8/7)
マイクロ(10/7)(10/7)(17/6)(17/7)(18/6)(17/7)(14/8)基盤5121315161823(4/1)(7/5)(8/5)(10/5)(12/4)(12/6)(16/7)採択率(%)10098100100999899充足率(金額)(%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額(千円):a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091採択金額(千円):b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均採択金額(千円)320391333301248229222		ナノ・	17	17	23	24	24	24	22
基盤5 (4/1)12 (7/5)13 (8/5)15 (10/5)16 (12/4)18 (12/6)23 (16/7)採択率(%)10098100100999899充足率(金額)(%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額(千円):a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091採択金額(千円):b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均採択金額(千円)320391333301248229222		マイクロ	(10/7)	(10/7)	(17/6)	(17/7)	(18/6)	(17/7)	(14/8)
座盤(4/1)(7/5)(8/5)(10/5)(12/4)(12/6)(16/7)採択率(%)10098100100999899充足率(金額)(%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額(千円):a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091採択金額(千円):b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均採択金額(千円)320391333301248229222			5	12	13	15	16	18	23
採択率(%)10098100100999899充足率(金額)(%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額(千円):a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091採択金額(千円):b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均採択金額(千円)320391333301248229222		坐盆	(4/1)	(7/5)	(8/5)	(10/5)	(12/4)	(12/6)	(16/7)
充足率(金額)(%)26~77~9559~9749~8344~7319~7021~67申請金額(千円):a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091採択金額(千円):b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均採択金額(千円)320391333301248229222	採択率	മ (%)	100	98	100	100	99	98	99
申請金額(千円):a20,17729,30335,40538,89541,34943,35944,091採択金額(千円):b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均採択金額(千円)320391333301248229222	充足率(金額)(%)	$26\sim$	$77 \sim 95$	$59 \sim 97$	$49 \sim 83$	$44 \sim 73$	$19 \sim 70$	$21 \sim 67$
採択金額(千円):b16,63924,63725,65725,55023,07922,00421,563平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均採択金額(千円)320391333301248229222	申請金額(千円):a		20,177	29,303	35,405	38,895	41,349	43,359	44,091
平均充足率(金額)(%):b/a82847266565149平均採択金額(千円)320391333301248229222	採択金額(千円):b		16,639	24,637	25,657	25,550	23,079	22,004	21,563
平均採択金額(千円) 320 391 333 301 248 229 222	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
一件あたりの採択金額(千円)	7,000	4,650	3,445	2,936

表11:分野横断プロジェクト申請・採択状況

表12:連携公募共同研究プロジェクトおよび萌芽公募共同研究の申請・採択状況

	連携公募共同研究プロジェクト			萌芽公募	共同研究
	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
申請数(件)	3	3	7	5	3
採択数(件)	3	3	7	5	3
採択率(%)	100	100	100	100	100
申請金額 (千円): a	4,700	4,600	7,900	911	450
採択金額(千円): b	2,977	2,627	4,572	393	257
充足率(金額) (%):b/a	63	57	58	43	57
一件あたりの採 択金額(千円)	992	876	653	79	86

表13:研究者の受け入れ状況

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
国内	165	210	262	350	345	347	430
国外	254	384	285	340	347	473	498
合計 (延べ人日)	419	594	547	690	692	820	928

表 14:研究費の内訳

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
物件費(千円)	8,136	22,343	22,837	18,739	16,796	16,649	12,417
旅費(千円)	7,415	11,978	11,484	13,866	15,809	15,611	18,688
合計 (千円)	15,551	34,321	34,321	32,605	32,605	32,260	31,105

表 15:研究成果の発表件数

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

2. 研究成果報告書

<一般公募共同研究>

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

Project code	J19I001
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

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

Simon Tupin*†, Khalid M. Saqr**†† *Institute of Fluid Science, Tohoku University **College of Engineering & Technology, Arab Academy for Science, Technology and Maritime Transport, EGYPT †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Recent research findings confirmed the existence of transitional flow in intracranial aneurysm (IA). Transitional flow is linked to aneurysm formation and rupture via pro-inflammatory responses of endothelial cells. The characteristics of transitional flow, and its relationship with arterial geometry and aneurysm morphology is unknown until the present day. Current CFD models and methods are not sufficient to study the transitional flow in aneurysm and link it with clinical and biological implications. This project aims at conducting in-vitro (Particle Image Velocimetry - PIV) and in-silico (Large Eddy Simulation - LES) investigations of transitional flow in IA in order to:

- 1- determine the criteria for transition to turbulence in IA
- 2- develop open source CFD solver for transitional flow in IA

2. Details of program implement

The objective of the first study of the project was to explore characteristics of transition to turbulence in IA using PIV and LES.

The details of the IA silicone model, flow circuit and PIV measurements setup were previously reported [2]. The measurements were conducted assuming planar symmetry in the ideal side-wall IA model shown in figure 1. The mean Reynolds number was 344 and Womersley number was 4.8. The inlet flow waveform measured by flow meter were analyzed using FFT. Then, only the waveform's first 10 harmonics were adopted in the LES setup to reduce computational cost.

In the present work, the computational work was conducted using ANSYS FLUENT V16 LES/WALE solver with bounded central differencing discretization scheme and 2nd order time stepping scheme. The total number of grid cells in the meshing was 2.5×10^5 cells with subgrid filter length ranging from 7.5×10^{-5} to 3.75×10^{-4} m. Three cardiac cycles were solved with time step of 2.5 ms. The total simulation time on Intel® i-7



Figure 1. (a) flow circuit of the PIV measurements (b) laser PIV setup (c) schematic of the symmetry plane and the locations of interest for comparison between PIV and LES.

6-core and 16 GB RAM PC consumed 26 hours to ensure that the solution is spatially converged to absolute residuals of 10^{-5} for velocity and pressure fields.

The peak systolic velocity field on the symmetry plane and energy cascade on point 1 are compared from PIV and LES measurements in figure 2. The shear layer is almost similar in height and velocity value in figures 2-b and 2-b. The rotational jet in the PIV results, however, is less concentrated and has shorter length than LES. Both sets of results showed three levels of dissipation demonstrated by the slope lines in figure 2. The value of cascade scaling in low frequency range is higher in the LES results (S \approx -7/5). The approximation of the boundary condition in LES results in higher dissipation of kinetic energy. However, at higher frequency, LES was able to capture the inverse cascade demonstrated by the PIV measurements with approximately the same cascade scaling value.



Figure 2 : Peak systolic velocity contours on symmetry plane and kinetic energy cascade comparison on point 1 for (a,c) PIV measurements and (b,d) LES simulations.

3. Achievements

Results of this first study are in line with the expected results for the first year of the project.

4. Summaries and future plans

Coarse LES simulations with approximated boundary conditions are capable of predicting the essential flow and TT characteristics in side-wall aneurysm. PIV and LES demonstrated three-regime kinetic energy cascade. LES results additionally revealed that the aneurysm is dominated by a coherent vortex in the systole, which vanishes to a smaller vortex at the neck plane during the diastole. Higher resolution LES should be capable of computing TT characteristics with better accuracy.

Future plans of this project will focus on building more aneurysm models that are anatomically realistic (i.e. averaged from patient data) and conduct more robust CFD simulations to capture the transitional characteristics of aneurysmal flow.

5. Research results (* reprint included)

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

- *[1] <u>Saqr, K. M., S. Rashad</u>, S. Tupin, <u>K. Niizuma</u>, <u>T. Hassan</u>, <u>T. Tominaga</u> and M. Ohta: What does computational fluid dynamics tell us about intracranial aneurysms? A meta-analysis and critical review, *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, Vol. 40, No. 5, (2020), pp. 1021-1039.
- International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[2] Tupin, S., <u>Saqr, K. M.</u>, Ohta, M.: Transition to Turbulence in Side-wall Intracranial Aneurysm: A Comparative PIV and LES Study, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, CRF-59, (2019), pp. 118-119.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I002
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Chemical Interpretation of the Two-Stage Cool Flame of Diethylether

Yasuyuki Sakai*†, Hisashi Nakamura**†† Toru Sugita**, Takuya Tezuka** * Department of Mechanical Engineering, University of Fukui **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

There are many experimental and theoretical studies on the low-temperature oxidation mechanism of hydrocarbon fuels for accurate understanding and prediction of autoignition phenomena such as knocking in sparked ignition engines. Among these studies, our present study was motivated by the two-stage cool flame behavior of stoichiometric diethyl ether (DEE)/air mixture measured by Nakamura who is one of co-authors. This project aims to see the oxidation mechanism of stoichiometric DEE/air by using both temperature-controlled micro-flow reactor and detailed chemical kinetics mechanism.

2. Details of program implement

Figure 1 shows the intensities of chemiluminescence (upper) and CH_2O -LIF (lower). The three peaks of chemiluminescence are located at around 630, 780, and 1120 K. Although we observed different phenomena from shock-tube experiments, it was concluded that this flame image of chemiluminescence supports the possibility of three-stage ignition presented in the literature. CH_2O -LIF was observed in wider temperature range compared to chemiluminescence with a peak at 700 K.

Simulated heat release (upper and middle) and CH₂O mole fraction (lower) profiles are also shown in figure 1. It should be noted that the simulated heat release profile does not directly correspond to measured CH radical chemiluminescence profile. There are four peaks of heat release located at 594, 736, 1024, and 1152 K, respectively. In the simulations of shock tube experiments at 18 and 40 bar in the literature, the first two peaks (before final ignition) were predicted relatively higher temperatures. However, considering the different phenomena observed and pressure difference, these two peaks at 594 and 736 K probably correspond to the first two peaks in shock tube experiment. Reaction flow analysis around the four peaks of heat release were performed. Here, we focus on the difference of reaction flow at first (594 K) and second peak (736 K). At first peak, the main sources of OH radical production are 8-fission reaction (31%) and second O₂ addition pathway (50%) of C4H8ObOOHc (CH₃CH(OOH)OCHCH₃). C₄H₈ObOOHc is CH₃CHOCH₂CH₃ produced DEE CH₃CH(OO)OCH₂CH₃ via \rightarrow \rightarrow $CH_{3}CH(OOH)OCHCH_{3}$, this pathway is also main flow of DEE oxidation. Before first peak, C4H8ObOOHc mainly reacts by second O_2 addition which leads to chain branching (for example, 96% at 479 K), however, after first peak C4H8ObOOHc mainly reacts 8-fission reaction which leads to chain propagation (for example, 82% at 639 K). It is thought that the first peak arises from the change of reaction pathway of C4H8ObOOHc. At second peak, the main sources of OH radical production change into O-O fission reaction of CH_3OOH (42%) and C_2H_5OOH (16%) which are decomposition

products of DEE. Before second peak, $CH_3CHOCH_2CH_3$ mainly reacts by first O₂ addition (for example, 64% at 639 K), however, after second peak $CH_3CHOCH_2CH_3$ mainly reacts β -fission reaction which produces CH_3CHO and C_2H_5 (for example, 97% at 817 K). Thus, the reactions of decomposition products of DEE account for OH production. At the third and fourth peak, the main OH radical sources change into H_2 -O₂ reaction systems well-known as high temperature oxidation mechanism.



Fig. 1 Comparisons between measured (black lines) and simulated (red lines) profiles of cool flame (upper) and CH_2O (lower) as a function of wall temperature, T_w .

3. Achievements

We can clearly show the reason why DEE shows two-stage cool flame.

4. Summaries and future plans

To elucidate the low-temperature oxidation mechanism of DEE, stoichiometric diethyl ether/air flame at atmospheric pressure was investigated by using a micro flow reactor. The separated cool flame structure with temperature range of 600-800 K was observed from chemiluminescence measurement. Reaction flow analysis shows the importance of the reactivity for CH₃CH(OOH)OCHCH₃ and CH₃CHOCH₂CH₃ radicals. We are now preparing the results for publish. Then, our focus moves to another ether molecules.

- 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>Yasuyuki Sakai</u>, Hisashi Nakamura, Toru Sugita, Takuya Tezuka: Chemical Interpretation of the Two-Stage Cool Flame of Diethylether, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, CRF-2, (2019), pp. 4-5.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I003
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

Mixture of Experts in Bayesian Optimization for Complex Aerospace Designs

Rhea P. Liem*[†], Koji Shimoyama^{**††} T. Jim^{**}, P. Boonjaipetch^{**}, Y. Lyu^{*}, K. S. Oyetunde^{*}, P. S. Palar^{***} *Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, HKUST, Hong Kong **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***Institut Teknologi Bandung (ITB), Indonesia [†]Applicant, ^{††}IFS responsible member

1. Purpose of the project

The main objective of the proposed research is to improve the computational efficiency of the Bayesian optimization technique. Focus will be given to the surrogate model construction, in particular in the improvement of surrogate model's accuracy and the sample-updating procedure in order to find the global optimum more efficiently. This will be achieved by incorporating machine learning technique in the procedure. To this end, we propose to construct an ensemble of Kriging surrogate models with multiple Kernel functions in order to boost the search performance of Bayesian optimization. The developed method would then be demonstrated in two case studies in the context of aerospace engineering.

2. Details of program implement

We derive a novel kriging variant to address its current limitations to approximate complex problems that are typically non-linear, non-smooth, noisy, and with heterogeneous function profiles. In particular, we explore the mixed kernel (MK) approach, which enables selecting a different kernel function for each variable. This approach provides a means to better model the inherent heterogeneity of the complex function. The predictive performance of this proposed method is compared with results obtained from using a single kernel, ensemble method, and the composite kernel learning (CKL). The benchmarking was performed with two analytical problems (Branin and Himmelblau functions) and an aerodynamic test case; all are two-dimensional problems. The aerodynamic test case comprises the approximations of lift and drag coefficients (C_L and C_D) of a Common Research Model (CRM) configuration. The samples are obtained by running 3-D Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) simulations on the SU2 solver. Mach number and angle of attack are varied in the design space. We validate the surrogate models by computing the normalized root-mean square errors (NRMSE), as shown in Figs. 1 and 2 below. We find that the single kernel performance is problem dependent. Performance improvements are observed when we consider multiple kernels, led by the MK approach and followed by CKL. While the MK approach outperforms the accuracy performance in most cases, it also incurs the highest computational efforts, especially for higher-dimensional problems. Further investigations are needed to optimize the kernel combination.

3. Achievements

We presented four conference papers, two of which were for ICFD 2019.



Fig 2. Approximation errors for the CRM problem.

4. Summaries and future plans

We plan to continue our collaborations and to work on journal articles, based on the conference papers. We have applied for a new CRP scheme under IFS, titled "Datadriven kriging variant characterization and construction for complex aerospace problems." In this newly proposed project, we will focus on the surrogate modeling aspect of our collaborative work. In particular, the key objective is to perform a systematic and computationally rigorous method to select the optimum model structure and parameters of the kriging model for the specific problem at hand.

- 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] L. R. Zuhal, K. Zakaria, P. S. Palar, K. Shimoyama, R. P. Liem: Gradient-Enhanced Universal Kriging with Polynomial Chaos as Trend Function, AIAA SciTech Forum, Orlando, USA, (2020).
- *[2] <u>R. P. Liem, K. S. Oyetunde</u>, <u>P. S. Palar</u>, K. Shimoyama: Kriging with mixed kernel (MK) for complex aerospace problems, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-3, pp.6-7.
- [3] P. S. Palar, L. R. Zuhal, R. P. Liem, K. Shimoyama: An Investigation on Covariance Functions of Kriging for Surrogate Modelling in Fluid Dynamics, *Proceedings of the* 16th International Conference on Fluid Dynamics, Sendai, (2019), GS1-4, pp. 86-87.
- *[4] P. S. Palar, R. P. Liem, L. R. Zuhal, K. Shimoyama: On the Use of Surrogate Models in Engineering Design Optimization and Exploration: The Key Issues, *GECCO*, Prague, (2019).
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I004
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	3rd 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*, Satoshi Uehara* *Institute of Fluid Science, Tohoku University **Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL) †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

In this study, we present experimental observations of microjets formed by cavitation microbubbles. An underwater electric discharge generated beneath an alumina plate produces a compression wave. Then the wave reflects at the free water surface and subsequently at the plate. The first reflection yields an expansion wave, which produces a cloud of cavitation bubbles in the liquid, some of which form microjets upon collapse. By using these reflection waves, it is possible to control the microjet direction.

Figure 1 shows the experimental setup. The bubble-generating part consists of two electrodes for a spark discharge, 0.2-mm-thick alumina plate and a small cuvette filled

with distilled water. The pulsed high-voltage circuit consists of a DC power source, spark gap switch, resistances, and capacitors. Applied voltage is up to 30 kV. The quasi-planar wave is produced by the oscillation of the plate in association with a spark discharge. The images of bubble behaviors are captured by an ultra-high speed camera with the frame rate of 100 Mfps. We use ultrasound contrast agents as a bubble cores. Ultrasound contrast agents consist of microbubbles with



Fig. 1 Experimental setup

1-10-um diameter and a lipid bilayer coating. Inside the shell, C_4F_{10} gas is enclosed. The gas acts as the nucleation core of the cavitation bubble when the expansion wave arrives.

The typical observed



Fig. 2 Cavitation bubble expansion and collapse with generation of a microjet.

images are shown in Fig.2. The bubble expands in nano-seconds order. When the bubble collapses, micro-meter scale jet (microjet) is formed and propagates downward. The maximum diameter of the bubble reached before the collapse is defined as R_{max} (Fig. 2). The observed collapse time is defined as T_E . Figure 3(a) shows the relationship in between T_E and R_{max} . The results are normalized by Rayleigh collapse time T_R . In Fig.4 (a) there is a linear relation, that is to say, T_E increases proportionally with R_{max} .

3. Achievements

We observed cavitation bubble behavior generated by expansion wave by constructing the ultra-high speed camera system. It is found that there is a linear relation of maximum radius R_{max} and collapse time T_{E} .

4. Summaries and future plans

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

- 5. Research results (* reprint included)
- Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)



Fig. 3 Typical pictures of micro-jet generation with collapsing a cavitation bubble.



Fig. 4 (a) The relationship of the collapse time $T_{\rm C}$ with the maximum bubble radius $R_{\rm max}$. (b) The relationship of the collapse time normalized by the Rayleigh collapse time $T_{\rm E}/T_{\rm R}$ with the maximum bubble radius $R_{\rm max}$.

- *[1] S. Uehara, T. Akimura, T. Nakajima, K. Ohtani, <u>O. Supponen</u>, <u>M. Farhat</u>, and T. Sato: Characteristics of Jetting from Micro Cavitation Bubbles Under Multiple Pressure Waves, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-65, pp. 140-141.
- 3) Patent, award, press release etc. (Patent) Not applicable.
 (Award) Not applicable.
 (Press release) Not applicable.

課題番号	J19I005
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2年目

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

向井 有理*†, 亀卦川 樹*, 越中谷 賢治**, 太田 信***†† *明治大学大学院理工学研究科電気工学専攻 ***青山学院大学理工学部化学・生命科学科 ***東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

細胞内で生合成されたタンパク質は適切な細胞内小器官に局在化されその機能を発揮する.各々のタンパク質の細胞内局在性は、局在化シグナルとしてアミノ酸配列の一部により決定されていることが知られている.II型膜貫通型タンパク質の膜貫通領域『シグナルアンカー』は通常10~30残基の疎水性アミノ酸からなり、小胞体局在化シグナルとしても働くことが明らかにされている.II型膜タンパク質は最もシンプルな構造をした膜タンパク質でありながら、タンパク質の翻訳後修飾など重要な生化学反応に関わる酵素が多く、細胞内の正しい位置に送達されることが細胞の恒常性維持に必須である.しかしながら、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 型膜タンパク質シグナルアンカー周辺配列-GFP 融合タンパク質の細胞内局在性解析 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貫通領域のアミノ酸配列 を明確に判別することができた (Kikegawa *et al.*, BBB, 2018). 我々はこのように、II 型膜タン パク質のシグナルアンカー周辺配列が細胞内局在性を決定している可能性を示してきた.

そこで、II 型膜タンパク質のシグナルアンカー周辺配列を GFP と融合させたタンパク質を 遺伝子工学的に作製し、GFP 融合タンパク質が正しい細胞内局在性を有するかどうかという 点について、検証実験を行うこととした.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. 細胞内局在性の異なる 9 種の II 型膜タンパク質のシグナルアンカー周辺配列を導入した GFP 発現ベクターを用いて HeLa 細胞のトランスフェクションを行い,GFP 融合タンパク質 の細胞内局在性を詳細に観察したところ,小胞体局在性を有する II 型タンパク質のシグナル アンカー周辺配列と結合させた GFP 融合タンパク質は小胞体へ局在化し,ゴルジ体局在性 II 型タンパク質のシグナルアンカー周辺配列-GFP 融合タンパク質はゴルジ体へ,細胞膜局在 性シグナルアンカー周辺配列-GFP 融合タンパク質は細胞膜へと,それぞれ局在化した(図 1). 以上より,小胞体・ゴルジ体・細胞膜への II 型膜タンパク質の正しい局在化にはシグナルア ンカー周辺配列が本質的であることが検証された.





PMGT2_HUMAN SA-GFP (小胞体局在) B3GN6_HUMAN SA-GFP (シスゴルジ局在)





図 1. II 型膜タンパク質のシグナルアンカー周辺配列-GFP 融合タンパク質が発現した HeLa 細胞の GFP 蛍光観察による細胞内局在性評価

- 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:85%】

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:論文投稿および出版

4. まとめと今後の課題

最終年度は、GFP融合タンパク質を用いた検証実験に関する論文の投稿・出版に注力する.

- 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) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- *[1] <u>Y. Mukai, T. Kikegawa</u>, Y. Suda, Y. Kobayashi, M. Ohta, M. Doi, <u>K. Etchuya</u>: The Role of Signal-anchor Region of Type II Transmembrane Protein in Subcellular Localization, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI-2019), Sendai, (2019), CRF-60, pp. 120-121.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19I006
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Application of Core-Based Inversion to Reconstruct Stress Field in an Underground Geoscience Laboratory

Takatoshi Ito*†, Xiaodng Ma**††, Yusuke Mukuhira* *Institute of Fluid Science, Tohoku University **Institute of Geophysics, ETH Zurich †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objectives of this project are to overcome these technical challenges of DCDA and increase the validity of DCDA. We plane to collaborate the project Deep Underground Geoscience Laboratory (DUGLab) in the Swiss central Alps, which is operated by ETH Zurich and the Swiss competence center for energy research supply of energy (SCCER-SoE). Multidisciplinary measurement, experiment, and study are planned in this project for mainly geothermal and also for better understanding of induced seismicity associated with fluid injection. Application of DCDA to the rock core samples from this project will provide stress profile along the borehole and the heterogeneity of the differential stress. So, another objective is to contributing DUGLab by providing the in situ stress estimation with DCDA method.

2. Details of program implement

Non-IFS responsible member, Dr Xiaondong Ma, will visit IFS with rock core samples from DUGLab project. We will measure the asymmetric variation of core diameter with specially designed apparatus which is equipped in our lab (Fig.1). He will bring several cores sampled from different depths of various boreholes. Then, we estimate the differential stress at the different point from the measurements. We also estimate stress magnitude referring the minimum principal stress in borehole coordinate and overburden. Finally, we compare the result of stress estimation by conventional method of borehole breakout analysis and discuss the validity of DCDA method.

3. Achievements

Project research status is ongoing as schedule. We confirmed the first step of the core measurement and we will work more cores in next year.

Non-IFS responsible member, Dr. Xiaondong Ma, visited IFS with several rock core samples from a different depth of one borehole at the DUGLab project for the initial test. We measured the core diameter with a specially designed apparatus that is equipped in our lab (Fig.1). Then, we confirmed that the quality of the core from the DUGLab project is applicable to DCDA measurement.



Figure 1 : DCDA-resolved azimuth of maximum principal stress along the core CB1-1 from DUG lab.

4. Summaries and future plans

We will get more differential stress estimates and orientation of maximum stress at the different points of the well from the extended DCDA measurement on more cores. In a process of measurement, the validation of the DCDA method will be achieved by comparison with the result of the hydraulic fracturing test.

So, the combination of conventional hydraulic stimulation (in-situ) and DCDA (ex-situ) will reveal a wider range of stress state at the DUGLab study area. Hydraulic stimulation can provide the minimum stress on one specific point and costs a lot. DCDA will cover the wider area of differential stress information and orientation of maximum stress. Both the in-situ and ex-situ methods compensate each other and discover the comprehensive stress field.

- 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>Ma, X.</u>, Mukuhira, Y., Ito, T. : Application of core-based inversion to reconstruct stress field in an underground geoscience laboratory, *Proceedings of the 19th international Symposium on advanced Fluid information*, Sendai, (2019), CRF-4, pp. 8-9.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I007
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year (progressing)

Thermal Conductivity Reduction and Carrier Concentration Optimization for Development of Nanocomposite Materials with Enhanced Thermoelectric Figure of Merit

Vladimir Khovaylo*†, Toshiyuki Takagi**†† Hiroyuki Miki**, Hiroyuki Kosukegawa**, Sergey Taskaev***, Marina Seredina* Anna Kalugina*, Anastasiya Taranova* *National University of Science and Technology "MISiS" **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***Chelyabinsk State University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Purpose of the project in 2019 was experimental and theoretical studies of semiconducting Heusler-based alloys. Particularly, Vanadium doping of Fe₂TiSn Heusler alloys were tested as a tool for enhancement their thermoelectric properties via thermal conductivity reduction and carrier concentration optimization by means of varying valence electron count.

2. Details of program implement

Samples of the chemical composition $Fe_2Ti_{1-x}V_xSn (x = 0, 0.06, 0.15, and 0.2)$ were fabricated by arc melting technique under high-purity argon atmosphere. Annealed at 1073 K ingots were ground in a mechanical mortar and sintered by spark plasma sintering. Phase composition of the samples was analyzed by X-ray diffraction. Thermal conductivity, electrical resistivity and Seebeck coefficient were measured by laser flash, four probe and differential methods, respectively. *Ab initio* calculations of $Fe_2Ti_{1-x}V_xSn$ were performed in terms of density functional theory with the help of the Vienna *ab initio* Simulation Package (VASP) using the projector augmented plane wave method; the cutoff energy is 500 eV. Atomic relaxation in the cells and optimization of the lattice parameter with uniform ideal atomic distribution (*L*2₁-type structure) were performed using $15 \times 15 \times 15 k$ points. The crystalline structure with random atomic distribution in the alloy, which corresponds to a partially disordered *B*2-type structure (Fig. 1a), was optimized using $2 \times 2 \times 2 k$ points.

3. Achievements

Experimental investigations of the Fe₂Ti_{1-x}V_xSn alloys showed that all samples are thermally and chemically stable to 1173 K. Measurements of the thermal properties revealed that the prevailing component of the thermal conductivity changes from lattice to electron with temperature increasing. The lattice conductivity steadily decreases overall the temperature range, but this variation is not large, which can be explained by the close atomic radii of titanium and vanadium. According to the results of transport property measurements, the alloys under study belong to semiconductors. The maximal Seebeck coefficient *S* is observed at 300 K for the undoped Fe₂TiSn sample and is equal to 35 μ V/K.

Theoretical calculations of the electron structure and Seebeck coefficient S in Fe₂Ti_{1-x}V_xSn alloys for the cases of a fully ordered L21 and partially disordered B2
Heusler crystal structure were performed. It was shown that the band-gap width increases with the substitution of Ti by V. In the case of the completely ordered $L2_1$ structure and uniform distribution of vanadium atoms, a tenfold increase in S of V-doped samples was found, which agrees with the previous theoretical investigation of this alloy. However, when compared with the results of the experimental investigation of similar Heusler alloys, it is evident that the calculations greatly overestimates the influence of the substitution of titanium by vanadium on the thermoelectric properties of Fe₂Ti_{1-x}V_xSn. The results of calculations for the case of a partially disordered structure of the *B*2 type and nonuniform distribution of V atoms in the supercell (Fig. 1a) are more realistic. We can conclude from Fig. 1b that the Seebeck coefficient reaches -42μ V/K in the best case, which is fivefold smaller in modulo than S calculated for the L21 structure with a uniform distribution of vanadium.



Figure 1: (a) Supercell $2 \times 2 \times 2$ of $\text{Fe}_2 \text{Ti}_{1-x} V_x \text{Sn}$ (x = 0.25) of the *B*2 type with the nonuniform distribution of vanadium atoms; (b) Temperature dependence of the Seebeck coefficients for the $\text{Fe}_2 \text{Ti}_{1-x} V_x \text{Sn}$ Heusler with random atomic distribution.

4. Summaries and future plans

It is shown that theoretical assumptions on an increase in the thermoelectric efficiency of the Fe_2TiSn alloy with the partial substitution of titanium atoms by vanadium did not find experimental confirmation. The substantial difference of the theoretical calculations and experimental results can be explained by the fact that the theory does not take into account the nonideality of the experimental samples. Future plan is to stuy thermoelectric properties of other representative of semiconducting Heusler alloys.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] <u>Ye. Zh. Ashim, T. M. Inerbaev, A. T. Akilbekov</u>, H. Miki, T. Takagi, and <u>V. V. Khovaylo</u>: Theoretical Modeling of the Thermoelectric Properties of Fe₂Ti_{1-x}V_xSn Heusler Alloys, *Semiconductors*, Vol. 53, (2019), pp. 865-868.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[2] Vladimir Khovaylo, Anastasiya Taranova, Andrey Novitskii, Andrei Voronin, <u>Erzhan Ashim, Sergei Taskaev</u>, Hiroyuki Miki and Toshiyuki Takagi : Influence of Vanadium on Thermoelectric Properties of Fe₂Ti_{1-x}VxSn Heusler Alloys, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI-2019), Sendai, (2019), CRF-71, pp. 152-153.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I008
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

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

> Mehrdad Raisee Dehkordi*†, Koji Shimoyama**†† Arash Mohammadi* *College of Engineering, University of Tehran **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In large number of fluid engineering applications, uncertainties in the physical properties, model parameters and operating conditions can significantly affect the system Quantity of Interest (QoI). In such conditions, it is necessary to account for the effects of all sources of uncertainty in the design process to achieve a more robust response. However, a single computation of practical fluid dynamics problems (based on advanced numerical methods) could be computationally too expensive. Thereby, the cost of quantifying a large number of operational, geometrical etc. random variables in such problems is unaffordable. The purpose of the current project is the development of novel affordable Uncertainty Quantification (UQ) methods for tackling practical fluid flow problems with large number of random variables. The proposed methods are multifidelity surrogate models and use the Non-intrusive Polynomial Chaos Expansion (NIPCE). The ultimate goal of this research project is to combine three efficient UQ methods; namely the Proper Orthogonal Decomposition (POD), the Compressed Sensing (or L1-minimization) and the Kriging method to reduce the computational time of UQ. To fulfill this objective, the proposed method will be developed in two stages. In the first step, the surrogate model is constructed by combination of POD and compressed sensing. In the next step, the computational model is refined by incorporating the Kriging method in the methodology. In other words, the retrieved optimal basis functions from POD are used in the trend part of the Kriging method. To assess the capabilities of the proposed surrogate models, they will be applied to the challenging CFD test cases.

2. Details of program implement

During the first year of the project, the first stage of the project (i.e. development of an efficient UQ method via combination of POD and L1-minimization) is completed. The developed method is successfully applied into two challenging CFD problems: i) transonic turbulent air flow around RAE2822 airfoil with 18 geometrical uncertainties and ii) transonic turbulent air flow around NASA Rotor37 with 3 operational and 21 geometrical uncertainties (see Figure 1). The outcome showed significant reduction in the UQ computational cost in comparison to the classical UQ methods. Further improvement in the performance of the developed multifidelity method could be achieved by introducing the Kriging method in the developed model.



Figure 1: Considered practical CFD test cases : (a) RAE 2822, (b) NASA Rotor37.

3. Achievements

So far, the POD method is successfully combined with the compressed sensing method and subsequently implemented to two challenging high-dimensional CFD problems. It is found that the new bi-fidelity method is able to significantly reduce the computational cost of UQ analysis of challenging fluid engineering problems compared to the alternative methods. The numerical results of this part of research have already been documented and submitted to the Elsevier Journal of Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering for publication.

4. Summaries and future plans

This general collaborative research project is concerned with the development of affordable UQ methods to handle large numbers of simultaneous uncertainties. The proposed multifidelity approach uses the advantages of three efficient UQ methods; namely the sparse NIPCE, the POD and the Kriging methods. For the continuation of the work, the Kriging model will be incorporated in the developed multifidelity method with the support of IFS collaborators. Finally, attempts will be made to introduce the adaptive sampling method in the methodology. The research findings will be presented in the upcoming ICFD2020 conference and will be submitted to relevant high quality Journals.

- 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>M. Raisee</u>: Robust Design Optimization in Computational Fluid Dynamics, oral meeting presentation, Tohoku University, (2019).
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.
 - (Award) Not applicable.

⁽Press release) Not applicable.

Project code	J19I009
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

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

> Yusuke Mukuhira*†, Justin Rubinstein**†† Jack Norback***, Meihua Yang*, ****, Kangnan Yang*, **** *Institute of Fluid Science, Tohoku University **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. Meanwhile, the exploration and exploitation of geothermal resources in China has gradually developed. One of the challenges in conventional/next generation geothermal development (Enhanced/Engineered Geothermal System: EGS) is to understand the hydraulic properties of the geothermal reservoir. We often attempt to measure the hydraulic property (permeability or diffusivity) by wellbore tests or by using indicators such as migration of microseismicity. However, these quantities are often interpreted as representative value of hydraulic property for 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. 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

We had Dr. Jack Norbeck and Dr, Justin Rubinstein last November to discuss the research progress and detailed action plan for future works. Also, Dr. Norbeck solved all technical issues related on CFRAC modeling, since he is one of the developers of the CFRACK model. Their visit to IFS, Tohoku Univ. organizes the research structure again and speeds up the modeling part. We decided to analyze microseismicity to investigate the relationship between global permeability and local permeability. Previous project members, the visiting student Ms. Meihua Yang already performed very well and showed the reasonable basic results of microseismic cloud analysis on Basel data set. So, we can use the analysis code to other fields of Soultz and Fenton hill. Usually, the microseismic data is very difficult to get due to NDA. PI possesses the Basel and Soultz microseismic data and they are always available. Dr. Jack Norbeck recently complied with the microseismic catalog data of Fenton hill, which is also available to us.



Fig.1 The EGS and pore pressure distribution of cluster microseismic data

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. Also, we planned to summarize the microseismic analysis part with invitation of Ms. Meihua Yang to ifs. But her invitation had to be cancelled due to COVID2019.

4. Summaries and future plans

We improved the CFRAC performance and solved the technical issues related the CFRAC code. So, the good result from CFRAC part is forthcoming. 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. Meantime, Ms. Meihua Yang accomplished most of microseismic analysis and further extended 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] <u>Yang, M.</u>, Mukuhira, Y., <u>Norbeck, J. H.</u>, <u>Rubinstein, J. L</u>.: Validation of Fracture Permeability Estimated by Integrated Approach of Microseismic Observations and Reservoir Engineering Modeling. *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-5, pp. 10-11.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I010
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Mechanical Analysis of a Patented Biodegradable Zinc Alloy Stent Based on a Degradation Model

Aike Qiao*†, Makoto Ohta**†† Kun Peng*, Xinyang Cui*, Hitomi Anzai**, Honghui Zhang* * College of Life Science & Bioengineering, Beijing University of Technology **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The scaffold performance of a patented biodegradable zinc stent and its effect on treating stenotic vessel are analyzed based on a degradation model, which is important for development of biodegradable stents. The purposes of the project are: (1) to construct a degradation model of biodegradable zinc alloy; and (2) to analyze scaffold performance of the patented zinc stent and its effect on reshaping stenotic vessel based on the degradation model.

2. Details of program implement

During the past year, the project group carried out detailed collaborative research on novel structure design of biodegradable endovascular stent and hemodynamics of cardiovascular system. Both sides have endeavored to promote the progression of the project. Applicant from overseas came to Tohoku University to attend two conferences held in Sendai: (1) 6th International Conference on Computational and Mathematical Biomedical Engineering – CMBE2019, 10-12 June 2019, Sendai, Japan; (2) 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019), Nov. 6-8, 2019, Sendai, Japan. With regards to the novel structure design of biodegradable endovascular stent (Fig. 1), numerical simulation was performed to evaluate its scaffold performance and degradation process.



Figure 1 : Structure of the common stent (a) and the novel stent (b), and the details of the strutting ring and the link (c).

With regards to Material degradation model, the relationship between the effective stress tensor σ and the undamaged stress tensor $\overline{\sigma}$ can be described as $\sigma=(1-D)\overline{\sigma}$, where D is a global damage variable, which increases monotonously from 0 to 1. The global damage variable D is assumed to be linear superposition of the uniform corrosion damage and the stress corrosion damage.

Results showed that the average von Mises stress decreased from 50.71 MPa to 39.6 MPa in the novel stent during the degradation process, while that of the common stent decreased from 80.99 MPa to 51.9 MPa. These data corroborated that less recoiling and failed elements occur with the novel stent.

The radial recoiling ratios of the common stent and the novel stent are 22.6% and 7.19%, respectively. The mass loss ratios of the common stent and the novel stent are 14.1% and 3.1%, respectively. Less radial recoiling ratio and mass loss ratio of the novel stent mean the novel stent can still have stronger scaffolding performance and longer server time in corrosive environment.

The results indicate that structural innovation is very helpful for strong scaffolding performance and resistance to corrosion. A novel biodegradable zinc alloy stent with sufficient scaffolding performance can be a new competitive intervention device for future clinical cardiovascular application.

3. Achievements

Expected results stated in the application form: (1) A material degradation model of biodegradable zinc alloy; (2) The assessment of scaffold performance of the patented stent and its effect on reshaping stenotic vessel; (3) 1-2 research papers.

A novel structure for biodegradable zinc alloy stent with strong scaffolding performance was proposed. The mechanical performance of this design such as the stress distribution, the expansion pressure, and the recoiling displacement were investigated via finite element method. The analysis results suggested that the new stent design could provide much stronger scaffolding than a traditional stent.

4. Summaries and future plans

A novel stent with strong scaffolding performance was proposed and was investigated using finite element analysis approach. Results indicate that benefiting from the novel structure, the novel stent still has strong scaffolding performance following its degradation.

In future work, hemodynamics should be included in the stent degradation process, and more mechanobiological factors should be considered to model the vessel growth and remodeling process.

5. Research results (* reprint included)

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

- [1] <u>K. Peng, A. Qiao, J. Wang</u>, M. Ohta, <u>X. Cui</u>, Y. <u>Mu</u>: A Novel Structure Design of Biodegradable Zinc Alloy Stent and its Effects on Reshaping Stenotic Vessel, *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, (2020), (accepted).
- *[2] G. Li, K. Watanabe, H. Anzai, <u>X. Song</u>, <u>A. Qiao</u>, M. Ohta: Pulse-Wave-Pattern Classification with a Convolutional Neural Network, *Sci Rep.*, 9 (2019), 14930.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- *[3] <u>K. Peng</u>, <u>X. Cui</u>, <u>S. Liu</u>, <u>A. Qiao</u>, H. Anzai, M. Ohta: Mechanical Analysis of a Novel Biodegradable Zinc Alloy Stent Based on a Degradation Model, *Proceedings of the* 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019), Sendai, (2019), CRF-61, pp. 122-123.
- [4] <u>K. Peng, X. Cui, A. Qiao</u>, M. Ohta, K. Shimoyama, <u>Y. Mu</u>: Mechanical Analysis of A Novel Biodegradable Zinc Alloy Stent Based on Degradation Model, *Molecular & Cellular Biomechanics*, Vol. 16, Supplement 1, (2019), p.53, *1st International Conference on Biomechanics and Medical Engineering*, September 20-23, 2019 in San Diego, CA, USA.
- Patent, award, press release etc. Not applicant.

課題番号	J19I011
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

人工改変球殻状タンパク質による外表面ポリマー修飾と内包ナノ粒子距離制御 Development of Nanodots Distance Controlled Etching Mask by Cage-Shaped Protein with Outer-Surface Polymer Modification

山下 一郎*†, Huanwen Han*, 大堀 大介**, 寒川 誠二**†† *大阪大学工学研究科, **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

これまで複数種の球殻状タンパク質,特にフェリチンの内部空間でナノ粒子を合成し,タンパク質殻表面を改変・利用して半導体基板上に2次元配置し,これをマスクとした中性粒子ナノエッチングで機能構造を作製してきた.この手法により半導体薄層をワイドギャプ半導体で挟んだサンドイッチ構造基板をエッチングしナノディスク・量子井戸の2次元3次元配列及び量子効果素子の作製を可能となる.この量子効果素子の特性制御及びその高効率化のために,量子井戸の2次元面内間隔制御が必須である.そのためナノエッチングマスクとなるナノ粒子配置間隔を制御する手法を開発する必要がある.

2. 研究成果の内容

光学量子効果素子実現には、20~50nm 程度の距離制御ナノ粒子配置マスクが必要となる. 外径 12nm のフェリチン殻の相互作用では、20~50nm 距離配置はできない.この課題を解決 するために、球殻状タンパク質の外表面をポリエチレングリコール(PEG)修飾し、タンパク 質間距離を広くする.具体的には MeO-PEG-NHS または Fluo-PEG-NHS との反応により PEGylation を行い、PEG 層による立体障害により間隔を制御する.フェリチンサブユニット あたり 20~1000 mol 過剰の PEG 誘導体をリン酸緩衝液(100 mM, pH 8.2)中で約48時間反 応させ、遠心限外濾過膜で濃縮・調整した.この手法で分子量 500 から 20,000 の PEGylation が可能であった.動的光散乱測定によりフェリチンの直径は分子量に比例して大きくなるこ

とが確認された(図1).また図2に示すように,PEG 修飾 フェリチンでのナノ粒子バイオミネラリゼーションでは, 溶液中金属イオンによるフェリチンの凝集を外周 PEG 層が 抑制しフェリチンの水溶液中高分散性が保持されること が示された.その結果,フェリチン内部でのナノ粒子合成 が高効率で行えた.PEGylationされたナノ粒子内包フェリ チンの半導体基板への吸着量の時間経過を図3に示す.吸 着は1分程度でほぼ飽和量に近くなり極めて速いことが示 された.この基盤を SEM 観察したところ大幅なナノ粒子間 隔の増大が確認された.



図1. PEGylation を行った フェリチン直径測定結果



図 2. PEGylated フェリチンのナノ粒子合成 時における,溶液中分散率



図3. PEG 修飾フェリチンの基板上 吸着の時間経過と吸着状況(SEM 像)

3. 研究目標の達成状況

フェリチンの PEGylation の反応条件精製条件が確定した.またナノ粒子合成において, フェリチンの外殻に修飾した PEG 層が,ナノ粒子合成のイオン源である金属イオンによるタ ンパク質凝集抑制効果があり,ナノ粒子合成の高効率化が図られた.基板上分散配置の時間 経過,および分散状況が確認された.これを用いたナノエッチングを実施し量子井戸構造間 距離の増大が可能となることが示された.

4. まとめと今後の課題

PEGylation されたナノ粒子内包フェリチンを用いて 20nm 以上の間隔を持つナノ粒子配列 が実現され粒子間の間隔制御には PEG 修飾層が有効であることが示された.またこれを用い た高精度中性ビームエッチングとデバイス作製が可能であることが示された.今後の課題と しては長距離周期性を実現するための立体対称性導入が必要なことが示唆された.

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)

- <u>Akio Higo, Takayuki Kiba, Junichi Takayama</u>, Chang Yong, Lee, Cedric Thomas, Takuya Ozaki, <u>Hassanet Sodabanlu</u>, <u>Masakazu Sugiyama</u>, <u>Yoshiaki Nakano</u>, <u>Ichiro</u> <u>Yamashita</u>, <u>Akihiro Murayama</u>, Seiji Samukawa: Photoluminescence of InGaAs/GaAs Quantum Nanodisk in Pillar Fabricated by Biotemplate, Dry Etching, and MOVPE Regrowth, *ACSAppl. Electron. Mater.*, Vol. 1, No. 9, (2019), pp. 1945-1951.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[2] <u>I. Yamashita, N. Okamoto</u>, and S. Samukawa : Control arraying of cage-shaped protein with core and surface modification, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-6, pp. 12-13.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I012
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

カルマン渦列周波数を決定する特異点の同定

Identification of the Singular Point Associated with Frequency Selection of Karman Vortices

高木 正平*†,小西 康郁**††,奥泉 寛之**,稲澤 歩* *首都大学東京デザイン学部,**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

二次元鈍頭柱体や後縁近傍で小さな剥離を伴う二次元翼の後流には、全体不安定に由来し た規則的なカルマン渦列が形成される.全体不安定理論によれば、渦列周波数は後流の逆流 近傍の虚空間に存在する対数特異点ないしは転移点で決定され、その近傍から群速度を持た ない時間発展した有限振幅の規則変動が実空間に出現し、自励振動で規則的な渦列形成へと 発展すると説明している.しかし、出現点を実験で同定した報告は知る限り見当たらない. 規則変動の出現点を実験で同定するのが、本研究の目的である.

2. 研究成果の内容

2.1 実験条件

模型は二次元翼 NACA0006 で弦長 40mm, 翼幅約 290mm であり,風洞天井には迎角を設定するモータが設置してある.また,幅 2.8mm,厚み 1.0mm の小平板が迎角 0 度の翼後縁から下流方向に x = 10mm, 流れと直角に y = 30mm 離れた位置に設置され,その小平板の迎角を変化させることで全体不安定を自由に制御することができる.主流速度は 4.2m/s とし,計測には熱線流速計を用いた.

2.2 研究成果

これまでに得られた成果の1つをさらに発展させた二次元の薄翼後流に形成されるカルマン渦列の成長・抑制技術を応用して、今年度前期は抑制を解放した時間を基準に後流の各位 置において全体不安定で成長する変動の時系列データを取得した. 位相が最も進んだ位置、 すなわち出現点を同定するために、波形を重ね合わせた集合平均から位相を計測したが、再 現性にやや問題があることが判明した. そこで後期の実験では、渦列の流下を定点観測する 参照用熱線プローブと移動用の熱線プローブを併用して成長する変動の時系列データ(全体 不安定における中心周波数はおよそ 335Hz))を同時に収録し、さらに両者の相互相関関数か ら位相計測を行った.

また,カルマン渦列の成長が抑制された後流においては,全体不安定でなく対流不安定(微 小変動から指数成長)が支配するので同様の計測を行ない位相分布を比較した.

参照プローブを模型後縁から x = 7mm, y = 0mm に設置し、上記 2 つの流れの条件において 各断面の変動の最大位置における位相差を図 1 に比較した.対流不安定に起因する変動の位 相は下流方向に概ね単調に遅延し、その勾配から変動は主流速度の約 0.9 の位相速度で流下 し、広く知られた結果と整合している.一方、カルマン渦列を形成する変動の挙動は、模型 後縁から十分下流では概ね対流不安定変動のそれとほぼ等しい位相速度 0.84 を持つが, 翼後 縁近傍では両者の挙動は明らかに異なっている. すなわち, $x = 2 \sim 3$ mm で渦列変動の位相 差の変化はなく, その位相速度は 0 である. 群速度 0, すなわち位相速度も 0 を持つこの位 置こそ規則変動の出現位置と断定できよう. x = 1.5mm では変動は上流に伝播していることも 示唆している. ここで出現点と断定した $x = 2 \sim 3$ mm における変動のレベルは極めて小さく, 風洞に残留する速度変動(主流速度の 0.06%)と同程度か僅かに大きい程度で, 理論が示唆する ような有限振幅(線形の仮定が適用できない)でないことも明らかとなった.

3. 研究目標の達成状況

カルマン渦列の規則変動が出現する位置を参照プローブを採用することで、初めて同定することができた.また、全体不安定理論の示唆とは異なり、この位置における変動は有限振幅でないことも明らかとなった.この意味で研究の目標達成率は100%以上である.

4. まとめと今後の課題

参照用熱線プローブと移動用の熱線プローブを併用して成長する変動の時系列データを計 測することにより、これまで実験的に観察することが難しかった全体不安定の最も重要な特 徴を捉えることができた.



図1. NACA0006 後流の様々な流れ方向 X における変動の参照プローブとの位相差比較. (●は全体安定が,また■は対流不安定が支配する条件下で)

- 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>S. Takagi</u>, Y. Konishi, H. Okuizumi, <u>A. Inasawa</u> and S. Obayashi: Experimental Study for Identifying the Singular Point in Airfoil Wakes Dominated by the Global Instability, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-72, pp. 154-155.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I013
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

プラズマー生体界面における活性種挙動の数値動力学的考証 Numerical Molecular Analysis of Reactive Species Behavior 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

近年,大気圧非平衡プラズマの生体応用が進められており,う蝕殺菌,早期止血,アポトーシス誘導,細胞再生,遺伝子導入といった医療効果が確認されている.現在のところ,放電活性種と細胞内分子の相互作用が主要因であることは実験的に示されているが,細胞膜を通過して直接的に機能変化を起こすのか,表面反応での間接的刺激により誘起される結果なのか,その機序は十分に理解されていない.プラズマ医療技術に対する客観的評価において,上記のような細胞動態メカニズムを理論的かつ定量的に明示することが必須である.

本応募研究課題では、細胞膜分子との酸化反応および細胞膜内の拡散輸送を考慮した放電活性 種の膜透過挙動を量子化学計算および古典分子動力学法を併用して階層的にモデル化するとと もに、膜中部位に対する反応速度定数および局所拡散係数から各活性種の膜浸透分布を導出して、 細胞動態制御におけるプラズマ照射量の閾値条件を特定する.

研究成果の内容

膜構成リン脂質の一つであるフォスフォジチ ルコリン (PC) に近接したヒドロキシルラジカ ルについて,分子間距離に対するエネルギーポ テンシャルを導出した (図 1 参照).また,固 有反応座標 (IRC)を探索した結果から,PC の脂肪酸側鎖において水素引き抜き反応が生じ やすい酸化部位を特定した.さらに,上記側鎖 の炭化水素内にある結合種 (単結合または二重 結合)に対する反応の相違から,後段の連鎖酸 化反応と生体応答との相関を定性的に説明した.

また,酸素活性種の一つである過酸化水素を 内在した数値生体膜モデルを新たに構築して, 膜法線方向に対するアンブレラサンプリングシ ミュレーションを行った.ここで解析領域(ウ



図1: C₃H₈-OH 間の IRC に対するエネル ギープロファイル

インドウ)の解像度を従来の2倍にするとともに、計算の並列試行と解析統計の平均化により高 精度な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.上記の結果 は、他研究における挙動傾向と概ね一致し、モデルの妥当性を示せた.

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,結合価の 違いを考慮した活性酸素種による酸化部位を検証した.また,高精度な膜内自由エネルギー,拡 散係数および膜透過係数を導出できたことから,所定の成果が得られたと言える.また,本計算 センターに実装された解析ソフトウエア(Gaussian 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、生体膜モデルの構築、酸化 部位の特定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、高精度な自由エネル ギープロファイルを導出することができた。今後、これらの成果を早急に論文等にまとめて、幅 広い公開を行っていく.なお、異方性を有する反応速度定数の検証については、次年度に改めて 実施する予定である.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[1] <u>H. Ohta, S. Uchida, Y. Nakagawa</u>, and <u>F. Tochikubo</u> : Numerical investigation on membrane permeation of reactive oxygen species with umbrella sampling, *The Joint Conference of XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and the 10th International Conference on Reactive Plasmas*, Sapporo, (2019), PO18AM-070.
 - [2] <u>A. Kokubu, S. Uchida, Y. Nakagawa, F. Tochikubo</u>, and T. Sato : Molecular dynamics simulations on transport of reactive oxygen and nitrogen species in cell membrane under electric field application, *The Joint Conference of XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and the 10th International Conference on Reactive Plasmas*, Sapporo, (2019), PO18AM-076.
 - [3] <u>K. Toda, S. Uchida, Y. Nakagawa, F. Tochikubo</u>, and T. Sato : Quantum chemical analysis on oxidation of membrane constituent molecules by plasma irradiation, *The Joint Conference of XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and the* 10th International Conference on Reactive Plasmas, Sapporo, (2019), PO18AM-079.
 - [4] S. Uchida, Y. Nakagawa, and F. Tochikubo : Numerical Analysis of Transport Characteristics of Discharge Activated Species in Biological Membrane with Molecular Dynamics, The 11th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Science and Technology, Kanazawa, (2019), Keynote-4.
 - [5] <u>内田論</u>: 分子科学計算から探る! プラズマー生体電荷相互作用モデルの構築, 第 36 回プラ ズマ・核融合学会年会, 愛知 (2019), S2-5.
- [6] <u>戸田和希</u>, <u>内田論</u>, <u>栃久保文嘉</u>, 佐藤 岳彦: 量子化学計算を用いた活性酸素種と膜構成分 子の反応挙動解析, 第 67 回応用物理学会春季講演会, 東京, (2020), 14p-PB4-1, 06-075.
- *[7] S. Uchida, K. Toda, A. Kokubu, S. Yamauchi, K. Abe, and T. Sato : Large-scale Numerical Analysis of Discharge Active Species Behavior at Plasma-biological Interface, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-62, pp. 124-125.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19I014
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year (progressing)

Development of Gradient-Enhanced Bayesian Optimization Technique for Turbomachinery Design

Lavi Rizki Zuhal*†, Koji Shimoyama**††

Kemas Zakaria*, Pramudita Satria Palar *, Rhea Patricia Liem***

*Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Bandung Institute of Technology **Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Department of Mechanical and Aerospace Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Aerodynamic design problems often involve computationally expensive computational fluid dynamics (CFD) solvers. Especially in turbomachinery design, a three-dimensional CFD is necessary to properly calculate the aerodynamic performance of any turbomachinery system. The goal of this research is to develop efficient Kriging surrogate models which could novel incorporate gradient-information for handling complex aerospace design problems including turbomachinery design.

2. Details of program implement

The goal of the development of novel Kriging surrogate models is to further improve the performance of Bayesian optimization. We developed two new Kriging surrogate model methods, namely, Kriging with composite kernel learning (KCKL) and Gradient-enhanced Polynomial-chaos Kriging (GEPCK). KCKL works by combining multiple kernel functions so as to harness the advantages of individual kernels. On the other hand, GEPCK takes into account gradient information to enrich both the trend and the stochastic process of Kriging. The new methods are implemented in several aerospace problems including redesign of NASA Rotor 37 (Figure 1).



Figure 1 : (Left) The NASA Rotor 37 case considered in this research and (right) the response surface created by Kriging with composite kernel learning.

3. Achievements

The developed KCKL and GEPCK have been successfully implemented in several

complex aerospace cases, including NASA Rotor 37 and centrifugal diffuser problems. Table 1 shows the root-mean-squared error (RMSE) results for the NASA Rotor 37 problem. It can be seen that KCL yields lower error than the other existing methods. On the other hand, Fig. 2 shows that GEPCK also produced surrogate models with significantly lower error than conventional techniques.

4. Summaries and future plans

The proposed methods are highly potential for applications in many aerospace engineering problems. This is because the proposed methods exploit further auxiliary information from the data in the form of either composite kernel or gradient-enhanced model. For future works, we plan to apply the proposed methods on multi-objective optimization and multidiscplinary system.

Table 1: Root-mean-squared error results of KCKL for the NASA Rotor 37 problem.

	Gaussian	Matern-3/2	Matern-5/2	KCKL
<i>n</i> =10	0.2983	0.3305	0.3036	0.2932
n=20	0.1466	0.1466	0.1310	0.1246



Figure 2 : Normalized RMSE of GEPCK for the blended-wing-body problem.

- 5. Research results
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] <u>P. Satria Palar, Lavi Rizki Zuhal</u> and Koji Shimoyama: Gaussian Process Surrogate Model with Composite Kernel Learning for Engineering Design, *AIAA Journal*, Vol. 58, No. 4 (2020), pp. 1864-1880.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [2] Lavi Rizki Zuhal, Kemas Zakaria, Pramudita Satria Palar, Koji Shimoyama and <u>Rhea Patricia Liem</u>: Gradient-enhanced Universal Kriging with Polynomial Chaos as Trend Function, *Proceedings of the AIAA Scitech 2020 Forum*, Orlando (2020), pp. 1865-1880.
- *[3] Lavi Rizki Zuhal, Kemas Zakaria, Pramudita Satria Palar, and Koji Shimoyama: Derivative-enhanced Surrogate Models for Aerodynamic Design, Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2019), CRF-7, pp. 14-15.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I015
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

Development of Conservative Kinetic Force Method near Equilibrium

Vladimir Saveliev*†, Shigeru Yonemura**†† *Institute of Ionosphere, NCSRT, Kazakhstan **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

For small Knudsen numbers near the equilibrium, difficulties of direct numerical modeling of gas flow in the kinetic regime increase enormously. However, near the equilibrium, to reduce computational cost, we can use differential approximation for the scattering operator. Thanks to this approximation, we obtained the simple equation for angular velocity of rotation for quasiparticle pairs thus far. Some other simplification can be done for important case of gas flows with axial symmetry.

2. Details of program implement

We use the kinetic equation for two-particle distribution function. The Boltzmann equation follows from this two-particle equation without any additional assumptions after a simple integration. Instead of the collision integral, there are linear scattering operator and chaos projector in the right part of this equation. After the regularization of the scattering operator, we can replace real molecules with quasiparticles and the two-particle kinetic equation will describe the interaction between pairs of quasiparticles in terms of their rotation with angular velocity, which depends on the velocity distribution function. Near the equilibrium the distribution depends only through the covariance matrix $g = \langle (v - \langle v \rangle)(v - \langle v \rangle) \rangle$. Consider the axisymmetric flow. In this case, the symmetric matrix g is diagonalized with only two different eigenvalues g_{\perp} and g_{\parallel} . The expression for the angular velocity of rotation is invariant

with respect to the addition of the multiples of the identity matrix to the matrix g^{-1} . Therefore, in the axisymmetric case, the angular velocity of rotation of quasiparticles Ω depends on only one parameter a.

$$\mathbf{\Omega}(\mathbf{v}) = \mathbf{v} \times g_{-}^{-1} \cdot \mathbf{v}; \quad g_{-}^{-1} = \text{diag}(0, 0, a); \quad a = \frac{1}{8} \left\langle 1 - \mu^2 \right\rangle \left(g_{\parallel}^{-1} - g_{\perp}^{-1} \right)$$
(1)

It is easy to verify that the exact solution of the equation for the relative velocity

$$\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{v} = \mathbf{\Omega} \times \mathbf{v} , \qquad (2)$$

under condition (1) is:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{\parallel}(t) &= \mathbf{v}_{\parallel 0} \frac{\mathbf{v}_{0}}{\sqrt{\mathbf{v}_{\parallel 0}^{2} + \mathbf{v}_{\perp 0}^{2} \exp(-2\,\mathbf{v}_{0}^{2}\,\tau)}}; \quad \mathbf{v}_{\perp}(t) = \mathbf{v}_{\perp 0} \frac{\mathbf{v}_{0} \exp(-\mathbf{v}_{0}^{2}\,\tau)}{\sqrt{\mathbf{v}_{\parallel 0}^{2} + \mathbf{v}_{\perp 0}^{2} \exp(-2\,\mathbf{v}_{0}^{2}\,\tau)}}; \\ \mathbf{v}_{0} &= \sqrt{\mathbf{v}_{\parallel 0}^{2} + \mathbf{v}_{\perp 0}^{2}}; \, \tau(t) = \int_{0}^{t} a(t) dt \end{aligned}$$
(3)

Algorithm based on exact solution (3) reads: 1) All possible pairs (v_i, v_k) , i < k of quasiparticles are formed. There are $N_p = N(N-1)/2$ pairs. 2) Pairs of quasiparticles are recalculated at each fractional time step dt/(N-1) according to eq.(3). At each fractional time step dt/(N-1), velocities of only two quasiparticles are changed. During the entire time step dt, the velocity of each quasiparticle is recalculated $2N_p/N = (N-1)$ times.



Figure 1 : Comparison of calculated moments (dots) with exact ones (lines)

3. Achievements

We use a model scattering operator, obtained from the exact Boltzmann scattering operator on the basis of clear physical assumptions:

$$\hat{\chi} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} \cdot \left[\mathbf{v} \times \mathbf{\Omega} \right], \quad \mathbf{\Omega}(\mathbf{v}, \mathbf{u}) = \frac{1}{8} \left\langle 1 - \mu^2 \right\rangle \left(\mathbf{v} - \mathbf{u} \right) \times g^{-1} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{u})$$
(4)

The distribution function is entered into it only through the covariance matrix $g = \langle (v - \langle v \rangle)(v - \langle v \rangle) \rangle$. For axisymmetric flows, we obtained the exact solution for the rotation of the relative velocity. 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 good agreement between the relaxation of a covariance matrix g and the exact solution.

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)
- V. L. Saveliev and Shigeru Yonemura: Two-particle kinetic equation and simulations using quasiparticle pairs and velocity moments, AIP Conference Proceedings, Vol. 2132, (2019), 060014 (6 pages). <u>https://doi.org/10.1063/1.5119554</u>
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[2] <u>V. L. Saveliev</u>, Shigeru Yonemura and Clint John Otic: Rarefied Gas Simulations Using Quasiparticle Pairs and Exact Solution, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-73, pp. 156-157.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I017
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2年目

デブリ除去のための伝導性テザーの構造形態に関する実験的研究 Experimental Study on Structural Shape of Conductive Tether for Removing Space Debris

槙原 幹十朗*†,大谷 清伸**††
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

実験の方法としては以下の手順を踏んだ.

- 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.
- 衝突角度を変化させて、衝突による損傷を評価した.

ターゲットに用いた中空円筒テザーは直径 146 mm であり、錫メッキされた直径 0.12 mm の銅線で編まれている.円周方向の網目間隔は 1.34 mm,軸方向の網目間隔は 1 mm であり、単位長さあたりの質量は 0.14 g/mm である.中空円筒テザーとプロジェクタイルの衝突の概略を図 1 に示す. 2つの角度パラメータ θ_{XY} および θ_{ZX} を導入した.中空円筒テザーの横断面(X-平面)に θ_{XY} を定義し、X軸とテザー長手方向(Z軸方向)とのなす面(Z-X平面)に θ_{ZX} を定義した.本研究の調査対象である「斜め衝突」は、運用中の EDT の姿勢角度を再現した θ_{ZX} の変化による 衝突現象を意味する.全実験結果を図 2 のグラフに図示する.損傷の間方向長さ LDC は、X-Y 平面に射影した損傷の端点から端点までの距離を計測した.LDC は θ_{ZX} = 30°と θ_{ZX} = 45°のときに大きく、垂直衝突($\theta_{ZX} = 0$ °)の損傷よりも深刻であることが分かった. θ_{XY} の増加に伴って、損傷長さ LDC が増加する傾向があり、さらに、この傾向は θ_{ZX} がどの角度であっても共通していることが読み取れる.また、全体的な傾向として θ_{ZX} がたきいときの方が、損傷長さ LDC の絶対値が僅かに大きくなった.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.



3. 研究目標の達成状況

斜め衝突の基礎データを取得した.斜め衝突の於いて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.円筒テザーの衝突現象を把握して評価したので,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

斜め衝突の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,斜め衝突実 験を進めて円筒テザー衝突実験を行い,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.損傷が大きくなる衝突形態を探査するために複合的な斜め衝突角度の 影響を明らかにしていく.

- 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)
- *[1] <u>Uwamino, Y., Fujiwara, M., Tomizaki, H.</u>, Ohtani, K., and <u>Makihara, K.</u>: Damage of Twisted Tape Tethers on Debris Collision, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 137, (2020), 103440.
- [2] <u>Sasahara, K., Uwamino, Y., Hasegawa, S., and Makihara, K.</u>: Fracture Investigation of Hollow Cylindrical Tether during Space Debris Impact, *Transactions of the Japan Society* for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 17, No. 3, (2019), pp. 383-391.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[3] <u>Fujiwara, M., Tomizaki, H.</u>, Ohtani, K., <u>Hasegawa, S.</u>, and <u>Makihara, K.</u>: Damage Assessment for Hollow Cylindrical Tether considering Oblique Collision, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2019), CRF-8, pp. 16-17.
- [4] <u>Fujiwara, M., Tomizaki, H., and Makihara, K.</u>: Damage Assessment of Electric Tape Tether Against Space Debris Impacts, *Proceedings of the 32nd International Symposium* on Space Technology and Science, ISTS-2019-r-16, Fukui, Japan, (2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I018
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

飛行する回転中空円筒の実験と数値解析 Experiment and Simulation of a Rotating Hollow Cylinder in Flight

石本 淳*††,平田 勝哉**† 中野 政身***,野口 尚史**,永田 麻王** *東北大学流体科学研究所,**同志社大学理工学部 ***東北大学未来科学技術共同研究センター †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

1.1 研究の背景と目的

一般に、高レイノルズ数における三次元物体を過ぎる流れは航空力学や機械工学、スポー ツなどのさまざまな分野で重要であるが、二次元物体と比較すると研究も少なく、不明な点 も多い.3次元物体の基本構造としては球や円板などの軸対称物体が挙げられる.ここでは パイプを取り上げ、さらに回転している状態を考える.

目的としては、回転しながら飛行するパイプの飛行メカニズムを空気力学的な観点から明 らかにすることを目的とする.

1.2 研究期間内の最終目標

射出装置による精密な投擲を行い、より詳細なモデルの軌道・姿勢を得る.数値解析では 実験と同様の条件で3次元シミュレーションを行い、モデル周囲の詳細な流れを得る.

2. 研究成果の内容

2.1 モデルに作用する空力特性の解明

射出装置を完成させた.この装置を用いて実験を行うことで、広い迎角範囲での多数の実 験データを得ることが出来た.そしてそれらのデータを運動解析することで、モデルに作用 する揚力、抗力、空力モーメントと迎角、角速度との関係性を解明した.

2.2 数値解析によるモデル周囲の詳細な流れの解析

数値解析では実験と異なる条件で3次元シミュレーションを行い,結果より得られたプロ グラムの問題点についての改善を行った.

3. 研究目標の達成状況

本年度は射出装置を完成させ、広い迎角範囲での多くの飛行データをとることが出来た. これらのデータを運動解析することで、モデルに作用する流体力(揚力/抗力)、モーメント を算出し,流体力やモーメントがモデルの軌道にどう影響しているかを確認できた.数値解 析においてはプログラムコードのミスを発見し,改善を行った.

4. まとめと今後の課題

本年度の活動で、広い迎角の範囲で、より精密、詳細な飛行パイプに働く流体力やモーメントを得ることが出来、それらがパイプの軌道にどう影響しているかを確認できた.数値解析においては観測実験とパラメータを合わせたシミュレーションを行い、いくつかコードにミスをみつけて改善を行った.現在結果が出ているのは一例のみであるため、今後さまざまなパラメータで数値解析を行い、計算することが望まれる.

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>Yusuke Naito, Romain Montini, Hirochika Tanigawa</u>, Jun Ishimoto, <u>Masami Nakano</u>, <u>Katsuya Hirata</u>: Experiment and Numerical Analysis of a Rotating Hollow Cylinder in Free Flight, *SimHydro 2019*, Sophia Antipolis, paper 65, (2019).
- [2] Yusuke Naito, Hirochika Tanigawa, Jun Ishimoto, Masami Nakano, Takashi Noguchi, Katsuya Hirata: Experiment and Simulation of a Rotating Pipe in Flight, Proceedings of the Sixteenth International Conference on Fluid Dynamics (ICFD2019), Sendai, (2019), OS1/3-6, pp. 174-175.
- *[3] <u>Yusuke Naito, Hirochika Tanigawa</u>, Jun Ishimoto, <u>Masami Nakano, Takashi Noguchi, Katsuya Hirata</u>: On a Rotating Hollow Cylinder in Flight, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-74, pp. 158-159.

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	J19I019
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	3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*, 須崎 貴大*, 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

近年の航空機は燃費向上の為に、高アスペクト比翼を有するようになってきている.しかし、 高アスペクト比翼は突風に対してモーメントアームが大きくなるため翼根への負荷(翼根ひずみ) が大きくなる.これまで様々な突風負荷低減制御システムが考案されており、最新のものでは Airbus が提案した展開翼による突風負荷低減制御システムがある.このような突風負荷低減制御 システムの早期実現のためには数値モデルを用いた突風応答解析が必須である.しかし、従来の 構造モデリング法は高アスペクト比翼の大変形挙動が表現できなかった.本年度の研究目的は、 突風による大変形挙動を表現できるモデリング法を提案し、風洞実験で提案モデルを用いた突風 応答解析の精度を実証する事である.

2. 研究成果の内容

共同研究3年目として、突風応答解析を容易にする「ひずみ変数モデリング法」の構築を行った.構築したモデリング法を用いた解析の妥当性実証の為に、下記の実験を流体研・低乱熱伝達風洞で行った.実施期間は2019年9月2-6日と2019年11月11-15日である.

図1 に使用した実験系を示す. 平板翼供試モデルの風上に新規製作した可変翼列を設置した. 可変翼列を偏向させることで突風が発生し,供試モデルに変形が生じる. 昨年度までは,レーザ 一変位計による変位計測であったが,本年度は図2に示すひずみ計測ユニットを導入した. これ により,解析で得られるひずみ履歴を実験値と直接的に比較できるようになった. 図3は解析と 実験で得られたひずみ履歴を示す. 突風によって,ひずみが増大する様子が確認できる. 解析と 実験は良好な一致が得られた.

3. 研究目標の達成状況

突風応答解析に適し、大変形も表現できるひずみ変数モデリング法の構築に成功した.さらに、 風洞実験と提案モデルによる解析が良好に一致した点で研究目的を達成できたといえる.

4. まとめと今後の課題

今年度は、突風解析に適した「ひずみ変数モデル」の構築と実験実証に成功した.計測・フィ ードバックしやすい「ひずみ情報」は突風負荷低減を実現する制御系設計にも有効だと考えられ る. 今後の課題は、提案モデルを制御系設計に活かすことである.

- 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>Otsuka, K., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K.</u>: Multifidelity Modeling of Deployable Wings: Multibody Dynamic Simulation and Wind Tunnel Experiment, *AIAA Journal*, Vol. 57, No. 10, (2019), pp. 4300-4311.
 - 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
 - 国際会議
 - [2] <u>Otsuka, K., Wang, Y.,</u> Fujita, K., Nagai, H., and <u>Makihara, K.</u>: Deployable Wing Model Using ANCF and UVLM: Multibody Dynamic Simulation and Wind Tunnel Experiment, *SciTech Forum 2020*, Hyatt Regency Orland, Florida, USA, (2020), AIAA 2020-1678. [口頭]
- *[3] <u>Otsuka, K., Suzaki, T., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K.</u>: Comparison of 2D and 3D Simulation Models for Deployable Wing, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2019), CRF-9, pp. 18-19. 【口頭+ポスター】
 - [4] <u>Suzaki, T., Otsuka, K., Hirotani, S., Dong, S.</u>, and <u>Makihara, K.</u>: New Framework of Strain Based Beam Formulation for Rigid Body Motion, *Proceedings of the 16th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2019), OS-18-72. 【口頭+ポスター】

国内学会

- [5] 大塚啓介, 須崎貴大, 藤田昂志, 永井大樹, <u>植原幹十朗</u>:鳥の羽を模した折り畳み機構を有 する翼のマルチボディ解析, 第 57 回飛行機シンポジウム, 下関, 10 月, (2019). 【口頭】 研究会
- [6] <u>Otsuka, K.</u>: Aeroelastic Deployable Wing Modeling: Simulation and Experiment, *Aeroelastic Luncheon Seminar*, Imperial College London, UK, June (2019). 【口頭】
- 3) その他(受賞)
- [7] オーディエンス表彰,「展開型モーフィング翼の柔軟マルチボディシミュレーション」, 大塚 <u>
 啓介</u>, <u>
 槙原幹十朗</u>, 2019 年 8 月 29 日,日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2018.



図3 実験と解析の比較

課題番号	J19I020
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

圧縮性 DNS を用いた管楽器の流体音響解析 Numerical Study on Wind Instruments with Compressible DNS

高橋 公也*†,岩上 翔*,田畑 諒也*,小林 泰三**,服部 裕司***†† *九州工業大学情報工学府,**九州大学情報基盤研究開発センター ***東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

低マッハ数における流体音(空力音)の発音メカニズムは、これまでにあまり注目されてこなかった.本研究では、共鳴器を持つ管楽器の流体音の発音機構に注目する.共鳴器内に発生する強い共鳴音場は、音源となる流体に作用し、両者が同期することで安定した発振が起きる.したがって、管楽器の発音機構の解明には、流体と音の相互作用を再現可能な高精度の解析計算が必要になる.現在のところ、音楽音響の分野では、LES、LBM および人工粘性を取り込んだ DNS を用いた管楽器の解析は行われているが、流体音の発生機構の解明に必要な精度は得られていない.本研究では2次元ではあるが圧縮性 DNS を用いた管楽器の厳密な解析を行う、この点に本研究の意義がある.研究の推進にあたり、圧縮流体の DNS について豊富な知識を持つ服部教授 との共同研究が必要である.

2. 研究成果の内容

これまでのエッジトーンの研究の最終的な取りまとめを行い,モード遷移が起きたときの発振 周波数の変化,音響エネルギーの変化及びジェットの揺らぎの変化の間に明確な相関があること を示した[1,3]. これらの成果をまとめた原著論文は現在査読過程にある.



図 1:DNS で再現された小型エアジェット楽器の発振状態(空間単位:mm) (a) 流速分布(単位:m/s) (b) 音圧分布(単位:Pa)

小型のエアジェット楽器(小型フルーオルガンパイプ)のモデルを作成し, DNS を用いた解析 を行った[4]. ジェットの流速を 12m/s としたときの結果を図1に示す. 図1(a)の流速分布を見 ると,ジェットの振動が起き,ジェットがエッジと衝突すると渦が発生している. 図1(b)の音圧 分布をみると,管体内に強い音波が発生していることがわかる. また,唄口からほぼ球面波が放 射されているのが確認できる. この解析時間では,定常発振状態にまだ達していない. そのため, 基音よりも3倍音が優勢な発振状態であると考えられる. 定常発振状態に到達するまでには,数 ヶ月から半年の計算時間が必要である. 長時間計算を行うには,効率的で精度の高いメッシュの 生成法を確立することが必要と考えられる.

3. 研究目標の達成状況

当初の目標であった, DNS を用いて小型エアジェット楽器の発振を再現することに成功した. ただし、現状では1つの流速のみにかぎられている.したがって、必要最低限の目標は達成されたといえる.

4. まとめと今後の課題

2019 年度の研究で、DNS を用いた小型エアジェット楽器の計算に成功した. 今後は、数種類の流速での長時間計算を行い、流速変化に伴う周波数や音響エネルギーの変化等の解析を行う. そのためには、効率的で精度の高いメッシュの生成法を確立することが今後の課題になる.また、エアジェット以外の管楽器の解析の準備を行うことも今後の課題である.

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)

- *[1] <u>S. Iwagami, T. Kobayashi, K. Takahashi</u>, Y. Hattori: Reproducibility of Mode Transition of Edge Tone with DNS and LES, *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen, (2019), pp. 5573-5579.
- [2] <u>高橋公也</u>: 管楽器の大規模流体音響解析, サウンド, 35 号, (2020), pp. 9-13.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] S. Iwagami, R. Tabata, T. Kobayashi, K. Takahashi, Y. Hattori: Numerical Study on Relation between the Jet Oscillation and Acoustic Pressure in Edge Tone, *Proceedings of* the Sixteenth International Conference of Flow Dynamics, Sendai, (2019), OS16-3, pp. 660-661.
- *[4] <u>S. Iwagami, R. Tabata, T. Kobayashi, K. Takahashi</u>, Y. Hattori: Numerical Study on Air-jet Instruments Compared with Edge Tone, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-75, pp. 160-161.

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	J19I021
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

弾性体の変形-周囲流-遠方場音情報の複合動的解析による空力音発生メカニズム解明 On the Multi Dynamic Mode Analysis of Flow-Induced Noise from Elastic Bodies

> 寺島 修*†, 小西 康郁**†† 西川 礼恩*, 奥野 未侑*, 伊藤 大世* *富山県立大学工学部, **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、吹流しや旗、昆虫の羽根、植物の葉などに代表される弾性体が流体に曝され た際に、その変形により周囲の流体と相互干渉することにより発生する音の発生機構の解明 とその制御手法の構築を行う.2019年度は、柔軟体・弾性体の一つである旗(布)を対象とし て、旗から発生する空力音について、空力音の特性・旗の変形の様子・空力音と変形の関係、 の3つについて調べた.

2. 研究成果の内容

実験は流体科学研究所の低騒音風洞を用いて行った.この風洞は吸込型の風洞で,無響室内に開放型の測定部が設けられている.測定部の大きさは幅 300 mm,高さ 500 mm,流れ方向長さ 1,000 mm である.風速 45 m/s の時の測定室内の暗騒音レベルは 65 dB [A]以下である.

図1に本研究で使用した旗の標準寸法を示す.旗は流れ方向長さ1が410 mm,スパン方向 長さwが300 mm,厚さtが0.4 mm,重さが11gである.この旗を直径8 mmのアルミ製の 中実丸棒に取り付けた.図2,図3に旗および計測装置の設置方法を示す.図2に示したも のは空力音の計測と旗の変形の高速度カメラ撮影による計測,図3に示したものは空力音の 計測と旗の変形のレーザ変位計による計測について示すものである.座標系は流れ方向をx, 旗の面直方向をy,旗の幅方向をzとした.座標の原点は旗の中心とした.空力音の計測は マイクロホン(PCB 社 130F20)により行った.マイクロホンはデータロガーおよびシグナル コンディショナ(Keyence 社 NR-500 および NR-CA04)に接続して計測した.図2に示した計 測ではマイクロホンは2カ所設置し,マイクロホン1はx=205 mm,y=-1,000 mm,z=0,マ イクロホン2はx=205 mm,y=0,z=1,000 mmの位置にそれぞれ設置した.また,高速度カ メラ(Photron FASTCAM SA-X2,レンズ:NIKKOR fl.4,35 mm)による旗の変形の様子の撮影 は上方と側方の2カ所から行った.図3に示した計測ではマイクロホン1による空力音の計 測とレーザ変位計(Keyence 社 IL-300)による旗の変形の計測を同時に行った.レーザ変位計 の出力はマイクロホンの出力と同様にデータロガー(Keyence 社 NR-500 および NR-HA08)に 接続して計測した.

実験の結果,旗から発生する空力音は卓越したピークをもち(図4参照),その周波数は主 流速と旗の流れ方向長さに線形比例することが明らかとなった.また、卓越したピークの周 波数は旗の厚さにも依存するが、線形比例の関係はなく、旗の質量と流体力に対する剛性の 変化の両面から決定される可能性が示された.さらに、旗から発生する空力音の音源は旗の 下流端のスパン方向中央付近であることが明らかとなった (詳細は参考文献参照).

3. 研究目標の達成状況

研究目標の一つである弾性体と流体の相互影響下で発生する音の特性の解明を達成した.

4. まとめと今後の課題

実験の結果,旗から発生する音の特性は明らかにできたため,今後は旗の周囲の流れ場と 発生音の関係について PIV 等を使用して調べる.

- 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>R. Nishikawa, O. Terashima</u>, Y. Konishi, <u>T. Ito</u> and <u>K. Sugioka</u>: Experimental study on the flow-induced noise from a flag, *Proceedings of 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-10, pp. 10-11.
- [2] <u>西川礼恩</u>, <u>寺島修</u>, 小西康郁: 一様流中の旗から発生する空力音に関する研究, 日本機械学 会北陸信越支部第57期総会・講演会, 長岡市, (2020), 講演番号 K021.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし



課題番号	J19I022
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	3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*†, 山﨑 遊野*, 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

近年感圧塗料(PSP)を用いた模型表面の光学的圧力計測法が注目されてきている. PSP の 研究は、定常計測から非定常計測へ、圧力変化の大きな超音速/遷音速計測から、低速流や騒 音などの微小な圧力変動の計測へと進んできている. PSP は差圧ではなく絶対圧を計測する センサである. そのため、大気圧(100 kPa)付近での微小な圧力変化(~O(100 Pa))を計測 しようとすると、PSP の発光強度の変化も 1/1000 程度となる. これは、高速度カメラの分 解能の限界に近く、露光時間が 1 µs 以下と非常に短いこともあり、取得画像の S/N が非常 に低くなる. そのため圧力変動が微小な低速流れの非定常計測はチャレンジングな課題であ る. 申請者らは過去 2 年間の本共同研究において、独自開発した世界最高速の 20kHz 以上 の時間応答性をもつ PSP を用いて、微小な圧力変化の流れ場を非定常計測する評価試験を 行ってきた. その中で計測精度を向上させるための問題点の抽出を行い、PSP、計測方法、 ノイズ除去のためのポスト画像処理法などの改善を行ってきた. 本年度は、これまでの集大 成として PSP および計測手法の最適化/改善が計測精度に及ぼす影響について調査を行った.

2. 研究成果の内容

PSP の実証試験は東北大学流体科学研究所の小型検定風洞にて行われた.測定部は開放型 とし, Ru(dpp)3を感圧色素として用いた高速応答 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-106B)で励起した PSP からの発光は高速度 カメラ(Photron FASTCAM Nova)を用いて撮影レート 1kfps において各条件 21,841 枚ずつ 撮影した.計測中の模型の温度変化を低減するため,通風時画像を取得した直後に無風時画 像を撮影した.また励起光は照射開始後,発光強度が十分安定するまで待ち画像計測を行っ た.計測した PSP 画像は同時に計測した圧力センサの波形より画像を撮影した時刻の位相 を算出し,位相平均処理を行った.

図1は主流速度 50, 35, 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.また,図2は,最も圧力変動が小さい20 m/s (動圧~ 250 Pa)における時系列結果である.画像は位相平均だけでノイズ除去のフィルタ処理は行 っていないが, PSP の高輝度化と計測手法の最適化により,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明瞭に捉えることができた.



0.0 msec 3.3 msec 6.7 msec 10.0 msec 13.3 msec 16.7 msec

図2:流速20m/sにおける角柱後方の圧力変動の時系列計測結果

3. 研究目標の達成状況

本共同研究は研究/産業用風洞における低速から高速までの幅広い条件での使用に耐えう る高精度の非定常計測用 PSP 技術を開発することを目標として行ってきた. その結果風洞 試験に耐える模型表面への高い付着性を持ち,高速度撮影でも高い S/N が得られる高輝度の 高速応答 PSP を開発することに成功した. また,計測方法の改善により 20 m/s (動圧 O(100Pa)) 程度の低速流れにもノイズ除去のフィルタ処理なしで十分適用可能であること が実証できた. これにより従来の航空機や高速列車などの高速流れだけでなく,自動車など の低速流れにも十分用いることができることが分かり,当初の研究目標はほぼ達成できたと 考えられる.

4. まとめと今後の課題

高速応答 PSP を用いて低速領域の微小な圧力変動を計測する実証試験を検定風洞で行った. PSP の発光強度の向上や計測システムや手順の見直しにより,取得画像の S/N を向上 させることに成功し,位相平均だけの簡略な後処理だけでも 20 m/s の低速流れにおいても カルマン渦による圧力変化を明瞭に計測する事ができた.それらの成果は現在ジャーナル投稿準備中である. 今後は DMD や POD など高度な画像の後処理法を適用することにより計測限界を拡張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] Y. Egami, Y. Yamazaki, Y. Matsuda, T. Ikami, H. Nagai: Validation of Fast Pressure -Sensitive Paint for Measuring Small Pressure Fluctuation, *Proceedings of 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-11, pp. 22-23.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I024
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2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 ***東北大学医学部, ****八戸工業高等専門学校 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

申請者らはこれまで皮膚の有効熱伝導率を非侵襲・短時間・高精度に計測可能な保護熱源 式サーミスタプローブを開発し、皮膚がんの定量的診断へ応用する研究を行ってきた.これ までの臨床研究により、腫瘍深達度によって伝熱特性が変化することが明らかとなったが、 そのメカニズムはまだ詳細には分かっていない.そこで、本研究では腫瘍の進行に伴う皮膚 悪性腫瘍の伝熱特性変化のメカニズムを臨床実験及び免疫組織化学的解析、非臨床実験、数 値シミュレーションを用いて明らかにすることを目的とする.

2. 研究成果の内容

本研究では、12名の非メラノーマ性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.さ らに、有効熱伝導率に影響を与える可能性がある間質因子を調査するために、LL37や MMP12等の免疫組織化学的染色を実施した.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た.免疫組織化学 的染色の結果(図1右図)によると、MMP12の発現が有効熱伝導率の差異のメカニズムを 説明できる相関因子の一つである可能性が示唆された.

非侵襲熱伝導率計測時の皮膚悪性腫瘍の伝熱特性の変化を模擬するために, Local Thermal Non-Equilibrium Model を用いた数値シミュレーションを実施し,有効熱伝導率 に影響を与える因子を検証した.結果より,腫瘍の進行に伴い局所的に増加する血流の影響 が支配的パラメータの一つであることが示唆された.

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,腫瘍の進行に伴う有効熱伝導率の挙動のメカニズムを明らかに 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、免疫組織化学 的解析、数値シミュレーション、非臨床実験を実施することで明らかにした.ただし、臨床 研究の症例数が少ないため、今後大規模な臨床研究を実施し、詳細なエビデンスを取得して いく必要がある.



図1:臨床実験結果(左),免疫組織化学的染色結果(右)

- 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. Fujimura, T. Okabe, K. Tanita, Y. Sato, C. Lyu, Y. Kambayashi, S. Maruyama</u> and <u>S. Aiba</u>: A Novel Technique to Diagnose Non-melanoma Skin Cancer by Thermal Conductivity Measurements: Corelations with Cancer Stromal Factors, *Exp. Dermatol.*, 28 (2019), pp. 1029-1035.
- [2] <u>佐藤遥太,藤村卓,岡部孝裕,圓山重直,相場節也</u>: 非侵襲熱物性計測による皮膚腫瘍の早 期診断の可能性,臨床皮膚科,73・5 (2019), pp. 69-73.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [3] <u>T. Okabe, T. Fujimura, S. Maruyama</u> and <u>S. Aiba</u>: Early Detection of Skin Cancer by Thermal Conductivity Measurements, *Proceedings of 7th of US-Japan Workshop on Biomarkers for Cancer Early Detection, Tokyo*, (2020), p. 48.
- *[4] <u>T. Okabe, T. Fujimura</u>, J. Okajima, <u>S. Maruyama</u>: Investigation of Bioheat Transfer Characteristics of Skin Tumor during Non-invasive Measurement of Thermal Conductivity, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-63, pp. 126-127.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
 - (特許) なし

```
(受賞)
```

日本伝熱学会奨励賞,生体の非侵襲熱物性計測及び皮膚がんの定量的早期診断への応用, 岡部孝裕,2019.5,日本伝熱学会.

(インターネットメディア)

国立大学 56 工学系学部ホームページ 工学ホットニュース, ほくろか? 皮膚がんか?「熱」 で診断, 2019. 8. 2., https://www.mirai-kougaku.jp/hot-news/pages/190802.php

課題番号	J19I026
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

固気液混相流解析による工業製品の設計開発

Design and Development of Engineering Products by Using Multiphase Flow Simulation

高橋 俊*†,大林 茂**†† 永田 貴之***,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 ***東北大学大学院,****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の相対運動と気液界面を含む混相流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-運動連成解析による粒子流が関連する現象のメカニズム解明と 2)二相流体-構造連成解析によるエンジンオイルによる潤滑の評価を対象として研究を行った.

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運動方程式を組み合わせた連成 解析により、自由落下する粒子の解析による実験との検証とその応用解析を行った.図1は 自由落下する粒子の挙動を示しており先行研究との定量的な一致を確認している.また2) レベルセット法を用いた固気液混相流解析によるエンジンオイルの解析では図2のような可 視化が困難な領域での数値解析の応用によりオイルの流動挙動の調査を実施した.





図2:エンジン回転数5000rpmの結果 (上:レベルセット関数,下:速度の絶対値分布,左から-360,-180,0,180deg.CA時)

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、気液界面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.研究の推移は順調であるが論文発表数が少ないため 今後さらに注力する.

4. まとめと今後の課題

混相流体と移動物体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 ル構築を進めるとともに現象把握を進める.

- 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)
- T. Nagata, M. Hosaka, S. Takahashi, K. Shimizu, K. Fukuda, S. Obayashi: A simple collision algorithm for arbitrarily shaped objects in particle-resolved flow simulation using an immersed boundary method, *Int. J. Num. Meth. Fluids*, Vol. 92, (2020), pp. 1256-1273.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- *[2] <u>S. Takahashi, M. Yusuke, T. Nagata, Y. Kawamoto, K. Fukuda</u>, S. Obayashi: Numerical Prediction of Flow Characteristics around Moving Objects in Multiphase Flow, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-49, pp. 98-99.
- [3] <u>川本裕樹</u>, <u>蔵本結樹</u>, <u>高橋俊</u>, <u>落合成行</u>: Sharp interface 法に基づく混相流解析のエンジンオイル挙動予測への応用, 第 32 回計算力学講演会, (2019).
- [4] <u>川本裕樹</u>, <u>蔵本結樹</u>, <u>高橋俊</u>, <u>落合成行</u>, <u>畔津昭彦</u>, <u>山本憲司</u>: 気液二相流解析を応用した ピストンリング周りのオイル輸送に関する研究, 第 30 回内燃機関シンポジウム, (2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I027
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

高感度非発光再結合検出による量子ナノ構造におけるフォノン物性の評価 Investigation of Phonon Dynamics in Quantum Nano-Structures by Using High-Sensitivity Detection of the Non-Radiative Recombination

福山 敦彦***†**, 寒川 誠二****††**

碇 哲雄* *宮崎大学工学教育研究部,**東北大学流体科学研究所 †申請者,**††**所内対応教員

1. 研究目的

超スマート社会の実現には量子井戸や量子ドットといったナノスケールの半導体構造を 応用したデバイス開発が必須である.これは、量子構造が示すバンド構造、特にゼロ次元状 態密度や電子相互作用は、現在のレーザーやセンサといったデバイスの性能を飛躍的に向上 させる可能性があるためである.しかしながら、ナノスケールに微細化されたデバイスの発 熱・放熱が高性能化を阻害する.つまりデバイス内で発生するフォノン(熱)の生成および 輸送特性を明確にすべきである.そこで、流体科学研究所において中性ビームとバイオテン プレート(以下,NBE)法を用いて作製した規則配列ナノピラー(以下,NDs)を用意し、宮崎 大学が所有する光熱変換分光法(以下,PPT)を適用する.同法は半導体内の非発光再結合 (フォノン放出)を高感度に検出できる手法である.これによって量子ドットのフォノン物 性を明確にし、従来のレーザーやセンサといったデバイスの飛躍的特性向上に寄与する知見 を得ることを目的とする.

2. 研究成果の内容

NBE 法により 725 µm の SOI 基板上に 90 nm の Si-NP を作製し, その後 NP 間に SiGe を充填 した Si-NP/SiGe 複合膜を形成した (Si-NP 試料).また、参照試料として SOI 基板上に Si 薄 膜をエピタキシャル成長させた試料 (Si-epi)も用意した.PPT 測定は波長依存性と周波数依 存性を測定した.前者は断続周波数 $f \ge 108$ Hz に固定し、励起光波長を 600 から 1800 nm の間で変化させた.後者は励起光波長を 1120, 1090 と 1060 nm に固定し、 $f \ge 40$ から 3500 Hz の間で変化させた.発生した熱波および熱弾性波を透明トランスジューサで検出した.光源 にはハロゲンランプを用い、室温で測定を行った.

波長依存性測定では、両方でSiのバンド端(1.12 eV)付近にピークを観測した.またSi-epiのピーク強度はSi-NPのピーク強度のおよそ6倍程度であった.このことからSi-NP 複合膜が熱の伝搬を妨げていると推測できる.より詳細な議論のためピーク付近の波長1120,1090および1060 nm でのf依存性の測定を行った.図1にSi-NPおよびSi-epi 試料の結果を示す. 理論上、熱拡散長は高周波数になるほどPPT信号強度が減少する.これは熱が検出器側まで届かなくなるためである.Si-epi 試料では,PPT強度はfの増加に伴い単調に減少した一方,Si-NP 試料では700 Hz付近にdipが観測された.図2に焦電理論に基づく理論計算結果を示す.バルクSiの計算結果では、Si-epiの実験結果と同様に単調減少した.一方で、熱伝導 率 $\kappa \epsilon$ 減少させたところ dip が現れた. 図 2 の実線のように dip の周波数および形状を実験 結果に合わせたところ,面直方向の κ は 70±1.8 W/mK と算出された. これはバルク Si の κ = 150 W/mK の半分程度であり, Si-NP/SiGe 複合膜が κ の低減に有効であることを実証した. 今後は多層計算を行い,より正確に $\kappa \epsilon$ 算出できる解析方法を確立する.



3. 研究目標の達成状況

本研究では、流体科学研究所と宮崎大学が有するオンリーワンの技術を融合することで、 量子ドットのエネルギーバンド構造を明らかにし、得られた成果をもとにフォトン(光)だ けではなくフォノン(熱)も自在に操るフォノンエンジニアリングの基礎技術確立に有益な 知見を得ることが目標である.本年度はSi-NPs/SiGe 複合膜を作製することで熱伝導率を大 幅に低下させることが出来ることを実験的に解明することができた.よって達成度は8割と 判断する.

4. まとめと今後の課題

Si-NPs/SiGe 複合膜を作製することで熱伝導率を大幅に低下させることが出来ることを実験的に解明することができた. 今後は NP の密度(間隔)を変化させた試料を用意して,熱伝導率がどのように変化するかを明確にし,フォノン制御手法の確立を目指す.

- 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
- *[1] <u>T. Harada</u>, <u>T. Aki</u>, D. Ohori, S. Samukawa, <u>T. Ikari</u>, <u>A. Fukuyama</u>: Significant Reduction of Thermal Conductivity of Si Nanopillar/SiGe Composite Film Fabricated by Neutral Beam Etching Investigated by a Piezoelectric Photothermal Measurements, *Proceedings* of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019), Sendai (2019), CRF-12, pp. 94-95.
- [2] <u>T. Harada</u>, <u>T. Aki</u>, D. Ohori, S. Samukawa, <u>T. Ikari</u>, <u>A. Fukuyama</u>: Analysis and Estimation of Thermal Conductivity of Si Nanopillar/SiGe Composite Film by Using Photo-Thermal Spectroscopy Measurement with a Multi-layer Model Calculation, 第 40 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 東京 (2019), p. 1P1-8.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I028
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

懸濁液レオロジーの機能的制御を目指した実験観察ならびに数値解析 Experimental Observation and Numerical Simulation to the Smart Control of Suspension Rheology

福井 智宏*†, 早瀬 敏幸**†† 川口 美沙*, 船本 健一**, 宮内 優**, 村田 滋*, 田中 満* *京都工芸繊維大学, **東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

懸濁液のレオロジー特性を知り、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、非コロイド剛体球懸濁液 流れの微細構造および粘度の評価方法を検討することを目的とする.

2. 研究成果の内容

円形断面を有するマイクロ流路内の蛍光粒子を含む懸濁液流れの測定を行い, PTV とべき 乗則流体モデルを用いた懸濁液の微細構造の変化と流動特性の評価方法を提案した.測定し た画像から,懸濁粒子の半径方向の分布が得ることができた(図1)²⁰.また, PTV によっ て求めた速度分布とべき乗則流体モデルを用いて,懸濁液の非ニュートン性を評価した.こ の方法は、マイクロ流動における懸濁液の微細構造変化とレオロジーの関係を解明するため に役立つことが期待される.



図1:懸濁粒子の半径方向分布の粒子レイノルズ数(Rep)依存性
3. 研究目標の達成状況

懸濁液の微細構造とその巨視的なレオロジー特性を関連付けることができれば、例えば、 微細流路内流れの瞬時速度場から懸濁液レオロジー特性の時間的・空間的分布の推定が可能 となる.本研究では、懸濁液の微細構造の評価方法として、粒子濃度プロファイルを、巨視 的なレオロジー評価方法として、べき乗則流体モデルを用いた非ニュートン性評価を行った. これらの関連付けは検討中であるものの、研究成果を国際会議ならびに学術雑誌にて発表し た.

4. まとめと今後の課題

本研究では、粘度計や圧力計等の計測機器を用いることなく、懸濁粒子の挙動解析により 巨視的なレオロジーを推定する方法を提案した.引き続き、これらの評価方法を検討すると 共に、数値解析を含めた幅広い調査を実施する.

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)

- M. Kawaguchi, T. Fukui, K. Funamoto, S. Miyauchi and T. Hayase: Experimental Study on the Effects of Radial Dispersion of Spherical Particles on the Suspension Rheology, *Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019*, San Francisco, USA, (2019), 5322 (6 pages).
- *[2] <u>M. Kawaguchi, T. Fukui</u>, K. Funamoto, <u>M. Tanaka</u>, <u>M. Tanaka</u>, <u>S. Murata</u>, S. Miyauchi and T. Hayase: Viscosity Estimation of a Suspension with Rigid Spheres in Circular Microchannels using Particle Tracking Velocimetry, *Micromachines*, Vol. 10, No. 10, (2019), 675 (13 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等

- *[3] <u>M. Kawaguchi</u>, <u>T. Fukui</u>, K. Funamoto, <u>M. Tanaka</u>, <u>S. Murata</u>, S. Miyauchi and T. Hayase: Measurement of Particle Concentration Profiles of a Dilute Suspension in Different Reynolds Number Conditions, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-77, pp. 164-165.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19I029
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	3rd 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

To determine the effects of carbon dioxide (CO_2) dilution on laminar flame characteristics of lean, stoichiometric and rich methane (CH_4) flames under high initial pressure (0.5 MPa).

2. Details of program implement

The experiments were performed in the high-pressure constant volume combustion chamber in IFS. Methane (CH₄) was used as fuel with dry air as the oxidizer. CO_2 was used to dilute the fuel in varying proportions to create synthetic biogas with dilution ratio of 0.3 to 0.7. Initial pressure was set to 0.5 *MPa*. Studies for lower initial pressure has been performed in previous research period. Equivalence ratios were varied for 0.8, 1.0, and 1.2 with the initial temperature of 298 *K*. Schlieren technique was employed to obtain the stretch rate and the flame speed. The unstretched laminar burning velocity was calculated using the density ratio of burnt and unburnt mixtures, and the unstretched flame speed obtained from extrapolation. The numerical results for laminar burning velocity were obtained using GRI-MECH 3.0. The burnt gas Markstein length were obtained by measuring the slope between the flame speed and the stretch rate. Asymptotic analysis was used to explain the non-monotonic trend of the Markstein length.

3. Achievements

The influence of CO_2 dilution ratio to the combustion characteristics of biogas at high pressure has been clarified (shown in figure 1). Numerical and analytical methods verified the experimental results. More details can be found in the published journal paper.

4. Summaries and future plans

The unstretched laminar burning velocity of the mixtures decreased with an increase in CO_2 concentration. Numerical results of the unstretched laminar burning velocity indicated similar trend. The Markstein length increased with CO_2 dilution for the rich flame. However, for lean and stoichiometric flames, the Markstein length was nearly constant for CO_2 dilution of 0–0.5 and decreased with CO_2 dilution of 0.7, indicating a non-monotonic relationship. The non-monotonic trend can be explained from the asymptotic relationship and parameters such as Lewis number, Zel'dovich number, preheat zone thickness, and thermal expansion coefficient. More details can be found in the published journal paper.



Figure 1. Unstretched laminar burning velocity under various CO_2 dilution ratio, Z_{CO2} , and various equivalence ratios for initial pressure of 0.5 *MPa* and initial temperature of 298 *K*.



Figure 2. Burned gas Markstein length under various CO_2 dilution ratio, Z_{CO2} , and various equivalence ratios for initial pressure of 0.5 *MPa* and initial temperature of 298 *K*.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] <u>W. Anggono</u>, A. Hayakawa, E. C. Okafor, G. J. Gotama, and S. Wongso : Laminar Burning Velocity and Markstein Length of CH₄/CO₂/Air Premixed Flames at Various Equivalence Ratios and CO₂ Concentrations Under Elevated Pressure, *Combustion Science and Technology*, Vol. 192, (2020), doi: 10.1080/00102202.2020. 1737032.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - *[2] A. Hayakawa, E. C. Okafor, <u>W. Anggono</u>: Effects of High Concentration of CO₂ on Flame Propagation Characteristics of CH₄/CO₂/Air Laminar Premixed Flames, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-13, pp. 26-27.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I030
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	3rd 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-turbulent 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.

In the previous research project, the visualization using cntTSP has mainly focused on the laminar-to-turbulent transition, and cntTSP has been applied to the dynamic visualization of boundary layer transition. As a next step, we focused on the visualization of the laminar separation bubble by cntTSP. In low Reynolds number, the laminar separation bubble has important effects on aerodynamic characteristics, and it is characterized by the laminar separation, boundary-layer transition and turbulent reattachment. However, the relationship between the temperature distribution, which is visualized by cntTSP, and the laminar separation bubble is still unclear. In this year, the position of the laminar separation bubble was investigated by using cntTSP.

2. Details of program implement

The cntTSP-coated wing model was prepared by the cooperation between IFS and DLR. This wing model was manufactured by IFS and applied cntTSP coating by DLR. The wind tunnel experiment was conducted by using the small low-turbulence wind tunnel at IFS.

Two other visualization methods, particle image velocimetry (PIV) and oil-flow, were employed to compare with the cntTSP result. In the wind tunnel test, the PIV system and other measurement devices were produced by the wind tunnel facility in IFS. Figure 1(a) shows the flow distribution of mainstream direction obtained by PIV, and Figure 1(b) shows the estimated skin friction line, which was obtained by the oil-flow result using the global luminescent oil-flow (GLOF) skin friction measurement technique. The airfoil had the NACA0012 profile, and the Reynolds number was 50,000. We observed the laminar-separation-bubble structure in these two results. Figure 1(c) shows the temperature distribution obtained by cntTSP. The relation between the temperature distributions and the separation bubble location is under discussion between the project members.

3. Achievements

In this year's wind tunnel test, we mainly focused on the visualization of the



Figure 1 Visualization results of three flow visualization methods with the flow speed of 10 m/s and the angle of attack of 5°.

laminar separation bubble by using cntTSP. Three flow visualization techniques, PIV, oil-flow, and cntTSP, were employed in this wind tunnel test. The wind tunnel test was successfully finished, and the acquired data had enough quality to discuss the position of the laminar separation bubble.

4. Summaries and future plans

We have acquired the necessary data to discuss the laminar separation bubble in the wind tunnel test, and the purpose of the project in 2019 was partly achieved. We will discuss the relation between the temperature distributions and the separation bubble location using this data. We are planning to summarize the data and to submit to academic journals.

- 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] 伊神翼,藤田昂志,永井大樹,<u>依田大輔,</u><u>Christian Klein</u>:カーボンナノチューブ感 温塗料を利用した低速流れにおける NACA0012 翼の動的境界層遷移計測,第51回流 体力学講演会,(2019),ロ頭発表.
- [2] 伊神翼,藤田昂志,永井大樹,<u>依田大輔</u>,<u>Christian Klein</u>:低速風洞での流れ場計測 における cntTSP の応答性評価,第47回可視化情報シンポジウム,(2019),口頭発表.
- [3] 伊神翼,藤田昂志,永井大樹,<u>依田大輔</u>,<u>Christian Klein</u>:低速流れでの動的な境界 層遷移計測における cntTSP の時間応答性の調査,第 57 回飛行機シンポジウム,(2019), 口頭発表.
- [4] T. Ikami, K. Fujita, H. Nagai, <u>D. Yorita</u>: Measurement of Boundary Layer Transition on Oscillating Airfoil using cntTSP in Low-Speed Wind Tunnel, AIAA SciTech 2020 Forum, (2020), oral presentation.
- [5] <u>D. Yorita, J. Lemarechal, C. Klein</u>, K. Fujita, H. Nagai: Transition Detection Methods in a Pitch-sweep Test by means of TSP using Lifetime and Intensity Measurements, AIAA SciTech 2020 Forum, (2020), oral presentation.
- *[6] <u>D. Yorita, J. Lemarechal, C. Klein</u>, K. Fujita, T. Ikami, H. Nagai: Investigation of a Time Response of cntTSP Sensor for a Dynamic Visualization of the Laminarto-turbulent Boundary Layer Transition, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-78, pp. 166-167. And other 3 poster presentations (international 2 / domestic 1)
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I031
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2年目

火星へリの実現を目指した同軸反転ロータの研究開発 Study of Coaxial Inversion Rotor Aimed at Realize Mars Helicopter

永井 大樹*†,藤田 昂志*,山口 敦士*
米澤 宏一**††,大山 聖***
*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
***宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
†申請者,††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、火星ヘリコプタの実現を目指した同軸反転ローターの空力性能を調査する.近年、 火星表面には直径及び深さが数百メートルの縦穴が発見されており、探査対象として注目されて いる.この火星縦穴の探査手法として火星ヘリコプタが提案されている.ただし、火星の大気密 度は地球の 1/100 程度であること、また、他の探査機とともに火星に運ぶ必要があることから、 できる限りコンパクトで高推力な方式が必須である.そこで我々は、昨年度より同軸反転ロータ 式に着目し、検討を進めてきた.

本研究では、昨年度実施された火星へリコプタの概念設計に基づき、同軸反転ロータの空力性 能を調査する. その際に、複数の翼型を用いた実験や、同一のブレード枚数を用いたシングルロ ーターの実験を行うとともに、ロータ間の距離を変えた実験も行い、同軸反転ローターを火星へ リコプターに適用する場合の空力的有効性を評価する.

2. 研究成果の内容

今年度は、(1) 同軸反転ロータにおける平板翼と三角翼の空力性能試験、(2) 同一のブレード 枚数を用いたシングルロータと同軸反転ロータの比較、(3) 同軸反転ロータの上下ロータ間距離 を変えた実験、を行った.図1に、シングルロータと同軸反転ロータにおいて、平板翼と三角翼 を用いた実験の結果を示す.これより、三角翼の方が平板翼よりも性能が良く、火星へリコプタ には三角翼を用いる方が良いことを確認した.また、シングルロータと同軸反転ロータの比較に より、推力係数は同軸反転ロータの方が高く、Figure of Merit (FM) はシングルロータの方が高い ことを確認した.特に、同軸反転ロータは高ピッチ角において高い推力係数を示し、FM も比較 的高い状態を維持しており、同軸反転ロータを火星へリコプタに適用する妥当性を確認した.ま た、図2に上下ロータ間の距離を変えた実験の結果を示す.これより、ロータ間の距離とFM の 関係が明らかになり、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、同軸反転ロータの実験を実施し、それらの結果を整理することができたため、今後 新しい条件での実験や数値解析をする際に比較対象となる基準のデータを取得することができた. そのため、次年度以降は数値解析を実施し、結果を比較していく.

4. まとめと今後の課題

今年度は、火星ヘリコプタ実現に向け、同軸反転ロータの空力性能調査をすることができた. その成果は、国際会議において合わせて3件の発表を行い、また年度末には、昨年度に引き続き、 関連する研究者を集め、第2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、新たな翼型を用いた実験や、ロータ後流や吹き降ろしの可視化実験を行うことで、 同軸反転ロータの空力性能を明らかにし、推力効率の向上を目指すとともに、数値解析を実施し、 相互の結果の妥当性を示すことで、大型研究費への提案準備を進めていく予定である.







図 2. ロータ間距離と Figure of Merit の関係

- 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] K. Fujita, K. Kanou, K. Takahashi, H. Nagai: Research on Improving Performance of Coaxial Rotor of Mars Helicopter for Vertical Hole Exploration on Mars, 32nd International Symposium on Technology and Science, 2019-e-46, 2019/6/20, (2019), Oral Presentation.
- *[2] H. Nagai, K. Fujita, <u>A. Oyama, K. Yonezawa</u>: Study of Coaxial Inversion Rotor Aimed at Realizing Mars Helicopter, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-54, pp. 108-109, Poster.
- [3] K. Fujita, <u>H. Karaca</u>, H. Nagai: Parametric Study of Mars Helicopter for Pit Crater Exploration, AIAA Scitech 2020 Forum, 2020/01/09, (2020), Oral Presentation.
- [4] 山口敦士:火星ヘリコプタのための同軸反転ローター試験,第2回火星ヘリコプター研究会, 2020/02/20, (2020), 宮城県仙台市.
- [5] 藤田昂志: 概念設計による火星ヘリのプロペラ構成の評価, 第2回火星ヘリコプター研究会, 2020/02/20, (2020), 宮城県仙台市.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I032
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

イオン液体の二酸化炭素吸収による光学特性の解明

Optical Characterization of Ionic Liquid upon Its Absorption of Carbon Dioxide Gas

古川 怜*†,大倉 美紅* 大内 二三夫**,高奈 秀匡***†† *電気通信大学基盤理工学専攻,**ワシントン大学材料工学科 ****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

イオン液体は、その二酸化炭素吸収特性を利用したデバイス応用が見込まれる.本研究では、二酸化炭素吸収を起こす前後でのイオン液体の光学特性変化に着目し、導波路型 CO₂ 濃度検知システムの実現へ向けた光物性評価を目的とした.

2. 研究成果の内容

本研究では、イオン液体 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate; [emim][Ac]を中心に検討を行った. 分子構造に起因する影響を調べるため, アルキル鎖長が異なる 1-butyl-3-methylimidazolium acetate; [bmim][Ac]を比較用に用いた. 図1に各液体試料の CO₂浸潤前後での屈折率を示す. [emim][Ac], [bmim][Ac]ともに CO₂吸収後に屈折率は低下し, 液温の上昇に伴い屈折率は低下する傾向が得られた. CO₂ 未吸収時は, [bmim][Ac] に比して [emim][Ac]は高い屈折率を示し, カチオンのアルキル鎖長の寄与が示唆された.



図1:CO2吸収前後における屈折率の温度依存特性

各イオン液体試料を用い,図2の構成で光導波路デバイスを作製・評価した.導波長20cm での透過スペクトルを図3に示す.いずれのイオン液体についてもCO2吸収後に透過光強度 が低下する傾向が示唆された.



図3: CO₂吸収前後におけるイオン液体コア導波路の紫外可視透過光スペクトル (Device 1, 2 は[emim][Ac], Device 3,4 は[bmim][Ac]をコア材料とし, Device 1,3 は CO₂ 未吸収, Device 2,4 は CO₂ 飽和状態のコアを持つ)

3. 研究目標の達成状況

目標に掲げたイオン液体を実装した導波路の作製および、それによる CO₂含有量を光学信 号により検出することに関しては、試作と測定系の構築、および初期検討が実施された.

4. まとめと今後の課題

イオン液体を液体コアとして用いた光導波路の CO₂検出特性について評価を行った.アル キル鎖長の異なる2種のイオン液体において比較を行ったところ,密度の違いなどに起因す る差が生じたが,2種とも同様に CO₂飽和状態では透過光が大幅に減少した.一方で,検出 信号の再現性や由来の特定については,引き続き検討を必要とする.

- 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>M. Okura, R. Furukawa</u>, H. Takana, and <u>F. Ohuchi</u>: Optical properties of 1-ethyl-3methylimidazolium acetate before and after carbon dioxide exposure, *Proceedings of the* 19th International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2019), CRF-14, pp. 28-29.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19I033
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd 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*, Sidharth P. Raut*, 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

The interfacial properties are important in many physical and industrial applications including biological and chemical nanofluidic transport system. We aim to study the interfacial properties of thin liquid water film over metallic surface using Molecular Dynamics (MD) simulations. The effects of various water film thickness and water temperature on pressure and surface tension is studied.

2. Details of program implement

The simulation domain consists of liquid water of thickness varying from 2 nm to 10 nm over platinum surface for three different temperatures of 300 K, 350 K and 400 K.



Figure 1. (a) Simulation domain, (b) film thickness, (c) pressure gradient and (d) temperature gradient for a water film over platinum surface.

The vapor atoms are placed over liquid based on the saturation density. The

simulation domain is symmetric in the plane parallel to the wall (Figure 1(a)) to minimize the periodic boundary condition effect on interfaces. Water is modelled with SPCE model at constant bulk temperature with Nosé-Hoover thermostat. The thermodynamic analysis is carried out with pressure and density gradients are plotted in figure 1(c) and 1(d). Based on density results the simulation domain can be divided into four regions. Liquid close to surface has higher pressure and density as surface-liquid interaction is significantly stronger near the surface. Bulk liquid properties are close to saturation properties of water for corresponding temperatures due to very less impact by surface and interface.

3. Achievements

It was observed that liquid-vapor interface has some thickness (~1 nm), where density drops from bulk liquid value to bulk vapor. The pressure drop in this region corresponds to surface tension [2] and are plotted in Fig. 2 (a). The values of surface tension obtained matches well this bulk properties calculated by SPCE model in previous studies [3]. Varying thickness doesn't influence surface tensions as surface effect is limited to less than 2 nm. We also observed that peak pressure near the wall affected liquid which signifies the liquid-wall interaction depends on liquid temperature and plotted in Fig. 2 (b).



Figure 2. Effect of film-thickness and temperature (a) surface tension, and (b) peak pressure near surface.

4. Summaries and future plans

Thin water film over platinum surface was studied using molecular dynamics simulations. A high pressure region was observed in surface affected liquid which depends on bulk liquid temperature. The wall impact for non-polar Lennard Jones surface is very short and therefore, film thicknesses below 2 nm heights needs to be studied further. We have also implemented surface to liquid heat transfer algorithm for water in molecular dynamics simulator LAMMPS. The effect on surface tension and film thickness due to evaporation at higher temperature is under investigation.

- 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>M. Gupta, S. P. Raut, A. Zou</u>, T. Tokumasu, <u>S. C. Maroo</u>: Pressure Effects in Thin Water Film by Molecular Dynamics, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-15, pp. 30-31.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I034
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Multifunctional Hybrid Filaments Comprising Aligned Nanocellulose and Carbon Nanotubes Synthesized by a Field-Assisted Flow Focusing Method

> Anthony B. Dichiara*†, Hidemasa Takana**†† *Bioresource Science & Engineering, University of Washington **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The overarching objective of this project consists of numerically and experimentally studying the mobility of fibrous nanomaterials, such as cellulose nanobrils and carbon nanotubes, under applied voltage and hydrodynamic shear to produce renewable filaments with superior properties for smart textile applications.

2. Details of program implement

A PhD student, Heather G. Wise, from the Dichiara's group at the University of Washington, Seattle WA, spent approximately 15 days during summer 2019 at the Takana's laboratory in Tohoku University, Sendai. During her visit, the PhD student produced several meters of anisotropic filaments based on the innovative field-assisted flow focusing system. Prior to the PhD student's visit, large quantities of renewable cellulose nanofibrils (CNFs) were prepared and characterized in the Dichiara's lab with various specifications (i.e. viscosity, charge density and aspect ratio) suitable for the flow focusing experiment. As-produced filaments were conditioned for further testing of their mechanical properties in Tohoku University. Preliminary experiments were also conducted with the introduction to the filament composition of carbon nanotubes purified in the Dichiara's laboratory. Pristine and fractured filaments were brought back to the Dichiara's laboratory for further characterization of their morphology and microstructure by electron microscopy, polarized Raman spectroscopy and 2D X-ray diffraction. Results were presented (i.e. both oral and poster presentations) at the 2019 ICFD conference.

3. Achievements

Macroscopic filaments comprising highly-ordered TEMPO-oxidized CNFs were produced from renewable wood pulp using an innovative field-assisted flow focusing process. The presence of oxygen moieties on the CNF surface enabled strong polarization and spontaneous alignment of dipoles under applied external electric field, which significantly improved the downstream nematic ordering of CNFs despite diffusion caused by Brownian motion. While the upstream field-assisted alignment enhanced the CNF ordering both on the filament surface and in the bulk, its effect became dominant once a threshold voltage was applied. Results revealed that the applied voltage was effective at mitigating the hydrodynamic-induced non-uniform orientation profiles across the fiber width caused by the inherent velocity gradient toward the channel walls. Filaments produced at 600 Vpp had greater optical anisotropy and exhibited a 16 % augmentation in orientation index compared to filaments prepared without an AC external field. Despite the relatively high voltages incurred, there were no signs of either electric field-induced structural defects or water electrolysis. Furthermore, 2D X-ray diffraction indicated that CNFs were densely packed anisotropically in the plane parallel to the filament axis without any preferential out of plane orientation. The high orientation degree of CNFs combined with their dense packing yielded impressive improvements in the mechanical properties of the resulting filaments, with up to 120 % increase in toughness without compromising the material's stiffness. These results demonstrate for the first time that an external electric field can be applied in a continuous flow process to control the structural ordering of anisotropic materials.

4. Summaries and future plans

In summary, this project reports, for the first time, the successful production of macroscale filaments comprising aligned TEMPO-oxidized cellulose nanofibrils in a continuous fashion using a field-assisted flow focusing process. The improved nanoscale ordering combined with the tight packing of cellulose nanofibrils yielded impressive enhancements in mechanical properties, with stiffness up to 25 GPa and more than 63 %, 46 % and 120 % increase in tensile strength, strain-to-failure and toughness, respectively. This research has great implications for the continuous production of renewable fibers with good mechanical attributes, which is particularly relevant considering that fibers account for more than 20 % of the overall plastic production, which was valued at \$55 trillion in 2017.

Preliminary results with carbon nanotubes confirmed that the electrically conductive fillers exhibit a faster and stronger response to the electric field than CNFs. The mechanical characteristics of the hybrid filaments were reduced, however, with the addition of carbon nanotubes. The decrease in strength properties is likely attributed to the poor interfacial properties between the carbon nanotubes and the CNFs. As a result, single wall carbon nanotubes were functionalized with various moieties to study the influence of surface chemistry on the strength of hybrid filaments. The PhD student was scheduled for a second visit to the Takana's laboratory in March 2020 to conduct new experiments with functionalized carbon nanotubes. Unfortunately, her visit had to be cancelled due to COVID-19. The research team is actively working on alternative ways to pursue this work despite travel restrictions. In addition, Prof. Takana has been invited to serve as a committee member for the PhD student's general exam, which will take place remotely in May 2020.

- 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. B. Dichiara</u>: Advanced Cellulose-Based Materials for Multifunctional Sensing and Environmental Applications, *Next Generation Synchrotron Radiation Workshop*, Seattle, (2019).
- *[2] <u>H. G. Wise</u>, H. Takana and <u>A. B. Dichiara</u>: Alignment of Cellulose Nanofibrils and Carbon Nanotubes in a Flow Focusing System Assisted by Electric Field, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI-2019), Sendai, (2019), CRF-55, pp. 110-111.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I036
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Numerical Simulations as Evaluation Method for Biofluidic Experiments

Narendra Kurnia Putra*†, Hitomi Anzai**†† Zi Wang***, M. Shiddiq Sayyid Hashuro****, Haoran Wang*** Suprijanto*, Makoto Ohta** *Instrumentation and Control Research Group, Faculty of Industrial Technology, Insitut Teknologi Bandung, Indonesia **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University ****Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Numerical simulation has been widely utilized as an effective tools to predict, measure and analyze some physical parameters which is hardly to obtained by the experimental studies. *Computational fluid dynamics* or CFD in particular has been used as main analysis tools for many intravascular flow studies either to understand more about the internal flow behaviour or for designing and improving the medical treatment procedures.

In this project, we propose to use numerical simulations as evaluation method towards the multi-scale experiment to understand about the development of intravascular disease. Several simulation studies are plan to be develop side-by-side with the experimental studies of cellular experiment with flow exposure and the preparation of the flow circuit's design with PVA-H model.

2. Details of program implement

This research implemented mainly on the two subjects regarding the utilization of CFD simulations for:

a. Predictions of endothelial cells (ECs) alligmment on the experimental flow chamber dish to inform about the role of wall shear stress (WSS) to the endothelialization of ECs.

In this research, the applicant has a responsibility to conduct the CFD simulation for the virtual flow chamber with two wires stents positioned on its bottom side (Figure 1). This simulation aimed to figure out about the ECs behaviour towards the change of the flow when the stent wires are positioned on a different angle and gap. The experimental works have been carried on the life science cluster, IFS. Analysis on the comparison between WSS distributions map and the flourescence microscope fixed-cells images have been performed in this stage of research.

b. Predictions of the internal flow pattern of PVA-H model's for medical imaging phantom.

In this part of research, CFD simulation has been made as a predictions of PVA-H cylinder model which will be fabricated as a part of flow phantom development study. A straight pipe model has been designed with a different flow cross sections. This prediction is useful to determine the optimum position

to locate the flow measurement sensors.



Figure 1 : (a) geometry of flow chamber for ECs experiment setup. (b) predictions of flows pattern for the PVA-H model design

3. Achievements

Regarding the first target, concerning the comparison between post-flow-exposure ECs distribution on the bottom od the dish and the WSS distribution from the CFD simulation has been successfully obtained during this first phase of project. For flow pattern predictions and confirmation of computational simulation result on the in vitro blood vessel model is currently on the first stage. Analysis on multi-solver simulation results will be carried on the following year.

4. Summaries and future plans

From the current results, the tendency of ECs migration is happen under high influence of the flow, especially the WSS distribution. This conditions can be analyze from the agreement between the WSS distribution on the dish with the location of high WSS density which mainly located on the high WSS region.

For the next step, on the Cellular experimental study, we will continue to obtain more experimental results to proof the statistical consistency of the cell distribution results. Meanwhile the report of all the results is prepared for journal publication.

For comparison between simulation results and in vitro blood vessel model will be conducted on the following year with fabrication of PVA-H model which has been confirmed on simulations.

- 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>Putra N. K.</u>, Wang Z., Hashuro M. S. S., Wang H., <u>Suprijanto</u>, Ohta M., Anzai H.: Numerical Simulations as Evaluation and Planning Method for Cellular Biofluidic Experiments, *Proceeding of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, Miyagi, Japan, (2019), CRF-64, pp. 128-129.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I037
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

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

Olivier Mathieu*†, Hisashi Nakamura**††

Yoshimichi Yamamoto**, Clayton R. Mulvihill*, Eric L. Petersen*, Takuya Tezuka** *J. Mike Walker '66 Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

This project aims at understanding better the combustion chemistry of nitromethane (CH_3NO_2) , which is still not very well understood. This will have many benefits due to the many applications of NM such as gasoline fuel additive, race fuel, monopropellant. This will also lead to a better understanding of the interactions during combustion between CH_4 , the main component of natural gas, and NO_2 , since nitromethane will primarily dissociate into CH_3 , a dominant and early radical of CH_4 combustion, and NO_2 . This NO_2 - CH_4 interaction could be of interest for Japan as blends of ammonia and CH_4 are considered as a possible way to obtain low-carbon fuels with flame speeds higher than that of ammonia, the source of high NOx emissions being ammonia.

2. Details of program implement

Experiments were conducted as planned at the IFS. The results where compared to modern detailed kinetics models and the large discrepancy with the data and among models is a clear evidence of the project's value and relevance.



Figure 1 : Comparison between the data obtained during this project and modern detailed kinetics mechanisms.

3. Achievements

Experiments were successfully conducted at both the IFS and Texas A&M side (which benefited from its own, internal, source of funds). Results were presented at the 16th, ICFD in Sendai and a paper was written for the very selective and prestigious International Symposium on Combustion. The paper was accepted for oral presentation and is very likely to be accepted for publication in *Proceedings of the Combustion Institute*.

4. Summaries and future plans

New experimental data were taken for the pyrolysis of nitromethane in a micro-flow reactor with a controlled temperature profile at the Institute of Fluid Science and in shock tubes at Texas A&M University. These data were compared to modern detailed kinetics mechanisms and the predictions were poor in general, indicating a strong need to revisit the models.

The next step will be to develop a model capable of capturing the experimental trends and to perform similar experiments under oxidation. A final model, able to predict both pyrolysis and oxidation, should be developed in the near future and these results should be published in a peer-reviewed journal. It is anticipated that the model should be the reference in the field for this molecule.

- 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>O. Mathieu</u>, Y. Yamamoto, <u>C. Mulvihill</u>, <u>E. Petersen</u>, T. Tezuka, H. Nakamura: Experimental and Chemical Kinetics Modeling Study of Nitromethane in Shock Tubes and a Micro-Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-16, pp. 32-33.
- [2] Y. Yamamoto, T. Tezuka, H. Nakamura: Study on Pyrolysis of Nitromethane using a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS18-67, pp. 818-819.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I039
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year (progressing)

Evaluation of Natural Convection Flow under Spatiotemporally Variable Thermal Condition

Atsuki Komiya*†, Nicholas Williamson**†† Junhao Ke**, Linjing Zhou**, Steve Armfield** * Institute of Fluid Science, Tohoku University ** School of Aerospace, Mechatronic Engineering, The University of Sydney †Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

In this study, we focus on a temporally evolving natural convection boundary layer (NCBL) adjacent to a vertical isothermal wall (Prandtl number: Pr=0.71). This study aims to lay the foundations for future improvements in energy technology by improving our ability to predict and control the behavior of vertical NBCLs. We will for the first time examine this flow, using a large scale direct numerical simulation, in the transitional and fully turbulent flow at very high Rayleigh number regimes to obtain a detailed understanding of the flow structure of very high Rayleigh number NCBLs.

2. Details of program implement

The preliminary results show that the near wall characteristics of the mean statistics, such as mean temperature and velocity profiles, are largely dependent on the buoyancy force in the near wall region as shown in Figure 1. The mean profiles, although different from the canonical forced boundary layers, can be seen to follow a modified log-law relation. In the near wall region, we have identified a constant forcing layer, where the wall shear is balanced by the buoyancy and local shear, to a similar extent to the constant heat flux layer.



Figure 1 : Flow field visualization (a) Temperature field visualization at $Gr = 7.7 \times 10^7$, (b) A magnified view of the temperature field of the red box in (a), (c) Magnified view of the stream-wise velocity field of the red box in (a).

3. Achievements

A three-dimensional direct numerical simulation has been carried out with Pr = 0.71 using a massively parallelized solver in a $3125 \times 1000 \times 3125$ cartesian grid. Preliminary results are obtained up to Grashof number $Gr = 1 \times 10^8$ where the flow is turbulent enough to demonstrate the characteristics of a turbulent boundary layer. The turbulent DNS data suggests the mean profiles are found largely dependent on the buoyancy effect. As the flow progressively reach higher Gr, the buoyancy force is found to lose its significance in the near wall region. Such behavior suggests a shear-dominated (ultimate) turbulent regime could be achieved at a higher Gr where the buoyancy effect asymptotes to zero. Currently we have achieved a flow regime where shear and buoyancy are comparable (ratio of shear to buoyancy is about unity). We believe the asymptotic regime (which may be approximated by when the ratio of shear to buoyancy equals 10) can be achieved by another year of HPC support. At current stage, we have one paper submitted to the Journal of Fluid Mechanics (3 positive comments, require only minor revision) and one preliminary draft for the Journal of Fluid Mechanics in preparation.

4. Summaries and future plans

In this fiscal year, we will continue the simulation to achieve a higher Gr so that a more detailed description of the turbulent boundary layer structure can be obtained. The ongoing analysis on the outer region of the turbulent boundary layer will focus on the outer boundary layer, where a plume like flow structure has been developed. The study of the outer boundary layer will lead to a better understanding of multiple features of the turbulent boundary layer, for example, the entrainment of the boundary layer, the application of the plume integral model to the boundary layer, the scaling relation for the heat transfer rate and also the indication of the asymptotic ultimate regime.

- 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)
- J. Ke, N. Williamson, S. W. Armfield, S. E. Norris and A. Komiya: Application of an Integral Model to an Unsteady Natural Convection Boundary Layer, *The 11th Australasian Natural Convection Workshop*, (2019), Sydney, Australia.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I041
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	3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***,高橋 徹*,片岡 裕樹* *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.し かし、実際のスキージャンプ競技において通気量を0にすることは不可能である.そこで本 研究では、通気量を部分的に増加させた生地により空力特性に影響を及ぼすか、通気量を増 加した位置が異なることにより、失速角の後退が見られるかを調べた.

2. 研究成果の内容

本研究では、オリジナルの生地とオリジナルの生地の状態から中間層の穴を拡張、増加させたものを組み合わせた生地を用いた。オリジナルの生地の通気量は 43.4 L/m²/s、増加させた生地の通気量は 65.8 L/m²/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%の通気量を増加としたものを Case3-1、楕円柱後縁から 50%の通気量を増加としたものを Case3-1、楕円柱後縁から 50%の通気量を増加したものを Case3-1、楕円柱後縁から 50%の通気量を増加したものを Case3-1、楕円柱後縁から 50%の通気量を増加したものを Case3-1、右門柱後縁から 50%の通気量を増加したものを Case3-1、右門柱後縁から 50%の通気量を増加したものを Case3-1、右門柱後縁から 50%の通気量を増加したまのを Case3-1、右門柱後縁から 50%の通気量を増加したものを Case3-1、右門柱後縁から 50%の通気量を増加したものを Case3-1、右門柱後縁から 50%の通気量を増加したをした。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* = 2.0×10⁵ における楕円柱の抗力係数曲線と揚力係数曲線である。抗力係数(図2(a))では、Case3-1の値が他二つの生地と比べ最も小さい結果となった。揚力係数(図2(b))を見ると、最大揚力係数は部分的に通気量を変化させた生地の方が高く、低迎角の揚力傾斜も大きくなっている。失速角については Case1-3 と Case-1 でほぼ変わらなかったが、Case3-1 では失速角が早まったのは、前縁部の通気量が大きいため流出する流れが前縁付近で流出してしまい生地近傍への運動量の供給が行われるはずの位置で行われなかったためであると考えられる。





図2: 揚力係数曲線(横軸は迎角 a)

3. 研究目標の達成状況

通気量を部分的に増加させた生地を被せることで、生地と楕円柱の間に流入した流れが楕 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.ま た、前縁部の通気量を増加させることで最大揚力係数が増加する結果となった.体の部位に よっては低迎角で飛翔するため組み合わせによっては飛距離延伸の可能性を示唆する結果 が得られた.このことを考慮すると、目標は概ね達成できている.しかし、通気量を部分的 に増加させたことにより揚力曲線に違いが生じた理由については分からなかったため、流れ 場の評価による詳細な検討が必要になる.

4. まとめと今後の課題

本研究では、生地の通気量を変化させることで楕円柱の空力特性に違いが生じることを明 らかにしたが、流れ場の評価については不十分であった。今後は翼型に生地を被覆し揚力傾 斜、最大揚力係数、揚抗比、失速角周りのヒステリシスへの影響、非定常特性について調べ る.また、流れ場の評価を行うために模型サイズを縮小して実施する.

- 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)
- T. Takahashi, H. Hasegawa, M. Murakami, K. Seo and S. Obayashi: Flow Visualization Around an Elliptic Cylinder Clothed with Ski Jumping Suit Fabric of Different Air Permeability, *The 12th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*, Taipei, (2019).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] <u>T. Takahashi, Y. Kataoka, H. Hasegawa, K. Seo</u> and S. Obayashi: The Stall Characteristics of Ski Jumping Suit Fabric with Different Air Permeability, *Proc. of the 19th Int. Symp. on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-77, pp. 168-169.
- [3] <u>高橋徹</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を被覆した 楕円柱周りのはく離流れ, 日本流体力学会年会 2019, 東京, (2019).
- [4] <u>片岡裕樹</u>, <u>高橋徹</u>, <u>長谷川裕晃</u>, <u>村上正秀</u>, <u>瀬尾和哉</u>: スキージャンプスーツ生地の通気量 が失速特性に及ぼす影響, スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2019, 福岡, (2019).
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I042
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

実際の構造を反映させた多孔質材料内部の固気反応を伴う物質移動と 構造変化の大規模シミュレーション Large-scale Simulation of Mass Transfer with Solid-Gas Reaction in Porous Material with Actual Structure

松下 洋介*†,小宮 敦樹**††,沼澤 結* *東北大学大学院工学研究科化学工学専攻,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

本研究では、X線CT像により構築し、約2億ボクセルによって表現した実際の構造を反映させた多孔質材料内部の固気反応を伴う物質移動と構造変化の大規模シミュレーションを実施する.固気反応が生じる系において、Stefan-Maxwell式によって多孔質内のNg/CO/CO2の3成分系の拡散を正確に考慮し、多孔質の構造変化を予測し、構造によって決定される見かけの反応速度を推算する.

2. 研究成果の内容

2 成分系の拡散は Fick の法則により記述され、その簡便さからしばしば多成分系の拡散に も拡張される.しかしながら、厳密には多成分系の拡散は Stefan-Maxwell (S-M)式により 記述されるべきである.これは、Fick の法則の拡張では、多成分系における拡散を正確に記 述できないだけでなく、質量は保存するものの、連続の式には帰着することが保証されない ためである.そこで、検証問題として、図1(a)に示す定常状態において厳密解のある Stefan tube を対象に S-M 式の優位性を検討する.基礎式として、式(1)に示す化学種の保存式を考 える.なお、式(1)の化学種に関する総和は連続の式に帰着することがわかる.

(1)
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho (u_j + V_{k,j}) Y_k \right] = 0$$

ここで、Vは拡散速度であり、式(2)に示すS-M式を用いて算出する.

(2)
$$\nabla X_p = \sum_{k=1}^{N} \frac{X_p X_k}{D_{pk}} \left(V_k - V_p \right)$$

式(1)を構造格子の有限体積法に基づき,対流項を二次中心差分法により離散化する.既往の研究では,式(2)から拡散速度 V_{kj}を求め,陽解法を用いて式(1)から質量分率 Y_kを求める.

しかしながら、定常解を求めるには、小さな時間刻みで非常に多くのステップ数を要する ため、本研究では、式(2)を各化学種 k に対して $V_{k,i}$ について整理し、式(1)に代入し、陰解 法を用いて式(1)から体積分率 X_k を求める. これにより、大きな時間刻みで定常解を求める ことが可能となる. 図1(b)に示すとおり、本手法では Fick の法則の拡張では再現すること ができない Stefan tubeの厳密解をほぼ完全に再現することができる. また、ここでは示し ていないが、陽解法を用いて時間進展させることで求めた定常状態における数値解とも完全 に一致した.一次元の検証問題において本手法の妥当性を確認できたため、本手法を約2億 ボクセルで表現した三次元の多孔質内物質移動を伴う反応解析に適用した.ただし、現段階 では簡単のため、流体の速度はゼロであると仮定した.図2に示すとおり、多孔質内にはガ ス化剤である CO2の分布が生じており、見かけの反応速度が化学反応速度だけでなく、ガス 化剤の拡散による物質移動速度によって決定されることがわかる.紙面都合上示していない が、見かけの反応速度は測定値と概ね一致することも確認した.



(a) 解析対象の概念図

(b) 解析結果の一例

図1: Stefan-tubeの解析対象とStefan-Maxwell 式による解析結果の一例

3. 研究目標の達成状況

実際の構造を反映させた多孔質材料内部の固気反応を伴う物 質移動と構造変化の大規模シミュレーションとして、多孔質材 料の CT 像からボクセルを用いて解析対象を構築し、CO₂ガス 化反応を伴う Stefan-Maxwell 式を用いた物質移動解析を実施 できたことから、概ね目標は達成した.



図2:多孔質内CO2濃度分布

4. まとめと今後の課題

⊂ Ø ⊂ ラ @ の 課題 今後, CO₂ だけでなく H₂O ガス化反応を考慮する予定

である. H₂O ガス化では CO に加えて H₂が生成する. そのため, N₂/CO/ CO₂/ H₂/ H₂O の 5 成分系の拡散を考慮したシミュレーションを実施したいと考える. 5 成分系となることで, 水性ガスシフト反応も生じるため, 不均一反応であるガス化反応に加えて均一反応である水 性ガスシフト反応も考慮する予定である.

- 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・ロ頭発表等
- *[1] <u>Y. Numazawa, Y. Matsushita, H. Aoki</u>, A. Komiya: Large-Scale Simulation of Mass Transfer and Structural Change with Solid-Gas Reaction in Porous Media: Investigation of Diffusion Term, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2019), CRF-17, pp. 34-35.
- [2] <u>沼澤結</u>, 赤尾津翔大, 松下洋介, 青木秀之: 有限体積法に基づいた Stefan-Maxwell 式を用 いた物質移動解析の陰解法とその応用, 化学工学会第 85 回年会, 大阪, (2020).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19I044
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

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

Chenguang Lai*[†], Shigeru Obayashi^{**}[†], Yuting Zhou^{***}, Bin Zhao^{*} Yi Chen^{*}, Haitao Bai^{*} * Chongqing Institute of Automobile, Chongqing University of Technology

Institute of Fluid Science, Tohoku University of Technology * Institute of Chemical Engineering, Chongqing University of Technology †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

To design and optimize a car empennage with winglet, firstly, quasi-uniform B-spline curve was applied to fit the airfoil, then the fitting airfoil was employed in building the three-dimensional model of the winglet. After that, the Bi-directional fluid-structure interaction was used to add the actual influence of static aeroelasticity on the car empennage with the winglet. Coupled simulation between steady flow filed and static structure was achieved with System Coupling connecting the Fluent with the Static Structural. Then, optimized the airfoil and shape parameters of the new car empennage's winglet with multi-objective method under the three dimensional flows before and after considering the effect of static aeroelasticity. In order to obtain the accurate optimized results, the study took samples with Latin hypercube sampling, fitted the approximation model by Kriging method. In addition, NSGA-II was applied to perform multi-objective optimization based on approximation model. Finally, the optimal solutions from two Pareto Optimal Frontiers were obtained according to specific design indexes. 3D models were reconstructed based on optimal solutions. Finally, wind tunnel experiments were carried out in the Low-turbulence Wind Tunnel, IFS, Tohoku University to verify the results.





Fig. 1: Comparison between airfoil fitting result and original airfoil

Fig. 2: Parametric method of winglet

3. Achievements

The vortex-induced vibration of the car empennage with winglet occurs in the flow field at the vehicle's tail, which is motivated by the drag vortex at the vehicle's tail and the induced-vortex of the wingtip. The vibration frequency of the new car empennage is equal to its first-order modal vibration frequency. Due to that this frequency is different from the frequency of the motivated vortex obviously, the new car empennage has no risk about resonance under the design speed. Some fluid characteristic comparisons of the car with Ordinary empennage (left) and new empennage (right) are shown in Fig. 3 and 4.



Fig. 3: Surface pressure contour of model's tail



Fig. 4: Comparison of velocity vector of tip section at trailing edge

4. Summaries and future plans

Summaries: A winglet can use the three-dimensional flow, generated by the wingtip, to provide the wing with additional lift and forward thrust. Its unique mechanism of action is also suitable for the application to a car empennage. However, because the wake of a vehicle has many differences with an aircraft, traditional airfoils of an aircraft are difficult to satisfy the design requirements of a winglet that is installed on the car empennage. Meanwhile, adding a winglet will create new aerodynamic load distribution due to the additional elastic deformation. Therefore, the design and optimization of a car-used winglet is needed.

Future plans: 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</u>, <u>Q. Wang</u>, <u>B. Hu</u>, <u>K. Wen</u>, and <u>Y. Chen</u>: Design and Optimization of a Car Empennage with Winglet under Effect of Static Aeroelasticity, *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, Vol. 5, No. 2, (2020), pp. 399-407, (Chinese).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[2] <u>C. Lai, W. Huang, Q. Wang, Y. Zhou</u>, and S. Obayashi: Aerodynamic Drag Reduction of a Heavy Truck with Efficient Global Optimization Method. *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2019), CRF-18, pp. 36-37.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I046
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2年目

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** *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

†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・実用化には新規の高精度・高抵抗 (GΩオ ーダ) 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 より積層構造化することを構想し、高精度のアナログメモリ素子の製造技術の開発を進めた.

ReRAM 素子のアナログメモリ動作では、大きな特性ばらつきが問題となっているが、 MOSFET と ReRAM を結合したユニットを複数個を並列接続して、ReRAM 素子の特性ば らつきを平均化して抵抗値の精度を向上させる構成を考案した(図 1(a)). 今回は、この構 成を微細化に適したナノ構造とするために、MOSFET を高抵抗素子で置き換えた積層ナノ 構造を検討した(図 1(b)). 高抵抗素子としてアモルファス Si (a-Si)の利用を想定し、膜 厚 100nm のときのコンダクタンスの面積依存性を測定した(図 1(c)). 結果を外挿すると、 ナノメータサイズで GΩ級の抵抗値となり、所望の値が得られることが予想できた[3]. ReRAM 素子については、初期状態で GΩ級の抵抗値を示す材料構成と抵抗変化メカニズム を明らかにした[2,4]. なお、この構成では ReRAM が高抵抗状態から低抵抗状態に変化する と、その素子に電圧が印加されなくなるので元に戻すことができず、一回書込みのメモリ素 子となる.

一方, 脳型記憶モデルとしては, 海馬・扁桃体・前頭前野の機能を統合したモデルを提案 した[6]. さらに, エピソード記憶を実現する海馬とその周辺部位(嗅内皮質)のモデル化を 進め, 自己位置に反応する Place cell(場所細胞), 他者・オブジェクトの位置に反応する



図1 積層型アナログメモリ素子の構想と基本検討結果: (a) ReRAM-MOSFET 並列接続メモリ構成, (b) ナノ構造, (c) a-Si 抵抗評価結果.

Social place cell および短期・長期の記憶機能を実装したモデルを提案し、数値シミュレーションにより、場所とオブジェクトの関係に関わる記憶を扱うラットを用いた動物実験結果を説明できることを示した[7].

3. 研究目標の達成状況

高精度・高抵抗アナログメモリ素子のための製造技術開発と脳型記憶モデルの提案について、いずれも基本検討レベルではあるが、着実に進展した.

4. まとめと今後の課題

ReRAM 素子と高抵抗素子を積層したナノ構造実現のための製造技術の基本検討を行うと ともに,脳型記憶モデルとして,海馬・扁桃体・前頭前野の機能統合モデルと海馬-嗅内皮質 モデルの発展モデルを提案し,その機能を数値実験により実証した. 今後,構想したデバイ スの実現を目指すとともに,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)
- [1] <u>森江隆</u>:【解説記事】ニューロモルフィックシステムと物理デバイス,応用物理(応用物理 学会機関誌),88巻7号,基礎講座(No.35)「応用物理と人工知能」,(2019),pp.481-485.
- [2] Y. Li, A. T.-Fukuchi, M. Arita, T. Morie, Y. Takahashi: Initial States and Analog Switching Behaviors of Two Major Tantalum Oxide Resistive Memories, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 59 (2020), 044004 (8 pages).
- 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: Investigation of LSI Architecture and Analog Memory Devices for Brain-like Systems, *Proceeding of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI-2019), Sendai, (2019), CRF-56, pp. 112-113.
 - [4] <u>李遠霖,福地厚,有田正志,森江隆,高橋庸夫</u>: CuとTaを上部電極に用いたTa₂O₅₋₈多値 抵抗変化メモリの特性評価,電子情報通信学会電子デバイス研究会,ED2019-16,(2019).
 - [5] <u>森江隆</u>: 【招待講演】次世代人工知能のための脳型集積回路技術とデバイス技術,第83回 半導体・集積回路技術シンポジウム,(2019).
 - [6] <u>田中悠一朗</u>, <u>田向権</u>, <u>立野勝巳</u>, <u>香取勇一</u>, <u>森江隆</u>: 海馬・扁桃体・前頭前野の機能を統合 した脳型人工知能モデル, 第 29 回日本神経回路学会全国大会 (JNNS 2019), O3-41, (2019).
 - [7] <u>前田優輔</u>, <u>立野勝巳</u>, <u>森江隆</u>: 家庭用サービスロボットのための海馬-嗅内皮質モデルにお ける場のオブジェクト表現と統合, 電子情報通信学会 NC 研究会, NC2019-72, (2020).
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19I047
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year (progressing)

Understanding Tribological Behaviour of hBN Nanoparticles in TMP Ester Based Biolubricant by Assessing Its Rheological Properties

Takashi Tokumasu*†, Nasruddin Yusuf Rodjali**††, Rizky Ruliandini** *Institute of Fluid Science, Tohoku University **Faculty of Engineering, Universitas Indonesia †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Using molecular dynamics simulation, this project was intended to provide an overview of hexagonal boron nitride (hBN) nanoparticle mechanism in Trimethylolpropane ester-based biolubricants so as to improve its tribological characteristics. By getting the rheological properties it is expected to be able to predict the nano-biolubricant performance.

2. Details of program implement

This project was conducted by simulation based, and the study material about molecular dynamics simulation was supplied by IFS. During the project, we communicated very well, and the IFS members were very open with all discussions and consultations about the projects being carried out. The accessibility of super computer facilities was a major contribution to this project. Despite all the collaboration work was performed remotely, the project could be implemented well.

3. Achievements



Fig. 1 (a) System at initial position (b) The upper wall moving down after equilibrated for 250 ps (c) Sheared condition

- a. The mechanism of hBN nanoparticles were assessed through its density and viscosity profiles. The profiles were not sufficiently supplied the information of tribological characteristic.
- b. This project was trying to apply the molecular dynamics simulation method to assess hBN-TMP ester mixtures which employ an ab-initio calculation in order to

get the certain MD parameters, the pair coefficient between the boron nitride and atty acids in particular.

- c. During April 2019 March 2020 the members of this project were attending the International Conference in Bali (I-TREC, 2019) and two articles were selected to a Q3 SCOPUS indexed journal, EVERGREEN and AIP Proceeding. The status of the two articles are still under reviewed.
- 4. Summaries and future plans

The results show, up to 15MPa of wall pressure, the nanofluid still could hold in the load very well. The drawback is that in this study the upper and lower wall were acted as boundary since there is no potential applied. So, the interaction between the nanofluid and the wall were still not covered as we expected. For the next research, the inter atomic potential is should also be applied onto upper and lower wall and there should be a proper potential for hBN in order to get a more accurate and comprehensive results.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included intranational 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: Understanding Tribological Behavior of hBN Nanoparticles in Trimethylolpropane trioleate (TMPTO) Based Bio-lubricants : Molecular Dynamic Simulation, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-19, pp. 38-39.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I049
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2年目

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 孔径が数十-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

今年度は燃料電池触媒層内部のアイオノマー表面における酸素拡散現象を,表面上の酸 素散乱現象を考慮して分子動力学法により解析した.触媒層のナノ細孔のモデルとしては, スリット状の隙間にアイオノマーを敷き詰めた系を用いた.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.アイオノマー表面における酸素分子の滞在時間を調べたところ,滞 在時間はアイオノマーの含水率が増加するにつれて増加する傾向にあることが確認された. この表面滞在時間と表面移動距離の関係を調べたところ,入射方向への依存性があること が確認された.また,表面移動距離の確率密度関数を調べたところ,含水率が増加するに つれて,入射方向への移動確率が増加していることが確認された.これらの結果は,触媒 層内部の酸素輸送現象を正確に把握するためにはKnudsen拡散現象の影響を正確に評価する 必要があることを示唆している.



図1:各含水率における散乱方向の確率密度関数

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、散乱方向などを定量的に評価することができた. 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.

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方向の相関について明らかにした.今後は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、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)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- *[1] <u>Masataka Nakauchi, Takuya Mabuchi, Yuta Yoshimoto, Toshihiro Kaneko, Ikuya Kinefuchi, Hideki Takeuchi</u>, Takashi Tokumasu: Molecular Dynamics Study of Oxygen Diffusivity in Catalyst Layer, *ECS Transactions*, Vol. 92, No. 8, (2019), pp. 23-28.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[2] <u>Masataka Nakauchi, Takuya Mabuchi, Yuta Yoshimoto, Toshihiro Kaneko, Ikuya Kinefuchi, Hideki Takeuchi</u> and Takashi Tokumasu: In-plane Relation between Magnesium Oxide Thin Film and Silicon Substrate, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-20, pp. 40-41.
- 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	J19I050
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd Year

Solid Oxide Fuel Cells Replacement of a Traditional Catalytic Converter

Jeongmin Ahn*†, Hisashi Nakamura**†† *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of Project

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

2. Details of Program

It was discovered that the primary concern that needed to be addressed was the ability of a SOFC to reduce automotive emissions to successfully replace a traditional catalytic converter. A Ni-gadolinium doped ceria (GDC) SOFC was compared against a section of commercially available catalytic converter. The anode of the SOFC was made via dry pellet pressing of 60% by weight NiO and 40% by weight GDC powder. The anodes were then pre-sintered at 1000°C. A GDC electrolyte was then wet-powder sprayed onto the anode layer. The anode and electrolyte layers were then co-sintered to 1400°C. Finally, a lanthanum strontium cobalt ferrite (LSFC), GDC cathode layer was wet-powder sprayed onto the electrolyte. The catalytic converter specimen's surface area was matched to that of the SOFC. Each specimen was tested for emission reduction within the same testing apparatus. The testing apparatus was then placed within the same split tube furnace for accurate temperature control. Bench top flow meters were utilized to control the flow of each constituent within the model exhaust. The model exhaust was supplied to the reactive membrane within the furnace via quartz piping. For each run the specimen was supplied with 143 ml/min of air, 1 ml/min of 10% NO with N_2 balance, 5 ml/min of CO, and 15 ml/min of CH₄. This is meant to simulate a near stoichiometric exhaust mixture, for CH₄ and air, for testing across varying temperatures. The high content of hydrocarbons and CO is designed to emulate the exhaust of a catalyst warm up strategy. The incoming flow is known to consist of 18.31% O₂, 9.14% CH₄, 3.05% CO, and 0.0609% NO. The effluent of each test was measured with mass spectrometer (MS) and emission gas analyzer. Each of the following figures represents the time average result for each specimen. The MS scans are taken and averaged with continual sampling. The emission analyzer is then connected to the effluent stream and samples. All temperatures followed a similar trend and were determined to provide redundant information. The model exhaust was continually fed into the system, and therefore, it is believed that the chemical species within the furnace may not reach chemical equilibrium. This test is meant to simulate that of continual exhaust treatment. The test was conducted at 400°C, 500°C, 600°C, and 700°C to cover exhaust temperatures after warmup at idle ranging to under moderate engine load.

3. Achievements



Figure 1: Emission Reduction Comparison at 400-700 °C

4. Summaries and future plans

The comparison between the SOFC and catalytic converter element across a wide range of temperatures highlights significant differences in performance for particular emission species. The SOFC and catalytic converter are closely matched in hydrocarbon reduction for all temperatures tested. However, this is the only similarity between the two specimens. The catalytic converter is able to significantly reduce CO emissions, whereas the SOFC appears to generate CO as an intermediate species. This indicates that the final conversion of intermediate CO to CO_2 is slower in the SOFC when compared to the catalytic converter. However, at all temperatures the total NOx emission from the SOFC is significantly lower than the catalytic converter. The fuel cell is readily able to continually react and reduce NOx. This variation in performance indicates significant academic interest. Neither, the catalytic converter nor the SOFC performance is clearly better. Therefore, future study is needed on a combined system. Investigation of a SOFC that utilizes additional catalytic materials from the current catalytic converter mixed into the electrode material may yield significantly improved emission control.

- 5. Research results (*reprint included)
- 1) Journal
- T. S. Welles and J. Ahn: A Novel Solid Oxide Fuel Cell Based Catalytic Converter Replacement for Enhanced Emission Control and Power Generation in Automotive Exhaust, *Proceedings of the SAE*, 20PFL-0379, (2020).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- *[2] <u>T. S. Welles</u>, <u>J. Ahn</u>, and H. Nakamura: Solid Oxide Fuel Cells Replacement of a Traditional Catalytic Converter, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-21, pp. 42-43.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I051
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2年目

水中プラズマによる微細気泡の生成・安定化機構

Mechanism of Generation and Stabilization of Fine Bubbles Generated by Plasma in Water

佐藤 岳彦**, 中谷 達行****

宮原 高志***, 大谷 清伸*, 上原 聡司*, 中嶋 智樹* *東北大学流体科学研究所, **岡山理科大学フロンティア理工学研究所 ***静岡大学学術院工学領域数理システム工学系列 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

水中で放電させる際に形成される微細気泡の生成過程や安定化機構について可視化実験 を通し明らかにする.

2. 研究成果の内容

令和元年度は、気泡の安定性に関係 していると考えられている帯電量につ いて評価した. 図1は気泡発生および 帯電量を評価するための実験装置であ る. 気泡は水中ストリーマをキュベッ ト内に生成し、ストリーマガスチャネ ルの崩壊時に発生する残留気泡を観察 した. 図2は電極先端に高電圧を印加 しストリーマを発生させた後に残留し た微小気泡が、電圧印加時に高速で移 動する様子である. このときの電極 表面からの距離に対する速度分布を 図3に示す.移動平均速度は17 m/s で,最大 57 m/s に達する.残留微小 気泡は、電気力線に沿い移動するた め、電界分布を解析し、静電気力に よる気泡の駆動と抗力を考慮した, 式(1)を用いて帯電量の推定を行っ た.

$$m\frac{dv}{dt} = qE - 6\pi\mu rv \tag{1}$$

式(1)から式(2)が求まる.

$$q = \frac{6\pi\mu r\nu}{E\left\{1 - \exp\left(-\frac{6\pi\mu r}{m}t\right)\right\}}$$
(2)





Fig. 2 Moving traces of the residual bubbles. The periods of the traces are (a) $t = 0-3.0 \ \mu$ s, (b) $t = 0-1.7 \ \mu$ s, (c) $t = 0-3.0 \ \mu$ s, (d) $t = 0-1.5 \ \mu$ s. The time resolution of the bubble movement is 0.1 μ s.

Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

ここで、mは質量(1.0 × 10⁻²² kg), v は速度(57 m/s), r は気泡半径(5 μ m), E は電界強度(1.29 MV/cm), μ は水の粘性係数(1 mPa・s)である.

これより,帯電量は,-4.2×10⁻¹⁴ C と評価でき,プラズマにより生成 された気泡が帯電していることが示 された.

3. 研究目標の達成状況

本年度は、水中放電により生成し た微細気泡の帯電量の評価に成功 した.また、微細気泡が高電界中で 秒速57 m と極めて速い速度で移動 することを発見した.これより、本 年度の目的は達成したと考えてい る.



Fig. 3 Moving velocity of the residual bubbles against the distance between the center position of bubbles and the needle electrode at $t = 0.5 \,\mu s$. The data was sampled from three different discharges.

4. まとめと今後の課題

本年度は、水中放電により生成した微細気泡の帯電量の評価に成功したが、プラズマが生成する微細気泡の安定性と帯電量の関係は未だ解明されておらず、今後の課題としたい.

- 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] 佐藤岳彦, 上原聡司, 熊谷諒, <u>宮原高志</u>, 大泉雅伸, <u>中谷達行</u>, 落合史朗, <u>宮崎孝道</u>, 藤田 英理, <u>金澤誠司</u>, 大谷清伸, 小宮敦樹, <u>金子俊郎</u>, 中嶋智樹, <u>Marc Tinguely</u>, <u>Mohamed</u> <u>Farhat</u>:プラズマファインバブルの生成と計測, 混相流, Vol. 33, No. 4, (2019), pp. 382-389.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- *[2] T. Sato, R. Kumagai, S. Uehara, T. Nakajima, K. Ohtani, <u>T. Miyahara</u>, and <u>T. Nakatani</u>: Measurement of Electrical Charge in Fine Bubbles Generated by Plasma in Water, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI2019), Sendai, (2019), CRF-66, pp. 142-143.
- 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	J19I052
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

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

Hidemasa Takana*†, Hideya Hishiyama** Marien Simeni Simeni**, Yong Tang**, Keegan Orr**, 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 atmospheric pressure flames and atmospheric pressure plasma jets. Such insight is critical to predictive analysis of plasma-assisted combustion and flameholding, and applications of plasmas in biology and medicine.

2. Details of program implement

The results have been presented at 16th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, November 6-8, 2019: I.V. Adamovich, "Electric Field Measurements in Nanosecond Pulse Discharges in Air and in Hydrogen Flame".

3. Achievements

Repetitive ns pulse, dielectric barrier discharge voltage waveforms, combined with a tail several ms long, are used to induce oscillations of a counterflow atmospheric pressure diffusion flame, as shown schematically in Fig. 1. A baseline ns pulse discharge operated at 10 Hz results in a relatively modest oscillatory response of the flame, which becomes more pronounced in burst mode operation, at the same burst repetition rate of 10 Hz. This effect is most likely caused by the residual electric field after the discharge pulse, producing the electrohydrodynamic force on the charges generated during the discharge pulse is measured by ps E-FISH diagnostic. The results, plotted in Fig. 2, show that the electric field is maintained during the voltage tail. The time scale of the flame oscillations at the present conditions, of the order of ~10 ms, is limited by the relatively slow momentum transfer from the ions to the neutral species. The results demonstrate a significant potential of ps second harmonic generation diagnostics for non-intrusive measurements of the electric field in hydrocarbon flames flames forced by electric discharge plasmas, and in atmospheric pressure plasma jets.

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.


Fig. 1 Schematic of the counterflow burner, double dielectric barrier discharge electrode assembly, electric circuit, and the laser beam.



Fig. 2 Time-dependent Laplacian field (curves) and measured time-resolved electric field (symbols), in a ns pulse discharge with a ms duration tail. A schematic of the discharge pulse train is also shown.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- Y. Tang, M. Simeni, Simeni, K. Frederickson, Q. Yao, and I. V. Adamovich: Counterflow Diffusion Flame Oscillations Induced by Ns Pulse Electric Discharge Waveforms, *Combustion and Flame*, Vol. 206, (2019), pp. 239-248.
- [2] K. Orr, Y. Tang, M. Simeni Simeni, D. van den Bekerom, and I. V. Adamovich: Measurements of Electric Field in an Atmospheric Pressure Helium Plasma Jet by the E-FISH Method, *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 29, (2020), 035019 (13 pages).
- International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [3] M. Simeni Simeni, Y. Tang, K. Orr, and I. V. Adamovich: Electric Field Distribution Measurements in Plasma-Enhanced Flames, *Proceedings of the 16th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2019), OS2-35, pp. 246-247.
- *[4] M. Simeni Simeni, Y. Tang, K. Orr, I. V. Adamovich, H. Takana, and <u>H. Nishiyama</u>: Electric Field Measurements in Atmospheric Pressure Discharges by Electric Field Induced Second Harmonic (E-FISH) Generation, *Proceeding of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2019), CRF-22, pp. 44-45.
- [5] I. V. Adamovich, E. Jans, K. Frederickson, I. Gulko: Slevtive Generation of Metastable Excited Species in Hybrid Plasma for Plasma Chemistry and Plasma Catalysis Applications, *Proceedings of the 16th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2019), OS5-5, pp. 342-345, (Invited lecture).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I053
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

ふく射熱遮断スプリンクラーの開発 Development of Thermal Barrier Sprinkler

江目 宏樹*†, 岡島 淳之介**†† 古川 琢磨***, 岡部 孝裕****, 守谷 修一** *山形大学理工学研究科, **東北大学流体科学研究所 ***八戸工業高等専門学校産業システム工学科, ****弘前大学理工学部 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

本研究では、火災現場において火炎及び加熱壁面から放射され、延焼や火傷等の原因となっている熱ふく射を遮蔽するため、スプリンクラーから放出される水粒子と熱ふく射間の伝 熱現象を解析し、水粒子で構成されるふく射遮蔽層の最適化を行う.また、「ふく射伝熱」 と火炎旋風等の「対流熱伝達」の複合伝熱解析を行い、水粒子の散乱性媒体である遮蔽層の 存在状態を検証し、ふく射熱遮蔽スプリンクラーの設計指針の基盤構築を目指す.

2. 研究成果の内容

実際のミスト層の遮蔽性能を計測するため、本研究ではパワーメーターで黒体炉から放射 されるふく射強度の計測を行った. 噴霧開始前のふく射強度を初期値、噴霧中のふく射強度 を遮蔽値とし、遮蔽率を導出した. ふく射遮蔽率の噴霧粒径依存性, 流量依存性, 噴霧位置 の依存性について実験的に評価した.



3. 研究目標の達成状況

本研究では、火災現場において火炎及び加熱壁面から放射され、延焼や火傷等の原因となっている熱ふく射を遮蔽するため、ふく射熱遮蔽スプリンクラーの設計指針の基盤構築を目指し、水量の少ないミスト層のほうが、水量の多い水膜よりも、ふく射遮蔽性能が高いことを示した.

4. まとめと今後の課題

本研究は、これまで「どれだけの水量を炎に投入するか」という視点でのみ設計されてき た消防設備において、ふく射遮蔽のみを議論するならば、水量の少ないミスト層のほうが、 水量の多い水膜よりも、ふく射遮蔽性能が高いというパラダイムシフトを示した.この知見 は水が貴重な消防の現場において大いに有用なものである.本研究知見は、消防隊が使用す る管そう、可搬ブロアー、ブロアー車両、消防車両の自衛噴霧、延焼拡大防止用の水幕ホー スのほか、建築設備のドレンチャー(防火設備)などにも活用できる可能性がある.本研究 の社会実装のため、消防職員への聞き取り調査などを進めたところ、種々の消防設備の中で も特に消防車両の自衛噴霧に需要があった.調査の過程で現状の消防車両の自衛噴霧を観察 したが、噴霧粒径が大きく、広範囲に水をかけ車両を冷却するには有用かもしれないが、ふ く射遮蔽にはほとんど寄与しない水滴粒径であった.消火戦略においても、対象(消防車両) が熱くなってから冷やすのか、熱くならないように熱(ふく射)を遮るのか、議論があるだ ろうが、水量が少なくて済む後者のほうが有用ではないかと考える.以上から、今後は本研 究知見を消防車両の自衛噴霧に応用することを検討し、噴霧による「水の節約」と「ふく射 遮蔽」を同時に達成する技術の確立を目指す.その後、救出のための突入時に使用可能な可 搬自衛噴霧装置や消火ホースなど、消防職員の命を守る技術の確立に繋げていきたい.

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] <u>H. Gonome, T. Nagao, T. Kogawa</u>, S. Moriya, and J. Okajima: Effect of Droplet Diameter on Thermal Barrier Performance against Thermal Radiation from Fire, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-23, pp. 46-47.
- [2] <u>江目宏樹</u>:ふく射伝熱の基礎と応用研究,消防大学校学友会山形県支部総会・研修会,米沢, (2019).

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)

山形新聞, ふく射熱 水で遮断, 2019.4.11.

朝日新聞, 火災現場で放射熱遮れ 山大助教が研究中, 2019.4.17.

ウェブマガジンひととひと、ナノレベルで「ふく射熱」を制御 火災現場の減災目指し共同 研究, 2020.2.15, https://www.yamagata-u.ac.jp/jp/hitotohito/research/20200215/

Project code	J19I055
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

Clarification of the Transition Mechanism of Cavitation Instabilities

Donghyuk Kang*†, Iga Yuka**†† * Department of Mechanical Engineering, Saitama University **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Cavitation instabilities in the inducer were classified into three types by their behavior. On the other hand, in centrifugal pumps, the head drops quickly when cavitation occurs, so it is operated rarely under some large cavitation with unsteadiness occurring. Therefore, there is very little research on cavitation instability phenomena in centrifugal pumps. Therefore, to predict the behavior of unsteady and asymmetric cavitation in centrifugal pumps, the characteristics of it are needed to investigate. The objective of this study is to clarify the characteristics of unsteady cavitation in centrifugal pump for visualization by experiment. The centrifugal pump for visualization allows observing the behaviors of cavitations in each blade at once from the axial direction. The unsteady and asymmetric behavior was evaluated from the images with the coordinate transformation.

2. Details of program implement

Low specific speed centrifugal pump of 180 [min-1, m3/min, m] with two-dimensional closed three blades was adopted as the objective pump. This pump allows to observe flow field from axial direction through the transparent window. The pump's front view and cross-section are shown in Fig. 1. The pump has an inlet volute casing and inlet guide vanes. The impeller and inlet flow passage were separated by a transparent wall, which enables us to see the blade directly from the axial direction. Cavitation behavior was visualized by the high-speed camera, Photron FASTCAM Mini AX with the recording frequency of 3600 fps. The images recorded at the stationary system with the time interval of 1/3600ms were transformed into the rotational system. By this treatment, the position of blades was fixed in all images, then synchronizing and synchronizing components can be separately evaluated from the series of the image.



Figure 1 : Schematic of the experimental apparatus.

3. Achievements

The processed photographs from the high-speed camera image were arranged as shown in Fig. 2. They were taken at $\phi = 0.055$ and approximately $\sigma = 0.06$. One rotation was divided into six images and arranged in the row direction. The images of the next rotation were located just below. Hence, the rotational angle of the impeller is the same in each column. To evaluate the unsteady behavior of cavitation, the maximum length of cavitation on the suction side was focused. First, in the first row, it was considered that each blade was at the top, that is, at the same position because the cavitation of blade 1 at $1/3\pi$, blade 2 at $3/3\pi$ and blade 3 at $5/3\pi$ were large. Then, the variation of the cavity volume in the row direction at each blade at the top was focused. In circled photographs, the cavitation length on the suction side of each blade is the maximum. The pink, blue and green circles correspond to blade 1, blade 2, and blade 3. The colored circle did not appear at the same row, therefore, it is speculated that the unsteady behavior was not symmetric. Therefore, it was shown in this figure that the cavitation surge did not occur. On the other hand, the colored circle appeared in diagonal directions with the order of red, blue and green in every 6 - 8 photos. It is implied that cavitation with asymmetric unsteady behavior occurred and the asynchronous rotating cavitation may have occurred.



Figure 2: Photographs of cavitation from the high-speed camera ($\phi =$ 0.055, $\sigma =$ 0.06).

4. Summaries and future plans

The cavitation with asymmetric unsteady behavior in the centrifugal pump was observed by rotating and arranging photos of the high-speed camera so that the blades were in the same positions.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] <u>D. Kang</u>, D. Nakai and Y. Iga: Thermodynamic Effect of Tip-Leakage-Vortex Cavitation on Two-dimensional Hydrofoils with Tip Clearance for Hot Water, *Int. Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 12, No. 4 (2019), pp. 368-379.
- [2] P. Hu, J. Okajima, <u>D. Kang</u>, M. Nohmi and Y. Iga: Experimental and Numerical Studies for Unsteady Cavitation in a Centrifugal Pump for Visualization, 15th Asian International Conference on Fluid Machinery (AICFM15), Busan, Korea (2019), P00164.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [3] S. Tsuchiyama, J. Okajima, <u>D. Kang</u>, M. Nohmi and Y. Iga: Experimental Investigation of Unsteady Characteristics of Centrifugal Pump, *Proceeding of the* 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019), Sendai, Miyagi (2019), OS18-33, pp. 750-751.
- *[4] <u>D. Kang</u>, P. Fu and Y. Iga: Clarification of the Transient Mechanism of Cavitation Instabilities, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information(AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-24, pp. 48-49.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I056
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

ソニックブーム波形の立ち上がり時間に及ぼす乱流干渉の影響 Effects of the Turbulence Interaction on the Rise Time of a Sonic Boom Pressure Signature

鵜飼 孝博*†,大谷 清伸**††
中川 穂南*,焼野 藍子**
*大阪工業大学工学部,**東北大学流体科学研究所
†申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

過去に申請者は、低ソニックブーム波形である「立ち上がり時間の長い圧力波形」が乱流 効果を受けづらいと示唆する研究成果を挙げた(APPL ACOUST 114, pp.179-190, 2016). しかし、立ち上がり時間の長さが乱流効果を受けにくいことを断定するためには、さらなる 調査が求められる.そこで、「立ち上がり時間の長い圧力波形」と一般的なブーム波形は、 時間スケールが異なることから、乱流場の時間/長さスケールに着目し、本研究では、圧力波 形の時間スケールと乱流場の長さ/時間スケールの関係を明らかにする.

2. 研究成果の内容



流体科学研究所の1段式火薬銃を用いて「立ち上がり時間の長い圧力波形」と乱流干渉実 験を実施し、実験基盤の構築を行った.立ち上がり時間の長い圧力波形が発生できる円錐型 の模型を、マッハ数1.6で3回射出し、2カ所に設置した圧力変換器を用いて、乱流干渉あ り/なしの圧力波形を同時に計測した(飛行方向に対して上・下流側で圧力計測).上流側に 設置した圧力変換器によって、乱流干渉した圧力波形が計測できるセットアップである.ま た、高速度ビデオ撮影を行い、飛行体の飛行姿勢も計測した.本実験では、従来の実験より も衝撃波の伝播距離を長くしたことで、装置から発生する擾乱波が飛行体の圧力波形に影響 を及ぼした.そこで、飛行速度を速くすることで、擾乱波の影響を受けないことを確認した. 圧力波形計測の結果、乱流を干渉させた場合(図1(a))、2カ所で計測した「立ち上がり時 間の長い圧力波形」の最大過剰圧に圧力差が現れた.一方、乱流干渉がない場合でも、圧力 差は小さいものの最大過剰圧に差が現れた(図1(b)).原理的に乱流干渉がない場合、2カ 所で計測した圧力波形は一致する.そのため、この最大過剰圧の差が乱流干渉による影響で あるか判断できなかった.この最大過剰圧の差が発生した原因は、衝撃波伝搬距離の違いが 考えられる.そこで、数値解析を実施した結果、衝撃波伝搬距離が15 mm 違っていても、 最大過剰圧に本実験と同様な差が現れないことが確認できた.そのため、本セットアップで は、伝搬距離の違いにより最大過剰圧が変化しないことが分かった.一方、射出された飛行 体は、水平に飛行しなかったため、飛行中に姿勢が変化し、最大過剰圧に差が生じたと推測 される.

3. 研究目標の達成状況

本研究では、圧力波形の時間スケールと乱流場の長さ/時間スケールの関係の解明を目指し、 本年度は、流体科学研究所の弾道飛行試験を使って、擾乱のない圧力波形の計測方法の確認 および2カ所の圧力計測位置で同じ圧力波形が計測できる条件を検討した.その結果、飛行 体の飛行速度を速くすることで、「立ち上がり時間の長い圧力波形」が擾乱波の影響を受け ないことを確認した.また、飛行距離を伸ばして、飛行姿勢が安定した場所で圧力波形計測 を実施すべきことが分かった.このように、弾道飛行装置を用いた乱流干渉実験は、実験条 件の調整が非常に重要である.本年度の結果により問題点・対策が明らかとなり、来年度の 試験に向けて実験基盤が整った.

4. まとめと今後の課題

長さ/時間スケールの異なる乱流場を圧力波形に干渉させ、「立ち上がり時間の長い圧力波 形」への影響を評価するため、少ない模型射出回数であっても統計データが得られるように、 圧力計測箇所を増設する.また、乱流干渉による影響が明確に評価できるように、乱流場の 乱れ強さを強くする必要がある.

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)

- [1] <u>T. Ukai, K. Kontis</u>: Thermal fluctuation characteristics around a nanosecond pulsed dielectric barrier discharge plasma actuator using a frequency analysis based on Schlieren images, *Energies*, Vol. 13, No. 3, (2020), 628.
- [2] <u>G. Li, T. Ukai, K. Kontis</u>: Characterization of a Novel Open-Ended Shock Tube Facility Based on Detonation Transmission Tubing, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 94, (2019), 105388.
- [3] <u>M. M. Wojewodka, C. White, T. Ukai, A. Russell, K. Kontis</u>: Pressure dependency on a nanosecond pulsed dielectric barrier discharge plasma actuator, *Phys. Plasmas*, Vol. 26, No. 6, (2019), 063512.

2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等

- [4] 小林将大, <u>鵜飼孝博</u>: インジェクターノズルを用いた超音速衝突噴流の制御, 2019 年度衝撃波シンポジウム, (2020).
- *[5] <u>T. Ukai, H. Nakagawa</u>, K. Ohtani, A. Yakeno : An effect of pressure rise time on shock-turbulence interaction, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-81, pp. 172-173.
- [6] <u>鵜飼孝博</u>,大谷清伸,<u>丹野英幸</u>,<u>小室智幸</u>,<u>牧野好和</u>,<u>中右介</u>:開放空間型1段式ガス銃 を用いた超音速飛行体の近傍場圧力計測システムの構築,第51回流体力学講演会/第37 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム,(2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

課題番号	J19I057
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	3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、前年度に発現に成功した自転と公転を伴う新規の光マイクロモータ回転動作 (周転円運動モード)をさらに発展させ、自転と回転が同じ向きの周転円運動モードの実現 に成功した(図1).これを実現するために、2つのレーザー光線を光マイクロモータの異な る部位に集光する手法(ツインレーザー法)を考案した(図2).2つのレーザー光がマイク ロモータに及ぼす放射圧の作用により、従来よりも制御性を向上できる可能性が示された. CFD 解析結果(図3)に示すように、マイクロ流路内での混合において、通常の回転に比べ て格段に高い攪拌性能が得られることが予想されている.このほか、マイクロモータ周囲の 温度場、濃度場の可視化のための位相シフト干渉計システムの組立と性能確認も実施できた.



図1:周転円運動モード(自転と公転が同じ向き)の光マイクロモータ



図3:マイクロ流路内の二液混合における光マイクロモータの攪拌性能解析

3. 研究目標の達成状況

流体科学の観点で光マイクロモータの駆動原理と性能を明らかし、新たな手法により、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.

4. まとめと今後の課題

得られた成果を国際ジャーナルに早急に投稿・公表する.加えて、本研究をさらに発展させ、医療・バイオ分野等においてマイクロ流体制御デバイスとしての活用方法を開発する.

- 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>Noboru Yamada, Vuong Van Thai</u>, Hiroki Sato, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya: Experiment of Light-driven Micromotor with Epicyclic Motion, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2019)*, Sendai, (2019), CRF-25, pp. 50-51.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I059
区分	一般共同研究
課題分野	基礎流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

表面修飾ナノ粒子サスペンションのナノスケール界面現象に関する研究 A Study on Nano-Scale Interfacial Phenomena of Surface-Modified Nanoparticle Suspensions

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

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

2.1 ナノ粒子サスペンションの濡れ挙動の CFD-DEM 連成シミュレーション

Al₂O₃ 基板上に滴下したデカン酸およびオレ イン酸修飾 Al₂O₃ナノ粒子(粒径:25 nm)を含 む円筒形トルエンサスペンション液滴(初期半 径:125 nm)の拡張現象に関して,ナノ粒子/ 溶媒間接触角の影響を検討した.本条件に限る が,拡張現象はナノ粒子の分散・凝集挙動にほ とんど影響を受けないこと,ナノ粒子が存在す ると平衡時の液滴の拡張長さは短くなること が示された.

2.2 位相シフトエリプソメータを用いたミクロ動的 濡れの可視化計測

20 cSt ポリジメチルシロキサン (PDMS) 液 滴,および PDMS に PDMS 修飾 SiO₂ナノ粒子 (1 wt%)を混合したサスペンション液滴を Si 基板上に滴下し,三相接触線近傍の膜厚分布お よび動的接触角の測定を行った.結果として, 図1のように,粒子の有無にかかわらず先行薄 膜(マクロな接触線前方に存在する数 nm 厚の 液膜)長さはキャピラリー数 ($Ca = \mu u/\sigma, u$:接 触線移動速度, μ :粘度, σ :表面張力)で整理でき ることが示された.



図2 付着仕事に及ぼす修飾率の影響

2.3 MD シミュレーションによる表面修飾無機固体平面/溶媒界面の付着仕事の算出

MD シミュレーションと Phantom-wall 法を併用し、デカン酸修飾 Al₂O₃ 平面/ヘキサン間 の付着仕事に及ぼすデカン酸修飾率の影響を検討した.結果として、図2に示すように、デ カン酸層へ侵入したヘキサン分子の空間構造に起因して、付着仕事が修飾率に対して最大値 を取ることが示された.

3. 研究目標の達成状況

研究成果に示す通り、表面修飾ナノ粒子サスペンション液滴の濡れ挙動の理論的、実験的 評価技術、さらには分子シミュレーションによる表面修飾ナノ粒子/溶媒界面間の親和性評 価技術を確立することができ、当初の目標をほぼ達成できたと判断する.

4. まとめと今後の課題

超臨界水熱法により合成した表面修飾ナノ粒子を含むサスペンションを対象として、本研 究により確立した評価技術を利用し、(ナノ粒子/溶媒間親和性)- (サスペンション中の ナノ粒子の構造)- (サスペンションのミクロ動的濡れ特性)の相関を明らかにする.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] <u>S. Usune, T. Takahashi, M. Kubo, E. Shoji, T. Tsukada, O. Koike, R. Tatsumi, M. Fujita, T. Adschiri</u>: Numerical simulation of structure formation of surface-modified nanoparticles during solvent evaporation, *J. Chem. Eng. Jpn.*, Vol. 52, No. 8, (2019), pp. 680-693.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[2] <u>E. Shoji, M. Kubo, T. Tsukada,</u> A. Komiya, G. Kikugawa: A study on nano-scale interfacial phenomena of surface-modified nanoparticle suspensions, *Proc. of the 19th Int. Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-82, pp. 174-175.
 - [3] <u>E. Shoji</u>, <u>T. Yonemura</u>, <u>T. Kaneko</u>, <u>M. Kubo</u>, <u>T. Tsukada</u>, A. Komiya: Investigation of the effect of nanoparticles on microscopic wetting behavior of a nanoparticle suspension droplet on a substrate using phase-shifting ellipsometer, *18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress*, Sapporo, (2019).
 - [4] <u>庄司衛太</u>: 位相シフト技術を導入した新規光学計測手法の開発 熱物質輸送現象のマルチ スケール計測-, 第21回先端研究発表会・講演会, 仙台, (2019).
 - [5] 豊田慎一郎, 薄根真, 久保正樹, 庄司衛太, 塚田隆夫, 小池修, 辰巳怜, 藤田昌大, 阿尻雅 文: せん断流中における表面修飾ナノ粒子含有ナノフルイドのレオロジー特性の数値解析, 化学工学会横浜大会, 横浜, (2019).
 - [6] <u>T. Kaneko, T. Yonemura, E. Shoji, M. Kubo, T. Tsukada</u>, A. Komiya: Investigation of microscopic wetting behavior of PDMS suspensions with surface-modified nanoparticles using a phase-shifting ellipsometer, 2019 年度化学系学協会東北大会,山形, (2019).
 - [7] <u>久保正樹,豊田慎一郎,薄根真,庄司衛太,塚田隆夫,小池修,辰巳怜,藤田昌大,阿尻雅</u> <u>文</u>:表面修飾ナノ粒子含有ナノフルイドのレオロジー特性と分散・凝集状態との相関,日本 マイクログラビティ応用学会第 31 回学術講演会,仙台,(2019).
- [8] 庄司衛太,米村建哉,金子峻大,久保正樹,塚田隆夫,小宮敦樹:位相シフトエリプソメー タを用いた固体基板上における懸濁液の微視的濡れ挙動の計測,日本マイクログラビティ応 用学会第31回学術講演会,仙台,(2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19I060
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

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

Shinkyu Jeong*†, Hiroki Nagai**†† *Mechanical of Engineering, Kyunghee 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 exploration aircraft. In the second year of the project, the multi-objective optimization of the propeller airfoil shape was performed to improve the efficiency of the Mars aircraft propulsion system.

2. Details of program implement

Optimization of the propeller airfoil shape was conducted to improve the efficiency of the propeller at high subsonic, low Reynolds number flow, which is the typical flow condition of the Mars aircraft propeller. To design an optimum airfoil, multi-objective genetic algorithm was used. Kriging model was constructed from the results of compressible RANS based CFD for reducing the computational cost of performance evaluation. For the validation of the optimized airfoil data, aerodynamic data were obtained from Mars wind tunnel in Tohoku University.

3. Achievements

Figure 1 shows the geometry of optimum and reference airfoils. As shown in Table 1, all objectives of optimum airfoil were improved than those of the reference airfoils. Therefore, the design of the propeller of Mars aircraft using the optimum airfoil can have better performance than using the reference airfoils. Figure 2 shows the result of the wind tunnel test conducted to obtain an aerodynamic database of optimum airfoil for designing propeller. The test was carried out at Reynolds number of 10,000 to 14,000 at a Mach number 0.7 and Reynolds number of 8,000~20,000 at a Mach number 0.55.



Figure 1 : Geometry of optimum airfoil(OPT) and the reference airfoils

	Max L/D	$C_d @Max L/D$	stdev($dC_l/d\alpha$)
OPT	12.837588	0.049225	0.013322
Main Wing	10.413744	0.057041	0.025945
ARA-D 6%	8.638512	0.070106	0.034714

Table 1 : Objectives of optimum airfoil(OPT) and the reference airfoils



Figure 2 : Aerodynamic database of optimum airfoil obtained from the wind tunnel test

4. Summaries and future plans

In the second year of the project, multi-objective optimization of the propeller airfoil was conducted to improve the efficiency of Mars exploration aircraft propulsion system. Multi-objective genetic algorithm was used to optimize the propeller airfoil. Compressible RANS based CFD and Kriging model were used to evaluate the objectives and reduce the computational time in optimization. Optimum airfoil has better performance than the reference airfoils. For designing the propeller, the aerodynamic database of optimum airfoil was acquired from the wind tunnel test. In the future, propeller will be designed using the aerodynamic database of optimum airfoil obtained through the wind tunnel test.

- 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>K. Park, S. Jeong</u> and H. Nagai: Optimization of Airfoil for Mars Exploration Aircraft Propeller, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-57, pp. 114-115.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I061
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	3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 †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

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、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 Cu-DLC の 成膜時基板温度および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.



図1:CCTを用いた RF-MS 法で異なる温度の基板上に成膜した Cu-DLC の抵抗率(大気中 303K)

各 Cu含有量において Cu-DLC の成膜時基板温度を 323~423K の範囲で変化させた場合, 成膜時基板温度と抵抗率の間に有意な差は認められなかった.一方,成膜時基板温度の増加 に伴い, Cu 含有量が低いほど硬さが低下する傾向が認められたため,成膜時基板温度変化 によって DLC マトリクス構造が変化していることを示唆している.しかし, Cu-DLC の抵 抗率は成膜時基板温度に依存せず, Cu 濃度による変化が大きかった.従って, Me-DLC の 比抵抗は膜中 Me のナノレベルの形態に依存する要素が大きいと考えられる.

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 成 膜条件とナノ構造の影響の一端を明らかにした.

4. まとめと今後の課題

本研究で、異なる温度条件下で成膜した Me-DLC のナノ構造と電気抵抗率の関係を調査 した.その結果、成膜時基板温度が 323~423K の範囲において、DLC マトリクスの構造変 化よりも膜中 Me の形態に依存することが分かった.引き続き Me-DLC 中の Me ナノ構造 と抵抗率の温度依存性を明らかにすることおよび、膜の付着強度を向上させる効果的な絶縁 性中間膜の探索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)
- *[1] <u>M. Goto</u> and <u>M. Maruyama</u>: Quantitative Investigation of Wear Properties of Soft-Metal/dlc Nanocomposite by Transmission Electron Microscopy, *Proceedings of BALTTRIB*'2019, Lithuania, (2019), pp. 237-242.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] <u>Minoru Goto</u> and <u>Masataka Maruyama</u>: Correlation between the characteristic behavior of soft-metallic nano-crystals in the soft-metal/DLC nanocomposite coatings and the tribological properties, *Proc. ICMDT 2019*, Kagoshima, (2019), USB.
- [3] <u>山田裕貴</u>, <u>後藤実</u>: Cu/DLC ナノコンポジット膜の成膜基板温度による構造変化と摩擦・摩 耗特性および電気抵抗の関係, 関西潤滑懇談会7月例会ポスター発表会, 京都大学, (2019).
- [4] <u>Minoru Goto, Masataka Maruyama</u>, Hiroyuki Kosukegawa, Hiroyuki Miki: Quantitative Evaluation on Wear Properties of copper/DLC Nanocomposite Coatings by Transmission Electron Microscopy, *Proc. ITC2019 Sendai*, (2019), 17-B9, USB.
- *[5] <u>Minoru Goto</u>, Toshiyuki Takagi, <u>Kosuke Ito</u>, Hiroyuki Miki, Hiroyuki Kosukegawa: Study on the function of Me-DLC nano-composite coatings acting as thermo-sensor in the sliding interface, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-26, pp. 52-53.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19I062
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

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 **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 FY year's project, NDE experimental signals were measured for test-pieces of different residual plastic deformations after fatigue testing of different circles for RAFM steel. Four samples of RAFM steel were firstly fabricated and processed with proper heat treatment in order to realize a free strain state of the material. Then, different levels of residual plastic strains (0%, 0.6%, 1.8% and 4.8%) were applied to the specimens with a tensile material testing machine. After that, different cycles of fatigue damage (0, 100, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 cycles) with a loading stress range of 50 MPa to 500 MPa were applied to each sample respectively, and NDE experiments using an integrated measurement system of magnetic Barkhausen noise (MBN), magnetic incremental permeability (MIP) and magnetic flux leakage (MFL) were carried out during each loading gap, i.e., the test-pieces were measured after they were unloaded from the testing machine.

The typical NDE experimental results are shown in Fig.1, with (a) is the MBN results vs fatigue circles for different plastic strains, (b) the MIP results and (c) the measurement results of the MFL method. From the figures, one can find that the feature parameters of these three magnetic NDE methods all show a downward tendency with the increasing plastic deformation before fatigue damage is introduced, which is consistent with previous results of authors. In the case of the sample without any residual plastic deformation, the RMS of MBN method, imaginary peak value of MIP butterfly trajectory and K factor of MFL method drop dramatically as large as 100 times at a low cycle number. Then all the signals of the three NDE methods change relatively slowly with the increasing loading cyclic numbers. On the other hand, in the case for TPs with residual plastic deformation, despite the strain levels were different, tendency and change rates of these NDE signals were only limited influenced by the fatigue damages. In general, the influence of the fatigue damage on the NDE signals is far smaller than the influence of residual plastic deformation on the NDE signals in TPs with residual plastic deformation for the RAFM steel.



Figure 1: The experimental results of NDE signals at different loading cycles for RAFM TPs with different levels of residual plastic deformation (a) MBN, (b) MIP, (c) MFL

3. Achievements

In this year's project, the influence of fatigue damages on relationship between plastic deformations and NDE signals was studied experimentally for the RAFM steel. As conclusion, the results reveals that the fatigue damages have some impact on the TPs free of plastic strains at the very beginning while only have limited influence on TPs with relative large residual plastic deformation. Among the three magnetic MDE methods, the MFL method shows the best stability and repeatability for NDE of the plastic strains in structures of the RAFM steel even considering the fatigue damages.

4. Summaries and future plans

In the last two 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. In addition, it was also found that the influence of the fatigue damages on the NDE signals for the RAFM steel depends on the state of plastic strains in the material and the MFL method has the best stability and repeatability for NDE of the plastic strains in structures of the RAFM steel.

5. Research results (* reprint included)

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

- *[1] S. Xie, L. Zhang, Y. Zhao, X. Wang, Y. Kong, Q. Ma, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi: Features extraction and discussion in a novel frequency-band-selecting pulsed eddy current testing method for the detection of a certain depth range of defects, NDT&E International., Vol. 111, (2020), 102211 (12 pages).
- [2] Y. Du, S. Xie, X. Li, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi: *IEEE Access*, Vol. 7, (2019), pp. 152278-152288.
- [3] P. Li, S. Xie, K. Wang, Y. Zhao, L. Zhang, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi: NDT&E Internatinal., Vol. 107, (2019), 102154 (10 pages).
- [4] X. Li, L. Xue, Z. Chen, Y. Pan, T. Uchimoto, T. Takagi: Fusion Engineering and Design, Vol. 156, (2020), 111612 (6 pages).
- [5] Z. Tong, S. Xie, H. Liu, C. Pei, Y. Li, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi: Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 142, (2020), 106781 (14 pages).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- *[6] <u>Z. Chen, M. He, H.-E. Chen, S. Xie</u>, T. Uchimoto, T. Takagi: Influence of Fatigue Damage on NDE of Plastic Strain in RAFM Steel using Electromagnetic NDE Methods, *Proceedings of 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-27, pp. 54-55.
- [7] <u>Z. Chen, C. Pei</u>, T. Uchimoto, T. Takagi: Some Researches on UT and Laser Thermography for NDT Tokamak Plasma-Facing Components, *Proceedings of 16th Conference of Japan Society of Maintenology*, Morioka, (2019), pp. 115-116.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I063
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

Numerical Study on Gas Lubrication System Using Micro/Nanoscale Dimples

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

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

To consider dimples of an arbitrary shape in DSMC simulations, it is beneficial that the solid body surfaces are reproduced by the assemblies of triangular panels. When a molecule is transferred, it is necessary to determine whether the molecule collides with triangular panels on the body surfaces and, if so, it is necessary to determine which panel it collides with. In searching for the point of intersection of the molecule trajectory with the surface panels, it may also happen that the molecule falls onto the rib separating the panels. In such situations, the molecule may penetrate through the surface in numerical simulation because of the machine accuracy of number presentation. Since the probability of such through flight is very small and the error due to that is much smaller than the statistical error of the DSMC simulation, it is not a big problem in usual scene where DSMC simulation is performed, such as a flow around a solid body. But, in the case of a flow in extremely thin lubricated region considered here, molecule experience huge number of molecule-wall collisions, and hence, such through flight becomes serious.

To avoid such through flights, we introduced unstructured tetrahedral cells shown in Fig.1 and proposed a new algorithm that tracks the motions of all molecules, always grasping which cell they are flying in. Then, we demonstrated this algorithm by performing DSMC simulations of gas flow in the lubricated system considered in this study. Figure 2 shows the pressure distribution obtained for the sliding surface with rectangular dimple shown in the upper diagram in Fig.2. It shows that the upper slider will receive the lift force. This algorithm is published in AIP conference proceedings.

On the other hand, so far, we have considered gas flow not only in the lubricated region between the sliding surfaces but also in the buffer region outside the lubricated region in order to correctly reproduce a flow field around the lubricated region. But, our simulation results show that in order to correctly reproduce the flow and pressure fields around the lubricated region, a wide and thick buffer region is required to be considered. Since the lubricated region is very thin, the volume of the thick and wide buffer region is much larger than that of the lubricated region. As a result, computational resource will be spent for non-essential calculation for a flow in the buffer region. Therefore, we need to develop other strategy instead of increasing the size of the buffer region.



Fig. 1 Tracking of molecular transfer.

Fig. 2 Pressure distributions.

3. Achievements

Due to the proposed algorithm, non-realistic leakage of molecules through solid wall will not occur any more. This algorithm is useful not only for the present problem but also for any DSMC simulation accompanied by molecular-wall collisions.

4. Summaries and future plans

The required new strategy is to develop an "implicit boundary condition" to the outer boundaries of the buffer region. Due to this treatment, we will be able to reproduce the proper number flux and the proper velocity distribution of incoming particles without increasing the size of the buffer region, i.e., without increase of computational domain. Thanks to this implementation, we will learn more about the side leakage of the gas and will investigate the collective function of dimples for high pressure generation.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal
- *[1] <u>P. Vashchenkov, A. Kashkovsky, Y. Bondar</u>, S. Yonemura and Y. Kawagoe: Using a Tetrahedral Mesh for Simulation of Internal Flows by the DSMC Method, *High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM 2019), AIP Conference Proceedings*, Vol. 2125, Novosibirsk, Russia, (2019), 030030.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- *[2] <u>Pavel_Vashchenkov</u>, <u>Yevgeniy_Bondar</u> and Shigeru Yonemura: Numerical Investigation of Rarefied Gas Flow in Microchannel by the DSMC, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-28, pp. 56-57.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project Code	J19I064
Classification	General collaborative research
Subject Area	Fundamentals
Research Period	April 2019 ~ March 2020
Project year	3rd 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 the project

In the study, a lot of researchers assume to be rigid wall in CFD (Computational Fluid Mechanics). However, few experimental approaches are carried out for the elastic wall model. Particularly, there were few experimental studies with respect to hemodynamics using cerebral aneurysm model with elastic wall. The effect of wall elasticity on wall shear stress, tension force and flow instability was examined for the comparison of elastic with rigid models in pulsatile blood flow wave *in vitro*. In the present study, the authors have tried the fabrication of elastic cerebral aneurysm model using special technology. And the authors are examined to measure flow behavior, i.e. wall shear stress, flow instability and tension.

2. Details of program implement

2.1 Model

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

2.2 Flow condition

The working fluid is aqueous Glycerol with potassium iodide solution. The physical properties are as follows: the density of $\rho = 1188 \text{ kg/m}^3$, the kinematic viscosity of $\mu = 4.24 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $\nu = 3.57 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ and the refractive index of n=1.411. The maximum, mean and minimum Reynolds numbers are 510, 310 and 255, respectively.

2.3 Measurement

 M_2 M_2 M_2 M_2 M_2 M_2 M_3 M_3

Fig.1 Phantom morphology

The velocity vector was measured by 2D PIV using 15Hz

Double Pulse Yag Laser Solo II with time interval of 20ns (New Wave Research, Co., USA), Image Intense CCD camera (1376×1040 pixels, Lavision, Göttingen, Germany) and Photron Fastcam SA3(Japan. Tokyo). The phantom model was immersed in enclosed bath with two ports at upper plate. 2. 4 Results and discussion

In elastic model as shown in Figure 2, the velocity contours are similar to those of non-deformable model. Also, the main flow through inlet vessel collides at the stagnation point and separates at left side point C of stagnation point.

As shown in Figure 3. WSS steeply increases from left to right side along distance S_x around the stagnation point 0. This steep variation indicates the negative and positive WSSGs, respectively, which mean the tensile effect around stagnation point. The arrow line denotes the direction of tensile effect. Actually, the maximum magnitude of tensile effect WSSG is +11.4 Pa/mm at Peak systole of t/T = 0.280.

In elastic wall of Fig.4(b), the asymptotical decrease of PSD indicates that unstable laminar flow is



Fig.2 Velocity contour in elastic model

reduced within aneurysm and the flow instability attenuates to smaller PSD. The current results have significantly emphasized that flow instability with respect to rigid model in past CFD articles might be resurveyed.

3. Achievements Achievement level: 80%

4. Summaries and future plans

The velocity vector in median plane inside the elastic and non-deformable aneurysms was measured in 2D PIV. From WSS along aneurysm wall estimated from velocity, in summary the elasticity of the aneurysm wall may attenuate the



Fig.4 Comparison of PSD in elastic with rigid

absolute temporally-and spatially-averaged WSS and WSSG influences on progress as tension force. Furthermore, elastic model attenuates flow instability. Future, when the velocity and the elongation of phantom are measured three-dimensionally, another phenomena and new insights will be found. These results will be published from Medical Engineering and Physics.

20

As next step, WSS, deformation and flow instability is planned to measure using the full 3D PIV, i.e. Tomographic PIV. Through this measurement, the deformable ratio, WSS, WSSG and flow instability will be fully clarified.

- Research results (* reprint included) 5.
- 1) Journal Not applicable.
- 2) International and domestic conference, meeting, oral presentation etc.
- [1] N. S. Shafii, R. Yamaguchi, A. Z. Md Khudzari, G. Tanaka, S. Tupin, A. Saitoh, M. Ohta: Patient specific images in the middle cerebral artery aneurysm simulation with turbulent model, 6th International Conference on Computational and Mathematical Biomedical Engineering (CMBE2019), (2019), pp. 635-638.
- *[2] G. Tanaka, N. S. Shafii, T. Yamazaki, S. Tupin, H. Anzai, K. Osman, R. Yamaguchi, M. Ohta: Flow Characteristics of Wall Elasticity in a Full-Scale Patient-Specific Middle Cerebral Aneurysm, Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019), Sendai, (2019), CFR-83, pp. 176-177.
- [3] R. Yamaguchi, N. Shaffi, K. Osman, G. Tanaka, M. Ohta: Flow behavior in elastic patient-specific cerebral aneurysm, Russia-Japan Workshop, Mathematical analysis of fracture phenomena for elastic structures and its applications, Novosibirsk, (2019).
- [4] R. Yamaguchi, S. Tupin, S. Hashuro, G. Tanaka, N. S. Shafii, M. Ohta: Flow Characteristics in Full-Scale Patient-Specific Middle Cerebral Aneurysm with Wall Elasticity (Preliminary Preparation), 2019 UTM-IFS First Workshop, (2019), pp. 13-15.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.
 - 116 -

Project code	J191065
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Unsteady Aerodynamics of Axially Oriented Low Fineness Ratio Cylinders

Colin P. Britcher*†, Shigeru Obayashi**†† Keisuke Asai***, Taku Nonomura*** *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Old Dominion University **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***Faculty of Engineering, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

To further explore the steady and unsteady aerodynamics of low fineness ratio axially-oriented circular cylinders.

2. Details of program implementation

Preliminary measurements were attempted in the NASA/ODU 6-inch MSBS using 3D printed cylinders, nominally 44.45mm in diameter with L/D=1. The magnetic core was a small NdFeBo permanent magnet, with a vertical magnetization axis. Immediately, it was discovered that the cylinders were aerodynamically unstable, such they tended to "tumble". Shifting the magnetic/mass center forward provided some measure of static stability, resulting in limit cycle oscillations.



Figure 1 – 6-inch MSBS (left) and typical cylinder model (right)

In a parallel effort, a much larger cylinder (nominally 152.4mm diameter) was strut-mounted in the ODU low-speed wind tunnel, permitting detail PIV measurements of the separation and reattachment regions. Angle of attack could be varied from 0° to 30° .

It is noted that prior measurements of drag of low fineness ratio cylinders have featured relatively large wall interference corrections (e.g. AIAA 2019-0072). Both test series mentioned here will be used to develop validation information for wall interference corrections, by means of tests with varying blockage ratios (MSBS) and full flow field measurements (ODU) as well as comparison to CFD.



Figure 2 – Summary of preliminary tumbling measurements; typical view to right



Figure 3 - PIV measurements of flow on the upper surface of a 1:1 L/D cylinder, 10 m/s $\,$

3. Achievements

Preliminary measurements were started in as originally proposed but were interrupted by the laboratory quarantines associated with the COVID-19 outbreak. CFD analysis was started as an alternative but results are not yet available. The discovery of self-excited tumbling behavior was noteworthy and will be studied further.

4. Summaries and future plans

As soon as a restart of experimental work is possible, PIV measurements will be completed on the large cylinder model and MSBS testing will resume with a small range of model diameters. This will permit exploration of wall interference corrections (in concert with CFD analysis) as well as more dynamic testing.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal
- Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [1] <u>C. P. Britcher, M. Schoenenberger, D. Cox</u>.: Demonstration of a Magnetic Suspension and Balance System with Transverse Magnetization, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, OS6-1, (2019), pp. 362-363.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I066
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2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

低環境負荷や省エネルギーに直結するエネルギー変換として、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、火炎の ダイナミクスにおけるスケールの影響や熱損失の効果を明らかにしてきた.しかし、圧力の 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ナヴィエ・ ストークス方程式に基づく数値計算を遂行し、熱損失を伴う水素 - 空気予混合火炎のダイナ ミクスに及ぼす圧力の効果を調べ、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分散関係(当量比:0.5)を示したものである. 圧 力が高くなると共に、擾乱の増幅率は大きくなる. これは、火炎が薄くなるからである. ま た、熱損失が大きくなると共に、増幅率は小さくなる. これは、火炎温度が低下し、火炎を 横切る熱膨張による密度差が小さく、また平面火炎の燃焼速度も減少するので不安定性に対 する熱膨張の効果が小さくなるからである.

図2は、高圧下(5 atm)におけるセル状火炎の温度分布を示したものである.大きいスケールでは、セルは合体と発達、及び分割を繰り返し、火炎は複雑な形状を呈する.これは、流体力学的効果及び拡散・熱的効果の影響をより受けやすくなることが要因である.また、熱損失が存在すると火炎形状は複雑化し、更に不安定になる.これは、熱損失によって、拡散・熱的効果がより強くなるためである.

3. 研究目標の達成状況

本研究では、熱損失を伴う水素/空気予混合火炎の数値計算を遂行し、火炎のダイナミクス に及ぼす圧力の効果を精査した.そして、水素の希薄予混合燃焼において、熱損失と共に圧 力が火炎面の不安定挙動に大きな影響を及ぼすことを示した.以上のことから、火炎のダイ ナミクスに及ぼす熱損失の効果に着目した本研究は、十分な成果を得ていると考えられる.

4. まとめと今後の課題

本年度は主に熱損失と圧力に着目し、火炎挙動に及ぼすそれらの影響を精査した.今後は、 化学種分布の影響を調べると共に、火炎のダイナミクスにおける本質的な役割を議論する. そして、熱損失を伴う予混合火炎の不安定性のメカニズムを明らかにする.



図2 断熱と非断熱の条件下におけるセル状火炎の温度分布(5気圧)

- 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>S. Kadowaki, T. Uchiyama, T. Katsumi</u>, and H. Kobayashi : The Scale Effects on the Dynamic Behavior of Hydrogen-Air Lean Premixed Flames under the Adiabatic and Non-Adiabatic Conditions, *Proceedings of the 12th Asia-Pacific Conference on Combustion*, Fukuoka, ASPACC2019-1014, (2019).
 - [2] <u>門脇敏・草野優太・勝身俊之</u>・小林秀昭:水素-空気希薄予混合火炎の固有不安定性に及ぼ す圧力の効果,第57回燃焼シンポジウム,A114,(2019).
- *[3] <u>S. Kadowaki, Y. Kusano, T. Katsumi</u>, H. Kobayashi : The Effects of Heat Loss on the Dynamics of Hydrogen-Air Premixed Flames, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CEF-29, pp. 58-59.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I070
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

ナノ構造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 Nanostructures

高橋 庸夫*†,寒川 誠二**†† 有田 正志*,大野 武雄***,福地 厚*,遠藤 和彦**,李 遠霖*,瘧師 貴幸* *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) や半導体を用いない拡張性の高い単電子効果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新らたな動作原理デバイスの実現を目指す.

2. 研究成果の内容

昨年度からの継続課題の流体研の独自技術である 中性酸素ビームによる損傷のない極薄絶縁体を用い た Cu/TaO_x/Pt ReRAM の評価を継続した. 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、動作メカニズムを解明に向け、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した.極薄の絶縁膜を作製すると, 基板 Si も薄層化され高抵抗化するため、電流を下層 金属電極を通って横に抜く構造(図1(a))を作成し、 TEM 中での低抵抗変化の観察を行った.図1(b)は、高 抵抗化と低抵抗化のスイッチさ繰り返した結果を示 し、TEM 内で安定に動作できることが確認できた.本 サンプルはCu/MoOx/Pt 構造であるが、TEM 中で像の観 察と抵抗変化の同時観察が安定にできることを示し たものである.



これに加えて、前から流体研と共同で検討を進めているメタルナノドットアレイによる単 電子デバイスの検討を進めた. 微細ギャップを有する電極構造を工夫し一様に近い Fe ナノ ドットを配置することで、単一ドットに起因する単電子トランジスタ(SET)の特性が得ら れることを初めて示した. 図2(a)はソース・ドレイン電極間に MgF2 で覆われた Fe ナノド

ットアレイを取り付けた構造の走査電子顕微鏡像で ある.ナノドット数は数百~数千個あるにも拘らず図 2(b)のような,基板ゲート電圧に対する電流振動が観 察された。図の実線は、単一ドットを仮定した電流振 動の計算値であり、測定値とよく一致しており、単一 ドットに起因する特性が得られていることがわかる. 同様な特性が高確率で得られており、近接ドットが電 極的に働く効果が考えられ、新たな応用が期待できる ことがわかった.

3. 研究目標の達成状況

東北大の低損傷の中性粒子ビームにより作製した ナノ構造 ReRAM の電子顕微鏡内での特性評価を可 能にするための測定技術を開拓し、その手法の有効性 を確認することに成功した.また、金属ナノドットア レイによる単電子効果を明瞭に観測することに初め て成功した.新規機能性ナノデバイスによる機能発現 の原理の究明を大きく進展させるとともに、究極の目 標である極低消費電力ニューラルネットワーク応用 を進捗させた.



4. まとめと今後の課題

Mooreの法則の終焉を打破する,新たなニューラルネット素子実現に向けて具体的なデバイス作製と評価を進め,寒川研究室や九工大の森江研究室と共同して研究を進めていく.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- Y. Takahashi, M. Sinohara, M. Arita, A. T.-Fukuchi, A. Fujiwara, Y. Ono, K. Nishiguchi, and <u>H. Inokawa</u> (invited): Si Single-Electron Transistor Characteristics under Photo-Excitation, 236th ECS Meeting, Atlanta, USA, # G03-1198, (2019).
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- *[2] <u>T. Gyakushi, Y. Asai, A. T.-Fukuchi, M. Arita, Y. Takahashi</u> and S. Samukawa: Double-gate single-electron transistor formed by Fe nanodot array, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fuluid Information*, Sendai, (2019), CRF-30, pp. 60-61.
- *[3] <u>Y. Li</u>, <u>A. T.-Fukuchi</u>, <u>M. Arita</u>, <u>T. Morie</u>, <u>and Y. Takahashi</u>: Switching Current of Ta₂O₅-Based Resistive Analog Memories, *Abstracts of 2019 Silicon Nanoelectronics Workshop*, Kyoto, Japan, (2019), 4-3, pp. 23-24.
- [4] M. Arita, R. Ishikawa, K. Arima, A. T.-Fukuchi, Y. Takahashi, M. Kudo, and S. Matsumura: Failure and recovery of double-layer CBRAM studied by in-situ TEM, 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials, Nagoya, Japan, PS-2-16, (2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I071
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	3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*†, 小林 理輝*, 中川 健一**, 永井 大樹***†† *宇都宮大学大学院工学研究科, **宇都宮大学工学部, ***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

シャトルは飛翔時において、安定飛翔時に長軸周りに回転をするスピン回転の挙動を行う. しかし、スピン回転がシャトルの空力特性にどのように影響を及ぼしているのかは解明され ているとは言い難い.そこで、検定風洞にて、モータによって強制回転を与えた場合の挙動 についてスピン回転の影響を調べる.強制回転時のシャトル周りおよび後流の流れ場の可視 化で流れ場評価を行う.また、シャトル迎角変化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.

2. 研究成果の内容

シャトルに強制回転を与えた場合の挙動に関して,回転数及び回転方向の流体力への影響 を調べるために,流体力測定及び流れ場の可視化を行った.

本研究ではシャトルのスピン回転 Nが空力特性に及ぼす影響を明らかにするために、シャトルを強制的にスピン回転させることにより、回転数および回転方向を変化させた状態のシャトルの空力特性について、風洞試験により流体力測定および可視化実験を行った.

迎角 $\alpha = 0^{\circ}$ のシャトルの各回転数における抗力係数 G_{o} を図 1 に示す. 横軸はこの風速 ($Re=4.4 \times 10^{4}$)における,シャトルのオートローテーション回転数 N_{AR} に対しての回転数の 比($RR=N/N_{AR}$)である. 回転数の増加にともない,抗力係数は増加している. 特に逆回転 方向に回転させている場合において,回転数増加による抗力の増加傾向が顕著に見られた.



図1:各回転数におけるシャトルの抗力係数 (a=0°, Re=4.4×104)

迎角 $\alpha = 0^{\circ}$ 時の各回転数におけるシャトル後流の流れ場を図2に示す.順回転および無回転時と比較すると、逆回転時においてシャトルスカート後端からはく離する流れが大きく巻き上がっている(図2(c)〇印). これはシャトルの隣同士の羽根が角度を付けて交互に重なり合うように配置されており、逆回転では流れが羽根に沿って流れて、外周方向にはく離するためであると考えられる.一方、順回転では流れが羽根と羽根の間の重なっている部分の間に入り込むことで、流れが巻き上がらない.



(a) RR = 0 (N = 0 rpm) (b) RR = 3.0 (N = 1500 rpm) (c) RR = -3.0 (N = -1500 rpm)

3. 研究目標の達成状況

シャトルに強制回転を与えた場合の挙動に関して、回転数及び回転方向の違いによって流体力に影響を及ぼしていることを解明したことに関して、研究目標は概ね達成した. 迎角付 与時の力評価に関しては、再度実験が必要となった.

4. まとめと今後の課題

シャトルの強制回転時について、シャトル回転数及び回転方向が抗力に影響を及ぼすこと が分かった.逆回転時には、シャトル周りの流れが外周方向へはく離することで大きな抵抗 が生まれる.今後は迎角を付与した際の流体力を評価し、シャトルの迎角に応じて揚力及び 抗力が変化する理由を明らかにする.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- M. Kobayashi, H. Hasegawa, K. Nakagawa and N. Kato: Evaluation of Aerodynamic Characteristic of a Badminton Shuttlecock Using Open FORM, Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology, (2019).

2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等

- *[2] <u>M. Kobayashi, K. Nakagawa, H. Hasegawa</u> and H. Nagai: Aerodynamics of a Badminton Shuttlecock with Spin, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-86, pp. 178-179.
- [3] 小林理輝,加藤直人,長谷川裕晃,永井大樹: OpenFOAM によるバドミントンシャトルコ ックの高減速特性の解明,第51回流体力学講演会,(2019).
- [4] 小林理輝,長谷川裕晃,永井大樹:バドミントンシャトルコックの隙間開口率が空力に及ぼ す影響,第57回飛行機シンポジウム,(2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

図2:シャトル後流の流れ場 (a=0°, Re=4.4×104)

課題番号	J19I072
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

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

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

1. 研究目的

自動車内燃機関におけるノッキング現象は、エンジン筒内の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熱効率向上の大きな障壁であ る.本研究では、詳細反応機構を考慮した圧縮性流体解析技術を適用することで、未だ不明 瞭なノッキング現象の詳細な理解を目指す.特にノッキング現象に対する燃料反応特性の影 響を明らかにすることを目的とした.

2. 研究成果の内容

本研究では、n-butane, n-heptane, i-octane, そして DME の四種類の燃料を用いて解析を行った.得られたノッキング強度およびノッキング時間の比較を図1に示す.ノッキング強度は末端ガス自着火により発生した圧力波の強度を表す指標である.ノッキング強度の結果から、負の温度係数(NTC)領域を有する n-heptane と DME では、初期温度 650 K 付近に大きなピークが発生することがわかった.このピークは、空間非一様に壁付近から末端ガス自着火が開始し、発生した圧力波が爆轟波のように発達することを意味している.n-heptane と DME のノッキング強度の違いには、末端ガス自着火の空間非一様性が関係しており、ノッキング強度の大きい DME の方が、空間非一様性が強いことを意味する.また、ノッキング時間にはそれぞれの燃料着火遅れ時間特性が反映されることを確認できる.



図1:ノッキング強度とノッキング時間の比較

末端ガス自着火の空間非一様性がどのように形成されたかを明らかにするため、n-heptane と DME で得られた壁面上の圧力と温度の時間履歴を図2に示す.いずれの時間履歴におい ても低温酸化反応に起因した比較的小さな温度上昇が見られるが、DME において温度上昇 率が大きく、それにともない圧力振動が発生していることを確認できる.この圧力振動は、 急激な温度上昇による圧力擾乱波の発生を意味している.発生した圧力波は空間を伝播、壁 反射によって局所的に圧力と温度を上昇させ、壁近傍での反応進行を促進させる.つまり、 DME では低温酸化反応起因で発生した圧力波が末端ガス反応性の非一様性を強める.一方、 n-heptane においては、その温度変化は緩慢であり、それにともなう圧力振動もほとんど確認 することができない.ここでは示さないが、圧力波の壁反射が繰り返されることにより、壁 と他の末端ガス点の反応進行差が拡大していくため、低温酸化反応による着火から熱着火ま での準備期間の長さも重要となる.得られた結果により、ノッキング強度が大きくなる原因 が、低温酸化反応の熱発生率および主着火までの準備期間の長さであることを明らかにした.



図2:壁面圧力と温度時間履歴の比較(左:DME,右:n-heptane)

3. 研究目標の達成状況

ノッキング現象に対する燃料反応特性の影響について4種類の燃料を用いた解析を予定通り実施した.強いNTC特性を持つ燃料にて大きなノッキング強度が発生する.その原因が, 低温酸化反応の熱発生率と準備期間の長さであることを特定し,目標を十分に達成した.

4. まとめと今後の課題

強い NTC 特性を持つ燃料でノッキング強度が大きくなる. その原因は低温酸化反応の熱 発生率と主着火までの準備期間にある. 今後,高い熱発生率に関する低温酸化反応過程を明 らかにすること,異なる当量比や高圧条件での解析を通して本結論を固める.

- 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. Terashima</u> and H. Nakamura: Fuel sensitivity on end-gas autoignition behavior during knocking combustion, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium* on Advanced Fluid Information, Sendai, (2019), CRF-31, pp. 62-63.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I074
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

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

足立 高弘*†, 金森 潤*, 近江 春祐*, 小宮 敦樹**, 岡島 淳之介**†† *秋田大学理工学研究科, **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

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

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

2. 研究成果の内容

図1は、固定板に設置された永久磁石の磁場の影響下で、円板付き円すいを回転させた際の円板表面の温度の時間発展を示している.ただし、この場合には液の揚水がない場合の結果である.円板の回転開始とともに温度が上昇している.また、回転数が大きいほど、温度の値は大きくなる.これは、円板の回転によって磁場が乱れ、誘導電流の発生により円板にジュール熱が生じたことによるものと考えられる.



図1:各回転数ごとの回転円板表面温度の時間発展

3. 研究目標の達成状況

電磁誘導加熱を用いて膜状揚水流に熱を加え,粘度を大きくすることを目的としている. 今年度の結果から,円板の表面温度は円板の回転数が2000rpm 程度以上になれば100℃に 達することが明らかとなったので,水(水溶液)の水分を蒸発させ,水溶液の濃度を変化し得 る可能性が十分にあることが明きらかとなった.研究目標に至る途中段階としては,十分に 途中目標を達成している.

4. まとめと今後の課題

本研究で取り扱う回転円すいを活用した液の揚水機構は、シンプルな構造の液糸生成装置 としての独創性を有している.本機構をうまく利用すれば、従来の高圧コンプレッサーとノ ズルを使って噴出させる液糸生成方式に比べて、円すいを回転させるだけで粘度の大小を問 わず簡単に液糸を作り、液糸の太さや密度を調整することが可能となる.さらに、平滑で抵 抗の小さい円すいを用いるので消費動力を小さく抑えることが期待できる.今後は、膜状揚 水流から液糸が生成される過程を可視化することおよび消費動力お測定が課題と考えられ る.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] S. Omi, T. Adachi, J. Kanamori and J. Okajima: Development of Spinning Device Using Filmwise Pumping-up Mechanism with Induction Heating and Rotating Cone, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-85, pp. 180-181.
- [2] 近江春祐, 足立高弘:回転円すいを揚水する液膜の永久磁石による誘導加熱,日本機械学会 2019 年度年次大会講演論文集, (2019), S0515.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

Project code	J19I075
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year (progressing)

Instability and Wave Interactions in Helical Vortices

Yuji Hattori*†, Ivan Delbende**†† Maurice Rossi*** *Institute of Fluid Science, Tohoku University **LIMSI *** Universite de Paris VI †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

2.1 Linear Stability Analysis

We have been able to simulate the linear growth of short wavelength instabilities in a helical vortex of fixed reduced pitch L=0.3. We have focused on the instabilities arising from the resonant coupling of some azimuthal modes with the elliptical deformation of the vortex core due to three-dimensional effects. Following Blanco-Rodríguez et al. (2016), we have investigated three cases with different axial velocity magnitudes W0 inside the vortex core. For the three cases, the unstable modes have been found exactly in the range of wavenumbers predicted by the theory 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.

2.2 Direct numerical simulation

We have developed a code for direct numerical simulation in order to study nonlinear dynamics of disturbed helical vortices. We solve the incompressible Navier-Stokes equations in a cylindrical coordinate system assuming periodic boundary conditions in the axial direction. This year the developed code was used for simulation of an undisturbed helical vortex to obtain a base flow and for confirming linearly unstable modes obtained by the linear stability analysis.

Figure 1 shows the motion of an undisturbed helical vortex by contours of vorticity on a

section perpendicular to the axis of the cylindrical coordinate system. The vortex rotates clockwise with the magnitude of vorticity decreasing due to viscous diffusion. The results are in good agreement with Delbende et al. (2012).

Figure 2 shows an unstable mode of elliptic instability captured by DNS of the linearized Navier-Stokes equations. It is in good agreement with the mode captured by linear stability analysis.



Figure 1 (left): Motion of helical vortex. Contours of vorticity on a section perpendicular to the axis of the cylindrical coordinate system. W0=0, L=0.5, Re=5000. Figure 2 (right): Unstable mode of elliptic instability. W0=0, L=0.3, Re=5000.

3. Achievements

Our final goal is to explore mechanism of turbulent transition of helical vortices. The results should contribute to prediction of the wake flow in the wind farm and establishing a method for real-time prediction of the electric power and optimization of the wind rotor placement. As a first step toward our goal, the accuracy of the code for DNS has shown to be sufficient. The project has achieved this year's objectives.

4. Summaries and future plans

We have developed a code for direct numerical simulation of helical vortices and confirmed that the accuracy is sufficient. The future plans include:

- To systematically scan other the strength of the axial flow since other unstable modes might occur, overlooked by the theory;

- To find the curvature instabilities arising from a coupling with a non-elliptical deformation of the core;

- To study nonlinear dynamics.

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] Yuji Hattori, <u>Ivan Delbende</u>, <u>Maurice Rossi</u>: Instability and Wave Interactions in Helical Vortices, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-86, pp. 182-183.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I076
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

非構造数値流体解析を伴う進化的最適設計システムの完全自動化

Fully Automatization of Evolutionary Optimum Design System with Unstructured Computational Fluid Dynamics

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

1. 研究目的

現在様々な分野で最適化を利用した設計プロセスが企業に浸透しつつある.しかし,製品 設計への利用に際し,形状生成および構造や空力解析のための計算空間離散化の完全自動化 が困難であり,効率的作業を望む企業に対する高いハードルとなっている.これを解消すべ く,本研究では,現在取り組んでいる次期宇宙輸送機に資するフライバックブースタへの適 用を通じ,非構造流体解析を含む最適設計システムの計算環境に依らない完全自動化を行う.

2. 研究成果の内容

流体/構造解析を必要とする(航空宇宙工学分野のみならず)流体機械工学分野の設計開発 に少なからぬ影響をもたらす完全自動最適設計システムを構築した.また,次期宇宙輸送用 フライバックブースタに関する新たな設計知見を得た.



図1: AFI-NITY を利用し、構築システムを3ヶ月完全自動で流し、得られた多分野融合多数目的 最適化問題の非劣解集合.
3. 研究目標の達成状況

目標システムを構築,適用した問題に関する設計仮説の導出およびその検証まで完遂した.



図2:当該システムの運用により得られた設計仮説の検証.フライバックブースタの新たな設計 指針を得た.

4. まとめと今後の課題

より自由度の高い形状表現を如何に自動的に行うかが課題である.

- 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・口頭発表等
- Hatta, T., Sawahara, M., and Chiba, K., Many-objective Multidisciplinary Evolutionary Design for Hybrid-wing-body-type Flyback Booster on an Entirely Automated System, *EUROGEN*, Guimaraes, Portugal, 12-14 September, (2019).
- *[2] <u>Hatta, T., Sawahara, M., Chiba, K.</u>, and Obayashi, S.: Fully Automated Optimum Design under an External Computer Environment, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-32, pp. 64-65.
- 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	J19I077
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

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

Yiwen Zhang*†, Hiroyuki Kosukegawa**†† Diao Zhuo***, Hiroyuki Miki**, Toshiyuki Takagi**,*** * School of Materials Science and Engineering, Tianjin University **Institute of Fluid Science, Tohoku University *** Graduate School of Engineering, Tohoku University **** ELyTMaX UMI 3757, CNRS – Université de Lyon – Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

As developments of micro-electric devices, it requires multi-functional materials urgently, such as magnetic-dielectric films. In our previous work, it has found that the nano-composite films show large dielectric properties and high-frequency magnetic properties. Nano-composite films with diamond-like carbon (DLC) -Co metal particles will be a good candidate for this purpose. Strongly varying microstructure and chemical composition of DLC films are found though the selection of deposition methods and the regulation of preparation conditions. Plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) has great advantage of synthesizing density DLC film. Moreover, it can be changed from metallic to insulating by carbon structure controlling. In this research, DLC-Co nano-composite films have been produced by hybrid PECVD-sputtering method. The resistivity of the films has been controlled by the gas flow rate. The structure, electrical and magnetic properties of DLC-Co films have been investigated.

2. Details of program implement

At the IFS Laboratory, we have made the DLC-Co nano-composite films on Si (100), Pt/Si and quartz substrates by hybrid PECVD-sputtering method, which consists of chemical vapor deposition (CVD) using methane (CH₄) /argon gas mixture as a precursor and co-sputtering of a metal Co target. Flow rate of CH₄ of 3, 6, 7.5, 9 sccm included to chamber was changed to control carbon content. The structure of the 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). The magnetization curves were identified by a vibrating sample magnetometer (VSM, BHV-30SS, Rikendensi). All the measurements reported in this paper were carried out at room temperature.

3. Achievements

The Co particles have a very well dispersion in the Carbon matrix. These DLC-Co films show different microstructure, which will lead to different electric and magnetic properties. With the flow rate of CH4 increasing from 3-9 sccm, the Co content of DLC-Co films decrease, which will induce the various magnetic properties. The resistivity increases from 200 to 5500 $\mu\Omega$ ·cm by increasing the CH₄ flow rate from 3 to 9 sccm. which can be explained by Co content change.



Figure 1: Magnetization of DLC-Co nano-composite film.

The magnetic properties of DLC-Co films with different CH_4 flow rate are shown in Fig. 1. The saturation magnetization (B) of films increases from 200 Gs to 4600 Gs, with the CH_4 flow rate increasing. As shown in Fig. 1(b), when CH_4 flow rate is 3 sccm, the films show ferromagnetic properties, with the B of 4600 Gs. When the CH_4 flow rate increase to 9sccm, the films show superpara-magnetic properties. However, the magnetization is only 200 Gs. These films also show high resistivity. Therefore, this DLC-Co films could be studied as magnetoresistance material.

4. Summaries and future plans

By controlling the gas flow rate, the resistivity increases, and the films change from ferro-magnetic films to superpara-magnetic films. It is noteworthy, the DLC-Co nano-composite films has the promising to realize both high resistivity and superpara-magnetic properties in the further work, which could be studied as magnetoresistance (MR) and dielectric response material.

- 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)
- Zhuo Diao, Hiroyuki Kosukegawa, Hiroyuki Miki, <u>Yiwen Zhang</u>, Toshiyuki Takagi: Development of Co-DLC Multi-layered Film for Magnetic Device Application, *The 19th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, (2019), p. 144.
- *[2] <u>Yiwen Zhang</u>, Hiroyuki Kosukegawa, Diao Zhuo, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi: Structure and Properties of Diamond Like Carbon-Magnetic Metal Nano-composite Films, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2019), CRF-33, pp. 66-67.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.

(Award)

Excellent Poster Presentation (ISEM2019), Development of Co-DLC Multilayered Film for Magnetic Device Application, Zhuo Diao, September 18, 2019, ISEM2019 Organizing Committee.

(Press release) Not applicable.

Project code	J19I078
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Active Control of High-Speed Boundary Layer Flows

Adrian Sescu*††, Mohammed Afsar**, Shanti Bhushan*** Yuji Hattori****†, Makoto Hirota**** *Department of Aerospace Engineering, Mississippi State University **Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Strathclyde ***Department of Mechanical Engineering, Mississippi State University ***Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

A better understanding of the phenomenology underlying the transition in high-speed boundary layer (HBL) ows is of crucial importance from the fundamental as well as practical points of view. It is known that at high freestream disturbance level or large surface non-uniformities, streamwise oriented vortices and the accompanying streaks in pre-transitional boundary layers play a major role in the transition onset. The main objectives of this project are to: i) study boundary layer streak initiation and development in HBLs (both along at and concave surfaces); ii) establish the framework of active control in high-speed boundary layers on at and curved surfaces; iii) investigate theoretically and numerically the viability of active control via absorptive coatings, wall cooling/heating, or gas injection in HBLs.

2. Details of program implement

In the first year, we studied Gortler vortices that develop in high-speed boundary layer flows over concave surfaces, by using the numerical solution to the compressible nonlinear boundary region equations that were derived as part of the research. We targeted the nonlinear development of these centrifugal instabilities, by varying the spanwise separation that characterizes the upstream disturbance (and dictate the spanwise separation of the downstream Gortler vortices) and the Mach number.

3. Achievements

A range of spanwise separations was considered, and the Mach number covered a high subsonic, two supersonic, and a low-hypersonic case. Contours of temperature in cross flow planes at a certain streamwise location showed that, for the smallest Mach number, M = 0.8, in the adiabatic condition, as the spanwise separation is increased and that the mushroom shapes become smaller relative to the spanwise separation (the distance between the mushroom shapes increases). For the highest Mach number, as the spanwise separation was increased the mushroom shapes become fuller and less localized (see figure 1). The mushroom shapes corresponding to the isothermal wall condition showed that for the highest Mach number the vortices are more localized.

The kinetic energy of the instabilities was calculated and plotted against the streamwise coordinate. It was observed that as the spanwise separation is increased, the scaled kinetic energy maximum increases, and that the streamwise location, where the energy saturation sets in, moves downstream as the spanwise separation is increased. We also calculated the wall shear stress and the wall heat flux, and observed that the wall shear stress increases as the spanwise separation increases, and - as expected - the wall shear stress is smaller for the adiabatic condition, as a result of the high level of heating in proximity to the wall (see figure 2). There was also a jump of the wall shear stress approximately at the streamwise location corresponding to the energy saturation initiation. The results in terms of the wall heat flux for the isothermal wall showed a decrease as the spanwise separation is increased.



Figure 1: Contour plots of temperature in cross flow planes for different Mach numbers and spanwise separations (adiabatic wall condition).



Figure 2: Spanwise averaged wall shear stress distribution along the streamwise direction: a) M = 4:0; b) M = 6:0. Isothermal - black; adiabatic - red.

We presented the results at the American Physical Society Division of Fluid Dynamics Meeting, and published a conference paper at AIAA Scitech [1, 2].

4. Summaries and future plans

In the second year, we plan to derive the adjoint boundary region equations in the context of an optimal control algorithm aimed at reducing the frictional drag. As part as this project, one PhD student, residing at Mississippi State University, is involved in the research, which will be the subject of his dissertation. We plan to submit a journal paper, and to present the results at Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] <u>A. Sescu</u>, <u>M. Z. Afsar</u>, and Y. Hattori: Streaks in high-speed boundary layers: a view through the full nonlinear boundary-region equation, *AIAA Scitech Forum*, Orlando, FL, (2020), AIAA Paper 2020-0830.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [2] <u>A. Sescu, M. Z. Afsar</u>, and Y. Hattori: Growth of nonlinear streaky structures and the associated streamwise vortices in high-speed boundary layers, *Bulletin of the 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, Seattle, WA,(2019).
- [3] <u>A. Sescu, M. Z. Afsar</u>, and Y. Hattori: Streak Growth in High-Speed Boundary Layers: Assessment through the Compressible Boundary Region Equations, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, (ICFD2019), Sendai, Japan, (2019), OS16-2, pp. 658-659.
- *[4] <u>A. Sescu, M. Z. Afsar, S. Bhushan</u>, Y. Hattori, and M. Hirota: Active Control of Highspeed Boundary Layer Flows, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2019), CRF-87, pp. 184-185.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I079
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd 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 year, we analyzed the oxygen ion diffusivity in the neighborhood (NF) of the grain boundary (GB) between SSC and SDC by dividing the simulation system into four regions: bulk SSC, bulk SDC, neighborhood of GB in SSC, and in SDC (see Figure 1-a). As a result, we found that the diffusivities of oxygen ions in *x* and *y* directions in NF of GB in SSC is larger than those in SDC. Moreover, it was clarified the diffusivity in *z* direction in both regions is consistent with each other. These results indicate that



Figure 1: a) Analyzed MD simulation model of DPEM. b) MSD of oxygen ions in the NF regions of GB in each direction.

because the low diffusivity of oxygen ion and little vacancy site in SDC, oxygen ions in SSC is difficult to move to SDC.

Regarding the experimental analysis, we have manufactured a DPEM consisting of 70 wt.% SSC and 30 wt.% SDC and analyzed its ionic diffusivity, surface exchange

coefficient. general and morphology. Comparison between the electro-chemical behaviors of a DPEM and single-phase EM are shown in figure 2. At all temperatures, the DPEM exhibits lower oxygen chemical diffusion and surface exchange coefficients. This difference is caused by the SDC addition to the EM. The SDC is exclusively ionically conductive and so reduces the number of electronic pathways necessary for oxygen ion transport. Scanning electron microscopy revealed the membranes are non-porous and therefore structurally sound. Electron backscatter diffraction further revealed that most grains had high misorientation angles $(>15^{\circ}).$



Figure 2: Oxygen chemical diffusion and surface exchange coefficients of a DP-OTM ranging from 600°C to 900°C

3. Achievements

As for the simulation analysis, we clarified that how the diffusivity of oxygen in NF of the GB in DPEM changes due to the GB by using the constructed MD simulation model. Experimental analysis revealed the change in electro-chemical properties due to the addition of SDC, as well as the morphology of the DPEM.

4. Summaries and future plans

Regarding the simulation analysis, we constructed MD simulation models of DPEM and clarified how the oxygen ion diffusivity changes because of the GB between SSC and SDC. In experiment, we manufactured a DPEM and analyzed its performance, revealing decreased oxygen transport due to the addition of SDC. As plans, the correlation of configuration of GB and diffusivity of oxygen ions will be clarified by using the constructed MD model, and we will propose a membrane showing high ionic conductivity.

- 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 oxygen ion conduction in dual-phase electrolyte membrane, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-34, pp. 68-69.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.
 - (Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

Project code	J19I080
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamental
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

The Effect of Hypertension and Anti-Coagulant to Aneurysm Rupture

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

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

IJN-UTM Cardiovascular Engineering Center, Universiti Teknologi Malaysia *Institute of Fluid Science, Tohoku University

****Graduate School of Engineering, Chiba University

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

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

This study proposed a detail analysis on severity of the IA rupture risk prediction also a classification system as a part of the decision-making system that would help in prediction and pre planning process.

2. Details of program implement

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

The CFD result of real model was validated by comparing the velocity distribution on XZ plane in the middle of the model. Figures below shows similar velocity vector characteristics and high velocity flow was observed during the peak systolic condition at 0.1s. It shows good agreement with same trend pattern and the CFD results shows less than 8% lower than the experimental. Once validated, the simulation was run and analyzed few hemodynamics effect. The result of von misses stress and deformation effects due to the different pressure condition were recorded and discussed as below.

3. Achievements

Figure 1 shows the distribution of von misses stress on different physiological conditions. As in Table 1 below, the hypertension effect double than the normal and pre hypertension condition. As the stress is high, thus the deformation value during the hypertension become very low as in Table 1. This means the pressure impact to the wall vessel of the aneurysm become higher and will weaker the aneurysm wall other than the instability flow behavior impact. Thus it is proven that the rupture risk increase and higher for those who are suffering hypertension.



Figure 1 The von misses stress distribution on left and right is the total deformation effect (a) Normal condition (b) Pre hypertension (c) Hypertension

Table 1 The Maximum	Von Misses	Stress	distribution
---------------------	------------	--------	--------------

Condition	Maximum Von Mises Stress (Pa)	Maximum Total Deformation (mm)
Normal	39552	0.022515
Pre Hypertension	37835	0.021535
Hypertension	67867	1.2271e-6

4. Summaries and future plans

The future plans are as follows

- 1. The variation physiological conditions were simulated on a model and was validated between CFD and PIV.
- 2. The simulation for different anticoagulant conditions will be continue with few other real models too.
- 3. The results from the FSI simulation will be collected to determine the correlation for each parameter using the multiple regression method.
- 4. Then, a guideline support system will be established based on analyzed result of hypertension and anticoagulant effect to the rupture risk in IA.
- 5. Research results (* 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>A. Z. 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] N. S. Shafii, R. Yamaguchi, A. Z. Md Khudzari, G. Tanaka, S. Tupin, A. Saitoh, M. Ohta, <u>K. Osman</u>: Patient Specific Images in the Middle Cerebral Artery Aneurysm Simulation with Turbulent Model, 6th International Conference on Computational and Mathematical Biomedical Engineering CMBE2019, (2019), pp. 635-638.
- *[3] N. S. Shafii, R. Yamaguchi, M. R. A. Kadir, A. Z. Md Khudzari, G. Tanaka, S. Tupin, A. Saitoh, M. Ohta, <u>K. Osman</u>: Non-Scale up Flow Behavior Visualization using in vivo and in vitro in the Middle Cerebral Artery Aneurysm, *Proc. of the Int. Symp.* on Advanced Fluid Information (AFI-2019), Sendai, (2019), CFR-88, pp. 186-187.
- [4] R. Yamaguchi, S. Tupin, S. Hashuro, <u>G. Tanaka</u>, <u>N. S. Shafii</u>, M. Ohta: Flow Characteristics in Full-Scale Patient-Specific Middle Cerebral Aneurysm with Wall Elasticity (Preliminary Preparation), 2019 UTM-IFS First Workshop, (2019), pp. 13-15.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I081
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

Interferometric Measurement of Temperature Fields in Turbulent Flows

Juan F. Torres*†, Atsuki Komiya**†† *ANU 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

This year the project focused on improving the optical and simulations methods. The phase-shifting interferometry technique was examined using different phase-shifting algorithms while the simulations methods were developed for modelling the mass transport through membranes. In addition, the precision of the instrument was quantified.

2. Details of program implementation

The tuning method for the phases-shifting interferometer was improved (Figure 1) and then used to evaluate three phase-shifting equations using a rotating polarizer (Figure 2). This work was conducted within the context of high precision measurement of convective heat transport.



Figure 1: Phase-shifted data and quality assessment during the tuning process of the phase-shifting interferometer. (a) Poor-quality phase-shifted data due to an excessively weak or strong light source; insets show the wrapped phase-shifted data (0 to 2π) in blue, and the attempt to unwrap the data in red.
(b) Phase-shifted data of good quality, i.e., with a rather flat phase map; insets indicate processed data on a selected vertical line: wrapped, unwrapped and fringe boundaries shown in red, blue and green, respectively. (c) R² of the phase map (i.e., unwrapped phase-shifted data) as a function of the laser beam intensity; the error bar is the standard deviation of ten unwrapped lines.

In addition, numerical simulation work for mass diffusion through a membrane was conducted. An in-house code written in Fortran was transferred from the ANU to IFS to study the characteristics of iso-pore structures and mass control techniques.



- Figure 2: Phase-shifted data with relatively good quality obtained from the three *N*-bucket phase-shifting equations after tuning. (a) Phase-shifted data for three-bucket (3B), four-bucket (4B) and six-bucket (6B) equations when the laser power was 166.5 μW (3B and 4B) and 155.1 μW (6B). (b) Corresponding waviness; shaded region shows the standard deviation.
- 3. Achievements
 - Completed one jointly supervised ANU Honours (undergraduate) thesis.
 - Submitted one journal paper (under review).
- 4. Summaries and future plans

The main goal is to evaluate the proposed phase-shifting interferometer and particle image velocimetry technique in turbulent flows. Another ANU Honours student will be recruited to continue this work in 2020.S2–2021.S1. Currently, there is an ANU Honours student working on natural convection 2019-2020. At least three journal papers are expected to be submitted in 2020 (including the below *PRApplied* paper).

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal
- [1] J. F. Torres, Y. Zhao, Z. Li and A. Komiya: Simultaneous high-resolution optical measurement of heat and fluid flow, *Physical Review Applied*, under review (2020).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. Not applicable.
- Patent, award, press release etc. (Thesis)

Z. Li: Evaluation of N-bucket family of phase-shifting equations through fine tuning of an interferometer", ANU Honours Thesis (2020).

(Grant & press release)

Foundation for Australia Japan Studies (FAJS), *Contributing to Global Freshwater Security with Novel Solar-driven Desalination Methods*, Dr Juan Felipe Torres (ANU) and Prof Atsuki Komiya (Tohoku University) lead the project to develop a scalable desalination method based on a solar-driven, low-energy technique using thermophoresis to achieve a 95 per cent salinity reduction in seawater. AUD \$132,000. Press release: <u>https://www.fajs.org/2020-grant-awardees</u>

(Grant)

ANU Global Research Partnership Scheme, *Exchange on multi-scale convective heat transfer*, AUD \$25,000, of which \$4,500 will be used to cover a one-month trip of an IFS Masters student (Mr. Ryo Watanabe) to come to the.

課題番号	J19I082
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

極低温液体水素中における気泡初生の量子分子動力学解析 Quantum Molecular Dynamics Analysis of Bubble Inception in Cryogenic Liquid Hydrogen

津田 伸一*†, 徳増 崇**††, 永島 浩樹***, 髙橋 竜二**** *九州大学大学院工学研究院, **東北大学流体科学研究所 ***琉球大学工学部, ****九州大学大学院工学府 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

燃料電池に代表されるように、クリーンエネルギとしての水素の利活用に向けた動きが加速す る中、水素の輸送・貯蔵の一手段として、液体水素の利用も本格的に検討されている.液体水素 は、一般に20K程度の極低温で用いられることから熱侵入などによる相変化が生じやすい.その ため、液体水素を用いる流体機器の安全設計には気液混相流解析が欠かせないが、そもそも液体 水素の相変化開始条件を規定するために必要な、気泡の発生率(初生速度)を適切に記述するモ デルは存在していない.一方、液体水素中における気泡の初生には、原子核の量子効果に代表さ れる水素特有の微視的性質が影響し得ることが示されており、水素の気液混相流解析には分子ス ケールの理解に立脚したモデル適用が本質的に必要である.以上を踏まえ、本研究では量子分子 論的手法により分子スケールで生じる液体水素中の気泡初生の特性を解明することを本年度の目 的とし、マクロな混相流解析に導入可能な気泡初生モデルを提示することを最終目的としている.

2. 研究成果の内容

本年度は、まず水素の量子性を分子スケールで適切に模擬できる経路積分セントロイド分子動 力学(CMD)法を用いて、減圧下の液体水素を模擬し、熱ゆらぎにより生じるボイド(微視的な 気泡)の体積変化から気泡が発生するまでの待ち時間を評価することで、気泡核生成速度を算出 した.また、古典分子動力学(MD)法との結果比較により、気泡核生成に及ぼす量子性の影響を 定性的に評価した.その結果、対臨界温度(T/T_c)と無次元過熱度($\Delta \mu / \Delta \mu_{spn}$)を揃えた条件で 比較する限り、水素の量子性は気泡核生成速度を小さくする傾向にあることがわかった.続いて、 水素の量子性が気泡核生成の微視的プロセスに及ぼす影響を明らかにすることを目的として、均 質気泡核生成に対する微視的な運動論(KNT)的モデルによる解析を行った.その結果、MD に よる結果と同様、対臨界温度と無次元過熱度を揃えた条件下では、量子性は気泡核生成速度を小 さくすることが確認された(図1).また、このように核生成速度が低下するのは、気泡核のサイ ズによらず、量子性が気液界面で生じる蒸発速度 α と凝縮速度 β の比を小さくする作用を有する (図2)ためであり、さらに α/β の低下は、水素分子の量子性が液相中の分子間相互作用を見かけ 上小さくするために生じることが示された.



3. 研究目標の達成状況

これまでの研究により、対臨界温度と無次元過熱度を揃えた条件で比較する限り、液体水素の 量子性は気泡核生成速度を小さくする作用があるという知見が得られており、本年度の研究目標 は概ね達成してきている.なお令和元年11月6日~8日にかけて行われた ICFD2019 では、本課 題の研究報告を行うとともに、研究の進捗状況と今後の課題を研究グループ内にて共有した.

4. まとめと今後の課題

本年度は、液体水素の量子性が気泡核生成に及ぼす特性を解明することを目的として、MD シ ミュレーションおよび KNT による解析を行った.その結果、対臨界温度と無次元過熱度を揃え た条件で比較する限り、量子性は気泡核生成速度を小さくする作用を有することがわかった.ま た、これは水素の量子性が気液界面での凝縮速度に対する蒸発速度を相対的に小さくするためで あることが、KNT の適用により示された.今後は、CMD 法を用いて核生成速度の対臨界温度と 無次元過熱度に対する依存性を定量的に評価するとともに、既往の気泡初生モデルの妥当性を検 証する.また、既往の気泡初生モデルを改良するために必要な知見を得るため、MD および KNT を用いて、水素の量子性が核生成速度を低下させるメカニズムを定量的に明らかにする.

- 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・口頭発表等
- *[1] <u>R. Takahashi, H. Nagashima</u>, T. Tokumasu, <u>S. Watanabe</u>, <u>S. Tsuda</u>: Quantum molecular dynamics analysis on bubble nucleation in liquid hydrogen, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2019), CRF-89, pp. 188-189.
- [2] <u>高橋竜二</u>,<u>永島浩樹</u>,徳増崇,<u>渡邉聡</u>,<u>津田伸一</u>:液体水素の量子性が気泡核生成に及ぼす 影響の分子動力学解析,日本流体力学会年会 2019,東京,(2019),A101-17.
- 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	J19I084
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

Thermal Conductivity of Silicon Nanowire Using Landauer Approach for Thermoelectric Application

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

In this project, based on the achieved results of the collaborative research projects in years 2015-2019, we successfully explore the thermal conductivity of silicon nanowires (SiNWs) embedded in SiGe_{0.3} (SiNW–SiGe_{0.3} composite). The electron band structure and phonon energy dispersion of the SiNW–SiGe_{0.3} composite are simulated by using the effective mass Schrödinger equation and the elastodynamic wave equation, respectively. Then, the TE properties of the SiNW–SiGe_{0.3} composite are investigated by the Landauer approach.

2. Details of program implement

For the periodic SiNWs, as shown in Fig. 1, the electron band structure solved by the Schrödinger equation with the effective mass approximation under the Bloch theorem. The phonon energy dispersion is numerically solved by the elastodynamic wave equation. The parameters used to calculate the electronic band structure and phonon energy dispersion are listed in the right Table I.



Figure 1 : (a) Cross-sectional SEM image of a highly ordered SiNW array with nanowire with a height of 100 nm and an average diameter of 10 nm. (b) Modeled square superlattice of SiNW with dimensions of height h = 100 nm, radius r = 5 nm, and space $s = 2 \sim 15$ nm. Table I lists parameters used in the simulation.



Figure 2 : (a) Electrical and (b) thermal conductance are shown as a function of the Fermi level for the $SiNW-SiGe_{0.3}$ composite with a radius of SiNW = 5 nm and space = 15 nm between the SiNWs and a bulk Si for comparison. (c) Thermal conductance contributed from lattice dynamic for bulk Si and SiNW agrees well with the experimental measurement.

Fig. 2(a) shows the electrical conductance as a function of the Fermi level. Notably, p-type SiNW–SiGe_{0.3} composite has a larger conductance than bulk p-type Si. The thermal conductance from charge [Fig. 2(b)] has the same phenomenon as electrical conductance, since the carriers are also electrons and holes. With the estimated mean free path, the phonon thermal conductivity of the SiNW–SiGe_{0.3} composite is calculated and shown in Fig. 2(c). The simulated $_{ph}$ for SiNW with density around 1.6×10^{11} /cm² (radius 5 nm and space 15 nm) agrees with the experimental results.

3. Achievements

The main results show the contribution from electrons/holes on both electrical conductance and thermal conductance increases few times by introducing SiNWs; however, lattice thermal conductance reduces around two orders. Our results are consistent with the experimental data and indicates that much lower lattice thermal conductance dominates the TE performance of the SiNW–SiGe_{0.3} composite.

4. Summaries and future plans

In this project, from our results, the impact of silicon nanowires on thermoelectricity from electrons, such as electrical and thermal conductance, is less than the thermal conductance from phonons. These results also well describe the measurements in the experiment. We will continue the collaboration with IFS of Tohoku University.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- D. Ohori, S. Takeuchi, <u>M. Sota, T. Ishida, Y. Li, J.-H. Tarng</u>, K. Endo, and S. Samukawa: Highly Water-Repellent Nanostructure on Quartz Surface Based on Cassie-Baxter Model With Filling Factor, *IEEE Open Journal of Nanotechnology*, Vol. 1, (2020), pp. 1-5.
- [2] N. M. Shrestha, P. Chauhan, Y.-Y. Wong, Y. Li, S. Samukawa, and E. Y. Chang: Low Resistive InGaN Film Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition, *Vacuum*, Vol. 171, (2020), 108974 (6 pages).
- [3] T. Fujii, D. Ohori, <u>S. Noda</u>, <u>Y. Tanimoto</u>, <u>D. Sato</u>, <u>H. Kurihara</u>, <u>W. Mizubayashi</u>, K. Endo, <u>Y. Li</u>, <u>Y.-J. Lee</u>, T. Ozaki, and S. Samukawa: Atomic layer defect-free etching for germanium using HBr neutral beam, *J. Vacuum Science & Technology A*, Vol. 37, No. 5, (2019), 051001 (7 pages).
- [4] N. M. Shrestha, Y. Li, T. Suemitsu, and S. Samukawa: Electrical Characteristic of AlGaN/GaN High-Electron-Mobility Transistors With Recess Gate Structure, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 66, No. 4, (2019,) pp. 1694-1698.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [5] S.-W. Chang, P.-J. Sung, T-Y. Chu, D. D. Lu, C.-J. Wang, N.-C. Lin, C.-J. Su, S.-H. Lo, H.-F. Huang, J.-H. Li, M.-K. Huang, Y.-C. Huang, S.-T. Huang, H.-C. Wang, Y.-J. Huang, J.-Y. Wang, L.-W Yu, Y.-F. Huang, F.-K. Hsueh, C.-T. Wu, W. C.-Y. Ma, K.-H. Kao, Y.-J. Lee, C.-L. Lin, R.-W. Chuang, K.-P. Huang, S. Samukawa, Y. Li, W.-H. Lee, T.-S. Chao, G.-W. Huang, W.-F. Wu, J.-Y. Li, J.-M. Shieh, W.-K. Yeh, Y.-H. Wang: First Demonstration of CMOS Inverter and 6T-SRAM Based on GAA CFETs Structure for 3D-IC Applications, *Tech. Dig. IEEE IEDM*, (2019), pp. 254-257.
- [6] <u>M.-Y. Lee, M.-H. Chuang, Y. Li</u>, and S. Samukawa: Thermal Conductivity of Silicon Nanowire Using Landauer Approach for Thermoelectric Applications, *Proc. IEEE Int'l Conf. Simulation of Semiconductor Processes and Devices*, (2019), pp. 121-124.
- *[7] <u>M.-Y. Lee, Y. Li, M.-H. Chuang</u>, D. Ohori, S. Samukawa: Numerical and Experimental Investigation of Centreline Shock Reflection in Ring-Shaped Supersonic Intake Geometries, *Proceedings of the 19th International Symposium* on Advanced Fluid Information, Sendai, (2019), CRF-35, pp.70-71.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19I086
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

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

Hideaki Ogawa*, **†, Kiyonobu Ohtani***†† *School of Engineering, RMIT University **Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu 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, exerting substantial impact on the engine performance. However, the understanding and in-depth investigation of such phenomena practically represent a challenge due to multiple factors including; (a) Mach reflection that must occur at the focal point on the centreline as regular reflection is prohibited from occurring on the centreline by theory and; (b) minuscular Mach disc (stem) that characterises such Mach reflection resembling regular reflection. These factors pose a significant challenge to traditional approaches from numerical and experimental perspectives due to the limitations in resolution associated with the computational mesh and the optical apparatus, respectively. Further, the presence of flow viscosity can have manifold effects on the shock structure, responsible for boundary layer on wall surface and dispersion of shock reflection on centreline. The purpose of this project is to gain new or revised insights into the characteristics and behaviour of centreline shock reflection in supersonic flow by means of state-of-the-art, non-traditional approaches including; (a) numerical simulation with highly refined mesh owing to local mesh adaption; (b) experimental testing with free flight in a ballistic range; and (c) theoretical analysis based on curved shock theories.

2. Details of program implement

The research project is proposed to be undertaken in two parts:

- 1. The first part (accomplished in J18I042) investigated the characteristics of centreline Mach reflection in computational and analytical approaches, utilising a high-fidelity CFD (computational fluid dynamics) solver with adaptive meshing and the method of characteristics (MOC), respectively, as outlined in the last year's Activity Report.
- 2. The second part (undertaken in the present project) aimed to examine the detailed characteristics of centreline shock reflection and the effects of viscosity on the shock structures numerically and experimentally, in conjunction with theoretical methods:
- (a) Euler simulations are performed to scrutinise the flow characteristics in the vicinity of the triple point in the presence of Mach reflection. Navier-Stokes simulations with slip wall condition are performed to investigate the influence of flow viscosity on the shock structures in the absence of boundary layer. Both simulations are performed using adaptive mesh refinement, which allows to accurately resolve the essential flow characteristics including shock waves to an extremely fine level.

- (b) Flowfields associated with axisymmetric intakes are investigated by utilising the ballistic range of the IFS Shock Wave Facilities. Shock structures are generated by ejecting models with ring structures (e.g., wedge, M-flow rings) supported by sabots at supersonic velocity (M≈2) into stagnant air. The flowfields surrounding the ring models are visualised via Schlieren photography using a high-speed camera.
- (c) Further theoretical analysis is performed so as to acquire quantitative insights into the intake flowfields caused by ring structures. In particular, shock structures are analysed in the light of the Guderley's analogy (analogous to implosive shocks).

3. Achievements

The shock structures in ring-shaped supersonic intakes have been scrutinised to an extremely fine levels by high-fidelity CFD computation using progressive mesh adaption, which resolved the intake flowfield to 2×10^{-7} m, comparable to the mean free path $\lambda = 1.21 \times 10^{-7}$ m. The comparison between the inviscid and viscous (without boundary layer) cases revealed rather little influence of flow viscosity on the shock position (Fig. 1), whereas a somewhat

moderate pressure gradient was observed in the centreline pressure distributions (Fig. 2) and the Mach disc was found to be thicker for the viscous case (Table 1). These results verify the validity of the use of inviscid solvers for most numerical studies conducted in conjunction with theoretical and experimental studies. The same methodology has been applied to axisymmetric scramjet intakes with three ramps for scramjet-powered ascent flight, yielding valuable insights at various freestream and wall conditions, as summarised in Ref. [1]. Experimental investigation, on the other hand, was hindered by the difficulty associated with the acquisition of helium gas, which is inherently required to serve as the driver gas in the operation of the IFS ballistic range.



Fig. 1 Mach number distributions (with computational mesh)



Fig. 2 Centreline pressure distributions

Table 1 Mach disc thickness

	<i>t</i> _s [m]	$t_{\rm s} \left[\lambda \right]$
inviscid	8.87×10 ⁻⁷	7.3λ
viscous	2.16×10 ⁻⁶	17.8λ

4. Summaries and future plans

An effective, robust numerical technique using mesh adaption has been established, allowing to capture the shock structures at unprecedented refinement levels. This paves the way for further investigation in conjunction with theoretical approaches and experimental verification. Future work will focus on the identification of the key factors and mechanism that determine the incident shock wave and Mach disc radius and their formulation represented as a function of the intake geometry and freestream conditions.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (including international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] <u>C. Fujio, S. Brahmachary</u> and <u>H. Ogawa</u>: Numerical Investigation of Axisymmetric Intake Flowfield and Performance for Scramjet-Powered Ascent Flight, *Acta Astronautica*, Submitted on the 21st March (under review), 2020.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- *[2] <u>H. Ogawa, S. Brahmachary, C. Fujio, T. Watanabe</u> and K. Ohtani: Numerical and Experimental Investigation of Centreline Shock Reflection in Ring-Shaped Supersonic Intake Geometries, *Proceedings of the Nineteenth International* Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2019), CRF-36, pp. 72-73.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I087
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2年目

イオン液体静電噴霧による二酸化炭素吸収促進に関する数値モデルの構築 Development of Numerical Modeling on Enhancement of CO₂ Absorption by Ionic Liquid 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(CO₂)の分離回収技術に応用するための研究開 発が活発化している.イオン液体へのCO₂吸収は気液界面の表面反応により生じることから、 イオン液体をナノオーダーの微小液滴として噴霧することによって、液滴の比表面積効果に よる効率的なCO₂吸収が期待できる.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CO₂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CO₂の吸収速度の間の定量的関係に対する理解が不 十分であり、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CO₂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

ラグランジュ的手法を用いた液滴挙動解析コードおよび二酸化炭素吸収・拡散方程式との カップリングにより、噴霧形状と二酸化炭素吸収過程を明らかにすることが可能となった. 図1に9kVの直流電圧をノズル・対向電極間に印加した際に形成されるイオン液体静電 噴霧形状と吸収二酸化炭素分布を示す。噴霧形状はノズル下方に作用する静電気力と同一電 荷を帯びた液滴間に作用するクーロン反発力により決まり、釣鐘状となることが明らかとな った.また、より小さな液滴が噴霧外縁側に集中し、大きな液滴は中心部に集中する.二酸 化炭素吸収量は噴霧内で一様とはならず、噴霧中央部で吸収が促進することが分かった.

3. 研究目標の達成状況

本研究により、イオン液体静電噴霧における噴霧形成過程と二酸化炭素吸収過程を同時に 解析することが可能となり、噴霧内における液滴径分布を明らかにするとともに、二酸化炭 素吸収特性を解明することに成功した.これより、本研究目標は概ね達成されたと言える.



図1:9.0 kV印加時におけるイオン液体静電噴霧形状(左)および吸収二酸化炭素量(右)

4. まとめと今後の課題

イオン液体静電噴霧において液滴径分布に対する噴霧形状および CO₂ 吸収過程を解明す ることが可能となった.本研究により、イオン液体噴霧による二酸化炭素吸収過程に対する 最適条件を示すことが可能となり、得られた最適条件の下でイオン液体静電噴霧による二酸 化炭素分離吸収実験を行い、本方式による高性能化を実証する.

- 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)
- H. Takana, N. Hara, <u>T. Makino</u> and <u>M. Kanakubo</u>: Enhancement of CO₂ Absorption by Ionic Liquid Electrospray, *Proceedings of 12th European Congress of Chemical Engineering (ECCE12)*, (2019), USB.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] H. Takana, K. Kawatani and N. Hara: Computational Simulation on Ionic Liquid Electrospray for High Efficiency Carbon Dioxide Absorption, Proceedings of International Symposium on New Plasma and Electrical Discharge Applications; and on Dielectric Materials (ISNPEDADM 2019), Bonifacio, France, (2019), USB.
- *[3] H. Takana, K. Kawatani and <u>T. Fujino</u>: Development of Numerical Modeling on Enhancement of CO₂ Absorption by Ionic Liquid Electrospray, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-37, pp. 74-75.
- [4] 原望,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に 与える環境温度依存性,第42回溶液化学シンポジウム講演要旨集,(2019), p. 77.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
- (特許) なし
- (受賞) 溶液化学シンポジウムポスター賞,イオン液体静電噴霧による二酸化炭素分離吸収に与 える環境温度依存性,原望,2019年10月31日,溶液化学研究会.
- (マスコミ発表) なし

Project code	J19I088
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Experimental Investigation on Atomization Process in Electro-Sprays by Surface Disturbance Measurements

Noritsune Kawaharada*, Hidemasa Takana**† Friedrich Dinkelacker*†† *Institute of Technical Combustion, Leibniz University Hannover **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Electro-spray process forms one of the finest and narrow-dispersed droplets in liquid spraying devices. The electrostatic force which is observed on charged liquids stretches the liquids to ligaments and droplets (Primary breakup). These structures are further fragmented by Coulomb repulsion due to charged electrons (Secondary breakup). In spite of the important roles of the primary breakup on further atomization, it is still not fully understood yet due to the complexity of the process. The main purpose of this project is to obtain information of the first step of the atomization process in electro-sprays by high speed visualization techniques.

2. Details of program implement

The liquid column is stretched by the electrostatic forces and is fragmented from constrictions which appear as a surface disturbance. In this project, a high speed back light imaging setup was used to capture the structure. A simple capillary tube and a counter electrode plate setup were used for the electro-spraying. Inner diameter of the capillary tube is 0.1 mm. However, because of the surface tension, the initial liquid diameter is expanded to almost same as the outer diameter of the capillary tube (0.4 mm). Time resolved images were taken under several conditions. As a first step of the investigation, electrical conductivity, applied voltage, and flow rate are chosen as experimental parameters.

The images shown in Figure 1 are the representative results from the measurements. Fine sprays are coming out from each liquid tip. The expected surface disturbance is not visible (left), or only slight stripes are visible on the ligament (right). It is necessary to make the spatial and temporal resolutions higher



Figure 1 : Liquid tip shapes during electro-spraying process



Figure 2 : Image processing steps of a simple 3 colors superimposing method for visualizing the structure movements (from left to right).

to detect the surface disturbance at the appearing position of fine sprays.

3. Achievements

The high speed imaging techniques are applied for the parametrical investigation as a first step of the project. The transient liquid column shapes and spray angles are successfully obtained from the investigation. These data are useful for understanding where the fragmentation starts and for a sensitivity analysis of the parameters to develop a prediction equation of initial droplets sizes.

4. Summaries and future plans

The transient liquid column shapes and spray angles are successfully obtained from the parametrical investigation by high speed imaging techniques. However the results show that the surface disturbance appears at extremely small region on the liquid tip. Therefore it is essential to make the spatial resolution higher with a high intensity optical setup and high magnification lenses in the near future. A simple post processing program which tracks surface structures and droplets by 3 colors has been developed and tested on the other spray images (Figure 2). This technique will also be applicable for understanding the atomization processes in electro-sprays.

- 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>N. Kawaharada</u>, H. Takana and <u>F. Dinkelacker</u>: High-Speed Imaging of Primary Breakup in Electrosprays, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, Japan, (2019), CRF-38, pp. 76-77.
- [2] N. Kawaharada, H. Takana and F. Dinkelacker: Optical Investigations of Primary Breakup in Liquid Sprays, Proceedings of the 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019), Sendai, Japan, (2019), OS5-11, pp. 354-355.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I089
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

パルス放電プラズマによる電位刺激を用いた生細胞内への物質輸送機構の解明 Elucidation of Mass Transfer Mechanism into Living Cells using Electric Potential Stimulation by Pulsed Discharge Plasma

奥村 賢直*†,張 家興** 佐藤 岳彦**†† *一関高等専門学校未来創造工学科,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

現在、持続可能社会の構築や生涯現役社会の実現に向けて、革新的な医療技術の開発が望 まれている. その方策として近年, 大気圧プラズマ(以下, プラズマ)が着目されており[新 学術領域、プラズマ医療科学の創成」、これまでにプラズマを用いた皮膚治療装置(独国マッ クスプランク研究所、東京都市大学)、アポトーシス誘導や細胞分化などの細胞応答誘導(独 国グライフスバルト大学, 仏国オルレアン大学, 韓国 KAIST, 名古屋大学等) などの研究 開発が進められている.これらの多くは、プラズマを気中で生成し、液体に覆われた細胞へ 照射している.このとき細胞は、化学種や電位の作用を受ける.化学種とは活性酸素や活性 窒素などの総称で、これらの多くは液中に溶解し、過酸化水素や亜硝酸、硝酸などの安定な 化学種に変化した後、細胞まで輸送され、酸化刺激により細胞応答を誘導する.一方で電位 もまた、細胞の膜に介在するタンパク質(膜タンパク質)の極性アミノ残基を刺激してコン フォメーション変化を引き起こし、その機能を変質させることで細胞応答を誘導する.しか し、プラズマを用いた細胞応答誘導においては定量評価技術がすでに確立されている化学種 の生物学的効果を中心として作用機序を追及する研究がほとんどで、同じく生物学的効果を もつ電位の影響は、プラズマ医療応用分野においては十分に検討されていない. そこで本研 究では、プラズマ応用研究の新規領域のさらなる学術的発展に向け、プラズマ発生時の電位 現在,活発に調べられている化学種の効果に並行して,電位の影響の検討が必要となる.こ のため本研究では、同じく生物学的効果をもつ電位の生物学的影響をプラズマ発生下にて検 討した.

2. 研究成果の内容

申請者らは、プラズマ発生時の電位刺激を、化学種の作用なしに細胞に与える実験系を構築し、HeLa 細胞に対する電位の生物学的影響を調べた.その結果、電位刺激中に膜穿孔が生じ、培養液中の浮遊分子が細胞内へ輸送されることが明らかとなった.図1はその結果の一例で、蛍光試薬添加のタイミングを電位刺激前、刺激後、刺激から24時間経過後と変化させた場合の蛍光観察の様子である.図中の(a-f)および(g-l)はコントロールおよび電位刺激の結果を示している.図1(a, c, e, g, i, k)は生細胞を染める膜透過性試薬を、一方(b, d, f, h, j, l)は非透過性試薬を添加した場合の様子をそれぞれ示している.図1(g, h)に示すように、電位刺激により、細胞膜非透過性蛍光試薬が細胞内に生きたまま取り込まれていることがわか

る. さらに, この輸送は電位刺激中にのみに生じ, またその後も細胞は継続して活動し, コ ントロールと変わらず細胞分裂を行うことが(h, j), また(e, k)からそれぞれ明らかとなった.



図1 電位刺激による HeLa 細胞内部への物質輸送の様子.

3. 研究目標の達成状況

本研究の実施により、細胞への遺伝子等の物質導入が生きたまま可能であることが明らか となった.また、その機構には穿孔がかかわることが示された.生物学的効果をもつ電位の 生物学的影響をプラズマ発生下にて検討し、その機構の解明を目標としており、今年度は培 養液中の物質の細胞内への輸送、および細胞内容物の細胞外への漏出を実験的に明らかにで きた点において有意義な成果が得られたものといえる.本結果により電位が有する生物学的 効果について新たな知見が得られたことから、再生医療や創薬応用等への最適化につながる と期待している.

4. まとめと今後の課題

電位刺激が生物学的影響を有する可能性が示唆されたため、今後は電位および物質の細胞 内外への輸送を定量的に評価することで、プラズマ応用研究の新規領域のさらなる学術的発 展に貢献できるものと考えている.

- 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>Takamasa Okumura</u>, Chia-Hsing Chang, Takehiko Sato: Influence of Electric Potential Induced by Atmospheric Pressure Plasma on Cell, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, Japan, (2019), CRF-70, pp 150-152.
- [2] <u>Yuto Oba, Shuto Tamura, Takamasa Okumura</u>, Tomoki Nakajima, Takehiko Sato: Visualization of thermal flow in liquid medium by high-Frequency pulsed gas-liquid phase discharge, *The 6th Japan-Taiwan Plasma Life Science and Technology* (*JTPL-2019*), Tsuruoka, Japan, (2019).
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I090
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

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

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

1. 研究目的

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

<u>令和元年度は、3月に実施予定であった弾道飛行試験装置による模型周囲の衝撃波振動の可視</u> 化計測実験が社会情勢の変化のため、中止となった。前年度までに得られた概要を以下に示す。

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



図1. スパイク付前向きキャビティ模型形状(単位mm,スパイク先端の半頂角口は10°)



図2. 弾道飛行実験装置による衝撃波脈動および模型飛し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

上記のごとく、本年度は実験中止となったため、実験データの取得は未達成である.

4. まとめと今後の課題

実験の再開後,可視化画像から小孔取付位置と形状による多様な姿勢制御の可能性を明らかに する予定である.また,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 の見積を進め,旋転速度と側面小孔からの質量流量との相関を解明する.

- 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>Mizukaki, T., Anna Kouno, Yuki Yoshitomi, Fumihiko Iwasaki</u>, and Kiyonobu Ohtani: Flight Attitude Stabilizing by Side-jet Generated by Detached Shock Pulsation, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-90, pp. 90-91.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I091
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	3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、申請者らにより概念検討が行われた火星探査航空機に向けた次期高高度試験 機について、数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)を用いて全機 CAD モデル による横系(横力,ヨー,ロール)の空力計算を実施し、6自由度運動に対する、安定性・制御 性の検証を行い、その結果に基づくフライトシミュレーションの実施を目的とし、遂行した.

提案研究では、前年度、今年度に引き続き RG において副代表を務める東北大学流体科学研究 所 永井教授と、再設計に参加した申請者とが連携し、CFD を援用した再設計機の横方向運動特 性(ロールとヨー)の取得を行ったうえで、空力-飛行力学連成計算に繋げる.実施においては、 CFD の実施においてフルスパンモデルを用いて、横方向の運動方程式を解くために必要な空力デ ータベースに拡張したうえで、申請者が保有する高効率空力-飛行連成計算技術で運用することで、 大気球試験に向けた再設計機の運動性の評価を行った.

2. 研究成果の内容

本年度の研究の成果は下記のとおり纏められる.

- ① 再設計機におけるヨー・ロール特性の取得
- ② 制御系の設計に必要な空力データベースの構築
- ③ 運動予測と空力制御の効果に関する知見の獲得

①②においては空力データベースの構築を行ったほか,飛行力学における運動方程式における 線形微小上覧方程式の解を求め,再設計機の想定環境における不安定モードの評価を行った.結 果として,想定できる様々な運動に対して,安定であることが理解された.

①で得た空力データベースを用いて,火星探査航空機大気球試験機の空力-飛行連成計算を行った. MABE-1 試験によって計測した機速や迎角を時系列的に参照して行った本連成計算による結果(図 1)は飛行試験と概ね一致した.不一致箇所については,引き続き検証を行うが,機体ロールによる揚力方向の変化が適切に反映されていないことなどが原因と考えられ,6自由度運動方程式を解く計算コードを引き続き,改良する予定である.

この計算法を用いて,MABE-2 の飛行制御最適化を行った.「引き起こし完了までの時間最小化」と「最大荷重の最小化」を目的とした設計問題ふたつを進化計算法により解決し,飛行経路の違いや,制御の相違点に関する知見を得た.また,本連成計算法は高効率化を図っていることから,進化計算法などの大域的最適化法と親和性が良いことも示され,2020年度に予定されている実飛行試験の事前・事後の分析に有益な手法と出来た.



図 1: MABE-1 における空力—飛行力学連成計算結果 (赤線) と実フライトログ(緑遷) との比較. *t=*30s 以降,実フライトは破綻している.

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横方向における動的特性の取得」は完了 することができた.また、「空力データベース構築と空力―運動連成計算と飛行経路の最適化」も 行うことができた. MABE-1 における、横方向力の影響性については、今後調査する必要がある が、空力データベースの充足をはかるなどして、解決への道筋は検討できている.

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.

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)
- Kanazaki, M., Tomisawa, K., Fujita, K., Oyama, A., and Nagai, H.: Aerodynamic Performance of Control Surfaceson Mars Airplane Balloon Experiment Two, *Journal of Fluid Science and Technology*, JSME, Vol. 14, Issue 3, (2019), JFST0017.

2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等

- [2] 橘高洋人,金崎雅博:火星探査航空機次期大気球試験機の動的空力特性,第63回宇宙科学 技術講演会,徳島,(2019).
- *[3] <u>Kanazaki, M., Kittaka, H., Oyama, A.</u>, Fujita, K., and Nagai, H. : Numerical Simulation of Dynamic Derivatives for Mars Airplane Balloon Experiment-2 (MABE-2), *Proceedings* of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019), Sendai, (2019), CRF-39, pp. 78-79.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I094
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2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* *東海大学工学部,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

惑星探査機が大気突入飛行する際には、強い衝撃波の生成を伴い空力加熱が問題となる. そこで宇宙機を空力加熱から守り安全にミッションを成功させるためには、機体表面に作用 する空力加熱率を正確に予測して適切な機体形状や熱防御材料を開発することが求められ ている.空力加熱率を正確に予測するためには、衝撃層内で生じる熱化学反応及び輻射輸送 過程を解明する必要がある.そこで本研究においては、地上試験装置を用いて大気突入機周 りに生成される衝撃層環境を模擬して、衝撃層内で生じる熱化学反応及び輻射輸送過程につ いて、実験的及び数値的解析より明らかにすることを目的とする.

2. 研究成果の内容

本研究では、極超音速衝撃波管の観測部を高速で伝播する衝撃波を観測対象として側方からの輻射光の時間分解分光計測を実施した.本計測システムは、集光レンズ、モノクロメータ及び光電子増倍管(PMT)から構成されている.本実験では、モノクロメータの中心波長を変更することで、波長 316nm 付近の N₂(2+)(1,0)、391nm 付近の N₂+(0,0)及び 744nm 付近の N 3p 4S⁰ - 3s 4P を対象として単一波長における時間分解計測を実施した.また、標準光源を用いて本計測システムの絶対強度校正を実施して、PMT で計測した出力値を絶対放射輝度に変換した.試験気体としては純窒素を用いて、衝撃波速度は秒速 6.0km,試験気体圧力は 100Pa の条件で実験を実施した.

また衝撃波管内の1次元内流れ場の計算と輻射輸送を考慮した連成解析を実施して、数値 的に輻射光の時間分布を再現して計測値との比較検討を行った.1次元流れ場の計算は Poshax3を利用して行い、窒素系の5化学種(N₂, N, N⁺, N₂⁺, e)を考慮して、熱的非平衡 性には2温度モデルを用いた.また輻射輸送の影響も考慮して計算を実施した.輻射強度の 計算には、輻射計算コード Photaura を利用し、衝撃波管観測部スケール 44mm における視 線輻射強度として計算を実施した.図1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視線輻射強度の時間変化として表して いる.これより、すべての図において実験値は衝撃波面前方から輻射強度が増加することに 対して、計算値においては、いずれの場合も衝撃波面付近から輻射強度が急激に上昇する傾 向にあることが分かる.これは、衝撃波面を前方領域で衝撃層内からの輻射光が吸収されて、 光化学反応過程(プリカーサ輻射加熱現象)が生じるためであると考えられる.数値計算に おいては、このプリカーサ輻射加熱現象が考慮されていないために、衝撃波面付近から輻射 強度の増加が生じる.また $N_2(2+)$ 以外の輻射強度に関しては、実験値の方が大きな値となり、 また衝撃波背後の輻射強度の減少過程においても実験値と計算値の不一致が著しく異なっ ているのが分かる.以上本研究の結果から、プリカーサ輻射加熱現象は、衝撃層内の熱化学 過程と輻射輸送過程に大きな影響を及ぼすことが明らかになった.よって今後現象解明を行 い、適切なモデル化を行う必要がある.



3. 研究目標の達成状況

極超音速衝撃波管を用いて、大気突入飛行環境を模擬した実験を行い、衝撃層周りの輻射 強度分布について調査した.衝撃波面を基準とした輻射強度分布の計測値と計算値の比較を 行うことで、衝撃波面前方のプリカーサ輻射加熱の影響により衝撃波面のみならず、衝撃層 内の熱化学過程と輻射輸送過程に大きな影響を及ぼすことが明らかになった.そして本研究 により今後適切なプリカーサ輻射加熱現象のモデル化を行うために必要なデータを取得す ることができた.また本実験データは、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値と比較することで、プリカーサ輻射加熱現象が実飛行環境でも生じる 現象なのかについても検証することができる.

4. まとめと今後の課題

本研究では、弾道飛行装置を用いた自由飛行する飛翔体模型周りの輻射強度計測の予備試 験として、極超音速衝撃波管で高速衝撃波を生成して、輻射強度計測を実施した.また流れ 場と輻射輸送の連成解析を実施して、計測した輻射強度と比較検討を行った.これより衝撃 波前方で生じるプリカーサ輻射加熱現象は、衝撃層内で生じる熱化学過程と輻射輸送過程に 大きな影響を及ぼすことが示され、大気突入機の空力加熱率を高精度に予測するためには、 プリカーサ輻射加熱現象の適切なモデル化が重要であることが明らかになった.

- 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] <u>G. Yamada, M. Kajino</u> and K. Ohtani: Experimental and numerical study on radiating shock tube flows for spacecraft reentry flights, *J. Fluid Science and Technology*, Vol. 14, No.3 (2019), JFST0022.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- *[2] <u>G. Yamada, M. Kajino, F. Kikuchi</u> and K. Ohtani: Spectroscopy of Shocked Radiating Flows for Re-entry Flight, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-40, pp. 80-81.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19I096
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd 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 *** ELyTMaX UMI 3757, CNRS – Université de Lyon – Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

One of natural fibers that has a strong tensile property is Abaca (Musa) fibers. It has been used as a reinforced composite in the 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

A test apparatus was built and used, as shown in Fig. 1 (a). It consists of a motor, a linear stage, specimens' holder, an adjustment stage, and a cantilever beam installed with a strain gage. The loading rate of the tests was 0.46 N/s (Fig. 1(b)). Twenty specimens were tested to investigate the maximum tensile strength and the fracture behavior of the single fiber.



Figure 1: The tensile test apparatus (a) and the relationship between strain rate and time (b).

3. Achievements

Twenty specimens of single fiber were selected for evaluation of the tensile strength. In order to achieve a more accurate value of the tensile strength, the cross-section area of each specimen was evaluated. Fig. 2 shows the comparison of the measured cross-section area (Fig. 2(b)) and the estimated area (Fig. 2(a)). Fig. 2(a) shows that the area is 16963 μ m² by assuming that the cross-section was circular. However, Fig. 2(b) shows that the cross-section was not circular and that the measured area is

10626 μ m². Therefore, the cross section of each specimen was measured and used to calculate the maximum tensile strength of the fiber, as given in Fig. 3.



Figure 2: The width of a specimen at break up (a) and its cross-section area (b).



Figure 3: The maximum tensile strength of single abaca fiber.

The tensile strength of abaca fiber is given in Figure 3. It is shown that fibers that have smaller cross-section areas have a higher value of tensile strength. The diameter of the analyzed fiber ranges from 5635 μ m² and 19714 μ m² resulting in the tensile strength value ranging from 490 MPa to 1548 MPa.

4. Summaries and future plans

In the future, the interfacial shear strength will be evaluated by using polyamide and polypropylene as resin. Furthermore, the fracture behavior of the composite will be studied using a high strain rate tensile test (impact loading).

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included an international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- *[1] <u>Z. Fuadi, S. Sabri, S. Rizal, H. Homma</u>, T. Takagi, H. Kosukegawa, H. Miki: Tensile Strength and Fracture Behavior of Single Abaca Fiber. *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-41, pp. 82-83.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19I097
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

電場によって変形する強誘電体ポリマーの数学的モデル化とMCシミュレーション Mathematical Modeling and MC Study of Deformation of Ferroelectric Polymers under Electric Field

鯉渕 弘資**, 高木 敏行*****

Jean-Yves Cavaille***, Jean-Marc Chenal****, Olivier Lame****, Gael Sebald*** Chrystelle Bernard***,****, Gildas Diguet**,***, Vladislav Egorov***** Olga Maksimowa*****, Giancarlo Jug****** *仙台高等専門学校(名取キャンパス), **東北大学流体科学研究所 ***ELyTMaX, ****INSA Lyon

*****The Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University *****Cherepovets State University, ******Insubria University †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

強誘電体ポリマー(FEP)は電気(または光)エネルギーを機械的エネルギーに直接変換で きるため、アクチュエータなどの工学的な応用への観点から、注目を集めている。FEP はセ ラミックと比べると、堅さや耐衝撃力の違いはもちろんのこと、弾性変形では 10 倍も伸び る.しかし、FEP の外部電場応答は特異的であるため、その変換のメカニズムはよく分かっ ていない.例えばポリフッ化ビニリデン(PVDF)の場合、その電場の向きによって、ひずみ の正負が変わる.これは、ポリマーを構成する分子配置が電場の向きで非対称に変化するた めと理解されているが、ポリマーは柔らかいため、このようなミクロな配置の変形に伴い全 体の形も複雑に変化する.このため、このような複雑な変形をモデル化するのは一般には困 難である.そこで、物質内部の計量が方向に依存するという Finsler geometry (FG)モデル の考え方を適用し、既に発表されている実験データを再現することにより、特異的に変形す るメカニズムを明らかにする.

2. 研究成果の内容

電場の向きによって正負の符号が変わるひずみ-電場曲線の実験結果を再現する結果が 得られた.これは、仮定したモデルに組み込まれたポリマーの位置と方向自由度間の相互作 用が、実際の物質におけるミクロな相互作用をよく表わしていることを意味する.この意味 において、FEPの変形のメカニズムが分かったことになる.既に述べたとおり、FEPに見 られる電場方向に依存する変形は、定性的には、分子結合の非対称性に起因すると理解され ているが、そのミクロな非対称性がマクロな変形にどのように定量的に影響を与えるかは複 雑な問題になる.本研究で仮定する相互作用は、この意味で未解明な現象を明らかにする第 一歩になる.

流体研で実施した研究内容は以下のとおり:

(1) 2019 年 7 月 10 日に、流体科研 ELyTMax の Dr. SEBALD Gael, Dr. BERNARD

Chrystelle と, 流体科研に滞在していた INNSA Lyon の CAVAILLE Jean-Yves 教授, Cherepovets 国立大の大学院生 EGOROV Vladislav と, 仙台高専の鯉渕弘資で, Skype 会議を開いた. 内容は, EGOROV Vladislav と鯉渕による研究経過のプレゼンテーショ ンである. それまでに得られた結果と問題点の報告, 今後の方針などについて議論した.

(2) 2019年11月5日に、流体科研のELyTMax Labで、V.EgorovがPVDFの電場によるひずみと電気分極の計算結果をセミナー形式で発表し、議論を深めた。発表者以外の参加者は、Dr. SEBALD Gael、Dr. BERNARD Chrystelle、Dr. DIGUET Gildas とINNSA Lyon の CAVAILLE Jean-Yves 教授、仙台高専の鯉渕弘資である。

3. 研究目標の達成状況

PVDF が常誘電状態にある場合,電場をかけたときの機械的応答としての「ひずみー電場」 曲線と、電気的応答としての「分極ー電場」曲線の既報告の実験データについては、FG モ デルでうまく計算できることが分かった.これらについては国際会議で発表した[1,2].一方, 強誘電状態にある PVDF に関しても、その後の計算で、既に報告されている実験データを うまく再現できることが分かった.これについては、現在論文を準備中である.従って、論 文が現時点で準備中である点を除けば、達成状況としては「良好」といえる.

4. まとめと今後の課題

PVDF の複雑な電場応答が,FG モデルの考え方でうまく説明できることが分かった.特に,強誘電相にある場合の数値計算では(現在論文を準備中ではあるが),電場を入力すると, 電気分極と機械的なひずみが同時に出力され,それが実験結果とよく合う.しかも何の仮定 も必要ない.従って,まさに数値実験といえる.それは材料内部を Finsler 空間と見なすと いう新しい考え方によるものである.この考え方は,2020-2021 年度の科研費(新学術研究) に採択された公募研究テーマ「材料の内部構造に関する新しい幾何学的解釈とその変形機構 の解明への応用」においても中心的なものである.流体科研で支援を受けた「材料の研究」 からこのような研究の展開が生まれつつある.

- 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] V. I. Egorov, O. G. Maksimova, H. Koibuchi, G. Jug, C. Bernard, J.-M. Chenal, O. Lame, G. Diguet, G. Sebald, J.-Y. Cavaille, T. Takagi: Finsler geometry modeling of reverse piezoelectric effect in PVDF, 8th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Science, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1391, (2019), 012024 (4 pages).
- *[2] <u>Vladislav Egorov, Hiroshi Koibuchi, Olga Maksimova, Chrystelle Bernard, Jean-Marc Chenal, Lame Oliver</u>, Gildas Diguet, <u>Gael Sebald</u>, Jean Yves Cavaille and Toshiyuki Takagi: Simulation of reverse piezoelectricity in ferroelectric polymers by Finsler geometry model, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-42, pp. 84-85.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I098
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

火星大気突入カプセル周り流れの数値解析 Numerical Simulation of Flowfields over Mars Entry Capsules

Michiko Furudate*†, Bok Jik Lee** Nomura Masayuki***, Hiroki Nagai****†† *Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University **Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University ***Dept. of Aerospace Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University ***Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. 研究目的

現在,火星の低層大気中を飛行し様々な観測を行う火星飛行機の研究開発が JAXA や東北大学 流体科学研究所を中心に進められている.この飛行機を火星の低層大気や地表まで運搬するため には,機体を収納したカプセルを極超音速で火星大気に突入させる必要がある.一般に惑星大気 突入カプセルは空力加熱からの防御や空力性能の観点から頂角の大きな鈍頭円錐をしているが, 火星飛行機を搭載するためにより最適なカプセル形状について検討する必要がある.そこで本研 究では,火星飛行機を搭載する突入カプセルの最適な形状を検討するために,いくつかの形状の 突入カプセル周りの火星大気流れの数値計算を行い,空力加熱や空力係数の算出を行うことを目 的とする.

2. 研究成果の内容

本研究では、修正ニュートン理論を使用した抗力係数の計算を行い、カプセル形状に関するパ ラメーターが抗力係数に及ぼす影響を調査した.この方法では、カプセル表面を三角形の面積要 素に分割し、各面積要素に対する圧力係数をニュートン理論により解析するものである.カプセ ルの形状には鈍頭楕円錐を仮定し、円錐の半頂角、鈍頭部の球と円錐底面の半径比、堕円錐の圧 縮係数をパラメーターとし、各パラメータの変化による効力係数の変化を調べた.その結果、抗 力係数は、圧縮係数の減少および円錐の半角の増加とともに増加し、鈍頭部の球と円錐底面の半 径比が抗力係数に及ぼす影響は比較的小さいことがわかった.(Fig.1)また、これらの空力係数 予測に加え、物体表面の空力加熱率予測を数値流体力学(CFD)で行うために、火星大気中を飛 行する物体周りの流れを化学反応を考慮して計算できる CFD コードの整備を行った.今後、こ のコードを利用し、様々な迎角に対しての CFD の計算を行う予定である.

また,共同研究集会として,まず,2019年6月28日に永井,Furudate,Leeの3名で,1次 共同研究グループでのミーティングを行い,共同研究プログラムについての研究手法,計算対象, 及び,利用可能なデータなどについての確認,議論などを行った.また,2019年11月6日に2 次共同研究グループでのミーティングを行い,共同研究の進捗報告とこれからの計画についての 議論を行った.参加者は永井,Furudate,Leeである.



- 研究目標の達成状況
 - 突入カプセルへの空力加熱解析ツールおよび空力係数解析ツールの構築 修正ニュートン理論を使用した抗力係数予測計算ソフトウェア及び、物体表面の空力 加熱率予測のための化学反応を考慮した火星大気用 CFD コードの整備を行い、成果目標 をほぼ達成した。
 - 火星大気突入カプセルの最適な形状を検討のための空力係数および熱流東データの提供 さまざまな円錐の半頂角,鈍頭部の球と円錐底面の半径比,堕円錐の半頂角をパラメ ーターに対する効力係数データを修正ニュートン理論により取得した.また,熱流東デ ータを習得するためのツール構築および予備計算を行った.
- 4. まとめと今後の課題

本共同研究では、火星飛行機を搭載する突入カプセルの最適な形状を検討するために、いくつ かの形状の抗力係数の算出し、抗力係数は楕円体の圧縮係数の減少および円錐の半角の増加とと もに増加し、鈍頭部の球と円錐底面の半径比が抗力係数に及ぼす影響は比較的小さいことが明ら かになった. 今後、化学反応を考慮した火星大気用 CFD コードにより、様々な迎角に対しての CFD の計算を行う予定である.

- 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 なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- *[1] <u>Michiko Ahn Furudate</u>, <u>Bok Jik Lee</u>, Nomura Masayuki, Hiroki Nagai: Numerical simulation of flowfields over Mars entry capsules, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-91, pp. 192-193.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
 - なし

課題番号	J19I100
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2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***, Pravin Kadu** *東北大学流体科学研究所, **名古屋大学大学院工学研究科機械システム工学専攻 ***南京理工大学エネルギー工学専攻 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本節では、紙面の都合上、平行に設置された 2 本の角柱背後に形成される後流流れについてのみ記述する.計算領域は直方体型であり、サイズは主流(X)方向、鉛直(Y)方向、スパン(Z)方向に対してそれぞれ $L_{X}\times L_{Y}\times L_{Z} = 42T_{0}\times 38T_{0}\times 5T_{0}$ である.ここで T_{0} は角柱径である.図1に速度こう配テンソルの第2不変量 Q値の等値面を用いて流れを可視化した様子を示す.また図2より、流れが間欠的である $X/T_{0}=6$ においても、乱流エネルギースペクトルにいわゆる-5/3乗側が見られることが確認できる.なお乱流レイノルズ数は $X/T_{0}>5$ で $Re_{h}\approx 80$ であった.



ここで2点エネルギー相関を調べるために、Karman-Howarth-Monin-Hill 方程式の収支を算出した. 図中の(A_t) は非定常項、(A)は移流項、(Π)はスケール間非線形輸送項、(Π_U)はス
ケール間線形輸送項、 (\mathcal{P})は生成項、 (\mathcal{T}_u)は乱流輸送項、(\mathcal{T}_p)は圧力拡散項、(\mathcal{D}_x)は空間拡 散項、(\mathcal{D}_r)はスケール間拡散項、(ϵ_r)は消散項である. 図3に $X/T_0 = 6$ での主流方向距離に 対する各項の分布を示す. 図より、いわゆる平衡乱流で見られる (Π) $\approx -(\epsilon_r)$ の関係が成り 立たないことがわかる.



図3: X/T₀=6におけるスケール間輸送の主流方向距離に対する分布.

3. 研究目標の達成状況

本年度は、上記の角柱後流に対する数値シミュレーションおよび統計解析に加えて、複雑 旋回噴流場に対する考察も行った.また成果の一部は下記のように論文・学会で発表された. したがって、順調に研究が遂行されたと言える.

4. まとめと今後の課題

プロジェクト最終年である来年度は、上記のような速度場に対する解析に加えてスカラ場や 化学反応を伴う流れ場における乱流輸送現象の解明を通して、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.

- 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>高牟礼光太郎</u>, <u>酒井康彦</u>, <u>伊藤靖仁</u>, <u>岩野耕治</u>: 乱流混合層中の大規模構造が乱流プラント ル数に及ぼす影響,可視化情報学会論文集, 39 巻 4 号, (2019), pp. 1-10.
- [2] Z. Yi, K. Nagata, Y. Sakai, T. Watanabe: Extreme events and non-Kolmogorov -5/3 spectra in turbulent flows behind two side-by-side square cylinders, J. Fluid Mech., Vol. 874, (2019), pp. 677-698.
- *[3] <u>P. Kadu, Y. Sakai, Y. Ito, K. Iwano, M. Sugino, T. Katagiri, T. Hayase, K. Nagata:</u> Application of spectral proper orthogonal decomposition to velocity and passive scalar fields in a swirling coaxial jet, *Phys. Fluids*, Vol. 32, (2020), 015106.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[4] <u>Y. Sakai, Y. Ito, K. Iwano, T. Hayase, Z. Yi, J. Yu, P. Kadu</u>: Fluid dynamics and energy/scalar transport in coexisting flows of turbulence and non-turbulence: Cases of dual-wakes, grid-turbulence and complex jet, *Proc. of the 19th International Symposium* on Advanced Fluid Information (AFI-2019), Sendai, (2019), CRF-94, pp. 198-199.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	.1191101
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2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****, 後藤 喜一*****
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*******, 奥田 晃久*******
高山 哲生*******, 水上 孝一*******
*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, *****山形県工業技術センター

レター

レター

・************
・*********
・***********
・********
・******
・*******
・*******
・*******
・*******
・******
・******
・******
・******
・*******
・******
・****
・****
・*****
・****
・***
・****
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・
・

†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31年度は、大規模な展示会に出展し、東北における研究会の活動とその成果のアピールを行った.また、航空宇宙産業で用いられる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) メッセナゴヤ 2019

- 日 時 : 令和1年11月6日(水)~9日(土)
- 場 所 : ポートメッセなごや 東北・北海道航空宇宙産業パビリオン
- 来客者数: 149名

(2) 第九回 CFRP 研究会講演会

- 日時: 令和1年12月23日(月) 14:30-17:45
- 場 所 : 東北大学 さくらホール会議室
- 参加者数: 72名

講 演 :

「航空機複合材構造の修理技術について」 宇宙航空研究開発機構 主任研究開発員 星 光 先生 「愛媛県・炭素繊維加工事業の創出活動」 愛媛県中小企業団体中央会コーディネーター 兼えひめ産業振興財団顧問 教授 樋口 富壮 先生 「コンポジットハイウェイコンソーシアム令和元年度の取組について」 公益財団法人中部科学技術センタープロジェクトマネージャー 渡辺 裕吉 先生

(3) 第二回 CFRP 研究会技術懇談会

日時: 令和1年12月23日(月) 11:30-14:15

場 所 : 東北大学 片平北門会館エスパス

参加者数: 37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9回にわたって行った研究集会を通して CFRP 製品の保全技術に関する産学共同研究が開始され, 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. 参画企業の中でも着々と事業化が進められていることから,本研究集会の目的は十分達成されたものと考えられる.

4. まとめ

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9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.フェーズ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た.国内における自動車や航 空宇宙産業などにおいてリードする川下企業と東北域内における企業・大学・公設試・県の 連携の橋渡しという役割を担い、本研究集会は東北地方の産業振興と学術発展に貢献したも のと考える.

- 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・ロ頭発表等
- [1] 高木敏行,小助川博之,孫宏君,橋本光男:CFRP 複合材の電磁現象を用いた非破壊検査, 日本社会基盤安全技術振興協会第3回あんしん協勉強会,横浜,(2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I102
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2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****,楠 秀遥****,宮川 知大****
*信州大学工学部,**東北大学流体科学研究所
****信州大学・大学院
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は軽量であり高強度であるため、航空・宇宙部品や F1等の部品に多く用いられてきている.しかし、CFRP はオートクレーブなどの成形装置を用いて温度と圧力を制御して成形する必要があるため、成形に時間が必要である.今後、炭素繊維強化プラスチックを自動車などの部品に使用するためには、成形時間を短縮化してコストを削減させる必要がある.近年、熱可塑性樹脂を母材とした炭素繊維強化プラスチック(CFRTP)が開発されてきている.CFRTP は加熱すると軟化するため、これまで自動車部品を成形してきたプレス成形やせん断加工などの塑性加工が可能である.従って、コスト削減が期待されている.しかし、熱可塑性樹脂は変形しやすい材料であるが、炭素繊維は変形しにくい材料であるため、その差から内部に空孔が発生する.

本研究では、成形温度を変化させてアルミニウム部品と CFRTP を塑性加工した際の内部 欠陥の発生メカニズムを明らかにすることを目的とする.

2. 研究成果の内容

図1にCFRTPとA5052の接合試験片,図2にCFRTPとA5052の接合板の概略を示す.





図1: CFRTP とA5052の接合試験片の概略

図 2: CFRTP と A5052 の接合板の概略

超音波映像装置及び透過型x線検査装置を用いてCFRTP-A5052接合体界面の超音波映像 観察とx線観察を行ない,内部欠陥の確認可否について検討した.超音波探傷試験の検査結 果を図 3,図4に示す.試験は50MHz探触子で行なった.x線検査結果を図 5,図6に示 す.x線の管電圧は60~130kV,管電力は1.5Wに設定した.それぞれの結果の左側に検査 方向を示す.



超音波探傷では、接合面と直交方向からの観察で確認できるが、0.1mm 程度の僅かな空隙の確認は難しい. x線検査では、接合面と水平方向からの観察で確認できるが、樹脂の透過率も高いため、欠陥と樹脂リッチの差が現れにくい. 接合片の観察を2つの方法で行ったが、欠陥である0.1mm 程度の空隙の観察は、いずれの方法でも困難であることがわかった.

3. 研究目標の達成状況

試験片の超音波探傷実験, x 線検査を実施したが, 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、今後も内部欠陥の非破壊検査方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)
- *[1] 小平裕也,小林信彦,小平直史,武井敦子,中山昇: CFRTP の熱膨張を利用した接合に及 ぼすオートクレーブ成形条件の影響,塑性と加工,60・705 (2019), pp. 289-294.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[2] <u>Yuya Kodaira</u>, Toshiyuki Takagi, Hiroyuki Miki, Hiroyuki Kosukegawa, <u>Noboru Nakayama</u>: Internal defect of plastic-fabricated Carbon Fiber Reinforced Thermo Plastics, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-44, pp. 88-89.
- [3] Yuya Kodaira, Nobuhiko Kobayashi, Naofumi Kodaira, Atsuko Takei, Noboru Nakayama : Development of joining method by cylindrical pin using thermal expansion of CFRTP, 14th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Tsukuba, (2019), p. 20.
- [4] 小平裕也,小林信彦,小平直史,武井敦子,中山昇:オートクレーブ成形した熱可塑性 CFRP とアルミニウム合金の接合,2019 年度塑性加工春季講演会,京都,(2019), pp. 157-158.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19I106
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	3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、水中ストリーマガスチャネル内の圧力の評価を行うための計測法の開発に取り 組んだ.水中に発生させた熱点源による気泡は、キャビテーション気泡の基礎研究において 中心的な役割を担ってきたが、この気泡内の圧力は今まで計測されていない.数値解析など においても、最大径において飽和蒸気圧を与えるなどの扱いになっていることから、気泡内 の正確な圧力の測定が待たれている.これより、最初にレーザー収束誘起気泡内の圧力測定

法の開発を進めた. Fig. 1に気泡内 圧力計測の実験装置を示す. 立方体 の容器の各面に窓を設け,レーザー 収束光の導入や電極の挿入,背景光 の入力と高速度カメラによる観察が 行えるようにした.最初にレーザー 光発信直前に電極に電圧を印加し, レーザー収束光により気泡が発生・ 成長し,気泡内の圧力が放電開始電 圧まで低下すると放電が発生する. このとき,電極が気泡内に露出する ように調整する.放電開始電圧は, 圧力pと電極間距離dの積pdとの相 関があり,パッシェン曲線として知 られているが,放電開始電圧を計測



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

し、設定した電極間距離から圧力を求める手法を新たに考案した.ガス種により異なる曲線 となるため、今回は空気のパッシェン曲線を利用し、大気中で放電開始電圧と pd との関係を 測定し、Fig. 2 に示した. (a) は放電開始電圧, (b) は針電極近傍の電界強度を縦軸として示 した. これは、本実験では電極を平板とせず、針状の電極を用いたことから、針近傍の電界 強度に対してのパッシェン曲線も必要であったためである. これらの結果は、概ねパッシェ ン曲線近傍のデータが得られたものの、針状ではなく平板状の平等電界下で再度実験する必 要があることが示された.

3. 研究目標の達成状況

本年度は、水中ストリーマの進 展における電荷の状態を理解す るため、ストリーマガスチャンネ ル内の圧力測定に向けた、キャビ テーション気泡内圧力測定法の 開発を進めた.これにより、パッ シェン曲線を利用した圧力測定 法の可能性が高まり、来年度は平 板間における圧力測定の検証を 行うことになった.これより、本 年度の目標は達成できたと考え ている.

4. まとめと今後の課題

本年度は、圧力測定法の考案と 予備実験を行ったが、次回は秒土 電界が得られる手法についてさ らに検討して行く予定である.



Fig. 2 (a) Breakdown voltage, and (b) electric field strength at the breakdown, against *pd*.

- 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] S. Uehara, S. Kamata, T. Nakajima, Y. Iga, <u>S. Kanazawa</u>, and T. Sato: Development of Pressure Measurement Method in a Laser-Induced Cavitation Bubble, *Proceedings of* the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2019), Sendai, (2019), CRF-67, pp.144-145.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許)	なし	
(受賞)	なし	
(マスコミ	発表)	なし

2. 研究成果報告書 <萌芽公募共同研究>

課題番号	J19H001
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2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 法であり、多分野での応用が進んでいる.個々の課題に対するデータ同化の適用は進んでい 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.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する.

2. 研究成果の内容

共通の流体問題を設定し、4次元変分法おとびアンサンブルカルマンフィルタによる流れ 場の推定に関する比較を行った.ここでは参照数値解析の結果を疑似的な計測値として扱う 双子実験を行った.図1に解析した角柱まわりの低レイノルズ数二次元非圧縮性粘性流れ場 を示す.角柱上流に渦を配置し、主流によって移流されて角柱に衝突する状況を解析した. データ同化としては渦の無い状態から推定を開始し、渦を再現するのが目的となる.

それぞれの手法でデータ同化を行い、図1で示すモニター点において主流方向速度成分を 抽出して結果を比較した.モニター点における主流速度およびその真値からの差の履歴を図 2に示す.4次元変分法では初期値推定を行っているので、渦の初期状態を再構成するのに 適した手法であることが、図2に示す誤差の小ささからもわかる.一方、逐次型手法である アンサンブルカルマンフィルタにとっては、移流する渦の情報から徐々に渦の位置や大きさ を推定しなければならず、推定初期の誤差はどうしても大きくなってしまう.したがって、 このような過渡的流れ場においては、4次元変分法などの変分型手法が適していると言える. 一方で、ここでは結果を示さないが、逐次型手法はカルマン渦のように周期的な現象を推定 するのに適している.







図2:モニター点における主流方向速度の履歴

3. 研究目標の達成状況

公募共同研究申請時の目的を達成することができた.

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の比較を角柱まわりの低レイノルズ数二次元非圧縮性粘性流れにおい て行った. 今後はそれぞれの手法に関して提案されている精度改善テクニックの効果を調べ 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)
- Shiku Hirai, Yuma Fukushima, Shigeru Obayashi, <u>Takashi Misaka</u>, <u>Daisuke Sasaki</u>, <u>Yuya Ohmichi</u>, <u>Masashi Kanamori</u>, <u>Takashi Takahashi</u>: Influence of Turbulence Statistics on Stochastic Jet-Noise Prediction with Synthetic Eddy Method</u>, *Journal of Aircraft*, Vol. 56, No. 6 (2019), pp. 2342-2356. DOI: 10.2514/1.C035465.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[2] <u>Takashi Misaka, Norio Asaumi, Seiji Kubo, Takeomi Ideta</u>, Shigeru Obayashi: Prediction of Film-Cooling Effectiveness based on Bayesian Model Calibration of SST Turbulence Model, *Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo*, Japan, (2019), IGTC-2019-061.
- *[3] <u>Takashi Misaka</u>, Shigeru Obayashi: Comparison of Data Assimilation Methods in Flow Problems, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-92, pp. 194-195.
- 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	J19H002
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2年目

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****

高木 保鑑***,大坪 咲智***,下山 幸治** *木更津高等専門学校機械工学科,**東北大学流体科学研究所 ***木更津高等専門学校専攻科機械・電子システム工学専攻 †申請者, **††**所内対応教員

1. 研究目的

近年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、表2に示すような3種類の塗布方 法①②③を考案し、膜厚を変化できるように した.

(2) 空気力測定

図1に本研究で使用した羽ばたき翼模型を 示す.この模型は、羽ばたき振幅 FA を0度 (固定翼)から30度まで任意に可変できる機 構を有している.主翼は、翼厚 ==1.5mm 一定 のABS 樹脂製であり、平面形状は、誘導抗力 を軽減することができる楕円形である.アス ペクト比 AR=8,主翼の根元部翼弦長 c=60 mm 固定であり、主翼は容易に交換可能であ る.DC モータ RS-540SH (マブチモーター) の回転がハイポイドギヤを介して、翼の羽ば たき運動に変換されている.本測定における

表 1: HardoLass 主成分

type	composition1	composition2
HardoLass	polysilazane	
0	compound (90%)	
HardoLass	polysilazane	
9	compound (40%)	
HardoLass	perhydropolysilazane	dibutyl ether
А	(3%)	(53%)

表2:塗布方法

Coating method	1	2	3
Brushing material	melamine sponge	both of brushing materials ① and ③	microfiber cloth
Coating film Thickness	2~3µm	1µm	~0.1µm

羽ばたき周波数 f=7Hz としている.本研究 では各コーティング条件について、それぞ れ迎角 α=0~30°まで2 度おきに 20 秒間の サンプリング時間で,空気力測定を3回実 施し、コーティング材の効果を調査した. 図2に揚力曲線を示す.この図を見ると, HardoLass 9①以外の途布条件において途 料塗布効果が確認でき, HardoLass O③の CLMAXは,塗料なしの場合と比較して17.6% の増加となっている.図3に抗力曲線を示 す. この図を見ると、迎角 α=0~24°まで の領域で、全てのコーティング条件が塗料 無しの C_d 値を下回る結果となった. 塗料無 しと比較して最も抗力低減効果が見られた のはO③であり、 $\alpha = 14^{\circ}$ において 30.6% 低減が確認できる.

3. 研究目標の達成状況

撥水性塗料の抗力軽減効果が定量的に示 され,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 料の空力特性改善実用化への可能性が高ま ったものと考えられる. 今後は, 改善効果 と表面形状, レイノルズ数との関係につい て汎用的な知見を得ていきたい.

- 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>T. Ishide</u>, <u>Y. Takagi</u>, <u>S. Otsubo</u>, <u>T. Kaeriyama</u>, K. Shimoyama and S. Obayashi: Aerodynamic drag reduction using a coating material in flapping wing, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, CRF-1, (2019), pp. 2-3.
- *[2] <u>T. Ishide</u>, <u>Y. Takagi</u>, <u>S. Otsubo</u>, K. Shimoyama and S. Obayashi: Effect of span-wise and chord-wise flexibility in a flapping flight, *The 30th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP30)*, Halong, Vietnam, (2019).
 - [3] 石出忠輝,高木保鑑,大坪咲智,歸山智治,下山幸治,大林茂:羽ばたき飛行における翼幅 及び翼弦方向の柔軟性の効果,日本航空宇宙学会第 57 回飛行機シンポジウム,(2019), JSASS-2019-5029.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし







図3:抗力曲線

課題番号	J19H003
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

バイオミメティクス技術による翼端渦の抑制を目指した翼端デバイスの空力設計 Aerodynamic Design of Wingtip Devices for Suppression of Tip Vortex Using Biomimetic Technology

森澤 征一郎*†, 大林 茂**†† *沖縄工業高等専門学校, **東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年,バイオミメティクス技術に注目が集まり,様々な産業・業界でその利用が検討されている.これは航空業界でも同様である.本研究でもこの技術に注目し,鳥類の翼端を模擬したwing grid によって誘導抵抗の低減効果の実証を CFD よって行う.具体的には,離着陸・巡航条件を念頭に置いた低速域と高速域での空力特性,及び流れ場の関係を考察し,最終的には誘導抵抗低減かつ空力特性に優れた効率の良い形状の探索を目的とする.

2. 研究成果の内容

本研究は、以下の図1にあるような半裁形状を対象として、計算条件は主流に対するマッ ハ数を0.74と0.20、レイノルズ数を6.25×10⁶とした.なお、wing grid には上反角など付 加していない平面形状を検討対象とした.これは過去のwing grid に関する研究が非平面形 状から出発しており、非平面な形状に対する効果を調べる基本的な形状の検討がなされてい ないためである.また、比較対象には同じスパン長さの矩形翼を採用した.これらの形状の 翼型には旅客機の標準モデル NASA-CRM の CRM.airfoil を用いた.

図2に wing grid と矩形翼を比較した空力特性の結果を示す.図2(a)よりマッハ数0.20 において, wing grid の揚力傾斜が矩形翼のよりも大きく,高迎角で高い揚力係数を示す. 一方,マッハ数0.74 ではそれの差が両翼でなくなり,ほぼ同程度の値を示した.また,図 2(b)より wing grid の抗力係数が全迎角で大きな値を示した.この大きな抗力係数を示した 理由を調べるために抗力分解を実施し,圧力抗力及び誘導抗力の比較を図3及び図4に示す. その結果,これらの図より wing grid の平面形状は矩形翼の誘導抵抗と小さく,圧力抗力の 影響が大きいことを明らかにした.



図1: wing grid の平面寸法,及び計算格子



図3:抗力分解の結果1 (圧力抗力)



3. 研究目標の達成状況

本研究で対象となる平面形のwing grid と矩形翼の比較を行うことができた.これにより, 非平面な形状に対する効果を調べる基本的な形状の空力特性を明らかにすることができた. しかし,今後の翼端デバイスの空力設計における新たな提案に向けてパラメトリックスタデ ィに関しては zone1 と zone2(特に wing grid 間の隙間)での格子解像度を調整するために 時間を要したため達成できていない. [達成度 60%]

4. まとめと今後の課題

「3. 研究目標の達成状況」で述べたように, wing grid の形状を変化させた際のパラメトリックスタディにまで至っておらず, 今後は形状の影響を考慮しつつ, 非平面形状としての効果についての評価を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・口頭発表等
 - *[1] <u>S. Morizawa</u> and S. Obayashi: Effect on Wing Grid for the Aerodynamic Design, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2019), CRF-68, pp. 146-147.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19H004
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

湿り蒸気の流動状態の解明 Elucidation of the Flow State of Wet Steam

丹澤 祥晃*†,大木 眞一* 石本 淳**†† *日本工業大学,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

熱エネルギー供給媒体として、産業革命以来広く活用されている飽和水蒸気の、乾き度と 気液二相流としての流動状態との定量的な相関関係、および流動様式の解明を目的とする. 混相流としての飽和蒸気は、一般的な気液二相流とは物理的なふるまいが異なり、温度圧 力により流動状態が変動することから、取り扱いが難しく、気液二相流としての流動様式の 解明が進んでいないのが実情である.

本研究は、飽和蒸気の流動状態を定量可視化することを実現して、ボイラから供給される 蒸気量と2次側で消費されるエネルギー量との関係を明らかにすることにより、産業界での 飽和蒸気使用時のエネルギー効率の大幅な向上、CO₂削減に貢献することを目指す.

2. 研究成果の内容

本研究においては、飽和蒸気流の代表的な事例として水平管中の流動状態を調査する.先行研究では主に空気・水系の気液二相流の流動状態が調査され、流動様式として分類されている.その内、水平管の基準流動様式として図1に示す6種類の流動状態がまとめられている.二相流中の気相体積量が増加するにともなって、流動様式が(a)から(f)のように遷移することが知られている.このような流動様式が観察される範囲を座標上に図示した、いわゆる流動様式線図として図2に示す線図がある.ここに、横軸 V_{SG}=気相の見かけ速度、縦軸 V_{SL}=液相の見かけ速度である.

本研究の実験装置,および実験方法は以下のとおりである.飽和蒸気を生成するために図 3 に示すような実験装置を構成した.図3において,ボイラから生成した飽和蒸気は過熱器 を通過することにより過熱蒸気状態となる.次に熱交換器部分で蒸気管の外側に冷却水を供 給することにより一定の飽和蒸気の流動状態に制御する.このとき,飽和蒸気の乾き度は熱 交換器における蒸気と冷却水との間の熱交換量を計算することにより算出する.水平管に流 出された飽和蒸気を可視化するため,流路にサイトグラスを設置した.サイトグラス部にて 観察される流動状態は,図4に示すように高速度カメラを使用して詳細に解析した.

3. 研究目標の達成状況

上記2に述べた実験装置,および実験方法により図5に示すような流動様式画像を観測した.またサンプルデータを図2の流動様式線図を適用した場合,測定時における飽和蒸気の状態量から層状波状流(図1(b))の領域であることが分かった.



図1 水平管の基準流動様式

(出典:気液二相流技術ハンドブック、日本機械学会)



| Hor

図2 流動様式線図



(出典:J.M.Mandhane et al. A Flow Pattern Map, 1974)

図4 サイトグラス側面に設置した高速度カメラ (図3中央部に示す水平管部分)



図3 飽和蒸気の実験装置

- 図 5 流動様式サンプル画像 (カメラ仕様: FASTCAM NOVA、Max. 解像度 1024X1024、撮影速度 6400 コマ/秒) (水平管サイズ 40A、飽和蒸気流量 357 kg/h 、蒸気圧力 0.68 MPa 、乾き度 0.906)
- 4. まとめと今後の課題

飽和蒸気の流動状態を気液二相流として扱うために,先行研究で調査されている空気・水 系の流動様式に適用することが妥当と考える.今後,飽和蒸気の乾き度等の状態量を制御し て流動様式を詳細に調査,解析する.

- 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
 - S. Oki, Y. Tanzawa and J. Ishimoto: Flow Pattern of Saturated Steam at Certain Dryness, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS1/3-3, pp. 168-169.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19H005
Classification	Exploratory collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Numerical Analysis of a Morphing Jet-Flap under Ground Effect

Edyta Dzieminska*†, Shigeru Obayashi**†† Yuki Kamiyama*, Shota Hanada*, Aiko Yakeno**, Yoshiaki Abe** * Department of Engineering and Applied Sciences, Sophia University **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this project is to verify the effect of the combination of morphing flaps and pneumatic control systems for high lift devices on amphibious aircrafts and STOL aircrafts.

2. Details of program implement

In this research, lift characteristics of morphing flap models were calculated using a CFD solver, ANSYS Fluent. Morphing flap geometries were generated by deforming the NACA23012-slotted flap model extracted from NACA's experiment data.

Firstly, lift characteristics of morphing flap models were calculated changing flap angle and morphing angle as shown in Figure 1(a). Maximum lift coefficient increased as flap angle and morphing angle increased but when they were set above a certain limit, the lift slope decreased at low angle of attack. In order to prevent boundary flow separation and gain better lift characteristics, propeller slipstream was applied into morphing flap by configuring actuator disk model as shown in Figure 1(b).



Figure 1 : Calculation setups

Figure 2 shows the comparison of lift characteristics of morphing flap with the propulsion system. It can be seen that lift coefficient of morphing flap with the propulsion system continues to increase until the angle of attack becomes about 9 degrees. Moreover, the decrease of lift coefficient over the stall angle seems to get slower.

Figure 3 shows the flow velocity vector around the morphing flap models with and without propulsion where the angle of attack is 2.5 degrees. In the model of Propulsion 16.7 hPa, Figure 3(b), the boundary flow separation point shifted backward by the accelerated flow. The slipstream seems to delay the boundary flow separation on the morphing flap which is set for high flap angle and high morphing angle.



Figure 2 : Lift characteristics of morphing flap with and without the propulsion system (Flap angle: 20 deg, Morphing angle: 30 deg)









Figure 3 : Flow velocity vector around the morphing flap (Flap angle: 20 deg, Morphing angle: 30 deg, Angle of attack: 2.5 deg)

3. Achievements

Calculation results showing lift enhancement by the morphing flaps and the pneumatic control devises which were stated in the application form were gained. More analysis is needed to search for the optimized morphing flap geometries.

4. Summaries and future plans

In this project, qualitative observations of the two-dimensional lift characteristics of morphing flaps and pneumatic control devises were obtained. Assuming these systems applying into the design of amphibious aircrafts or STOL aircrafts, three-dimensional analysis is needed for estimating taking-off and landing 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>Y. Kamiyama, S. Hanada, E. Dzieminska</u>, S. Obayashi, A. Yakeno and Y. Abe: 吹き 出し制御による高揚力装置に適応したモーフィングフラップの数値解析 (In Japanese), *Proceedings of the 57th Aircraft Symposium*, Shimonoseki, (2019), JSASS-2019-5061.
- *[2] <u>Y. Kamiyama, E. Dzieminska, S. Hanada</u>, A. Yakeno, S. Obayashi and Y. Abe: Numerical Analysis of Morphing Flaps on High-lift Devices with Pneumatic Controls, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-69, pp. 148-149.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

2. 研究成果報告書 <国際連携公募共同研究プロジェクト>

International multiple collaborative research		
Project code J19R001		
Subject area	Environment and energy	
Research period	April 2019 ~ March 2020	
Project status	1st year	

Micro-Combustion for Micro-Tubular Flame-Assisted Fuel Cell Power Generation

Jeongmin Ahn*†, Kaoru Maruta**††, Ryan Milcarek***†† *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***School for Engineering of Matter, Transport and Energy, Arizona State University †Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

During the IFS Collaborative Research Project 2018, natural gas was investigated as a fuel for micro-combustion and flame-assisted fuel cell (FFC) power and heat cogeneration. Natural gas showed potential for high electrical efficiency (25%) and power density (350mW.cm⁻2) and further improvements are expected with additional optimization. Some of the previous work resulting from the IFS Collaboration has been published recently [1,2]. This technology has further potential to be applied in stationary and portable technologies requiring power, but many of these applications utilize fuels like liquefied petroleum gas (LPG) or higher hydrocarbons. Currently no research has been conducted on butane or higher hydrocarbons for use with the FFC for power generation. To conduct this research this project will expand the Syracuse University-Tohoku University collaboration to include Arizona State University and create the Syracuse University-Tohoku University-Arizona State University collaboration. The work aims to analyze higher hydrocarbons (e.g., butane) that have not previously been investigated for use in the micro-combustion and FFC power generation concept.

2. Details of program implement

Butane/air mixtures at different equivalence ratios were analyzed using chemical equilibrium computations. Specifically, equivalence ratios ranging from stoichiometry to an equivalence ratio of 5 were investigated under constant enthalpy/pressure and constant temperature/pressure conditions. The concentrations of hydrogen, carbon monoxide, carbon dioxide, water, nitrogen and other equilibrium species were quantified. Micro-combustion of butane/air was investigated in a micro-flow reactor with controlled temperature profile for temperatures ranging from 700-1000°C. The concentration of exhaust species was assessed with a gas chromatograph and compared with chemical equilibrium calculations. Yttria-stabilized zirconia anode, electrolyte and cathode materials were prepared using extrusion and dip coating techniques. After drying, each layer was sintered to appropriate temperatures. Silver was used for current collection on the cathode. The long-term performance while operating in butane/air micro-combustion exhaust was assessed. The anode was assessed with the current-voltage method and electrochemical impedance spectroscopy during testing in the butane/air micro-combustion exhaust. The currentvoltage method was conducted using a Keithley 2460 source meter and with electrochemical impedance spectroscopy (EIS).



Figure 1 : n-butane/air microcombustion exhaust and SOFC polarization and power density curves at equivalence ratios from 1.5-4.5.

3. Achievements

A FFC was integrated with a micro flow reactor with controlled temperature profile to reform n-butane fuel into syngas at high equivalence ratios using heat recirculation. The FFC was able to produce a high power density of 300 mW.cm⁻² using a total fuel/air flow rate of 50 mL.min⁻¹ at an equivalence ratio of 3.5. When exposed to the high amounts of fuel available at high equivalence ratios, the fuel cell had a high fuel utilization of >40%.

4. Summaries and future plans

A high power density, electrical efficiency, and fuel utilization were achieved with nbutane 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 second years' work were published in an international peer reviewed journal[1].

- 5. Research results
- Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 [1] <u>R. J. Milcarek</u>, H. Nakamura, T. Tezuka, K. Maruta, and <u>J. Ahn</u>: Investigation of Microcombustion Reforming of Ethane/Air and Micro-Tubular Solid Oxide Fuel Cells, *J. Power Sources*, Vol. 450, (2020), 227606.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - *[2] <u>B. B. Skabelund</u>, H. Nakamura, K. Maruta, <u>J. Ahn, R. J. Milcarek</u>: Microcombustion of n-butane for power generation applications, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2019), CRF-R1, pp. 130-131.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

International multiple collaborative research	
Project code	J19R003
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd 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 main goals of the project are to conduct research aimed at the development of clean and efficient energy technologies and to train highly qualified specialists in this field. The research activities will be concentrated at fundamental study of combustion waves in porous media and micro channels, development of effective and eco-friendly methods of hydrocarbon fuels burning and new porous materials production using self-propagating high temperature synthesis methods.

2. Details of program implement

Four Russian teams and one team from IFS performed the complementary researches. The participants discussed current scientific problems related with project at the international conferences ASPACC 2019 (Fukuoka, Japan) and ICFD 2019 (Sendai, Japan). 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 served for discussion and approbation of the scientific results obtained by the 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 and theoretical study of flame in microsystems and a study related with flammability limits of lean premixed gas flames. The team from Moscow developed theoretical approach to describe nonlinear phenomena in combustion occurring in microsystems. The team from Novosibirsk dealt with development of effective numerical algorithms for modeling of gas combustion in micro channel systems and porous media. The Tomsk team developed special materials for porous burners using by self-propagating high temperature synthesis methods.

3. Achievements

The project proposes to use micro burning technologies to create environmentally friendly porous radiative burners and to develop new micro combustion applications aimed at obtaining fundamental knowledge on the flame structure. Laminar gas flow with controlled characteristics, homogeneous composition of the mixture in the cross section of the micro channel, as well as the relative simplicity of the organization of combustion at elevated pressures and initial temperatures, create advantages in studying of the flame structure based on micro combustion, compared with traditional methods. The part of the studies were focused on the flame propagation and stabilization in the planar micro channels. The planar geometry is convenient to investigate flame structure by optical methods, to study of the flame instabilities, quenching and ignition in turbulent flows. Team from **Far-Eastern Federal University** in collaboration with **Lebedev Physical Institute RAS** (**LPI RAS**) team obtained the following results concerning gas combustion in planar micro channel [1]. The hydrodynamic instability of a flame propagating in the space between two parallel plates in the presence of a gas flow is studied by linear stability method. The



scheme is shown in Figure 1.

Figure 1: Scheme of the flame in a planar channel with gas flow. Indexes 1 and 2 denote regions of combustible mixture and combustion products, respectively. Large arrows show direction of the gas flow. The curved tape schematically shows the flame front in the upper figure. The curved lines in two bottom figures are flame fronts [1].

The linear analysis was performed in the framework of a two-dimensional model that describes the averaged gas flow in the space between the plates and the perturbations development of two-dimensional combustion wave. The model includes the parametric dependences of the flame front propagation velocity on its local curvature and on the combustible gas velocity averaged along the height of the channel. It is assumed that the viscous gas flow changes the surface area of the flame front and thereby affects the propagation velocity of the two-dimensional combustion wave. In the absence of the influence of the channel walls on the gas flow, the model transforms into the Darrieus-Landau model of flame hydrodynamic instability. The dependences of the instability growth rate on the wave vector of disturbances, the velocity of the unperturbed gas flow, the viscous friction coefficients, and other parameters of the problem are obtained. It is shown that the growth rate of disturbances is larger than the growth rate predicted by the classical Darrieus-Landau model for a flame in free space in the case when the gas flow directed against direction of flame propagation. In the case when the flow of the combustible mixture moves in the direction of flame propagation, the growth rate of disturbances is smaller than the Darrieus–Landau model predicts. The possibility of the pulsating instability development in the case when the gas flow moves towards the flame is shown (see Figure 2). The pulsating instability can occur even for the mixture with Lewis number less than one, which is impossible for freely propagating flame.



Figure 2: The time dependencies of flame surface perturbations f (*solid line*), flame propagation velocity perturbations s_0 (*grey circles*) and perturbations of the pressure drops $p_2 \cdot p_1$ at the flame front (*hollow circles*).

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. For the understanding of ball-like flame behavior in counterflow field, transient three-dimensional computations with thermal-diffusion model were conducted by **IFS Tohoku** and **FEFU's** teams for near lean-limit low-Lewis number mixtures [3]. Analysis of flame structure for non-spherical ball-like flame located its center at the stagnation point showed that the maximum temperature on the stagnation plane was higher than that on the counterflow axis because of the small difference between the flame curvatures on the stagnation plane and that on the counterflow axis. With the increase of stretch rate, the maximum temperature of the non-spherical ball-like flame on the stagnation plane increased and the position of maximum temperature got away from the stagnation point. On the other hand, the maximum temperature on the counterflow axis decreased and



Figure 3: The iso-surface of temperature for (a) non-spherical ball-like flame and (b) splitting ball-like flame. Direction (B) corresponds to the counterflow axis and the others (A) and (C) lie on the stagnation plane.

the position of maximum temperature got closer to the stagnation point. Existence of unburned fuel was also confirmed near the stagnation point. Thus, net fuel velocity was newly introduced to evaluate the effect of the unburned fuel diffusion. The analyses on the peak positions of the net fuel velocity showed that the flame splitting occurs when the positions of the inner two peaks of the net fuel velocity are located outside of the reference flame ball radius (see Figure 3).

The idea of application of microflow reactor to verify the kinetic models of fuels combustion was proposed by participants of the project from FEFU and IFS Tohoku in previous work (*K. Maruta et al.*, Proc. Combust. Inst., 30 (2005), and others).

A new type of spiral microreactor was created by **FEFU's** team [4] using a quartz tube ~ 100 cm long with an inner diameter of 2 mm and an outer diameter of 4 mm. The diameter of the base of the spiral was 80 mm, the height was 60 mm. The geometric parameters of the spiral were selected so that the turns of the spiral did not overlap each other in the frontal and lateral projections. A flat cylindrical burner was installed at the base of the spiral, operating on a pre-mixed methane-air mixture. The photos of spiral microflow reactor with different points of view are shown in Figure 4.



Figure 4: The left photos is general view of spiral microflow reactor. The top view of the reactor is shown at right photo. The normal flame is pointed by a circle.

Thus, it was possible to construct a compact micro reactor with a very smooth temperature gradient, in which the maximum temperature is reached at the top of the spiral. Before experiments the study on temperature gradient determination was carried out. The temperature gradient was determined using a NEC TH9100WB thermal imager, which was mounted on top of the same axis with a spiral and the center of an external cylindrical burner. The measurements of the thermal imager were corrected according to the data obtained using a K-type thermocouple with a shell with a diameter of 320 µm during the measurement of the wall temperature at the base of the quartz spiral. The tip of the thermocouple was in direct contact with the heated wall and held in this position for several minutes to obtain an average temperature. The temperature of the tube varied from 500 to 1300K, and the length of the working area was approximately 85 cm. The flow inside the tube was laminar under atmospheric pressure. The position of the flame front was recorded focused at a mirror mounted above the studied spiral.

Studies have shown that the temperature distribution along the spiral tube is uniform. Processing of data obtained from the thermal imager showed that the wall temperature profile can be approximated by a linear function. Two combustion regimes were revealed in the inlet velocity range from 5 to 150 cm/s for stoichiometric methane-air premixture: a normal flame at the velocity rates from 39 to 150 cm/s, and unstable combustion regime with repetitive extinction-ignition dynamics at the velocity from 8 to 38 cm/s. On the other hand, the path length from ignition to extinction points in FREI regime increased more than 10 timesSpiral shape of microtube allows to achieve almost linear temperature gradient in the temperature range from 500 to 1300 K along the very long length of the quartz tube. The experiments shown that the path length from ignition to extinction points in FREI regime increases more than 10 times as compare with linear configuration of traditional microflow reactor. Thus the resolution and sensitivity of experimental setup became higher and allows detecting of the transition effects from normal flame to FREI regime and from FREI regime to weak flame.

Collaborative research of scientific groups from **ITAM SB RAS** and **TSC SB RAS** was dedicated to the development of a simple model with detailed chemistry for prediction of pollutant emissions of radiant cylindrical porous burners [2]. Development of such models is motivated by increasingly stringent environmental standards demanding intensive research including computations in the framework of reduced models. Previous results presented in (*A. Maznoy et.al*, Energy 160 (2018)) demonstrate low NOx and CO emissions of cylindrical radiant burners fed by natural gas/air mixtures. The concentration of NOx in combustion products is 10–50 ppm and CO – 2–50 ppm depending on equivalence ratio and firing rate. However the possibility of further reduction of pollutant emissions by fuel modification by relatively small percentage of additives are still of great interest. In this study we propose a simple model with detailed chemistry for predictions of NOx and CO emission from cylindrical porous burners. The effect of firing rate, equivalence ratio and percentage of such additives as H₂, O₂ and H₂O is studied in the frame of the proposed model and compared with experimental data.

Simplified model is based on the chemical reactor network concept which was originally developed for prediction of gas turbine emission (*M. Falcitelli et al.*, Appl. Therm. Eng. 22 (2002)). Combustion processes in the inner hollow of the cylindrical radiant burner is modelled by laminar premixed flame. The processes inside the porous shell are described by 0-dimensional constant pressure perfect stirred reactor. Motion of combustion products through the exhaust pipe towards the probe location also describes by constant pressure reactor. Numerical simulations [2] have demonstrated that accounting for the processes in the exhaust pipe which include low temperature CO oxidation is very important for accurate prediction of CO emission. Low computational costs of the proposed model allow to apply it in a wide range of problem parameters and examine big variety of combustible mixtures with different additives.

Figure 5 demonstrates dependencies of NOx (left) and CO (right) emission on equivalence ratio obtained for firing rate $FR = 260 \text{ kW/m}^2$ by means of experimental (marked lines) and numerical (solid lines) studies. All mole fractions in Fig. 5 are converted to dry basis and corrected to 0% O₂ level. Dependencies obtained for firing rates 160 and 420 kW/m² are similar to those presented in Figure 5.

Both numerical and experimental data demonstrates decrease of NOx emission in the case of hydrogen additive and increase of NOx concentration if the oxygen enriched oxidizer is used. Analysis of the results obtained at different firing rates shows that numerical and experimental results on NOx emission are also coincide in conclusion that effect of different additives becomes more prominent for near stoichiometric mixtures. Although the numerical results obtained in the frame of significantly simplified model cannot provide exact quantitative information on variation of NOx concentration for different additives these results allow to predict the trends of these variations. Moreover, numerical results demonstrates the capability of the model in the accurate enough prediction of characteristic values of NOx emission. An order of magnitude of CO emission as well as trends of its variation with variation of mixture composition, equivalence ratio and firing rate are also well described by reduced model. Herewith, results of numerical simulations show that accounting for the processes in the exhaust pipe is of vital importance for accurate enough predictions of CO emission. However, it is not the case for NOx emission which was found insensitive to the processes occurring with combustion products after they leave the porous burner. This is due to the intensive low temperature CO oxidation taking place in the exhaust pipe, while NOx is mainly formed in the porous matrix behind the flame front.

Numerical and experimental results show that hydrogen additive results in decrease of CO emission in the entire range of equivalence ratios (Fig. 4b). For $CH_4 + (25\% O_2 + 75\% N_2)$ mixture CO concentration is less than reference value obtained for CH_4 -air mixture at small equivalence ratios and higher than the reference value for near stoichiometric mixtures. Numerical results qualitatively reproduce this experimentally found trend.



Figure 5: Experimental (marked lines) and numerical (solid lines) dependencies of NOx (a) and CO (b) emission on equivalence ratio obtained for firing rate $FR = 260 \text{ kW/m}^2$ [2].

Radiation efficiency and CO/NOx emission of hollow cylindrical Ni-Al radiant burner run on methane-air mixture modified with hydrogen and oxygen were investigated as a function of equivalence ratio and burner firing rate by **FEFU's** and **TSC SB RAS** research teams [5]. H₂ and O₂ addition was found to be beneficial for expanding the lean limit of internal combustion mode, when the flame is stabilized under the surface of the burner. The findings have suggested that:

1). Hydrogen enrichment allows to extend the lean limit of internal combustion mode existence, reduce by half the CO emission at minimal firing rate, and NOx emission at maximal firing rate; up to 5% increase radiation efficiency at low and middle firing rates.

2). Oxygen enrichment at low firing rates allows to combust lean mixtures with 4 times reducing in CO emission while maintaining reasonable NOx emission and radiation efficiency. As it was shown in [5] the fuel mixture compositions and combustion conditions make it possible to decrease the NOx and CO emission and to

maintain high radiation efficiency.

The effect of curvature on the emergence of pulsating diffusive-thermal instabilities and dynamics of hydrogen-air flame oscillations was numerically studied by LPI RAS team within the model with detailed transport and reaction mechanism [6]. It was shown that there are two regimes of combustion front stabilization near the cylindrical burner: attached and detached flames, which emerge for mass flow rates smaller and larger than the mass flow rate in the freely propagating combustion wave. In the attached flame regime the curved cylindrical flame is less stable in comparison to the combustion front stabilized near the planar burner and this effect is more pronounced for the rich mixture compositions. In the detached flame regime the hydrodynamic perturbation imposed by the divergent flow significantly distorts the flow field in the product regions of the flame. As a result of this the radicals produced in course of the chain-branching reactions resides longer in the vicinity of the chain-branching region for the curved flame and the radicals have more time to recombine and release heat. The change in the flame structure in the detached flame regime due to the curvature effect significantly influences the flame stability characteristics: the critical pressure for the onset of instability and the frequency of oscillations increase with the decrease of flame radius. Thus in contrast to the case of the attached regimes in the detached regime the flame curvature has stabilizing effect.

4. Summaries and future plans

The results obtained by all teams give new fundamental knowledge on combustion in the porous media and micro channels and the outlined research plan was fulfilled in generally. The obtained results were presented at ICFD 2019 and submitted for publication in reviewed journals. The plan of the project teams includes continuation of gas combustion studies in small-sized flat channels to obtain fundamental knowledge of the combustion wave's 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. The future researches of the project teams 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)
- T. Miroshnichenko, V. Gubernov and S. Minaev: Hydrodynamic instability of premixed flame propagating in narrow planar channel in the presence of gas flow, *Combustion Theory and Modeling*, Vol. 24, No. 2, (2020), pp. 362-375.
- [2] <u>R. Fursenko, A. Maznoy</u>: A simple model with detailed chemistry for estimation of NOx and CO emission of porous burners, *Combustion Theory and Modeling*, Vol. 24, No. 2, (2020), pp. 262-278.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

- [3] T. Akiba, T. Okuno, H. Nakamura, Y. Morii, T. Tezuka, <u>R. Fursenko, S. Minaev, M. Kikuchi</u> and K. Maruta: Dynamic Behaviors of Flame Ball in Flow, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS2-20, pp. 216-217.
- [4] <u>A. Ponomareva, S. Mokrin, G. Uriupin and S. Minaev</u>: Flame Behavior in Spiral Microchannel, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS2-14, pp. 204-205.
- [5] <u>A. Maznoy, N. Pichugin, A. Kirdyashkin and S. Minaev</u>: Experimental Study of the Combustion of Oxygen and Hydrogen Enriched Natural Gas in a Cylindrical Radiant Burner, *Proceedings of 12th Asia-Pacific Conference on Combustion*, Fukuoka, Japan, (2019).
- [6] <u>V. Gubernov, V. Bykov, U. Maas</u>: Dynamics of the Burner Stabilized Hydrogen-Air Flames, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS2-15, pp. 206-207.
- *[7] <u>S. Minaev</u>, K. Maruta, <u>R. Fursenko</u>, <u>A. Kirdyashkin</u>, <u>V. Gubernov</u>: Microchannel Burners for Energy Production on the Basis of Microcombustion, *Proceedings of the* 19th International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Japan, (2019), CRF-R2, pp. 132-133.
- 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	J19R004
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

An Efficient Algorithm of Inlet Turbulence Generation for Cross-Platform-Based Parallel Computation and Its Application for Flows over a Low-Pressure Turbine Cascade

Yoshiaki Abe*†, Peter E. Vincent**††

Freddie D. Witherden***††, Brian C. Vermeire****††, Niki A. Loppi**††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Department of Aeronautics, Imperial College London
***Department of Ocean Engineering, Texas A&M University
****Department of Aerospace Engineering, Concordia University
†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

This project aims at developing an efficient algorithm of inlet turbulence generation for cross-platform-based parallel computation. The research is based on PyFR (www.pyfr.org), a high-order accurate Python-based computational flow solver. The High-fidelity scale resolving simulations of flow over a low-pressure turbine blade was also targeted using high-order flux-reconstruction schemes. In the simulation, the blade was mounted in a linear cascade with expanding end walls. The fifth-order accurate simulation at a chord-based Reynolds number of 90,000 will be formulated with laminar and turbulent inflow conditions on a mesh with over 2 billion solution points. Specifically, we will investigate differences between flow characteristics with laminar and turbulent inflow conditions, comparing with experimental data.

2. Details of program implement

The project was mainly performed by Tohoku University and Imperial College London with the support from Texas A&M and Concordia University. The primary goal is to develop the inlet turbulence generation algorithm for a cross-platform-based parallel computation, and the subsequent objective is a demonstration of the inlet turbulence generation algorithm to the flows over a low-pressure turbine blade. In this report, we start from the conditions for the flow simulation, and then explain the details of inlet turbulence generation including its algorithm and performance test. Finally, some preliminary results of flow simulations over the low-pressure turbine blade were presented.

3. Achievements

3.1 Flow conditions

This study focuses on scale resolving flow simulations over a highly loaded low-pressure turbine blade. The blade is mounted in a linear turbine cascade bounded by diverging end walls in the experiment. Specifically, this study focuses on single blade including end walls and assumes a periodic condition in the pitch-wise (vertical) direction. In the reminder of this report, subscripts 1 and 2 stand for values at the inlet and outlet plane. All the variables are normalized by blade chord length and total pressure at the outlet. We also assume $c_{PT_t} = \gamma/(\gamma - 1)RT_t = 3.5$ and $\rho_t = 1.0$ as a stagnation state, where $\gamma = 1.4$ is used. Inflow and outflow angles (normal to the radial direction at the centerline) are $\beta_1 = 131.0$ and $\beta_2 = 25.0$. Inlet and outlet Mach number is 0.3857 and

0.5543, respectively. A blade-chord-based Reynolds number is 90,000. The other inlet and outlet variables are derived from isentropic relations.

3.2 Domain and mesh

The computational domain and mesh are shown in Fig. 1. The inlet and outlet planes correspond to left and right boundaries of Fig. 1 (i.e., 0.92 and 0.78 time chord length upstream and downstream of the blade), respectively. The mesh is periodic in the pitch-wise (vertical) direction and prismatic in the span-wise direction. Both sides of the blade are bounded by end walls which are diverging in the downstream direction. The mesh consists of 19,560,000 hexahedral elements defined by a second-order shape function, which was generated using Gmsh.



Wake measurement line

Figure 1 : Computational domain and mesh.

3.3 Boundary conditions

The wall boundary condition is a no-slip adiabatic condition, which is applied to the blade surface and end wall surfaces. The outlet condition is a non-reflecting characteristic boundary condition based on Riemann invariant. The characteristic boundary condition does not explicitly enforce a static pressure, and thus a preliminary simulation was conducted with a pressure controller which adjusts the outlet pressure to match the experimental results. The corrected characteristic boundary condition (with pressure correction) is then applied in the physics simulation. In the pitch-wise direction, a periodic boundary condition is imposed.

Next, a laminar inlet condition is described. The inlet plane is bounded by end walls at $z = \pm hz = \pm 1.14391$. In this study, a Blasius boundary layer is assumed near the end walls, which is approximated by hyperbolic tangent function of the velocity magnitude according to Eq. (2) in [4]. Therefore, the inlet boundary condition is imposed as a total pressure profile as:

$$p_{t;\pm} = p \left\{ c_P T_t \middle/ \left[c_P T_t - \frac{1}{2} u_2^2 \left\{ \tanh\left(\frac{\eta_{\text{ref}} a_{bl}(h_z \pm z)}{\delta_{bl}}\right)^{n_{bl}} \right\}^{2/n_{bl}} \right] \right\}^{\gamma/(\gamma-1)},$$

$$(1)$$

$$p_{t;\text{mid}} = p \left\{ c_P T_t \middle/ \left[c_P T_t - \frac{1}{2} u_2^2 \right] \right\}^{\gamma/(\gamma-1)}, \qquad (2)$$

$$p_t = p_{t;+} + p_{t;-} - p_{t;\text{mid}}.$$
(3)

Note that c_{PTt} is a constant (= 3.5); z is a spanwise coordinate ($-hz \le z \le hz$); η_{ref} corresponds to 99% thickness of the boundary layer profile approximated by $[\tanh\{(a_{bl} \eta)n_{bl}\}]1/n_{bl}$, where η is a distance from the wall.

Finally, a turbulent inlet condition is introduced, based on the digital filter (DF) technique of Klein et al. [5,7]. The algorithm follows [6], which requires the integral length scale in each direction (I_x , I_y , I_z), the Lagrangian time scale ($\tau = Ix/U$ where U is the mean inlet streamwise velocity), and the prescribed Reynolds stress profile. The integral length scale and the Lagrangian time scale is estimated from the wake region in the laminar inlet simulation. The Reynolds stress profile is assumed as a function of z (spanwise coordinate), which has a form of :

$$R_{ij} = c_{ij} (\tanh [a_{ij}(z - h_z)] + \tanh[a_{ij}(h_z - z)] - 1)(z^4 + b_{ij}), \qquad (4)$$

where R_{ij} are parameters to be adjusted. These parameters are adjusted such that R_{ij} corresponds to the experimental profile. Specifically, R_{ij} is designed to have a turbulent intensity of 6% as a peak value in the vicinity of the end walls and 4% as a flat value around the centerline in the inlet plane. As such, the random velocity field is obtained, which is then superimposed on the laminar velocity profile as a ghost state of the Riemann solver in the boundary condition kernel. The code implementation of the velocity fluctuation will be described later. Next, a density fluctuation is introduced by the strong Reynolds analogy (SRA)[8]. The original idea is that the total temperature fluctuation is negligible in the sense of its Favre mean. More specifically, only the terms that are linear in the fluctuation are retained, which leads to:

$$c_P T_t'' = c_P T'' + u_1 u_e'', (5)$$

where u_e " is a fluctuation of the velocity component in the inflow angle. u_1 stands for the inlet velocity condition that was defined before. Equation (5) leads to:

$$\frac{\rho''}{\rho_1} = -\frac{T''}{T_1} = (\gamma - 1)Ma^2 \frac{u''_e}{u_1},\tag{6}$$

3.4 Flow solver, numerical schemes, and simulation procedure

Throughout this study, we adopt PyFR [2] to solve flows over the low-pressure turbine blade. PyFR solves the compressible Navier–Stokes equations using the FR scheme first proposed by [3]. PyFR is a Python based implementation of the FR approach. It is designed to be compact, efficient, and platform portable. PyFR is capable of operating on high performance computing clusters utilising distributed memory parallelism. All Message Passing Interface (MPI) functionality is implemented at the Python level through the mpi4py wrapper. To enhance the scalability of the code care has been taken to ensure that all requests are persistent, point-to- point and non-blocking. Further, the format of data that is shared between ranks has been made back- end independent. It is therefore possible to deploy PyFR on heterogeneous clusters consisting of both conventional CPUs and accelerators.

3.5 Inlet turbulence generation algorithm

As explained in the previous section, the flow solver is mainly written in Python and partly by Mako templating engine as a kernel that generates a CUDA code for GPU computations. In this section, we describe two different implementations of the velocity fluctuation. The algorithm basically follows Touber and Sandham [6]. Let us assume that the inlet plane exists in $y_{min} \le y \le y_{max}$ and $z_{min} \le z \le z_{max}$. The integral length scales in the inlet plane are given as I_y and I_z , and the Lagrangian time scale is defined as $\tau = Ix / U$. The algorithm is briefly summarized as follows.

- 0. Define $M_y \times M_z$ uniform grid points for a ran- 3. Compute velocity fluctuation on the random latdom lattice: $\phi_{m_{\phi}} = \phi_{\min} + m_{\phi} \Delta \phi$ $(\phi = y \text{ or } z)$ where $m_{\phi} = 0, \dots, M_{\phi} - 1$ and $\Delta \phi = (\phi_{\max} - \phi_{\max} - \phi_{\max})$ $\phi_{\min})/(M_{\phi}-1).$
- 1. Prepare $(2N_y + 1) \times (2N_z + 1)$ correlation coefficients: $b_{j_y j_z} = b_{j_y} b_{j_z}$ ($0 \le j_\phi \le N_\phi$, $N_\phi =$ $2n_{\phi} = 2I_{\phi}/\Delta\phi$, where

$$\tilde{b}_{k_{\phi}} = \exp\left(-\frac{\pi |k_{\phi} - N_{\phi}|}{n_{\phi}}\right),\tag{9}$$

$$b_{j_{\phi}} = \tilde{b}_{j_{\phi}} / \sqrt{\sum_{k_{\phi}=0}^{2N_{\phi}} \tilde{b}_{k_{\phi}}^2},$$
 (10)

2. Generate $3 \times (M_y + 2N_y) \times (M_z + 2N_z)$ random numbers at $t = t_i$ as $[r_l^{\psi,t_i}]$ $(l = l_y(M_z + 2N_z) +$ $l_z, 0 \le l_\phi \le M_\phi + 2N_\phi - 1$), where t_i stands for the current time step and ψ takes (u', v', w'). The random seed is fixed at each time step so that the random numbers are reproducible.

tice (uniform grid):

$$\psi_{m_y,m_z}^{\mathrm{uni},t_i} = \sum_{j_y=0}^{2N_y} \sum_{j_z=0}^{2N_z} b_{j_y} b_{j_z} r_{(m_y+j_y)(M_z+2N_z)+m_z+j_z}^{\psi,t_i}$$

$$(0 \le m_\phi \le M_\phi - 1)$$
(11)

4. Bilinear interpolation is performed to get velocity fluctuation at flux points on the inlet plane: $\psi_{f_i}^{t_i}$ (f_i stands for the *i*th flux point)

5. Temporal filter is imposed:

$$\psi_{f_i}^{t_i} = \psi_{f_i}^{t_i - 1} \exp\left(-\frac{\pi\Delta t}{2\tau}\right) + \psi_{f_i}^{t_i} \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{\pi\Delta t}{\tau}\right)},\tag{12}$$

6. Add velocity fluctuation to the mean (laminar) velocity profile.

The initial setup (0. Define a random lattice and 1. Prepare correlation coeffecients) is performed by CPU (coded in Python). The subsequent steps (2 to 6) are iteratively performed at each time step. The code implementation is as follows:

The CPU side is purely coded in Python whereas the GPU side is constructed as a kernel by Mako templating engine that generates a CUDA code (runtime code generation). We call this implementation non-FFT version. Note that the algorithm and implementation above assume a single domain for the simulation, which can be applied to the multiple do- main (via MPI) by constructing the random lattice for each domain. In the algorithm, the step 3 includes a convolution, and thus the use of the FFT could accelerate the computational speed. We constructed the following framework, which is called FFT version hereinafter:

These different implementations (non-FFT and FFT versions) are tested for a channel flow simulation. The important parameters are the size of the random lattice (N_{lattice} = $(y_{max}-y_{min})(z_{max}-z_{min})/(\Delta y \Delta z))$ and the stencil size of the convolution $(N_{conv.} = (2I_v/\Delta y)(2I_z/\Delta z))$. We set the ratio $N_{\text{conv}}/N_{\text{lattice}} \simeq 0.78$, which roughly corresponds to the actual simulation case. Figure 2 shows elapsed time of the FFT and non-FFT codes using different random lattice size while keeping the same ratio N_{conv}/N_{lattice}. The result shows the non-FFT version is faster than FFT version for a range of random lattice size, which indicates that the use of FFT is not effective for a larger random lattice case.



Figure 2 : Comparison of elapsed time using FFT and non- FFT code for velocity fluctuation.

Figure 3 shows preliminary results of our inlet turbulence simulation over the low-pressure turbine blade. This implies that in the laminar inlet simulation, the wake region formed by low momentum fluid becomes wider than experiments at the mid-span plane, which results in inaccurate prediction of a performance of the whole turbine cascade. The more detailed results were presented in [1] (Y. Abe et al.) of Research results section.



Figure 3 : Instantaneous flow fields of laminar (left) and turbulent (right) inlet cases after approximately 27 flow passes. The contour color shows a magnitude of density gradient.

4. Summaries and future plans

This project developed an inlet turbulence generation algorithm for a cross platform based parallel computation, and the algorithm was demonstrated to simulate flows over the low-pressure turbine blade. In this report, we started from the conditions for the flow simulation, and then explained the details of inlet turbulence generation including its algorithm and performance test. Two different implementations (non-FFT and FFT versions) have been tested for a channel flow simulation. The result shows the non-FFT version is faster than FFT version for a range of random lattice size, which indicates that the use of FFT is not effective for a larger random lattice case. Then, some preliminary results of flow simulations over the low-pressure turbine blade were presented. Two different inlet conditions have been examined, i.e., the laminar and
turbulent inlet conditions, which implies that the effect of turbulence is significant in the prediction of wake expansion behind the blade. In the future plan, the more detailed analysis for the simulation results will be conducted, and also an improvement in the accuracy of inlet turbulence (e.g., control of temporal correlations) will be focused. Furthermore, the implementation of the current flow solver (PyFR) on vector machine (NEC SX-Aurora) will be also considered in terms of the cross platform based implementation.

[1] P. E. Vincent, A. S. Iyer, F. D. Witherden, B. C. Vermeire, Y. Abe, Ralf-Dietmar Baier and A. Jameson, ICOSA- HOM2018, 9 Jul 2018.

[2] F. D. Witherden, A. M. Farrington, and P. E. Vincent, CPC, 185 (11), pp.3028- 3040, (2014).

[3] H. T. Huynh, AIAA-2007- 4079.

[4] O. Savas, Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul., 17 (10), pp.3772-3775, (2012).

M. Klein, A. Sadiki, and J. Janicka, J. Comput. Phys., 186, pp.652-665, (2003).

[5] Emile Touber and Neil D. Sandham, Theor. Comput. Fluid Dyn., 23, pp.79-107 (2009).

[6] Z. T. Xie and I. P. Castro, Flow Turbul. Combust., 81, (3), pp.449-470, (2008).

[7] S. E. Guarini, R. D. Moser, K. Shariff, and A. Wray, J. Fluid Mech., 414, pp.1-33, (2000).

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. Abe, <u>F. D. Witherden, G. Giangaspero, B. C. Vermeire</u>, A. S. Iyer, <u>P. E. Vincent</u>: High-performance Implementation of Inlet Turbulence Generation for GPU-based Parallel Computation, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2019), CRF-R4, pp. 208-209.
- [2] <u>F. D. Witherden</u>: Anatomy of a High-performance FR CFD Solver, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2019), OS2-55, pp. 286-287.
- [3] B. C. Vermeire, C. B. Kiyanda, H. D. Ng: Towards Turbulent Combustion using the High-Order Flux Reconstruction Approach, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2019), OS2-57, pp. 290-291.
- [4] N. A. Loppi, F. D. Witherden, P. E. Vincent: A High-Order Cross-Platform Incompressible Navier-Stokes Solver via Artificial Compressibility: Application to Submarine Hydrodynamics, *Proceedings of the Sixteenth International Conference* on Flow Dynamics, Sendai, Japan, (2019), OS2-61, pp. 298-299.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.

(Award)

- Best Presentation Award for Young Researcher, "A High-Order Cross-Platform Incompressible Navier-Stokes Solver via Artificial Compressibility: Application to Submarine Hydrodynamics", <u>N. A. Loppi</u>, December 3, 2019, The 16th International Conference on Flow Dynamics.
- [2] Best Presentation Award for Young Researcher, "Towards Turbulent Combustion using the High-Order Flux Reconstruction Approach", <u>B. C. Vermeire</u>, December 3, 2019, The 16th International Conference on Flow Dynamics.

(Press release) Not applicable.

International multiple collaborative research	
Project code	J19R005
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	3rd 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*****††, Adam J. Howkins**†† *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

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. We started the collaboration with Peter Kang at University of Minnesota. To combine the information between flow information from tracer response and the structure information from microseismid data, we attempted to characterize the relationship between flow properties and structure information by using topological data analysis. We introduce the collaboration research with Peter Kang in this report.

3. Achievements

3.1 Collaborative Seminar

Geothermal development requires comprehensive understanding of fluid flow in reservoirs by evaluating from various viewpoints. We held a seminar to introduce our recent research related to hydraulic, thermal, mechanical, and seismological perspective and discuss technologies and social acceptance required for sustainable geothermal development. We invited Kewen Li, Adam Hawkins, Ayaka Abe, Halldora Gudmundsdottir in geothermal group from Stanford University, and Keisuke Yoshida in Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Shuokun Shi, Yanayra Ortega Matienzo in Earth Energy System Lab, Mechanical Engineering from Tohoku University. The participants were eight Japanese and ten international students and researchers. The topics were as follows:

- 1. Opening: Optimization model for sustainable geothermal development and community building (Suzuki, Tohoku U)
- 2. Migration of Shut-in Pressure and its Effect to Occurrence of the Large Events at Basel Hydraulic Stimulation (Mukuhira, Tohoku U)
- 3. Fluid movement after the 2011 Tohoku-Oki earthquake and its effects on the aftershock activity (Yoshida, Tohoku U)
- 4. Reservoir Characterization and Prediction Modeling Using Statistical Techniques (Gudmundsdottir, Stanford)
- 5. Rock mechanics studies for super-critical geothermal development: fracturing (Liu, Tohoku U)
- 6. Investigating the Effect of Wing Cracks on the EGS Reservoir Permeability Enhancement by Hydraulic Stimulation (Abe、Stanford)
- 7. Laboratory and Field Tests of Thermoelectric Generators for Power Generation under Different Conditions (Li、Stanford)
- 8. Unknown Interfacial Surface Area at Low Reynolds Number (Hawkins, Stanford)
- 9. Accounting for Model and Observation Error in Geothermal Thermal Breakthrough Models (Bjarkason, Tohoku U)

We also had a field trip to Binary power plant in Ryokan Sugawara, facilitation of drying fruit by geothermal heat in Nakayamadaira area. Photos are shown in Figure 1.



(c)





(d)





Figure 1: Photos of seminars and field trip: (a) presentation by Mukuhira,, (b) students presentation during dinner time, (c) binary power plant, (d) drying fruit by geothermal heat, (e) heat exchanger, (f) naturally cooling system in Shintoro-no-yu, and (g) gathering photos in Ryokan Miyama.

3.2 Relationship between structure and flow properties

We conducted fracture characterization by topological data analysis with Peter Kang at University of Minnesota.

To estimate flow properties from structure data, we need to analyze the fracture aperture but also connectivity comprehensively. Topological data analysis is a rapidly growing field of research. Persistent homology is one method for computing the topological features of shapes (dot, ring, pore), which provides complex and multiscale geometric information in large datasets and has been applied in several research fields. For instance, glass is an amorphous material and known to have similar atomic arrangement with liquid like them. However, it has not been understood how different each other.

In persistent homology, we can recognize hole structures, which has entrance and exit to outside by using 1st order PH as shown in Figure 2. If we consider the yellow parts as rocks, the hole can be regarded as the flow path from inlet outlet. Now we consider this structure as rock. This is 3D image and this is 2D cross section. The yellow part is rock skeleton and these are three fractures connecting from the inlet to the outlet and forming a flow path.



Figure 2: Flow paths detected by 1st order PH.

In the PH analysis, we thin or thick the object voxel by voxel and counting the voxel increment. When closing the flow path, the voxel increment was death 5. the voxel is thickening from both sides. If we multiply the resolution in this case 1 voxel is 0.1 mm. We can calculate the fracture aperture. First, by using the death value of PH analysis, we can estimate fracture aperture. In addition, PH detects the smallest aperture in a flow path. We consider the flow properties is controlled by the smallest point, Thus, PH will give us the useful value. If there is independent fracture, this recognizes as 2nd order PH not as 1st order PH. PH detects only fractures functioning flow paths. By considering the PH definition, PH may be able to characterize apertures of fractures functioning flow paths. Our objective is to propose an analysis to characterize flow properties using structure data.

First, we prepared synthetic fracture network by using OpenSCAD. We generated many numbers of penny-shaped fractures and controlled aperture, radius, number and orientation as shown in Figure 3. Several fracture network models for different number of fractures were prepared with same aperture, same radius, and same orientation. We also prepared network with variable apertures according to the power low relationships.



Figure 3: Fracture network with different fractures.

After prepared the fracture network, the data was converted to binarized images and analyzed by PH. We used Open source software Homcloud. We don't use all data, but numbers of flow paths were recognized as the numebers of pairs (Death >0) and Fracture aperture was recognized as double of Death.

Figure 4a shows the results of estimation of number of fracture for three networks with different number and same aperture radius and orientation. Some results are higher than the actual value, but the estimated value has high correlation with the actual fracture numbers.



Figure 4: Estimation of fracture properties by PH. (a) Number of flow paths and (b) frequency of fracture apertures.

Figure 4b shows the results of estimation of fracture aperture for three networks with different aperture and same number radius and orientation. The size of circle is the number of flow paths. The estimated value has high correlation with the actual fracture aperture. These results indicate that PH can be used in estimating numbers and apertures.

Next, we conducted direct flow simulation with same fracture network by using

OpenFOAM to calculate permeability. By using the OpenFOAM, we could obtain each flow rate and pressure gradient between inlet and outlet. Based on Darcy's law, we can calculate equivalent permeability K between the inlet and the outlet in the whole model. To derive permeability by using parameters obtained from PH, we consider the fracture permeability. If we assume the fracture is a parallel plate, flow rate can be described by the fracture aperture. Combining the Darcy's law, single fracture permeability can be written by this equation. If we consider multiple flow path between inlet and outlet, the equation can be extended as follows:

$$K = \frac{w}{12A} \sum_{i=1}^{N} b_i^3 \tag{1}$$

where w is the fracture width, A is the cross-section area, b_i is the aperture of fracture i, N is the total number of fractures.



Figure 5: Mesh structures of fracture network model in OpenFOAM.

Fracture permeability was estimated by Eq. (1) using parameters from PH analysis. We compared to the exact permeability simulated in OpenFOAM as shown in Figure 6. Although the estimated permeability was overestimated, but reasonable estimation were performed.



Figure 6: Estimation of permeability from PH analysis.

4. Summaries and future plans

We proposed a PH analysis to characterize flow properties in fracture network using structure data and validated the analysis by using the results from flow simulation with synthetic fracture network. Opening aperture distributions of flow paths could be obtained by PH analysis. Permeability derived from PH analysis was almost the same order of magnitude as the permeability derived from the simulation. PH analysis can contribute to find relationship between structures and flow. This would contribute to combine the tracer data (flow data) and microseismic data (structure data).

In our last year's report, 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 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] A. Suzuki, J. Cui, <u>Y. Zhang</u>, S. Uehara, <u>K. Li</u>, <u>R. N. Horne</u>, and T. Ito: Experimental study on nano-/microparticles transport to characterize structures in fractured porous media, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 53, (2020), DOI: 10.1007/s00603-020-02081-8.
- [2] A. Suzuki, M. Miyazawa, <u>A. Okamoto, H. Shimizu, I. Obayashi, Y. Hiraoka, T. Tsuji, P. K. Kang</u>, and T. Ito: Inferring fracture forming processes by characterizing fracture network patterns with persistent homology, *Computers & Geosciences*, under review.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[3] A. Suzuki, Y. Mukuhira, <u>R. N. Horne, A. Abe, A. J. Hawkins, T. Ishibashi</u>, and <u>P. K. Kang</u>: Link between tracer and microseismic analysis to comprehensive understanding of hydraulic feature of fractured geothermal reservoir, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2019), CRF-R3, pp. 134-135.

- [4] 鈴木杏奈:温泉地域で、ワク湧く work しよう!, 第二回 COI 学会, Tokyo, Japan, September 19-20, (2019).
- [5] 鈴木杏奈:地熱資源利用促進・理解促進のためのワク湧くコミュニティ,日本地熱学 会令和元年学術講演会,Kumamoto,Japan,November 19-22,(2019).
- 3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable.

(Award)

Not applicable.

(Press release)

・YouTube 東北・新潟のキラ☆パーソン『地熱資源を有効活用した暮らしを探究』 https://www.youtube.com/watch?v=JqsAvvsEkRY&t=72s・2020年3月18日公開.

2. 研究成果報告書 <重点公募共同研究プロジェクト>

Project code	J19J001
Classification	Priority collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility of humans and materials
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	3rd year

Multiphase Flow and Interfacial Transport Phenomena at Phase and Material Boundaries

Shigeru Obayashi¹, Seiji Samukawa¹, Toshiyuki Takagi¹, Hirofumi Wada² Takeru Okada³, Yutaka Watanabe³, Mitsuo Hashimoto¹, Takashi Iijima⁴, Philippe Guy⁵ Lalita Udpa⁶, Yuji Hattori¹, Hiroki Nagai¹, Koji Shimoyama¹, Makoto Hirota¹ Aiko Yakeno¹, Gota Kikugawa¹, Atsuki Komiya¹, Sho Takeda¹, Jun Ishimoto¹ Tetsuya Uchimoto¹, Hiroyuki Kosukegawa¹, Taku Ohara¹[†]

¹Institute of Fluid Science, Tohoku University
 ²Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University
 ³Graduate School of Engineering, Tohoku University
 ⁴National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
 ⁵Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA de Lyon
 ⁶College of Engineering, Michigan State University
 [†]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 goal of this project is to propose a feasible method for delaying the laminar-to-turbulent transition and reducing viscous drag, especially on the swept wings. For that purpose, the integrated transition analysis tool was developed, which combines a direct numerical simulation developed by IFS/Tohoku University and a number of stability analysis codes developed by JAXA. This tool enables us to quantify the transition suppression effect (laminarization effect) brought by the discrete roughness elements (DRE) on the wing surface. By optimizing the roughness shape further, we proposed a new type of the roughness element (SRE) that has a higher laminarization effect than the

laminarization effect than the conventional DRE, as shown in Fig. 1.

This year, we have started to demonstrate flow situation around a complicated wing structure, reading-edge part of a swept wing. We investigated the receptivity of an attachment-line boundary layer to cause a transition by direct numerical simulation (DNS). We have identified two optimal instability modes and verified the dependence of the wing



Fig. 1: Vortical structures in boundary layers

shape on these growth rates. We also tried to clarify the ultra-fine roughness coating effect on a transition delay. As the first step, we have investigated a two-dimensional small wavy surface, which is much smaller than the TS vortex. We found, in a certain wavelength case, the vortices paring was restrained and a transition delayed.

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.

To investigate the mechanism and maximize the performance, developed we flow-chip generator equipped with microchannel which is covered with graphene (Fig. 2 (a)). Figure 2 (b) shows typical signal of generated voltage from water flow on graphene using the flow-chip generator. The generated voltage is clearly responded to water flow. In this case, the direction of electric current matches water flow direction, and magnitude of the generated voltage correlates with flow speed as shown in Fig. 2 (c). Non-linear voltage generation at higher flow speed was observed. The investigation is still ongoing and further investigation will reveal quantitative understandings of electrokinetic phenomenon, leading better output performance.



Fig. 2: (a) Flow-chip type generator. (b) Typcal generated voltage. (c) Flow velocity dependence of generated voltage.

2.3 Characterization of phase transition at hydrogen-metal material interfaces

Hydrogen embrittlement (HE) is one of key issues for design and maintenance of the hydrogen stations. Concerning the HE of austenitic stainless steels which are used for hydrogen components, it has been reported that there is a correlation between stabilities of austenite phases and susceptibilities to HE. However, the detailed

mechanism of HE of austenitic stainless steels have not been fully understood in a view of phase transition. Especially, behavior of HE to the fatigue failure has not been elucidated yet. In this study, eddy current testing (ECT) is used for an evaluation method of a fatigue crack propagation and a phase transition of a material by a hydrogen charging. Martensitic transformations around fatigue cracks and fracture states of hydrogen charged AISI 304 specimens are discussed.

Four specimens are prepared: 1) non-charged with electric discharge machining (EDM) slit, 2) hydrogen charged with EDM slit, 3) non-charged with fatigue crack, and 4)



Fig. 3 ECT signals of the specimens

hydrogen charged with fatigue crack. Eddy current testing was made for the slits and cracks of each specimen. Figure 3 shows ECT signals of the specimens. The signals changed by applying fatigue test and hydrogen charging. The results of the numerical analyses based on the reduced vector potential method suggested that the signal phase changes with changing the sample relative permeability, and the signal amplitude changed with changing the sample electrical conductivity. Thus, it was suggested that not only strain application by fatigue test but also hydrogen charging cause martensitic transformation of AISI 304. In addition, crack closure might be happened on the hydrogen charged specimen during the fatigue test.

3. Achievements

The study has achieved a good result 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 has been derived which leads to novel technologies in the near future.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal
- *[1] A. Yakeno and M. Hirota: Three-dimensional global stability on Stuart vortex of free shear layer, *Springer Proceedings in Physics*, Vol. 226 (2019), pp. 9-13.
- *[2] 廣田真,<u>井手優紀</u>,林田貴寿,服部裕司:孤立粗度による横流れ不安定性抑制効果 の数値的検証,ながれ, Vol. 38 (2019), pp. 39-72.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
 - [3] A. Yakeno, S. Obayashi: Global receptivity analysis around an attachment line of a swept wing, *72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, (2019).
 - [4] A. Yakeno, H. Tameike, S. Obayashi: Ultra-fine roughness effect on a flat plate boundary layer transition, 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, (2019).
 - [5] H. Tameike, A. Yakeno, S. Obayashi: Influence of Small Wavy Roughness on a Flat Plate Boundary Layer Transition, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS18-23, pp. 710-711.
 - [6] A. Yakeno, S. Obayashi: Attachment-line Receptivity around a Swept Wing by Direct Numerical Simulation, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS15-12, pp. 630-631.
 - [7] 溜池啓輝,焼野藍子,大林茂:平板上の異なる波長を有する微小波状粗さの境界層遷移への影響,第51回流体力学講演会/第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム,(2019).
 - [8] S. Obayashi, A. Yakeno: Data-driven approach to fluid engineering, *The International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science (ICCES)*, (2019), Invited.
 - [9] M. Hirota, <u>Y. Ide</u>, Y. Hattori: Prediction and control of boundary-layer transition induced by steady crossflow vortices, *Vortex dynamics in science, nature and technology IUTAM*, (2019).
- [10] 廣田真, <u>井手優紀</u>, 服部裕司: Prediction of Crossflow-induced Boundary-layer Transition and its control by sinusoidal wall roughness, 第65回「乱流遷移の解明 と制御」研究会, (2019).
- [11] M. Hirota, <u>Y. Ide</u>, T. Hayashida, Y. Hattori: Development for a theoretical model of crossflow-induced boundary-layer transition, *72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, (2019).
- [12] M. Hirota, Y. Ide, T. Hayashida, Y. Hattori: Scale analysis for primary and

secondary instabilities of three-dimensional boundary layer, *Proceedings of the Sixteenth Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS16-1, pp. 656-657.

- [13] <u>岡田健</u>: 固液界面における動電現象を利用したエネルギーハーベスティング応用, 仙 台プラズマフォーラム, (2020), (招待講演).
- [14] <u>T. Okada, G. Kalita, M. Tanemura, I. Yamashita, F. S. Ohuchi, M. Meyyappan</u>, S. Samukawa: Electrokinetics at the interface between graphene and moving water droplet, *8th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces*, (2019).
- [15] <u>T. Okada, G. Kalita, M. Tanemura, I. Yamashita, F. S. Ohuchi, M. Meyyappan</u>, S. Samukawa: Power generation from the interface between graphene and flowing liquid water, *32nd Int. Microprocesses ad Nanotechnology Conference*, (2019).
- [16] <u>T. Okada, G. Kalita, M. Tanemura, I. Yamashita, F. S. Ohuchi, M. Meyyappan</u>, S. Samukawa: Investigation of nitrogen doping effect on electrokinetics at graphene-water interface, *Materials Research Society 2019 Fall Meeting & Exhibit*, (2019).
- [17] <u>岡田健</u>, <u>カリタ ゴラップ</u>, <u>種村眞幸</u>, <u>山下一郎</u>, <u>F.S. Ohuchi</u>, <u>M. Meyyappan</u>, 寒 川誠二: 固液界面動電現象における窒素ドープグラフェン結合状態の効果, 第 80 回 応用物理学会秋季学術講演会, (2019).
- [18] 徳田衣莉,内一哲哉,高木敏行,<u>榎浩利</u>:水素チャージしたオーステナイトステンレ ス鋼における疲労亀裂周りのマルテンサイト変態の電磁非破壊評価,日本高圧力技術 協会平成 31 年度春季講演会,(2019).
- [19] 武田翔,内一哲哉,高木敏行,山本宏樹,<u>榎浩利</u>,<u>飯島高志</u>:渦電流試験によるオー ステナイト系ステンレス鋼の水素脆化における相変態評価,日本保全学会第16回学 術講演会,(2019).
- [20] S. Takeda, T. Uchimoto, T. Takagi, H. Yamamoto, <u>H. Enoki, T. Iijima</u>: Eddy Current Testing as an Evaluation Method of the Phase Transition of Austenitic Stainless Steels by Hydrogen Charging, 24th International Workshop on Electromagnetic Non-destructive Evaluation, (2019).
- [21] E. Tokuda, S. Takeda, T. Uchimoto, T. Takagi, <u>H. Enoki, T. Iijima</u>: Evaluation of the Hydrogen Embrittlement on the Hydrogen Exposed Austenitic Stainless Steel Fatigue Specimens by Eddy Current Testing, *The 19th International Symposium* on Applied Electromagnetics and Mechanics, (2019).
- [22] 武田翔,徳田衣莉,内一哲哉,高木敏行,山本宏樹,<u>飯島高志</u>,<u>榎浩利</u>:オーステナ イト系ステンレス鋼の水素脆性試験における渦電流試験による相変態評価,日本機械 学会 M&M2019 材料力学カンファレンス,(2019).
- [23] E. Tokuda, S. Takeda, T. Uchimoto, T. Takagi, <u>H. Enoki</u>, <u>T. Iijima</u>: Hydrogen Embrittlement Evaluation Using Eddy Current Testing on Fatigued Specimens of Hydrogen Charged Austenitic Stainless Steel, *Proc. of the 16th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS18-87, pp. 858-859.
- [24] S. Obayashi, S. Samukawa, T. Takagi, <u>H. Wada</u>, <u>T. Okada</u>, <u>Y. Watanabe</u>, M. Hashimoto, <u>T. Iijima</u>, <u>P. Guy</u>, <u>L. Udpa</u>, Y. Hattori, H. Nagai, K. Shimoyama, M. Hirota, A. Yakeno, G. Kikugawa, A. Komiya, S. Takeda, J. Ishimoto, T. Uchimoto, H. Kosukegawa: Multiphase Flow and Interfacial Transport Phenomena at Phase and Material Boundaries, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-J2, pp. 138-139.
- 3) Patent, award, press release etc.
- [25] H. Tameike, A. Yakeno, S. Obayashi: Influence of Small Wavy Roughness on a Flat Plate Boundary Layer Transition, Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD) 2019, Best Award.
- [26] 廣田,服部,<u>井手</u>,<u>高見</u>,<u>吉本</u>:隆起構造および翼,2020.3.18,国際特許出願 PCT/JP2020/011911.

課題番号	J19J002
区分	重点公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

超微小液滴と高速衝突の科学 Science of Ultrafine Drop and High Speed Impact

佐藤 岳彦**, 渡部 正夫****

矢野 猛***†,小林 一道**,伊賀 由佳*,早瀬 敏幸*,石本 淳*,太田 信*, 小宮 敦樹*,高奈 秀匡*,大谷 清伸*,岡島 淳之介*,上原 聡司*,宮内 優*,安西 眸* *東北大学流体科学研究所,**北海道大学大学院工学研究院 ***大阪大学工学研究科

†申請者, **†**†所外対応研究者

1. 研究目的

超微小液滴の高速衝突現象の学術分野創成に向けて,発生方法,噴出方法,衝突方法,計 測方法などの開発,物理化学特性の理解,応用展開などを行うための研究課題の抽出ならび に研究体制を構築し,大型予算へ応募し採択を目指すことを目的とする.

2. 研究成果の内容

研究分担者の渡部,矢野,伊賀を主たるメンバーとし,研究体制構築に向けて「分子液滴 による高速衝突界面科学の創成」研究会を開催した.

第1回は、3月28、29日に開催し、加藤健司(大阪市立大学 大学院工学研究科 教授) 「エレクトロウェッティングによる液滴分裂過程の考察」、高比良裕之(大阪府立大学 大 学院工学研究科 教授)「集束超音波の気泡界面での後方散乱によるキャビテーション初生」、 小林 一道(北海道大学 工学研究院 准教授)「少量の非凝縮性気体を含む蒸気気泡の崩壊 に関する分子気体力学解析」、城田 農(弘前大学 大学院理工学研究科 准教授)「加熱平 面に衝突する液滴内の気泡運動の可視化 | エバネッセント光とバックライト光を利用した 高速度撮影の応用」について情報提供を受けた.また、研究会の方向性や立ち位置について 検討した.

第2回は、5月31日、6月1日に開催し、石原 雅之(防衛医科大学校防衛医学研究セン ター 教授)「感染症防護・除染・洗浄技術の研究・開発動向—BiSCa0 とマイクロミストジ ェット洗浄器を中心に一」,藤村 茂(東北医科薬科大学薬学部 教授)「食中毒菌の伝播様 式から考える新しい除菌法への期待」,砂金 養一(アクアサイエンス株式会社 代表取締役 社長)「蒸気2流体洗浄技術の応用」,真田 俊之(静岡大学学術院工学専攻 准教授)「半導 体物理洗浄技術の概要と水蒸気二流体ジェット洗浄法の開発」,杉山 和靖(大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授)「コップ内における泡飲料の気泡クラスター」,田川 義之(東京農 工大学大学院工学研究院 准教授)「高速液滴衝突挙動における長さスケールの影響:新規 マイクロジェット装置による実験的研究」について情報提供を受けた.また,どのような分 野の研究者が必要かについて討論し,化学,物理学分野の研究者にも参加を呼びかけること とした.

第3回は、7月22日に開催し、由井宏治(東京理科大学理学部第一部化学科 教授)「水

溶液中における電極間放電現象の時間分解顕微イメージングと分光化学計測」, 金澤 誠司 (大分大学理工学部 教授)「空気・水環境におけるラジカルの生成と計測-放電プラズマ の世界-」, 米村 茂(東北大学流体科学研究所 准教授)「微小液滴の気体流れへの追随性 および気体中での挙動についての考察」について情報提供を受けた. さらに,研究体制につ いて検討を進め, 超微小液滴の生成と高速衝突界面現象を担当する班と革新的水利用の検証 をし応用への展開を図る班, 将来の応用や政策提言をする班の3グループで活動をすること とした.

3. 研究目標の達成状況

本年度は、目標とした大型予算に向けた研究体制の構築を行った.また、大型予算(科研 費学術変革(A))への申請を行った.これより、当初の目標を十分達成した.

4. まとめと今後の課題

本年度構築した研究体制の発展と、研究課題の深化、さらに大型予算の採択に向けた対応 を行う.本年度申請分が採択されなかった場合は、再度申請することを目的とする.

- 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] T. Sato, <u>M. Watanabe</u>, <u>T. Yano</u>, Y. Iga, <u>K. Kobayashi</u>, T. Hayase, J. Ishimoto, M. Ohta, A. Komiya, H. Takana, K. Ohtani, J. Okajima, S. Uehara, S. Miyauchi, and H. Anzai: Science of Ultrafine Drop and High Speed Impact, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-J3, pp. 210-211.
- 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	J19J003
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	3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 CO₂ 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 CO₂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

本重点公募研究は本年度が最終年度(3年目)となる.流体科学研究所,北海道大学大学院, 東北大学大学院, INSA-Lyon, Texas A&M University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る.

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.

本稿では最終年度の成果として、アンモニア燃焼のLES数値解析および実験によるNOx排出 特性およびライナー冷却の影響の予測研究、アンモニア乱流予混合燃焼特性の解明、ガスタービ ン等でのアンモニア・天然ガス混焼を想定した炭素・窒素相互反応モデルの検証、さらに、高圧 アンモニア雰囲気の金属材料劣化を評価する高温用 EMAT 開発に関する成果を述べる.

2.1 アンモニアガスタービン燃焼器における燃焼生成ガス特性に関する LES と実験

アンモニアを燃料とするガスタービン燃焼器を開発するために, NO 生成および未燃アンモニ ア排出特性を明らかにすることは重要である.本研究では、アンモニアガスタービン実燃焼器を 用いた実験およびそれを模擬した旋回流燃焼器に対する LES(Large Eddy Simulation)を行い, アンモニアー空気およびメタンー空気乱流非予混合火炎における燃焼生成ガス特性について検討 した. さらにそれらに及ぼす壁面熱損失の影響について検討した.

計算には、メタン/アンモニア/空気火炎の層流燃焼速度の実験値を用いて開発された簡略化 反応機構を用いた.図1はアンモニアー空気火炎における局所 OH モル分率 Xon と局所 NO モル 分率 Xoo の関係を表したものである.図1(a)に示すように、アンモニアー空気火炎の場合 Xoo と Xon の間に比例的な関係が見られたことから、アンモニアー空気火炎における NO 生成には OH が重要な振る舞いをする事が明らかとなった.一方、図1(b)に示すメタンー空気火炎の場合、 アンモニアー空気火炎に見られたような Xon と Xoo の間の強い関係性は見られない.

図2はアンモニアガスタービン燃焼器におけるアンモニアー空気乱流非予混合火炎のOHおよび NO 同時 PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence)画像である. 図2は当量比 1.3 における PLIF 画像を示している. 図に示すように、OH の蛍光カウント値が高い領域において NO の蛍 光カウント値も高い. このように、アンモニアー空気火炎における NO 生成には OH が重要な振 る舞いをすることが実験的にも確認された.

図3は LES における壁面境界条件を,断熱条件および熱損失を考慮した等温条件とした場合の NO および未燃 NH3排出量である.図3(a)に示すように,壁面境界条件を等温条件にした場合,特に壁面境界条件が900 K の条件において NO 排出量は低減した.一方,図3(b)に示すように,壁面境界条件が900 K において未燃 NH3排出量は増大した.

実際のガスタービン燃焼器においては、損傷を防ぐため、ライナーの冷却が必要である.本研 究で得られた成果は、アンモニアを燃料とするガスタービン燃焼器において、NOx および未燃ア ンモニアを同時低減を実現するための重要な知見となる.



図2:当量比1.3 におけるアンモニアー空気火炎のOH およびNO 同時 PLIF 画像



2.2 アンモニア乱流予混合火炎の火炎伝播限界

燃焼性の低いアンモニアについて,層流場および乱流場における酸素富化条件下の火炎伝播特 性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、実験装置を示す.実験装置は主に耐圧容器とガス供給系、光学系から構成され、耐圧 容器内部の上下にファンが設置されており、任意の乱流強度条件における火炎伝播実験が可能で ある.着火は容器中央部に設置された電極からの火花により行い、シュリーレン光学系を用いた 高速度カメラにより火炎伝播の様子を撮影した.酸化剤は 40%酸素+60%窒素の酸素富化条件と なる混合ガスを用い、0.6~1.6 の当量比条件で火炎伝播実験を行い、取得した画像を解析して火 炎伝播速度を求めた.

図5に、各乱流強度条件における、当量比と火炎伝播速度の関係を示す. どの乱流条件においても、当量比1.0 付近で火炎伝播速度が最も高くなることが分かった. また、同じ当量比条件で比較すると、乱流強度の増加に伴って火炎伝播速度が高くなることが分かった. これは、乱流により形成される火炎面の皺により、火炎表面積が増加し、高温部から予熱帯への熱伝達が促進されるためであると考えられる.

図6に、乱流 Ka 数が乱流火炎伝播速度と層流火炎伝播速度の比(U_d/U_N)に与える影響を示 す. 乱流 Ka 数は層流火炎の時間スケールと乱流渦の時間スケールの比を示しており、この値が 大きいほど、乱流渦が火炎面に与える影響の効果が大きいことを示している. 図から、どの当量 比条件においても、乱流 Ka 数の増加と共に、U_d/U_Nが増加していることが分かる. これは、乱 流 Ka 数の増加と共に、乱流渦による火炎面の変形が大きくなり、火炎面積の増加による熱伝達 促進効果が大きくなるためである.一方、同じ乱流 Ka 数で比較した場合、当量比が1よりも大 きい燃料過濃条件に比較して当量比が1よりも小さい燃料希薄条件の方が U_d/U_Nが大きいこと が分かる(当量比0.6 の条件は他の燃料希薄条件よりも U_d/U_Nが小さいが、これは断熱火炎温度 が低いことが影響していると考えられる. 当量比0.6 と同等の断熱火炎温度で燃料過濃条件であ る当量比1.6 の条件は他の条件に比べて U_d/U_Nが大幅に小さいことが分かる). これは、燃料希 薄条件においては、Le 数が1よりも小さいため、温度の拡散に比べて物質の拡散が速く、拡散・ 熱的不安定性の効果により火炎面の皺が増長し、上述した乱流渦による火炎面積増加の効果が大 きくなるためであると考えられる.

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.



2.3 炭素と窒素の相互反応モデルの検証

アンモニア燃焼の普及拡大期においてはアンモニア・天然ガスの混焼が重要となることから、 複雑な炭素と窒素の相互反応モデルについて検証を進めることは重要である.ここでは炭素と窒 素の反応が相互干渉する場として比較的シンプルなニトロメタンの熱分解を取り上げた.実験に は温度分布制御マイクロフローリアクタを用いて熱分解過程の化学種計測を行った.図7に実験 及び数値計算結果の比較を示す.検証に用いた反応モデルは4種である.実験結果より,熱分解 により NO と CH4が生成されている.また,熱分解後の高温域で NO および CH4が減少してい る.ここでは示していないが,C2 炭化水素も CH4 と同様に熱分解で生成され,その後に減少し ている.すなわち,低級炭化水素が NO を酸化剤として酸化反応していることが観察された.

Brequigny らの反応モデルが最も実験で観察された熱分解の位置を正確に再現した.一方,いずれのモデルも高温域における NO および CH4の減少を再現できていない.いずれのモデルも脱硝を対象として開発されたモデルであるが,低級炭化水素と NO の反応は検証が不十分であることが示された.アンモニア・天然ガスの混焼の火炎帯では,アンモニアから生成された NO と低級炭化水素の反応が重要な相互反応のひとつと考えられることから,さらなるモデル開発の必要性を見出すことができた.



--- Glarborg mechanism ---- Shrestha mechanism ---- Brequigny mechanism ----- Weng mechanism

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.

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. 昨年度は、高温用 EMAT の開発を行い、その基本性能につ いて確認を行った.本年度は、EMAT を用いた共鳴法による減肉試験片の肉厚評価のための信号 処理法について検討を行った.

(1) N 周期加算法(SNC)による減肉部ピーク検出

共鳴法では、入力する超音波バースト波の周波数を掃引することにより、共鳴ピークを検出し、 共鳴周波数と既知の音速から肉厚を求める. 減肉した試験片では、明瞭な共鳴ピークを確認する ことが難しい. 本研究では N 周期加算法を適用し肉厚を求めることを考える. SNC は共鳴ピーク が共鳴周波数の整数倍の時に周期的に現れることを利用した解析法であり、基本共鳴周波数 fi は、

$$f_1 = \arg \max_f \left\{ \sum_n x(nf) \right\}$$

により求める. ここで, x(f) はスペクトル強度, n は共鳴ピークの次数, argmax は最大値を取る 引数の値を示す. ここで,上式より,足し合わせる信号の数により変化することが分かり,足し 合わせる信号の数のことを圧縮回数と定義する.求めた基本共鳴周波数 f_1 および対比試験で求 めた試験片材料の横波音波 Vを用いることで,減肉部の厚さ $d \in d = V/2f_1$ と評価することが出 来る.

(2) 実験および解析方法

本研究では、機械構造用炭素鋼 S50C 試験片を塩化第二鉄溶液に 50℃で浸漬し、減肉度合いの 異なる 25 種類の腐食試験片を作製した.腐食試験片の腐食部分の幅と厚さをそれぞれノギス、ダ イヤルゲージ(ミツトヨ 543-781)を用いて測定した. 25 種類の腐食試験片の非腐食部の厚さを 5 回測定した平均結果は 9.52 mm であった.腐食減肉部の幅が 40.4 mm, 厚さが 7.85 mm の試験 片を試験片 A とする.

本研究で用いた EMAT は、SmCo 系磁石と送受信コイルから構成される. コイルは、直径 0.1 mm の銅線を用いて作製し、単層レーストラック型でである. 送受信コイルの上に長さ 10 mm、奥行 き 20 mm、高さ 20 mmの SmCo 系磁石を 2 つ組合せて設置する. パルサーレシーバー(RITEC-4000) により、送受信コイルに 100µs のバースト波を、1 MHz から 4 MHz まで 5 kHz 間隔で掃引しなが ら印加する.

(3) 実験および解析結果

非減肉試験片に対して室温 20℃で EMAR 試験を行い,横波音速を測定した.得られた音速は 3275 m/s であり,以降の肉厚計算にはこの値を用いる.図8左に圧縮回数と推定される基本共鳴 周波数の関係を示す.肉厚の実測値と試験片内横波速度から計算によって求めた真の基本共鳴周 波数を赤い線で示した.EMAR より推定される基本共鳴周波数と真の基本共鳴周波数との誤差が 最も小さくなり始める圧縮回数を P_s ,終わる圧縮回数を P_e とする.試験片 A においては,計算 によって求めた基本共鳴周波数は 0.21 MHz で, $P_s=13$, $P_e=33$ であった.圧縮回数を 5 回とした 場合,得られた基本共鳴周波数は 0.63 MHz であり,推定肉厚は 2.59 mm となった.実測値肉厚 との誤差は 66.9%となり,良好な推定が出来ていないことが確認できた.一方で,圧縮回数が 15 回の場合,得られた基本共鳴周波数は 0.21 MHz であり,推定肉厚は 7.76 mm となった.実測値 肉厚との誤差は 1.07%となり,良好な結果を得ることが出来た.同様に,図8右に 25 種類の腐 食減肉試験片の $P_s \ge P_e$ の関係を示す.全体の傾向として,肉厚が小さくなるほど $P_s \ge P_e$ がとも に小さくなることが確認できた.また,圧縮回数が 15 回から 20 回の間とすることで精度の高い 肉厚の推定ができることが示唆された.

図9に25種類の試験片に対して計算によって得られた基本共鳴周波数と, EMAR 試験に SNC を適用した結果得られた基本共鳴周波数を比較したグラフを示す.この時, SNC における圧縮回数は Ps と Pe の間に含まれるよう選択した.結果, 誤差は最大でも 2.29% であり, 圧縮回数を Ps と Pe の間で選択することで, 良好な周波数の推定ができることが分かった.



図8:圧縮回数と推定基本周波数との間の関係(左)と実測厚さと圧縮回数との間の関係(右)



図9:実測厚さから計算した基本周波数と評価基本周波数との関係

3. 研究目標の達成状況

最終年度である本年度は、昨年度に引き続きアンモニア燃焼の NOx 生成予測、アンモニア乱 流燃焼特性や反応論の研究に加え、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 の開発研究に成果を得た.本重点公募共同研究による成果に基づき、更に共 同研究者の努力により科学研究費や NEDO プロジェクトなど、個別あるいは共同で新規プロジ ェクト研究申請が行われ採択が決定されつつあるが、今後も研究プロジェクト化を進めていく.

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、低炭素燃料による温室効果ガス削減に向けた取り組 みは急務である.総合エネルギー効率やコスト面で可能性が高い燃料アンモニアの重要性は国際 的にも認知され、我が国のエネルギー政策にも明記された.燃焼科学および材料科学の観点から 多面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)

- [1] E. C. Okafor, Y. Naito, S. Colson, A. Ichikawa, T. Kudo, A. Hayakawa, H. Kobayashi: Measurement and modelling of the laminar burning velocity of methane-ammonia-air flames at high pressures using a reduced reaction mechanism, *Combustion and Flame*, Vol. 204, (2019), pp. 162-175.
- [2] 小林秀昭, 早川晃弘:アンモニア直接燃焼, 水素エネルギーシステム, Vol. 44, No. 2, (2019), pp. 105-113.
- [3] K. D. K. A. Somarathne, E. C. Okafor, A. Hayakawa, T. Kudo, <u>O. Kurata</u>, <u>N. Iki</u>, H. Kobayashi[:] Emission characteristics of turbulent non-premixed ammonia/air and methane/air swirl flames through a rich-lean combustor under various wall thermal boundary conditions at high pressure, *Combustion and Flame*, Vol. 210, (2019), pp. 247-261.
- *[4] 小林秀昭, 早川晃弘: アンモニア燃焼研究の意義とインパクト, 日本燃焼学会誌, Vol. 61, No. 198, (2019), pp. 277-282.
- [5] 伊藤慎太郎, 内田正宏, 藤森俊郎, 小林秀昭:詳細反応機構を用いたアンモニア/天然 ガス混焼ガスタービン燃焼器の低 NOx 燃焼方法に関する検討, 日本燃焼学会誌, Vol. 61, No. 198, (2019), pp. 368-375.
- [6] <u>S. Ito, M. Uchida, S. Kato, T. Fujimori</u>, H. Kobayashi: Emission characteristics of a lean-premixed ammonia/natural-gas gas-turbine combustor and effect of secondary ammonia injection, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 6, No. 5, (2019), 19-00266.
- [7] E. C. Okafor, K. D. K. A. Somarathne, R. Ratthanan, A. Hayakawa, T. Kudo, <u>O. Kurata, N. Iki, T. Tsujimura, H. Furutani</u>, H. Kobayashi: Control of NOx and other emissions in micro gas turbine combustors fuelled with mixtures of methane and ammonia, *Combustion and Flame*, Vol. 211, (2020), pp. 406-416.
- [8] Y. Xia, G. Hashimoto, K. Hadi, N. Hashimoto, A. Hayakawa, H. Kobayashi, O. Fujita: Turbulent burning velocity of ammonia/oxygen/nitrogen premixed flame in O₂-enriched air combustion, *Fuel*, Vol. 268, (2020), 117383.
- N. Yusa, H. Song, D. Iwata, T. Uchimoto, T. Takagi, <u>M. Moroi</u>: Probabilistic analysis of electromagnetic acoustic resonance signals for the detection of pipe wall thinning, *Nondestructive Testing and Evaluation*, (2019), DOI: 10.1080/10589759.2019. 1679141.

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
 - [10] 小林秀昭:カーボンフリーアンモニア燃焼の科学と技術,第 56 回伝熱シンポジウム,
 (2019),(招待講演).
 - [11] 早川晃弘,塚本真章,K.D.K.A. Somarathne,工藤琢,小林秀昭:二段燃焼によるアン モニア/空気予混合火炎からの NO および未燃アンモニア同時低減,第56回伝熱シンポ ジウム, (2019), F235.
 - [12] K. D. K. A. Somarathne, A. Hayakawa, H. Kobayashi: Effect of NH3 addition into CH4/air swirl flames on NO emission characteristics, 第 57 回燃焼シンポジウム, (2019), B111.
 - [13] H. Kobayashi: Ammonia combustion for gas-turbine power generations, World Hydrogen Technologies Convention, (2019), SI-2, (Invited).
 - [14] A. Hayakawa, Y. Hirano, T. Kudo, H. Kobayashi: Experimental investigation of product gas characteristics of ammonia/air laminar premixed flames, *3rd European Power to Ammonia Conference*, (2019).
 - [15] A. Hayakawa, Y. Hirano, E. C. Okafor, T. Kudo, H. Kobayashi: Product gas characteristics of strain stabilized ammonia/air premixed laminar flames, 12th Asia-Pacific Conference on Combustion, (2019), 1424.
 - [16] K. D. K. A. Somarathne, E. C. Okafor, A. Hayakawa, H. Kobayashi: Emission characteristics of turbulent non premixed CH4/NH3/air swirl flames through a rich-lean gas turbine-like combustor at high pressure, 12th Asia-Pacific Conference on Combustion, (2019), 1189.
 - [17] E. C. Okafor, R. Ratthanan, K. D. K. A. Somarathne, A. Hayakawa, T. Kudo, <u>O. Kurata, N. Iki, T. Tsujimura</u>, H. Kobayashi: On the control of NOx emission from a micro gas turbine combustor fueled with mixtures of methane and ammonia, *12th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2019), 1387.
 - [18] E. C. Okafor, <u>O. Kurata, N. Iki, T. Inoue, T. Fujitani, Y. Fan, T. Matsunuma, T. Tsujimura, H. Furutani, M. Kawano, K. Arai, A. Hayakawa, H. Kobayashi: Pure ammonia combustion micro gas turbine system, *Ammonia Energy Conference 2019*, (2019).</u>
 - [19] A. Hayakawa, H. Kobayashi: Product gas characteristics of strain and swirl stabilized ammonia/air flames, *Proceedings of the 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019)*, Sendai, Japan, (2019), OS2-2, pp. 180-181. (Invited)
 - [20] D. Sugawara, K. D. K. A. Somarathne, A. Hayakawa, H. Kobayashi: Effects total enthalpy profiles on stability of ammonia/air premixed flames in a swirling flow, *Proceedings of the 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019)*, Sendai, Japan, (2019), OS18-48, pp. 780-781.
 - [21] T. Kudo, R. Kanoshima, A. Ichikawa, A. Hayakawa, T. Kudo, H. Kobayashi: Effects of mixture temperature on laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames, *Proceedings of the 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019)*, Sendai, Japan, (2019), OS18-60, pp. 804-805.
 - *[22] H. Kobayashi: Progress in the research of fundamental and utilizations of carbon free energy carriers, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, Japan, (2019), CRF-J1, pp. 136-137.
 - [23] 山本能道、手塚卓也、中村寿:温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いたニトロ

メタンの熱分解の反応モデル検証,第57回燃焼シンポジウム, (2019), P204.

- [24] Y. Yamamoto, T. Tezuka, H. Nakamura: Study on Pyrolysis of Nitromethane using a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *Proceedings of the 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019)*, Sendai, Japan, (2019), OS18-67, pp. 818-819.
- [25] <u>B. Shiozawa</u>: CO₂ Free Ammonia as CO₂ Free Fuel and Hydrogen Carrier -Achievements of SIP "Energy Carriers", *Proceedings of the 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019)*, Sendai, Japan, (2019), OS2-1, pp. 178-179.
- [26] 橋本玄弥, 市村涼, Khalid Hadi, Yu Xia, 橋本望, 藤田修, 早川晃弘, 小林秀昭:アン モニアとメタンの予混合気の定容容器内乱流場における火炎伝播限界, 第24回動力・エ ネルギー技術シンポジウム, D124, (2019).
- [27] N. Hashimoto, G. Hashimoto, R. Ichimura, K. Hadi, Y. Xia, A. Hayakawa, H. Kobayashi, O. Fujita: Turbulent flame propagation limit of NH3/CH4/air mixture in a fan-stirred closed vessel, *The Fifth International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems (IMPRES2019)*, Kanazawa, (2019).
- [28] Y. Xia, G. Hashimoto, K. Hadi, N. Hashimoto, A. Hayakawa, H. Kobayashi, O. Fujita: Experimental study of turbulent burning velocity of Amonia/Oxygen/Nitrogen Mixture in a Fan-Stirred Closed Vessel, *Proceedings of the 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019)*, Sendai, Japan, (2019), OS2-9, pp. 194-195.
- [29] <u>G. Hashimoto, K. Hadi, Y. Xia, A. Hamid, N. Hashimoto</u>, A. Hayakawa, H. Kobayashi, <u>O. Fujita</u>: Experimental study of flame propagation limits of ammonia/methane/air mixture in turbulent fields, *Proceedings of the 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019)*, Sendai, Japan, (2019), OS2-11, pp. 198-199.
- [30] H. Sun, <u>C. Reboud</u>, <u>P. Calmon</u>, <u>E. Demaldent</u>, T. Uchimoto, T. Takagi: Three-Dimensional Simulation of Electromagnetic Acoustic Resonance Method Using CIVA Software, *The 24th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2019)*, (2019), A0105.
- [31] <u>H. Nakamoto, P. Guy</u>, T. Takagi, T. Uchimoto, K. Hamaguchi: Back Surface Roughness Measurement Based on Attenuation of Ultrasonic Wave, *Proceedings of* the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019), Sendai, Japan, (2019), OS20-12, pp. 236-237.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許) なし

- (受賞)
 - 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, 日本燃焼学会論文賞, 日本燃焼学会, 2019/11/21.
 - [2] A. Hayakawa: Product gas characteristics of strain and swirl stabilized ammonia/air flames, 16th International Conference on Flow Dynamics, Best Presentation Award for Young Researcher, Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2019/12/3.

(マスコミ発表)

[1] 小林秀昭:読売新聞・知の拠点セミナー「アンモニア合成 燃料に」, 2019/5/19.

2. 研究成果報告書 <リヨンセンター公募共同研究>

Project code	J19Ly01
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year (progressing)

Numerical Modelling of Particle-Laden Effect on Supersonic Flow for Cold-Spray Polymer Coating

Chrystelle Bernard*†, Hidemasa Takana**†† Olivier Lame***, Kazuhiro Ogawa****, Jean-Yves Cavaillé***** *Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***MATEIS, INSA de Lyon, Université de Lyon ****Fracture and Reliability Research Institute, Tohoku University ***ELyTMaX UMI 3757, CNRS – Université de Lyon – Tohoku University, International Joint Unit, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

This project aims to study the in-flight behavior of polymer particles during the cold-spray process. The analysis of the particle temperature and velocity prior to the impact on the substrate will give us an insight of the particle behavior in supersonic flow. These results will be used as input data of the impact simulations to perform finite element simulations of the cold-spray process.

2. Details of program implement

The previous year saw the implementation of a 2D-axisymmetric nozzle with the injection of particles inside the nozzle. The obtained results were quite encouraging to estimate the particle velocity and temperature (as well as temperature gradient); however, no information regarding the powder feeder was taken into account. Thus, we assume that the flow inside the nozzle was axisymmetric. In this new analysis, we model the 3D geometry of the nozzle and account for the powder feeder (see Figure 1). The difficulties here lie in the backflow that might arise around the powder feeder because of the difference of pressure between the inlet gas pressure and the particle inlet gas pressure.



Figure 1: Schematic representation of the cold-spray nozzle with powder feeder.

3. Achievements

The working gas used is air. For a first calculation, the inlet gas pressure and

temperature are chosen to be (0.4 MPa, 653 K) as they appear to be the best parameters from an experimental viewpoint. Normally, particle inlet gas pressure should be equal to atmospheric pressure; however, because of the backflow, pressure of 0.3 MPa was firstly introduced. The gas temperature at the particle inlet is 300 K. Under these conditions, the evolution of the gas velocity is presented in Figure 2. It is clearly demonstrated that the gas flow along the nozzle can no longer be considered as axisymmetric.



Figure 2: Evolution of the gas velocity along the nozzle for an inlet gas pressure and gas temperature of (0.4 MPa, 653 K) and gas pressure and temperature at the particle inlet of (0.3 MPa, 300 K).

4. Summaries and future plans

In the perspective of this work, we intend to improve our modelling by slowly decreasing the gas pressure at the particle inlet towards atmospheric pressure during the calculation to avoid back-flow. In the following, we will introduce one, several polymer particles and then considering a flow of particles to consider the true physics of the cold-spray.

- 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>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>: Polymer coating by cold-spray: a review, *ELyT Workshop*, Vogüé, (2020).
- *[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>: Investigation of the thermal behavior of in-flight polymer particle during cold-spray process, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), OS20-4, pp. 220-221.
- [3] C. A. Bernard, H. Takana, G. Diguet, K. Ravi, O. Lame, K. Ogawa, J.-Y. Cavaillé: In-flight history of a polymer particle during cold-spray process, *Cold-spray club meeting: cold-spray and polymers*, Paris, (2019).
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.
 - (Award) Not applicable.
 - [1] Best Presentation Award for Young Researcher, "Investigation of the thermal behavior of in-flight polymer particle during cold-spray process", <u>Chrystelle</u> <u>Bernard</u>, November 7, 2019, 16th International Conference on Flow Dynamics.
 - [2] Special Recognition Award, "Polymer coating by cold spray process: understanding and modeling polymer deformation behavior at high temperature and strain rate", <u>Chrystelle Bernard</u>, February 11, 2020, The 2nd Caterpillar STEM Award.
 - (Press release) Not applicable.

Project code	J19Ly02
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Ionic Liquid Polymer for Corrosion Resistance Applications

Nicolas Mary*†, Tetsuya Uchimoto*,**†† Sebastien Livi***, Lucas Olivier Lamarque*,**, Sabrina Marcelin**** *ELyTMaX, CNRS – UdL – Tohoku University **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***IMP, INSA Lyon **** MATEIS, INSA Lyon †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Extension of material durability is an important issue to save partially earth ores resources. Among other strategies, the application of coating on existing metallic structure is one solution. Epoxy-amine polymers have been extensively studied and their good resistance to water uptake stated. Recently, amines were classified as carcinogen. An alternative solution was proposed based on Ionic Liquids. This project aims to evaluate and characterize the degradation mechanism of IL-epoxy polymer coating and matrix by nondestructive techniques to propose industrial implementation in future.

2. Details of program implement

Water uptake of polymer matrix is a diffusion process controlled by the water adsorption and absorption kinetics. As the water and the polymer present different permittivities ($\varepsilon_w = 80$ and $\varepsilon_{coat} \approx 3$, respectively), the overall permittivity of the sample may vary. Capacitive measurements were then selected in this work.

2.1. Sample elaboration and experimental procedures

IL-epoxy samples (free films) are based on BADGE epoxide mixed with two hardeners: the polyether Jeffamine D400 (stoichiometric ratio of 63 phr) and the trihexyltetradecylphosphonium dicyanamide ionic liquid (IL105 hereafter). IL105 were prepared with three mixing ratios: 10, 20, 30 phr. Polymer samples (discs of \emptyset 4 cm and thickness at about 1.2 mm) were polished to SiC2000 emery paper. Samples were immersed in 0.1 M NaCl solution (pH 6.5, 35°C). Before analysis, the samples were cleaned and gently dried. Samples were installed in a specific holder (CESH-Biologic) connected to an Impedance Analyze (HP4194A). Impedance data were recorded in the frequency range from 1 kHz to 1 MHz (11 points/decade). Gravimetric measurements were performed with a weight scale (AsOne Sefi ITX220) with a precision of 0.1 mg.

2.2. Results

Figure 1 presents the gravimetric and capacitive measurements with the time of immersion. Similar trends are observed with a rapid increase at the first time of immersion. For the two measurements, the trends follow a Fickian law of diffusion. The material ranking is slightly different, however, the IL105-10phr presents the lowest water uptake kinetic. Note that the water absorption is the driving force for the permittivity modification since IR-FITR analysis did not shown chemical modifications of the polymers.



Figure 1. Comparison of the mass and capacitive variation with the immersion time.

3. Achievements

We achieved to set up the capacitive measurements on polymer samples with a good reproducibility and a good agreement with gravimetric measurements. Our results point out a difference of behavior for two IL epoxy resin. For D400 and IL105-10 phr the hardeners are in the proper quantity while IL105-20phr and 30 phr presents an excess of hardeners. It is believed that the microstructure and local chemistry of the polymer may change capacitive properties.

4. Summaries and future plans

Capacitive measurements provided valuable information that needs to be further discuss in term of kinetic of diffusion based on the Fick law. They also suggest a role of the polymer microstructure and chemistry that need to be better understand. Completing modeling approaches (Fick Law) and microstructure will help to better interpret capacitive measurement and later design new polymer chemistry.

- 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)
- L. <u>Ollivier-Lamarque</u>, T. Uchimoto, <u>N. Mary</u>, <u>S. Livi</u>, <u>S. Marcelin</u>, <u>B. Normand</u>, <u>B. Ter-Ovanessian</u>: Water Uptake in anti-corrosion polymer coating: development of capacitive measurement methods, *Eurocorr2019*, Seville (Espagne), (2019).
- [2] L. Ollivier-Lamarque, T. Uchimoto, N. Mary, S. Marcelin, B. Ter-Ovanessian, S. Livi: Evaluation of Water Uptake in Ionic Liquid Composite Polymer Coating: Comparison between Gravimetric and Capacitance Measurements, Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019), Sendai, Japan, (2019), OS18-82, pp. 848-849.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.
 - (Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

課題番号	J19Ly03
区分	リヨンセンター公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

混相エネルギーシステムにおける流体-構造体連成コンピューティング Coupled Computing of Fluid-Structure Interaction Problems for Multiphase Energy Systems

石本 淳*†, Thomas Elguedj**††, 松浦 一雄***, 桑名 一徳**** 中村 裕二*****, 松岡 常吉****

*東北大学流体科学研究所, **INSA de Lyon LaMCOS, ***愛媛大学工学部 ****山形大学工学部, *****豊橋技術科学大学工学部 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

水素は、低炭素社会を実現するために大いに貢献すると考えられているものの改質が必要 とされる二次エネルギーであり、かつ常圧でのエネルギー密度は従来の化石燃料に比べて非 常に小さいため、高密度水素として貯蔵輸送を行う必要がある.また、高圧に充填された水 素を安全に運用するためには、水素の引火限界濃度や安全性を十分考慮した水素ステーショ ン設計、ならびに水素脆化や繰り返し応力の発生に基づく材料劣化の影響を考慮した高圧水 素タンクの設計が必須となる.そこで本研究では、高圧水素容器が破壊されたときに付随し て発生する水素ガスの漏えい現象を研究対象とし、材料の構造解析と流体解析を同時に扱う 連成解析手法の開発を目的とする.また、高圧容器の隔壁のき裂破壊時に発生する水素の漏 えい拡散現象を連成解析する計算手法を開発することにより、安全性の高い水素設備の設計 に貢献することを目的とする.

2. 研究成果の内容

本研究では、き裂伝播に伴う水素漏えい現象を二つのステップに分けて解析を行う.高圧 容器にき裂が発生・伝播するまでの材料側の解析と、き裂伝播後の隔壁から高圧水素が漏え いする流体側の解析の2ステップである.本年度においては粒子法により得られたき裂形状 データを基に混相流体解析を実施した.図1に水素の体積分率(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 75%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



(a) 2.0×10^{-4} s

(b) 8.0×10^{-4} s

図1 漏えい水素体積分率の等値面α=0:5 に関する時間発展計算結果

濃度予測が可能となった.

4. まとめと今後の課題

本年度の研究では、Peridynamics model による材料のき裂伝ば現象に関する数値解析手 法を構築できた. 今後は、高圧水素タンクの漏えい現象を解析する上で必要となる Euler FSI 連成解析モデルの構築を行い、き裂伝ばに伴う水素漏えい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)
- Przemysław Smakulski, Sławomir Pietrowicz, and Jun Ishimoto: Numerical research of solidification dynamics with anisotropy and thermal fluctuations, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. ahead-ofprint No. ahead-of-print, (2019), <u>https://doi.org/10.1108/HFF-12-2018-0740</u> [IF: 1.958].
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] Jun Ishimoto and Satoru Shimada: Coupled Particle and Euler Computing for Hydrogen Leakage with Arbitrary Crack Propagation of Pressure Vessel, 8th World Hydrogen Technologies Convention (WHTC 2019), Tokyo, Japan, (2019).
- *[3] J. Ishimoto and <u>T. Elgued</u>; Coupled Computing of Fluid-Structure Interaction Problems for Multiphase Energy Systems, OS20: AFI-2019 IFS Lyon Center Collaborative Research Forum, Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019), Sendai, Japan, (2019), OS20-11, pp. 234-235.
- [4] 平田憲真,石本淳,落合直哉:橋脚に衝突する洪水流動特性に関する自由表面流動解析,第 33 回数値流体力学シンポジウム(OS.3-1:複雑流体の流れ),札幌,(2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19Ly04
区分	リヨンセンター公募共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

回転二重円すい間に発生するテイラー渦の安定性と乱流遷移

Stability and Transition to Turbulence of Taylor Vortex in a Gap between Rotating Two Cones

足立 高弘*†, 小宮 敦樹**††, 薄木 健太郎*, 高橋 賢次*, 大宮 佳輝* Daniel Henry***, Varely Botton***

*秋田大学理工学部/理工学研究科,**東北大学流体科学研究所,***リヨン大学 INSA †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

流体に回転運動を与えたときの不安定現象についての研究は、混合を考慮するような多く の産業用途にとって重要である。例えば、回転システムの研究はあらゆる同心駆動装置やタ ービンロータなどの回転機械設計に役立つだけでなく、小型の回転熱交換器やミキサーなど 化学装置の最適化にも役立つ。これらの流れをより良く制御するためには、流れの不安定性 が発生する臨界パラメータや、不安定性による流れのパターンの遷移メカニズムを解明する 必要がある。本研究では、ミキサー等のモデルとして、同心同軸で回転する二重円すい間の 流れを取り扱う。

先行研究として、二重円筒間のテイラー・クエット流に関する研究は数多くなされている. その中でも、内側の円筒のみを軸中心に回転させて円筒間の流れ挙動を調べた研究では、内 円筒の回転速度に応じたある臨界点で周方向の回転流が不安定となり円筒間にはテイラー 渦が発生する.この遷移の形態は、円筒長さと円筒の幅の比で表されるアスペクトを無限大 (円筒が無限長)としたときに、完全なピッチ・フォーク分岐となることがわかっている.し かし、アスペクト比が有限の大きさ(上下に蓋のある系)の場合には、渦の発生形態は不完全 分岐となり、さらに回転数を大きくすることで複雑な分岐現象を示す.アスペクト比の変化 に対して、豊富な遷移現象が現われるため分岐理論を用いた観点から多くの研究が行われて いる.

一方で、本研究ではアスペクト比が有限で容器の上下に蓋のある系において、円筒の側 壁が傾斜した同心二重円すいの場合を取り扱う.上述のように分岐の様相は不完全分岐とな り複雑となることが予想される.また、回転による遠心力の斜面成分により、このシステム では回転と同時にテイラー・クェット流と似た渦が生じることが先行研究より分かっている が、それらの渦の遷移条件等については不明な点が多い.そこで、本研究では二重円すい間 内の渦形態が遷移する条件を解明するために、実験と数値解析を用いて安定性解析を行い、 流れが遷移する臨界点とその後の遷移現象を分岐理論を用いて明らかにすることを目的と する.

2. 研究成果の内容

今年度は、側壁が傾斜していない同心二重円筒の場合について、スペクトル・エレメント 法を用いた非線形平衡解の計算行った.図1は、サドル・ノード分岐が生じる分岐点を内外
円筒半径比*Γとレイノルズ数 Re*を用いいて示したものである. 領域 I~IV の分類は, 分岐 の前後で生じるテイラーの個数の違いによるものである. 本研究で得られた結果と他の研究 者の既存の結果との比較を行ったところ, これまでに見付かっていなかった分枝の存在が明 らかになりつつある.



図1: 内外円筒半径比Γとレイノルズ数 Re による分岐ダイアグラム

3. 研究目標の達成状況

円すい形状の流路を取り扱う前段階として,円筒形状を取り扱った.分岐の構造が,円筒の傾斜により大きく変化することは現段階としては考え難いので,研究目標の達成に向け順調な進展途上にあると考えている.

4. まとめと今後の課題

傾斜を持たない同心二重円筒間に発生するテイラー渦の遷移について,非線形平衡解を求めることで,アスペクト比の異なるいくつかの流路形状の変更に対して大域的な分岐ダイアグラムをある程度完成させることができた.最終的には,側壁が傾斜を持つ同心円すい間の流れの大域的分岐ダイアグラムを求めることとなるが,傾斜のない二重円筒の場合においても,その分岐ダイアグラムは複雑なことが明かとなり,目標までの道程はかなり遠いものと思われる.

- 5. 研究成果 (*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>T. Adachi, K. Usuki, D. Henry, V. Botton</u>, A. Komiya : Stability and Transition to Turbulence of Taylor Vortex in a Gap between Rotating Two Cones, *Proceedings of the* 19th International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2019), OS20-9, pp. 230-231.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19Ly05
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
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

Joint Laboratory, Jonoku University

1. Purpose of the project

Early detection of flaws or defects in metallic cracks requires to assess the microstructure changes that occurs before the apparition of cracks. To do so, electromagnetic methods are foreseen to be an effective method as microstructure of the materials strongly affect their magnetic behaviors.

In this framework, the project investigates Magnetic Incremental Permeability and Barkhausen Noise on metallic parts subjected for example to thermal creep.

2. Details of program implement

During previous years of the project, 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. The PhD was defended in September 2019.
- Eddy current testing, Magnetic Incremental Permeability and Barkhausen Noise on representative aged and fatigued metallic samples were tested. The different experimental results are inputs for the theoretical effort. Especially, the parameters of the model are screened in order to establish discriminant and reliable structural health indexes.
- Comparison between Magnetic Incremental Permeability and Barkhausen Noise as techniques revealing the microstructure of the materials.
- Both techniques were modeled using the Jiles-Atherton theory for magnetic hysteresis.

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. Interestingly, Barkhausen Noise show slightly different sensitivities to the microstructure, revealing that both techniques are complementary.

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.



Figure 1: a) Magnetic incremental Permeability (MIP) experimental setup. b) Induction field versus excitation field when performing MIP experiment, showing the local cycles that are measured by the system, thanks to the superimposition of low and high frequency excitation field.

4. Summaries and future plans

Further steps of this collaboration are mostly related to the development of electromagnetic models (linking magnetic fluctuations in the materials to the voltages in measurement coils) for improving the accuracy of model parameters from NDT signals.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, T. Uchimoto, G. Sebald, T. Miyazaki, T. Takagi : Non-destructive testing on creep degraded 12% Cr-Mo-W-V ferritic test samples using Barkhausen noise, *J. Mag. Mag. Mater.*, Vol. 498, (2020), 166102.
- *[2] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto, T. Miyazaki, T. Takagi : Physical Interpretation of the Microstructure for aged 12 Cr-Mo-V-W Steel Creep Test Samples based on Simulation of Magnetic Incremental Permeability, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 486, (2019), 165250.
- [3] B. Gupta, T. Uchimoto, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Miyazaki, 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.
- *[4] B. Gupta, G. Sebald, <u>B. Ducharne</u>, T. Uchimoto, T. Takagi : Modelling Materials Behavior for Advanced Electromagnetic Non Destructive Testing Techniques, *Proceeding of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI-2019), Sendai, (2019), OS20-14, pp. 240-241.
- [5] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, T. Uchimoto, G. Sebald : Micromagnetic Non-Destructive Testing on High Chromium Creep Test Samples: Characterization, Modelling and Physical Interpretation, 24th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, September 11-14, (2019), Chengdu, China.
- [6] T. Matsumoto, <u>B. Ducharne</u>, B. Gupta, G. Sebald, T. Uchimoto : Numerical Analysis and Interpretation of Eddy Current Magnetic Signature Micro-Magnetic Nondestructive Testing & Evaluation Method, 24th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, September 11-14, (2019), Chengdu, China.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19Ly06
区分	リヨンセンター公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

超音波による配管内の腐食の定量化 Corrosion Characterization for Pipe Wall by Ultrasonic Wave

中本 裕之*†, 高木 敏行**,***††, Philippe Guy****, 内一 哲哉**,*** 浦山 良一**, 孫 宏君**

*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 ***ELyTMaX UMI 3757, CNRS–Université de Lyon–Tohoku University, International Joint Unit

> ****Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA de Lyon †申請者, **计**所内対応教員

1. 研究目的

循環する高温,高圧の流体により発電所の配管内面には腐食が発生する.この腐食は徐々に減 肉を進行させるが,腐食面は平坦な面ではなく凹凸のある粗い面であることが報告されている. 本研究ではこの配管内面に生じた腐食による粗さの定量化を目的とする.超音波プローブにより 配管外面から計測することとし,実験において模擬腐食試験体を用いて配管内面で反射した超音 波の減衰の特性を確認する.

2. 研究成果の内容

配管のような金属を媒体として伝搬する超音波を考える.超音波は粗面で反射する際,散乱が発生し減衰する.この粗面の二乗平均平方根高さを粗さ h とし,粗面による減衰関数を-f(h)で表す.一般に,金属などを伝搬する超音波は,反射面である粗面における散乱以外に,伝播距離や媒体の結晶粒径などの影響を受けて減衰する.本研究では,粗さの有無以外は全く同じ寸法と物性をもつ比較対象が存在すると仮定し,

$$(R^{2nd}/R^{1st})/(R^{2nd}_0/R^{1st}_0) = e^{f(h)}$$
(1)

で粗さの超音波に対する影響を定量化する.ただし, R^{ls}_0 , R^{2nd}_0 は粗さのない面でそれぞれ1回目,2回目に反射した超音波の振幅, R^{ls} , R^{2nd} は粗面でそれぞれ1回目,2回目に反射した超音波の振幅を表す. Nagy らは超音波の波数をkとして粗さの減衰関数を $f(h)=2k^{2}h^{2}$ としている.ここで,対象となる配管の材料が同じであれば,超音波の速度は一定であり,波数kは超音波の周波数に依存するため,減衰関数は周波数と粗さに依存する.そこで,実験により広帯域超音波プローブによって計測した反射波を周波数毎に解析することにより1つの反射波から周波数の異なる複数の減衰値を求め,その周波数の減衰値への影響を確認した.

広帯域超音波プローブにより反射波を計測する実験を行った.実験には、中心周波数が5 MHz のプローブを用いた.40×40 mmの面積、厚さ20 mmの炭素鋼ブロックに、機械加工により片 面に櫛状の周期的な傷を加えた.周期が1.25 mmの場合、粗さhが56と91 µm、周期が2.0 mm の場合、hが58と94 µmの4種類の試験体を用いた.各試験体を10回ずつ計測した.信号から 1回目、2回目の反射波を抽出、フーリエ変換により求めた振幅スペクトルを式(1)の各振幅とし. 減衰値をdBとして算出した.



図1:第1反射波と第2反射波のFFT スペクトルと減衰値. (a)と(b), (c)と(d)は傷のピッチがそ れぞれ 1.25 mm, 2.0 mm.

実験結果を図1に示す.実際の中心周波数は約4MHzであり、その前後の3.5及び4.5MHzの周波数も含めて、減衰値が理論値にほぼ一致しており、広帯域プローブを用いることで1回の計測から複数の減衰値が得られることがわかる.また、図1(a)においては5MHz、図1(b)においてはそれに加えて3.5 MHzのスペクトルが急激に減少している.また、図1(c)と(d)においても、3と5MHz辺りで同様なスペクトルの減少を確認できる.試験体の違いからこのスペクトルの減少の原因は傷の深さと周期によるものと考えられ、今後、傷の深さと周期、超音波の周波数とスペクトルの急激な減少の関係を検討する必要がある.図1(b)と(d)において、6MHzの減衰値が理論値よりも急に小さくなっている.これは減衰値の理論値と実験値とが合致する範囲が限られることを示している.今後、推定可能な粗さの範囲について確認する必要がある.

3. 研究目標の達成状況

腐食によって生じた配管内面の粗さの推定方法を確立することを目的として超音波を用いた粗 面の粗さ計測の有効性を検証した.配管形状の試験体の実験はできていないが、特に広帯域プロ ーブと周波数解析を新たに用いることで粗さ計測の高精度化の可能性を実験的に確認した.

4. まとめと今後の課題

模擬腐食試験体を用いて配管内面で反射した超音波の減衰の特性を確認した.今後は,傷の深 さと周期,超音波の周波数と減衰の関係を明らかにし,配管形状の試験体で実験を行う.

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)

- *[1] <u>H. Nakamoto, P. Guy</u>, T. Takagi: Corrosion Induced Roughness Characterization by Ultrasonic Attenuation Measurement, *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol. 11, No. 4, (2020), pp. 139-146.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[2] <u>H. Nakamoto, P. Guy</u>, T. Takagi, T. Uchimoto, <u>K. Hamaguchi</u>: Back Surface Roughness Measurement Based on Attenuation of Ultrasonic Wave, *Proceedings of the Nineteenth Int. Symp. on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), OS20-12, pp. 235-237.
- [3] 石橋昴也, 中本裕之, P. Guy, 高木敏行, 内一哲哉:周期的な傷をもつ粗面における反射による超音波減衰の影響, 2019 年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会シンポジウム, (2019), pp. 73-74.
- [4] <u>中本裕之</u>, <u>P. Guy</u>, 高木敏行, 内一哲哉: 廃炉措置における配管減肉の予測とモニタリング に基づく配管システムのリスク管理 (5)粗面で反射した超音波とその周波数分析による粗さ 評価, 日本原子力学会 2020 年春の年会, (2020), 2C07.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19Ly07
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Response Characteristics of Cellulose Nanofibril under AC Electric Field

Hidemasa Takana*†, Laurent Chazeau**†† Florent Dalmas**, Jean-Yves Cavaille** Anthony Dichiara***, Heather Wise*** *Institute of Fluid Science, Tohoku University **INSA Lyon, Université de Lyon ***School of Environmental and Forest Sciences, University of Washington †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Cellulose nanofibrils (CNFs) with a width of around 4-20 nm and a length of around 1 micro meter have attracted significant attention as a basis for advanced bio-based materials. To fabricate materials such as filaments or films with high mechanical performance from CNFs, it is essential to align the fibrils in the macroscopic structures. It has been demonstrated in the previous study that CNFs can be aligned and assembled into strong filaments using a flow-focusing channel where an elongational flow field is aligning the fibrils in the flow direction.

Takana, et al. of IFS Tohoku Univ. proposed AC electrostatic field in combination with the flow-focusing technique for further control of the CNF alignment. AC electric field is applied upstream of the flow-focusing location aiming at electrostatically control the fibril alignment in the flow. The effect of the applied alternating electric field on the CNF alignment in the flow will be clarified through numerical simulation.

2. Details of program implement

To realize the full potential of this method described above, it is essential to understand the complex behavior of CNFs flowing in the alternating electric field. In this study, a numerical simulation has been conducted of CNF alignment by an alternating electric field in the presence of elongational flow to understand the CNF alignment process in the flow channel. The Smoluchowski equation was used to model the evolution of the probability distribution-function of the orientations of fibrils in electric field and extensional flow field.

3. Achievements

Figure 1 shows a schematic illustration of the flow channel for single cellulose filament fabrication considered in this study. An alternating electric field is applied along the flow direction for CNFs to be aligned parallel to the electric field by the electrostatic torque. The pre-aligned CNFs flow into the nozzle to be aligned further by the elongational flow.

Figure 2 shows the distribution of the obtained order parameter, with and without the electric field. With the application of an alternating electric field between a pair of electrodes before the nozzle section, the order parameter increases linearly from 0 to 0.6 between the electrodes, and then increases up to 0.9 in the nozzle. The CNF alignment is clearly enhanced by the electric field.

4. Summaries and future plans

The numerical modeling on the alignment process of the CNFs in an alternating electric field and elongational flow was successfully developed. Based on the optimized conditions predicted by the numerical model, cellulose fabrication experiments will be conducted and the effect of applied electric field on the material characteristics of fabricated cellulose single fibers will be clarified.



Figure 1: Schematic illustration of the flow channel with electrodes.



- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] H. Takana and M. Guo: Numerical simulation on electrostatic alignment control of cellulose nano-fibrils in flow, *Nanotechnology*, Vol. 31, (2020), 205602 (7pp).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [2] H. Takana, Y. Takeda and M. Kiuchi: Effect of Alternative Electric Field and Elongational Flow on Control of Cellulose Nano Fibril, Proc. of the 4th Int. Conference on Natural Fibers (ICNF2019), Porto, Portugal, (2019), ID61, USB.
- [3] <u>H. Wise</u>, H. Takana and <u>A. Dichiara</u>: Electric Field-Assisted Alignment of Cellulose Nanofibrils and Carbon Nanotubes in a Flow Focusing System, *Proc. of the 16th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2019)*, Sendai, Japan, (2019), OS5-8, pp. 348-349.
- [4] H. Takana and M. Guo: Computational Simulation on Control of Cellulose Nano Fibril by Alternative Electric Field, Proc. of the 16th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019), Sendai, Japan, (2019), OS5-9, pp. 350-351.
- [5] 佐藤瞭,高奈秀匡:高強度セルロース単繊維創製に向けたナノ繊維静電配向の特性シ ミュレーション,混相流シンポジウム 2019 講演論文集,福岡,日本,(2019), P089.
- [6] 高奈秀匡:セルロースナノファイバーを取り巻く国際研究動向と静電配向法による次 世代新素材創製,電気学会第2回電磁界応答流体によるエネルギー・環境技術の新展 開に関する調査専門委員会,東京,日本,(2019),P089. (招待講演)
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.
 - (Award) Not applicable.
 - (Press release) Not applicable.

Project code	J19Ly08
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Elucidation of the Pathophysiology of Skin Sodium and Water Metabolism

Asadur Rahman*†, Akira Nishiyama* Thomas Elguedj**, Jun Ishimoto***†† *Department of Pharmacology, Faculty of Medicine, Kagawa University **Mechanical Engineering, INSA-Lyon & LaMCoS Lab ***Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Since the local disturbances in the sodium ion (Na+)/moisture balance of dermal tissue caused various diseases, elucidation of the mechanism of control behind these disturbances would be crucial to manage these pathological conditions in clinics. Aiming this, the purpose of the present study is to establish the fixation method of dermal tissue to evaluate the in vivo Na⁺ accurately by imaging mass spectrometry (IMS).

2. Details of program implement

In this project, we planned to apply Ishimoto laboratory's vitrification method using a cryogenic solid particulate spray, and use a next generation integrated research system (supercomputer) to achieve dermal tissue fixation by a method that does not alter the water content of skin, and thereby allow accurate evaluation of the Na⁺ concentration distribution in dermal tissue by IMS.



 $\label{eq:starsest} \begin{array}{l} \mbox{Figure 1:A. Principle of two-phase Laval nozzle for continuous SN_2 production;} \\ \mbox{B. Scheme of workflow.} \end{array}$

3. Achievements

We have measured the distribution of sodium in dermal tissues by IMS. But due to the difficulties in tissue fixation step, shrinkage in dermal tissue was obvious in hematoxylin and eosin staining (Fig. 2A). Therefore, the tissue distribution of sodium by IMS in the dermal tissue of high salt diet-fed CKD rats (Fig. 2B) may not reflect the real distribution of sodium. To overcome these difficulties, we are planning to use the vitrification method to fix the dermal tissue before performing IMS.



Figure 2 : A. Hematoxylin and Eosin stain of frozen dermal tissue (OCT sample); B. IMS to detect the distribution of Na⁺.

4. Summaries and future plans

By applying the vitrification method, we may measure the Na⁺ concentration distribution accurately in skin by IMS. This technique will help to identify the local disturbances in the Na⁺/moisture balance of dermal tissue, and to elucidate the mechanism of control behind these disturbances.

- 5. Research results (* 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. Rahman, A. Nishiyama, T. Elguedj</u> and J. Ishimoto: Elucidation of the Pathophysiology of skin sodium and water metabolism, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), OS20-7, pp. 226-227.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19Ly09
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Active Control of Protein Mass Transfer by Membrane Utilizing Variation of Surrounding Condition

Atsuki Komiya*†, Sébastien Livi**†† Ryo Watanabe* ***, Hani Alkitabi Aldaftari * *** * Institute of Fluid Science, Tohoku University **IMP, INSA Lyon, Université de Lyon *** Department of Mechanical Engineering, Tohoku University †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

In this study, we aim to perform the diffusion experiments at a view point of mass transfer control of protein, and quantitative evaluation of mass transport phenomenon by changing the microchannel and pore size of membrane. To achieve an ideal crystal growth process under gravitational condition, the authors are considering a locally active control of mass flux of protein by using a functional membrane. The transient field of lysozyme in hindered diffusion is carefully visualized with changing the condition such as microchannel and pore size by using optical interferometer in this study. The capability and technique for active control of protein mass transfer are also discussed in this study.

2. Details of program implement

In this collaborative research, the hindered mass diffusion phenomenon is focused on. Both French and Japanese sides have concrete contributions and they are merged in this collaborative framework. The main point of this research in Tohoku University is to conduct diffusion experiments. Accurate measurement system for mass diffusion coefficient is designed and hindered diffusion phenomena are visualized. For the evaluation of membrane performance, total mass flux through the material is quantitatively evaluated. The contribution from Lyon end is to make a special membrane. By utilizing several characteristics of polymers or porous media, a special membrane which has a function of changing representative diameter of micro channel due to the surrounding conditions such as temperature, pH value or electric and magnetic fields is fabricated. The evaluation of the characteristics of the special membrane is also done in the French end. As precursory experiments, several types of the membrane filters were used in this study. To compare the experimental results to existing data, iso-pore and millipore type membranes were applied in this study. Representative pore sizes of membrane used were 5µm and 10µm.

Figure 1 shows the typical experimental results of diffusion field visualized by phase-shifting interferometer. These interferograms were obtained from the experiments under the conditions of 5 µm iso-pore and millipore membrane use at elapsed times of t=2500s, 3600s, 4900s and 6400s. From the visualization results, the concentration gradient near the surface has no difference between iso-pore and millipore cases. However, the concentration profile at far side differs between two cases. Figure 1 also shows concentration profiles at t=2500s. At 2mm distance from the surface, the concentration profile in case of millipore membrane shows large compared with the case of iso-pore membrane.



Figure 1 : Typical experimental results in case of 5µm iso-pore and 5µm millipore cases.

3. Achievements

We could successfully visualize transient mass diffusion field. The achievement of our activity in this year was 80%. The difference of mass flux between 5μ m and 10μ m cases should be discussed later. This might be affected by the time variation of concentration difference between upper and bottom surfaces of membrane.

4. Summaries and future plans

This study focuses on the evaluation of the relationship between hindered diffusion process of protein through several types of membranes and their structures. A series of clear visualized images of concentration profiles of diffusion fields was obtained. The experimental results reveal that the concentration gradient near the surface has no difference between iso-pore and millipore cases. As future plan, we will continue the visualization experiments and evaluate the hindered mass diffusion process.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] A. Komiya, R. Watanabe, H. A. Aldaftari, S. Moriya and <u>S. Livi</u>: Evaluation of the Relations between Hindered Diffusion Process of Protein and Membrane Structure, *Extended Abstracts of the Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference*, (2019), PRTEC-24440.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [2] R. Watanabe, S. Moriya, <u>S. Livi</u>, H. A. Aldaftari and A. Komiya: Quantitative Evaluation of the Influence of Membrane Structure on Protein Mass Diffusion, *Proceedings of 16th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS18-77, pp. 838-839.
 - [3] H. A. Aldaftari, R. Watanabe and A. Komiya, Numerical Simulation of Concentration Field around a Growing Crystal Subjected to Gravity, *Proceedings* of 16th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2019), OS18-78, pp. 840-841.
 - *[4] A. Komiya, R. Watanabe and <u>S. Livi</u>, Protein Mass Transfer Control by Using Hindered Diffusion in Membrane, *Proceedings of the 19th International* Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2019), OS20-6, pp. 224-225.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19Ly10
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Eddy Current Magnetic Signature (EC-MS) Micro-Magnetic Nondestructive Method for the Evaluation of Fe-Si Electric Steel

Benjamin Ducharne*†, Tetsuya Uchimoto**.***†† Shurui Zhang**, Toshiyuki Takagi**.** *Univ. Lyon, INSA-Lyon, LGEF **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***ELyTMaX UMI3757, CNRS- Université de Lyon - Tohoku University International Joint Laboratory, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Magnetism has been used for years as a subsidiary method to identify the level of mechanical residual stress through ferromagnetic steels. It is admitted that residual stress strongly modifies the magnetic behavior and consequently the monitored magnetic signatures. However, some of them like the Eddy Current Magnetic Signature (EC-MS) happen to be especially sensitive. EC-MS exhibits drastic changes, strong enough to predict and anticipate the presence of elastic or plastic deformations. The EC-MS signature is obtained by plotting the imaginary part versus the real part of an Eddy current probe impedance, controlling locally a tested sample under the influence of a slowly varying high amplitude magnetic excitation. The superimposition of the weak amplitude, high-frequency magnetic excitation of the Eddy current probe to the quasi-static contribution creates minor hysteresis loop situations where the reversible magnetic contribution is the main provider. EC-MS is, therefore, an exceptional way to observe and characterize this reversible contribution and this over different average magnetic states. This contribution tends to be particularly sensitive to residual stresses and strains, and so is EC-MS. In this framework, the project investigates EC-MS. Experimental set-up improvements are envisaged such as dedicated numerical tools to enhance the understanding of the method.

2. Details of program implement

During this year, the following tasks were completed:

- Development of a simulation tool for the EC-MS magnetic control method. This simulation tool is based on the Jiles-Atherton-Sablik theory and an improved Dodd and Deeds analytical solution for the simulation of a pancake-type Eddy current coil. This task lied in the framework of the master degree of Ms Shurui Zhang and M. Aoba Kita.
- Ms Shurui Zhang and M. Aoba Kita stayed two months in INSA Lyon from September the 1st 2019 to November the 1st 2019. During their stay complementary magnetic tests were performed (Hysteresis cycle B(H) ...).
- M. Ducharne went to IFS in January for two weeks, to validate the simulation tool by comparing the simulation results to the experimental ones.

3. Achievements

Simulations of EC-MS are required as they constitute an essential step towards the understanding of the physical mechanisms. In this project, the scalar Jiles-Atherton-Sablik stress dependent hysteresis model has been used to simulate the induction, the differential and the incremental permeability of a mechanically stressed Fe-Si electric steel. By coupling these simulation results to a frequency dependent analytical solution of a pancake coil type Eddy current sensor (modified Dodds and Deeds (D & D) analytical solution), the simulation of the EC-MS impedance variations have been obtained. To converge towards correct simulation results, the early stage D & D solution had to be improved by the adjunction of a classic dynamic contribution product of ρ to the time derivative of B. Unlike the classic approach, correct simulation results have only been obtained by considering a B and T small dependences of ρ , strong enough to modify the EC-MS signature (reversible magnetization) but too weak to influence the frequency dependence of the B(H) hysteresis cycles (irreversible magnetization).

4. Summaries and future plans

Further steps of this collaboration are mostly related to the improvement of the already existing simulation tool (More specifically improve the link between the magnetic fluctuations in the materials to the electrical quantities in the measurement coils).

- 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] T. Matsumoto, <u>B. Ducharne</u>, B. Gupta, G. Sebald, T. Uchimoto: Numerical Analysis and Interpretation of Eddy Current Magnetic Signature Micro-Magnetic Nondestructive Testing & Evaluation Method, 24th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Chengdu, China, September 11-14, (2019).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19Ly11
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Microfluidic Tools to Study Aerotaxis in Eukaryotic Cells

Jean-Paul Rieu*†, Christophe Anjard*, Olivier Cochet-Escartin*, Rémy Fulcrand* Kenichi Funamoto**††, Satomi Hirose**

> *The Institute of Light and Matter, Claude Bernard University Lyon 1 **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

It is well known that eukaryotic cells sense oxygen tension and change their behaviors accordingly either by regulating gene expression as just highlighted by the Nobel Prize in Medicine 2019. It is less known that they can also move to regions of favorable oxygen level (aerotaxis) [M. Deygas, et al. Nat. Comm., 2018]. Using a self-generated hypoxic assay, we showed at iLM that the social amoeba Dictyostelium (Dicty) displays a spectacular aerotactic behavior. When a cell colony is covered by a coverglass, cells quickly consume the available O₂ and move outward of the hypoxia area, forming a dense expending ring moving at constant speed (see Fig. 1A-B). Hence, aerotaxis seems a conserved mechanism in various eukaryotic cells.

The self-generated hypoxic response in our spot assay combined with the easy use of Dicty for quantitative biology provides a powerful experimental framework to understand the molecular nature of the O_2 directed migration as well as the detection and sensing mechanisms (sensitivity to a threshold or to a gradient, response time, and cell adaptation). However, to get further insight in the O_2 sensing mechanisms, we need to develop oxygen gradient microfluidic devices to investigate the cell responses to various types of O_2 gradient as functions of gradient steepness and absolute O_2 level. Therefore, we design a new device to study aerotaxis adapted from Funamoto's microfluidic devices for observations of cancer and endothelial cells [K. Funamoto, et al., Lab Chip, 12 (2012), Integr. Biol., 9 (2017)].

2. Details of program implement

We have fabricated a very efficient microfluidic device enabling to control the O_2 concentration in the range of 0.5-20% within 15 min with gas channels positioned just above the media channel with cells. An effort was made to include O_2 sensing polymer films inside the device. The device was fabricated in NanoLyon facility during a two-month stay of Funamoto and Hirose at iLM in 2019. Then, it was successfully tested with Dicty during that stay. Dicty cells responded to the 0-2% range of O_2 concentration. This is extremely low O_2 concentration and indicates a very efficient O_2 detection mechanism for those cells.

3. Achievements

This project is progressing smoothly, and we obtained several critical achievements to understand aerotaxis of Dicty cells.



Figure 1 : (A-B) A spot of initially densely packed *Dictyostelium* cells quickly move outward with the formation of a ring of cells when covered by a coverglass (B, 3 h). (C-F) Microfluidic device developed jointly by IFS and ILM generates an O₂ gradient between 0% and 21%: (C) device geometry with two gas channels above a media channel whose bottom is covered with an oxygen-sensing film; (D) raw fluorescence signal of the O₂ sensitive fluorophore contained in the oxygen-sensing film (the brighter the fluorescence intensity, the less the fluorophore quenching, and the lower the oxygen concentration); (E-F) calculated oxygen map and profile along media channel, and the oxygen concentration is as low as 0.5% on the hypoxic right side.

- 4. Summaries and future plans
- (i) We developed a microfluidic device, and used it for experiment with Dicty cells. We'll validate the microfluidic device using several cell lines and improve it for Dicty, especially for mutants associated with proteins involved in the O₂ detection and response pathways.
- (ii) Our preliminary results indicate that Dicty cells become aerotactic when O_2 concentration is lower than 2%. The current device can barely not control the O_2 concentration down to 0.5%. We need hence to work on a second generation of devices or to adjust protocols to control more precisely gradient in the O_2 concentration range 0.1-0.5%.
- 5. Research results (*reprint included)
- 1) Journal

Results obtained during the 1st year of the project will be submitted during the first semester of 2020 to a major interdisciplinary journal (PNAS). A more detailed methodological paper will be submitted in 2020.

- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- J.-P. <u>Rieu</u> and K. Funamoto: Reduced oxygen availability triggers aerotactic migration of Dictyostelium, *ELyT Workshop*, Voguie, France, 17th-19th Feb. (2020).
- Patent, award, press release Not applicable.

Project code	J19Ly12
Classification	LyC collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year

Sensitivity Analysis for Fast and Efficient CFD Design under Unsteady Flow Behavior

Aiko Yakeno*†, Frederic Gillot**††, Sebastien Besset***, Benjamin Chouvion*** *Institute of Fluid Science, Tohoku University **ElyTMaX, UMI 3757: CNRS-TOHOKU University-Université de Lyon ***Department of Solid Mechanics, Mechanical Engineering and Civil Engineering, Ecole Centrale Lyon †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The context of the study is the analysis of unstable behavior of wing profiles when exposed to trans-sonic conditions. Simulations are available and come from specific codes, but unfortunately require huge computational effort when changing experiment conditions (flux conditions, wing design parameters). In order to achieve fast design analysis under trans-sonic conditions, a sensitivity analysis of the numerical experiments is of special interest, but not yet available. (Sudret 2007, Fruth et al., 2013)

The proposal can be divided into three parts. First part will consist of applying metamodelisation of a given cost function representing the emerging of unstable behavior of a given wing section design exposed to trans-sonic flux. The meta-modelisation will then enable to reach classical sensitivity analysis output, such as Sobol indexes, which will allow targeting a specific and limited set of parameters for shape optimization studies. The second part will consist of working on spatiotemporal meta-modelisation, able to take into account transient phenomena of unstable behavior. Spatio-temporal kriging will then be considered as a first approach to reach the sensitivity indexes. The third step will consist in developing polynomial chaos (PCE) meta-modelisation of the unstable phenomena criteria. As working on PCE allow to reach directly sensitivity indexes, the effort put on its building will benefit directly and will provide us with direct access to sensitivity indexes and statistical information on the wing design.

2. Details of program implement

2.1 Research plan and preparation status

The project will be running on 3 years from October 2019. Expected results are mainly open sources codes, as well as scientific publications in international conferences and in international peer-reviewed scientific papers. We will proceed the research, in the following three steps.

1) classical Sensitivity analysis with NOVA type approaches

2) improving with meta-modelelisation

2.1) Kriging kind meta-modelisation for ANOVA estimation

2.2) Spatio-temporal Kriging based approach

- 3) change of the model description -> classical FDM to the iso-geometric description
 - 3.1) sensitivity from Iso Geometric Analysis model with polynomial chaos
 - 3.2) sensitivity from IGA(Iso Geometric Analysis) model with patio-temporal kriging

The first year will be dedicated to stepping one and two, the second year on steps two and three, and the third and last year on the third step and specific applications. We have already started discussions and shared ideas. We have obtained one of the first results on transonic buffet unsteady phenomena (Fig.1) around an airfoil.

2.2 Database preparation of airfoil unsteady flow simulations

The unsteady simulation takes much computational cost, 100 times larger than that of a steady one. One of the most significant issues of this study is database preparation of unsteady flow simulations around airfoil shapes. In this case, we try to simulate twodimensional flow around NACA airfoil 70 different shapes (Fig.2).

2.3 Sensitivity analysis

On the sensitivity analysis side, generic code is being produced to adapt to future databases from CFD. The use of GPU enhanced code is foreseen so that to decrease computational sensitivity analysis



Fig. 1 Transonic buffet simulation around an airfoil (pressure distribution)



Fig. 2 Database preparation of unsteady flow simulations around different airfoil shapes

time and enable fast experiments for the codes.

3. Achievements

The study has just been launched in the last October and achieved some of a good result as has been planned.

4. Summaries and future plans

In the project first year, corona-virus infection restrained traveling in Japan. However, we think through this study, it is expected the interdisciplinary research collaboration will lead a novel technology 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. Not applicable.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

2. 研究成果報告書 <リーダーシップ共同研究>

課題番号	J19L016
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	$2019.4 \sim 2020.3$
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, ††所内対応教員

1. 研究目的

シリコンの100倍の移動度や鉄鋼の200倍の強度を示すグラフェンは様々な応用が期待されている.その薄膜化には触媒が必要であり、高い成膜温度も必要である.これまでに、グラフェンをはじめとして、機能性材料のエピタキシャル成長を実験的に確認している.本研究では、各種機能性材料の成長過程について、理論的な考察を行う.

2. 研究成果の内容

炭素系膜の作製では、二酸化炭素中でのグラフェンの成長を報告(ACS Omega 2 (2017) 1523.)した.異なる基板上への成膜を試みたところ、図1に示すようにシリコン基板ではナ ノボールなどの成長が確認された.各種基板上での炭素系材料の安定性について、シミュレ ーションを用いることで考察している.本内容は招待講演 1 件を含む国際会議 (IUMRS-ICA2019 Perth Australia, ISPlazma2020 Nagoya)で2件の発表を行い、論文誌への の投稿を行い、学会誌への解説記事も執筆した.



また、炭素系膜の初期成長で粒状に成長している場合があり、そのラマン測定ではピーク

の大きなシフトが観察された.そこで、モデルを用いたラマンピークのシミュレーションを 行った.図2にシミュレーションによるラマンピークを示したが、更に大きな系でのシミュ レーションが必要のようである.



3. 研究目標の達成状況

今回,各種基板情での成長過程についての検討を行い,国際会議での発表2件と論文1本の投稿を行った.

4. まとめと今後の課題

今回,カーボン系材料についてのラマンシフトのシミュレーションも行ったが,更なる境 界条件等の最適化などが必要である.また,酸化物材料についての報告(*J. Jpn. Appl. Phys.*, 58 (2019), pp. SAAD06-1-4.)についても,更に新規のポテンシャルを用いるなど検討してく 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>金子智</u>: 触媒のいらないグラフェン作成, ニューダイヤモンド, 第 134 号, (2019), pp. 25-27.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] <u>Satoru Kaneko</u> et.al.: Graphitic films growth on insulators: paper and oxide substrate, *UMRS-ICA2019*, Perth, Australia (2019), 招待講演.
- *[3] S. Kaneko, R. Sudo, S. Yasuhara, T. Endo, M. Yasui, M. Kurouchi, M. Can, S. Shawuti, Y. Nakamaru, C. Kokubun, K. Konda, T. Tokumasu: In-plane Relation between Magnesium Oxide Thin Film and Silicon Substrate, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-45, pp. 90-91.
- [4] <u>Satoru Kaneko</u> et.al.: Graphitic spheric ball and thin film growth in oxygen atmosphere by pulsed laser deposition, *ISPlazma2020*, Nagoya, (2020).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19L023
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

超小型航空機周りの非定常空気力学特性に関する数値的・実験的研究 Experimental and Computational Study on Unsteady Aerodynamic Characteristics of Micro Aerial Vehicles

佐々木 大輔*†, 下山 幸治**†† 赤坂 剛史*, 岡本 正人*, 大林 茂**, 髙橋 俊*** *金沢工業大学工学部, **東北大学流体科学研究所 ***東海大学工学部 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年注目を集めているドローン(回転翼機)を初めとして、超小型航空機を様々な用途で 使用することに注目が集まっている.その一方、運用時間の制限や安定性の問題等が明らか になっており、超小型航空機の非定常空力特性を理解することで、それらの問題を解決する ことが期待されている.低レイノルズ数の流れ場においては、流れ場が複雑であり、レイノ ルズ数や形状の相違によって空力特性が大きく変化することが知られている.本研究では、 様々な翼形状や羽ばたきが非定常空力特性に及ぼす影響について風洞実験及び数値流体解 析(CFD)により解明する手法を研究する.

2. 研究成果の内容

微小な力の変化や流れ場の複雑な変化が生じる低レイノルズ数の流れ場を理解するため には、風洞実験と CFD の両者が必要となる.風洞実験においては、非定常翼の空力特性を 理解するために、平板を対象としてヒーヴィング運動を初めとする羽ばたき翼の空力係数値 の取得等を行った.併せて、翼表面の凹凸が特徴的なトンボの翅(コルゲート翼)を対象と し、平板との比較を通してコルゲート翼の非定常特性について調べた.

また、CFD では、風洞実験との空力特性の比較を行うと共に、コルゲート翼に対し、通 常のモデルと凹凸部を閉じたモデルにおいて3次元解析を実施した.解析により得られた空 力係数と可視化図を比較することで、コルゲート翼に存在する凹凸形状が流れ場に与える影 響を明らかにした.図1では、レイノルズ数3000、最大揚抗比となる迎角3度において、 通常のコルゲート翼と凹凸を塞いだコルゲート翼の可視化図を比較している.通常のモデル では、翼型上面に存在する凹部にて2次元的な渦が形成され、この渦が層流剥離泡における 死水域のような役割を果たし、揚抗比を向上させている.一方、凹凸を閉じたモデルでは、 上面の前縁から1つ目の凹部でのみ2次元的な小さな渦が発生しているだけであることが分 かる.本研究により、コルゲート翼は低いレイノルズ数帯で有効であることを明らかにした.



(a)通常のコルゲート翼 (b)凹凸を閉じたコルゲート翼 図1:最大揚抗比となる迎角における凹凸の有無による流れ場の変化

3. 研究目標の達成状況

本研究では、実験的・数値的研究により、羽ばたき翼の非定常空力特性の詳細な解明を目 標としている.風洞実験では、平板等を対象として羽ばたき翼の非定常空力係数を取得し、 低レイノルズ数下における挙動を調べた.更に詳細な解析をするためには、非定常振動翼の CFD解析が必要であるが、コルゲート翼の非定常解析を実施して流れ場を解明したものの、 振動翼に関しては予備的な解析にとどまってしまっている.そのため、早急に解析手法を確 立し、実験との比較を行う予定である.

4. まとめと今後の課題

本研究では、実験的・数値的研究により、コルゲート翼の空力性能の高さの要因について 調べた.特に、凹凸の有無を変化させた CFD 解析により、凹凸の効果を明らかにすること ができた. 今後、羽ばたき翼の非定常空力特性を解明するためには、レイノルズ数を変化さ せた風洞実験を更に実施すると共に、CFD による非定常振動翼の解析が不可欠である.

- 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>Y. Yamaguchi</u>, <u>D. Sasaki</u>, <u>M. Okamoto</u>, K. Shimoyama and S. Obayashi: Numerical Investigation of Geometrical Corrugate Influence to Vortex Flowfields at Low Reynolds Number, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 14, No. 3, (2019), JFST0018 (8 pages).
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[2] D. Sasaki, T. Akasaka, M. Okamoto, K. Ouchi, Y. Shikada, Y. Yamaguchi, S. Fukatsu, A. Shirakawa, H. Ohshima, S. Obayashi and K. Shimoyama: Experimental and Numerical Study on Unsteady Aerodynamic Characteristics, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-46, pp. 92-93.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19L025
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

乱流の階層スケールにおける Eigen-vortical-axis line に関する研究 A Study of Eigen-Vortical-Axis Line in Hierarchical Flow Scales in Turbulence

中山 雄行*†, 服部 裕司**†† *愛知工業大学工学部, **東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

乱流を特性づける渦において、その渦軸は渦の位置、性質や構造、また渦モデルの構築の 上に欠かせないが統一的な定義は未確立である.近年提案された"Eigen-vortical-axis line"は、 渦線よりも強い旋回強さ、また圧力極小も有していることが低レイノルズ数の一様等方性乱 流で示されている.乱流は複数のスケールの流れで構成されていると考えられるが、本研究 では乱流を階層的にスケール分解した流れにおける Eigen-vortical-axis line の特性を解析する.

2. 研究成果の内容

擬スペクトル法(波数 k < 120)による DNS (Direct Numerical Simulation)において、テイラーレイノルズ数約 35 の一様等方性乱流を波数に応じて流れをスケール分解し、各々のスケールにおける渦領域(swirlity $\varphi > 0$ の領域)中の Eigen-vortical-axis line と渦線の特性を解析した. 図 1 では、 $\varphi = 3.5$ のコンターまた一平面上の $\varphi(\varphi_{2dim}$ にて示す)のコンターによって示された 渦領域において、これを通過する Eigen-vortical-axis line(φ のコンター φ_a にて示す)の例を示す. 渦線は、渦コア領域中で螺旋軌道となる場合があることが確認された. 図 2 は、波数 8 ≤ k < 16の範囲のスケールの流れにおける渦領域と Eigen-vortical-axis line のバンドルの例を示す. 各階層スケールにより渦領域の形状は異なるが、Eigen-vortical-axis line は渦線より渦 (swirlity)の強い領域を通ることが解析により示された.



この性質に関し、渦の伸長(vortex stretching)の特性をこれら二つの軸線について解析した.

図2:波数8≤k<16のスケール流れ における渦領域とEigen-vortical-axis lineのバンドル

中の Eigen-vortical-axis line のバンドル

(ηはコルモゴロフスケールを示す)

渦の伸長の方向は、歪み速度テンソルSと 渦度ベクトルのの積Sのにより表され、ま たエンストロフィーの増分は旋回に関す る成分並びに旋回平面に並行な渦度・渦軸 (Eigen-vortical-axis line)角度に関する成分 に分解できる(K. Nakayama, Phys. Rev. Fluids, 2017). この旋回を強める成分を δ_{nor} とし、またSのと Eigen-vortical-axis line・渦 線との角度を θ とすると、Eigen-vortical-axis line は渦線よりSのとの角度が小さく、また δ_{nor} も高い. 波数60 ≤ k < 120 の小スケール 流れの全周吸い込み渦におけるこれらの



る δ_{nor} と(a) Eigen-vortical-axis line, (b)渦線の θ との JPDF

JPDF(結合確率密度関数)を図3に示す.この傾向は、定性的に流れのスケールに依らない特性であった.

これらの研究結果より, Eigen-vortical-axis line は本乱流において流れの階層スケールに依 らず旋回の強い領域を通り,また渦の伸長では渦線より伸長方向との角度が小さく,効果的 に旋回を強める成分が与えられていることが示された. Eigen-vortical-axis line が旋回を強化 される作用をより大きく受けることは,本 line 上の渦が強いことの一因と考えることができ る.

3. 研究目標の達成状況

本研究によりローカルトポロジーによる渦の伸長の渦軸への影響が評価され, Eigen -vortical-axis line は渦線より渦(旋回)が強いことの一因が明らかになった. 渦軸は渦の強いコア領域を通る, という渦軸の公理的な条件を Eigen-vortical-axis line は満たすことが示され, 研究目標は達成されたと考えられる.

4. まとめと今後の課題

Eigen-vortical-axis line について、一様等方性乱流における階層スケールに依らない特性が 明らかになった. 今後は本研究でも進めていた非等方性乱流での本 line の特性、また渦コア 領域を通る軸線の幾何を特定する local axis geometry の理論(K. Nakayama, *ICFD2019*, 2019)を 用いて渦軸と渦のトポロジーの関わり・メカニズムについて解明することが望まれる.

- 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>K. Nakayama</u>, <u>H. Hori</u>, and Y. Hattori: A Study of Eigen-Vortical-Axis Line in Hierarchical Flow Scales in Turbulence, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-47, pp. 94-95.
- [2] <u>H. Hori, K. Nakayama</u>, and Y. Hattori: Stretching Effect for Swirling in Eigen-Vortical-Axis Lines in a Hierarchal Isotropic Homogeneous Turbulence, *Proceedings of Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS16-14, pp. 682-683.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19L040
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	3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.また、他の計測手法と PSP で得られた計測結果を比較することで、PSP 計測の妥当性評価について、併せて実施 した.

2. 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 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.



Flow separation line

図1:マッハ 1.9 で飛翔する球状物体上の圧力場 (飛翔体移動方向: 左から右) 図より, 飛翔体上において, 飛翔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. 飛翔体半径より後方において, 圧力 は急激に低下しており, 飛翔体後部では低圧領域が広がっているのが分かる. 本結果と同条 件で取得したシュリーレン写真と比較すると,上述した流れ場とシュリーレン写真上の流れ 場は定性的に一致しており, PSP による計測結果とシュリーレンによる計測結果の間に整合 性が見られた.以上により,定性的には球状物体上の圧力場を可視化し,その妥当性を他の 流体計測手法によって示すことに成功した.

3. 研究目標の達成状況

本年度の成果としては、前年度に開発した高速応答型二色発光 PSP の特性をさらに向上 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.特にシュリーレン法などの 他の計測手法で取得した流れ場と PSP との整合性も確認され、PSP 計測の妥当性評価も実 現した.また、PSP の性能向上についての新たな指針も得られたため、今後計測精度をさら に高めることも可能であることが分かった.

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.計測精度は昨年度よりも向上しており、かつ他の計測手法と組み合 わせることで、PSP 計測の妥当性を示すことも出来た.本年度の成果から更なる 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 を作成し、更に計測精度を高めた実験を遂行する予定である.

- 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・ロ頭発表等
- *[1] <u>D. Numata</u> and K. Ohtani: Time-Resolved Pressure Measurement on the Surface of a Supersonic Spherical Projectiles by Using a Bi-Luminophore PSP, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-93, pp. 196-197.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J19L043
Classification	Discretionary general collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year (progressing)

Neutral Beam Based Interface Engineering for Triboelectric Nanogenerators

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 engineering is important technique for controlling triboelectric behavior. Thus, various surface modification techniques had been developed for dramatically enhancing triboelectric performance. However, the investigation of interfaces in TENGs were hardly performed. In this project, therefore, we investigate the effect of interface engineering on triboelectric performance. This project has three objectives: (1) Investigation of the effects of interface engineering on performance of TENGs; (2) Characterization and Optimization design of interfaces between triboelectric materials and electrodes; (3) Acquirement of physical mechanism.

2. Details of program implement

Interface engineering was applied on interface between negative tribo-materials and electrode. To understand the effects of interface engineering on TENG, the following actions were progressed:

(1) Deposition of metal oxide interlayer:

The metal oxide interlayer was deposited on Al electrode. First, the neutral beam based oxidation and deposition of metal oxide using sputter ware conducted to obtain the difference between methods and triboelectric performance. Furthermore, various metal oxides were utilized, such as HfOx, TiOx, and AlOx, to confirming the effective interlayer.

(2) Triboelectric performance:

We controlled the contact area, frequency and load to be 300 mm^2 , $2.5 \sim 5 \text{ Hz}$, and 5 N, respectively. The outputs were measured using oscilloscope and low-noise preamplifier.

(3) Characterization:

The physical characteristics of metal oxide interlayer were investigated using X-ray absorption spectroscopy (XAS) and Kelvin probe force microscopy (KPFM).



Figure 1 : Effect of metal oxide interlayers formed with (a) NB and sputter, (b) various metal oxides, and (c) Effect of oxygen partial pressure (O.P.P.) on tribo-performance.

3. Achievements

Figure 1a shows the effect of metal oxide interlayers formed with neutral beam (NB) and sputter. Without a metal oxide interlayer, the maximum voltage was measured as 20 V. However, the output performance was enhanced after applying the metal oxide interlayer. After forming metal oxide interlayer using NB, the tribo-performance was slightly improved to 23 V. Meanwhile, the triboelectric performance was noticeably enhanced to over 60 V after forming a metal oxide interlayer with sputter. During NB based oxidation, thin and dense oxide layer can be formed. However, the oxygen vacancy can be formed during sputtering. Thus, we assumed that the oxygen vacancy affects the triboelectric performance. Therefore, we controlled the oxygen partial pressure (O.P.P.) as shown in Figure 1b. As increase the O.P.P., the triboelectric performance was significantly dropped from 350 V to 200 V. This means that the oxygen vacancy in metal oxide interlayer can improve the triboelectric performance. Since the element of electrostatic induction in TENGs change from dipole to free electron between the tribo-materials and electrode, the electrostatic interruption by excess free electrons might be possible. When applying the metal oxide interlayer with oxygen vacancies, the excess free electrons can be trapped by oxygen vacancy due to the electrical property of oxygen vacancy. Thus, the electrostatic interruption can be prevented. Finally, we investigated the effective metal oxide for improving triboelectric performance. As indicated in Figure 1c, the TiOx interlayer shows highest output performance. This trend can be explained, based on their dielectric constant. Dielectric constants of AlOx, HfOx, and TiOx were measured as approximately 6, 14, and 38, respectively. This means that the dielectric constant also affects the triboelectric performance. Thus, the metal oxide interlayer can improve the triboelectric performance, based on the free electron trapping by oxygen vacancy and improving polarization.

4. Summaries and future plans

We confirmed the effect of metal oxide interlayer on triboelectric performance. The oxygen vacancy and dielectric constant of interlayer are important variable to controlling triboelectric performance. Based on these results, we will acquire more controllable interfacial engineering for improving TENG performance.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] W. Kim, T. Okada, H.-W. Park, J. Kim, S. Kim, S.-W. Kim, S. Samukawa and D. <u>Choi</u>: Surface modification of triboelectric materials by neutral beams, J. Mater. Chem. A, Vol. 7, No. 43, (2019), pp. 25066-25077.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[2] W. Kim, J. Yu, H.J. Hwang, T. Okada, S. Samukawa, D. Choi: Electron Blocking Layer based Interfacial Engineering for Improving Triboelectric Performance, Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2019), CRF-48, pp. 96-97.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.

(Award)

Best Paper Award, "Neutral beam aided surface modification for controlling triboelectric behavior", <u>Wook Kim</u>, Takeru Okada, Seiji Samukawa, <u>Dukhyun Choi</u>, October 21, 2019, Chinese Institute of Electronics & The Japan Society for Precision Engineering.

(Press release) Not applicable.

Project code	J19L045
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	3rd year

Application of Nanostructure 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 has been tested as condensing surfaces to understand temperature-dependent switchable wettability, nucleation density and droplet depinning behavior. 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. Moreover, stick-slip dynamics needs to be investigated, resulting in physical understanding of droplet depinning in various phases of paraffin, namely, solid, mush and liquid.

Shown in Figure 1A is the test facility to study the performance of condensation of water at atmospheric pressure, leading to the dorpwise condensation on paraffin-infused SLIPS (Figure 1B) and droplet number density in solid and liquid phase (Figure 1C).



Figure 1 (A) The schematic of condensation unit (B) Condensation patterns on pristine copper and paraffinic slippery surfaces, (C) Droplet number density in solid and liquid phase of paraffin wax.

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 and 1C. The paraffin-infused surfaces could provide a unique wettability change depending on the solid and liquid phases that considerably influence the droplet number density. Such pehenomeon is of great practical importance in condensation heat transfer and water-harvesting applications.

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.

- 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, Peng Zhang</u>, Hiroki Nagai: Triple-phase Contact Line Dynamics of Sticky and Slippery Surfaces, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-53, pp. 106-107.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J19L054
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	1st year (progressing)

Analysis and Modeling of the Transport Properties of the Contact Line Based on the Molecular Dynamics Simulation

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, nanoscale mechanical devices can be realized, and the transfer of heat and momentum between liquids and solids on the nanoscale 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 considered 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. In this year, we focus on the slip length dependence of the argon droplet shearing phenomena as shown in figure 1.

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 molecular dynamics (MD) simulation. Changing the magnitude of interaction between the liquid and the solid walls and the channel size, we will clarify the slip length dependence of the dynamics of the liquid-vapor interface. We make the droplet sheared condition and evaluate the shape of the interface by the function, Q, defined as follows,

$$Q(z) = \cos\theta_{\rm R}(z) - \cos\theta_{\rm A}(z)$$

where z is the coordinate along the perpendicular direction of the solid wall, θ_R and θ_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. Moreover, the interaction parameters are changed in 4 patterns, 0.30, 0.36, 0.42, and 0.48 kJ/mol. The liquid droplet is constructed by

argon atoms. Using these parameters, the channel size and the slip length dependence of the function, Q, is clarified.



3. Achievements

Figure 2: Simulation results of the shape of the interface. (a) MD simulation in the case of the 0.48 kcal/mol and 10 nm. (b) Channel size dependence of the characteristic value, Q_{c} .

Figure 2(a) shows a typical example of the simulation result of the shape of the interface in the case of 0.48 kJ/mol and 10 nm. At the point that z is zero, the function has the maximum values and decrease with approaching the solid walls. Figure 2(b) shows the channel size dependence of the maximum value of the Q, which is named $Q_{c.}$. The horizontal axis is the ratio between channel size and the slip length between the liquid and the solid. The Q_c linearly increases with increasing the ratio between the channel size and the slip length. This result means that this ratio is the important parameter to describe the dynamics of the droplet on the solid surface.

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 channel size and the slip length dependence of the shape of the interface by molecular dynamics simulation. As a result, the characteristic value of the shape of the interface increases with increasing the ratio between the channel size and the slip length. In the future work, we will make numerical models to describe the dynamics of the liquid-vapor interface.

- 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>, and T. Tokumasu : Analysis and Modeling of the Transport Properties of the Contact Line Based on the Molecular Dynamics Simulation, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-43, pp. 86-87.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not applicable.
 - (Award) Not applicable.
 - (Press release) Not applicable.

課題番号	J19L067
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2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**†† *東北大学病院臨床研究推進センター,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

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

頭蓋模擬モデル,とくに音響インピーダンスの異なる材料を用いた円管内において微小爆 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. 初年度の成果とあわせて、3次元で空気を含有する材料(ゴアテックス、ベンシーツ)の 社会実装に向けて,臨床的な考察をあわせた検討を行った.

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音響インピーダンスの異なる材料を用いた円管内にお い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頭蓋 内での挙動を解析する模擬モデル実験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、初年度計測した複数の材質にお ける過剰圧減衰効果を基にして社会実装するための基礎的知見を得ることができた.細胞レ ベルにおける損傷機序解明については今後の課題として残った.

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るが、損傷機序解明、損 傷防止機序解明、いずれにおいても基礎的な知見を得ることができた.

4. まとめと今後の課題

本研究の結果,衝撃波の生体内電波をより微視的な観点から捉え,衝撃波が組織,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.とくに,爆風損傷全体に おける衝撃波の果たす役割に関して,損傷機序解明,損傷防止機序構築の観点から基礎的な 知見を得ることができた.その一方で,細胞レベルでの損傷機序については明らかになって おらず,引き続き,高速度撮影,圧測定,理論解析を含めた実験系の最適化を中心に検討を 進める.その一方で,損傷を防止する方法についての社会実装については,まだまだ端緒で あり,実装場面の選定から将来的な事業化まで実臨床で経験のある米国 Rocco Armonda 医師,イスラエル Guy Rosenthal 医師と相談しながら検討を進める予定である. 本研究で得られた結果は、本来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.今後さらに細胞に対する衝撃波現象 の理解を深化させることにより、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) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
 - [1] 大谷清伸,小川俊広,<u>中川敦寛</u>,<u>阿部淳</u>:音響インピーダンスの異なる材料を用いた円管内 発生水中衝撃波挙動に関する研究,日本機械学会 2019 年度年次大会,(2019),秋田大学(手 形キャンパス),秋田, #J02102.
 - [2] 大谷清伸,小川俊広,<u>中川敦寛</u>,<u>阿部淳</u>:水中放電を用いた衝撃波伝播挙動の光学可視化計測,高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2019, (2019),名古屋工業大学,名古屋,#2-2.
 - [3] 大谷清伸,小川俊広,<u>中川敦寛</u>,<u>阿部淳</u>:金属円管内発生水中衝撃波挙動の管形状の影響, 火薬学会 2019 年度秋季研究発表会,(2019),沖縄県立博物館・美術館,沖縄,35, pp. 91-94.
 - [4] 大谷清伸,小川俊広,<u>中川敦寛</u>,<u>阿部淳</u>:爆風に伴う衝撃波圧力からの防御方法に関する基礎研究,2019年度衝撃波シンポジウム,(2020),神戸大(深江),神戸,#1B1-4.
 - [5] <u>中川敦寛</u>, <u>Rocco Armonda</u>, <u>Guy Rosenthal</u>, <u>佐久間篤</u>, <u>八木橋真央</u>, <u>古谷桂子</u>, <u>刈部博</u>, <u>成田徳雄</u>, <u>久志本成樹</u>, <u>冨永悌二</u>: 災害医療現場における脳神経外科医の役割, 第 43 回日本脳神経外傷学会, 箱根, 2020 年 3 月 7 日, (2020).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許) なし(受賞) なし(マスコミ発表) なし

課題番号	J19L069
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目(発展)

Upper Surface Blowing 機能を有する将来型垂直・短距離離着陸小型機の主翼開発と その空力特性に関する基礎研究

Study on Wing Development for Future Small V/STOL with USB and Its Aerodynamic Characteristics

> 川添 博光*†,大林 茂**†† 坂本 憲一*,奥村 太貴*,井上 瑞稀* *鳥取大学工学部,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

本研究は将来のファミリーユース eV/S-TOL 機の開発を目指したフィジビリティスタディである. V/S-TOL 機を対象とした主翼模型を製作し, Upper Surface Blowing (USB) 機能を有する STOL 翼と対地高度が異なる VTOL 翼の空力計測を行い,それぞれの特性を評価する.

2. 研究成果の内容

2.1 STOL 実験

鳥取大学の低速風洞を用いて STOL 翼模型の空力計測を行った. 試験条件を表 1,風洞試験の様子を図1に示す. 表1 試験条件

風試結果L-αを図2に示す. 流速20m/s, Fan(ON), 迎角 3.8°において基準値(模型機の水平飛行に必 要な揚力:L=12N/片翼)を示した.また, USB 機 能によって揚力が増大し, 20m/s, Fan(ON)では Fan(OFF)に比べ,Lが最大43%向上した.



図1 風洞試験の様子





2.2 VTOL 実験

主翼を模擬した t=2 mm のアルミ平板に対して回転軸が垂直になるようにファンを取り付け, VTOL 翼模型を製作した. VTOL 実験装置を図3に示す. 対地高度は翼弦長を基準として 0.25~3.0 C (C: Chord = 291 mm) で変化させ, 垂直離着陸を想定した主翼の空力計測を行った.
また,前後縁にスカートを取り付けることで地面近傍における揚力増強を図り,同様の計測を 行った.スカート付き模型を図4に示す.

計測結果 L-Altitude を図 5 に示す. 地面近傍ではファンによる作動流体が地面に衝突して分散したことで翼下面の圧力が低下し, 揚力が減少しており, 0.75C では翼下面に適度なサイズの渦が発生して揚力が増大したと考えられる.

前後縁のスカート(Both Edge)付与によりある高度(本報では0.75C)以下で揚力は増大す るが、全ての計測結果において12N/片翼を超える値を得られず、十分な効果は確認できなかっ た.また、高さ1.0C以上ではスカート無し(Normal)との差はなく、上昇に従って効果は無く なる.地面から離れることで、偏向される流れが少なくなることが一つの要因と考えられる.

14





図4 スカート付き模型



図3 VTOL 実験装置

3. 研究目標の達成状況

STOL 実験により、USB 機能を有する主翼模型の空力特性を取得した.また、VTOL 実験に よって対地高度に対する揚力特性を取得した.これらの結果によって、フィジビリティスタデ ィを行う模型機において、USB 機能を有した主翼の有用性を示すことはできたが、VTOL 形態 において浮揚に十分な揚力を得られる条件を明示できなかった.

4. まとめと今後の課題

V/S-TOL 機を想定して製作した主翼模型について空力計測を行った. STOL 実験では水平飛行が可能となる運用条件を明らかにし, USB 機能による揚力増大効果を確認した. VTOL 実験では地面近傍において揚力が低下し,スカートの取り付けによってある高度以下の最大,最小揚力が増加することを明らかにした.

今後の課題として、VTOL 実験における揚力増大と高度に対する空力特性変化の要因を解明 する. PIV 法を用いた翼下方の流れの可視化、CFD によるファンの個数や取付位置の最適化を 行い、VTOL 機成立のためのファン条件を明らかにする.また、ファンよる気流速度では USB 機としての成立可能性が小さく、他の推力を含めその可否について判断する.

- 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>Taiki Okumura, Mizuki Inoue, Kenichi Sakamoto, Hiromitsu Kawazoe</u>, Shigeru Obayashi : Experimental Feasibility Study on a V/S-TOL Aircraft with Upper Surface Blowing, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-95, pp. 200-201.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
 - なし

課題番号	J19L073
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	$2019.4 \sim 2020.3.$
継続年数	3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**†† 安達 拓矢***,竹村 薫****,長島 弘明***** *東海大学工学部,**東北大学流体科学研究所 ****東北大学大学院,****東海大学大学院,****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

近年低コストの熱輸送デバイスとして様々な機器への応用が期待される自励振動ヒート パイプは駆動力に加熱部と冷却部の温度差のみを用い外力を用い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の特長を有する.しかしながら安定な動作 とその動作限界の予測等はいまだ困難で現在も研究開発が盛んである.そこで本研究では高 精度に性能予測を行う数値解析法の開発を行ってヒートパイプの流動形態を定性かつ定量 的に再現することで自励振動ヒートパイプの高精度設計に繋げる.

2. 研究成果の内容

数値流体解析によりヒートパイプ内部の流動現象を再現するため、気液二相流中において 物体を含む気液二相流と気泡流の流動挙動を予測する流体解析手法を開発した.本手法では 流体部分を Euler 法で気泡部分を Lagrange 法で解析する連成解析を行う.この手法を用い て得られた気泡の成長過程の解析結果(図1)と単一ループのヒートパイプの内部流動解析 結果(図2)を示す.気泡成長は加熱されたダクト内部での半径の増加率を先行研究と比較 しており、単一ループ内のヒートパイプの解析では加熱部で生じた気泡が駆動力となって一 方向の速度を誘起した結果、顕熱輸送が顕著になる様子が確認された.今後はこの解析手法 の検証をさらに進めて本手法の妥当性と応用性を示す.



図1:加熱部内部での気泡成長解析の可視化



図2:単一ヒートパイプモデル中の解析結果 (左:0.1 秒後の温度, 密度, 流速分布, 右:0.45 秒後の温度, 密度, 流速分布)

3. 研究目標の達成状況

ヒートパイプの性能予測ツールとして離散気泡モデルを応用した Euler-Lagrange 連成解 析手法を構築した点は到達目標の一つが得られたと言える.しかしながらこちらの検証によ る妥当性の確認と応用性の実証が次の課題であり早急な実施を要する.

4. まとめと今後の課題

気液二相流体解析手法を構築し Euler-Lagrange 法による離散気泡法を応用したヒートパイプの性能予測ツールを開発した. 今後はこちらの定性的・定量的検証をさらに進めると共に実際のヒートパイプの高精度設計に応用してその性能実証を行う.

- 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)
- [1] T. Adachi, K. Fujita, H. Nagai: Numerical study of temperature oscillation in loop heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 163, (2019), 114281.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[2] <u>K. Takemura, Y. Kawamoto, S. Takahashi, H. Nagashima</u>, T. Adachi, H. Nagai: Application of Two-phase Thermo-fluid Simulation for Accurate Design of Oscillating Heat Pipe, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-50, pp. 100-101.
- [3] <u>K. Takemura, H. Nagashima, Y. Kawamoto, S. Takahashi, M. Kondo, A. Kawachi, S. Okazaki, H. Fuke</u>: Temperature prediction of a heat pipe using gas-liquid two-phase simulation, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS18-37, pp. 758-759.
- [4] 竹村薫,川本裕樹,長島弘明,高橋俊,近藤愛実,河内明子,岡崎俊,福家英之:気液二相流体解析を応用したヒートパイプ内部の流動予測,第32回計算力学講演会,(2019).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19L083
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

界面ナノバブルの形成過程および安定性に関する分子動力学解析 Molecular Dynamics Study on Formation Process and Stability of Surface Nanobubbles

> 堀 琢磨*†,菊川 豪太**††,上野 一郎*** *東京農工大学大学院工学研究院先端機械システム部門 **東北大学流体科学研究所 ***東京理科大学理工学部機械工学科 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

固液界面のナノバブルは触媒反応や表面洗浄といった様々な現象に影響を及ぼすため、工 学的に重要である.理論的にはナノバブルは力学および熱力学的に安定ではないが、固液界 面上のナノバブルの安定性については近年様々な理論によって説明がなされている.それに 加え、それらと整合性のある分子シミュレーションも報告されている.一方で、これまで報 告されている分子シミュレーションは2次元での系、または現実の水を再現しないモデルを 用いていることが多い.特に、現実の系でよく見られる界面活性剤等の不純物を加えた際の 振る舞いについての解析には、この2つの要因を取り入れて精緻な現象の理解を実現する必 要がある.

そこで本研究は、分子動力学(Molecular Dynamics, MD)シミュレーションを用いて、 界面活性剤の導入による界面ナノバブルへの影響を明らかにすることを目的とする.

2. 研究成果の内容

界面活性剤が界面ナノバブルの安定性へどのように寄与するかの理解には、より単純な気 液界面における界面活性剤の役割を明らかにすることが欠かせない.そのため図 1(a)に示す ように、界面活性剤を模擬したペンタノールを窒素気体および水薄膜からなる平面界面に加 えた系での MD シミュレーションを行った.このシミュレーションにより窒素気体の密度分 布を求めた結果、図 1(b)に示すとおりペンタノール分子の数が増えるに従い界面へ窒素気体 が吸着し、大幅に増加することを明らかにした.この現象は窒素気体が安定的に存在できる サイトをペンタノール分子が供給する効果によるものだと考えられる.また同時に、こうし た窒素気体の増加量には限界があること、吸着した窒素気体の割合は気液全体での分子数と は無関係であること、およびこうした吸着窒素分子がペンタノール分子の構造に与える影響 は小さいことを明らかにした.

ナノバブルの形成過程を明らかにするためには、まずは単純な系における現象を明らかに し、比較対象とする必要がある.そのため、グラファイトと水のみからなる系におけるナノ バブルの形成の MD シミュレーションを行った.グラファイト表面の一部を疎水化しバブル が容易に存在可能な箇所を用意することで、バブルの形成を試みた.この結果、十分な減圧 下では疎水性サイト上に界面ナノバブルが安定的に形成することがわかった.



図1:(a) ペンタノール, 窒素気体および水薄膜からなる平面界面系.(b) 窒素ガスの水表面への吸着に対するペンタノールの影響

3. 研究目標の達成状況

ナノバブルの MD シミュレーションは、系自体は単純であるものの、形成およびその安定 性の評価のために極めて長いシミュレーション時間が必要である。そのため現状では本研究 目標の核心である界面活性剤がナノバブルの形成と安定性に与える影響を明らかにするま でに至っていない.一方で、研究目標にとって重要な要素である気液界面での界面活性剤の 役割、およびグラファイト上でのナノバブル形成では十分な成果を上げている。特にこれら 2 つの研究により、研究の最終目的に到達するために必要な技術的な課題は概ね克服してい る.

4. まとめと今後の課題

これまでの研究では、気液界面および固液界面での簡単なシミュレーションをそれぞれ行った.これにより、界面活性剤の存在が窒素ガスの水表面への吸着を促すこと、および固体 壁面の疎水性サイトの存在によりグラファイト上にナノバブル形成が可能であることなど がわかった.今後はこれらの研究を組み合わせることで、界面活性剤がナノバブルの形成と 安定性へどのように寄与するかを明らかにするとともに、熱的な非平衡性によりナノバブル の形成や成長がどのように促されるかを定量的に明らかにしていく.

- 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) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] <u>T. Hori</u>, G. Kikugawa, <u>I. Ueno</u>, and <u>Y. Matsumoto</u>: Molecular Dynamics Analysis of Surfactant Effect on Water-gas Interface, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-96, pp. 202-203.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19L085
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	3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**†† 廣瀬 裕介*, 稲毛 達朗***, 大谷 清伸** *千葉大学大学院, **東北大学流体科学研究所 ***湘南工科大学工学部 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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、安価に多方 向同時計測を実現するため、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.本計測システムの撮影可能領域は各デジタルカメラにおいて横方向(弾道方向) 60mm×縦方向40mm 程度と狭いため、撮影に成功するためには高速で飛行する飛翔体が 計測系を通過する正確なタイミングで LED を発光させることと、飛翔体の弾道がこの領域 から大きく外れないことが必要である.昨年度までは飛翔体の通過と撮影タイミングを合わ

せることが困難で,撮影成功率が極めて低い状況で あった.このため今年度までに撮影システム上流側 に圧力センサを2つ設置し,これらから得られる圧 力信号の立ち上がりの時間差と距離の関係から飛翔 体が撮影装置を通過するタイミングを算出する回路 を作成して撮影成功率の向上を図った.タイミング 算出回路にはArduinoを用いており,様々な実験条 件に柔軟に対応できる仕様となっている.本研究計 測に成功した2例を図2に示す.今年度は他にも数





回計測に成功している. 飛翔体は直径 8mm の球であり, 飛行マッハ数は約 1.36 である. 同 図は 12 台のデジタルカメラによる多方向計測画像から, 3次元再構成された密度分布から 等密度面表示としたものである. 球前方の衝撃波と球後方の再付着衝撃波を含む後流領域を 3次元的に捉えることに成功していることがわかる.



図2:3次元密度計測成功例

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、再現性のない非定常流れ場の3次元密度場の取得を実現した.まずは 単純形状である球体の後流領域を含む密度場を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た.

4. まとめと今後の課題

本研究により,飛翔体まわりの非定常流れ場に対する3次元密度計測を世界に先駆けて実 現することができた.今後の課題としては,撮影できる視野が狭いことが計測に成功するこ とを困難にしているため,カメラレンズをより画角の広いものへ変更する,より高輝度な照 明を用いる等の改良を行えれば,様々な飛翔体を用いた実験も可能になると考えられる.

5. 研究成果(*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] Y. Hirose, K. Ishikawa, Y. Ishimoto, T. Nagashima, M. Ota, S. Udagawa, T. Inage, K. Fujita, H. Kiritani, K. Fujita, K. Ohtani, H. Nagai: The Quantitative Density Measurement of Unsteady Flow around the Projectile, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, Vol. 7, (2019), pp. 111-119.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] <u>M. Ota, Y. Hirose, T. Nagashima, Y. Yahagi, T. Inage, S. Udagawa</u>, H. Kiritani, K. Fujita, K. Ohtani, H. Nagai: Quantitative Density Measurement of Unsteady Flow Field around A Sphere in The Ballistic Range, *Proceedings of the 32nd International Symposium on Shock Waves*, Singapore, (2019), OR-05-0355, pp. 1-5.
- *[3] <u>Y. Hirose</u>, <u>T. Nagashima</u>, <u>Y. Yahagi</u>, <u>M. Ota</u>, <u>S. Udagawa</u>, <u>T. Inage</u>, K. <u>Fujita</u>, H. Kiritani, K. Fujita, K. Ohtani, H. Nagai: Quantitative Density Measurement of Unsteady Flow around the Projectile by Colored-Grid Background Oriented Schlieren, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-51, pp. 102-103.
- 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	J19L092
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2年目

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

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

1. 研究目的

本研究では、赤外線カメラによる高精度温度測定手法の確立を目的とする.赤外線カメラの高 精度測定のためには、カメラの波長感度特性を定量的に把握する必要性がある.しかしながら、 カメラの波長感度特性はメーカー側から開示されておらず、ユーザー側で予測する必要性がある. そこで本研究ではラップフィルムおよび黒体炉を用いた赤外線カメラの波長感度予測実験を行い、 カメラ波長感度特性が予測可能性について検討を行った.

2. 研究成果の内容

本研究期間中では、流体科学研究所においてラップフィルムおよび黒体炉を用いた温度減衰実 験を行った. Figure 1 に本実験の概念図を示す.本実験では黒体炉前にラップフィルムを設置す る.ラップフィルムを黒体炉前に設置することで、黒体炉温度より減衰した温度が赤外線カメラ に取得される.ラップフィルムの透過率はフーリエ変換赤外分光光度計(FTIR)によって測定さ れた既知の情報のものと仮定する.大気による赤外線減衰が無視可能であるとき、黒体炉温度の 真値温度とフィルムによる減衰温度の情報から間接的に波長感度特性を予測することが可能とな る.本研究期間中においては流体科学研究所が保有する FTIR、黒体炉を用いることによって赤外 線カメラの波長感度特性予測実験を行った.透過率を測定したフィルムは、ポリエチレン、ポリ 塩化ビニル、ポリ塩化ビニリデン、ポリエチレンおよびナイロン、ポリエチレンおよびポリプロ ピレンで構成された5種類である.

Figure 1 に示される実験から、赤外線カメラの波長感度特性はおおよそ 11~13 µm 付近に存在 することが示唆された.使用したカメラの取得可能波長領域の公称値は 8~14 µm であり、実際 の波長感度領域と公称値にずれがある可能性があることが示された.



Figure 1 プラスチックフィルムを用いた減衰実験の概念図

3. 研究目標の達成状況

本件研究では赤外線カメラによる高精度温度測定を最終目的としている.本研究期間ではカメ ラ波長感度特性予測手法の確立を第一段階の目的とした.研究期間中,プラスチックフィルムを 用いた赤外線カメラによる温度測定実験を行うことにより,定性的ではあるがカメラの波長感度 領域を把握可能であることが示唆された.以上の状況から本研究期間で設定した研究目標は概ね 達成できたと考える.

4. まとめと今後の課題

今後は予測したカメラの波長感度特性の妥当性について、長距離下での対象物の温度測定実験 を行う予定である. Figure 2 に示される大型黒体炉を使用して、大気による赤外線吸収考慮時、 不考慮時における測定値と黒体炉温度を比較することで赤外線カメラによる高精度温度測定手法 の可能性について検討評価する予定である.



Figure 2 大型黒体炉

- 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. Kogawa</u>, J. Okajima, A. Komiya, <u>S. Maruyama</u>: Evaluation of Prediction Method for IR Camera's Sensitivity, *Proceedings of Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-52, pp. 104-105.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19L093
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

中赤外吸収分光法を応用した燃焼中間生成物計測手法の高度化研究 Development of Advanced Measurements Method for Intermediate Species in the Low Temperature Oxidation of Hydrocarbons Using Mid-Infrared Absorption Spectroscopy

> 田中 光太郎*†,中村 寿**†† *茨城大学工学部,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

近年,詳細化学反応モデルを含んだエンジンシミュレーションが活発に行われており,燃料の 自着火特性を模擬できる詳細化学反応モデルの構築が必要とされている.燃料の酸化過程におい てホルムアルデヒド(HCHO)と過酸化水素(H₂O₂)は重要な燃焼中間生成物であり,燃焼場におけ る HCHO と H₂O₂の定量データは,詳細化学反応モデルの構築に役立てることができる.

そこで、本研究では中赤外吸収分光法と急速圧縮装置(RCM)を組み合わせた計測装置を構築し、 3.5 μm 帯と 8 μm 帯の中赤外レーザーを用いて、イソオクタンの低温酸化過程における HCHO と H₂O₂の時間履歴の定量計測することを目的とした.

2. 研究成果の内容

本研究で考案したイソオクタンの低温酸化過程における HCHO と H₂O₂の計測法について述 べる. HCHO の計測は HCHO の吸収断面積が大きい 3.5 µm 帯を使用した. この 3.5 µm 帯の DFB-ICL の発振波長域では、わずかにイソオクタンのブロードな吸収が存在し、HCHO の吸収 に干渉する. そこで、2 波長の吸光度からそれぞれの成分の定量計測が可能な 2 波長吸収分光法 を用いて、イソオクタンの低温酸化過程における HCHO の計測を行った. 2 波長吸収分光法は ベールランベルトの法則を基本原理としており、HCHO の濃度とイソオクタンの濃度は次式で表 される.

 $c_{HCHO} = \frac{(A_1 \varepsilon_{2,Iso-octane} - A_2 \varepsilon_{1,Iso-octane})}{d(\varepsilon_{1,HCHO} \varepsilon_{2,Iso-octane} - \varepsilon_{1,Iso-octane} \varepsilon_{2,HCHO})}$ (1) $c_{Iso-octane} = \frac{(A_2 \varepsilon_{1,HCHO} - A_1 \varepsilon_{2,HCHO})}{d(\varepsilon_{1,HCHO} \varepsilon_{2,Iso-octane} - \varepsilon_{1,Iso-octane} \varepsilon_{2,HCHO})}$ (2)

ここで、 $A_1 \ge A_2$ は第1計測波長と第2計測波長における吸光度、dは光路長、 c_{HCHO} は HCHOの 濃度、 $c_{Iso-octane}$ はイソオクタンの濃度、 $\varepsilon_{1,HCHO} \ge \varepsilon_{2,HCHO}$ は第1計測波長と第2計測波長における HCHO の吸収断面積、 $\varepsilon_{1,Iso-octane} \ge \varepsilon_{2,Iso-octane}$ は第1計測波長と第2計測波長におけるイソオク タンの吸収断面積をそれぞれ示す.スペクトルの温度依存性や、他の化学種の干渉を考慮し、 HCHO の吸収が強い 2807.358 cm⁻¹(5.977×10⁻²⁰ cm²molecule⁻¹ cm⁻¹, v₁, 10₁₉ - 9₁₈)を第1計測波 長として選定した.また、HCHO の吸収が弱く、イソオクタンの吸収が主に観測される 2808.498 cm⁻¹(8.166×10⁻²⁵ cm²molecule⁻¹ cm⁻¹, v₃+v₄, 9₅₄ - 9₂₈)を第2計測波長として選定した.

次に、 H_2O_2 の計測装置及び方法について説明する. H_2O_2 の計測には吸収断面積が比較的大き く他の化学種の干渉が少ない 8.0 µm 帯で行った.用いた量子カスケードレーザーの発振波長域 において、わずかに H_2O とイソオクタンの吸収が存在し、 H_2O_2 の吸収に干渉する.そこで、1.392 µm の DFB-LD を用いて、 H_2O の計測を行った.スペクトルの温度依存性や、他の化学種の干 渉を考慮し、 H_2O_2 の吸収が強い 1251.278 cm⁻¹(2.82×10⁻²⁰cm²molecule⁻¹cm⁻¹, v₆、38732 - 387 31)を H_2O_2 の計測波長として選定した. 1251.278 cm⁻¹における吸光度は、次式のように、 H_2O とイソオクタンの吸収を含む.

 $A_{1251,278} = A_{H202} + A_{H20} + A_{Iso-octame}$

そこで、H₂O とイソオクタンの濃度は、それぞれ 7185.597 cm⁻¹(5.984×10⁻²²cm²molecule⁻¹cm⁻¹, v₁+v₃, 6₆₀-6₆₁)と、2808.498 cm⁻¹において計測し、1251.278 cm⁻¹における吸光度から H₂O とイ ソオクタンの吸光度を差し引くことで、H₂O₂の吸光度を算出した。

上述の方法を用いて、イソオクタンの低温酸化過程における HCHO と H₂O₂の濃度履歴を取得した. イソオクタンの低温酸化過程を含む自着火実験は急速圧縮装置を用いて行った. 当量比 1.0 のイソオクタン予混合気を温度 642 K, 圧力 0.77 MPa となるように急速圧縮した. 得られた HCHO, H₂O₂, H₂O, イソオクタンのプロファイルを Fig. 1(a)に示す. HCHO と H₂O₂が低温酸化反応過程において生成し、蓄積した HCHO と H₂O₂の消費に伴い主燃焼に至っている様子を確認できる. イソオクタンは圧縮終了後から緩やかに消費され, HCHO と H₂O₂の生成に伴い急激に消費されていることがわかる. Atef 6(N. Atef et al., Combust. flame, Vol. 178, (2017), pp. 111-134.)によって構築された詳細化学反応モデルの計算結果を Fig. 1(b)に示す. 実験結果と計算結果は同様の傾向を示し、濃度プロファイルも良好に一致した.



 \boxtimes 1 : Pressure profiles and HCHO, H₂O₂, H₂O and iso-octane profiles in the oxidation of iso-octane obtained by (a) Experiments, (b) Calculations.

3. 研究目標の達成状況

中赤外分光法を応用してイソオクタンの低酸化過程中の HCHO と H₂O₂ の定量計測に成功した. 概ね研究目標を達成した.

4. まとめと今後の課題

中赤外分光法と急速圧縮装置を組み合わせて構築した計測装置を用いて、イソオクタンの低温酸化過程における HCHO と H₂O₂の計測に成功し、HCHO と H₂O₂がイソオクタンの低温酸化 過程中に生成していることを明らかにした.より広い温度、圧力条件において計測し、化学反応 モデルの改良に役立てることが課題である.

- 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)
- 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
- K. Tanaka, S. Sugano, S. Sakaida, M. Konno, H. Nakamura, and T. Tezuka: Time-resolved Quantitative Measurements of Intermediate Species in the Low-temperature Oxidation of Iso-octane using Mid-infrared Absorption Spectroscopy, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS2-29, pp. 234-235.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

課題番号	J19L095
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	2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*, 西村 涼汰* 佐藤 岳彦**††, 中嶋 智樹**, 上原 聡司** *鶴岡工業高等専門学校, **東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

次世代自動車,自立型ロボット,プロジェクター等の光学機器に搭載される加速度センサー, ジャイロセンサー,マイクロアクチュエーター等の MEMS デバイスは微細加工技術で作製され る.多品種少量生産の MEMS 作製ではエッチング,成膜等の多段階プロセスの一部を非真空プ ロセスへ置換えることでコスト削減・生産性向上が期待できる.大気圧マイクロプラズマは局所 エッチングやオンサイト成膜を可能にする.これまで外径 1.2 mm 以下の細径 SUS パイプ(注射 針)電極を RF(13.56 MHz)励起して大気圧マイクロプラズマ流を生成して Si ウエハやポリア ミド薄膜の局所エッチング, DLC 成膜に応用した.しかし,大気圧プラズマでは高密度ラジカル を含むガス流が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、細径ノズル電極(外径/内径: 0.7 mm/0.4 mm)から基板への大気圧マイクロプラ ズマの衝突噴流をシュリーレン法で可視化して、ガス流量、投入電力、細径ノズル-基板間距離 *d*とプラズマ衝突噴流の状態を明らかにし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(APµP)流の可視化実験の概略図を図1 に示す.プラズマガスは一般ヘリウム,ガス流量:0.6~1.8 L/min,RF電力:2~14 W,細径ノズ ル-基板間距離 d:3~5 mm に設定してアルミニウム基板への衝突噴流を観察した.ハイスピー ドカメラは Photron, FASTCAM SA5,フレームレート:7500 fps とした.APµP 流の観察の様子を 図2に示す.基板距離 d,RF電力およびHe 流量をパラメータとして衝突噴流の様子を観察した. 図3(1-a),(1-b)にプラズマ流の距離 d 依存性を示す.dの増加で衝突噴流に乱れが発生するが, RF電力の増加で乱れが消失することが判る.次にHe 流量および RF 電力依存性を図3(2),(3)



図1:流れの可視化実験装置の概略図



図2:細径ノズルから噴射する大気圧プラズマ流

(1-a) He流量: 1.2 L/min, RF: 9 W		(1-b)
+ 細径ノズル電極 d: 3 mm d: 4 mm	<i>d</i> : 5 mm	<i>d</i> : 5 mm
(2) He 流量 : 1.4 L/min, <i>d</i> : 3 mm		
Plasma OFF Plasma ON (RF: 7 W) 細径ノズル電框	Plasma ON (RF: 9 W)	Plasma ON (RF: 12 W)
and the second	- Marine	
(3) He流量: 1.8 L/min <i>, d</i> : 3 mm		
Plasma OFF Plasma ON (RF: 7 W) 細径ノズル電極	Plasma ON (RF: 9 W)	Plasma ON (RF: 12 W)
aller and a leader	California Cal	

図3:細径ノズルからの大気圧マイクロプラズマ衝突噴流, d 依存性: (1-a) 1.2L/min, 9W (1-b) 1.2L/min, 12W, RF 電力依存性: (2) 1.4L/min, 3mm (3) 1.8L/min, 3mm

に示す. プラズマ OFF 時の基板衝突噴流に大きな乱れが生じているが, RF 電力が 9 W 以上で 乱れ現象が抑制された. また, He 流量を 1.4 から 1.8 L/min に増やすと再び乱れが生じるが, 乱 れ抑制閾値電力が存在する.電界強度と荷電粒子の速度分布が乱れ抑制に関係すると考えられる.

3. 研究目標の達成状況

APµP 流の基板への衝突噴流の"乱れ"発生とその抑制現象の基板間距離, RF 電力, ガス流量 依存性が明らかとなり, 大気圧プラズマプロセス理解の観点では <u>60%程度の達成度</u>である.

4. まとめと今後の課題

シュリーレン法による APµP 衝突噴流の可視化で基板での"乱れ"発生とその抑制現象が明か となった. 今後の課題は, プラズマ流速や, 電磁場強度測定等から乱れ制御機構を明らかにする.

- 5. 研究成果 (*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
- K. Otosaka, H. Yoshiki, T. Nakajima, T. Sato and S. Uehara: Fluid analysis of an atmospheric pressure µplasma ejected from a narrow nozzle, *The 6th Japan-Taiwan Workshop on Plasma Life Science and Technology*, (2019), PO-09.
- *[2] <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 Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-76, pp. 162-163.
- [3] 乙坂謙次, 吉木宏之: 大気圧マイクロプラズマによる金ナノ粒子の局所合成とバイオセンサーへの応用, 応用物理学会東北支部第74回学術講演会予稿集, (2019), USB: 3aB05.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19L099
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

水中爆発を用いた物体洗浄効果の研究 Study on Washing Effect for Textile Using the Underwater Explosion

北川 一敬*†,大谷 清伸**††,小西 康郁** *愛知工業大学工学部,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

水中衝撃波の研究は、水中衝撃波による食品加工の産業応用や生体組織中の衝撃圧減衰の 医学応用、マイクロバブルを利用した海洋細菌の殺菌などがある。衝撃圧力の利用は、静的 には与えにくい高い圧力を対象物体へ短時間に作用させることができる。水中爆発による洗 浄技術への応用の試みは上述の特性を効率的に利用する研究や開発への期待が高まる。

水中爆発では高い圧力で微小気泡の発生を誘発でき、その近傍に被対象物(布)を設置し、 水中衝撃波とバブル衝撃波に伴う気泡発生や水流ジェットの慣性力を有効に活用する事で 洗浄効率の向上が図れないかという着想に至り、物体洗浄技術と洗浄効果を解明する.

2. 研究成果の内容

図1は爆薬の下方40mmの位置に布を設置した時の可視化結果を示す布は図中矢印箇所 に設置されている. No.1で起爆,爆発生成ガス内部が高圧になり膨張過程(No.2-5),No.5 で爆発生成ガスが最大時である.その後爆発生成ガス内部が負圧になることで収縮過程(No. 6-8),No.8で水流ジェットが発生する.その後,No.9以降,爆発生成ガスは下方に移動し ながら再膨張過程を終え,No.11で再収縮する.No.13で2度目の水流ジェットが発生し, No.13以降,膨張収縮運動を繰り返しながら下方に移動し,爆発生成ガスは布前面に衝突す る.No.8では再膨張をはじめ、爆発生成ガスは下方に移動する.No.5で最小となる.

図2は図1状態のPIV解析後の画像を示す.以下爆発生成ガスが発生している布面を布前面,反対の布面を布後面と表現する.No.1爆発生成ガスが最大でありその時の周囲の水はほぼ静止している.その後No.2では,爆発生成ガスの膨張速度が増加,爆発生成ガス境界では7m/s,No.3では膨張速度の減少が始まり.No.5の爆発生成ガスが最大時では,爆発生成ガスの膨張速度が静止状態となる.No.7では爆発生成ガスが最小になりその時の速度は12m/sである.No.8以降下向きの水流ジェットが発生し,このとき爆発生成ガス周りで下向きに8m/s,布前面では3m/s,布後面では2m/sの速度が確認された.No.12で2度目の水流ジェットが発生し,このとき布前面では5m/s,布後面では3m/sの速度が確認された.No.14では下方に移動した爆発生成ガスが布を突き抜けている.このとき布前面では3m/s,布後面では2m/sの速度である.

表1は実験前後の測色色差計による布表面の計測結果を示す.表1から実験前と実験後を 比較すると色相が10YRから7.5Yに変化し、赤黄色から黄色に変化している.また、明度 は7から8に変化し実験前よりも明るくなり、彩度は2から1に変化し無彩色に近くなって いる. 色差値は20.6から18.5に減少し実験後のほうがより白色に近づいていることがわか る.



図1:爆発生成ガスの運動の可視化 (Δt=0.66 ms).



図2: 爆発生成ガス周りの速度場 (Δt =0.66 ms).

表	₹1	:	測	色色差	計の布表面	jの計測結果	1
		_		IIno	Lightness	Color	1
				пие	/ Chroma	difference	1

		/ Chioma	unteren
Virgin	10YR	7/2	20.6
Bottom	7.5Y	8/1	18.5

3. 研究目標の達成状況

本研究目標は、水中衝撃波とバブル衝撃波に伴う気泡発生や水流ジェットの慣性力を有効 に活用する事で洗浄効率の向上が図れないかという着想に至り、物体洗浄技術と洗浄効果を 調査することである.水中爆発を利用することで、布面を無彩色まで変化させ、汗などの油 脂の除去に成功した.

4. まとめと今後の課題

爆発生成ガス収縮時に水流ジェットが布方向に発生し、布に衝突する. その結果、色相、 色差値の結果から実験後の布が無彩色まで変化させている. これにより、水中爆発で発生し たする水流ジェット等には布を洗浄する効果有という事が確認できた.

今後,設置状態による洗浄状態の比較,泥汚れ,ガム,インクなどが除去できる瞬間洗浄 技術を開発する.

- 5. 研究成果(*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, Y. Konishi: Study on Washing Effect for Textile using the Underwater Explosion, *Proceedings of the 19th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2019)*, Sendai, (2019), CRF-97, pp. 204-205.
- [2] <u>K. Kitagawa</u> and K. Ohtani: Experimental study on washing effect for textile using the underwater explosion, *32nd International Symposium on Shock Waves (ISSW32)*, National University of Singapore, Singapore, 2019.7.14-19, (2019), OR-14-0041.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J19L103
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	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

タンパク質の細胞内局在に基づく糖鎖修飾知識ベースの開発

Development of Sugar Chain Distribution by Glycosylation Based on Protein Subcellular Localization

越中谷 賢治*†,太田 信**††,向井 有理*** *青山学院大学理工学部,**東北大学流体科学研究所 ***明治大学理工学部 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

本年度は、タンパク質の細胞内局在に寄与する因子による分類と糖種の相関をもとに、タンパク質の細胞内局在性に応じた糖鎖修飾分布を明らかにした.加えて、バイオインフォマティクス解析の結果を実験的に明らかにするためにモデルタンパク質を選定し局在を人工的にコントロール可能な手法を構築した.また、同時に組織特異性を確認すべく、線虫の糖 鎖修飾を解析し候補タンパク質を選定し、実験的アプローチのために基盤を整えた.

2. 研究成果の内容

[A] 植物タンパク質を利用した,ヒト培養細胞内の様々なオルガネラに輸送可能な評価モデルの構築

0型糖鎖修飾を受けている糖タンパク質に ついて、細胞内局在・糖鎖修飾情報をもと に、細胞内での局在化経路および糖種に応 じて分類した.糖タンパク質をシグナルペ プチドや膜貫通領域の有無で、細胞内在 型・分泌型・シグナルアンカー型・膜貫通 型の4グループに分類し、0型糖鎖修飾の 糖種を調査した.シグナルペプチドもしく は膜貫通領域を有する分泌型・シグナルア ンカー型、あるいはその両方を有する膜貫



通型の糖タンパク質は、トランスロコンから小胞体に挿入され、小胞体を経由する局在化経路(小胞体・ゴルジ体・細胞膜・細胞外分泌)を通る.小胞体経由の3グループにおいては、 主としてFuc・Xyl・GalNAcの修飾が見られた.一方、小胞体を経由しない局在化経路(核・ 細胞質・ミトコンドリア)を通る細胞内在型タンパク質においては、0型糖鎖修飾の100%が GlcNAcによることがわかった.上記の結果は、0-Fuc・0-Xyl・0-GalNAc・0-GlcNAc 転移酵素 の細胞内局在性とよく一致した.

3. 研究目標の達成状況

上記の研究内容からモデルタンパク質を作成し、実験的に検証を行った.植物由来のGPI

アンカー型タンパク質 CEBiP をもとに、局在性に関与する シグナル領域前後に AcGFP を導入し、最適な条件を検討 した. GPI 修飾に寄与する AS 領域の前にGFPを導入するこ とで、適切にオルガネラを経 由し細胞膜に局在化すること が本研究で示された.一方で、 DsRed-Mito を同時に HeLa 細 胞に導入することで、キメラ CEBiP がミトコンドリアに誘

(a) CEBiP_SP-AcGFP-CEBiP-CEBiP_AS



導されていることから局在性をプラスミドに変異を導入せずにタンパク質局在性を変化させられることが新たに明らかとなった.以上のことから,研究目標はおおよそ達成していると考えられる.

4. まとめと今後の課題

当該年度において、タンパク質の細胞内局在性と糖種との相関を、バイオインフォマティ クス解析によって明らかにしました.また、これらの実験的検証に向けて、モデルタンパク 質をコードする複数の遺伝子をクローニングし、モデルタンパク質の細胞内局在性を人工的 に制御することに成功しました.また糖種や細胞内局在性の組織特異性を確認するためのモ デル生物として線虫を選択し、網羅的なバイオインフォマティクス解析により線虫タンパク 質の糖種特異性を明らかにしました.これらの実験結果を基にデータベースへの還元を行う とともに、実験による新たな発見を目指す.

- 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
- *[1] <u>K. Etchuya</u>, M. Ohta, <u>Y. Mukai</u>: Development of Sugar Type Distribution by Glycosylation Based on Protein Subcellular Localization, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-80, pp. 170-171.
- 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	J19L105
Classification	Discretionary collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2019 ~ March 2020
Project status	2nd year

Surface Pressure Measurement of a Re-Entry Model 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 focuses on the challenges of capturing surface pressure data on a free-flight object in a ballistic range facility. There are four main challenges: (1) shooting an aerodynamic model in a ballistic range; (2) capturing the free-flight trajectory; (3) capturing luminescent images of the object during the flight; and (4) obtaining the surface pressure distribution from the luminescent images. Prior work has been successful with the first two challenges; this study will focus on methods to overcome the third and fourth challenges using two-color pressure-sensitive paint (PSP).

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. To apply this method for a ballistic range, it is necessary to overcome four challenges as follows:

- 1. To launch a free-flight test article
- 2. To capture images of the free-flight object
- 3. To capture luminescent images of the object
- 4. To extract a pressure distribution from the luminescent images

Previous collaborative work has been successful up to the third level, capturing luminescent images from a free-flight body coated with PSP. However, the images captured in this test were severely blurred, which prevented pressure data from being extracted from the luminescent images. This project focuses on ways to improve the quality of the luminescent images in order to use them to generate a surface pressure map.

The project was performed at the ballistic range research facility at Tohoku University's Institute of Fluid Science. The projectile was a sphere with 30 mm in diameter. These models were anodized and then coated with a two-color PSP using the dipping deposition method. For this test, pyrene sulfonic acid was selected as the pressure sensitive dye for its bright emission intensity, and ((1,10-Phenanthroline) tris [4,4,4-trifluoro-1- (2-thienyl)-1,3-butanedionato] europium(III)) was selected as the reference dye that is insensitive to pressure; these chemicals were selected for their similar excitation peak wavelength and distinct peak emission wavelengths. The test chamber was evacuated to 50 kPa, and the test article was shot at Mach 1.5.

The lower pressure in the test chamber gives a higher emission intensity from the PSP. Two 365-nm Solis LED light sources from Thorlabs were pulsed to excite the PSP with a pulse width of 1 ms. A Photron Fastcam SA-Z high-speed color camera fitted with a 430-nm high-pass filter was used to capture the images. Frame rates from 30,000-100,000 fps and exposure times from $2.5-30 \ \mu$ s were used.

3. Achievements

At Mach 1.5, the test sphere traveled at 395 m/s under 50 kPa in a freestream static pressure. The present project could achieve to capture a pressure distribution of the free-flight sphere (Figure 1). With the camera-exposure time of 3.75 µs, a spatial uncertainty was 1.48mm, or 4.9% of the diameter of the sphere. This is substantially reduced as compared to previous tests where blurring caused the image of the sphere to be elongated by approximately 25%.



Figure 1 : Pressure distribution of a free-flight sphere at Mach 1.5.

4. Summaries and future plans

This test 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)
- [1] D. Kurihara, J. P. Gonzales, S. L. Claucherty. H. Kiritani, K. Fujita, H. Nagai, H. Sakaue: Surface Pressure Measurements over a Free Flight Object in a Ballistic Range Facility using Two-Color Pressure-Sensitive Paint, *The 58th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Science and Technology Forum and Exposition*, Orlando, FL, USA, (2020), AIAA paper 2020-0123.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- *[2] <u>D. Kurihara, J. P. Gonzales, S. L. Claucherty</u>. H. Kiritani, K. Fujita, H. Nagai, <u>H. Sakaue</u>: Surface Pressure Measurements using Two-Color PSP over a Free Flight Object in a Ballistic Range Facility, *Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-98, pp. 206-207.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J19L107
区分	リーダーシップ共同研究
課題分野	人・物質マルチスケールモビリティ分野
研究期間	$2019.4 \sim 2020.3$
継続年数	1年目

Establishment of High-Accuracy Analysis Method of Spacecraft Thermal System Using Data Assimilation

永井 大樹*†,田中 寛人* 三坂 孝志**†† *東北大学流体科学研究所 **産業技術総合研究所エレクトロニクス・製造領域 †申請者,††所外対応研究者

1. 研究目的

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

以上のような制約の中で宇宙機の状態を推定するために、本研究ではデータ同化を熱解析 に適用し、限られた温度データから機体の伝熱状態を推定する手法を確立することを研究の 目的とする.これに加えて、温度センサ配置と状態推定精度の関係解明を目指す.

2. 研究成果の内容

今年度は(1)少ない温度センサで離れた点の熱コンダクタンスを推定する手法の開発, (2)センサ配置が推定精度に及ぼす影響の調査を行った.特に熱コンダクタンスの推定手 法は、データ同化の一種であるアンサンブルカルマンフィルタをベースに独自の解析アルゴ リズムを構築した.さらに火星飛行機の大気球試験機の熱数学モデルに解析手法を適用し (図1),熱試験で得られた実測温度データを用いた熱コンダクタンスの推定実験を行った. その結果,限られた温度センサを用いて離れた位置にある熱コンダクタンスを推定すること に成功し、従来手法と比べても手法の有用性を示すことができた(図2).さらに、センサ配 置が熱コンダクタンスの推定精度に与える影響を評価する指標を考案し、数値実験によって 定性的に推定精度を予測する手法を確立した.

3. 研究目標の達成状況

データ同化ベースの状態推定手法の確立に注力し、1点の温度データから1点の熱コンダ クタンスを推定するプログラムを構築した.手法は実機熱数学モデルに適用され、その有用 性が確かめられた.さらにセンサ配置と推定精度の関係性の解明に関しては限定的に達成す ることができた.一方で大規模モデルへの解析手法の適用,さらには複数の温度センサによって複数の熱コンダクタンスを同時に推定するための温度センサ配置方法の提言は行うことができなかった.

4. まとめと今後の課題

これまでの研究によって、限られた温度測定から離れた点の熱コンダクタンスを推定する 手法を提案し、実機の熱数学モデルと熱試験で得られた実測温度データを用いて推定手法の 有用性を確かめた.また、限定的ではあるが温度センサ配置が推定精度に与える影響を評価 する手法を提案した.

次年度は、特に温度センサの配置方法を最適化する手法の開発に取りみ、まだ実現できて いない複数点の観測データから同時に複数の熱コンダクタンス推定を行う際の最適なセン サ配置方法を提言する予定である.加えて、温度データから実システムとモデルの誤差を検 知する手法の開発に着手する.



- 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
- Hiroto Tanaka, Hiroki Nagai, <u>Takashi Misaka</u>: Thermal Analysis of Spacecraft using Data Assimilation, *Thermal and Fluid Analysis Workshop 2019*, Newport News, (2019), (Oral Presentation).
- [2] Hiroto Tanaka, Hiroki Nagai, <u>Takashi Misaka</u>: Thermal Analysis of Spacecraft using Data Assimilation, *Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2019), OS18-16, pp. 806-807, (Poster presentation).
- [3] 田中寛人,永井大樹, 三坂孝志:データ同化を用いた宇宙機の熱状態推定手法の提案,宇宙 航行の力学シンポジウム 2019,相模原, (2019),(ロ頭発表).
- *[4] Hiroki Nagai, Hiroto Tanaka, <u>Takashi Misaka</u>: Establishment of High-accuracy Analysis Method of Spacecraft Thermal System using Data Assimilation, *Proceeding of the Nineteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2019), CRF-58, pp. 116-117.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

足立 高弘	127, 231	佐
阿部 圭晃	195	寒
安西 眸	73	下
伊賀 由佳	99	鈴
池田 (向井) 有理	19	髙
石出 忠輝	177	高
石橋 琢也	201	高
石本 淳	43, 181, 229, 239	高
伊藤 高敏	21	高
伊藤 浩志	169	盲
鵜飼 孝博	101	Ħ
内田 諭	35	Ħ
内一 哲哉	227, 233, 243	丹
江上 泰広	51	千
越中谷 賢治	281	張
太田 信	19, 29, 115, 139, 281	堟
大谷 清伸	41, 101, 147, 155, 159, 255, 263, 279	津
岡島 淳之介	53, 97, 127, 273	寺
岡部 孝裕	53	寺
奥村 賢直	153	徳
太田 匡則	271	永
大林 茂	55, 79, 83, 117, 131, 175, 177, 179, 183, 265	中
小原 拓	209	中
門脇 敏	119	中
金崎 雅博	157	中
金澤 誠司	173	中
金子 智	249	中
川添 博光	265	沼
姜 東赫	99	服
菊川 豪太	269	橋
北川一敬	279	長
杵淵 郁也	89	早
鯉渕 弘資	163	早
古川 琢磨	273	平
小助川 博之	133	福
後藤 実	109	福
小西 康郁	33, 49	福
江目 宏樹	97	藤
小林 秀昭	119, 215	船
小宮 敦樹	77, 81, 103, 105, 141, 231, 241	古
酒井 康彦	167	古
酒井 康行	13	堀
坂上 博隆	283	槙
佐々木 大輔	251	松

佐藤 岳彦	17, 35, 93, 153, 173, 213, 277
寒川 誠二	31, 57, 85, 121, 145, 257
下山 幸治	15, 25, 37, 251
鈴木 杏奈	201
髙木 正平	33
高木 敏行	23, 109, 111, 161, 163, 169, 171, 235
高奈 秀匡	67, 71, 95, 149, 151, 225, 237
高橋 公也	47
高橋 俊	55, 267
高橋 庸夫	121
田中 学	115
田中 光太郎	275
丹澤 祥晃	181
千葉一永	131
張 亦文	133
塚田 隆夫	105
津田 伸一	143
寺島 修	49
寺島 洋史	125
徳増 崇	69, 87, 89, 137, 143, 249, 261
永井 大樹	45, 51, 63, 65, 107, 123, 157, 165, 259, 267, 271, 283, 285
中川 敦寛	263
中谷 達行	93
中村 寿	13, 75, 91, 125, 275
中本 裕之	235
中山 雄行	253
中山 昇	171
沼田 大樹	255
服部 裕司	47, 129, 135, 253
橋本 望	215
長谷川 裕晃	79, 123
早川 晃弘	61
早瀬 敏幸	59, 167
平田 勝哉	43
福井 智宏	59
福島 啓悟	261
福山 敦彦	57
藤野 貴康	149
船本 健一	245
古川 怜	67
古館 美智子	165
堀 琢磨	269
槙原 幹十朗	41, 45
松下 洋介	81

丸田 薫	185, 187
三坂 孝志	175, 285
水書 稔治	155
椋平 祐輔	27
森江 隆	85
森澤 征一郎	179
焼野 藍子	247
矢野 猛	213
山下一郎	31
山田 剛治	159
山田 昇	103
吉木 宏之	277
米澤 宏一	65
米村 茂	39, 113
依田 大輔	63
渡部 正夫	213
渡邊 豊	215

Adam J. Howkins	201	Roman Fursenko	187
Adrian Sescu	135	Ryan Milcarek	185
Aike Qiao	29	Sébastien Livi	241
Alexander Kirdyashkin	187	Sergey Minaev	187
Anthony B. Dichiara	71	Shalabh C. Maroo	69
Asadur Rahman	239	Shinkyu Jeong	107
Benjamin Ducharne	243	Simon Tupin	11
Brian C. Vermeire	195	Thomas Elguedj	229
Cedric Galizzi	215	Vladimir Gubernov	187
Chenguang Lai	83	Vladimir Khovaylo	23
Chrystelle Bernard	225	Vladimir Saveliev	39
Colin P. Britcher	117	Willyanto Anggono	61
Dany Escudie	215	Xiaondong Ma	21
Dukhyun Choi	257	Yevgeniy Bondar	113
Edyta Dzieminska	183	Yiming Li	145
Freddie D. Witherden	195	Zahrul Fuadi	161
Frederic Gillot	247	Zhenmao Chen	111
Friedrich Dinkelacker	151		
Gael Sebald	233		
Hideaki Ogawa	147		
Igor Adamovich	95		
Ivan Delbende	129		
Jean-Paul Rieu	245		
Jeongmin Ahn	91, 137, 185		
Juan F. Torres	141		
Justin Rubinstein	27		
Kahar Osman	139		
Khalid M. Saqr	11		
Laurent Chazeau	237		
Lavi Rizki Zuhal	37		
Mehrdad Raisee Dehkordi	25		
Michael Fehler	201		
Mohamed Farhat	17		
Narendra Kurnia Putra	73		
Nasruddin Yusuf Rodjali	87		
Nicholas Williamson	77		
Nicolas Mary	227		
Niki Loppi	195		
Olivier Mathieu	75		
Peng Zhang	259		
Peter E. Vincent	195		
Peter K. Kang	201		
Rhea P. Liem	15		
Roland N. Horne	201		

東北大学流体科学研究所 令和元年度共同利用・共同研究拠点「流体科学国際研究教育拠点」 活動報告書

令和3年3月発行

編集·発行: 東北大学流体科学研究所 所長 丸田 薫

〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目1番1号 電話:022-217-5302(総務係) FAX:022(217)5311

E-mail : ifs-kyodo@grp.tohoku.ac.jp URL : http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/koubo/index.html

印刷: 株式会社 仙台共同印刷

