



東北大学

平成 28 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 2016
Joint Usage / Research Center
"Fluid Science Global Research and Education Hub"

東北大学 流体科学研究所

Institute of Fluid Science
Tohoku University



は し が き

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

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

本報告書は平成 28 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、106 件の公募共同研究およびリーダーシップ共同研究の成果報告書、主な発表論文の別刷等を収録している。本拠点は、本公募共同研究を通じて、国内外の様々な異分野の英知を結集させ、流動現象の基礎研究とそれを基盤とした先端学術領域との融合ならびに重点科学技術分野への応用によって、世界最高水準の多様な流動現象に関する学理の探求及び研究を推進し、社会に貢献するとともに、次世代の若手研究者及び技術者を育成するよう努めて参る所存である。今後ともご支援ご鞭撻をお願い申し上げますと共に、本報告書について、忌憚のないご意見を頂ければ幸甚である。

平成 29 年 11 月

東北大学流体科学研究所長
大林 茂

目 次

1. 平成 28 年度流体科学研究拠点活動のまとめ

1.1	概要	1
1.2	公募共同研究成果報告会	1
1.3	流体科学データベース	2
1.4	共同利用・共同研究拠点「流体科学研究拠点」活動報告書	3
1.5	公募共同研究実施状況	3
1.6	研究成果の発表件数	5
1.7	平成 21 年度から平成 27 年度までの活動成果	6

2. 研究成果報告書

＜一般公募共同研究＞

J16001	予混合燃焼における火炎のダイナミクスに及ぼす未燃ガス温度と熱損失の影響	9
	門脇 敏（長岡技術科学大学）、小林 秀昭（東北大学）	
J16002	エッジトーンの音響流体解析	11
	高橋 公也（九州工業大学）、服部 裕司（東北大学）	
J16005	準地衡風乱流における高エネルギー（負温度）領域での渦の動力学	13
	高橋 直也（東京電機大学）、服部 裕司（東北大学）	
J16007	係留式高層プラットフォームシステムのための LTA 機体空力設計	15
	千葉 一永（電気通信大学大学院）、大林 茂（東北大学）	
J16008	常温圧縮せん断法を用いたマイクロ成形技術の開発	17
	中山 昇（信州大学）、高木 敏行（東北大学）	
J16009	飛翔体の空力性能改善に関する研究	19
	長谷川 裕晃（秋田大学）、大林 茂（東北大学）	
J16010	複雑形状の空隙媒体による水中爆発環境の減衰効果	21
	北川 一敬（愛知工業大学）、大谷 清伸（東北大学）	
J16011	高密度水素安全管理に関する連成解析	23
	石本 淳（東北大学）、Alain Combescure（INSA de Lyon）	
J16012	火災旋風のリスク軽減化に関する混相流体力学的アプローチ	25
	石本 淳（東北大学）、Kozo Saito（University of Kentucky）	
J16013	微小循環系における血球挙動の数値解析ならびに実験観察	27
	福井 智宏（京都工芸繊維大学）、早瀬 敏幸（東北大学）	
J16014	ナノ構造体を用いた多機能特性の発現とその応用に関する研究	29
	高橋 庸夫（北海道大学）、寒川 誠二（東北大学）	
J16015	量子ナノディスクのバンド構造制御とデバイス応用	31
	福山 敦彦（宮崎大学）、寒川 誠二（東北大学）	
J16016	微分位相構造に基づく後方乱気流の多感覚呈示	33
	竹島 由里子（東京工科大学）、大林 茂（東北大学）	
J16017	ナノ粒子を母材に分散させた炭素繊維強化プラスチックの機能性向上に関する研究	35
	高山 哲生（山形大学）、小助川 博之（東北大学）	
J16018	炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の検査、補修、リサイクルに関わる研究会	37
	高木 敏行（東北大学）、伊藤 浩志（山形大学）	
J16019	氾濫流・津波の伝播解析における不確実性影響の高精度評価技術の確立	39
	山崎 渉（長岡技術科学大学）、下山 幸治（東北大学）	

J16020	マッハ 1 近傍の流れの非定常性の研究	41
	菊池 崇将 (日本大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J16021	微細加工を施した伝熱面を流れる液膜流の熱流動特性	43
	足立 高弘 (秋田大学)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J16022	非平衡乱流現象の解明と制御	45
	酒井 康彦 (名古屋大学)、早瀬 敏幸 (東北大学)	
J16023	溶射用外部磁界印加型プラズマスジェット内の飛行粒子の数値解析	47
	藤野 貴康 (筑波大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J16024	翼端漏れ渦キャビテーションの熱力学的効果	49
	姜 東赫 (青山学院大学)、伊賀 由佳 (東北大学)	
J16025	ナノ粒子 E R 流体の高機能化とマイクロチャンネル内での流動評価	51
	田中 克史 (京都工芸繊維大学)、中野 政身 (東北大学)	
J16027	実験的・数値的解析によるマルチコプタの飛行性能向上に関する研究	53
	佐々木 大輔 (金沢工業大学)、下山 幸治 (東北大学)	
J16028	ホールトーン現象のアクティブ制御に関する研究	55
	松浦 一雄 (愛媛大学)、中野 政身 (東北大学)	
J16030	旋回流プラズマジェット微粒子形成プロセス用高熱効率プラズマトーチの開発	57
	安藤 康高 (足利工業大学)、西山 秀哉 (東北大学)	
J16031	超並列脳型 L S I のためのナノ構造アナログメモリ素子の開発	59
	森江 隆 (九州工業大学)、寒川 誠二 (東北大学)	
J16033	風力エネルギー高度利用のための電磁エネルギー変換装置の開発	61
	岩本 悠宏 (名古屋工業大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J16035	ふく射要素法を用いたレーザー温熱治療に関する研究	63
	櫻井 篤 (新潟大学)、圓山 重直 (東北大学)	
J16036	遷臨界 / 超臨界状態における酸水素混合系に対する熱物性解析	65
	徳増 崇 (東北大学)、津田 伸一 (九州大学)	
J16037	光化学物質を用いたスペースデブリ衝突による空気漏れ検知の研究	67
	楨原 幹十朗 (東北大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J16038	新力天秤を用いたサイレント超音速複葉翼モデルの空力特性	69
	川添 博光 (鳥取大学)、大林 茂 (東北大学)	
J16042	ナノスケール固液複合系の熱伝導メカニズム	71
	小原 拓 (東北大学)、芝原 正彦 (大阪大学)	
J16043	Kinetic Modeling of High-Pressure Surface Ionization Waves Generated by Ns Pulse Discharges	73
	高奈 秀匡 (東北大学)、Igor Adamovich (The Ohio State University)	
J16045	放電誘起水中衝撃波とマイクロバブルを用いた高効率な樹脂薄板破碎法の確立に関する研究	75
	小坂 丈敏 (埼玉工業大学)、孫 明宇 (東北大学)	
J16046	プラズマ流による気泡生成機構に関する研究	77
	佐藤 岳彦 (東北大学)、中谷 達行 (岡山理科大学)	
J16047	衝撃波の細胞内伝播動態の解析	79
	中川 敦寛 (東北大学病院)、大谷 清伸 (東北大学)	
J16050	タンパク質のシグナル配列の物理化学的性質と細胞内小器官への輸送に関する研究	81
	池田 (向井) 有理 (明治大学)、太田 信 (東北大学)	
J16051	低・高温プラズマ気流の特性解析とその材料表面に与える影響	83
	山田 剛治 (東海大学)、大林 茂 (東北大学)	
J16053	水中におけるストリーマ進展機構	85
	佐藤 岳彦 (東北大学)、金澤 誠司 (大分大学)	

J16054	カルマン渦列の周波数選択機構の究明と渦列形成の抑制……………	87
	高木 正平 (首都大学東京)、大林 茂 (東北大学)	
J16056	時間変化を伴う温度境界条件下での閉空間内流動評価……………	89
	小宮 敦樹 (東北大学)、Nicholas Williamson (The University of Sydney)	
J16057	傾斜キャビティ内流れの不安定性評価……………	91
	小宮 敦樹 (東北大学)、Daniel Henry (Ecole Centorale Lyon)	
J16060	人工改変タンパク質バイオテンプレートによる大面積2次元高密度および分散型ナノ粒子エッチング マスク作製の理論解析……………	93
	山下一郎 (大阪大学)、寒川 誠二 (東北大学)	
J16063	大規模環境でのふく射および対流によるエネルギー輸送に関する研究……………	95
	山田 昇 (長岡技術科学大学)、圓山 重直 (東北大学)	
J16065	ナノ・マイクロ構造によるふく射制御に関する研究……………	97
	圓山 重直 (東北大学)、Bong Jae Lee (韓国科学技術院)	
J16066	がん治療および診断のための生体伝熱解析……………	99
	圓山 重直 (東北大学)、Mishra Subhash Chandra (IIT)	
J16067	Development, Modeling and Characterization of Efficient Magneto-Rheological Elastomers for Vibrational Energy Harvesting ……………	101
	Gael Sebald (Université de Lyon, INSA-Lyon)、中野 政身 (東北大学)	
J16068	Development and Applications of Micro-Motors Consisting of Smart Polymer Rotor and Dielectric Liquid ……………	103
	中野 政身 (東北大学)、Miklos Zrinyi (Simmelweis University)	
J16069	Development of Novel Multi-Layer Magnetorheological Elastomer Isolators ……………	105
	Weihua Li (University of Wollongong)、中野 政身 (東北大学)	
J16071	各種基板上のカーボン系薄膜成長における量子・分子論的解析……………	107
	徳増 崇 (東北大学)、金子 智 (神奈川県産業技術センター)	
J16072	触媒層内酸素輸送抵抗に対する表面散乱の影響……………	109
	徳増 崇 (東北大学)、杵淵 郁也 (東京大学)	
J16073	Theoretical and Experimental Study of Flow Stability, Flow Controllability, and Trapped Acoustic Modes in Cylindrical Expansion Chamber-Pipe System ……………	111
	Mikael A. Langthjem (山形大学)、中野 政身 (東北大学)	
J16075	Electronic and Spin Transport of Carriers Localized in 3D Array of Nano-Disks Fabricated by Bio-Template Top-Down Etching ……………	113
	Natalia Stepina (Institute of Semiconductor Physics)、寒川 誠二 (東北大学)	
J16077	Charge-up on Water Surface by Cold Atmospheric Plasma for Sanitization Device……………	115
	Tetsuji Shimizu (terraplasma GmbH)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J16078	Immersed Boundary Techniques for Building Cube Method ……………	117
	大林 茂 (東北大学)、Arpiruk Hokpunna (Chiang Mai University)	
J16080	The Theoretical Modes of the Wake Flow of Road Vehicles……………	119
	Chenguang Lai (Chongqing University of Technology)、大林 茂 (東北大学)	
J16081	Measurement-Integrated Analysis Methodology for Complex Flow Systems ……………	121
	早瀬 敏幸 (東北大学)、Luca Brandt (KTH)	
J16082	Nanostructured Heusler Alloys and Related Compounds Prepared by Mechanical Alloying and Plasma Electrolytic Methods for Energy Saving Thermoelectric Power Generation and Protective Coatings …	123
	Vladimir Khovaylo (National University of Science and Technology “MISiS”)、高木 敏行 (東北大学)	

J16083	Numerical Study on Gas Lubrication of a Textured Surface in Micro/Nanoscale	125
	米村 茂(東北大学)、Yevgeniy Bondar (Siberian Branch of Russian Academy of Science)	
J16088	Aeroacoustics of Low Reynolds Number Flows Via Dynamic Hybrid RANS/LES and Stochastic Noise Generation and Radiation	127
	Adrian Sescu (Mississippi State University)、服部 裕司(東北大学)	
J16089	Quantitative Temperature Measurement of High Pressure Flame Applying Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS)	129
	早川 晃弘(東北大学)、Simone Hochgreb (University of Cambridge)	
J16090	Physical Insight into Mach Reflection Transition and Its Hysteresis in Axisymmetric Intakes in Continuum and Rarefied Flow Conditions for High-Speed Airbreathing Propulsion	131
	Hideaki Ogawa (RMIT University)、大谷 清伸(東北大学)	
J16094	Characteristic Simulation of Neutral Beam Etching Fabricated Nanodisks for New Material Applications	133
	Yiming Li (National Chiao-Tung University)、寒川 誠二(東北大学)	
J16095	Characterization of Plastic Deformation Using Electromagnetic NDT Methods	135
	陳 振茂(西安交通大学)、高木 敏行(東北大学)	
J16101	Analysis of Transport Phenomena of Oxygen Ion in Electrolyte of Solid Oxide Fuel Cell	137
	徳増 崇(東北大学)、Jeongmin Ahn (Syracuse University)	
J16104	Research of High-Speed Contact with Medical Devices	139
	太田 信(東北大学)、Philippe Kapsa (ECL)	
J16105	Development of Program for Surveying Stent Strut Position	141
	太田 信(東北大学)、Bastien Chopard (Geneva University)	
J16107	マウス胎仔を用いた自律神経発達過程における胎仔脳出血発症リスクの検証	143
	伊藤 拓哉(東北大学)、早瀬 敏幸(東北大学)	
J16108	移動物体周りの非定常流体现象予測の高度化のための研究	145
	大林 茂(東北大学)、高橋 俊(東海大学)	
＜萌芽公募共同研究＞		
J16H001	木質バイオマス内部の熱分解ダイナミクス	147
	大上 泰寛(秋田県立大学)、中村 寿(東北大学)	
J16H002	アルミニウム合金のイメージベース解析	149
	鈴木 克幸(東京大学)、大林 茂(東北大学)	
J16H003	飛行パイプの屋外観測と流れ解析	151
	平田 勝哉(同志社大学)、中野 政身(東北大学)	
J16H004	複数の前縁フラップの組合せによるデルタ翼の空力特性の改善	153
	石出 忠輝(木更津工業高等専門学校)、下山 幸治(東北大学)	
J16H005	羽ばたき飛行における柔軟翼の有効性	155
	石出 忠輝(木更津工業高等専門学校)、大林 茂(東北大学)	

<国際連携公募共同研究プロジェクト>

J16R001	The Characteristics of the Flow Induced by an Over-Expanded Bubble	157
	孫 明宇 (東北大学)、Jiming Yang (University of Science and Technology of China)、 Nicholas Apazidis (KTH)、阿部 晃久 (神戸大学)、小板 丈敏 (埼玉工業大学)	
J16R003	Investigation of Inhomogeneous Mixing of Plasma Species in the Hybrid-Stabilized Argon-Water Arc Discharge for Subsonic-Supersonic Quasi-Laminar Plasma Flow Regimes.....	165
	Jiří Jeništa (Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i.)、西山 秀哉 (東北大学)、 Milan Hrabovský (Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i.)、 Anthony B. Murphy (CSIRO Materials Science and Engineering)	
J16R004	Instability and Nonlinear Dynamics of Curved Vortices	167
	服部 裕司 (東北大学)、Stéphane Le Dizès (IRPHE and Aix-Marseille University)、 Stefan G. Llewellyn Smith (MAE, University of California)、 福本 康秀 (九州大学マス・フォア・インダストリ研究所)	
J16R005	省エネルギーのための知的層材料・層構造に関する国際共同研究.....	173
	高木 敏行 (東北大学)、Jean-Yves Cavaillé (INSA de Lyon)、 Christian Boller (Fraunhofer Institute for NDT)、 Jinhao Qiu (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics)、 Julien Fontaine (EC Lyon)、Manfred Kohl (Karlsruhe Institute of Technology)、 Henrik Alfredsson (KTH Royal Institute of Technology)	
J16R006	Filtrational Gas Combustion in Porous Media and Micro Combustion	185
	Sergey Minaev (Far-Eastern Federal University)、Roman Fursenko (ITAM SB RAS)、 Alexander Kirdyashkin (Department Structural Macrokinetics, TSC)、 Vladimir Gubernov (ICKC SB RAS, Novosibirsk)、Andrey Shmakov (Lebedev Physical Institute RAS)、 丸田 薫 (東北大学)	

<リーダーシップ共同研究>

J16L003	熱遷移流に対する分子動力学解析.....	189
	山口 浩樹 (名古屋大学)、菊川 豪太 (東北大学)	
J16L004	腹足類這行運動の粘液の特性解析とその壁面移動ロボットへの応用.....	191
	塚越 秀行 (東京工業大学)、中野 政身 (東北大学)	
J16L006	海洋細菌に対する衝撃波殺菌効果の向上に関する研究.....	193
	阿部 晃久 (神戸大学)、孫 明宇 (東北大学)	
J16L026	水および液体窒素の高圧環境下における噴霧特性の研究.....	195
	渡邊 力夫 (東京都市大学)、小林 秀昭 (東北大学)	
J16L029	次世代高温環境センサ研究会 (フェーズ2)	197
	内一 哲哉 (東北大学)、矢口 仁 ((株) インテリジェント・コスモス研究機構)	
J16L034	高繰返しレーザーパルスを用いた超音速流体制御の数値解析.....	199
	岩川 輝 (名古屋大学)、大林 茂 (東北大学)	
J16L039	プラズマ流による密閉小型容器内のウイルス不活化法の開発.....	201
	佐藤 岳彦 (東北大学)、押谷 仁 (東北大学)	
J16L040	M R 流体流動場中における微粒子挙動の解明.....	203
	井門 康司 (名古屋工業大学)、中野 政身 (東北大学)	
J16L041	Numerical Simulation for Reducing Future Tsunami Damage	205
	大林 茂 (東北大学)、Fumiya Togashi (Applied Simulations Inc.)	

J16L044	しゅう動面における Me-DLC 由来軟質金属層の諸物性と摩擦・摩耗特性に関する研究	207
	後藤 実 (宇部工業高等専門学校)、高木 敏行 (東北大学)	
J16L048	膨張波照射による生体組織への影響	209
	橋本 時忠 (佐賀大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J16L052	自然環境中の大規模非定常高速流体现象の定量的可視化計測法	211
	水書 稔治 (東海大学)、大林 茂 (東北大学)	
J16L055	パリスティックレンジへ適用可能な感圧塗料技術の開発	213
	沼田 大樹 (東北大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J16L058	P-Selectin Printing on PDMS Substrates	215
	白井 敦 (東北大学)、Jean-Paul Rieu (Université Claude Bernard Lyon 1)	
J16L059	歪み Ge-on-Insulator 基板の作製とデバイス応用	217
	澤野 憲太郎 (東京都市大学)、寒川 誠二 (東北大学)	
J16L061	中性粒子ビームプロセスによる高性能高移動度 MOS トランジスタに関する研究	219
	遠藤 和彦 (産業技術総合研究所)、寒川 誠二 (東北大学)	
J16L064	生体内光熱伝播制御による温熱治療の研究	221
	圓山 重直 (東北大学)、Victoria Timchenko (The University of New South Wales)	
J16L070	腸骨内の骨髓流れの数値流体モデルの構築	223
	中山 敏男 (鶴岡工業高等専門学校)、太田 信 (東北大学)	
J16L074	Development of a Smart Material with Cellulose	225
	太田 信 (東北大学)、Fredrik Lundell (KTH)	
J16L076	Tornado Formation Research with Wind Tunnel	227
	Rongjia Tao (Temple University)、中野 政身 (東北大学)	
J16L079	Application of Data Assimilation to Aviation Safety System	229
	大林 茂 (東北大学)、鄭 信圭 (Kyunghee University)	
J16L084	Development of Conservative Kinetic Force Method	231
	Vladimir Saveliev (National Center of Space Researches and Technologies)、米村 茂 (東北大学)	
J16L085	Numerical Study of Thermal and Chemical Non-Equilibrium Effects in Near-Continuum Hypersonic Flows	233
	Georgy Shoen (Novosibirsk State University)、米村 茂 (東北大学)	
J16L086	Cavity Formation Mechanism in a Cavitation Process	235
	佐藤 岳彦 (東北大学)、Mohamed Farhat (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL))	
J16L087	Investigation of Nozzle Flows at Low Reynolds Numbers	237
	Yevgeniy Bondar (Novosibirsk State University)、丸田 薫 (東北大学)	
J16L100	Transport Phenomena of Nanoscale Water Droplet in a Nano Pore	239
	徳増 崇 (東北大学)、Vergne Philippe (INSA-Lyon)	
J16L103	Shock Amplification behind Fabrics	241
	Loïc Ehrhardt (French-German Research Institute of Saint-Louis)、孫 明宇 (東北大学)	

1. 平成 28 年度流体科学国際研究教育拠点活動のまとめ

1.1 概要

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

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

平成 25 年度より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が開始され、28 年度からは、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が開始された。平成 26 年度から実施している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されている。

平成 28 年度の公募共同研究は、平成 28 年 4 月 1 日から平成 29 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 27 年 12 月から翌年 1 月末にかけて、本研究所のホームページで日本語と英語で広く国内外に公開するとともに、関連学会および本研究所の関連研究者メーリングリストを利用して電子メールで広く国内外に通知した。公募共同研究の採択は、共同研究委員会に過半数が外部委員の審査委員会を結成して行った。採択された研究課題には、評価結果に基づき研究経費を措置した。

平成 28 年 11 月には、運営委員会、共同研究委員会、同年 10 月に公募共同研究成果報告会が開催された。

1.2 公募共同研究成果報告会

平成 28 年 10 月 11 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-2016 において仙台国際センタ

一にて開催した。本報告会では 89 件（連携公募共同研究プロジェクト 5 件、萌芽公募共同研究 3 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、104 人の出席者があった（写真 1、2）。

発表は全て英語で行われ、海外からの共同研究者も交えて活発な議論が行われた。



写真 1：ショートプレゼンテーションの様子

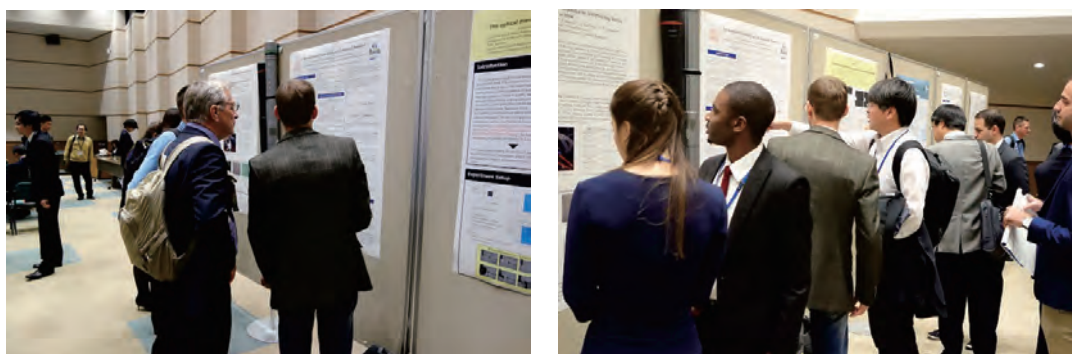


写真 2：ポスターセッションの様子

1.3 流体科学データベース

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

表 1：流体科学データベースへの登録件数とアクセス数

	平成 28 年度
公募共同研究成果の登録数	67
登録済みデータ総数	540
流体科学データベースへの アクセス件数	7,154

1.4 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 28 年 11 月に、平成 27 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「流体科学研究拠点」活動報告書を作成し、関係機関、研究者に配布した。報告書の内容（著作権の都合により論文別刷りは除く）は流体科学研究拠点ホームページに掲載されている。

(<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/koubo/seika.html>)

1.5 公募共同研究実施状況

1) 申請・採択状況

一般公募共同研究の申請・採択状況等を表 2 に示す。申請時に選択された研究課題分野（環境・エネルギー、人・物質マルチスケールモビリティ、健康・福祉・医療、基盤）と国内/国際の別を分類した。表 3 には国際連携公募共同研究プロジェクトおよび萌芽公募共同研究の申請・採択状況を示す。表 4 には拠点活動の一部（自己負担によるもの）として開始したリーダーシップ共同研究の実施状況を示す。

表 2：一般公募共同研究の申請・採択状況

		平成 28 年度
申請数（件）		99
採択数（件）		69
国内・国際	国内	44
	国際	25
分野別件数 (国内/国際)	環境・エネルギー	27 (17/10)
	人・物質マルチスケールモビリティ	9 (4/5)
	健康・福祉・医療	10 (6/4)
	基盤	23 (17/6)
採択率（％）		70
申請金額（千円）：a		30,396
採択金額（千円）：b		16,819
平均充足率（金額）（％）：b/a		55
平均採択金額（千円）		244

表 3：国際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

平成 28 年度	国際連携公募共同研究 プロジェクト	萌芽 公募共同研究
申請数（件）	6	5
採択数（件）	5	5
採択率（％）	83	100
申請金額（千円）：a	8,140	994
採択金額（千円）：b	4,869	525
充足率（金額）（％）：b/a	60	53
一件あたりの採択金額 （千円）	974	105

表 4：リーダーシップ共同研究の実施状況

		平成 28 年度
実施数（件）		28
国内・国際	国内	15
	国際	13
分野別件数 (国内/国際)	環境・エネルギー	7 (5/2)
	人・物質マルチス ケールモビリティ	2 (0/2)
	健康・福祉・医療	6 (3/3)
	基盤	13 (7/6)
申請金額（千円）：a		11,825
採択金額（千円）：b		2,894
平均充足率（金額）（％）：b/a		24
平均採択金額（千円）		103

2) 研究者の受け入れ状況

本研究所が公募共同研究を実施するために受け入れた研究者の人数（延べ人日）を表 5 に示す。対象は公募共同研究経費を使用して来仙した研究者とし、滞在日数を基に算出した。

表 5：研究者の受け入れ状況

	平成 28 年度
国内	389
国外	625
合計 (延べ人日)	1,014

3) 研究費

本公募共同研究にて使用した研究費の内訳を表 6 に示す。

表 6：研究費の内訳

	平成 28 年度
物件費（千円）	16,377
旅費（千円）	16,177
合計（千円）	32,554

1.6 研究成果の発表件数

研究成果の発表件数を表 7 に示す。これらの成果の内、主要な論文の別刷り等が、本報告書の後半に掲載されている。

表 7：研究成果の発表件数

	平成 28 年度
学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）	99
国際会議、国内会議、研究会、口頭発表等	291
その他（特許・受賞・マスコミ発表等）	16
合計（件）	406

1.7 平成 21 年度から平成 27 年度までの活動成果

本節では、平成 21 年度から平成 27 年度までの活動成果を表 8 から表 14 に記載する。

表 8：流体科学データベースへの登録件数とアクセス数

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
公募共同研究成果の 登録数	16	32	42	47	54	60	63
登録済みデータ総数	458	478	488	493	500	516	532
流体科学データベー スへのアクセス件数	10,040	12,123	10,815	8,591	7,587	6,818	7546

表 9：一般公募共同研究の申請・採択状況

		平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
申請数（件）		52	64	77	85	94	98	98
採択数（件）		52	63*	77	85	93*	96*	97
国内・国際	国内	32	35	47	51	59	60	58
	国際	20	28	30	34	34	36	39
分野別件数 (国内/国際)	エアロ スペース	7 (5/2)	7 (5/2)	10 (7/3)	12 (9/3)	13 (10/3)	16 (12/4)	16 (3/13)
	エネルギー	16 (8/8)	14 (5/9)	18 (6/12)	20 (7/13)	21 (7/14)	21 (7/14)	21 (7/14)
	ライフ サイエンス	7 (5/2)	13 (8/5)	13 (9/4)	14 (8/6)	19 (12/7)	17 (12/5)	15 (8/7)
	ナノ・ マイクロ	17 (10/7)	17 (10/7)	23 (17/6)	24 (17/7)	24 (18/6)	24 (17/7)	22 (14/8)
	基盤	5 (4/1)	12 (7/5)	13 (8/5)	15 (10/5)	16 (12/4)	18 (12/6)	23 (16/7)
採択率（％）		100	98	100	100	99	98	99
充足率（金額）（％）		26～	77～95	59～97	49～83	44～73	19～70	21～67
申請金額（千円）：a		20,177	29,303	35,405	38,895	41,349	43,359	44,091
採択金額（千円）：b		16,639	24,637	25,657	25,550	23,079	22,004	21,563
平均充足率（金額）（％）：b/a		82	84	72	66	56	51	49
平均採択金額（千円）		320	391	333	301	248	229	222

*取り下げ

表 10：分野横断プロジェクト申請・採択状況

	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度
申請数（件）	1	1	1	1
採択数（件）	1	1	1	1
採択率（％）	100	100	100	100
申請金額（千円）：a	7,000	5,000	5,000	5,000
採択金額（千円）：b	7,000	4,650	3,445	2,936
充足率（金額）（％）：b/a	100	93	69	59
一件あたりの採択金額 （千円）	7,000	4,650	3,445	2,936

表 11：連携公募共同研究プロジェクトおよび萌芽公募共同研究の申請・採択状況

	連携公募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 12：研究者の受け入れ状況

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

表 13：研究費の内訳

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

表 14：研究成果の発表件数

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

2. 研究成果報告書

<一般公募共同研究>

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

課題番号	J16001
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	2016.4～2017.3
継続年数	1年目

予混合燃焼における火炎のダイナミクスに及ぼす未燃ガス温度と熱損失の影響
The Effects of Unburned-Gas Temperature and Heat Loss
on the Dynamics of Flames in Premixed Combustion

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

省エネルギーや低環境負荷の観点から、メタンや水素の希薄予混合燃焼が注目されている。これらの火炎の挙動を制御するためには、固有不安定性に起因する火炎のダイナミクスに関する知見が不可欠である。これまでの数値計算では、高・低温度環境下における熱損失を考慮した火炎は取り扱われておらず、そのダイナミクスに関する情報は乏しいのが現状である。本研究では、予混合燃焼における火炎のダイナミクスに及ぼす未燃ガス温度や熱損失の影響を調べ、そのメカニズムを解明することを目的とする。

2. 研究成果の内容

本数値計算では、支配方程式として化学反応を考慮した圧縮性ナビエ・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、未燃ガス温度やレイリス数を変化させて計算を遂行した。なお、計算の遂行では、流体科学研究所のスーパーコンピュータを用いた。

正弦波状の微小擾乱を予混合火炎に加え、その増幅率と波数の関係を明確にし、特性波長を求めた。また、時間発展の数値計算を遂行し、火炎のダイナミクスに及ぼす未燃ガス温度の影響を調べた。そして、火炎面のフラクタル解析を通して、不安定性のメカニズムを明らかにした。

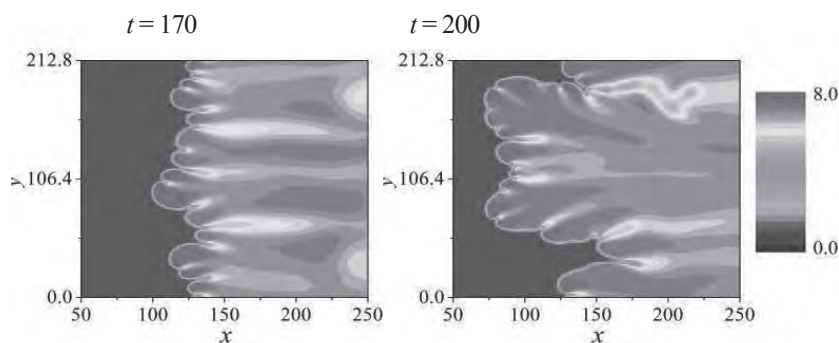


図1 セル状火炎の温度分布 ($Le = 0.5$, $L_y = 16\lambda_c$, $T_u = 0.8$, $t = 170$ & 200)

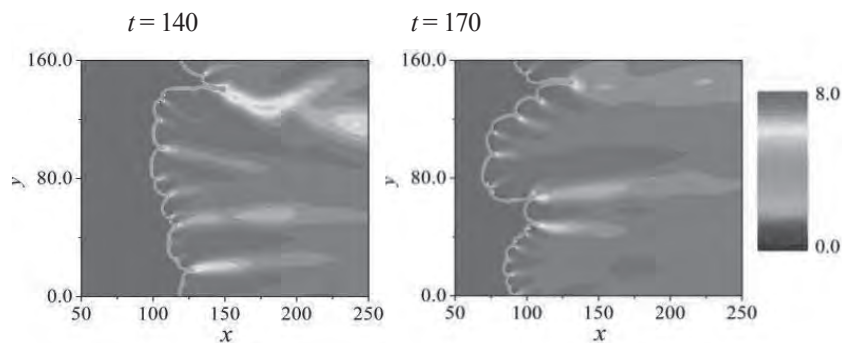


図2 セル状火炎の温度分布 ($Le = 0.5$, $L_y = 16\lambda_c$, $T_u = 1.2$, $t = 140$ & 170)

図1は、セル状火炎の温度分布を示したものであり、未燃ガス温度は $T_u = 0.8$ である。未燃ガス温度が1より低い(低温環境下)ので、火炎面を通しての熱膨張の効果が大きくなり、ダイナミックな火炎挙動が観察される。

図2は、未燃ガス温度が $T_u = 1.2$ のときのセル状火炎の挙動を示したものである。未燃ガス温度が1より高い(高温環境下)ので、熱膨張の効果が小さくなり、相対的に穏やかな火炎挙動が観察される。

数値計算で得られた火炎面に対してフラクタル解析を遂行した。火炎面のフラクタル次元は時間や計算領域長さに依存しないことを示した。そして、未燃ガス温度が上昇すると共にフラクタル次元が小さくなることを確認した。

3. 研究目標の達成状況

本研究では、予混合火炎の数値計算を遂行し、予混合燃焼における火炎のダイナミクスに及ぼす未燃ガス温度の影響を精査した。未燃ガス温度が1より低いとき、火炎面の挙動はダイナミックになり、未燃ガス温度が1より高いとき、相対的に穏やかな火炎挙動になることを示した。加えて、熱損失を考慮した場合の分散関係を求め、熱損失が火炎の不安定化を促進することを示した。

以上のことから、火炎のダイナミクスに及ぼす未燃ガス温度や熱損失の影響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

今年度は、主に未燃ガス温度に着目し、火炎挙動やフラクタル次元に及ぼす影響を精査した。今後は、熱損失を考慮した広領域における数値計算を遂行し、火炎の不安定機構を体系的に調べる予定である。

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] Kadowaki, S., Morita, Y., Thwe Thwe Aung, Katsumi, T., and Kobayashi, H.: The effects of unburned-gas temperature and heat loss on the dynamics of premixed flames – fractal analysis of flame fronts, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 8-9.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J16002
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

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

高橋 公也^{*†}, 岩上 翔^{*}, 小林 泰三^{**}, 服部 裕司^{***††}

^{*}九州工業大学情報工学府, ^{**}帝京大学

^{***}東北大学流体科学研究所

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

低マッハ数における空力音(流体音)の発音メカニズムは, これまであまり注目されてこなかった. 本研究ではエアリード楽器(リコーダー, フルート等)の音源となるエッジトーンに注目する.

本研究の目的は, 圧縮流体のシミュレーションによってエッジトーンの基本的な性質を詳細に調べ, その音源となる流体音源(Lighthill の音源)との関係を明らかにし, エッジトーン発生メカニズムの全体像を明確にすることである. これらの結果は, 楽器や流体音の研究を進展させるための基礎になると考えられる.

2. 研究成果の内容

2次元のエッジトーンの解析を行うために, LES による計算法を改良発展させ, 十分な精度の計算が可能となった. その結果, 音響エネルギーがジェットの流れ速の変化により低速領域では5乗に比例する(5乗則)が, 中速領域では3乗に比例する(3乗則)ことを発見した(図1). これは3次元系では, 6乗則から4乗則への変化を意味する. この結果は, 従来の予想とは異なる新たな結果であり, ヤマハ(株)から提供された実験の結果と一致する.

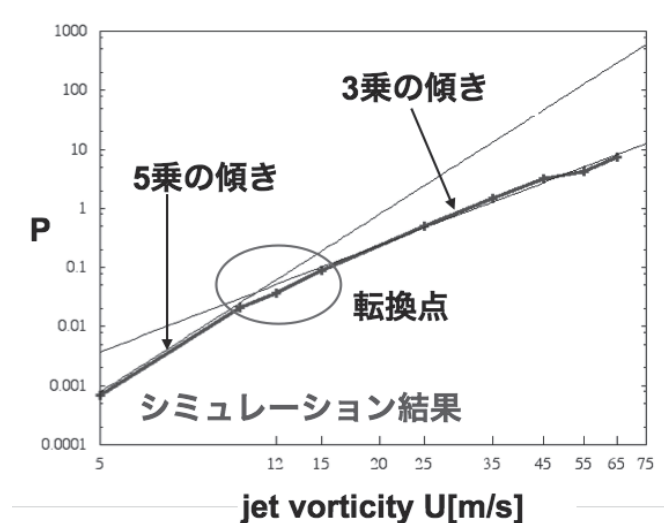


図1: エッジトーンの流れ速と音響エネルギーの関係

3. 研究目標の達成状況

当初 DNS を用いた解析まで行う予定であったが、まだ、DNS の解析は準備段階である。しかし、上記に示したように十分に高い精度の LES の計算が行えたこと、5 乗則から 3 乗則への転移が起きることは発見したのは大きな進展と考えられる。今後、DNS の解析を進め LES の結果の検証を行う予定である。

4. まとめと今後の課題

エッジトーンの解析に適した圧縮性 DNS の開発を行い、低レイノルズ数領域におけるエッジトーンの再現を行い、LES の結果と比較し LES の精度検証を行う。精度が不十分な場合には、LES の計算法を再検討し、高精度化を図る。これらの結果を踏まえて、高レイノルズ数におけるエッジトーンの性質を調べるために Lighthill の音源を計算し、Lighthill の音源から遠方音場を再現する方法の開発に挑む。

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] Sho Iwagami, Taizo Kobayashi, Kin'ya Takahashi, Yuji Hattori: Numerical study on acoustic intensity of edge tone, with change of jet velocity, *5th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and Acoustical Society of Japan*, Honolulu, Hawaii, (2016).

[2] 岩上翔, 小林泰三, 高見利也, 服部裕司, 高橋公也, 「エッジトーンの基礎問題の流体音響解析 II」, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 大阪府 豊中, (2017 年 3 月).

[3] 岩上翔, 小林泰三, 高見利也, 服部裕司, 高橋公也, 「エッジトーンの基礎問題の流体音響解析」, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 石川県 金沢, (2016 年 9 月)

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）Best Student Paper Award in Musical Acoustics second prize: Numerical Study on acoustical intensity of edgetone with change of jet velocity, Iwagami Sho et al., 2016.12, J. Acoust. Soc. Am. 140, 3254(A)

（マスコミ発表）なし

課題番号	J16005
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3 年目

準地衡風乱流における高エネルギー(負温度)領域での渦の動力学
Vortex Dynamics of the High Energy (Negative Temperature) State
in Quasi-Geostrophic Turbulence

高橋 直也*†, 服部 裕司**††

宮寄 武***, 石原 雅也***, 畠山 望****

*東京電機大学工学部, **東北大学流体科学研究所

***電気通信大学大学院情報理工学研究科

****東北大学未来科学技術共同研究センター/流体科学研究所(兼任)

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

地球流体现象に現れる 3 次元渦構造の相互作用を f 平面一様密度勾配の準地衡風近似に基づいて解析し, その統計力学的性質を調べた. 異符号渦の混在する乱流場において, 高エネルギー(負温度)領域では同符号渦のクラスターリングが起き, エントロピーが増大することが知られている. この流れ場を擬スペクトル法による大規模数値シミュレーションで再現し, 最大エントロピー理論に基づく平均場方程式の解を比較した. またエネルギー逆カスケードのような地球流体乱流に特有の渦のメカニズムを捉えるため, 過渡的時間発展を捉える渦モデルの構築を目的とした.

2. 研究成果の内容

本研究では渦構造の動力学を反映した乱流渦モデルを構築するために, 大規模直接数値シミュレーション(Direct Numerical Simulation, DNS)結果と統計力学的な理論解析を行なった. DNS は擬スペクトル法を用い, 512^3 と 1024^3 の解像度で平衡状態に至るまで長時間行なった. その結果は Ester らの DBSCAN 法を用いて渦構造を抽出し, 渦数や形状の時間変化を解析した(図 1(a)). その結果, 渦の数は冪関数に従って減少することを示した渦領域モデルに基づく最大エントロピー理論では, 渦面積(確率密度関数の面積分)とエネルギーを保存量として, シヤノンエントロピーをラグランジュの未定乗数法を用いて最大化させて理論解を得た. 理論解と数値計算結果は定性的に良く一致した. このことから, 数値計算において十分時間発展させた状態はほぼ最大エントロピー状態だと言えた. これらの結果と, 構築している点渦モデルの結果(図 1(b))と比較した.

3. 研究目標の達成状況

エネルギー逆カスケードなど地球流体運動の乱流場におけるメカニズムは, DNS の結果にクラスター解析を行い, 渦数の時間変化が時間の冪として減少することを定量的に捉えた.

また平均場方程式として最大エントロピー理論に基づき定式化を行ない, DNS のポテンシャル渦度の分布と比較した. 両者は定性的な一致を見た.

さらに過渡的な時間発展を渦動力学の見地から解明するために構築した点渦モデルの結果

と DNS の結果を比較した. その結果, DNS では最終状態に到達する直前渦構造が一本化し, アスペクト比が急激に増加するなど, 点渦系と矛盾しない結果が得られた. 一方で, 連続系の過渡状態ではアスペクト比は減少するが, 点渦系では変化しないなど, 一致しない結果も見られた. その原因として, エネルギーの散逸に伴い生成されたフィラメントが, DNS では粘性によって消失するが, 点渦モデルでは消失せずに捉えていることが考えられる.

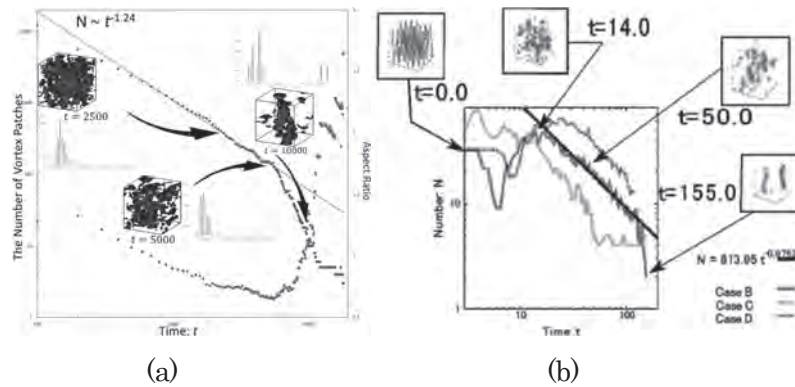


図 1 : 渦の数の時間変化と, 特徴的な時刻でのアスペクト比の分布.
(a)DNS の結果, (b)点渦モデルの結果.

4. まとめと今後の課題

準地衡風乱流の特徴的な振舞いを捉えるため, 大規模直接数値シミュレーションで再現された流れ場を解析した. その結果をもとに統計解析および点渦モデルの構築を行なった. DNS の結果と統計理論は定性的に一致した. また構築した点渦モデルは DNS の結果と, 最終状態では矛盾しない結果を再現することができた. 一方で過渡的な振舞いについて, DNS でフィラメントが十分解像できないために起こる現象を捉えられた.

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)

- [1] T. Miyazaki, M. Ishihara, Y. Konno and N. Takahashi: Clustering and Entropy Growth of Quasi-Geostrophic Point vortices under Periodic Boundary Conditions, *24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM) 2016 Book of Papers*, Montreal, (2016), pp.1443-1444.
- [2] T. Miyazaki, Y. Shimoda and K. Saga: Statistical Mechanics of Quasi-geostrophic Vortices, *Mathematical Fluid Dynamics, Present and Future*, Springer, (2016), pp. 461-486.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[3] K. Ishikawa, N. Takahashi, T. Miyazaki, N. Hatakeyama and Y. Hattori: Vortex Dynamics of the High Energy (Negative Temperature) State in Quasi-Geostrophic Turbulence, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 106-107.
- [4] N. Takahashi, K. Ishikawa, T. Miyazaki, N. Hatakeyama and Y. Hattori: Clustering, Enstrophy Growth and Vortex Dynamics of the High Energy (Negative Temperature) State in Quasi-Geostrophic Turbulence, *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2016), pp. 508-509.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J16007
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	2016.4～2017.3
継続年数	1年目

係留式高層プラットフォームシステムのためのLTA機体空力設計 Aerodynamic Design of Lighter-than-Air Hull for Captive High-Altitude Platform System

千葉 一永^{*,†}, 大林 茂^{**,††}, 西川 遼祐^{*}

^{*}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

より簡便に広範な運用を目指し、かつランニングコストを100%無くすべく、世界初の試みである係留式高層プラットフォームシステムの構築が最終目標である。本研究では、本年度本共同研究の枠組みで構築した静的挙動解析の知見に基づき、プラットフォームとして用いるLTA機体形状の空力最適設計を行う。

2. 研究成果の内容

システムに用いる機体形状候補として四つの形状を考案し、簡易的にモデルを作成した(Fig.1)。これと並行し、考案した候補を参考に実機モデルを製作し(Fig.2)、低高度で飛行実験を行い形状の安定性を評価した。その結果、非軸対称形状が高安定であった(Fig.3)。

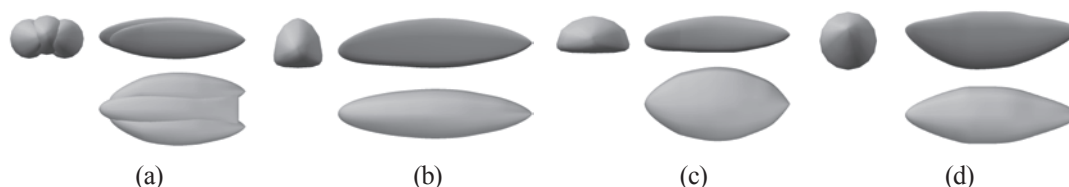


Fig.1 機体形状候補. (a) ハイブリッド, (b) 非軸対称, (c) 横長型非軸対称, (d)ペンギン型.

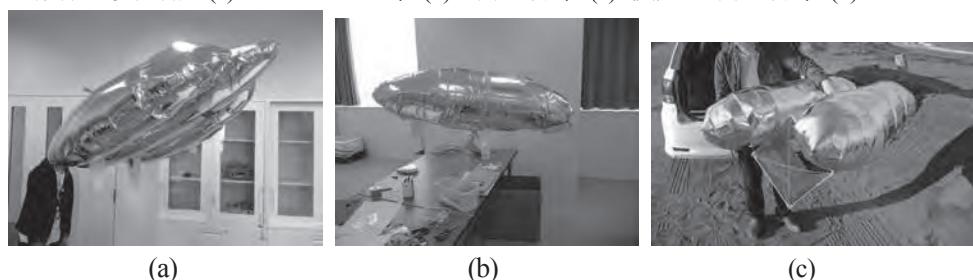


Fig.2 製作した実機モデル. (a) ハイブリッド, (b) 非軸対称, (c) ハイブリッドカイト(立体風).

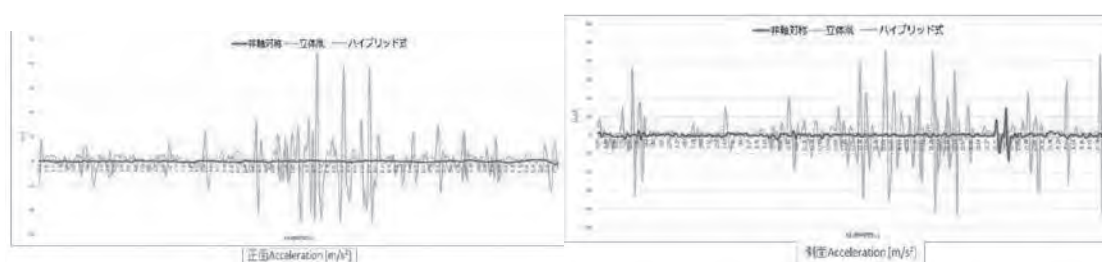


Fig.3 機体形状の安定性評価.

3. 研究目標の達成状況

今年度の研究により、形状候補を絞り込んだ。同時に、予備実験により、実験環境が整備された。以上の状況に鑑み、当初の予定通りに研究が進んでいると判断する。

4. まとめと今後の課題

考案した形状の空力性能と安定性に関する CFD 解析を実施し、データセットを作成する。

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] 西川 遼祐, 千葉 一永, 恩田 昌彦, 佐鳥 新, 秋葉 隼二郎: 係留式高層 LTA プラットフォームシステムにおける機体の上昇経路予測, 日本航空宇宙学会年会講演会, 東京, (2016).

[2] 柳田 大輝, 佐鳥 新, 三橋 龍一, 千葉 一永: 係留式高層プラットフォームによる小型衛星打ち上げ宇宙ビジネスモデル. 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 函館, (2016).

[3] 西川 遼祐, 千葉 一永, 恩田 昌彦, 佐鳥 新, 秋葉 隼二郎: 係留式高層 LTA プラットフォームシステム実現に向けた基礎検討. 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 函館, (2016).

[4] 西川 遼祐, 千葉 一永, 恩田 昌彦, 佐鳥 新, 秋葉 隼二郎: 係留式高層 LTA プラットフォームシステム実現に向けた基礎検討. 航空宇宙流体科学サマースクール, 大津, (2016).

*[5] Nishikawa, R., Chiba, K., Onda, M., Obayashi, S., Satori, S., and Akiba, R.: Aerodynamic Design of Hull Geometry for Captive High-Altitude Lighter-Than-Air Platform System, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 10-11.

[6] 柳田 大輝, 池田 悠登, 佐鳥 新, 伊藤 那知, 三橋 龍一, 千葉 一永: 小型衛星打ち上げのための係留式高層プラットフォームの研究 - 大樹多目的航空公園での実験報告, 計測自動制御学会 第 17 回システムインテグレーション部門講演会, 札幌, (2016).

[7] 池田 悠登, 柳田 大輝, 佐鳥 新, 伊藤 那知, 三橋 龍一, 千葉 一永: 小型衛星打ち上げのための係留式高層プラットフォームの研究 - モーションキャプチャを利用した姿勢推定, 計測自動制御学会 第 17 回システムインテグレーション部門講演会, 札幌, (2016).

[8] 池田 悠登, 柳田 大輝, 佐鳥 新, 伊藤 那知, 三橋 龍一, 千葉 一永: 超小型衛星打ち上げのための係留式高層プラットフォームの基礎的検討, 2017 年電子情報通信学会総合大会, 名古屋, (2017 年 3 月).

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J16008
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3年目

常温圧縮せん断法を用いたマイクロ成形技術の開発
 Technical Development for the Micro Shape Forming
 Used by Compression Shearing Method at Room Temperature

中山 昇*†, 高木 敏行**††, 堀田 将臣*, 小平 裕也*, 遠藤 恵太*, 井上 勇人*

三木 寛之***, 小助川 博之**

*信州大学工学部, **東北大学流体科学研究所

***東北大学学際科学フロンティア研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年, 優れた生体親和性や耐食性をもつチタンは, 歯科におけるインプラントや外科における人工骨など, その活躍の幅は広い材料として注目されている. 現在, 骨芽細胞の増殖に対するチタンの表面粗さの影響について数多くの研究^{1), 2)}が行われており, 骨芽細胞は表面粗さが大きく, 不規則な凹凸面により増殖することが確認されている. しかし, 従来の表面加工方法では凹凸形状を制御できず, 複雑な幾何学模様をチタン表面に与えることが困難である. 常温圧縮せん断法 (COSME-RT : Compression Shearing Method at Room Temperature)³⁾を用いて金型に付与した微細形状をAl 成形体に転写が可能である. したがって, 対象材料を純アルミニウム粉末から純チタン粉末と変更し, 純チタン粉末に微細形状を転写することを検討した.

本研究では, 常温圧縮せん断法を用いて金型に付与した微細形状を純チタン薄板への転写性を検証することを目的とし, 成形体の転写特性に及ぼすせん断距離の影響を明らかにした.

2. 研究成果の内容

本研究では, 純度 99.6%, 平均粒径 45 μm 以下の非球形の純 Ti 粉末を使用した. 鏡面加工を施した固定板 (Stationary plate) にビッカース試験機により試験荷重 PHV = 4.9, 9.8N でピラミッド状の圧痕を付与した. このときのビッカース圧痕の対角線長さは約 35, 50 μm となった. 隣り合うビッカース圧痕との距離を 100 μm と設定した.

純チタン薄板の成形には常温圧縮せん断装置 (有限会社ディップ) を使用した. 成形条件は, 目標寸法を 40×10×0.25mm, 圧縮応力を 1250MPa (圧縮荷重 500kN), せん断速度を 5mm/min を一定とし, せん断距離 L_s を $L_s=2, 4, 6, 8\text{mm}$ と変化させ成形を行った.

成形した試料の転写体 SEM 像を図 1 に示す. 図 1 より, COSME-RT で成形したすべての試料でビッカース圧痕が転写できていることが確認できた. 成形体の転写性を評価するために, 超深度形状測定顕微鏡を用いて線粗さ測定を行った. 図 2 に金型の微細形状 ($D=50\mu\text{m}$) と純チタン薄板の転写部の形状との比較を示す. 図 2 よりせん断距離の増加とビッカース圧痕の転写性は関係性が乏しいことがわかる. なお図 2 より, せん断距離 4mm の時に転写性が最も高い結果が得られた.

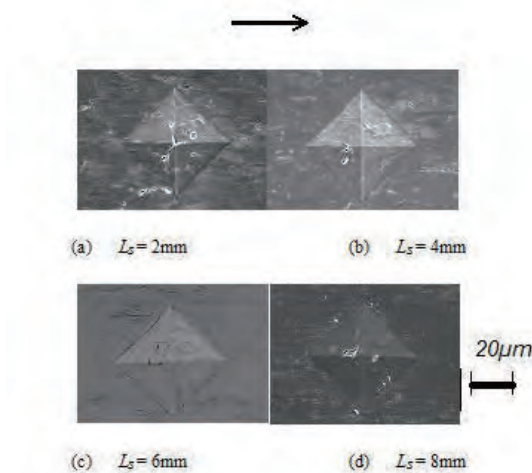


図 1：成形体の SEM 像

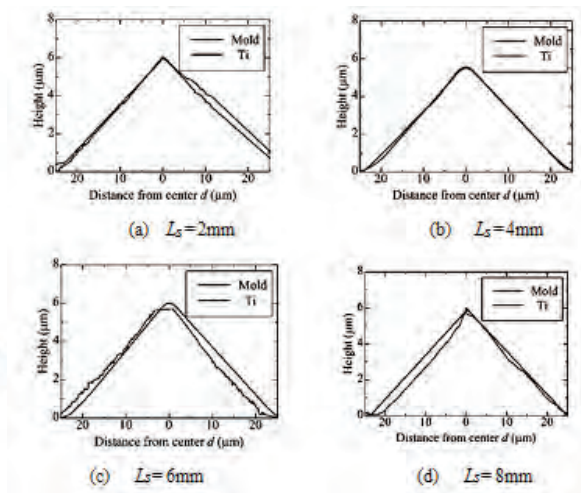


図 2：金型の形状と成形体の転写

3. 研究目標の達成状況

一度の加工により、マイクロスケールの部品製造開発が可能であることがわかったため、一定の目標を達成できたと考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究により、微細粒を有し、さらに μ スケールの部品製造が可能であることが示唆された。今後は骨芽細胞などの培養について評価しなければならないと考えられる。

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] Noboru Nakayama, Shota Sakagami, Masaomi Horita, Hiroyuki Miki, Hiroyuki Kosukegawa and Toshiyuki Takagi: Effect of Shearing Distance on Transfer Characteristic of Al Thin Plate formed by Compression Shearing Method at Room Temperature, *International conference on processing & manufacturing of advanced materials (THERMEC'2016)*, Graz, Austria, (2016), p. 409.
- [2] 中山 昇, 坂上将太, 堀田 将臣, 三木寛之, 小助川博之, 高木敏行, 武石洋征: 常温圧縮せん断法により成形した純アルミニウム薄板の転写特性に及ぼすせん断距離の影響, 平成 28 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2016), pp. 179-180.

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	J16009
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3年目

飛翔体の空力性能改善に関する研究

Study on Improvement of Aerodynamic Performance for an Airborne Project

長谷川 裕晃^{*†}, 大林 茂^{**††}

川端 鷹亮^{*}, 沖 大善^{*}

^{*}宇都宮大学大学院工学研究科, ^{**}東北大学流体科学研究所

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

飛翔体の構造が空力特性に及ぼす影響を調べ、空力安定性、高揚力・低抗力化に関する知見を得る。

2. 研究成果の内容

本研究ではバドミントンシャトルコックの空力安定性とスポーツスーツの生地通気量の違いが空力特性に及ぼす影響を調べる為に流体力測定と可視化実験、熱線風速計を用いた速度分布測定を行った。

シャトルコックは打球した際、コルク部が反転し向きを変えながら飛んでいく。つまり、極めて短い時間で反転し安定に飛翔する。このシャトルコックのインパクト直後の急激迎角変化中の飛翔メカニズムに着目し解明を行う。この高い空力安定性にシャトルの構造が影響しているのかを調べるためにシャトルの隙間部、羽根部に軽量で通気性の無い和紙で加工を行い4つのシャトルを用意し、スモークワイヤー法による流れ場の可視化と安定度の測定を行った。反転挙動のオーバーシュート時にシャトル後流の渦構造に隙間部の流れが影響し、オーバーシュートを抑える役割をしていた。こうしてシャトルの隙間部の存在が空力安定性に大きく影響することがわかった。

一方、スキージャンプスーツの異なる生地通気量 (case0 (0.0 L/m²s) case1 (43.4 L/m²s) case2 (58.2 L/m²s) case3 (65.8 L/m²s)) での流れ場特性を評価するために、楕円柱に生地を巻き付けて熱線流速計を用いた速度分布測定を行った。これまでの成果で通気量が増加することによる失速角の後退が確認でき、その際に通気量の違いで生地表面の流れに違いが生じることがわかった。一方で今年度、生地の厚みを4 mm から5 mm に変更すると通気量をさらに増加させた case3 では失速角の後退は生じなかった。この理由を調べるために熱線流速計で模型周りの速度場を取得した。主流速は20 m/s (楕円柱長軸長さ150 mm を代表長さとして $Re = 2.0 \times 10^5$) とし、迎角が30度の生地近傍の速度分布を図2に示す。case3 では case2 で見られた生地近傍での増速がみられなかった (赤丸で囲った部分)。以上より、通気量が大きすぎる生地では生地内部を通った流れが後縁付近まで到達せず、前縁側で流出することで模型表面の剥離領域への運動量の供給が行われず失速の後退に繋がらなかったと推測される。

3. 研究目標の達成状況

バドミントンシャトルコックの縦回転挙動においては、隙間部の有無でのシャトルスカート端から生じる渦の挙動を捉え、安定性に及ぼすシャトル構造とその理由の解明ができた。スキージャンプスーツの生地を巻きつけた楕円柱の通気量の違いによる失速角の後退について、速度分布測定から原因の考察を行った。次項に示す課題を残しつつも当初の目標は概ね達成できた。

4. まとめと今後の課題

空力安定性について、シャトルの縦回転挙動において隙間の存在でシャトルスカート端から放出される渦の挙動が回転中の挙動を支配していることがわかった。今後はこの内部流れの挙動と隙間部の位置、開口面積の関係を調べる必要がある。生地通気量と空力特性の関連については、空気通気量が増加すると、抗力減少と失速角後退が生じることがわかった。失速角が後退する理由として通気量が増加することで隙間を通った流れが模型表面に流出することで境界層内の流れ構造に違いが生じたと推測される。しかし、通気量が大きすぎると失速が早まることから、隙間を通った流れのふるまいを詳細に解明する必要がある。今後はこの隙間部の流れの影響を解明するために熱線流速計以外での評価方法も検討し通気量の存在で失速が後退するメカニズムを解明していく。

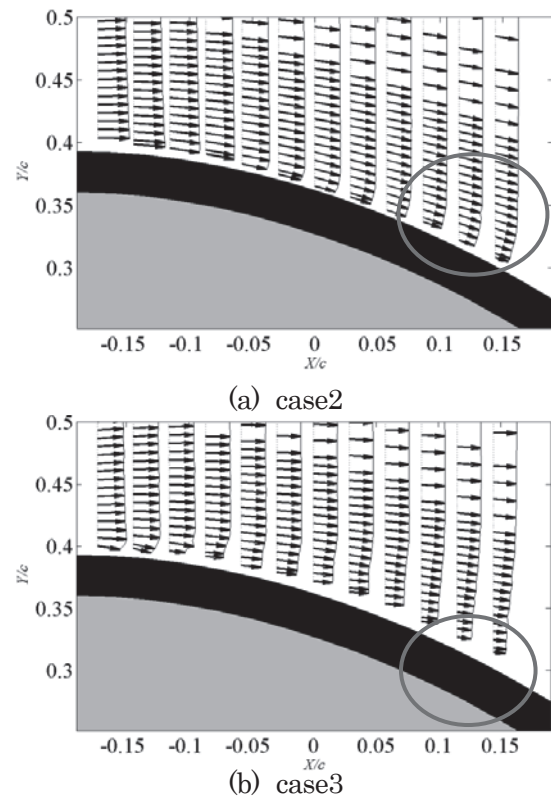


Fig. 2 The velocity profile of the elliptic
(Aoa = 30, Re = 2.0×10⁵)

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] Yuki Aoshima, Hiroaki Hasegawa, Shigeru Obayashi: Boundary Layer Control by Using Non-Circular Synthetic Jets, *APISAT-2016*, (2016).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 川端鷹亮, 長谷川裕晃, 村上正秀, 瀬尾和哉, 大林茂: スキージャンプスーツ用生地の通気量の違いが飛距離へ及ぼす影響, *スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2016*, 山形テルサ, (2016), Flash Disk.

[3] 工藤健太, 長谷川裕晃: 境界層内のシンセティックジェットによる流れ構造, *日本機械学会 2016 年度年次大会*, 福岡, (2016), CD-ROM.

[4] 青島有希, 長谷川裕晃: 主流と干渉するシンセティックジェットにおける吹出し口形状の影響, *日本機械学会第 94 期流体力学部門講演会*, 山口, (2016), Flash Disk.

*[5] Daizen Oki, Hiroaki Hasegawa, Shigeru Obayashi: Aerodynamic Characteristics of a Badminton Shuttlecock with Different Gap Size, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 108-109.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J16010
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

複雑形状の空隙媒体による水中爆発環境の減衰効果

Effect of Environment Attenuation of Underwater Explosion by Porous Complex Mediums

北川 一敬^{*†}, 大谷 清伸^{**††}, 小西 康郁^{**}

^{*}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

衝撃波の減衰法・緩和法の信頼性を向上のために、予測・実証・検証のサイクルで実行していくシステムが必要である。現状では、水中爆発の衝撃干渉問題と爆発環境の減衰効果の検証と実証のための計測データが不足している。

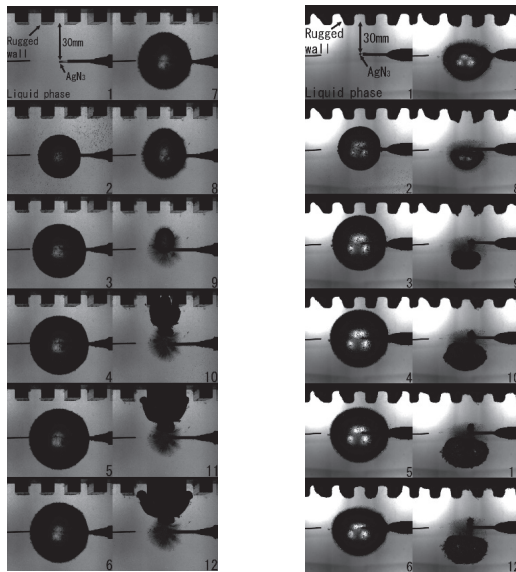
本研究目的は、衝撃波と気泡振動の減衰特性を考慮した音響インピーダンスを持つ気泡構造の複雑媒体で、水中爆発時の衝撃圧減衰、爆発ガスの気泡膨張収縮の抑制と水流ジェットの軽減による衝撃環境の減衰法の確立することである。

2. 研究成果の内容

模擬構造体は、水面付近の水中に設置、爆薬は、物体表面から 30mm の位置に、この時の換算距離 Z は $1.45\text{m/kg}^{1/3}$ 、中距離爆発条件($0.40 < Z < 5.55$)となる。爆発生成ガスの変形挙動の可視化と圧力計測により、圧力減衰効果と爆発現象の軽減効果を調べた。

図 1 は水中爆発の可視化結果を示す。図 1(a)の凹凸形状剛体壁の場合、爆発生成ガスの膨張過程(No.2～No.5)、収縮過程(No.6～No.9)となる。水面からの反射膨張波によりキャビテーションが発生する。爆発生成ガスは、No.5 で最大、No.6 から均等に収縮する。No.7 では、爆発生成ガス下面の収縮速度 5.6m/s 、No.8 では、爆発生成ガス下面 11.2m/s 、爆発生成ガス上面 3.4m/s となり、収縮速度が 30%速い。No.9 では、爆発生成ガスが最小となり、爆発生成ガス下面が爆発生成ガス中心方向に貫入し、供試体方向(上方)に水流ジェットが発生する。図 1(b)の凹凸形状可変形空隙壁面(Foam80)の場合、爆発生成ガスの膨張過程(No.2～No.4)、収縮過程(No.5～No.9)となる。水面と可変形な凹凸形状のフォーム境界面で反射膨張波が発生し、キャビテーションが生成される。爆発生成ガスは、No.4 で最大、No.5 から爆発生成ガス上面から収縮、爆発生成ガス下面は膨張し続ける。No.6 では、爆発生成ガス上面の収縮速度 13.4m/s 、No.7 から爆発生成ガス下面も収縮をはじめる。No.7 から爆発生成ガス上面の収縮速度 16.8m/s 、爆発生成ガス下面 6.0m/s となり、36%速い。No.9 では爆発生成ガスが最小、爆発生成ガス上面が爆発生成ガス中心方向に貫入していき起爆部下方向に水流ジェットが発生する。この時、水流の影響により凹凸形状可変形空隙壁面凸部が起爆部方向に引張られる。図 2 は凹凸剛体壁面及び凹凸可変形空隙壁背面での最大過剰圧・応力の最大値の結果、図 3 は図 2 の結果から求めた換算インパルスを示す。図 2 から凹凸形状可変空隙壁背面では最大過剰圧・応力が凹凸剛体壁と比較し、 $Z=1.74\text{m/kg}^{1/3}$ の時 92～98%、 $Z=2.42\text{m/kg}^{1/3}$ の時 96～97%に減衰した。換算インパルスの計算は第一波の立ち上がりから負圧になるまでの区間を積分する事により算出した。図 3 からインパルスは凹凸形状可変空

隙壁面と凹凸剛体壁と比較し $Z=1.74\text{m/kg}^{1/3}$ の時 52～55%, $Z=2.42\text{m/kg}^{1/3}$ の時 37～43%増加した。以上の結果から、フォームの変形と骨格固体の非定常抵抗により衝撃力の減衰効果が確認された。



(a) 剛体壁

(b) フォーム壁

図1 爆発生成ガスの可視化

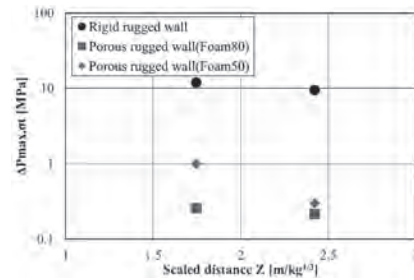


図2 過剰圧力・主応力

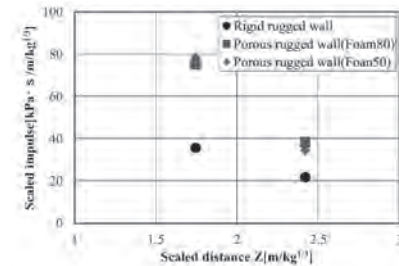


図3 換算インパルス

3. 研究目標の達成状況

水中爆発時に印可される衝撃圧・動的破壊挙動を、複雑構造媒体の組合せによって、物体損傷軽減の評価を行うことが研究目的である。本年度は、凹凸形状フォームによる物体形状の影響を調べた。凹凸形状の空隙フォームにおいて、フォームの密度とセル数の増加によって、衝撃圧の減衰と水流ジェットを物体から遠ざける事ができた。従って、当初の研究目標を達成した。特に、水中爆発の減衰と軽減効果は、媒体形状(三角, 半円), 媒体の物性値や分布変更により得ると考えている。

4. まとめと今後の課題

空隙フォームを用いて、衝撃圧・バブルパルスの90%以上の減衰効果とフォームによる水流ジェットの軽減の両面から水中爆発の軽減効果を得る事ができた。

今後の課題は、今年度得られた結果を踏まえ、空隙媒体の非定常抵抗と媒体の音響インピーダンスから総合判断し、水中爆発の軽減効果の向上を図る。

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] K. Kitagawa, D. Nagahiro, K. Ohtani, Y. Konishi, A. Abe: Attenuation and Reduction Effect of Underwater Explosion by Porous Materials, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 110-111.

*[2] 長廣大樹, 北川一敬, 大谷清伸: 各種形状の可変空隙媒体による水中爆発の減衰効果, 平成28年度衝撃波シンポジウム, ヴェルクよこすか, 横須賀, (2017.3.), #1C3-2.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J16011
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

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

石本 淳[†], Alain Combescure^{**††}, 松浦 一雄^{***}, 桑名 一徳^{****}, 中村 裕二^{*****}

*東北大学流体科学研究所, **INSA de Lyon LaMCOS, ***愛媛大学工学部

****山形大学工学部, *****豊橋技術科学大学工学部

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

水素は、低炭素社会を実現するために大いに貢献さ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。本年度においては材料側の構造体解析には粒子法の一つである Peridynamics モデルを用い、初期欠陥を有する隔壁の高歪み条件下におけるき裂伝播解析を行った。図1には弾性ひずみエネルギー分布の時間変化の可視化を示す。これを見ると、どの時間においてもその時間でのき裂の先端周辺が高歪みエネルギー密度、つまり応力が集中していることがわかる。

3. 研究目標の達成状況

達成度は80%である。高圧水素タンクのき裂伝播現象を解析する上で必要となる連続体力学理論、線形破壊力学理論の基礎、粒子法の一つである Peridynamics モデルによる材料き裂伝ば解析を実施した。

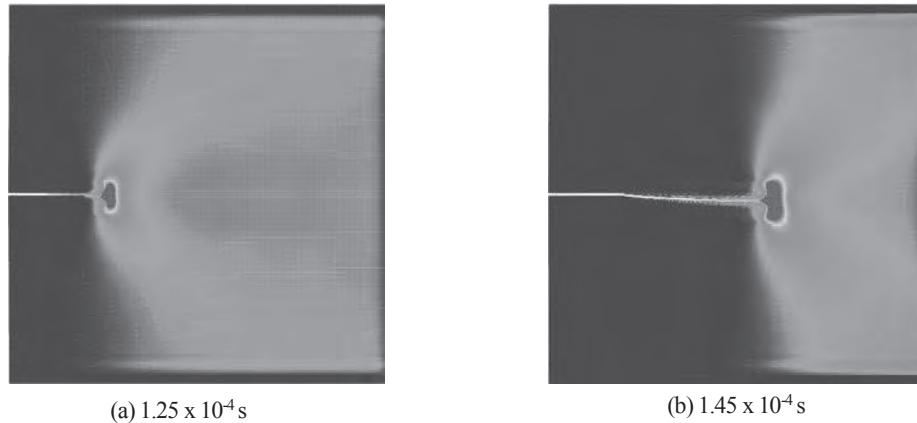


図1 弾性ひずみエネルギーの時間的変化

4. まとめと今後の課題

本年度の研究では、Peridynamics model による材料のき裂伝ば現象に関する数値解析手法を構築できた。今後は、高圧水素タンクの漏えい現象を解析する上で必要となる Euler FSI 連成解析モデルの構築を行い、き裂伝ばに伴う水素漏えいに関するシミュレーションを実施する。

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] Jun Ishimoto, Toshinori Sato and Alain Combescure: FSI Approach of Hydrogen Leakage Problems with Crack Propagation, *Proceedings of the TFC ELyT Workshop 2016*, Miyagi Zao Royal Hotel, Japan, (2016), [in USB memory].

*[2] Jun Ishimoto and Alain Combescure: Coupled Analysis of High-Density Hydrogen Safety Management, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 12-13.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J16012
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

火災旋風のリスク軽減化に関する混相流体力学的アプローチ
Multiphase Fluid Dynamic Approach for Fire Whirl Risk Mitigation

石本 淳[†], Kozo Saito^{**††}, Michael Winter^{**}

*東北大学流体科学研究所, **IR4TD, University of Kentucky, USA

[†]申請者, ^{††}所外対応研究者

1. 研究目的

震災等により都市に発生する火災旋風の挙動は通常の竜巻とは比較にならないほど人的・物理的に多大な被害を及ぼす。本研究は、従来から未解明であった可燃物を含む各種構造体を巻き込んで形成される火災旋風の形成メカニズムの混相流体力学的解明と、新しい火災リスクマネジメント科学の創成を目的とした以下の研究を行う。(1) 可燃物が混入した火災旋風に関する混相流体解析モデリングならびにスケールモデリングを行う。(2) 可燃構造体の着火・巻き上がり挙動と旋回流の相互作用を考慮に入れた反応化学連成シミュレーションを行い、可燃物の燃え広がり挙動と火災旋風の発達・移動に関する連成解析手法を確立する。(3) 小スケールの混相旋回流模擬実験を行いモデルの妥当性を検証する。火災旋風の防止ならびに発生した場合の消火法等に関する新しい火災リスクマネジメント方に関するシミュレーション技術を確立する。

2. 研究成果の内容

小スケールの竜巻発生装置(図 1)を用い、オイルミストを気流に乗るトレーサ粒子と想定して可視化し、粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry, PIV)解析を行った。図 2 は各断面での流速の PIV 解析画像を示す。反時計まわりの渦が形成されており、中心付近の速度が速いことがわかる。また、基準位置から位置が高くなるにつれて高流速領域が増加しており、発生させた竜巻が自然界の竜巻と同様のすり鉢形状を形成することを示している。この高速度領域は、形成されたすり鉢状竜巻のコーン縁部(外郭部)に相当している。また、渦の中心は常にダクト中心軸に沿って存在するわけではなくダクトの軸から乖離しており、発生させた竜巻がうねりながら形成されていることを確認した。以上より本実験において発生させた竜巻は自然界における竜巻を模擬しているといえる。

3. 研究目標の達成状況

達成度は 80%である。混相竜巻の流動特性を解析する上で必要となる小スケール竜巻生成模擬試験装置を設計・製作し旋回流動特性に関する PIV 計測手法を確立した。本試験装置は上部にあるファンで吸い込むことによって 4 箇所ある開口から空気が流れ込み、旋回流が生じることによって竜巻が発生する仕組みである。竜巻の発生空間は開口のある直方体形状の下部旋回収束領域と円筒形状の対流領域によって構成されている。

4. まとめと今後の課題

可燃物が混入した火災旋風の発生メカニズムと内部燃焼構造に関する数値予測が可能となった。また、火災旋風の防止、可燃物の巻き込み発生時における避難に必要となるリスク管理技術が確立される。さらに火災旋風の新型消火技術に関わる減災システムの創成が可能となる。

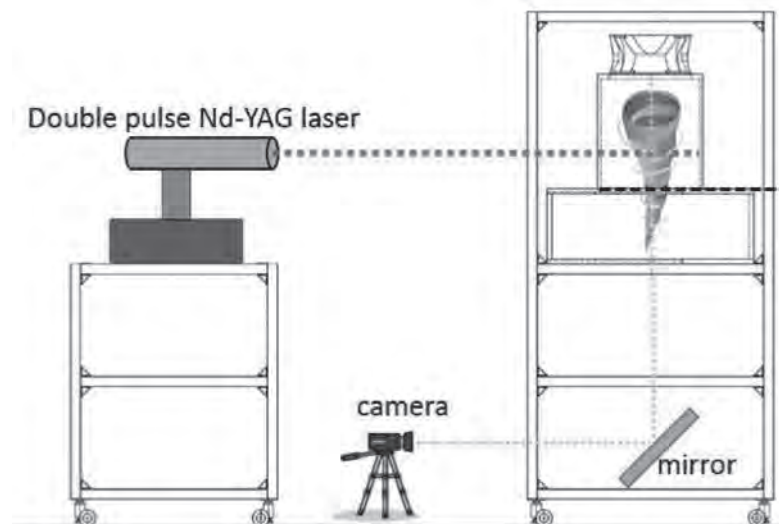


Fig.1 Experimental procedure

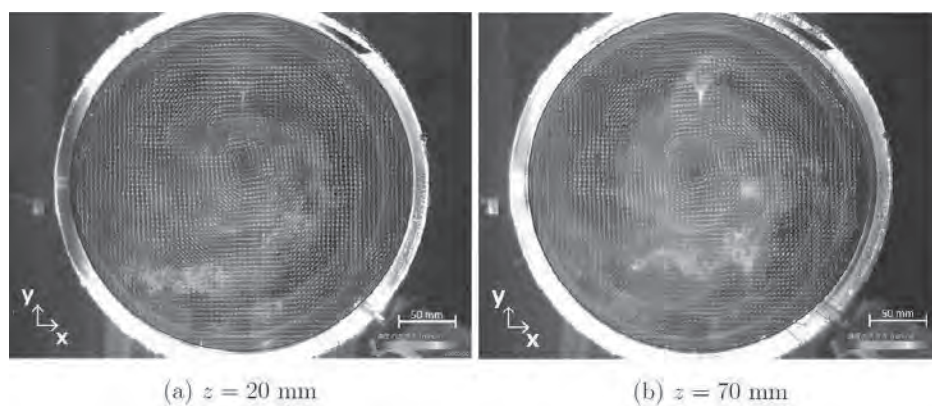


Fig.2 Experimental results of z-axis cross-sectional velocity profile in different vertical location obtained by PIV measurement

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] Jun Ishimoto and Kozo Saito: Multiphase Fluid Dynamic Approach for Fire Whirl Risk Mitigation, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 14-15.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J16013
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

微小循環系における血球挙動の数値解析ならびに実験観察
Numerical Simulation and Experimental Observation
of the Blood Cells Behavior in Microcirculation

福井 智宏*†, 早瀬 敏幸**††

船本 健一***, 北川 石英*, 川口 美沙*

*京都工芸繊維大学機械工学系, **東北大学流体科学研究所

***東北大学学際科学フロンティア研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

微細流路内における分散体の挙動やレオロジーを知ることは、工学や医学等の分野において重要である。微粒子を含むサスペンションの実効粘度は、アインシュタインの粘度式から簡易的に見積もることも可能であるが、高濃度のサスペンションや高レイノルズ数の力学環境下においては、同式を適用できない等の制限もある。また、同式からは実効粘度の空間分布を知ること也不可能である。本研究では、微細流路内におけるミクロな粒子挙動がマクロな流体のレオロジーに与える影響を考察するために、2次元平行平板間を流下する微粒子の数値解析を行い、壁面せん断応力の空間分布から、サスペンションの実効粘度の空間的な変化を考察した。

2. 研究成果の内容

図1に、面積分率=25.13%、レイノルズ数=1における、微細流路内の微粒子の移流に伴う渦度分布（上）と相対粘度の空間変化（下）を示す。渦度分布図は流路の下壁面近傍の拡大図である。微粒子は流下すると同時に回転運動も行っており、これが流路内の渦度分布に大きな影響を与えていることが確認できた。相対粘度は、サスペンションの実効粘度 η_{eff} を粒子を含まない流体の粘度 η_0 で除すことにより定義しており、壁面せん断応力から推定される相対粘度の平均値ならびに標準偏差は 1.511 ± 0.281 （平均 \pm SD）と求まった。

相対粘度の平均値は、アインシュタインの粘度式から推定される値（ $=1.503$ ）と良く一致した。相対粘度の空間変動は予想以上に大きく、粒子を含むサスペンションのレオロジーの複雑さを確認することができ

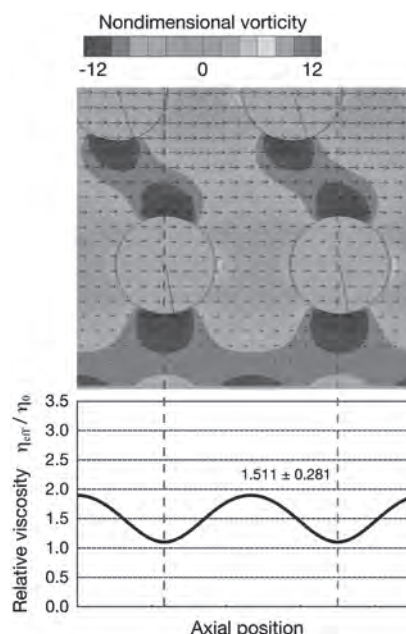


図1：微細流路内における微粒子の移流に伴う渦度分布(上)と相対粘度の空間変化(下)。

た．相対粘度の空間的な最低値と微粒子の位置関係を確認するために，図中に赤破線を示した．これにより，微粒子が壁面近傍を通過する際に，相対粘度が最も低くなっていることが分かる．これは，微粒子の回転運動（この場合，下壁面近傍であるため，微粒子は時計回りに回転している）により，壁面と微粒子の間の相対速度が低くなったためであると考えられる．微粒子の回転速度は，微粒子の流路内の半径方向位置に大きく依存する（流路の中央付近を流下する粒子は無回転であるのに対し，壁面近傍の粒子は回転運動が顕著である）ことから，サスペンションの実効粘度は，微粒子の濃度のみならず，微粒子の流路内の空間分布にも大きく依存する可能性が考えられた．

3. 研究目標の達成状況

本研究では，微小空間での分散体の挙動を解析するための数値的手法ならびに実験解析手法の開発を進めると共に，物質輸送や心血管系疾患の発症・進展に関わる生体力学的要因の解明を目指してきた．このような目標に対し，分散体の挙動の数値解析を可能とするアルゴリズムや高効率な並列計算のためのスキームの開発を進め，two-way coupling による微粒子流下の連成解析を行った．また，従来のアインシュタインの粘度式からは推定することが出来なかった，実効粘度の空間分布と微粒子の運動との関連性の考察をしてきた．一方で，これらの実験的な観察や，医工学への展開へは今後の課題として残っており，今年度の達成度としては 70 点程度であると考ええる．

4. まとめと今後の課題

本研究により，サスペンションの実効粘度は，微粒子の挙動に大きく影響を受けることを確認した．今後は，微粒子の空間分布や大きさ，形状等が，マクロな流体の実効粘度に与える影響を実験的観察と共に調べ，微小循環系において観察される赤血球の複雑な挙動（連銭，軸集中等）が血液レオロジーに与える影響を考察する．

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] T. Fukui, M. Kawaguchi, A. Kitagawa, K. Funamoto, and T. Hayase: Computational and Experimental Studies on the Blood Cells Behavior in Microcirculation, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 82-83.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16014
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	2016.4～2017.3
継続年数	1年目

ナノ構造体を用いた多機能特性の発現とその応用に関する研究
Research of Highly Functional Characteristics
Produced by Nanostructures and Their Applications

高橋 庸夫*†, 寒川 誠二**††, 曹 民圭*, 内田 貴史*

大野 武雄***, 久保田 智広**, 野田 周一****

*北海道大学情報科学研究科, **東北大学流体科学研究所

東北大学原子分子高等研究機構, *東北大学工学研究科

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

東北大が持つ低損傷の中性粒子ビームエッチングを用いたナノドットクアレイ（円盤状シリコンナノ構造が2次元的に規則配置した構造）や抵抗変化メモリ（ReRAM）の作製技術と、北海道大学が持つ量子効果デバイスやReRAMに関する評価技術を融合し、これらのデバイスの特性を活かした従来にない低消費電力で、高集積化と高速動作が可能なデバイスの構築を目指す。

2. 研究成果の内容

Siのナノドットをアレイ状に配置し、その上に制御ゲートを多数取り付けると、図1の右図のようになる。各ナノドットは単電子トランジスタ（SET）として動作することでコンダクタンスがゲート電圧の変化に対して振動する現象を示す。加えて各ドットは複数のゲートと容量的に結合するので、各ゲート電圧の変化に対して複雑な特性変化を示すことになる。ここで提案している素子は通常の集積回路のように、目的とする論理を実現できるように設計し作製するものではなく、作製後に求める論理機能を探索して実現するものである。素子の微細化に伴い、揺らぎを押さえ込むために苦心した挙動にリーク電流などを押さえ込めずに消費電力の増大を招く素子を目指すのではなく、逆にドットサイズの揺らぎやゲート位置のずれなどがあっても動作する、きわめて冗長性の高い回路の実現を目指すものである。

この構成を実現するためには、一部のゲートを機能を決定する制御ゲートとして用いる必要があり、また同時に各種の機能を得るために学習して得られた各制御ゲートに印加する電圧値を記憶しておく必要がある。この電圧値はアナログ値になるので、効果的にこの値を記憶するアナログメモリが必要になる。このメモリとしてReRAMを用いることで、論理機能可変ナノドットアレイ素子の実証を行った。

ReRAMのアナログ抵抗特性制御は、共同研究で作製したMOSFETによる電流制御により行うことで、抵抗値の制御の精度として±1%以内に抑えることができることが判明した。図2左図は、ナノドットアレイ上に2つの入力ゲートと1つの制御ゲートを形成し、制御ゲート電圧を変化させたときの出力抵抗値を基に、2入力論理関数（AND, OR, XOR・・・の6種）の変化を評価したものである。制御ゲート電圧が有限な範囲の幅を持つことがわかり、

この電圧を ReRAM の抵抗値から再現することを考えると、各基本論理ゲートのマージンは図 2 右の表のようになる。この結果は、ReRAM の抵抗の精度より十分大きいマージンが得られていることを示し、論理記憶機能素子として ReRAM が使えること結論付けている。

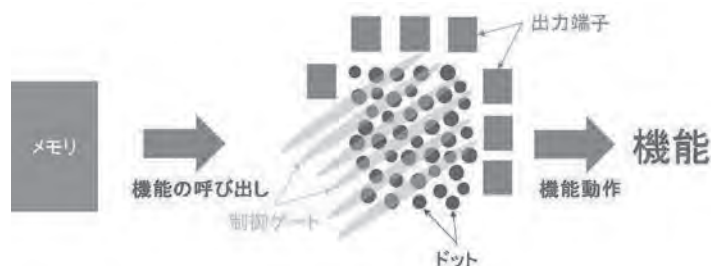


図 1：ナノドットアレイにゲートを配置した論理機能可変素子

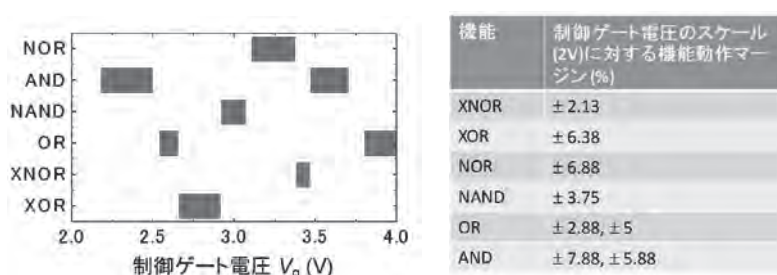


図 2：作製したナノドットアレイ素子の制御ゲート電圧による論理機能変化と各機能のマージン

3. 研究目標の達成状況

共同研究が効果的に作用して、ナノドットアレイ素子作製とアナログ可変抵抗の ReRAM の実現に漕ぎ着け、その結果として制御ゲートによる 6 種の最重要論理関数全てを ReRAM の抵抗制御精度の範囲で実現できることを成功裏に示すことができた。紙面の制限で書けなかったが、寒川研究室で作製した TaOx 極薄膜を用いた ReRAM の動作の TEM 内その場観察の検討もサンプル作製まで進み、TEM 観察を待つ段階にあり、今後の進展が期待できる。

4. まとめと今後の課題

ReRAM のアナログメモリ特性は、ニューラルネット素子としての新たな機能分野を構築しようとしており、ナノドットアレイと併せて、寒川研究室と共同して進めていく。ReRAM は材料や作成条件などによっても特性が異なることから、共同して広範に検討していく。

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] T. Uchida, M. Jo, A. T-Fukuchi, M. Arita, A. Fujiwara, and Y. Takahashi: Capacitance evaluation of compact silicon triple quantum dots by simultaneous gate voltage sweeping, *Journal of Applied Physics*, Vol. 120, No. 23, (2016) 234502-1-6.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] Mi. Jo, R. Katsumura, A. T-Fukuchi, M. Arita, Y. Takahashi, H. Andoh, and T. Morie: Analog memory characteristics of 1T1R MoOx resistive random access memory, *2016 Silicon Nanoelectronics Workshop*, Honolulu, Hawaii (2016), pp. 78-79.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J16015
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー
研究期間	2016.4~2017.3
継続年数	1 年目

量子ナノディスクのバンド構造制御とデバイス応用
Control of Electronic Band Structure of Quantum Nanodisks for High-Efficiency
Solar Cells and Laser Applications

福山 敦彦^{*†}, 寒川 誠二^{**††}
大堀 大介^{*}, 碓 哲雄^{*}, 久保田 智宏^{**}, 岡田 健^{**}, 肥後 昭男^{***}
^{*}宮崎大学工学教育研究部, ^{**}東北大学流体科学研究所
^{***}東北大学原子分子材料科学高等研究機構
[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

これまでの研究で, GaAs-NDs アレイおよび母結晶再成長前の GaAs ナノピラー構造(以下, NPs)からの発光信号を同定した. 特に NPs からの発光信号は初めて観測された成果である. アスペクト比の高い NP は表面積が大きくなるため, 光吸収および発光効率が向上すると考えられ, デバイス応用の際に有利である. 本年度は高品質な GaAs-NPs を作製し, NP の直径分布を走査型電子顕微鏡(SEM)観察から算出し, フォトルミネッセンス(PL)法で検出した発光スペクトルと比較することで, NP の直径分布の影響を調べた.

GaAs-NPs は流体研が所有するトップダウンプロセスを用いて以下のように作成した. まず, ともに 12 nm の GaAs 井戸層と $\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 障壁層から成る量子井戸(MQW)を n-GaAs 基板上に成膜した. 次にバイオテンプレートと中性子ビームによりエッチングを行い, GaAs-NPs 試料を作製した. SEM 観察と PL 測定は宮崎大学で実施した. 図 2 に SEM 観察から算出した直径分布を示す. 図から明らかなように, 直径 18 nm の GaAs-NP が最も多く存在したが, 直径は 8 から 40 nm と幅広く分布を持っていることが分かった. 直径の大きな NP は, 複数の NP が集合して形成された可能性が高い. また, 室温で得られた発光スペクトルを図 2 中の実線に示す. 約 1.55 eV の AlGaAs 起因の発光ピークより高エネルギー側に幅広い裾を引くスペクトルが得られた. そこで図 1 の直径分布を用いて, NP の発光強度の直径依存性を三次元有限差分法によって求めた. 図 2 には計算された発光強度のヒストグラムを併せてプロットしたが, 図から明らかなように実験で得られた PL スペクトルと形状が非常によく一致した. 以上の解析から 1.55 から 1.75 eV の広範囲の発光スペクトルが GaAs-NP 起因の発光信号であると同定することができた.

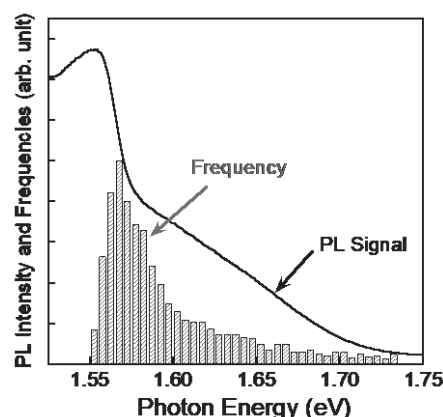
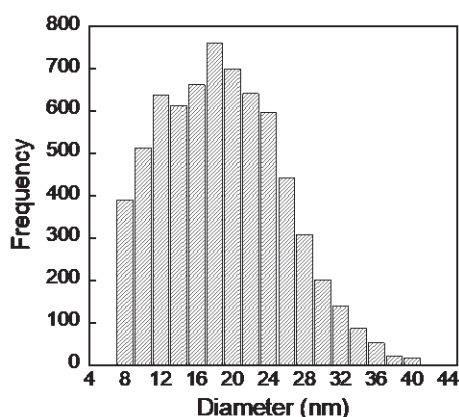


図 1：SEM 観察から算出した NP の直径分布 図 2：発光スペクトルと直径依存性の比較

3. 研究目標の達成状況

今年度は太陽電池や発光デバイスの要素的材料として期待できる GaAs-NPs を用意し、NP の直径分布と発光スペクトル形状を比較検討した。室温で得られた幅広い発光スペクトルは NP の直径分布によって説明できることを明らかにした。ただし、直径分布のばらつきにつながる成長条件の特定には至らなかったことから、達成度は 8 割と判断する。

4. まとめと今後の課題

GaAs-NPs 起因の発光スペクトルを初めて観測し、その幅広いスペクトルは NP の直径分布に起因することを明らかにした。今後は GaAs-NPs の作製条件を精査し、直径分布が少ない NPs を作製するために継続して共同研究を実施する。

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）なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] D. Ohori, K. Kondo, K. Sakai, C. Thomas, A. Higo, S. Samukawa, T. Ikari, A. Fukuyama: Effect of embedding process on photoluminescence spectra of GaAs quantum nanodisks fabricated by bio-template and neutral beam etching process, *E-MRS Spring Meeting*, (2016), MIII-3.

[2] D. Ohori, K. Kondo, K. Sakai, A. Higo, C. Thomas, S. Samukawa, T. Ikari and A. Fukuyama: Photoluminescence emission from As-etched quantum nanodisks fabricated by bio-template and neutral beam etching process, *16th Int. Conf. on Nanotechnology*, Sendai, (2016), TuPM15.2.

[3] 大堀大介, トーマス セドリック, 肥後昭男, 寒川誠二, 碓哲雄, 福山敦彦: ナバイオテンプレート極限加工を用いた GaAs 量子ナノディスクの発光再結合の温度依存性, 平成 28 年秋季第 77 回応用物理学会学術講演会, (2016), 16a-P1-11.

*[4] A. Iwamoto, D. Ohori, C. Thomas, A. Higo, S. Samukawa, T. Ikari, A. Fukuyama: Radiative carrier recombination process in GaAs ND fabricated by bio-template and neutral beam etching embedded by AlGaAs, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 16-17.

[5] T. Ikari, D. Ohori, A. Higo, C. Thomas, S. Samuakwa, K. Nishioka, A. Fukuyama: Investigation of carrier recombination process in top-down fabricated GaAs nano-disc array structure by photoluminescence measurements, *IEEE NMDC*, Toulouse, France, (2016), M3-2.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）なし

課題番号	J16016
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

微分位相構造に基づく後方乱気流の多感覚呈示
Topology-Based Multisensory Realization of Wake Turbulence

竹島 由里子^{*†}, 大林 茂^{**††}, 三坂 孝志^{***}

^{*}東京工科大学メディア学部, ^{**}東北大学流体科学研究所

^{***}東北大学学際フロンティア研究所

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

現在, 数値計算結果の解析には主に可視化が利用されている. しかし, 人間が視覚から同時に把握できる情報量には限界があるため, 色や不透明度, 使用する可視化技術を組み合わせたとしても, 高々数個の変数しか表すことができない. 複雑な現象を解明するための数値解析では, 複数個の変数の関係を同時に解析する必要がある場合も多く, 可視化だけでデータ全体を表現することは困難である. そこで本研究では, 航空機翼後方にできる後方乱気流の数値計算データを対象とし, 可視化だけでなく力覚化や聴覚化などの多感覚を用いて直感的にデータを解析する方法についての研究を行う. 可視化や力覚化では数値データをどのように色や形, 力に変換するかという伝達関数の設計が重要になってくる. 従来法では, 試行錯誤的にユーザが決定していたが, その場合, 解析結果が適切に呈示されるかどうかはユーザの技量に大きく依存してしまう. そこで, 本研究では, 対象データをあらかじめ解析することにより, その特徴を考慮して半自動的に伝達関数を設計する方法を提案する. 特徴としては, データ全体の大局的な情報および局所的な情報を抽出可能な微分位相構造に着目する. これにより, 個々のユーザの技量によらず, 特徴がある領域を強調した可視化結果を表示しながら, 力覚を用いて関連する変数の分布を感覚的に把握することが可能になる.

2. 研究成果の内容

本研究では, 伝達関数設計のため, 事前に対象データの微分位相構造を抽出しておく必要がある. しかし, 複雑な流れ場やノイズを多く含むデータでは, 多数の臨界点が抽出されてしまうため, 臨界点の単純化が必要不可欠である. 今回対象とする後方乱気流データは, 時系列データであり, 流れが複雑になるにつれ, 抽出される臨界点の数も増えてしまう. そこで, 本研究では, 臨界点に関連する位相変化が起こる領域が狭いもの, および, 臨界点の値が周囲とあまり差がないものを統合していくことにより, 臨界点の数を高々10個に制限した. 次に, 抽出した位相構造に基づき, 可視化を行う. 今回は, 圧力場を可視化対象とし, ボリュームレンダリングを用い, 位相構造が変化する値の不透明度を高くして強調表示を行った. 力覚化では, 速度場に沿ってスタイラスを動かすような伝達関数を用いた. なお, デバイスには, 3自由度の汎用力覚デバイスである GeomagicTouch を用いた. 図1に圧力場の可視化結果と速度場の流線を示す. 時刻固定の場合は, スタイラスは流線に沿って移動する. 時間変化を伴った表示を行う場合には, スタイラスの軌跡は流跡線となる. 力覚自体を紙面で示すことは困難であるため, 今回はその軌跡を可視化して掲載した. 実際の画面上では, 流線は表示されない.

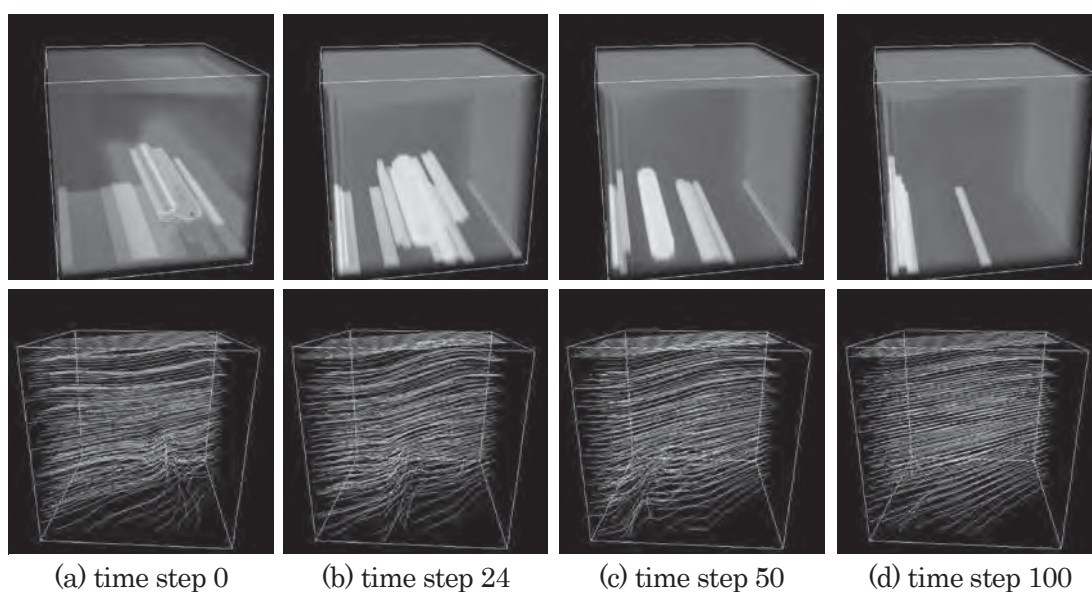


図 1：圧力場のボリュームレンダリング結果および流線

3. 研究目標の達成状況

人間の力覚がもつ精度が低いため、複雑な情報を近くできないため、力覚にマッピングする場を適切に選ぶ必要がある。今回は、スタイラスの移動という比較的分かりやすい機能を用いたため、速度場を力覚で表現した。今回、デバイスとして 3 自由度の力覚装置を用いたが、6 自由度の力覚装置への応用は容易である。研究目標である、可視化と力覚化を用いた多変量の多感覚呈示は実現できており、可視化だけを利用した場合に比べて、直感的な解析が可能となった。

4. まとめと今後の課題

昨年度の課題であった、力覚にマッピングする場の選択や、可視化と力覚化に異なるデータ成分を与えて、両方のデータを直感的に認識することは可能になった。今回用いた後方乱気流データは、サイズが小さいものであったが、大規模データや複雑なデータに対応するためには、微分位相構造抽出プログラムの改良が必要である。また、複雑なデータにおける多感覚呈示の効果についても懸賞が必要である。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Y. Takeshima and I. Fujishiro: Multisensory Realization Using Topology-Accentuated Visualization, *Proc. The 5th IEEEJ International Workshop on Image Electronics and Visual Computing*, Da Nang, Vietnam, February, (2017).

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16017
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

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

高山 哲生*†, 小助川 博之**††, 高木 敏行**

*山形大学大学院有機材料システム研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年, CFRP の非破壊検査として渦電流探傷試験法 (ECT) が研究されている. ECT は非接触方式であり, CFRP の欠陥を超音波検査法より早期に検出することができる. しかし, CFRP は金属に比べて導電率が低いので, この方法により CFRP の欠陥を検出するのが困難である.

高木らの研究グループでは CFRP の電磁物性の制御により, ECT による CFRP の欠陥検出能を向上させることを検討している. 具体的には, マトリックス中に磁性を有するナノ粒子を分散させることにより, CFRP の電磁気特性の改善が検討されている.

一方, CFRP は常に曲げ強度や弾性率などの機械的特性を必要とするため, ナノサイズのフィラー分散が CFRP の機械的特性に及ぼす影響を特定する必要がある. 高山らの研究グループでは, 不連続繊維強化熱可塑性プラスチックの機械的特性を極小粒子分散により改善できることを実験的に見出し, そのメカニズムについて理論を提案し解析することに成功している. 本研究では, 極小粒子が分散した CFRP を試作して機械的特性を実験的に評価し, 得られた結果を高山らが提案した理論に基づいて解析を行なうことで, CFRP の機械的特性に及ぼすナノサイズのフィラー分散の影響を解明することを目的とした.

2. 研究成果の内容

【実験方法】: ナノフィラーを含む CFRP は, 真空含浸工法 (VaRTM) によって調製した. 本研究では, メディアン径 250 nm および 90 nm の酸化チタン (TiO_2) 粒子をフィラーとして使用した. 一方向炭素繊維 (東レ (株) 製 UT70-60S) は [0/90/0] 方向に積層され, そして自転公転ミキサを用いて 4wt% のナノフィラーを分散させたエポキシ混合物 (TB2023 / TB2131D, スリーボンド社製) をプリフォームに含浸させた. 樹脂を含浸した布地を 100°C, 2 時間の条件にてオーブンで硬化させ, 室温まで冷却した.

硬化したナノ粒子充填 CFRP 試験片の機械的特性を, JIS K7074 に従った 3 点曲げ試験によって評価した. CFRP 試験片を 100×15 mm² に切断し, 上部および下部積層体の繊維方向を長軸方向とした. 両方の支持点間の距離は 80 mm とし, 試験速度は 5 mm/min とした. 3 点曲げ試験により得られた応力-ひずみ曲線から曲げ強さおよび曲げ弾性率を算出した.

【結果】: 3 点曲げ試験で得られた曲げ応力および曲げひずみ曲線を図 1 に示す. 全ての試料は約 1.0% の曲げひずみで破断した. 曲げ弾性率および曲げ強さは, ナノ粒子分散によって増加した.

これらの効果は, 繊維とナノ粒子の粒子間距離から考察される. ナノ粒子の直径は繊維の直

径よりはるかに小さいので、ナノ粒子の分散によって充填材間の距離は近づくことになる。したがって、ナノ粒子が均一に分散していると仮定すると、CFRPの横方向の弾性率 E_{90} が増加し、ナノ粒子の直径が小さくなるほど充填材間の距離がより近くなるために効果が高くなることになる。このような効果により、CFRPの曲げ弾性率が上昇すると考えられる。

上記のメカニズムを基に、高山らが提案した理論を用いて曲げ弾性率の推定を行った。その結果を表1に示す。ここで、 E は曲げ弾性率を、表中の添え字の0と90は繊維の積層方向を指す。また、成形品は[0/90/0]方向に積層されているため、積層理論を用いて曲げ弾性率は下記の式(1)を使用して計算した。

$$EI = 2E_0I_0 + 2E_0A_0h^2 + E_{90}I_{90} \quad (1)$$

I は断面2次モーメントを、 h は層の厚さを意味する。計算した結果は実験結果をよく再現しており、ナノ粒子分散CFRPの弾性率が理論によって説明できたといえる。

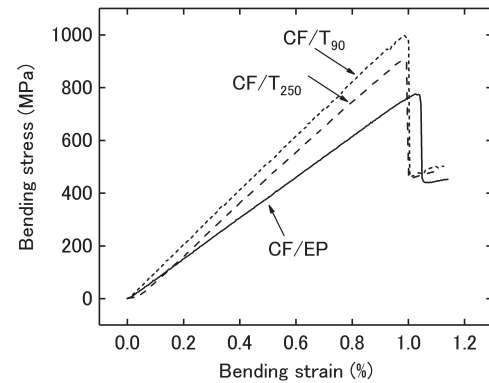


図1 ナノ粒子分散CFRPの応力ひずみ曲線

表1 ナノ粒子分散CFRPの曲げ弾性率と分散させたナノ粒子の諸元

Specimen	D_{50} of particles (nm)	Particle	E_0 (GPa)	E_{90} (GPa)	E (GPa)
CF/T ₂₅₀	250	TiO ₂	93.7	9.1	90.6
CF/T ₉₀	90	TiO ₂	104.7	25.9	101.7
CF/EP	N/A	N/A	85.4	20.1	82.8

3. 研究目標の達成状況

本研究期間ではナノ粒子分散によるCFRPの力学特性向上効果について解明できた。申請段階では、さらにナノ粒子分散効果の最適化までを行うこととしており、このために最適化に必要な理論構築までを達成できた。

4. まとめと今後の課題

本研究期間ではナノ粒子分散によるCFRPの力学特性向上効果について、高山らが提案する理論を使用することで解明した。今後は今回の知見を踏まえて、ナノ粒子分散効果の最適化設計を行う予定である。

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・口頭発表等

*[1] T. Takayama, H. Kosukegawa and T. Takagi: Functionality Improvement of Nanoparticulate-filled Carbon Fiber Reinforced Plastic, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 20-21

- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）
なし

課題番号	J16018
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	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の検査、補修、リサイクルに関わる研究会 Seminar for Inspection, Repair, and Recycle of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)

高木 敏行[†], 小助川 博之^{*}

伊藤 浩志^{**††}, 工藤 素^{***}, 藤嶋 基^{***}, 菊池 時雄^{****}, 飯田 敬子^{*****}, 菅野 英樹^{*****}
玉川 修一^{*****}, 久田 哲弥^{*****}, 佐藤 勲征^{*****}, 浦 啓祐^{*****}

^{*}東北大学流体科学研究所, ^{**}山形大学大学院有機材料システム研究科

^{***}秋田県産業技術センター, ^{****}福島県ハイテクプラザ, ^{*****}青森県産業技術センター八戸地域研究所, ^{*****}宮城県経済商工観光部, ^{*****}宮城県産業技術総合センター

[†]申請者, ^{††}所外対応研究者

1. 研究目的

本研究会では、東北域内に炭素繊維強化プラスチック(CFRP)に関して高いレベルの知見や技術を持つ東北6県の大学・企業・公設試からなるコンソーシアムを結成し、CFRPに関わる知識向上と課題抽出および解決を以って、東北の新産業育成を目指す。特にCFRPのライフサイクルにおける「検査・評価」「リサイクル」「修理」「二次加工」という要素技術に注目し、シーズ・ニーズの探索とマッチング、および産学官連携による共同研究開発を展開することを目的とする。

2. 研究成果の内容

平成28年度は、以下の2回の講演会を開催し、CFRPに関わる産業のニーズおよびシーズと、各地方自治体における産学官連携の取り組みについて調査を行った。また、講演会の他に5回の「検査・評価」分科会を行った。さらに、東北大学知のフォーラムの主催により、複合材料の検査技術に関する国際ワークショップを開催することができた。

(1) 第五回 CFRP 研究会講演会 ～複合材料関連産業の可能性について～

CFRPの工具開発に関する技術シーズとヘルスマonitoring技術のシーズについて調査をし、本研究会で目指すべき技術的な課題の抽出について議論をした。

日時：平成28年7月8日(金) 14:30 - 17:20

場所：東北大学 流体科学研究所 2号館5階 大講義室

参加者数：47名

講演：

「大型CFRP製治具・工具の開発とCFRP成形加工用新工場のご紹介」

丸隆工業株式会社

取締役 宮田 智弘 先生

「航空宇宙機における複合材料構造物のヘルスマonitoring」

東北大学大学院工学研究科

教授 福永 久雄 先生

(2) 第六回 CFRP 研究会講演会 ～水素化社会を支える複合材料について～

水素技術で利用される複合材料部品に関する技術的ニーズとレギュレーションについて幅広く調査し、東北域内の企業が参入できる市場について議論を行った。

日 時 : 平成 29 年 1 月 27 日 (金) 13:30~17:15

場 所 : 東北大学 知の館 3 階講義室

参加者数: 56 名

講 演

「電磁現象を利用した金属構造物の非破壊検査」

東北大学流体科学研究所

教授 内一 哲哉 先生

「水素ステーション用金属材料の選定基準化と CFRP を用いた複合圧力容器蓄圧器の技術基準化への取り組み」

(一財)石油エネルギー技術センター 自動車・新燃料部

水素利用推進室

室長 小林 拓 先生

「CFRP を用いた燃料電池自動車・水素ステーション用高圧水素ガスタンク」

JFE コンテナ株式会社 高圧ガス容器事業部

技監 高野 俊夫 先生

(3) TFC Workshop for Advanced Maintenance on Composite Materials

アメリカ, フランス, ドイツ, 日本の専門家を交え, 世界における CFRP を含む複合材料の非破壊検査技術の課題と動向について議論を行った.

日 時 : 平成 29 年 2 月 15 日(水) 13:30-17:40, 2 月 16 日(木) 10:00-15:30

場 所 : 東北大学 知の館 3 階講義室

参加者数: 41 名

講 演 :

「Eddy Current Testing for NDT of CFRP – Electromagnetic Numerical Analysis and Functionalization in Detectability –」 Hiroyuki Kosukegawa

他 7 件

3. 研究目標の達成状況

これまで行った 6 回の講演会と分科会、および技術調査会を通して、研究会に参画する東北域内の大学・企業・公設試が有する技術シーズをまとめた。特に「検査・評価」分科会においては、目標とするニーズを絞り込み、産学官連携の研究グループを構築した上で共同研究を開始するに至った。本共同研究の成果は、国際会議および国内会議で発表予定である。

4. まとめと今後の課題

本研究会は、平成 26 年 10 月に発足したものであり、これまでに 6 回の講演会と 3 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、共同研究が開始された。今後は、「補修」分野の開拓と知財の取得、産学官の共同研究を順次進める。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Global/Local Innovations for Next Generation Automobiles 2016, Sendai, (2016).

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

研究会講演会

[1] 第 5 回 CFRP 研究会講演会～複合材料関連産業の可能性について～, 平成 28 年 7 月 8 日

[2] 第 6 回 CFRP 研究会講演会～水素化社会を支える複合材料について～, 平成 29 年 1 月 27 日

課題番号	J16019
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	2016.4～2017.3
継続年数	1年目

氾濫流・津波の伝播解析における不確実性影響の高精度評価技術の確立 Efficient Uncertainty Quantification in Shallow Water Equations

山崎 渉^{*†}, 下山 幸治^{**††}, 加藤 達也^{*}, 大林 茂^{**}
^{*}長岡技術科学大学工学部, ^{**}東北大学流体科学研究所
[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

近年数値解析において不確実性を考慮し、不確かさを持つ入力の影響を含めた解析を行う不確実性解析技術が注目されている。数値解析は元来決定論的であるが、現実問題では初期条件の変動やモデルパラメータのばらつきなどにより、単純なノイズではない有意な変動、すなわち不確実性が生じうる。本研究で扱う津波氾濫流について言えば、初期条件の水深・流速分布や海底地形データなどを不確かな入力変数と考える事ができる。不確実性解析の実行により、これまで単純にスカラー値として得られていた任意の出力変数について、その平均・標準偏差・確率密度関数 (Probability Density Function, PDF) などを得ることができる。これにより、より高度な津波氾濫流の災害予測が可能になると考えられる事から、不確実性を考慮した津波氾濫流の数値シミュレーション技術を成熟させていくことには、安全工学的な側面から意義がある。本研究では、多項式カオス法 (Polynomial Chaos, PC) と呼ばれる不確実性解析手法について検討した。この手法では、不確実性の伝播を考慮できるように基礎支配方程式を拡張し、その拡張された支配方程式を直接解く事で、直接的な不確実性解析を実現する事が可能となるものである。本研究では、2次元浅水方程式に多項式カオス法を導入し、その基礎方程式を拡張した。開発した手法による不確実性解析結果を古典的なモンテカルロシミュレーション (MCS) 結果と比較することで、その妥当性及び有効性について検討した。

2. 研究成果の内容

本研究では開発した手法の妥当性を見る上で、基礎的なダム崩壊問題を扱った。200[m]×60[m]の解析空間を取り、初期条件としてその片側に水深 1[m]の静止流体が存在している。静止流体のない側には最大高さ H の滑らかなバンプ形状が地形として与えられている。解析を始めると静止流体はバンプの方向へ流れ始めていくことになる (図 1 左)。

このバンプの最大高さ H を平均 0.5[m]、標準偏差 0.1[m]の不確実性入力として考慮した、PC 及び 100 サンプルによる MCS の解析結果の可視化図を図 1 右側に示す。図 1 右側においては鉛直方向の座標で水面座標の平均値分布を、カラーバーでその標準偏差値分布を示している。バンプの最大高さ H に不確実性があるため、バンプ位置以降の領域において、不確実性が強く伝播している様子が確認でき、また両者の結果は定性的に一致している事が確認できる。更に、不確実性解析においては水深の PDF も得ることができるため、それを活用してこの時刻における浸水確率マップを作成して、図 2 に示した。バンプの背後領域はバンプの存在により浸水確率が低下する事が予想されるが、その効果を正しく予測できている事がわかる。解析

コストについて言及すると、通常の汎濫流解析の解析コストを 1 とするとき、MCS は 100 サンプルを用いているため、解析コストは 100 となる。一方 PC での解析コストは 5 程度であり、多項式カオス法の適用により、高精度の不確実性解析が低コストに実現できていることが確認できた。

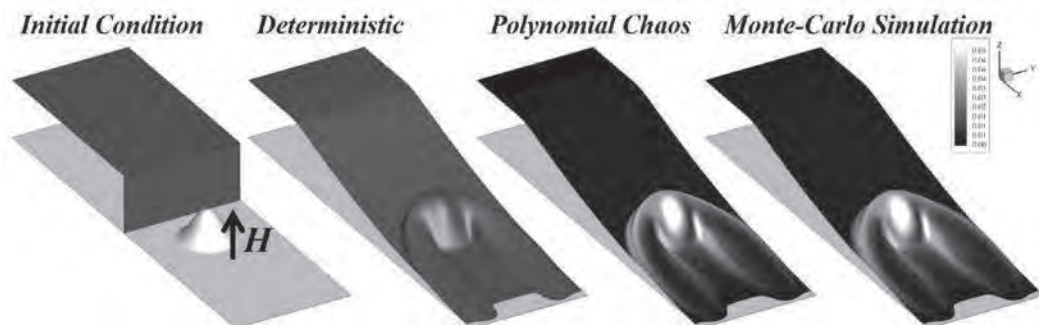


図 1：不確実性解析結果の可視化図

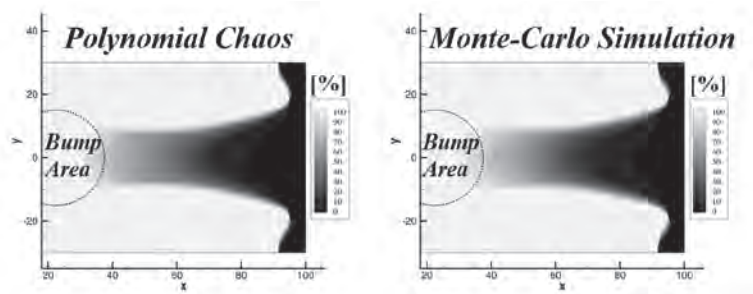


図 2：浸水確率ハザードマップの可視化図

3. 研究目標の達成状況

当初の予想される成果、として「任意の位置における不確かさメトリクスが評価できるため、津波浸水の確率などを考慮した高度なハザードマップの作製が効率的にできるようになることが期待される」としていたが、実際に上記の通り、確率的な指標を含むハザードマップ作成が効率的にできる事が示されており、当初の研究目標としては十分に達成された状況にある。

4. まとめと今後の課題

本研究では、二次元浅水流方程式を用いた津波汎濫流解析に多項式カオス法を導入し、効率的な不確実性解析を実現できる手法を開発した。PC による結果は古典的な MCS の結果と十分に一致しており、解析コストは MCS に比べ非常に小さいことから、高精度・低コストな不確実性解析を実現できたと言える。今後は、開発手法をより実用的な問題設定に適用していき、確率的な指標を含む有益なハザードマップを作製できるように拡張していく事を目指す。

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] W. Yamazaki, T. Kato, K. Hanazaki, K. Shimoyama, S. Obayashi: Uncertainty Quantification in Shallow Water Waves via Polynomial Chaos Approach, *Proceedings of the 16th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016).

*[2] 山崎渉, 加藤達也, 下山幸治, 大林茂: 津波汎濫流解析における不確実性の考慮, 日本機械学会北陸信越支部第 54 期総会・講演会 (2017).

- 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）なし

課題番号	J16020
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

マッハ1 近傍の流れの非定常性の研究
Study of the Unsteady Flow at Near Mach Number 1.0

菊池 崇将^{*†}, 大谷 清伸^{**††}

*日本大学理工学部, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

定常流れでの鈍頭物体周りの衝撃波離脱距離は、物体の大きさと流れのマッハ数に依存して一意に定まり、マッハ数が 1.0 に近づくにつれ増大し、マッハ 1.0 で無限大に発散する。しかしマッハ 1.0 の定常流れは自然界には存在せず、マッハ 1.0 近傍は非定常性の高い速度領域である。この非定常性のため、現実のマッハ 1.0 近傍での衝撃波離脱距離は無限大に発散せず、見かけ上有限の衝撃波離脱距離になると考えられる。衝撃波離脱距離は物体の密度に依存しないため、物体の密度が異なる場合でも衝撃波離脱距離は等しくなるはずである。また、自由飛行する物体の密度が異なる場合、物体の減速率は密度に依存して変化する。したがって、同じ速度で飛行する密度の異なる物体周りの衝撃波離脱距離の違いは、物体の減速率に対応した流れの非定常性のみの影響を受ける。すなわち、衝撃波離脱距離から流れの非定常性を評価できると考えられる。本研究の目的は、音速近傍の速度域で減速しながら飛行する物体の非定常な衝撃波離脱距離と物体の減速率の関係を明らかにすることで、音速近傍流れの解明を目指すものである。

2. 研究成果の内容

昨年度に引き続き、衝撃波関連施設に設置された弾道飛行装置を用いて、直径 7.93mm の球を射出し、自由飛行させ、球の衝撃波離脱距離を可視化計測した。計測にハイスピードビデオカメラを使用し、連続写真を取得した。球の材質をアルミ(密度: 2.7 g/cm³)とジュロン(密度: 1.41 g/cm³)の 2 種類選択することで、球の減速率を変化させた。

非定常流れの衝撃波離脱距離のモデルを構築した。モデルの詳細を以下に示す。自由飛行する物体から発生した微小擾乱が離脱衝撃波に到達した瞬間、衝撃波離脱距離は物体の飛行マッハ数に応じた値になる。微小擾乱は、物体と離脱衝撃波間を相対的に音速で伝播するため、伝播には有限時間を要する。このため、物体の速度変動が衝撃波離脱距離へ反映されるまで時間遅れ T が存在する。時間遅れ T の間に、飛行体の速度は ΔU だけ減少し、衝撃波離脱距離は減速に対応した距離 ε だけ増加する。弾道飛行装置実験で得られる衝撃波離脱距離のプロットは以下のグラフになる。ここでは U_0 , a , δ , d は、それぞれ減速前の飛行体速度、音速、定常流れでの衝撃波離脱距離、物体の大きさである。

$$(U_0 - \Delta U)/a \quad \text{vs} \quad (\delta + \varepsilon)/d$$

過去の定常流れでの球周りの衝撃波離脱距離計測実験報告を用いて、定常流れの衝撃波離脱距離の実験式を作成し、実験式に対して非定常流れでの衝撃波離脱距離のモデルを適用した。本共同研究で実施した弾道飛行装置実験結果と、非定常流れでの衝撃波離脱距離のモデルを比較した。アルミニウム球とジュラコン球周りの衝撃波離脱距離について、実験とモデルの比較を図 1 に示す。値にズレが残っているが、定性的に良い一致を得た。

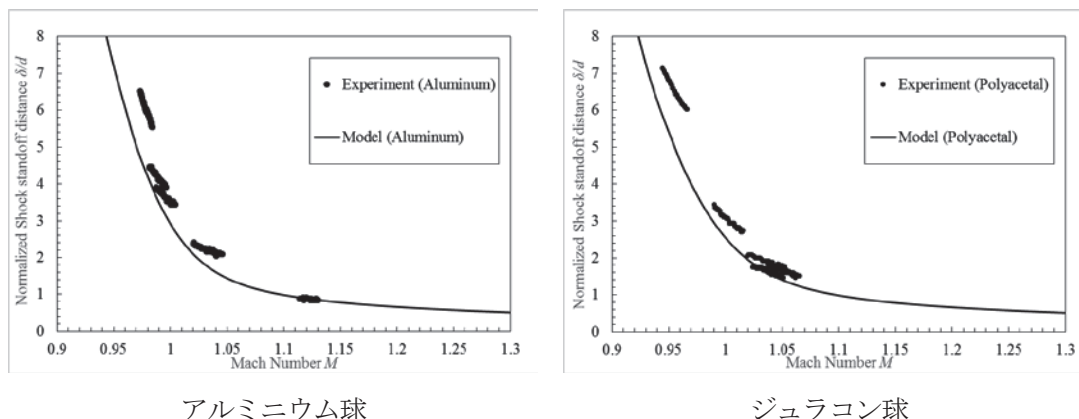


図 1：球周りの非定常流れでの衝撃波離脱距離の実験とモデルの比較

3. 研究目標の達成状況

研究目標は、衝撃波離脱距離に流れの非定常性を考慮した関係式へ発展させることである。本年度は、非定常流れの衝撃波離脱距離のモデルを構築し、実験結果との比較によりモデルの妥当性を評価することが目標である。非定常流れの衝撃波離脱距離モデルを構築した。実験との比較により、実験結果とモデルは定性的な一致を得たが、定量的なズレが確認できた。したがって、本年度の研究目標は達成できたと考えている。

4. まとめと今後の課題

昨年度と同様のマッハ数 1.0 近傍の速度で減速しながら自由飛行する球の離脱距離計測実験を実施し、から、衝撃波離脱距離が大きく変化し、流れの非定常性が顕著に現れる速度域を発見した。今後、該当速度域での同様の実験から、非定常性を定量的に見積もり、非定常流れでの衝撃波離脱距離の実験式を構築する。

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] T. Kikuchi, T. Koshimoto, M. Yuguchi and K. Ohtani: Study of the Unsteady Flow at Near Mach number 1.0 (2nd Report), *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 112-113.

*[2] 菊池崇将, 越本崇仁, 湯口雅也, 大谷清伸: 自由飛行する球の衝撃波離脱距離計測(第 2 報), 平成 28 年度衝撃波シンポジウム, 横須賀(2017.3), 1B2-4.

- 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）
なし

課題番号	J16021
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

微細加工を施した伝熱面を流れる液膜流の熱流動特性
Heat and Fluid Flow Characteristics of Liquid Film Flow along
Heat Transfer Surface with Microscopic Grooves

足立 高弘*†, 東大野 晃慈*, 堀田 聡*, 岡島 淳之介**††, 小宮 敦樹**, 秋永 剛***
*秋田大学大学院工学資源学研究所, **東北大学流体科学研究所 ***アストン大学
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

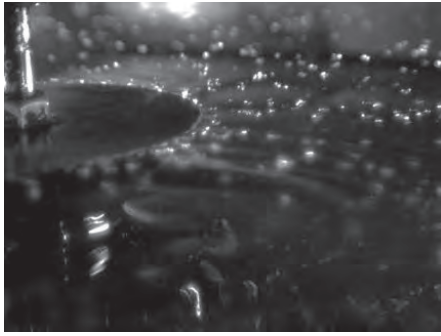
液膜流は、熱交換器や管路の内部、スピンコーターの内表面周りあるいは回転円すいの外表面周りなど工学的応用面に多く見られる流れである。液膜流れは膜厚が薄いことが特徴であり、液膜流の研究は膜が薄いために実験での計測が極めて困難であり数値計算に依るところが大きい。現在、最も信頼のおける気液二相流の数値計算手法の一つとして、CLSVOF(Combined Level-Set and Volume of Fluid)法がある。この方法は、レベルセット法とVOF法という古くからある方法を組み合わせ、短所を補うことで信頼のおける方法となっており利用者が増加している。本公募研究では、このCLSVOF法に気液界面での物理量(密度や粘度など)のシャープな変化を組み込むことが可能なGF(Ghost Fluid)法をカップルさせた新しい手法を開発する。GF法は新しい手法であり、特に円筒座標系や回転を伴う系における取り組みがなく、それらの系での信頼のおける熱流動現象の解析手法を確立させることが目的である。また、流路の表面に微細加工を施すことによる伝熱促進についても調べる。さらに研究が進んだ場合には、凝縮や蒸発といった相変化の効果を取り入れることも検討する。

2. 研究成果の内容

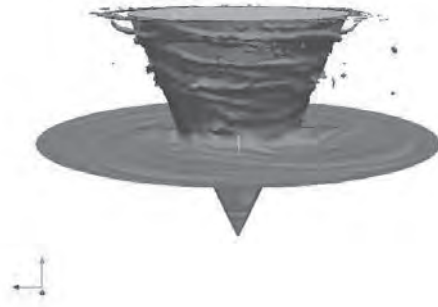
初年度には、流体研の高速度ビデオカメラを用いて、数値計算の対象となっている現象の可視化実験を行った。すなわち、回転円すい外表面を上昇する液膜流れと上昇した後に周囲に噴霧される液滴の可視化実験を行った。図1(a)は、その際の可視化写真である。液滴の噴霧状態を上手く可視化することに成功した。さらに、流体研のスパコンから利用できるアプリケーションのOpenFOAMを利用して、この現象の再現に取り組んだ。図1(b)が、OpenFOAMによる計算結果である。回転円すい外表面を液膜流が上昇する様子が再現できている。ただし、可視化実験のように円すい底面での液滴の噴霧の再現までには至らなかった。微細な液滴な噴霧を再現するためには、さらに細かなメッシュを必要とするため、さらに計算時間や計算費用が必要となる。そこで、2年目の28年度には、メッシュ生成に細心の注意を払った。すなわち、OpenFOAMで利用可能なメッシュ生成ソフトであるcfMeshを用いて、円すいの斜辺近傍で細かなメッシュを生成するようにした。図2は、cfMeshを用いた生成したメッシュの一例である。メッシュが細くなったため、計算時間が伸び現在も計算中である。

3. 研究目標の達成状況

本研究では、有限差分法を基にHSMAC法とCLSVOFとGF法といった新しい方法を用い



(a) 可視化実験の結果



(b) OpenFOAM による結果

図 1：回転円すい外表面の上昇液膜流

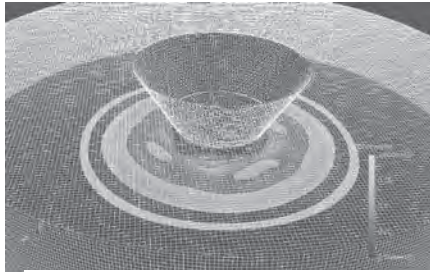


図 2: cfMesh によるメッシュ

た数値解析プログラムの開発を行っている。この方法では、計算の途中で気液の質量は厳密に保存される。また、界面の形状から曲率を精度良く算出すること出来るので界面追跡の精度が高い。問題となるのは、本研究で目的としている円筒座標系における取り扱いにおいて、応力テンソルの界面での不連続性を表現する数学的な表現の仕方がいまだ確立できていないことである。この数学的な取り扱いについて先行研究がなく参考になる文献が

存在しないが、そのため新規性を有する。一方で、上述の新しい手法によるプログラミング開発と並行して OpenFOAM を用いた数値解析にも取り組んでいる。OpenFOAM で得られる結果と自作で開発したプログラムによる結果とを比較することで開発したプログラムの妥当性を評価するためである。平成 28 年度は OpenFOAM の利用に関する公開講習会を秋田大学の足立が中心となり、秋田大学大学院理工学研究科および日本オープン CAE 学会の共催で秋田大学において開催している。

4. まとめと今後の課題

円筒座標系や回転系に着目し、気液二相流の界面を追跡するための新しい方法を取り入れた数値計算コードを開発してきた。CLFVOF および GFM を円筒座標系に適用して計算を進めようと試みたが、応力テンソルの界面での不連続性を表現する数学的な表現の仕方がいまだ確立できていないため、現在のところ上手く行っていない。今後の課題として、円すいの斜面に沿った一般座標系を導入して、一般座標系での界面追跡法の開発を行う必要があると考えている。その場合には、これまで使用してきたスタガード格子に加えてコロケート格子の使用も検討に入れる必要があると考えられる。一方で、これらのプログラム開発に平行して、OpenFOAM を利用して計算に取り組んだ。OpenFOAM はフリーソフトであるにもかかわらず、円筒座標系で回転を伴う複雑な現象をある程度再現することができた。ただし、今回取りあつかった形状が円すい形状であり、かつ薄い液膜流であったことから、メッシュ生成に細心の注意を払った。今後は実験等との結果との比較を行い、定性的かつ定量的な信頼度を確認することが課題となる。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 高橋雄太郎, 足立高弘, 岡島淳之介: 回転円すいを用いた液体微粒化装置の動力特性, 日本機械学会東北支部第 52 期秋季講演会・講演会論文集, (2016) USB

他 国際会議 2 件

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）なし

課題番号	J16022
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

非平衡乱流現象の解明と制御
Investigation of Non-Equilibrium Turbulence
and Its Application to Flow Control

酒井 康彦[†], 早瀬 敏幸^{**††}, 長田 孝二^{***}, 伊藤 靖仁^{*}

渡邊 智昭^{***}, 岩野 耕治^{*}, 高牟礼 光太郎^{*}

^{*}名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻, ^{**}東北大学流体科学研究所

^{***}名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

格子乱流場では、所謂非平衡乱流が存在することが明らかにされている。しかしその性質の詳細は未だに明らかになっていない。また、このような乱流は格子乱流に限らず、乱流噴流や壁面乱流境界層等の空間発展する乱流場でも普遍的に存在することが予想されるが、その存在と詳細なメカニズムはこれまで明らかにされていない。そこで本共同研究では、直接数値シミュレーションなどの数値解析により、格子乱流場以外でのその存在の有無の検証を含めた非平衡乱流現象を解明することを目的とする。また、格子乱流場以外での流れでの非平衡性を見出した場合には、その特徴を利用したエネルギー輸送やスカラー混合拡散の工学的制御法の開発を試みる。

2. 研究成果の内容

2.1 セン断乱流混合層における非平衡性

層流から乱流に空間発展する混合層流を再現する直接数値計算を実行し、非平衡性の存在の有無を明らかにした。図1に乱流エネルギーの減衰係数 C_ε の主流方向分布を示す。図より、乱流エネルギーの減衰領域であり、速度変動のパワースペクトルに慣性小領域が現れ、かつ局所等方性が成り立つような領域（図中、領域Ⅲ）においても、通常は一定のはずである乱流エネルギーの減衰係数が主流方向位置によって変化する現象が見られた。これは非平衡乱流の最たる特徴であることから、せん断混合層流においても非平衡乱流が現れる領域があることが示された。またその領域下流の領域では、減衰係数が一定となった。これらはフラクタル格子乱流場と同様の傾向である。

2.2 垂直衝撃波が乱流場に及ぼす影響

乱流中を衝撃波が伝播すると速度や圧力の不連続面が乱流内に現れ、衝撃波面を境界として乱流場の特性が大きく変化する。このため、衝撃波によって乱流場に非平衡性が現れる可能性がある。本研究では、低乱流マッハ数の一様等方性乱流場と垂直衝撃波の干渉について直接数値計算を行い、衝撃波による乱流場の変化について明らかにした。計算結果から、衝撃波による流体の圧縮に伴い乱流構造が圧縮され、乱流の渦度が増大することが明らかとなった。また、衝撃波によって乱流場の非等方性が現れることを確認した。

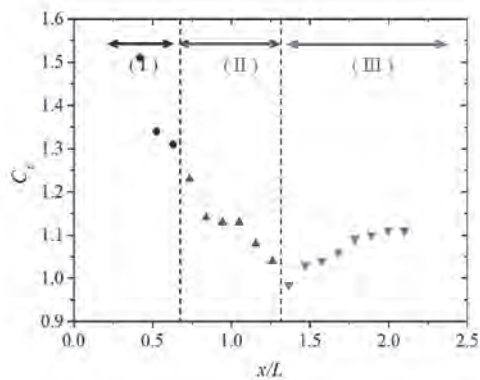


図1 混合層流における乱流エネルギーの減衰係数の主流方向分布.
領域Ⅰ：発達領域，領域Ⅱ，遷移領域，領域Ⅲ：乱流領域.

3. 研究目標の達成状況

本年度は，これまでに非平衡性については全く議論されていなかった混合層流において非平衡領域が現れることを見つけ出した．これらの結果は下記成果リストにあるように，論文または学会で発表されていることから，本共同研究の2年目である本年度は，順調に研究が遂行されたと言える．

4. まとめと今後の課題

本共同研究から，非平衡領域の流動構造の詳細が明らかにされつつある．また自由せん断乱流場に関する研究においては，その非平衡性の有無を明らかにすることができた．来年度は更なる考察・解析を行うとともに，高効率流体機器の開発につながる乱流制御法の開発や機器設計指針の確立を目指す．

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）

- *[1] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito and T. Hayase: Implicit Large Eddy Simulation of a Scalar Mixing Layer in Fractal Grid Turbulence, *Physica Scripta*, Vol. 91, No.7, (2016), 074007.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito, K. Iwano, T. Watanabe, T. Hayase, K. Takamure, M. Li: Investigation of Non-Equilibrium Turbulence and Its Application to Flow Control (Cases of Mixing Layer, Grid Turbulence and Jet), *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 116-117.
- [3] K. Takamure, Y. Ito, Y. Sakai, K. Iwano, T. Hayase: Direct Numerical Simulation of Momentum and Mass Transfer in a Spatially Developing Mixing Layer, *Proc. of the 13th International Conference on Fluid Dynamics* (2016), pp. 516-517.
- [4] 高牟礼光太郎，伊藤靖仁，酒井康彦，岩野耕治，乱流遷移域のせん断混合層における運動量・物質輸送現象の数値的解明，日本流体力学会年会 2016.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16023
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	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

溶射用外部磁界印加型プラズマジェット内の飛行粒子の数値解析
Numerical Analysis of In-flight Sprayed Particles in Plasma Jet for a Thermal Plasma Spray
with Externally Applied Magnetic Field

藤野 貴康*†, 高奈 秀匡**††

齋藤 宏輝*

*筑波大学, **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

プラズマ溶射用外部磁界印加型プラズマ溶射装置で生成されるプラズマジェットと溶射飛行粒子の非定常 3 次元数値解析を実施し、プラズマジェットの流体挙動と電圧変動の関係および各種運転条件下での飛行粒子の動力学/熱力学特性を明らかにすることを目的とする。

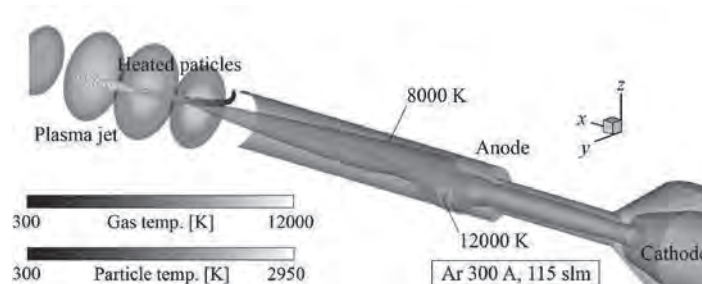


図 1 粒子軌道解析を連成した三次元数値解析

2. 研究成果の内容

昨年度、外部磁界印加型プラズマ溶射装置において通常（磁場なし）のプラズマ溶射装置のように鉛直方向上側から溶射粒子を投入すると、旋回プラズマジェットの影響で、溶射粒子の基板付着位置に鉛直軸に対して左右方向に強い非対称性が生じてしまうことが示された。本年度は、まず、この非対称性の外部磁界の運転電流依存性を明らかにし、その上で、非対称性の改善方法として、鉛直軸に対して角度をつけて溶射粒子を投入することを考案し（図 1）、その方法が有効であることを 3 次元数値解析（図 2）から示した。

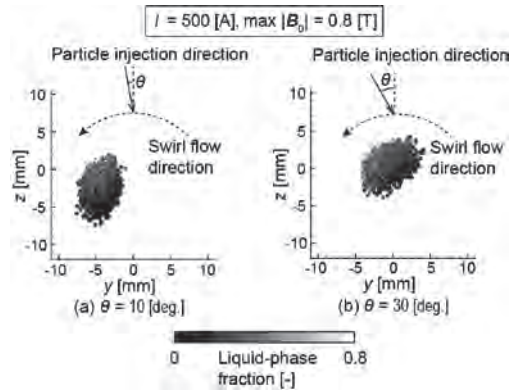


図2 溶射粒子付着位置・溶融度に与える溶射粒子の投入角度の影響

3. 研究目標の達成状況

外部磁界印加型プラズマ溶射環境下での溶射飛翔粒子の動力学/熱力学的特性についての理解を更に深めることができた。また、それを踏まえて同溶射環境下での溶射粒子の適切な投入方法についても検討が進んだ。それ故、本研究の目標のうち一つは概ね達成できたと考える。一方で、もう一つの目標である「外部磁界印加によるアーク電圧の変動抑制」に関する物理的メカニズムの解明には至っておらず、課題が残された。

4. まとめと今後の課題

外部磁界印加型プラズマ溶射装置内の電磁流体挙動及びジェット中の溶射粒子の動力学/熱力学特性の3次元数値解析から、同装置固有の溶射粒子の飛行・熱特性に関する知見を獲得し、またそれをもとに適切な溶射粒子投入法について提案することができた。一方で、実験で示されている外部磁場印加によるアーク電圧の変動抑制に関する物理的メカニズムの解明には課題を残したので、今後、その解明に集中的に取り組む予定である。

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] H. Saito, Y. Nakane, T. Fujino, and H. Takana: Numerical Analysis of In-flight Particles in Plasma Jet with an Externally Applied Magnetic Field, *Journal of fluid science and technology*, Vol. 11, No. 4, (2016), Paper No. 16-00184, pp. 1-12.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] H. Saito, T. Fujino, H. Takana, L. Pershin, and J. Mostaghimi: Influence of Operating Currents on In-flight Particle Trajectories in Magnetically Driven Arc Plasma Jet, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 22-23.
- [3] 齋藤宏輝, 藤野貴康, Javad Mostaghimi: プラズマジェット中の飛行粒子に及ぼす電圧変動周期の影響, 日本溶射学会第104回(2016年度秋季)全国講演大会, (2016), pp. 51-52.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J16024
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2nd year

Thermodynamic Effect on Tip Leakage Vortex Cavitation

Donghyuk Kang^{*†}, Iga Yuka^{**††}

^{*}Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University

^{**}Institute of Fluid Science, Tohoku University

[†]Applicant, ^{††}IFS responsible member

1. Purpose of the project

The cavity in the liquid needs latent heat as it evaporates, and the temperature of the liquid around the cavity gets low. As a result, the local saturated vapor pressure increases, suppressing expansion of cavity. The phenomenon explains thermodynamic effect in cavitation. Especially, the cavitation in hot water or in cryogenic fluids is significant on thermodynamic effect.

More investigations have been done on thermodynamic effect in a sheet cavitation in hydrofoils. However, cavitation in inducers for rocket engines using cryogenic fluids is not the sheet type but the tip leakage vortex type. Furthermore, the author showed that the interaction of a tip leakage vortex cavitation with a tip leading edge of a blade caused cavitation instabilities in an inducer. Therefore, quantitative evaluation for thermodynamic effect in a tip leakage vortex cavitation is very important to design a reliable inducer for rocket engines. However, the thermodynamic effect in a tip leakage vortex cavitation is remained unclear.

This report investigates the thermodynamic effect in a tip leakage vortex cavitation around the two- and three-dimensional hydrofoils in hot water focusing on the temperature depression, cavity length and pressure oscillation.

2. Details of program implement

Figure 1 shows the temperature depressions for the sheet cavitation (SC) and the tip leakage vortex cavitation (TLVC) around the two-dimensional hydrofoil (NACA0009) with the tip clearance of 0.27mm at the mainstream velocity $U_\infty=10\text{m/s}$, Reynolds number $Re=9.2\times 10^5$ and non-dimensional thermodynamic parameter $\Sigma^*=0.483$ ($T_\infty=90^\circ\text{C}$). The temperatures for the SC and TLVC were measured at the middle span and 1mm away from the tip, respectively. In $\sigma>1$, the temperature depression ΔT for the tip leakage vortex cavity is larger than ΔT for the sheet cavity. As not shown here, it was confirmed that the pressure around the TLVC was lower than that around the SC in the computational results.

Figure 2 shows the cavity length L_{cav}/C in cold water ($\Sigma^*=0.072$, $Re=3.4\times 10^5$, $T_\infty=30^\circ\text{C}$) and hot water ($\Sigma^*=10.3$, $Re=8.3\times 10^5$, $T_\infty=90^\circ\text{C}$) at $U_\infty=9\text{m/s}$ and $\alpha=13$ degrees in the three-dimensional hydrofoil with the tip clearance of 0.27mm. The cavity lengths in hot water are smaller than those in cold water. The cavity type depends on the cavity length. The significant difference between the inception cavitation number in cold water and hot water is not found.

Figure 3 shows the FFT results at $\sigma=0.898$ in cold water and at $\sigma=0.879$ in hot water. The amplitude in hot water is larger than that in cold water and the harmonic frequencies in hot water are observed. By the picture during five periods of the cavity oscillation, we confirmed that the cavity closure speed in hot water is higher than that in cold water. This shows that the sudden cavity closure causes the high pressure amplitude and the harmonic frequencies.

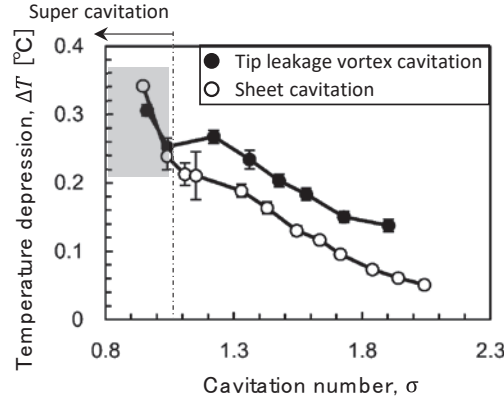


Figure 1 : Influence of cavitation number on the temperature depressions inside the sheet cavitation and the tip leakage vortex cavitation.

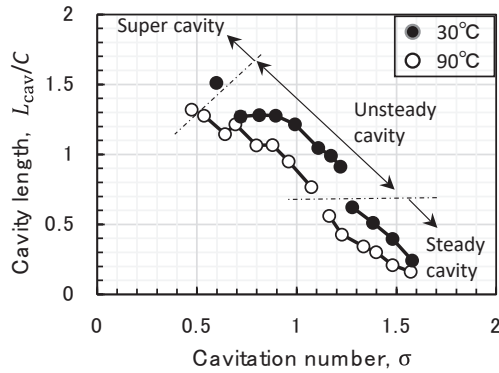


Figure 2: Cavity length in cold water and hot water in three-dimensional hydrofoil.

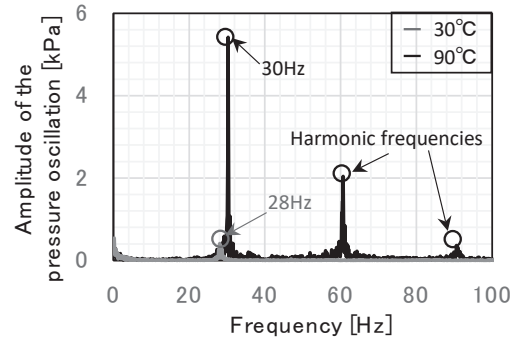


Figure 3: FFT result for the downstream pressure oscillations at $\sigma=0.898$ for $T_{\infty}=30^{\circ}\text{C}$, and at $\sigma=0.879$ for $T_{\infty}=90^{\circ}\text{C}$.

3. Achievements

The 70% of the goal that is the design of a three-dimensional inducer for rocket engines was achieved.

4. Summaries and future plans

The image analysis calculating the brightness value of the cavity pictures will be operated in order to qualitatively evaluate the thermodynamic effect in the tip leakage vortex cavity.

5. Research results

1) Journal Not applicable.

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

[1] D. Nakai, T. Furusawa, D. Kang and Y. Iga: Experimental Study of Thermodynamic Effect of Tip Leakage Cavitation in Hot Water, *Proceedings of the International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Honolulu, (2016), pp. 1-6.

[2] D. Nakai, Y. Sasaki, D. Kang, M. Nohmi, B. An and Y. Iga: Influence of Thermodynamic Effect on Growth and Collapse of Cavitation, *The Ninety Fourth Fluid Engineering Conference on Yamaguchi* (2016), pp. 1-2.

*[3] D. Kang and Y. Iga: Thermodynamic Effect on Tip Leakage Vortex Cavitation, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 24-25.

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

課題番号	J16025
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	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

ナノ粒子ER流体の高機能化とマイクロチャンネル内での流動評価
Improvement and Micro-Channel Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions

田中 克史^{*†}, 中野 政身^{**††}, 西本 美功^{***}, 小松 弘樹^{***}
^{*}京都工芸繊維大学材料化学系, ^{**}東北大学流体科学研究所
^{***}京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科
[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

エレクトロレオロジー(ER)効果は、ある流体に外部電場を印加・除去することによって生ずる見かけの粘度の増加・回復応答現象である。ER効果が見られる流体はER流体と称されており、機能性流体としての応用が期待されている。本研究では、粒径がナノメートルオーダーの酸化チタンナノ粒子を用いた分散系を中心としてER流体を種々の条件で調製し、流体の微細構造及びマイクロチャンネル内におけるER効果の評価を行うとともに、流体の安定性の評価を行うことを目的とする。

2. 研究成果の内容

粒径 400 nm 程度の酸化チタンナノ粒子と、化学変性シリコーンオイル(粘度 $\eta_0 = 0.04$ Pas)を用いた流体(粒子濃度 $\phi = 20$ vol%)について検討した。直流電場での流動において、調製後長時間経過後の試料では、図 1(a), (b)に示す、粒子の平行円板治具外への排出、及び、流動不安定が認められた。さらに、(c)に示すように、平行円板 edge 部近傍において、気泡状成分の排出が観察された。一方、正弦波電場では、比較的安定した流動が得られた。類似の結果は、酸化チタンナノ粒子水分散系においてより顕著に得られており、変性シリコーンオイル系流体においても、流体に混入した微量水分が一因と考えられる。

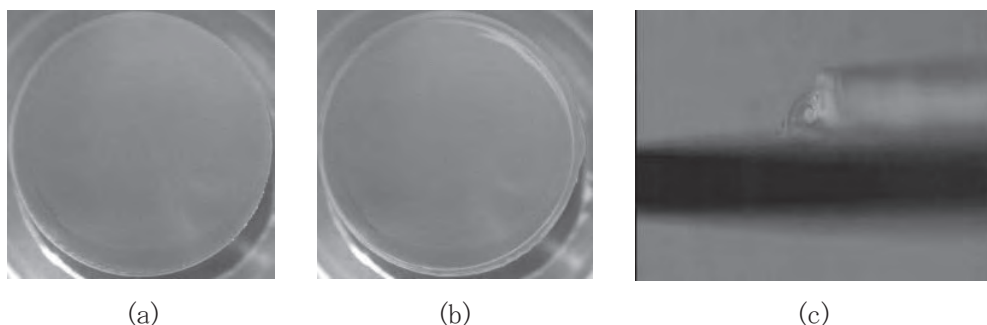


図 1: 直流電場の流動挙動. (a), (b) 円板治具下方から観察. (c) 平行円板治具側方から観察.

上記した流体($\phi = 20$ vol%)及び $\phi = 12, 15$ vol%で調製した流体について、毛細管力による micro-gap (gap = 50 μ m)への注入挙動を検討した結果、20 vol%の流体では、充填に時

間を要したが、12, 15 vol%の流体については、比較的良好な結果が得られた。以上から、流体の流動曲線（せん断応力のせん断速度依存性）において低せん断速度側に観測される、応力の平坦部分の値（見かけの降伏応力）の制御が有効であると考えられる。

3. 研究目標の達成状況

直流電場において発生した流動不安定については、モデル流体として検討した酸化チタンナノ粒子水分散系の結果から、流体に混入した微量水分のジュール発熱による気化が一因との考えが得られ、より安定性の高い流体を得るための指針が得られた。また、micro-gap への注入においては、見かけの降伏応力の制御が有効であるとの考えに至った。

4. まとめと今後の課題

十分な ER 応答と微細間隙への注入の改善を両立させるため、検討が進められている。

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）

- [1] K. Tanaka, S. Robson, M. Takasaki, H. Kobayashi, M. Nakano, and A. Totsuka: Micro-Gap Flow Behavior and Micro-Structure of Stored Electro-Rheological Nano-Suspensions in the Presence of Sinusoidal Electric Field, *Colloid Polym. Sci.*, Vol. 295, No. 3 (2017), pp. 441-451.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] K. Tanaka, S. Robson, M. Takasaki, H. Kobayashi, M. Nakano and A. Totsuka: Micro-Gap Flow Behavior and Micro-Structure of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *15th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, Incheon, (2016) (1 Page).
- [3] K. Tanaka, S. Robson, M. Takasaki, H. Kobayashi, M. Nakano and A. Totsuka: Micro-Gap Flow Behavior and Micro-Structure of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *17th International Congress on Rheology*, Kyoto, D4_M8_R2E (2016), (2 Pages)
- * [4] K. Tanaka, M. Nishimoto, H. Komatsu, M. Takasaki, H. Kobayashi, M. Nakano, and A. Totsuka: Improvement and Micro-Channel Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 62-63.
- *[5] K. Tanaka, M. Takasaki, H. Kobayashi, and M. Nakano: Micro-Gap Flow Behavior and Micro-Structure of Electro-Rheological Nano-Suspensions in the Presence of Sinusoidal Electric Field, *Proc. of the 13th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2016), pp. 480-481.
- [6] 田中克史, ロブソン星夜, 高崎 緑, 小林治樹, 中野政身, 戸塚 厚: ナノ粒子分散系エレクトロレオロジー流体の微細間隙における流動挙動と微細構造, 日本レオロジー学会第 43 年会講演予稿集, 東京, (2016), pp. 121-122.
- [7] 田中克史, ロブソン星夜, 高崎 緑, 小林治樹, 中野政身, 戸塚 厚: ナノ粒子分散系エレクトロレオロジー流体の微細間隙における ER 効果と流動挙動の同時観察, 第64回レオロジー討論会講演要旨集, 大阪, (2016), pp. 250-251.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16027
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	2016.4～2017.3
継続年数	1年目

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

佐々木 大輔*†, 下山 幸治**††
永谷 圭司***, 岡本 正人*, 赤坂 剛史*
高橋 俊****, 三坂 孝志*****

*金沢工業大学工学部, **東北大学流体科学研究所
東北大学未来科学技術共同研究センター, *東海大学工学部
*****東北大学学際科学フロンティア研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年注目を集めているマルチコプタ（ドローン）は、橋梁の点検や災害の監視等、様々な用途での使用が期待されている。その運用時間を延ばし、安全性を高めるため、ロータ周りにダクトを有するダクテッドファンが挙げられるが、水平飛行時には安定性に不利に働くことが知られている。加えて、マルチコプタを地面付近や壁面近傍で安定に飛行させるためには、機体近傍の複雑な流れ場の理解が必要である。本研究では、マルチコプタの飛行性能・安定性向上を目的として、低レイノルズ数域における流れ場の解明を実験的・数值的に行う手法を研究する。

2. 研究成果の内容

直交格子法に基づく CFD 手法を構築し、ダクテッドファンに適用する予定であったが、回転翼での検証の結果、解析に必要な精度が十分得られないことが明らかとなった。そのため、回転翼に適したソルバーの構築を新たに進め、現在 2 次元での検証を行っている。一方、比較検証用の実験データとして、ダクテッドファン周りの流れ場の可視化には成功した。

また、共同研究により、直交格子法の計算精度向上及び大規模解析法の構築を進めることができ、低レイノルズ数流れにおいて直交格子法を利用した CFD 解析手法の開発を加速することができた。本年度、三角翼を使用して解析を行い、直交格子による形状再現性が空力係数値に大きく影響を及ぼすことを明らかにし、埋め込み境界法を使用することで同様の流れ場を再現できることを示した。また、折り曲げ薄翼に対し、風洞壁を再現した 3 次元解析を実施して空力性能の解析を行い、空力性能値が実験値とよく一致することを示した。

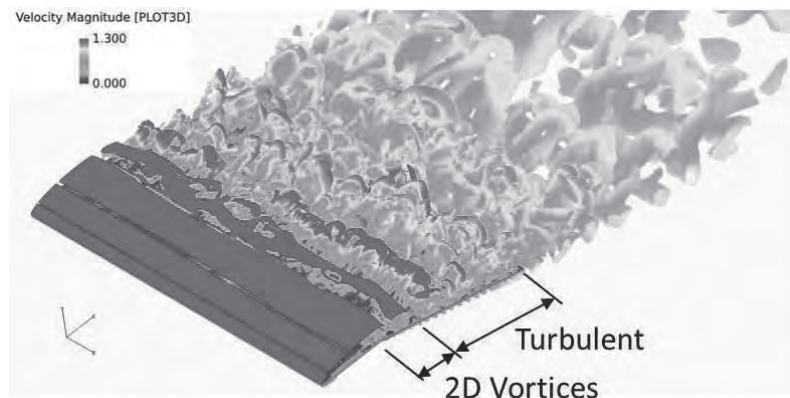


図 1：迎角 6 度での折り曲げ薄翼上面の渦構造の可視化

3. 研究目標の達成状況

低レイノルズ数での直交格子法の解析精度を向上させるために、三角翼を対象とした流体解析を行い、埋め込み境界法を使用することで空力係数値及び流れ場が収束することを示すと共に、風洞壁を再現した 3 次元解析により高迎角でも空力係数値を示すことができた。その一方、回転翼での解析精度が不十分であり、新たに解析ソルバーの開発を始めたこともあり、実験による可視化はできている一方、当初の目標は一部しか達成できていない。

4. まとめと今後の課題

本研究では、マルチコプタ周りの流れ場を詳細に解明することを目的として、低レイノルズ数での流れ場解析を行い、実験では可視化しにくい流れ場を CFD により可視化することができた。また、直交格子法での解析において境界埋め込み法が有効である事を実証したため、今後のマルチコプタ周りの解析においても重要な知見を得た。その一方、マルチコプタ周りの流れ場を解析により詳細に解明するには至っていないため、現在開発を進めている回転翼用の解析手法を 3 次元に拡張すると共に今年度取得した結果との比較が必要である。

5. 研究成果（※は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] D. Iioka, T. Kunishio, T. Akasaka, M. Okamoto, D. Sasaki, S. Takahashi, H. Otsuka, K. Nagatani, T. Misaka, K. Shimoyama and S. Obayashi: Numerical and Experimental Investigations to Improve Flight Performance of MAVs Under Low Reynolds Number Conditions, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 26-27.

[2] D. Iioka, K. Fukuda, M. Okamoto, D. Sasaki, K. Shimoyama and S. Obayashi: Computational Analysis of Thin Airfoils Under Low-Reynolds Number Flow Using Block-Structured Cartesian Mesh, *AIAA Paper 2017-0546, AIAA SciTech Forum 2017 (55th AIAA Aerospace Sciences Meeting)*, Grapevine, U.S.A., January, (2017).

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16028
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

ホールトーン現象のアクティブ制御に関する研究 Researches on the Active Control of the Hole Tone Phenomena

松浦 一雄^{*†}, 中野 政身^{**††}

^{*}愛媛大学大学院理工学研究科, ^{**}東北大学流体科学研究所

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

円形のノズルあるいは穴から流出した噴流がノズルと同じ直径の穴が開いている下流に置かれた板を通過する際に発生する自励発振音はホールトーンと呼ばれる。普段、我々は固体燃料ロケットモータ、自動車取入口、換気装置、ガス供給システムや、笛吹きやかんなど、多くの実用的な場面においてこの音に遭遇する。近年、ホールトーンのパッシブ制御に関しては詳細が徐々に報告されつつあるが、アクティブ制御に関しては、例えば効果的な制御法や消音の確実性など、依然として漠然とした状況にある。そこで本研究は、計算による直接音解析を実験と併せて行い、ホールトーンのアクティブ制御を主体とした効果的な低減化制御法を開発することが目的である。

2. 研究成果の内容

長さ 330 mm の尾管を付けたホールトーンシステムを構築した。ノズル直径、下流板の穴直径、尾管直径は共に 51 mm であり、ノズル出口と下流板間の衝突距離は 50 mm である。実験では噴流速度を 20 m/s 以下の範囲で行った。噴流速度が 11 m/s 未満の時、尾管がないオリジナルのホールトーンと同様に流速の変化に対して発振周波数が線形的に変化した。噴流速度が 11 m/s 以上では、15 m/s まで発振周波数が一定となるロックイン現象が見られた。レーザー・スモーク法により噴流せん断層の可視化を行った。その結果、ロックイン現象が起きている際の渦の合体の様子などが分かった。噴流速度が 12 m/s の場合を対象として、直接音解析を行った。実験とピーク周波数が定量的に一致する数値計算を実現できた。音の伝播と下流板の穴入口コーナー部における剥離挙動との連動性を明らかにした。

3. 研究目標の達成状況

尾管を付けたホールトーンシステムの実験計測を行い、ホールトーンに対する尾管の影響を明らかにすることが出来た。またロックインが生じている噴流速度条件において、尾付きホールトーンシステムの発振周波数を正確に計算可能となった。またプラズマアクチュエータ励起システムを開発することができた。研究目的に対するこれまでの全体達成度は70%である。

4. まとめと今後の課題

尾管を付けたホールトーンシステムの実験計測および直接音解析を行い、ホールトーンに対する尾管の影響を明らかにすると同時にその高精度予測が可能になった。今後、噴流出口部で噴流をプラズマアクチュエータで励起する制御システムの効果について詳細計測してゆくことが課題である。

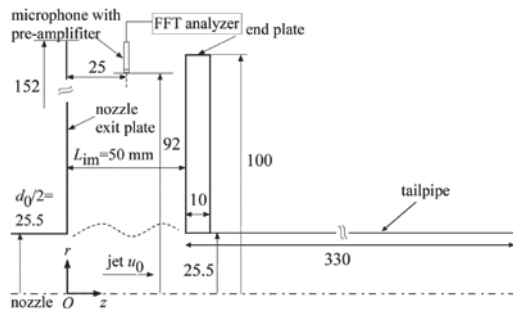


Fig. 1 Hole tone system with a tailpipe

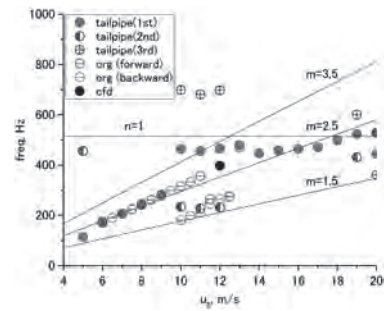


Fig. 2 Variation of the most dominant peak tone frequency with jet speed u_0



(a) $t=0$

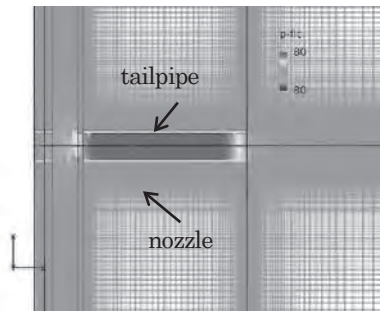


(b) $t=0.16 L_{im}/u_0$



(c) $t=0.32 L_{im}/u_0$

Fig. 3 Experimental visualization of jet between the nozzle exit and the end plate for $u_0 = 12$ m/s, flow direction is from left to right.

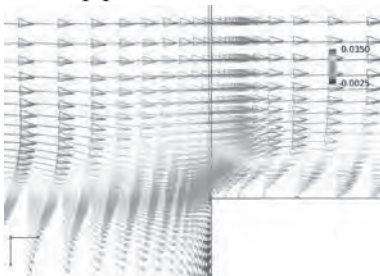


(a) When Δp inside the tailpipe becomes maximal

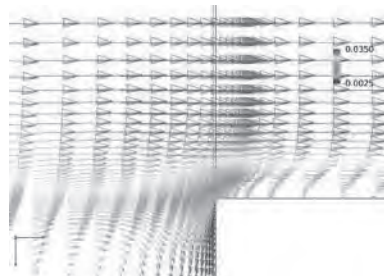


(b) When Δp inside the tailpipe becomes minimal

Fig. 4 Instantaneous distribution of pressure fluctuation $\Delta p = p - p_\infty$, $p_\infty = 101,325$ Pa in the hole tone system with tailpipe, $u_0 = 12$ m/s.



(i) min mass flow



(ii) max mass flow

Fig. 5 Velocity field around the hole edge when mass flows are locally min & max

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. Matsuura and M. Nakano: Experimental and Direct Computation Study on Flow-Acoustic Resonance of a Hole Tone System with a Tail Pipe, *Proc. Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 118-119.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J16030
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

旋回流プラズマジェット微粒子形成プロセス用高熱効率プラズマトーチの開発
Development of High Thermal Efficiency Plasma Torch for Fine
Particle Synthesis Using Vortex Plasma Jet

安藤 康高*†, Dickson Kindole*, 野田 佳雅*

上原 聡司**, 中嶋 智樹**, 西山 秀哉**††

Oleg P. Solonenko***

*足利工業大学工学部, **東北大学流体科学研究所

***Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch RAS

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

昨年の研究（課題番号 J15041）では、N₂ の Ar 作動ガスへの添加により旋回流プラズマジェットの発熱量を増加させ、その前駆体気化率向上効果を実験的に確認するとともに酸化チタン皮膜形成を試みた。その結果、Ar 作動ガスの場合にはプラズマジェット中を飛行した前駆体液滴が確認されたが、Ar/ N₂ 作動ガス（Ar (0.5 l/min.)/ N₂ (2 l/min.)）の場合には目視レベルでのプラズマジェット中を飛行する前駆体液滴は皆無となり、N₂ 添加によるプラズマジェット発熱量増加に伴う前駆体気化率向上効果を確認することができた。本年度の研究では、本プロセスの応用技術に関する知見を得るため、前駆体気化率向上効果が確認された Ar/ N₂ 作動ガスを使用して、旋回流プラズマジェット液相前駆体プラズマ溶射による酸化チタン皮膜形成を行い、当該皮膜を ITO 被覆ガラス基材上に形成した陽極を組み込んだ色素増感太陽電池の性能評価を行った。

2. 研究成果の内容

本研究で使用した ASPPS 装置及び酸化チタン皮膜の出発原料となる前駆体は、昨年の研究と同一である。但し、基材に熱衝撃に弱い ITO 被覆ガラス平板を使用したことから、基材ホルダーにはウォータージャケットを組み込んだ水冷構造のものを使用した。表 1 に酸化チタン皮膜形成条件を示す。皮膜形成後は、X 線回折による皮膜結晶構造解析を行った後、当該皮膜を光電素子とする色素増感太陽電池を製作し、1 SUN (1kW/m²) 条件下での開放電圧 (V_{oc}) 測定を行った。

図 1 に酸化チタン皮膜形成中の様子、図 2 に前後の ITO 被覆ガラス基材の外観写真を示す。ITO 被覆ガラス平板を基材に用いた場合には、基材裏面を水冷した条件においても連続的に皮膜形成（プラズマジェット照射）する条件では、基材冷却時に熱衝撃による割れが発生した。そこで、プラズマジェット連続照射時間を短縮し、基材冷却時間を挟み繰り返しプラズマジェット照射を行った結果、プラズマジェット連即照射時間 20sec., 基材冷却時間 30sec. の条件で基材に割れを発生させることなく酸化チタン皮膜形成が可能であることがわかった。図 3 に、形成された酸化チタン皮膜の XRD パターンを示す。形成された皮膜は、アナターゼを主体とするアナターゼ／

表 1：皮膜形成条件

Working gas (Flow rate)	Ar (0.5 l/min.)/ N ₂ (2 l/min.)
Carrier gas	Air
Discharge power	25V, 100 A
Deposition distance	20 mm
Feedstock	C ₂ H ₅ OH diluted TTIB* solution
Feedstock quantity	70 ml
Feedstock feed rate	0.1 ml/sec.
Substrate (Size)	ITO coated glass (20*40*3 mm)

*TTIB: Titanium tetra iso butoxide (Ti(OC₄H₉)₄)



図 2：ITO 被覆ガラス基材上への酸化チタン皮膜形成の様子

ルチル混相酸化チタン皮膜であり、本プロセスでは断続的にプラズマジェットを照射する条件でも連続的にプラズマジェットを照射した前報と同様の酸化チタン皮膜形成が可能であることが明らかとなった。製作した色素増感太陽電池（DSSC）は市販の DSSC（教材用）のものと同一構造・寸法であり、1SUN の条件下にて開放電圧を測定した結果、 $V_{oc}=120\text{mV}$ となり、本プロセスで形成した酸化チタン皮膜が光起電力を発生する能力を有し、当該皮膜を光電素子として実用化する上での有益な知見が得られた。今後は、皮膜形成条件最適化によるアナターゼ含有率の向上、基材トラバースによる膜厚分布の均一化などにより、DSSC の性能向上を図る予定である。



図 2：酸化チタン皮膜形成前後の ITO 被覆ガラス基

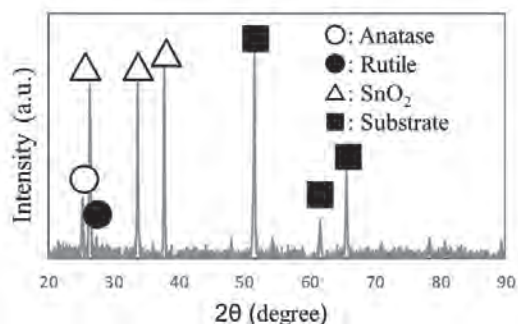


図 3：酸化チタン皮膜の XRD パターン

3. 研究目標の達成状況

本研究では、a) プラズマジェットの発熱量が前駆体気化率に及ぼす効果の確認、b) 薄膜形成条件の確立、c) 旋回流形成ノズル付陽極ノズルの熱損失評価を目標に掲げており、a), b)については、a)は前報で確認済みである。b)については、前報で形成した皮膜の光触媒特性が確認でき、今回も当該皮膜を光電素子とした色素増感太陽電池による発電に成功するなど、一定の成果は収めることができているが、形成された皮膜の強度は依然弱く、薄膜形成条件の最適化は完了していない。c)については、b)の目標をクリアした後の課題であるため、現段階では定量的な評価を行うには至っていない。以上より、達成度は 75%と考えている。なお、課題番号 J14H005, J15041, J16030 を通じて得られた成果は、Materials Transactions 誌に投稿済である。

4. まとめと今後の課題

Ar/ N₂ 作動ガスを用いた旋回流プラズマジェット液相前駆体プラズマ溶射による、ITO 被覆ガラス基材上への酸化チタン皮膜形成を行い、応用技術（DSSC 製造プロセス）に対する可能性を調査した。その結果、プラズマジェット照射を断続的にすることでガラス基材への皮膜形成も可能であり、形成された皮膜を光電素子として用いた DSSC は $V_{oc} = 120\text{mV}$ の開放電圧を伴う発電に成功し、実用化を図る上での有益な知見が得られた。今後は、皮膜強度の向上を図るためより高い放電電力での皮膜形成を行うとともに、定量的に熱損失を評価し本プラズマトーチの従来のプラズマトーチに対する優位性を確認する。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] O. P. Solonenko, Y. Ando, H. Nishiyama, A. A. Golovin, S. Uehara: Revisited High-Energy Treatment of Thermal Plasma CVD Titania Coatings, *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2016), pp. 566-567.
- [2] Yasutaka Ando, Dickson kindole, Hideya Nishiyama, Tomoki Nakajima, Satoshi Uehara, Oleg P. Solonenko: Photo-catalytic Titanium Oxide Film Deposition by ASPPS using Vortex Ar/ N₂ Plasma Jet, *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2016), pp. 568-569.
- *[3] Dickson Kindole, Yasutaka Ando, Hideya Nishiyama, Tomoki Nakajima, Satoshi Uehara, Oleg P. Solonenko: Application of the Titanium Oxide Film Deposited by ASPPS Using Vortex Plasma Jet to DSSC, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 172-173.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）なし

課題番号	J16031
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	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

超並列脳型 L S I のためのナノ構造アナログメモリ素子の開発
Development of a Nanostructure Analog Memory Device for Massively-Parallel Brain-Like LSIs

森江 隆^{*†}, 寒川 誠二^{**††}
 安藤 秀幸^{*}, 久松 直貴^{*}, 原田 將敬^{*}
 大野 武雄^{***}, 野田 周一^{****}, 久保田 智広^{**}
^{*}九州工業大学生命体工学研究科, ^{**}東北大学流体科学研究所
^{***}東北大学原子分子材料高等研究機構, ^{****}東北大学工学研究科
[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

脳の情報処理様式をまねた人に近い認識・学習・判断能力を有する機械の実現を目指して、神経細胞が発するスパイク状パルスの同期等による時空間並列情報処理を物理的に実現する超低消費電力・省サイズ・高精度な実ニューロン方式脳型集積回路の要素技術として、分子の自己組織化機能によるナノ構造作製技術を駆使して、制御性の高いアナログメモリ素子を開発する。すなわち、これまでの研究実績に基づいて、新規なナノ構造による抵抗変化型メモリ (ReRAM) 素子の作製技術を確立し、試作素子の評価および制御回路の考案により、アナログ記憶量の微少更新を実現する。この目的のため、本研究では北海道大学高橋庸夫教授グループの協力を得て、MoO_x/Cu 系 ReRAM 構造と MOSFET を結合した素子を作製して、アナログメモリ素子としての動作特性を検討する。

2. 研究成果の内容

脳型人工知能チップ開発において、既存のデジタル方式を性能的に凌駕するアナログ集積回路方式実現のための最大の課題は、省サイズ・低電力・高精度なアナログメモリ素子の開発である。我々は、これまでに MOSFET 上に MoO_xを用いた ReRAM を集積し、アナログメモリ特性を評価してきたが、素子毎および書き込み動作毎に特性ばらつきが大きいという問題があった。これはこの種のアナログメモリ素子共通の問題である。本研究では、この問題を低減し、ナノ構造化への道筋を付けるために、素子の多並列接続化を検討した。

図 1 に示すように、Si 基板上に nMOSFET (W/L=6/2μm) を作製し、平坦化処理した Al 電極開口部の表面に自然形成された Al₂O₃を介して、20 nm 厚の MoO_x薄膜を反応性スパッタ (室温、Ar-O₂, O₂: 20%) により形成し、Cu 上部電極 (30 nm 厚)、Pt (100 nm) を成膜し ReRAM 素子を作製した。この素子をそれぞれ 4, 8, 16 個並列接続した集合素子を作製し、図 2 に示すように、素子に外付け抵抗 R (10kΩ) を直列に接続し、パルス電圧を印加して、オシロスコープにより ReRAM 素子-R 間ノード電位 (V_{re}) を測定した。

高抵抗状態の 16 並列接続 ReRAM 素子において、図 3 挿入図に示す SET 用パルスおよび Read パルスをそれぞれ V_{in}, V_g に印加し、Read パルス印加時間内の V_{re} の平均値を求めた。書き込み時に印加する V_g (=V_g(w)) を 1V から上昇させたときの結果を図 3 に示す。V_g(w)を高くするにつれて ReRAM 素子の抵抗値が低下し、V_{re} が低下した。変化特性のバ

ラツキはほとんど生じないことが確認できた．試行回数毎の抵抗値の変化量の違いは，複数接続した ReRAM 素子内で低抵抗化する素子の個数の違いであることがわかった．

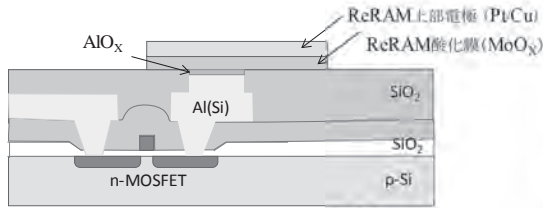


図1: ReRAM-MOSFET構造

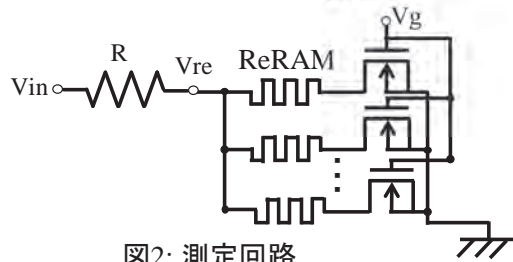


図2: 測定回路

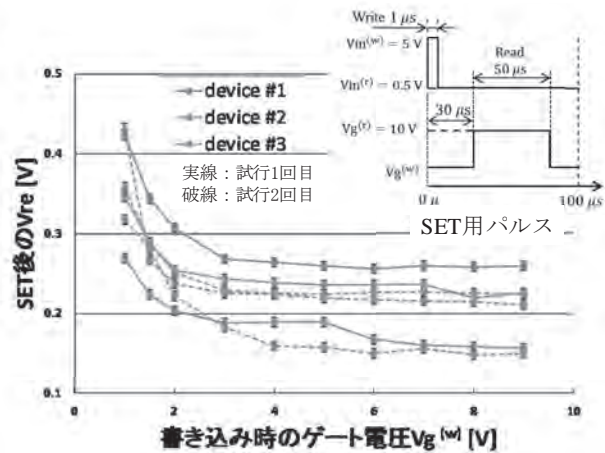


図3: 測定結果(16並列素子)

3. 研究目標の達成状況

本研究では特にアナログメモリ素子の高精度化を実現するための，基礎的検討を行った．抵抗変化型メモリ素子の欠点である書き込み特性バラツキを逆に利用して，並列結合素子においてアナログメモリ特性を実現する発想が有効であることを確認した．これによりナノ構造化アナログメモリ素子への道筋が示された．

4. まとめと今後の課題

MOSFET と ReRAM 素子を複数個並列接続した集合素子により，制御性の優れたアナログメモリ機能を実現できることを確認した．この構成を東北大寒川教授グループのナノ構造製造技術を用いてナノディスクアレイ構造に適用することを次年度に検討する．

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] T. Morie, H. Liang, T. Tohara, H. Tanaka, M. Igarashi, S. Samukawa, K. Endo, and Y. Takahashi: Spike-based Time-domain Weighted-sum Calculation Using Nanodevices for Low Power Operation (Invited), *16th Int. Conf. on Nanotechnology (IEEE NANO)*, Sendai, (2016), pp. 390-392.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] H. Ando, K. Tomizaki, T. Tohara, T. Morie, A. T. Fukuchi, M. Arita, Y. Takahashi, and S. Samukawa: Spike-based Neural Learning Hardware Using a Resistance Change Memory Device toward Brain-like Systems with Nanostructures, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 64-65.

[3] 原田 将敬, 安藤 秀幸, 森江 隆, 勝村 玲音, 福地 厚, 有田 正志, 高橋 庸夫: 多並列接続 Cu-MoOx-Al 抵抗変化型メモリのアナログメモリ動作, 第 64 回応用物理学会 春季学術講演会, 横浜, (2017.3), p. 05-032.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J16033
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	2016.4～2017.3
継続年数	3 年目

風力エネルギー高度利用のための電磁エネルギー変換装置の開発
Development of MHD Energy Conversion Device for Efficient Wind Energy Utilization

岩本 悠宏*†, 高奈 秀匡**††

*名古屋工業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

近年、化石燃料の枯渇や地球温暖化といった問題を背景に再生可能エネルギーに注目が集まっており、温室効果ガスを排出しない風力エネルギーはその一つである。しかし、風力発電は出力が天候に左右されやすく、電力を安定的に供給することが難しい。この欠点を補うためには風速変動に対しトルクを能動的に制御する必要がある。既存のトルク制御では風速変動に対し風車の翼の角度を調節し、定格出力を得ている。さらなる風力発電の高度利用に向けて MHD 発電機を利用したトルク制御が期待される。MHD 発電はタービンといった機械的要素を使用せずに、流体のもつ運動エネルギーを電気エネルギーに直接変換する発電方法である。MHD 発電機内部に生じるローレンツ力を利用することで、定格風速より高い風速の場合において余剰風力を回収することで、風力エネルギーの更なる高度利用が期待できる。その高度化へは発電機内部の電磁流体の流動を明らかにすることが重要である。そこで本研究では、3次元 MHD テイラークエット流れを格子ボルツマン法により解析し、調査した。

2. 研究成果の内容

本研究では、Dellor's Lattice Boltzmann model に基づく電磁流体解析コードを開発し、3次元テイラークエット流れを解析した。図 1 に解析モデルを示す。解析対象は、3次元 MHD テイラークエット流れであり、内円筒が一定の各速度 ω で回転し、外円筒は静止している。また、 z 方向に一様磁場 B を印加している。本年度は特にレイノルズ数 $Re = ua/\nu$ を 100 で固定し、ハルトマン数 $Ha = B_0 a \sqrt{\sigma/\rho\nu}$ とアスペクト比 $h/(r_2 - r_1)$ が出力電圧やトルク、内部流動に与える影響を調査した。

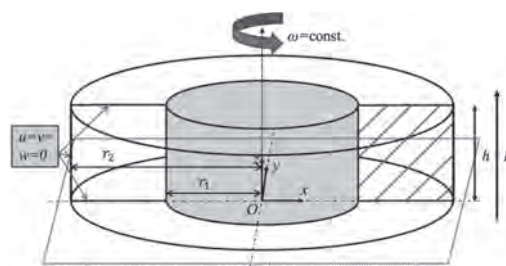


図 1：解析モデル

代表的な結果として、図 2 にアスペクト比 1 における出力電圧とトルクの結果を示す。図 2 より Ha の増加に伴い出力電圧とトルクが増加することがわかる。これは磁場印加により電磁流体の流れ場や電流・磁場分布が変化するためと考えられる。そこで、図 3 にハルトマン数を変化させたときの図 1 斜線部分の高さ中央における周方向の速度分布を示す。図 3 より Ha の増加に伴い周速度が減少し、内円筒付近の速度勾配が大きくなることがわかる。ここで、図 4 と図 5 に $Ha=5$ における電流・磁場分布とローレンツ力分布をそれぞれ示す。図 4 より電流が誘導磁場を形成する様子が確認できる。それに伴い、図 5 より容器中心部では流れを妨げる向きに大きくローレンツ力が電磁流体に作用することがわかる。そのため Ha

の増加に伴い周速度が減少し、その結果出力電圧とトルクが伴に増加することがわかった。

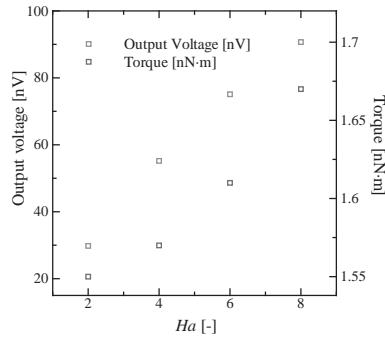


図 2：出力電圧とトルク

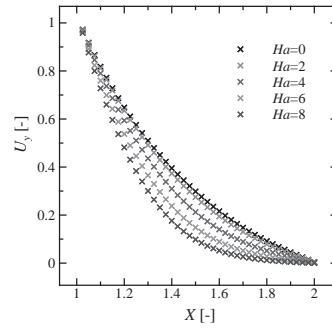


図 3：周速度分布

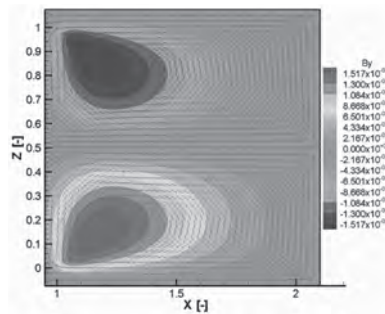


図 4：電流・磁場分布

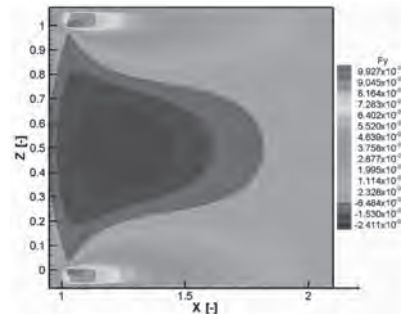


図 5：ローレンツ力分布

3. 研究目標の達成状況

本研究で提案する電磁エネルギー変換装置の性能向上に向けて、3次元 MHD ティラークエット流れを Dellor's Lattice Boltzmann model に基づく電磁流体解析を用いて調査した。特に、ハルトマン数とアスペクト比が出力電圧やトルク、内部流動に与える影響を調査し、電磁エネルギー変換装置内部の流動現象に関する基礎的な知見を得た。以上より、研究目標を十分に達成した。

4. まとめと今後の課題

本年度では、Dellor's Lattice Boltzmann model に基づく電磁流体解析基礎コードの開発を行い、提案する電磁エネルギー変換装置のトルク制御と発電メカニズムに関する基礎的な知見を得た。今後の課題として、より実現現象、実機に近い幾何学的条件や流体条件における電磁流体解析により、ファラデーの電磁誘導による発電性能とローレンツ力に起因するトルク制御メカニズムの調査が必要である。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] H. Takana and A. Tanida: Development and fundamental characteristics of co-axial MHD energy conversion device, *Mechanical Engineering Journal*, vol. 4 (2017), 16-00500 (9 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] Y. Iwamoto, H. Takana, H. Yamaguchi and Y. Ido: Fundamental Numerical Study of MHD Energy Conversion in Annular Geometry, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 28-29.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）なし

課題番号	J16035
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

ふく射要素法を用いたレーザー温熱治療に関する研究
A Study of Laser Thermotherapy Using Radiation Element Method

櫻井 篤^{*†}, 圓山 重直^{**††}, 中村 勇友^{*}, 小宮 敦樹^{**}, 岡島 淳之介^{**}

^{*}新潟大学工学部, ^{**}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、金ナノロッド(GNRs)による局在プラズモン共鳴を用いた局所がん治療への応用を目指す。そのため、光線放射モデルによるふく射要素法（以下 REM2）及び電磁波解析を用いて、生体内における光伝播を解析する。この方法と血流や代謝熱を考慮に入れた生体伝熱方程式と結合させることによって、レーザー温熱治療時における複雑な生体内伝熱現象について定量的評価を行っていくことを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究では、生体内の光多重散乱や GNRs によるプラズモン加熱、体内の血流や代謝熱を考慮した複合伝熱解析を考慮し、レーザー治療時の複雑な生体内伝熱解析を行った。まず、伝熱工学的観点から生体内の伝熱現象を評価するために、光線放射モデルによるふく射要素法 REM² と Pennes の生体伝熱方程式を用いたふく射伝導伝熱複合解析のモデル化を行った。GNRs を用いた生体組織へのレーザー照射を想定した数値計算を行い、GNRs の有無、また GNRs を用いたレーザー治療における数密度などの様々なパラメータを変更し、その時の生体組織内の熱流束分布、温度分布の変化について評価した。図 1 は皮膚内における熱損傷度分布を示している。皮膚内における熱損傷度の分布がレーザー照射時間と共に変化していく様子がわかる。また、GNRs の長さ $L[\text{nm}]$ によってレーザー加熱量が異なるため熱損傷分布が変化している。

3. 研究目標の達成状況

これまでにレーザーの過照射による火傷などといった治療ミスを減少させるため、生体伝熱現象の数値予測モデルの開発を行ってきた。またプラズモン加熱を用いた局所レーザーがん治療についても検討を重ねてきており、現在までに 1 次元生体伝熱モデルによってプラズモン加熱を含む様々な状況を考慮して生体伝熱現象を明らかにしている。プラズモン加熱量を正確に予測するため電磁波数値解析によって GNRs の局所電場を解析し、吸熱量の推定を行った。その結果、GNRs のアスペクト比によって局在プラズモン共鳴によるレーザー光の吸収に違いが表れることを確認した。さらにこのプラズモン加熱を用いることにより、生体伝熱モデルと結合させた局所レーザーがん治療モデルについても検討を重ねたところ、GNRs のサイズによって皮膚内における熱損傷度の分布が変化することを明らかにした。

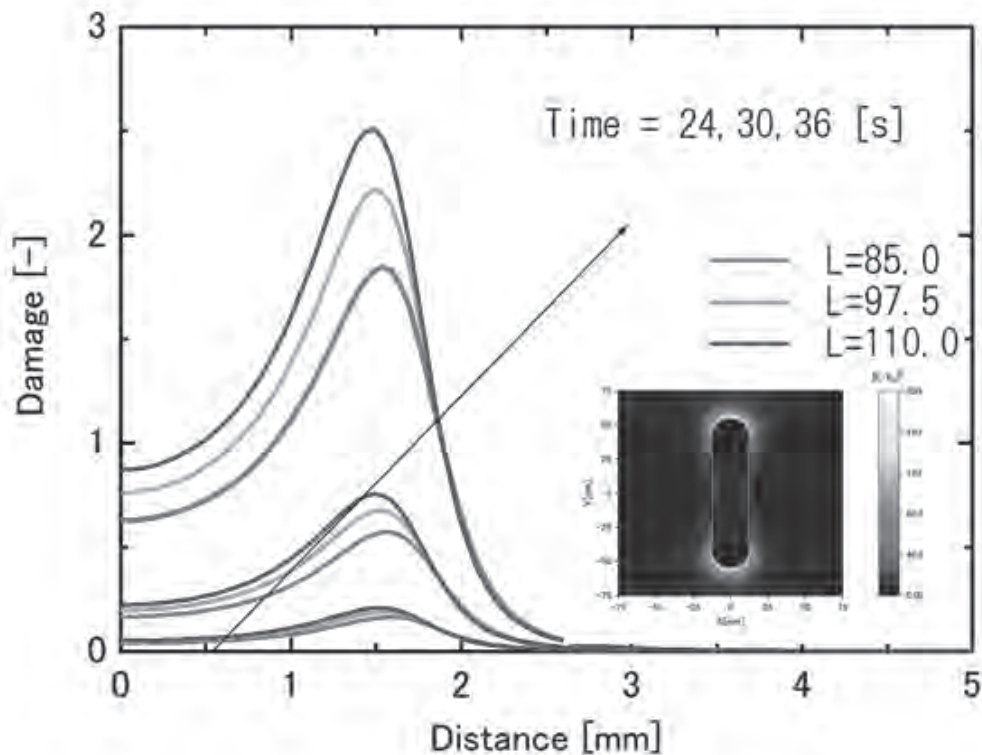


図 1：皮膚内における熱損傷度分布

4. まとめと今後の課題

本研究では、レーザー治療時における生体伝熱現象の解明と新たな治療法について検討してきた。今後は、これまでに開発してきた1次元生体伝熱モデルを3次元に拡張し、またプラズモン加熱のより詳細なモデル化により、高効率な局所加熱法の検討を行いたいと思っている。

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] Y. Nakamura, A. Komiya, J. Okajima, S. Maruyama, A. Sakurai: Coupled Photon and Bioheat Transport Simulation for Laser Induced Plasmonic Photothermal Therapy, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 30-31.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16036
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

遷臨界/超臨界状態における酸水素混合系に対する熱物性解析
An Analysis of Thermophysical Properties of Hydrogen/Oxygen Mixture at
transcortical/Supercritical State

徳増 崇*†, 津田 伸一**††, 坪井 伸幸***

*東北大学流体科学研究所, **九州大学大学院工学研究院, ***九州工業大学大学院工学研究院

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

H-IIA ロケットなどに代表される酸素と水素を推進剤とする大型ロケットエンジンの燃焼室に関しては、その内部流れの CFD 精度向上に向けた流体力学および反応化学的研究が多数展開されてきている一方、熱力学的観点から精度向上を図る研究はほとんど行われてきていない。しかし、酸水素混合系の熱物性データ（実験値）が皆無に等しいことから、現行の CFD では、経験的な状態方程式 (EOS) を未検証のまま用いている状態である。そこで本研究では、エンジン内部の遷臨界/超臨界状態を想定した酸水素混合系の熱物性を分子シミュレーションにより推算し、既往の EOS の精度検証を行うことを目的としている。

2. 研究成果の内容

昨年度に構築した、酸水素混合系モデルに対する分子シミュレーションから様々な熱力学量を評価する手法をベースに、今年度は遷臨界/超臨界状態における P - V - T 関係（圧力 - 体積 - 温度の 3 つの関係）と定圧比熱について、本手法から求めた結果とロケットエンジン用の CFD 解析でよく用いられている既往の状態方程式 (EOS) による結果を比較し、この EOS の精度検証を実施した。

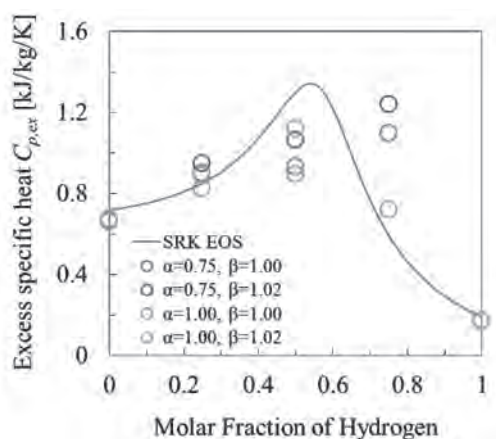


図 1 余剰定圧比熱の結果比較（圧力 10MPa, 温度 90K）

超臨界条件に比べて、遷臨界条件下の P - V - T 関係や比熱については、既往の EOS の適用に限界が見られることがわかった。図 1 は、定圧比熱について、分子シミュレーションの結果と既往の EOS の差異が最も顕著に見られた結果の一例であり、横軸は水素のモル分率（濃度）、縦軸は余剰定圧比熱（比熱の非理想気体項の値）である。4 種類のプロットは、現段階では正確に評価できていない酸素 - 水素の異種分子間相互作用を仮想的に、しかしながら現実的な範囲で変化させた場合の分子シミュレーションの結果である。これより、比熱にピークが表れる傾向は既往の EOS でも捉えられるのに対して、その定量的な精度には限界があることがわかる。

なお、平成 28 年 10 月 10 日～12 日にかけて行われた ICFD2016 では、本課題の研究報告を行った。また、本学会期間中にメンバー間で議論を交わし、本研究の目標達成状況と今後の課題を共有してきている。

3. 研究目標の達成状況

ロケットエンジンの燃焼室開発における CFD 援用がますます本格化してきている中、酸水素混合系の状態方程式の精度未検証は、非常に大きな課題の一つとして位置づけられる。今年度は、遷臨界/超臨界の幅広い条件において、 P - V - T 関係と比熱に対する既往の EOS の精度検証を一気に進めることができた。特に、比熱については予測が困難な条件があるという重要な知見が得られたことは評価できる成果であり、本研究は当初の目標を着実に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、経験的な分子間相互作用モデルによって水素と酸素の混合系を模擬し、この混合系に対する分子動力学シミュレーションの結果から、現在ロケットエンジンの解析で使用されている状態方程式の精度検証を実施した。その結果、特に遷臨界条件では P - V - T 関係（圧力 - 体積 - 温度の 3 つの関係）および比熱の予測精度がよくないことが示された。

なお、ロケットエンジンの CFD 解析では、「 P - V - T 関係」「比熱」だけでなく、「音速」も重要な熱力学量である。今後は、音速も含めた総合的検証を進める必要があり、この点を次なる課題としている。

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] S. Tsuda, R. Takahashi, T. Tokumasu, N. Tsuboi, S. Watanabe, S. Tsuda: Validation of the Classical Mixing Rule in a Cubic Equation of State for a Non-Ideal Gas Mixture, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 120-121.

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	J16037
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目（発展）

光化学物質を用いたスペースデブリ衝突による空気漏れ検知の研究
Investigation into Air-Leakage Detection in Space-Debris Impact
Using Photochemical Material

榎原 幹十朗^{*,†}, 大谷 清伸^{**,††}, 長谷川 美貴^{***}, 石井 あゆみ^{***}, 近藤 周^{*}, 笹原 一将^{*}
尾形 周平^{***}, 川口 拓馬^{***}, 近藤 一希^{***}
*東北大学工学研究科, **東北大学流体科学研究所
***青山学院大学理工学部
[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

スペースデブリが宇宙ステーションなどの有人宇宙施設に衝突し与圧壁に貫通穴が生じれば、空気漏れが起こる。スペースクルーは早急に貫通穴を発見し対処する必要があるが、衝撃によって電気系統がダウンし、既在の位置同定手法は使えない可能性が高い。そこで、暗闇でも貫通穴を認識できる位置表示手法が求められる。急激な温度・圧力上昇をトリガーにして長時間発光・蓄光するメカノクロミズム金属錯体と与圧壁内側に塗布することで、暗闇でも衝突貫通穴の周りを長時間発光させ続けるシステムを構築することを研究目的とする。

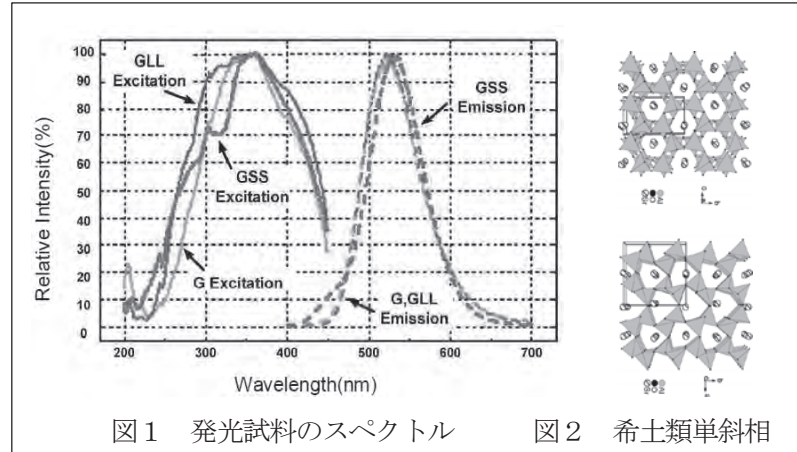
2. 研究成果の内容

- (1) 光化学物質と接着物質を混ぜ合わせる。計測装置を設置した後、実際に超高速衝突実験を行った。本研究では、衝突貫通穴周辺に塗料物質が残っていることを設計目標とし、衝突中心そのものの裏面の塗料物質の剥落・飛散は許容する。
- (2) 衝突前後の変化から、光化学発光物質の発光が確認された。複数回確認されたので、発光現象の再現性があると考えている。高速衝突後に発光体に化学変化を起こしたことが目視で確認でき、デジタルデータとしても捉えられている。
- (3) 真空チャンバー内に光ファイバー等を設置し、真空中であっても分光器を用いて計測する高度な観測技術を採用する。

希土類蓄光材料の混合比の粉末を市販の接着剤に混合させアルミ製のバンパーに塗布した。この際、発光材料との混合しやすさ、バンパーへの塗布のしやすさ、乾燥後の表面のスムーズさ、発色の確認のしやすさなどを加味し、接着剤は数種類程度を試した。発光体を塗布したバンパーと 10 cm の間隔でもう 1 枚のバンパーを配置し、与圧壁様に設置した。衝突実験には、3 km/s 程度でプロジェクタイルを衝突させる実験を行った。光ファイバーを衝突装置のチャンバーに設置し、その場観察を行った。図 1 に発光試料のスペクトル（根元特殊株式会社の公開資料）を示す。図 2 に希土類の単斜相の概念図を示す。激しい衝突により 3 価のユウロピウムが 2 価のユウロピウムに化学変化を起こしたことを示す。このような実験による 3 価のユウロピウムの還元現象を報告した例はなく、世界初の結果が期待できる。

3. 研究目標の達成状況

3 価のユウロピウムが 2 価に変化することを赤色から青色への変化という形で目視できた。今年度の目標である発光試料のスペクトルが観測されたので、今年度の研究目的は達成できた。



4. まとめと今後の課題

以下の段階を経て試料の合成と同衝突実験を試み、目的達成を目指す。

- 衝突後に発光減衰時間が 2 分間程度になるような試料の合成
- 衝突のみでの化学反応性 (3 価のユウロピウム還元) と超残光性を兼ね備えた試料合成

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] Makihara, K. and Matsumoto, N.: Survival Probability of Hollow Cylindrical Mesh Tether under Space Debris Impact, *AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 53, No. 3, (2016), pp. 520-527.
- [2] 近藤周, 沖義弘, 長谷川直, 榎原幹十郎: スペースデブリ衝突におけるアルミテザー破断基準の算出方法, *航空宇宙技術*, No. 15, (2016), pp. 79-84.
- [3] Makihara, K., Oki, Y. and Hasegawa, S.: Energy Investigation into Damage Evaluation of Pressure Wall at Oblique Impacts, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol. 14, No. 30, (2016), pp. 1-8.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[4] Kondo, S., Sasahara, K., Ohtani, K., Hasegawa, S., Hasegawa, M. and Makihara, K.: Experiment to Detect Air-Leakage in Space-Debris Impact using Photoluminescent Substance, *Proceedings of the 16th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 102-103.
- [5] 榎原幹十郎, 近藤周, 松本紀彦: スペースデブリ除去システム的设计における中空円筒メッシュテザーの提案, 第 58 回構造強度に関する講演会, (2016).
- [6] 近藤周, 笹原一将, 榎原幹十郎: デブリ除去ミッション成功確率向上のための導電性テープテザーの設計, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, (2016).
- [7] 榎原幹十郎: 東北大学のデブリ研究の取り組み～除去テザーの構造, 衝突による発光色変調～, 第 7 回スペースデブリワークショップ, (2016).
- [8] 長谷川美貴, 尾形周平, 近藤一希, 川口拓馬, 石井あゆみ, 榎原幹十郎, 近藤周, 笹原一将: 強い衝撃をうけた材料評価にむけた発光塗料の開発, 平成 28 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 相模原市, (2017.2).
- [9] 笹原一将, 近藤周, 上養義幸, 長谷川直, 榎原幹十郎: 円筒テザーのスペースデブリの衝突による損傷評価, 日本航空宇宙学会北部支部創立 30 周年記念 2017 年講演会, 仙台, (2017.3).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J16038
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3 年目

新力天秤を用いたサイレント超音速複葉翼モデルの空力特性

Aerodynamic Characteristics of a Silent Supersonic Biplane Model Using a New Force Balance

川添 博光^{*†}, 友枝 宏之^{*}, 坂本 憲一^{*}, 森澤 征一郎^{*}, 大林 茂^{**††}

^{*}鳥取大学, ^{**}東北大学流体科学研究所

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

翼の平面形状は航空機の空力特性を決める重要な要素である。しかし、離発着に伴う低速域(低 Re 数)での平面形状の議論について超音速複葉翼モデルではほとんどされていない。本研究では、低 Re 数での超音速複葉翼モデルの候補として、前進翼と後退翼の静的およびピッチング運動する動的な空力特性を、胴体と単葉モデルを平板形状で模擬し、本研究で開発した自作力天秤により風洞実験により調査した。

2. 研究成果の内容

実験装置および風洞試験の概要を図1に示す。図1(a)は平板による翼胴モデルで、この模型を後退翼および前後を反転して前進翼として用いた。図1(b)は本研究で開発した縦3分力の力天秤であり、翼模型にかかる空気力を天秤の歪みから検出する。特徴は揚力と抗力の感度を模型に応じて容易に設計変更できることである。図1(c)は自作の平行ルタイプのマニピュレータで、これを PC 操作して静的および動的な空力特性の実験データを取得した。実験条件を表1に示す。

図2に後退翼及び前進翼の動的及び静的な空力特性の結果を示す。また図3に静的な場合の L/D の結果を示す。動的な特性として、静的な空力特性を取り囲むようにヒステリシスループが形成されている。これは静的な状態に比べて翼周りの気流の形成に時間的遅れが発生し、ピッチアップの際はその時点よりも低迎角の流れが生じており、ピッチダウン時はその逆に高迎角の流れが形成されているためである。一方、図3から L/D は前退翼の方が後進翼より良い結果を与えることが分かった。迎角 24° 以上で両翼は失速するものの、前進翼の方が揚力およびピッチングモーメントにおける変化が小さく、空力特性としては優れているも分かった。この原因として、前進翼では翼端での剥離が遅れるためと考えられる。

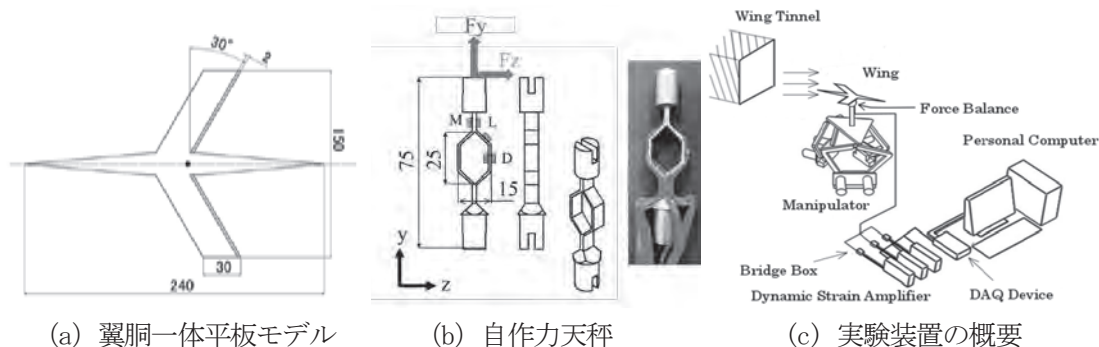


図1：実験概要

表 1：実験条件

	Static	Dynamic
V: Airflow velocity [m/s]	10 m/s	
Re: Reynolds number [-]	1.52×10^4	
α : Angle of attack [deg.]	$0^\circ \sim 30^\circ$	$15^\circ \pm 10^\circ$

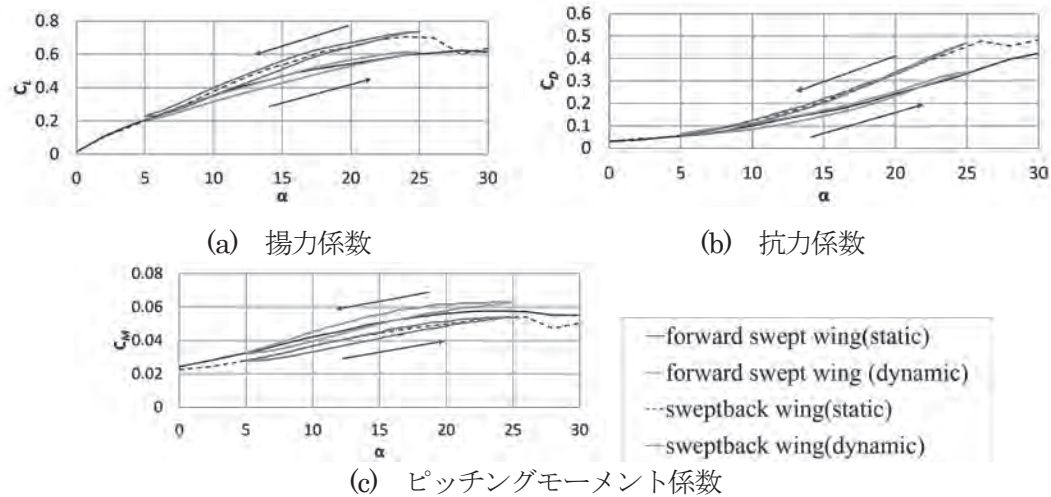


図 2：後退翼及び前進翼の静的及び動的な空力特性の比較

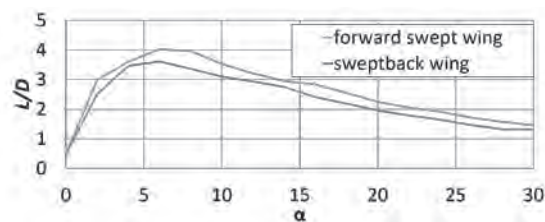


図 3：後退翼及び前進翼の揚抗比の比較

3. 研究目標の達成状況

本研究で開発した縦 3 分力の力天秤を用い、超音速複葉翼の候補として前進翼に注目して、翼胴を平板で模擬した単葉モデルの低 Re 数域での静的および動的（ピッチング運動）な空力特性を風洞試験により調査し、後退翼モデルと比較検討した。その結果、前進翼モデルは L/D 特性に優れ、さらに失速迎角近傍において揚力とピッチングモーメントに急激な変化を伴わないことから後退翼モデルより優位にあることが分かり、目標を達成した。

4. まとめと今後の課題

低速域での前進翼モデル、これは超音速複葉翼モデルの一候補であり、その空力特性の優位性を確認した。今後は、複葉化と高マッハ数風洞試験を計画している。

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] H. Tomoeda, Y. Iwamoto, S. Morizawa, H. Kawazoe and S. Obayashi: Experimental Study on the Dynamic Characteristics of a Forward Swept Wing in Pitching Motion, *Proc. 16th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 124-125.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16042
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1年目

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

小原 拓*†, 芝原 正彦**††, 菊川 豪太*

*東北大学流体科学研究所, **大阪大学大学院工学研究科

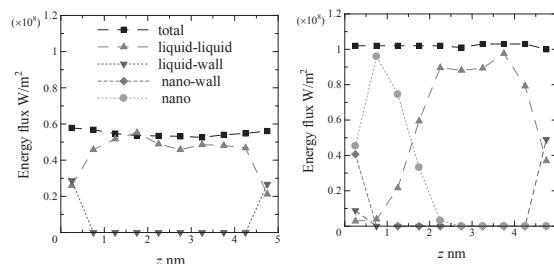
†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

(1)ナノ構造化界面 液体分子、壁面およびナノ粒子構成原子には、それぞれアルゴン分子、白金原子、炭素原子を仮定し、平行に配置された壁面で液体領域を挟んだ計算モデルを用いた。本モデルに対して、界面に付着したナノ粒子の結晶構造、特性スケール、濡れ性が固液界面近傍の熱抵抗やエネルギー輸送機構にどのような影響を与えるかを調べた。図1は、直径2nmのアモルファス構造の炭素ナノ粒子が付着することで固液界面近傍の熱抵抗が低下した場合の巨視的な熱伝導方向(z方向)に系を通過する熱流束の構成要素分布例を示す。図1より、炭素ナノ粒子が付着した界面では、液体分子間相互作用に起因する熱流束(liquid-liquid)はフラットな界面と比



(1) フラット界面

(2) ナノ構造化界面

図1: フラット界面およびナノ構造化界面における熱流束の構成要素分布

べて減少するが、ナノ粒子内を通過する熱流束 (nano) が増加することで、全体の熱流束 (total) が増加して界面熱抵抗が低下したことが分かる。

(2)結晶格子界面 金の FCC (001), (011), (100) 各結晶面が各種の直鎖アルカン液体と接している系に熱流束を印加した分子動力学シミュレーションにより、界面近傍の液体構造と固液界面熱抵抗を計測した。各種アルカンに対して同一の還元状態で解析するため、同じ対臨界温度を設定した。図2は金表面に吸着したアルカン分子層と金表面との距離を示したものである。横軸はアルカン分子の炭素数で、直鎖状分子の鎖長を表す。図より、液体分子の鎖長が増大するとともに固液間の距離が増大することがわかる。直鎖分子の両端にある炭素原子は他の炭素原子より金表面に近い位置に存在しており、鎖長の増大と共に分子両端の炭素原子が全炭素原子に占める割合が低下することが影響している。

固液界面に発生する温度ジャンプを熱流束で除して得られた固液界面熱抵抗を図3に示す。アルカンの鎖長が増大すると共に熱抵抗が大きく増加しているが、これは図2の固液間距離と傾向を同じくしており、液体分子の吸着構造の変化により固液界面熱抵抗が変化することを示している。

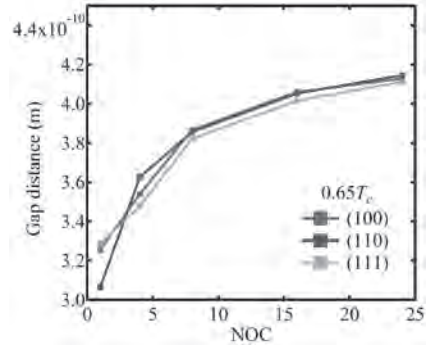


図2: 金のFCC各種表面とこれに接するアルカン液体の分子吸着層との距離

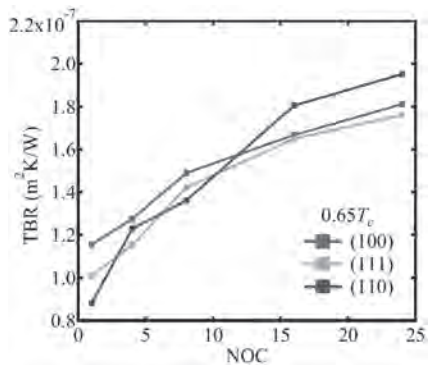


図3: 金-アルカン液体の界面熱抵抗

3. 研究目標の達成状況

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

4. まとめと今後の課題

今後は、固体表面構造と固液界面領域の熱抵抗の相関やスケールの変化に伴う支配メカニズムの変移、さらに固液界面の複合的な重畳効果について、さらに研究を発展させたい。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌

[1] M. Shibahara, Y. Miyazaki, Y. Ueki, T. Ohara: Molecular dynamics study on influence of nanoparticles on thermal resistance over a solid-liquid interface, *Proc. of the First Asian Conference on Thermal Sciences*, Jeju Island, Korea, March, (2017), ACTS-P00061.

*[2] Abdul Rafeq bin Saleman, Hari Krishna Chikukoti, G. Kikugawa, M. Shibahara and T. Ohara: A molecular dynamics study on the thermal transport properties and the structure of the solid-liquid interfaces between face centered cubic (FCC) crystal planes of gold in contact with linear alkane liquids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 105, February, (2017), pp. 168-179.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[3] M. Shibahara, G. Kikugawa, H. K. Chilukoti, T. Ohara: Mechanism of thermal energy transfer in nanoscale solid-liquid systems, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 84-85.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

Project code	J16043
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Kinetic Modeling of High-Pressure Surface Ionization Waves Generated by Ns Pulse Discharges

Hidemasa Takana*†, Hideya Hishiyama*
Benjamin Goldberg**, Marien Simeni Simeni**, Cheng Zhang**, 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 critical insight into fundamental mechanisms of formation and propagation of surface ionization waves in high-pressure plasmas, generated by high voltage, ns pulse duration electric discharges over dielectric surfaces. Such insight is critical to predictive analysis of high-speed plasma flow control, biomedical applications, and plasma-assisted ignition applications.

2. Details of program implement

The results have been presented at 13th International Conference on Flow Dynamics, October 10-12, 2016, Sendai, Japan: B.M. Goldberg, M. Simeni Simeni, C. Zhang, H. Takana, and I.V. Adamovich, “Four-Wave Mixing Measurements and Kinetic Modeling Predictions of Electric Field in a Quasi-Two-Dimensional Ns Pulse Discharge in Air”.

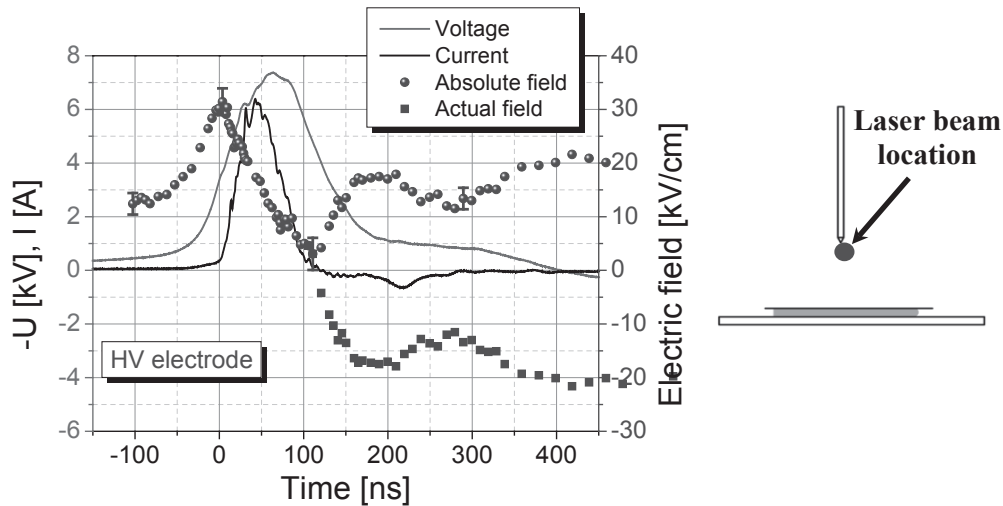


Figure 1. Time-resolved electric field ($t = -100 - 450$ ns) measured in the negative polarity discharge pulse at the conditions of Fig. 4, on the discharge center plane, ~ 100 μm below the high-voltage electrode. Approximate laser beam location is shown in the schematic.

3. Achievements

Temporally and spatially resolved electric field has been measured in measurements in a nanosecond pulse discharge in atmospheric air, sustained between a razor edge high-voltage electrode and a plane grounded electrode covered by a thin dielectric plate. The electric field is measured by picosecond four-wave mixing in a collinear phase-matching geometry, with time resolution of approximately 2 ns, using an absolute calibration provided by measurements of a known electrostatic electric field. The results demonstrate electric field offset on the discharge center plane before the discharge pulse due to surface charge accumulation on the dielectric from the weaker, opposite polarity pre-pulse. During the discharge pulse, the electric field follows the applied voltage until “forward” breakdown occurs, after which the field in the plasma is significantly reduced due to charge separation. When the applied voltage is reduced, the field in the plasma reverses direction and increases again, until the weak “reverse” breakdown occurs, producing a secondary transient reduction in the electric field. After the pulse, the field is gradually reduced on a microsecond time scale, likely due to residual surface charge neutralization by transport of opposite polarity charges from the plasma. Spatially resolved electric field measurements show that the discharge develops as a surface ionization wave. Significant surface charge accumulation on the dielectric surface is detected near the end of the discharge pulse. Spatially resolved measurements of electric field vector components demonstrate that the vertical electric field in the surface ionization wave peaks ahead of the horizontal electric field. Behind the wave, the vertical field remains low, near the detection limit, while the horizontal field is gradually reduced to near the detection limit at the discharge center plane. These results are consistent with time-resolved measurements of electric field components, which also indicate that vertical electric field reverses direction after the ionization wave.

4. Summaries and future plans

Future work will include comparison of the experimental data with kinetic modeling, and electric field measurements in plasmas sustained in flames and over liquid surfaces.

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] B.M. Goldberg, M. Simeni Simeni, C. Zhang, H. Takana, and I.V. Adamovich: Four-Wave Mixing Measurements and Kinetic Modeling Predictions of Electric Field in a Quasi-Two-Dimensional Ns Pulse Discharge in Air, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 76-77.
 - [2] M. Simeni Simeni, B.M. Goldberg, C. Zhang, K. Frederickson, W.R. Lempert, and I.V. Adamovich: Electric Field Measurements in a Quasi-Two-Dimensional Ns Pulse Discharge in Atmospheric Air, AIAA Paper 2017-1811, *55th AIAA Aerospace Sciences Meeting (SciTech 2017)*, Grapevine, TX, January, (2017).
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J16045
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

放電誘起水中衝撃波とマイクロバブルを用いた高効率な樹脂薄板破碎法の確立に関する研究
Study on High Efficiency Disintegration Method of Thin Resin Plate
Using Underwater Shock Wave Induced by Electrical Discharge and Microbubble

小板 丈敏*†, 孫 明宇**††

福島 祥夫*, 小林 晋***

*埼玉工業大学工学部, **東北大学流体科学研究所

***埼玉工業大学大学院工学研究科

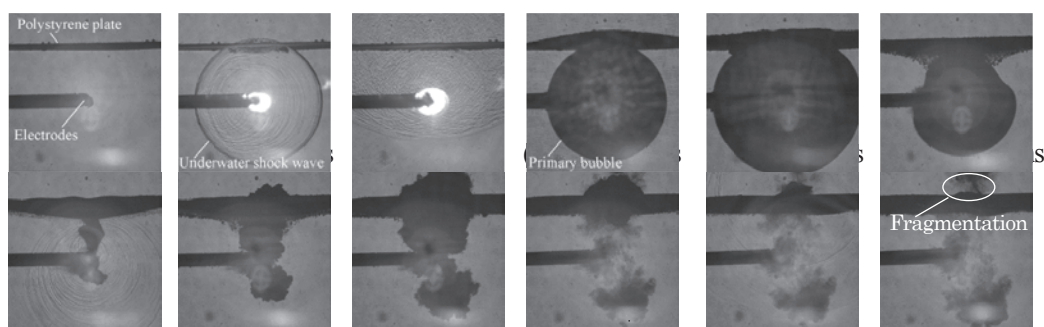
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

本研究では衝撃波破碎を用いた樹脂射出成形品の高効率バリ取り技術の開発を目指し、水中衝撃波とマイクロバブルの干渉で誘起されるリバウンド衝撃波圧力を用いて、従来の水中衝撃波の圧力負荷による破碎よりも高効率な樹脂薄板の破碎法の確立を目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究目的を達成するために、申請者（小板講師）と所内対応教員（孫准教授）が開発した放電発光強度を抑えた放電誘起高速現象の可視化計測法を用いて、爆発深さ L （放電電極と薄板との間の距離）の変化に対する、放電誘起の水中衝撃波および単一気泡とマイクロバブルの干渉による樹脂薄板破碎の一連の挙動を詳細に解明した。そして、マイクロバブルを活用した衝撃波樹脂薄板破碎を誘起する爆発深さ L を解明した。放電実験および可視化計測では、所内対応教員所有の放電装置、パルスダイオードレーザー（Cavilux HF）、高速度ビデオカメラ（PHANTOM V2010）を使用した。申請者所有の巡回方式マイクロバブル発生装置（M2-LM/SUS）を用いて、マイクロバブル（気泡直径 $D_{MB} = 10 \mu\text{m}$ ）をポリスチレン（PS）薄板の底面だけに付着させ、放電実験を行った。図1に放電エネルギー $E_e = 3.6 \text{ J}$, $D_{MB} = 10 \mu\text{m}$, $L / R_{\max} = 1.00$ ($E_e = 3.6 \text{ J}$ における放電誘起単一気泡の最大半径 $R_{\max} = 9.0 \text{ mm}$) でのマイクロバブルが付着した樹脂薄板に干渉する放電誘起の水中衝撃波と単一気泡、および、薄板の一連挙動の可視化画像を示す。



(g) $t = 2.167 \text{ ms}$ (h) $t = 2.317 \text{ ms}$ (i) $t = 2.707 \text{ ms}$ (j) $t = 3.107 \text{ ms}$ (k) $t = 3.237 \text{ ms}$ (l) $t = 3.767 \text{ ms}$

図1 樹脂薄板のマイクロバブル利用放電誘起破碎の可視化画像 ($E_e = 3.6 \text{ J}$, $D_{MB} = 10 \mu\text{m}$, $L / R_{\max} = 1.00$)

図1の可視化計測結果より、放電誘起水中衝撃波とマイクロバブルの干渉で誘起されるリバウンド衝撃波圧力だけでなく、放電誘起単一気泡の薄板への干渉による衝撃力によって、樹脂薄板の破砕が発生することを解明した。そして、 $E_e = 3.6 \text{ J}$ 、 $D_{MB} = 10 \mu\text{m}$ の場合、 $L/R_{\max} = 1.00$ において、樹脂薄板が破砕されることを解明した。

3. 研究目標の達成状況

研究目標の達成度はおおむね順調に進展したである。本申請の予想される成果は可視化計測による破砕現象の解明、破砕促進の実証による、水中衝撃波とマイクロバブルを用いた高効率な樹脂薄板破砕法の確立であった。本研究成果は1. 可視化計測を用いて、放電誘起の水中衝撃波および単一気泡とマイクロバブルの干渉による樹脂薄板破砕の一連現象を詳細に解明したこと、2. 薄板破砕を誘起する爆発深さの解明を行い、放電誘起水中衝撃波とマイクロバブルを用いた樹脂薄板破砕法を確立したことである。よって、これら研究成果により、研究目標をおおむね達成した。

本研究は新規研究であり、1年間で本研究成果を得た。そして、本研究成果を3件の学会発表（1件の国際発表、2件の国内発表）で公表した。また、申請者（小坂講師）が発表した本研究成果は平成28年度衝撃波シンポジウム（国内最大規模の衝撃波研究の学会）にて若手プレゼンテーション賞を受賞し、革新的衝撃波樹脂薄板破砕法として評価された。

4. まとめと今後の課題

可視化計測を用いて、マイクロバブルのリバウンド衝撃波圧力だけでなく、放電誘起単一気泡の薄板への干渉による衝撃力によって、樹脂薄板の破砕が発生することを解明した。可視化結果より、樹脂薄板破砕を誘起する爆発深さを解明し、放電誘起水中衝撃波とマイクロバブルを用いた衝撃波樹脂薄板破砕法を確立した。今後の課題は、本破砕法の高効率化を可能とするマイクロバブル半径の調査である。可視化計測を用いて、樹脂薄板底面に付着させるマイクロバブル半径の変化が本破砕法による樹脂薄板破砕現象に与える影響を解明する。本解明より、樹脂薄板の破砕をより効率的に発生させる最適なマイクロバブル半径を調査し、今後の本課題を解決する。

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] T. Koita, M. Sun, Y. Fukushima and S. Kobayashi: Experimental Study on Disintegration of Thin Resin Plate Using an Underwater Shock Wave Induced by Electrical Discharge and Microbubbles, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 126-127.

[2] 小坂丈敏, 小林晋, 孫明宇, 郭林世, 趙希祿, 福島祥夫: 放電誘起水中衝撃波負荷による薄板に付着したマイクロバブル群崩壊時の衝撃圧の理論解析, 第35回数理科学講演会論文集, (2016), A304.

*[3] 小坂丈敏, 孫明宇, 郭林世, 郭林世, 福島祥夫, 小林晋: 放電誘起水中衝撃波と単一気泡のマイクロバブルへの干渉を用いた樹脂薄板破砕に関する研究, 平成28年度衝撃波シンポジウム論文集, (2016), 3C1-3.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（受賞）平成28年度衝撃波シンポジウム若手プレゼンテーション賞, 放電誘起水中衝撃波と単一気泡のマイクロバブルへの干渉を用いた樹脂薄板破砕に関する研究, 小坂丈敏, 2017年3月22日, 日本衝撃波研究会.

課題番号	J16046
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

プラズマ流による気泡生成機構に関する研究

Clarification of Bubble Generation and Flow Dynamics in the Vicinity of an Electrode by Water Plasma

佐藤 岳彦*†, 中谷 達行**††

宮原 高志***, 大谷 清伸*, 中嶋 智樹*

*東北大学流体科学研究所, **岡山理科大学技術科学研究所

***静岡大学大学院総合科学技術研究科

†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気泡や電極近傍の熱流動場の形成過程や気泡生成に伴う水質の変化について検証し、プラズマ医療や環境浄化への応用に向けた基盤とする。特に、プラズマによる気泡生成機構の解明や微細気泡の検証方法を開発し、微細気泡科学の確立への貢献を目指す。

2. 研究成果の内容

平成 28 年度は、平成 27 年度に検証した膨張波と気泡生成の相関を利用して、微細気泡の固気判別法の開発に取り組んだ。図 1 に実験装置の概要を示す。ここでは、超音波造影剤を利用して直径 2 μm 程度の安定した気泡を生成し、容器内に注入した。27 年度の成果より、膨張波を通過させることでこれらの微細気泡が膨張しキャビテーション気泡を形成することを確認している。そこで、直径 5 μm のアクリル微粒子を容器内に分散させ、キャビテーション気泡が形成されるかどうかについて検証した。その結果、図 2 に示すように、超音波造影剤による気泡の場合は、その濃度に応じて発生する気泡数が増大するのに対し、アクリル微粒子の場合は、気泡の発生は観察されなかった。これらの結果より、2～5 μm 程度の直径を有する気泡と固体粒子の判別を可能にすることに成功した。

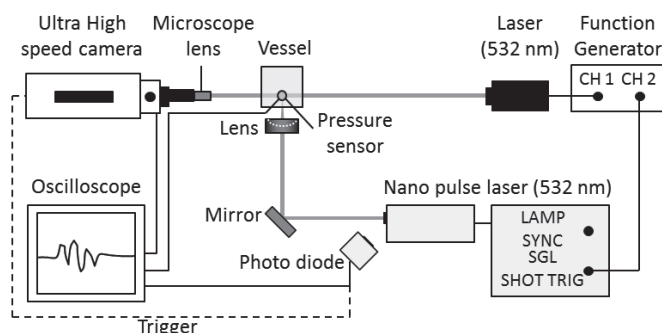


Fig. 1 A schematic of experimental setup for observing growth of cavitation bubbles by application of the expansion wave for the micro bubbles and acrylic particles.

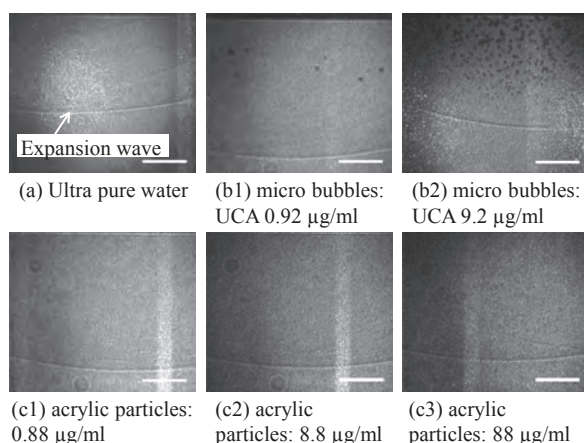


Fig. 2 Visualization of water after passing the expansion wave. Bubble growth was observed only in the case of micro bubbles.

3. 研究目標の達成状況

本年度は、超音波造影剤により生成した直径 2 μm 程度の微細気泡と直径 5 μm 程度のアクリル粒子の違いを、膨張波を通過後のキャビテーション気泡の発生の有無を観察することで判別することに成功したことから、本年度の目的を達成したと考えている。

4. まとめと今後の課題

本年度は、微小粒子・気泡の固気判別法の開発に成功したが、さらにナノスケールにおいても固気判別が行えるように発展させることを目指す。

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] T. Sato, M. Oizumi, T. Nakatani and T. Miyahara: Improvement of functionality of water by plasma discharge, *1st International Workshop on Plasma Agriculture (IWOPA-1)*, Camden, NJ, USA, (2016), Abstract No. 43.

*[2] T. Sato, Y. Nagasawa, T. Nakajima, K. Ohtani, T. Miyahara, and T. Nakatani: Development of Bubble Measurement Method by Plasma-generated Shockwave, *Proceedings of the 16th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFT-2016)*, Sendai, (2016), pp. 2-3.

[3] T. Sato, T. Miyahara, M. Oizumi and T. Nakatani: Polarity effect on plasma in water for water quality improvement, *1st International Conference on Hybridized Agriculture (HA2016)*, Kumamoto, (2016), Presentation No. I22-2. (Invited)

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) 特願 2016-196754 微細気泡固気判別方法および装置, 佐藤岳彦・中嶋智樹・長澤洋平・中谷達行, 2016.10.4, 出願。

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

課題番号	J16047
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

衝撃波の細胞内伝播動態の解析
Mechanism of Shock Wave Propagation within the Cell

中川 敦寛*†, 中川 桂一**, 大谷 清伸***††
 *東北大学病院, **東京大学大学院理学系研究科
 ***東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は、衝撃波の細胞内伝播という超高速複雑ダイナミクスを捉えるために必要な高速度画像装置の開発を行うことである。次いで、高速度画像装置と衝撃波照射デバイスおよび顕微鏡を組み込んだシステムにて可視化を行い、最後に細胞と衝撃波のインタラクションの解明に取り組むことである。

2. 研究成果の内容

高速度画像装置の開発については、一連の研究から、衝撃波の細胞内伝播という超高速複雑ダイナミクスを捉えるために必要なスペックとしては、フレームレート 1 Gfps, 連続撮影枚数 25 枚, 空間解像度 400×400 pixels は必要であると考えられており、このスペックを満たす撮影システムとなるようパラメータの設定と検証を実施し、可視化自体の目途がつきつつある。同時に生体と衝撃波のインタラクションについて模擬モデルを用いた高速度画像を継続、知見を蓄積した。本研究成果を派生させたマイクロジェットの医療応用については基礎段階から臨床段階まで多くの知見が得られた。

3. 研究目標の達成状況

高速度画像装置の開発に関しては、細胞内衝撃波伝播の可視化において求められるスペックとなる、フレームレート 1 Gfps, 連続撮影枚数 25 枚, 空間解像度 400×400 pixels を実現する撮影システムの開発に向け、まずは可視化の目途をつけた。最適化については現在取り組んでいる。概ね予定通りの進捗である。

平成 28 年度は衝撃波照射系の構築として音響的に生体内を模擬したゼラチン等を用いたサンプルと、衝撃波照射デバイスの作製（放電式あるいはレーザー光を用いる）を行い、既存高速度カメラ(フレームレート 0.2 Gfps)での実験を継続し、細胞培養系での予備実験に移行に取り組んだ。

4. まとめと今後の課題

細胞内の衝撃波伝播を可視化することが実現することにより、生体組織に対する音波作用に関する直接的かつ本質的な情報を提供することが期待できる。この結果は血管新生や骨成長など既知の効果のメカニズム解明だけでなく、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、音波の新たな再生・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。最適化を含めた画像系の深化に難渋しており、次年度の課題である。

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] Nakagawa A, Ohtani K, Goda K, Kudo D, Arafune T, Washio T, Tominaga T: Mechanism of Traumatic Brain Injury at Distant Locations After Exposure to Blast Waves: Preliminary Results from Animal and Phantom Experiments, *Acta Neurochir Suppl*, 2016;122:3-7.
- [2] Nakagawa A, Kumabe T, Ogawa Y, Hirano T, Nakano T, Yamamoto H, Ohtani K, Satomi S, Takayama K, Tominaga T: Pulsed laser-induced liquid jet: evolution from shock/bubble interaction to neurosurgical application, *Shock Waves*, (2017.1), Vol. 27, No. 1, pp. 1–14.
- [3] Endo T, Wenting J, Nakagawa A, Endo H, Sagae Y, Iwasaki M, Tominaga T: New Application of Actuator-Driven Pulsed Water Jet for Spinal Cord Dissection: An Experimental Study in Pigs. *Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*; March, (2017), Vol. 78, pp. 137-143.
- [4] Nakano T, Sato C, Yamada M, Nakagawa A, Yamamoto H, Fujishima F, Tominaga T, Satomi S, Ohuchi N: A laser-induced pulsed water jet for layer-selective submucosal dissection of the esophagus, *Laser Ther*, (2016), Vol. 25(3), pp. 185-191.
- [5] Takahashi Y, Iwasaki M, Nakagawa A, Sato S, Nakasato N, Tominaga T: Predicting Tissue Breaking Strengths in the Epileptic Brain with T2 Relaxometry: Application of Pulsed Water Jet Dissection System for Epilepsy Surgery. *Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*. 2016 Nov 30. [Epub ahead of print].
- [6] Endo H, Endo T, Nakagawa A, Fujimura M, Tominaga T, Application of actuator-driven pulsed water jet in aneurysmal subarachnoid hemorrhage surgery: its effectiveness for dissection around ruptured aneurysmal walls and subarachnoid clot removal. *Neurosurg Review*, (2016), [Epub ahead of print].
- [7] 中川敦寛，大谷清伸，富田博秋，久志本成樹，Armonda R，富永悌二：爆風による外傷性損傷：テロ対策の観点から，安全工学学会誌，(2016)，Vol. 55，No. 6，pp. 441-446.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [8]（基調講演）Nakagawa A, Ohtani K, Armonda R, Tominaga T. Mechanism of bTBI: Insights from shock wave research, *Japan-US Technical Information Exchange Forum on Blast Injury (JUFBI 2016)*, 東京，ニュー山王ホテル，2016年6月13日～16日。
- [9]（ポスター）Nakagawa A, Ohtani K, Nakagawa K, Tominaga T. Mechanism of bTBI: Evaluation of wave transmission by shock wave brain injury model, *16th International Symposium on Intracranial Pressure*, MIT Boston, MA, 2016年。
- *[10] Nakagawa A, Ohtani K, Harada N, Tominaga T: Mechanism of shock wave propagation within the cell, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 86-87.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16050
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3年目

タンパク質のシグナル配列の物理化学的性質と細胞内小器官への輸送に関する研究
Correlation between Physicochemical Properties of Protein Signal Sequence Variation and Subcellular Transportation

池田（向井） 有理*†, 太田 信**††, 越中谷 賢治***

亀卦川 樹***, 飯淵 友直*

*明治大学理工学部, **東北大学流体科学研究所

***明治大学大学院理工学研究科

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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。一方で、タンパク質の細胞内局在化のエラーが、がんや神経性疾患を引き起こすことも知られている。本研究では、異なるタンパク質局在化シグナル配列を用いて、生存細胞の蛍光観察から細胞内局在化経路や局在化効率を評価することにより、目的のタンパク質を適切な細胞内小器官に輸送する手法の確立を目指す。

2. 研究成果の内容

Ⅱ型膜貫通型タンパク質の膜貫通領域『シグナルアンカー』は通常 10～30 残基の疎水性アミノ酸からなり、小胞体標的シグナルとしても働くことが明らかにされている。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解明されていない。

本研究ではまず、Ⅱ型膜貫通型タンパク質の局在要因解明を目的として、シグナルアンカー周辺のアミノ酸出現傾向のバイオインフォマティクス解析を行った。その結果、細胞内局在性ごとにアミノ酸の出現傾向に偏りがあることが示され、小胞体から先の局在化機構にも、シグナルアンカーが関与している可能性が考えられた。

次に、細胞内小器官ごとにモデルタンパクを選び、モデルタンパク質のシグナル

アンカーの下流に GFP を結合させたキメラタンパク質を HeLa 細胞内で発現させ、それらの細胞内局在性を評価した（図 1）。その結果、Ⅱ型膜貫通タンパク質の細胞内局在性（小胞体局

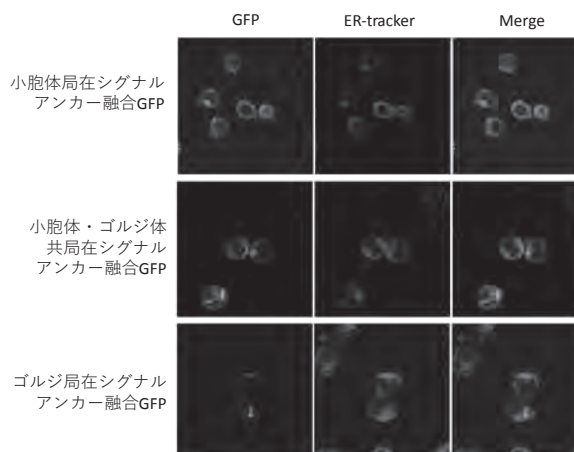


図 1. 細胞内局在性が異なるⅡ型膜タンパク質のシグナルアンカー領域を GFP に導入して HeLa 細胞に発現させ、細胞内局在性を観察した（上: PMGT2_HUMAN 小胞体局在タンパク質シグナルアンカー融合 GFP, 中: B3GLT_HUMAN 小胞体・ゴルジ体共局在タンパク質シグナルアンカー融合 GFP, 下: B3GN6_HUMAN ゴルジ体局在タンパク質シグナルアンカー融合 GFP）

在, 小胞体ゴルジ体共局在, ゴルジ体局在) と, シグナルアンカー融合 GFP タンパク質の局在性とが, よく一致した. したがって, II 型膜貫通型タンパク質のシグナルアンカー領域は, 小胞体標的のみならず, 小胞体から先の細胞内局在性にも関与していることが示された.

3. 研究目標の達成状況

タンパク質のシグナル配列のうち, シグナルアンカー領域の役割について, バイオインフォマティクスと細胞分子生物学実験を組み合わせることにより明らかにすることができた. 2016 年度計画に含まれていた実験の遂行と学会発表については計画通りであったが, 論文は投稿中である.

4. まとめと今後の課題

II 型膜タンパク質のシグナルアンカー領域は, 細胞内局在性によりアミノ酸配列の特性が異なっていることが, バイオインフォマティクス解析と分子生物学実験により示された. 今後は, シグナルアンカー配列の変化による細胞内局在化経路の変化を詳細に観察し, シグナルアンカーの物理化学的性質とタンパク質の細胞内輸送経路と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] Y. Mukai, D. Takahashi, K. Inoue, H. Sugita, T. Kikegawa, K. Etchuya: Secondary structure of GPI attachment signal region monitored by circular dichroism, *Chemistry Letters*, Vol. 45, No. 10, (2016), 1153-1155.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] T. Kikegawa, T. Iibuchi, K. Etchuya, M. Ohta, N. Kato, Y. Mukai: Correlation between physicochemical properties of protein signal sequence variation and subcellular transportation, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI 2016)*, Sendai, (2016), pp. 88-89.
- [3] K. Etchuya, T. Kikegawa, Y. Mukai: Correlation between protein subcellular localization and sugar variation, *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2016)*, Sendai, (2016), pp. 306-30.
- [4] K. Etchuya, Y. Mukai: Environment factor depending on each type around O-glycosylation sites in mammalian proteins, *15th European Conference on Computational Biology*, Netherlands, (2016).
- [5] T. Kikegawa, H. Sugita, R. Nambu, N. Kato, Y. Mukai: Identification of the subcellular localization factors of transmembrane proteins, *15th European Conference on Computational Biology*, Netherlands, (2016).
- [6] 宮坂豪, 越中谷賢治, 向井有理『糖転移酵素の糖選択性とタンパク質認識に関わるアミノ酸の解析』第 54 回生物物理学会年会, つくば, 2016 年 11 月.
- [7] 井上慶也, 高橋大輝, 亀卦川樹, 越中谷賢治, 向井有理『GPI アタッチメントシグナル領域の二次構造解析』第 54 回生物物理学会年会, つくば, 2016 年 11 月.
- [8] 亀卦川樹, 加藤徳剛, 向井有理『一回膜貫通型タンパク質のアミノ酸出現傾向と細胞内局在の相関』第 39 回日本分子生物学会年会, 横浜, 2016 年 11~12 月.
- [9] 北田洋平, 寺崎武夫, 向井有理『細胞の形態変化に影響を与えるタンパク質の網羅的検出』第 39 回日本分子生物学会年会, 横浜, 2016 年 11~12 月.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J16051
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2016.4~2017.3
継続年数	1 年目

低・高温プラズマ気流の特性解析とその材料表面に与える影響
Analysis of Low and High Temperature Plasma Characteristics
and Its Effects on Material Surface

山田 剛治^{*†}, 大林 茂^{**††}
川添 博光^{***}, 中西 基浩^{***}, 水口 貴弘^{***}
^{*}東海大学工学部, ^{**}東北大学流体科学研究所
^{***}鳥取大学大学院工学研究科
[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

これまで低温の表面波プラズマ(SWP)特性について調査してきた。本研究では、分光器による非接触計測法を適用して酸素プラズマの解離度を求める。また解離度が材料表面改質へ及ぼす影響を調査する。高温プラズマについては、アークプラズマ気流(CO₂-N₂ ガス)の CN について分光計測により調査をしてきた。本研究では、NO, O₂ など複数の化学種のプラズマ組成を解析し、詳細なプラズマ気流の熱的・化学的特性を解明する。

2. 研究成果の内容

低温表面波プラズマに関しては、アクチノメトリー法を用いて酸素プラズマの解離度を計測した。プラズマの生成はマイクロ波励起の表面波プラズマ装置により行った。装置と計測系の概要図を図1に示す。投入電力は400W、トレーサーガスにはアルゴンを使用し、投入量は酸素投入量の4%とした。また酸素投入量は50, 100, 150, 200sccmの4種類とし、分光計測点はチャンバ中央を設定した。実験結果を図2に示す。図に示すように酸素流量50sccmでは解離度が小さいことが分かる。また100sccmから200sccmの範囲において解離度がほぼ等しくなっている。高温プラズマの研究に関しては、中空電極型アーク加熱風洞の発生部である放電室内において作動ガスにCO₂-N₂(96%-4%)混合気体を用いて発光スペクトルの分光計測を行った。アーク加熱風洞の出力は9kw、流量は9L/minである。CN violet $\Delta v=(0,0)$ のバンドスペクトルを高分解能計測したところ、CN以外の化学種の発光の影響を受けていることが分かった。そこで、低分解能で広い波長範囲のスペクトルを取得し、どの化学種の発光強度がCNの発光に影響を与えているのか調査を行った。図3に示すように、発光にはCNの他にO₂, NOの発光が大きな影響を与えていることが分かった。この結果より、高分解能計測したCN violet $\Delta v=(0,0)$ のバンドスペクトルに対しスペクトルフィッティング法を用いて温度推定を行った。スペクトルフィッティングの結果を図4に示す。この結果より中空電極型アーク加熱風洞の放電室内における作動ガスをCO₂-N₂(96%-4%)としたプラズマ気流の振動温度は約4400K、回転温度約5000Kであることが得られた。

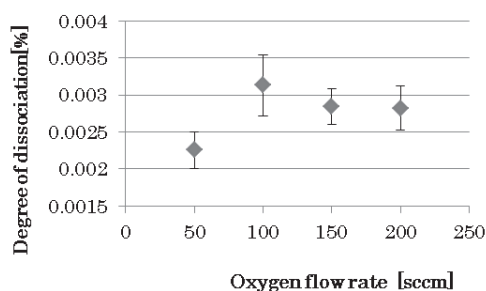


図1：表面波プラズマ装置及び計測系

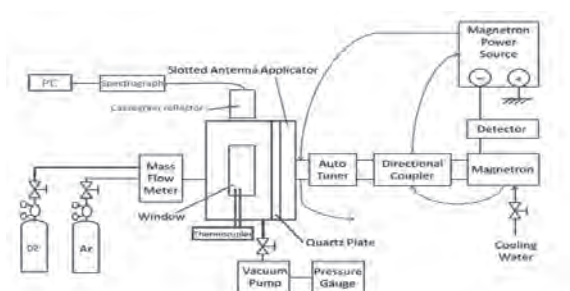


図2：酸素プラズマ解離度

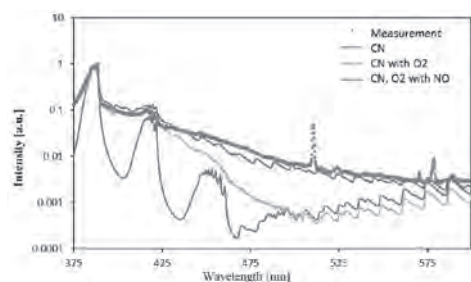


図3：広波長範囲における波形調査

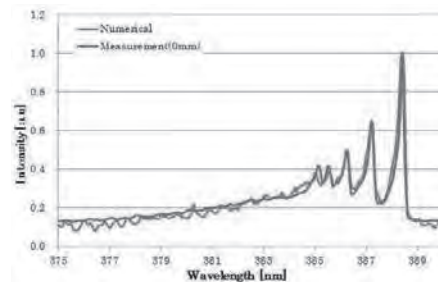


図4：スペクトルフィッティング結果

3. 研究目標の達成状況

低温プラズマの研究では、アクチノメトリー法を用いて酸素プラズマの解離度を計測することができた。高温プラズマの研究では、低電力のアーク加熱風洞において高温の $\text{CO}_2\text{-N}_2$ プラズマの発生部である放電室内での熱的・化学的特性が解明された。

4. まとめと今後の課題

低温プラズマの研究では、アクチノメトリー法を用いて酸素プラズマの解離度を評価した。今後は材料改質との関連性に関して調査を行う。高温プラズマの研究では、低電力のアーク加熱風洞の放電室内におけるプラズマ気流の解析を行った。今後は下流部における気流の解析を行う。

5. 研究成果（※は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] M. Nakanishi, Y. Nakao, G. Yamada, S. Morizawa, and H. Kawazoe: Analysis of $\text{CO}_2\text{-N}_2$ Plasma Flow in the Discharge Chamber of an Arc Heating Wind Tunnel, *The 6th Joint Symposium on Mechanical and Materials Engineering between Northeastern University, Dailian University of Technology and Tottori University*, Tottori, (2016), p. 31.

[2] S. Mizuuchi, T. Mizuguchi, G. Yamada, S. Morizawa and H. Kawazoe: Dissociation Analysis of Oxygen Plasma for Material Surface Modification, *The 6th Joint Symposium on Mechanical and Materials Engineering between Northeastern University, Dailian University of Technology and Tottori University*, Tottori, (2016), p. 24.

*[3] M. Nakanishi, G. Yamada, T. Mizuguchi, H. Kawazoe, and S. Obayashi: Flow Characteristics of $\text{CO}_2\text{-N}_2$ Plasma in the Hollow Electrode Arc Heater, *the 16th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 128-129

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）なし

課題番号	J16053
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3年目

水中におけるストリーマ進展機構 Propagation Mechanism of Streamer in Water

佐藤 岳彦*†, 金澤 誠司**††, 金子 俊郎***
大谷 清伸*, 小宮 敦樹*, 中嶋 智樹*, 熊谷 諒***
*東北大学流体科学研究所, **大分大学工学部
***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、進展速度の遅い負極性ストリーマの進展過程の解析を進めることで電荷移動機構について検討した。図1に電流・電圧波形と同期した負ストリーマの進展過程を示す。(a)はレーザーを背景光とし、露光時間 50 ns, フレームレート 10 Mega frame

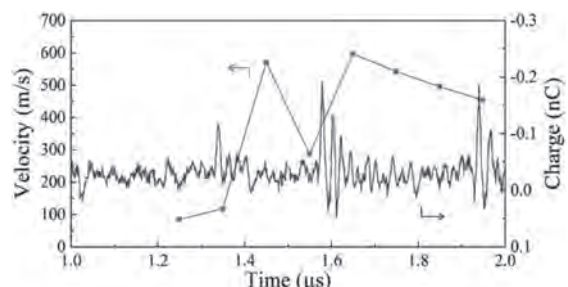
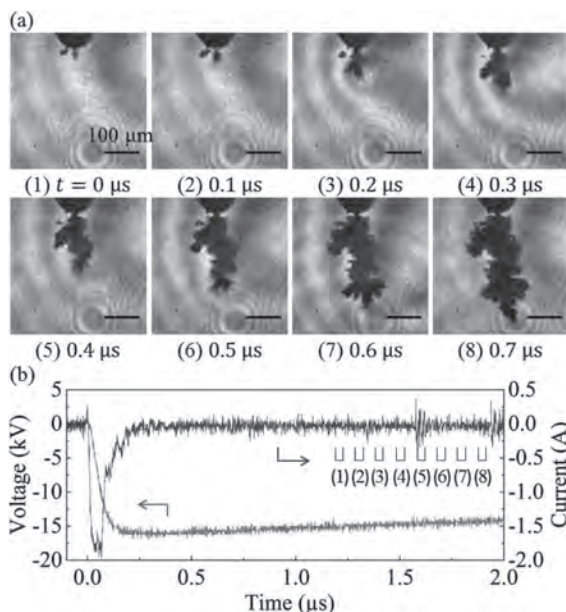


Fig. 2 Propagation velocity obtained from Fig. 1 and the amount of electric charge for 10 ns.

Fig. 1 (a) A series of shadowgraphs of the negative streamer propagation taken by using a laser as a backlight with an exposure time of 50 ns at 10 Mfps when the voltage of -18 kV was applied and (b) the synchronized waveforms of the applied voltage and the discharge current.

per second (Mfps)で撮影した連続写真を抜粋したもの、(b)はその時の電流・電圧波形を表し、同時にカメラゲートを示した(連続写真(a)の時間は最初のゲートからの経過時間を示す)。電圧の立ち上がり時に2 A程度の変位電流が観測され、約1 μ s後にストリーマの進展が始まる。図2に、図1でのストリーマ進展速度と電流波形から求めた電荷量の変化を示す。ストリーマは大きい進展(1.4 μ s, 1.6 – 1.7 μ s)と小さい進展が交互に起こりつつ成長することが示された。これは電荷量が増える時に進展していることより、放電による進展であると考えられる。このように繰り返しのパルス状電流波形はストリーマがパルス電流毎に間欠的に進展していることを示唆している。電流パルス発生時の放電直後の進展速度は500 – 600 m/sであり、その間における進展速度は約100 – 300 m/sであることが示された。速い進展は放電に伴うストリーマ先端の電界集中に起因し、遅い進展は熱膨張が原因と考えられる[2]。

3. 研究目標の達成状況

本年度は、負極性ストリーマの進展過程を可視化することで、正極性ストリーマと異なる進展過程であることを明らかにした。特に、放電発生時に生成される電荷がストリーマ進展に直接影響を与えていることを放電電流と進展速度の関係から示した。これは、本課題の目的である水中放電の進展機構において正負電荷の役割の違いを示唆する重要な知見を与える成果であり、本年度の目標を達成することができた。

4. まとめと今後の課題

本年度は、負極性ストリーマの進展機構の可視化に成功し、放電電流と進展速度の相関を示すことができた。今後は、断続的に進展する機構について詳細に解析を進める。

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)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] R. Kumagai, S. Kanazawa, A. Komiya, K. Ohtani, T. Kaneko, T. Nakajima and T. Sato: Observation of propagation process of negative streamer in water, *6th International Conference on Plasma Medicine (ICPM6) - Book of Abstracts, Bratislava, Slovakia*, (2016), p. 153.

[2] 佐藤岳彦, 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 金子俊郎: 水中ストリーマ放電の開始・進展機構, 仙台“プラズマフォーラム”, (2017.1). (招待講演)

外 国際学会 3 件 国内学会 1 件

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞)

[1] エクセレント・プレゼンテーション・アワード, 負極性水中放電におけるストリーマチャネルの可視化, 熊谷諒, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 金子俊郎, 佐藤岳彦, 2016.9.30, 第40回静電気学会全国大会.

[2] Excellent Oral Presentation Award, Highly Temporal Visualization of Propagation Process of Underwater Negative Streamer, Ryo Kumagai, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, Toshiro Kaneko and Takehiko Sato, December 16, 2016, 3rd Taiwan-Japan Workshop on Plasma Life Science and Technology (2016TJPL).

(マスコミ発表) なし

課題番号	J16054
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3 年目

カルマン渦列の周波数選択機構の究明と渦列形成の抑制
Frequency-Selection Mechanism of Karman Vortices and Vortex Suppression

高木 正平*†, 小西 康郁**, 奥泉 寛之**, 大林 茂**††
 *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, ††所内対応教員等

1. 研究目的

円柱や二次元鈍頭物体あるいは二次元翼後流に形成される規則的なカルマン渦列について、これまでの共同研究で確立した渦列形成抑制手法を用いて渦周波数の決定機構を究明すること、すなわち、渦周波数が決定される位置を特定することである。

2. 研究成果の内容

今年度は関連した3種類の実験を3回実施した。最後の実験は本課題の最終目的を達成するための位置付けである。以下に各実験の成果を報告し、最後に成果をとりまとめる。

2.1 前縁が半楕円の平板実験

二次元翼 NACA0010 後流に成長する狭帯域攪乱の成長に feedback 機構が寄与しているかどうか調べるために、模型の厚みを固定してコード長のみ異なる楕円前縁をもつ平板を4種類擁して、その後流に成長する不安定変動の高分解能のスペクトル解析を行った。feedback 機構の介在を明示する結果は得られなかった。

2.2 翼型 NACA0010 後流計測

二次元翼 NACA0010 後流に成長する狭帯域攪乱の増幅特性について、主流速度を6通り変え平均速度と変動成分を高精度の計測し、基本流データを取得した。

2.3 NACA0006 後流における周期攪乱の出現位置の同定実験

薄板を ON/OFF した時刻から後流の渦列が定常に達する直前（任意に引いた赤の基準線）に位相が最も進んだ $X=6\text{mm}$ の位置を右矢印で示した。この X 位置が狭帯域変動の実現点と結論付けた。

3. 研究目標の達成状況

今年度3回実験を実施した。いずれも今年度の目標を達成できた。特に最後に実施した実験で探し続けていたカルマン渦列の周波数を決定する位置をようやく特定することができた。この意味で達成率は100%である。

4. まとめと今後の課題

最後の実験でカルマン渦列の周波数が決定される位置を特定できたが、1つ気がかりな点

は渦列を抑制する小平板の設置位置が予定より上流側になり、渦列を抑制する小平板の迎え角を大きくしなければならなかった点である。その結果、小平板の迎え角がある場合とない場合の基本流が大きく異なってしまった。再実験して、納得できるデータを取得したいと願っている。

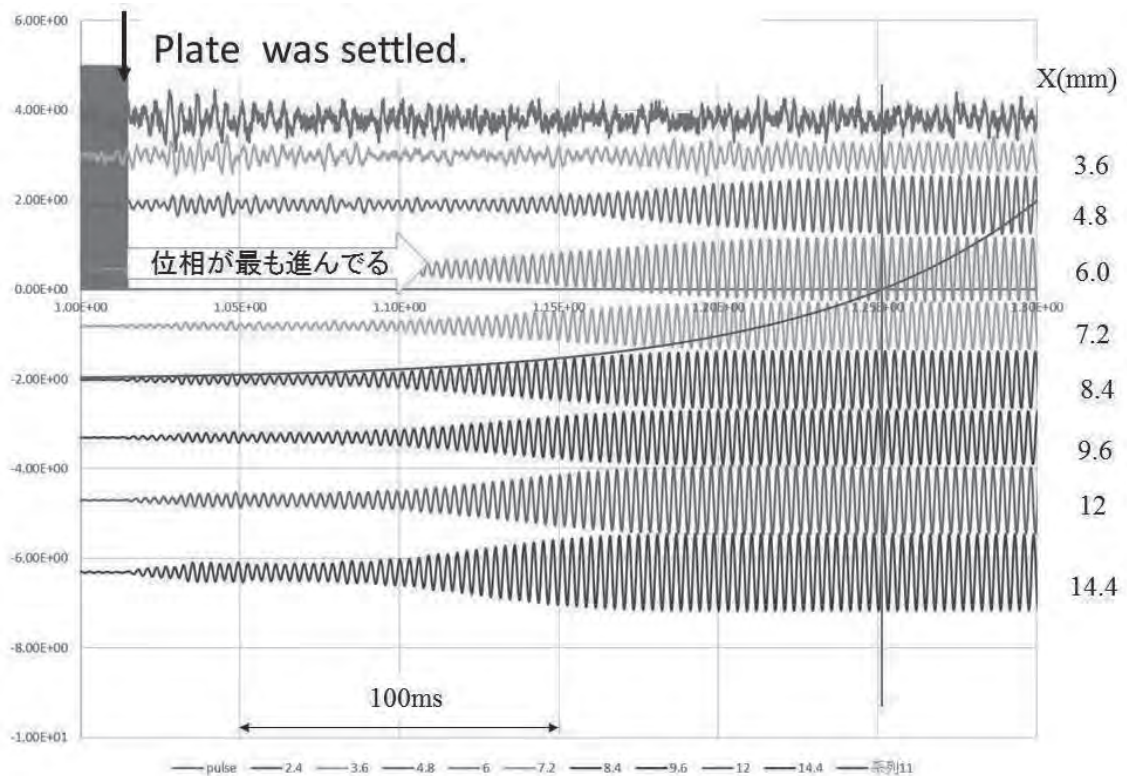


図 1. NACA0006 後流の様々な流れ方向 X における変動の位相比較。
縦の赤線は位相比較のため挿入（渦抑制 ON mode から OFF に小平板を回転）

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] Takagi, S., Konishi, Y., Obayashi, S. & Asai, M.: Control of Karman Vortex Street behind a Thin Airfoil at Low Reynolds Number, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, Vol. 4, No. 3, (2016), pp. 114-123.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] S. Takagi, Y. Konishi, H. Okuizumi and S. Obayashi: Wake Instability Behind Elliptic-Nose Flat Plates at Low Reynolds Number, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 130-131.
- [3] S. Takagi, Y. Konishi, N. Itoh, M. Asai and S. Obayashi: Detection of a logarithmic singular point behind an airfoil model at low Reynolds numbers, *Proceedings of the Twenty-fourth International Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, Montreal, Canada, (2016).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）なし

課題番号	J16056
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	2016.4～2017.3
継続年数	1年目

時間変化を伴う温度境界条件下での閉空間内流動評価

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

小宮 敦樹*†, Nicholas Williamson**††, 岡島 淳之介*

*東北大学流体科学研究所, **The University of Sydney

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、温度境界条件が時間変化する系における閉空間内温度差自然対流の流体挙動を、光計測技術を利用した計測システムで可視化実験を行い、時空間的に高解像度で温度境界層の評価を行う。あわせて三次元数値計算を行い、時間変化する温度境界条件により温度境界層の制御が可能であるかについて明らかにする。

2. 研究成果の内容

本研究では、自然対流の不安定性に関する三次元数値シミュレーションを行い、特に閉空間内における周囲境界条件の流動現象への影響について数値解析的なアプローチを行い、その挙動を明らかにした。現時点で問題となっている伝熱現象としては、自然対流を引き起こす重力加速度の方向が変化した場合、閉空間内にどのような流動パターンが形成され、それが対流熱伝達にどのように影響を及ぼすかである。そこで本年度は、重力加速度の方向を変化させる計算をパラメトリックに行い、図1に示す **Regime map** を作成した。図中、○印は二次元定常流動場を示しており、広範なレイリー数 (Ra) 領域においても、閉空間セルの傾斜角度 (θ) が小さければ定常流動状態を維持していることがわかる。また、+印は三次元定常流動場を示しており、傾斜角度が大きくなるにつれて流動様相が二次元から三次元に遷移することが明らかとなった。△印は二次元定常流れではあるが、2つの局所渦を有する流れであり、同傾斜角でも高 Ra 側で顕著に観察された。

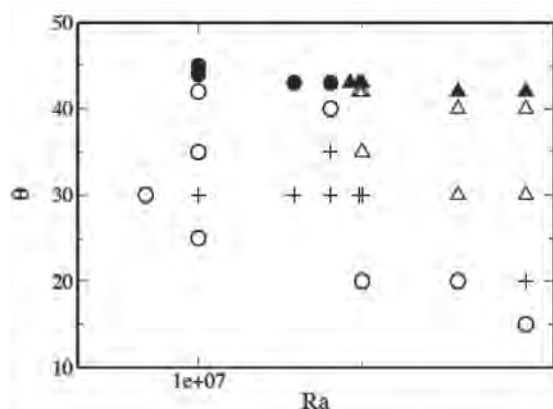


図1: Ra と傾斜角 θ の関係を示した Regime map

●および▲印は境界層において二次元不安定性を呈した流動場を示しており，広範な Ra において傾斜角が大きくなるにつれて観察された．一例を図 2 に示す．

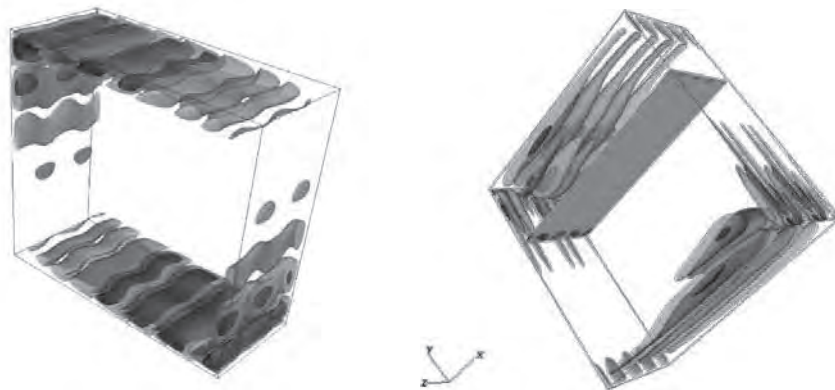


図 2：二次元不安定性を有した流動場の等温度線図

3. 研究目標の達成状況

本研究では，自然対流熱伝達における境界層の制御とその伝熱促進利用を目的としており，本研究の成果から対流熱伝達現象を利用した伝熱促進および抑制技術等の熱デザインの分野の一助となる知見を得ることが期待できる．これに対し，本年度の成果により，閉空間流動場にかかる重力加速度と流動場の関係が明らかとなり，これは伝熱促進技術に大きく資するものであると考えられ，全体としては 80%の達成度と評価することができる．

4. まとめと今後の課題

今年度は，主として重力加速度の方向を変化させる計算をパラメトリックに行い，重力加速度と流動場の関係を明らかにした．これにより，自然対流の不安定化遷移に関してより詳細な情報を取得することができたと言える．今後は温度境界条件が時間的に変化するとき閉空間内流体がどのような挙動をとり，温度境界層との関係性はどのようなものになるかについて，広範な Ra 条件下において実験的に明らかにしていく．

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）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] N. Williamson, A. Komiya, S. Armfield: Inclined Differentially Heated Cavity: Transition to Unsteady Flow, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 66-67.

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	J16057
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	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

傾斜キャビティ内流れの不安定性評価

Evaluation of Flow Instability in Tilted Cavity Configuration

小宮 敦樹*†, Daniel Henry**††, 岡島 淳之介*

*東北大学流体科学研究所, **Ecole Centrale Lyon

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、傾斜する立方体形状閉空間内の温度差自然対流現象に関して三次元数値計算を行い、流動場が不安定となる温度差、重力方向の影響等の諸条件について詳細解析を行う。並行して、自然対流現象に関して光計測技術を利用した温度場・流動場同時計測システムを用いて流動場可視化実験を行い、流動場が不安定となる温度差、重力方向の影響等の諸条件について評価する。

2. 研究成果の内容

本研究では、昨年度来よりフランス Ecole Centrale Lyon 側で閉空間内流れ三次元数値シミュレーションを行っており、広範なレイリー数 (Ra) 領域における流動場の様相を引き続き詳細検討している。この計算結果を実証するにあたり、これまでに平空間キャビティ内自然対流現象における温度場と流れ場の同時計測システム構築を行ってきた。しかしながら、閉空間セル左右の断熱境界条件を完全に実現できずに、計算結果との比較が困難となっていた。そこで本年度は、精緻な計測セルの製作に取り組み、その性能評価を行った。図1に改良した計測セルを、図2に $Pr = 5.9$ の作動流体における計測によって得られた温度場の様子を示す。図2から明らかなように、平空間内左右壁面において、位相シフトデータ（干渉縞）で表される等温線が垂直に壁面に接しており、断熱状態を実現できている。これにより、温度場及び流れ場を高精度に計測することが可能となった。これらの開発した技術を基に、今後傾斜キャビティ内流れにおける自然対流不安定化の計測実験を行っていく。

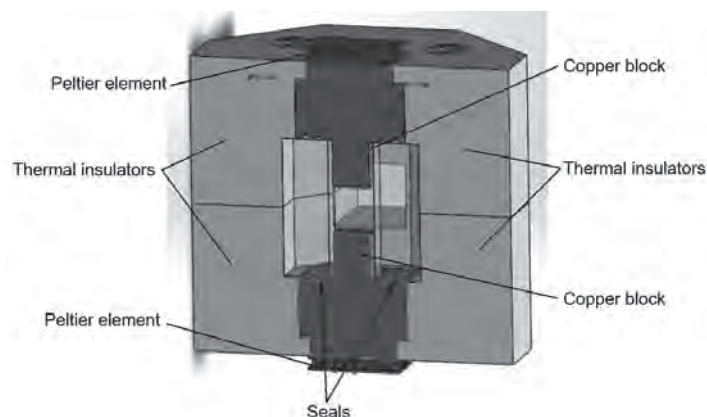


図1：温度場濃度場同時計測用観察セル

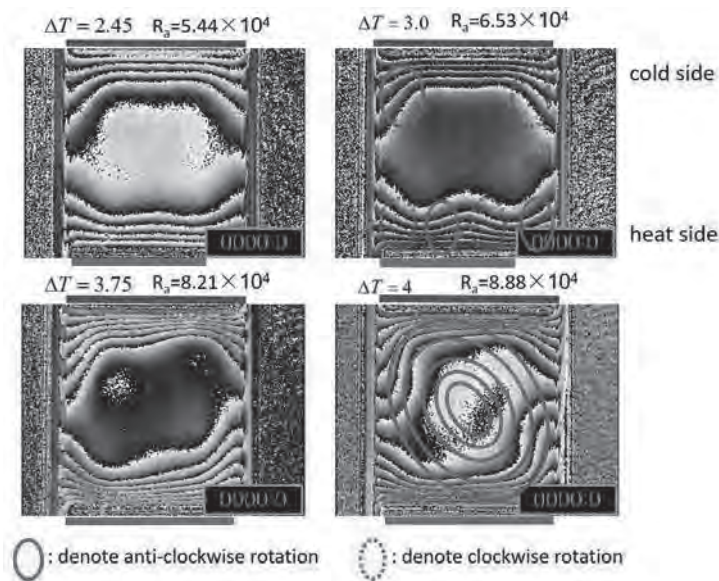


図2：位相シフトデータによる温度場の可視化結果

3. 研究目標の達成状況

本研究では、自然対流熱伝達現象を利用した伝熱促進技術等の熱デザイン分野の一助となる知見を得ることが期待できる。これに対し、本年度の成果により精緻な実験的研究の遂行が可能となり、温度差起因による自然対流場の温度場計測を行った。この技術開発は流動場を利用した伝熱促進の原理解明や、伝熱抑制技術の開発といった熱流動場における伝熱制御に大きく資するものであると考えられ、全体としては90%の達成度と評価することができる。

4. まとめと今後の課題

今年度はこれまでに得られた自然対流の不安定化に関する知見を実証すべく、実験システムの改良を行ってきた。温度境界条件を精密に再現すべく断熱条件を考慮することで精緻な計測システムを開発した。これにより、自然対流の不安定化遷移に関してより詳細な情報を取得することが期待できる。今後は本システムを用いて、温度場・流動場同時観察実験を行い、不安定化に関する信頼のある諸データを取得を行っていく。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] D. Henry, J.F. Torres, A. Komiya, S. Maruyama: Etude par méthode de continuation des bifurcations d'écoulements convectifs en cavité parallélépipédique chauffée soumise à une inclinaison, *Séminaire au Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique*, (2016).

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	J16060
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

人工改変タンパク質バイオテンプレートによる大面積 2 次元高密度
および分散型ナノ粒子エッチングマスク作製の理論解析
Analytical Development of Artificially Modified Bio-Template for 2D Ordered
or Dispersed Nanoparticles Etching Array Mask

山下 一郎*†, 寒川 誠二**††
*大阪大学工学研究科, **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

これまで内径 8nm の内部空間を持つ外径 12nm の球殻状タンパク質であるフェリチンの内部に選択的にナノ粒子コアを作製し、これを酸化シリコンにサンドイッチされたシリコン薄膜を持つ基板に展開した後、タンパク質を選択除去して分散された単層ナノ粒子配置を実現し、これをマスクとした中性粒子ビームエッチングにより、これまで難しかった量子効果を持つ直径 10nm 級のナノディスク配列が作製可能であることを示してきた。しかしながら、量子効果素子の性能向上や、量子効果太陽電池の効率アップのために、より小型のナノディスクが必要となっている。そこでフェリチンに替えて、超小型球殻状タンパク質 Dps を新たに導入して、直径 4nm 以下のナノ粒子配列エッチングマスクの作製を行い、5nm 級ナノディスク作製を実現する。

2. 研究成果の内容

超小型タンパク質としてリステリア由来 DNA 結合超小型球殻状タンパク質 Dps (直径 9.5nm 内径 4nm) を導入した。フェリチンはサブユニット 24 個が自己組織的に直方体様対称性をもつ球殻だが、Dps は正四面体構造と同じ対称性のタンパク質殻をもつ。そのため、フェリチンと同様 3 回対称部位にチャンネルを 8 つ持つがフェリチンと異なり、チャンネルには 2 種類の異なるチャンネルが存在する。図 1 はこの 2 つのチャンネル A, B の差を X 線構造解析を基に図示したもので、チャンネル A は比較的大きく開口し、チャンネル B はわずかに開口部が認められた。チャンネル A はアスパラギン酸が最も小さな開口部を形成しておりマイナス電荷を持つと考えられ絵構造的にフェリチンのチャンネルに似ている。一方チャンネル B は疎水性残基で囲まれ、ほぼ電荷を持つ金属イオン類は導入できないと判断された。チャンネル A がフェリチンのチャンネルと似ていることと、内部表面に比較的酸性アミノ酸が多いことより、合成溶液条件をフェリチンでのコア合成時反応溶液を基本として探索した。反応条件を変

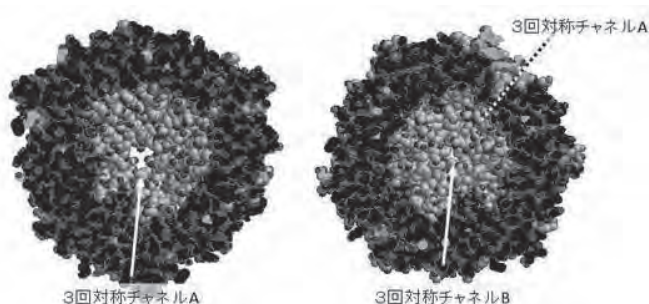


図 1. リステリア Dps の 3 回対称部位の 2 種類のチャンネル比較.
手前半分を切り取り、断面と内表面を 3 回対称軸より描画

えつつ、粒子合成状況を高分解能透過電子顕微鏡(TEM)で観察し、その結果を反映させて変更を加えた。図2は探索された最適条件でのナノ粒子合成結果のTEM像である。Dps 内部空間でナノ粒子合成が完了し、均一なナノ粒子が確認された。またDps のナノ粒子合成後、精製によりDps が保存溶液内で数か月分散を保てることも確認された。

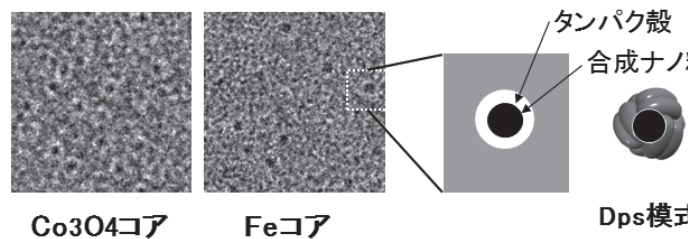


図2. 超小型球殻状タンパク質Dps内部に合成したナノ粒子の高分解能TEM像. 3回対称チャネルを通して金グルコース負染色像.

3. 研究目標の達成状況

ナノマスクのナノ粒子を、フェリチンで合成した 8nm ナノ粒子から小型にするため、超小型球殻状タンパク質 Dps を導入した。ナノ粒子合成のため構造解析を行い3回対称チャネルの構造からナノ粒子合成条件をフェリチンの知見をもとに構成し、4nm ナノ粒子合成に成功した。この合成のために重要な点は外部の溶液反応の抑制であった。今回の成功によりエッチングで得られる量子ナノディスクの直径が 10nm から 5nm 級に小型化できるめどが立った。

4. まとめと今後の課題

超小型球殻状タンパク質 Dps による 4nm ナノ粒子の均一合成と分散保存に成功した。次の課題は、このナノ粒子内包 Dps の基板上離散的2次元配列と中性粒子エッチングとの組み合わせによる 5nm 以下のナノディスク作製を確立することである。

5. 研究成果

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] Y. Tamura, A. Higo, T. Kiba, C. Thomas, J. Takayama, I. Yamashita, A. Murayama, and S. Samukawa: Temperature-Dependent Operation of GaAs Quantum Nanodisk LEDs with Asymmetric AlGaAs Barriers, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 15, No. 3, (2016), pp. 557-562.
- [2] Y. Lai, A. Higo, T. Kiba, C. Thomas, S. Chen, C. Y. Lee, T. Tanikawa, S. Kuboya, R. Katayama, K. Shojiki, J. Takayama, I. Yamashita, A. Murayama, G. Chi, P. Yu and S. Samukawa: Nanometer scale fabrication and optical response of InGaN/GaN quantum disks, *Nanotechnology*, Vol. 27, No. 42, (2016), 425401.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] A. Higo, C. Thomas, T. Kiba, J. Takayama, N. Okamoto, I. Yamashita, A. Murayama, S. Samukawa: Room Temperature Operation of GaAs Quantum Nanodisks LEDs by different AlGas matrix barriers, *European Materials Research Society 2016 Spring Meeting*, Lille, (2016), M.III.3.
- [4] A. Kikuchi, A. Yao, S. Iizuka, I. Mori, I. Yamashita, T. Ono, and S. Samukawa: Thermal Conductivity of 10nm-Diameter Silicon Nanowires Array Fabricated by Bio-Template and Neutral Beam Etching, *IEEE 16th International Conference on Nanotechnology*, Sendai, (2016), WeAM16.2.

3) その他(特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J16063
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー
研究期間	2016.4.1～2017.3
継続年数	2 年目

大規模環境でのふく射および対流によるエネルギー輸送に関する研究
Study on Energy Transport by Radiation and Convection in Large Scale Environment

山田 昇*†, 圓山 重直**††, 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

本研究では、メガスケールふく射伝熱解析と大気中でのふく射計測を通し、地球温暖化ならびに大都市におけるヒートアイランド現象に代表される温暖化現象の伝熱プロセスの評価を行う。観測手法の構築に向けた実験および実証ならびに大気成分の変移や雲粒子分布などの気象条件を考慮したふく射解析を行い、熱科学のみではなく環境科学の観点からも評価を行っていく。

2. 研究成果の内容

前年度に引き続き、これまでの共同研究開発で確立した独自のふく射観測ゾンデ技術を用いた観測データの追取得を目指した。前年度と同様に本放射ゾンデと別途、他機関が開発した雲粒子ゾンデを1つの気球に接続し、タンデム飛揚観測を行った。観測結果を図1に示す。前年度の観測と同様に放射プロファイルの変化と雲粒子の密度には明らかな相関が認められた。また、本ふく射観測ゾンデの測定系コンポーネントを JAXA が開発中の長時間飛翔用スーパープレッシャー気球に搭載できるよう仕様変更を行い、飛行観測を実施する予定であったが諸事情により今年度は気球の飛揚ができなかった。

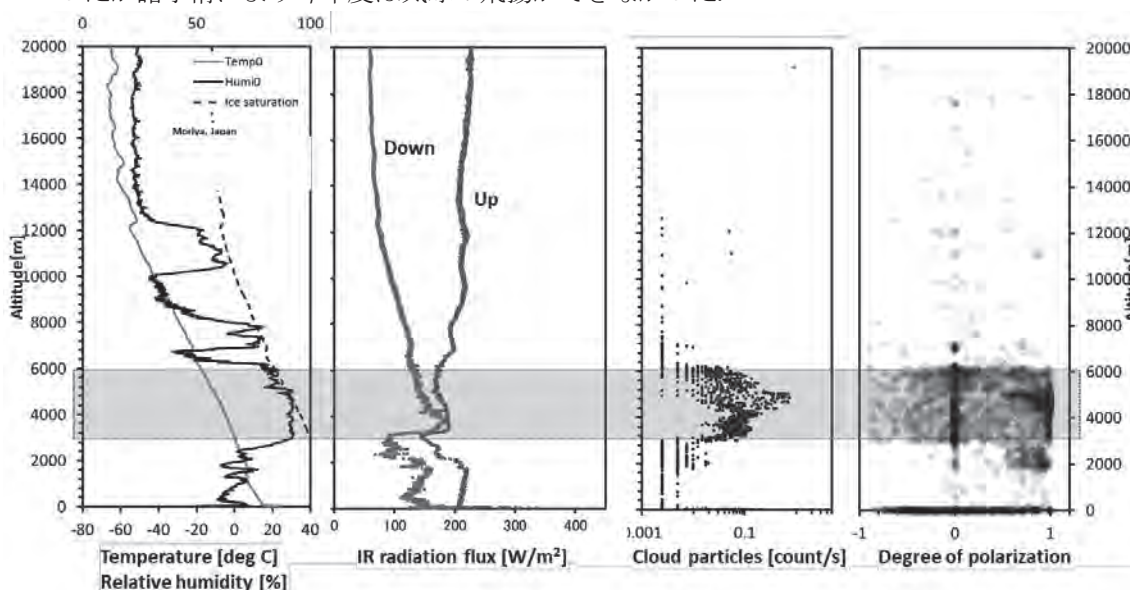


図1: ふく射観測ゾンデおよび雲粒子観測ゾンデのタンデム気球飛揚観測の結果

3. 研究目標の達成状況

メガスケール伝熱現象である都市温暖化および地球温暖化の精緻なシミュレーション・局所温度予測等を実現するためには、数値モデリング構築のための支援データを取得する信頼性が高く、且つ安価で高頻度の観測がおこなえる観測ツールが不可欠である。前年度の観測結果の妥当性を示す観測結果が得られたことにより、シミュレーションモデリングの構築を行う上で有益な成果が得られた。本研究成果により、研究目標の達成に向けて前進したと考えている。

4. まとめと今後の課題

今年度の共同研究では、これまでの共同研究で確立してきたふく射観測ゾンデを利用した具体的な観測結果の追加データを得ることができた。現在、これまでに得られたデータを詳細に解析し、シミュレーション結果との対比やモデリングの考察を行っている。また、最新の長時間飛翔気球システムに搭載できるように機器の準備を行った。今後、従来よりも長時間の観測データを収集する試みにトライする。

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] Noboru Yamada, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama: Study on Energy Transport by Radiation and Convection in Large Scale Environment, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2016)*, Sendai, (2016), pp. 34-35.

[2] 斎藤 芳隆, 後藤 健, 山田 和彦, 中篠 恭一, 秋田 大輔, 松尾 卓摩, 河端 昌也, 田村 啓輔, 大谷 章夫, 山田 昇, 松嶋 清穂, 田中 茂樹, 橋本 紘幸, 島津 繁之: 皮膜に網をかぶせた長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発(NPB2-1), JAXA 大気球シンポジウム (2016), isas16-sbs-019.

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	J16065
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	2016.4～2017.3
継続年数	1年目

ナノ・マイクロ構造によるふく射制御に関する研究
Study on Radiation Transfer Control by Nano-Micro Structure

圓山 重直^{*†}, Bong Jae Lee^{**††}, 小宮 敦樹^{*}, 岡島 淳之介^{*}

^{*}東北大学流体科学研究所

^{**}Korea Advanced Institute of Science and Technology

[†]申請者, ^{††}所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、ナノ・マイクロ構造により、可視域から近赤外領域に至るふく射特性制御に関する実験的・解析的知見を得ることを目的とする。マイクロサイズの複合粒子群を用いて波長選択性を有する機能性膜を製作し、分光光度計を用いてふく射制御塗料を塗布した基板のふく射特性を評価する。

2. 研究成果の内容

複数材料のナノ・マイクロ粒子群を含んだふく射制御塗料の反射特性を評価した。可視領域においては低反射を、近赤外領域においては高反射を実現すべく粒子の評価・選定を行った。図1に示すような2種類の粒子を含む系における有効吸収係数および有効散乱係数の算出法を検討し、ふく射輸送解析を行い、最適な含有率の検討を行った。製作・反射測定実験を実施し、それらの反射特性を評価した。

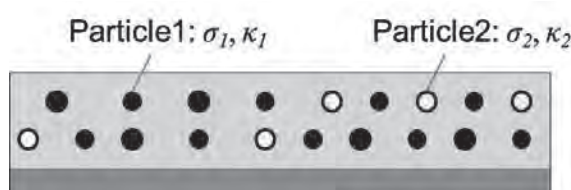


図1. 複合粒子を含む塗膜の概念図

本研究で作成した複合粒子機能膜の中で最も黒色遮熱塗料に最適な組み合わせであると考えられる CuO 粒子と JR1000 を複合した機能膜に関して実験と解析の比較を行った結果が図2である。可視光域の反射率に着目すると、複合粒子機能膜の反射率は酸化銅機能膜より若干高い。この反射率の差が作用し、複合粒子機能膜の色は酸化銅機能膜より若干明るい色となっているが、基本的には黒を基調とした外観となっている。近赤外域の反射率に着目すると、複合粒子機能膜の反射率は酸化銅機能膜より反射率が高く、全体で約 10%近い差があった。複合粒子機能膜は酸化チタンを含有することで近赤外域の散乱が強くなっており、その差が反射率の向上に寄与していたと考えられる。解析では CuO の粒径がカタログ値と異なる点、膜厚が異なる点があるが、概ね実験値を再現することができた。

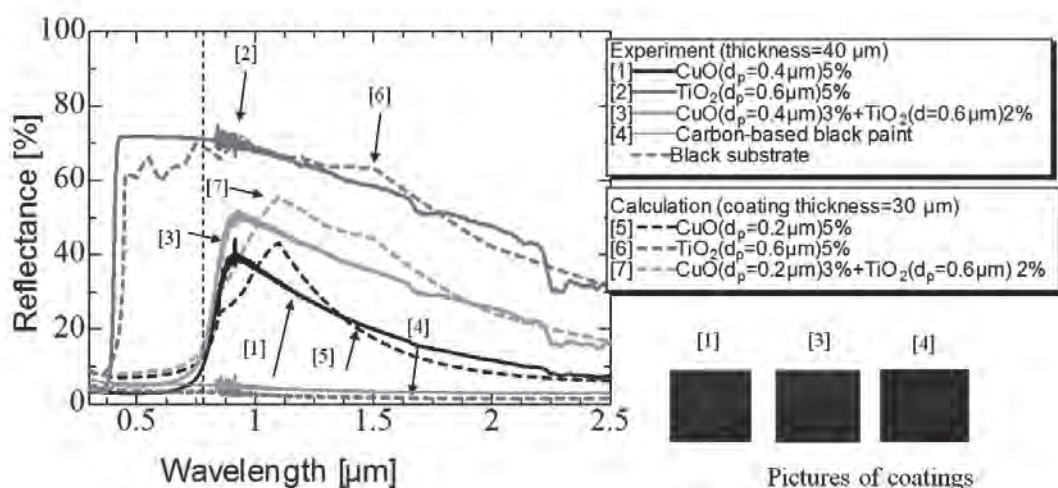


図 2. 黒色基板に塗布した酸化銅, 酸化チタン, 両者の複合粒子機能膜の実験及び解析結果

3. 研究目標の達成状況

本年度に実施した実験および解析では、マイクロ粒子の材料選定とその混合率で、ふく射特性が大きく異なってくることを評価することができた。この知見は、今後の高機能な低反射高断熱機能膜のデザインに向けた指標を示すことができ、本年度の研究目標達成度としては100%の達成度として位置付けることができる。

4. まとめと今後の課題

マイクロ/ナノ構造による発現するふく射特性制御について実験および解析を推進し、マイクロ粒子を利用したふく射制御塗料によるふく射制御を行った。そこから、学術的な基礎を構築するとともに、応用へ展開する足がかりを得る。これらの成果により太陽ふく射の有効利用や省エネルギー技術への展開を目指す。

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] M. Nakamura, H. Aldaftari Alkitabi, J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama, Evaluation of Radiative Characteristics of Wavelength Selective Coatings Mixed with Various Pigments, *Proceedings of 13th International Conference on Flow Dynamics*, (2016), pp. 746-747.

- 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	J16066
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

がん治療および診断のための生体伝熱解析
Bioheat Transfer Analysis for Cancer Treatment and Diagnosis

圓山 重直^{*†}, Mishra SubhashChandra^{**††}, Arnab Lahiri^{**}

小宮 敦樹^{*}, 岡島 淳之介^{*}

^{*}東北大学流体科学研究所

^{**}Indian Institute of Technology Guwahati

[†]申請者, ^{††}所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、がんの早期発見や低侵襲治療のための生体伝熱解析を行う。がん組織特有の生体伝熱特性や熱物性値を考慮し、理論的に新たな治療・診断方法を検討する。

2. 研究成果の内容

これまで流体科学研究所と IIT で行なってきた近赤外レーザーと表面冷却を組み合わせた生体内温度分布制御手法について医療技術へ応用するための評価を行った。計算領域は二次元軸対称となっており、熱源としてレーザー光、表面は強制対流熱伝達による冷却を仮定している。また、生体組織は多層構造となっている。生体伝熱方程式として、一般的に用いられている Pennes の生体伝熱方程式(1)を皮膚表面に用い、深部組織には Weinbaum-Jiji モデルを有効熱伝導率に利用した熱伝導方程式(2)を用いた。

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \eta_b \rho_b c_{pb} (T_a - T) + Q_m \quad (1)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_m \quad (2)$$

さらに生体組織内のレーザー光の伝播を光の散乱と吸収を考慮したふく射輸送方程式により解析した。得られた発熱密度分布を生体伝熱方程式へ与え、非定常温度分布を解析した。

解析結果を図 1 に示す。計算条件は直径 1mm 出力 4W の YAG レーザーを生体組織表面に設置した光学窓板を通して照射し、さらにその光学窓を液体二酸化炭素により冷却している状態を表している。図から明らかなように生体組織内部において温度のピークが形成されることが明らかになった。また、生体組織と光学窓板の間においても温度が上昇していることがわかった。

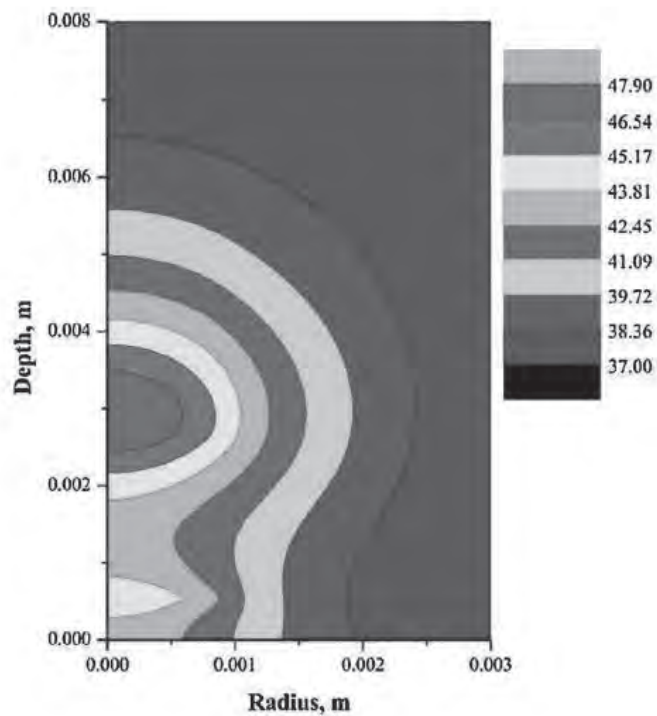


図1 生体組織表面を冷却しながら YAG レーザーを照射した条件における
生体組織内二次元温度分布

3. 研究目標の達成状況

がんの早期発見や低侵襲治療のための生体伝熱解析により多層構造を有した生体組織内の非定常温度分布を評価し、医療応用への展開を行った。当初目的としていた定量的な温度分布評価は達成された。

4. まとめと今後の課題

ガンの早期発見や早期治療は重要な課題であり、熱を利用した新たな診断手法や治療方法を提案し、有効性を検証することで大きな成果が期待できる。それを通じて、生体伝熱の基礎過程の解明や、熱物性データの蓄積が期待できる。

5. 研究成果（*は別刷あり）

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）
なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
なし
- 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）
なし

Project code	J16067
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Development, Modeling and Characterization of Efficient Magneto-Rheological Elastomers for Vibrational Energy Harvesting

Gael Sebald*†, Masami Nakano**††
Jean-Yves Cavaillé*, Mickaël Lallart***

*ELyTMaX UMI3757, CNRS, Université de Lyon, Tohoku University
International Joint Laboratory, Tohoku University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Univ. Lyon, INSA-Lyon, LGEF, EA682, F-69621, Villeurbanne, France

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

This project aims at continuing the collaboration between IFS and LGEF INSA on magneto-rheological (MR) elastomers for magneto-mechanic energy conversion and vibrational energy harvesting. While the energy conversion possibility has been previously demonstrated, this project proposes a further step towards the successful elaboration and application of these materials. This project has three objectives: (1) material elaboration and optimization; (2) modeling and characterization; (3) development of an energy harvesting demonstrator.

2. Details of program implement

Magneto-Rheological (MR) elastomers exhibit a variation of their rheological properties (storage modulus and loss factor) upon the application of a magnetic field. Conversely, their magnetic properties depends on the shear strain, which can be seen as a pseudo-Villari effect.

In this fiscal year, the following actions were started:

(1) Elaboration of materials:

Four kind of Magnetorheological elastomers were fabricated and tested. It consists of silicone rubber matrix where carbonyl iron particles were dispersed randomly, or aligned with the help of a magnetic induction field during curing. The addition of silicon oil for softening the material was also tested.

(2) Modeling and characterization:

Extensive experiments were conducted at IFS for determining both magneto-rheological properties of MR elastomers on the one hand, and their pseudo Villari effect (change in magnetic properties as a result of applied shear strain) on the other hand.

Deep analysis of the origin of the magneto-elastic coupling were performed through the development for example of an analytical model based on magnetic particles interactions in the applied field. In addition, Finite Element Modeling simulations were started in the objective of better understanding the physical mechanisms, and how to improve the magneto-elastic coupling.

(3) Application to energy harvesting:

At this stage, energy conversion capability were estimated. Preliminary design of energy harvesting devices were discussed and will constitute future work.

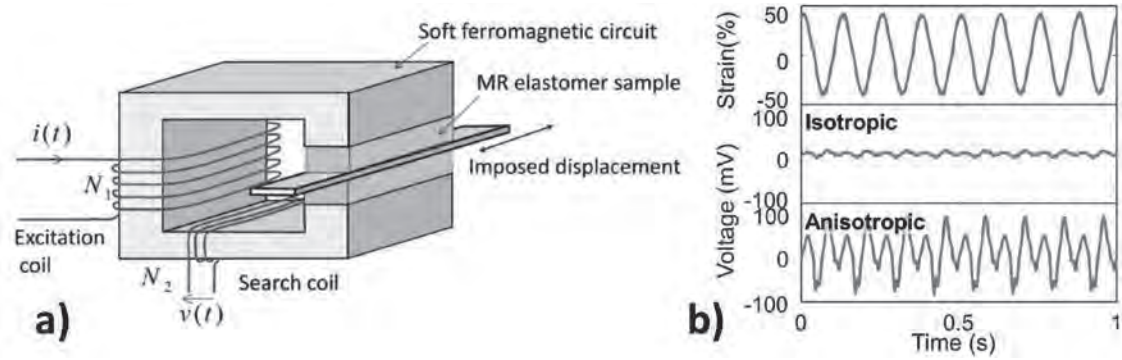


Figure 1: a) Experimental setup for determining magneto-elastic coupling. A constant current is applied to the excitation coil, and the voltage is monitored on the search coil when applied a harmonic strain to the MR elastomer samples. b), Typical voltage signals obtained, showing that magnetic induction field variations are obtained as a result of the deformation of MR elastomer samples.

3. Achievements

As stated in the application of this project, the magneto-elastic coupling in the view of energy harvesting was successfully quantified. Under a bias magnetic induction field of 0.2 T, dynamic variations up to 10 mT were measured when applying a strain of 50% on anisotropic MR elastomers. Energy conversion capability was estimated to be in the mJ.cm^{-3} range, comparable with other smart materials.

4. Summaries and future plans

Following a better understanding of the origin of the pseudo-Villari effect, we aim at developing other materials (different type and processing of the elastomer for example), further developing models of their behavior, in order to be able to design future materials (material by design approach). Finally, we aim at developing (design, fabrication and testing) vibrational energy harvesting devices using the most promising materials and operating conditions..

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
One manuscript is being finalized on a model for MR elastomers, and another manuscript dealing with pseudo-Villari effect characterization is under review.

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

[1] G. Sebald, M. Nakano, J-Y Cavaille and M. Lallart: Development, Modeling and Characterization of Efficient Magneto-Rheological Elastomers for Vibrational Energy Harvesting, *Abstract Book of TFC-ELyT Workshop 2016*, Tohoku University & Miyagi Zao, Japan, (2016), p.2.

- *[2] G. Sebald, M. Nakano, M. Lallart and J-Y. Cavaille: Development, Modeling and Characterization of Efficient Magneto-Rheological Elastomers for Vibration Energy Harvesting, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information(AFI-2016)*, Sendai, Japan, (2016), pp. 36-37.

[3] G. Sebald, M. Nakano, M. Lallart and J-Y Cavaille: Magneto-Rheological Elastomers for Magneto-Mechanical Energy Conversion, *Abstract Book of IOM³ (the Institute of Materials, Minerals and Mining) Innovations in Rubber Design*, London, United Kingdom, (2016), p.1.

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

Project code	J16068
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2nd year

Development and Applications of Micro-Motors Consisting of Smart Polymer Rotor and Dielectric Liquid

Masami Nakano*†, Miklos Zrinyi**††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Dep. of Biophysics and Radiation Biology, Semmelweis University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Controllable rotation of electroactive polymer (EAP) has relevance to a range of practical applications, for example in micro-motors and in micro-fluidics. In this research, a novel principle has been proposed for realization of a side drive micromotor, based on the electrorotation phenomena. The electrorotation or Quincke rotation is the circular movement of an electrically polarized micron sized particle or material in dielectric liquids. In this study, miniaturized micro-motors with novel EAP composite cylindrical rotors in dielectric liquid have been fabricated and demonstrated to rotate under homogeneous DC electric field.

2. Details of program implement

The developed miniaturized cubic micro-motor of 3x3x7 mm inner size with a cylindrical EAP composite rotor in dielectric oil is shown in Fig.1. The EAP composite cylindrical rotors of diameter d and height L was fabricated as follows; FeO(OH) particles were dispersed into the gelatin solution at 70 °C such a way that the mass ratio of the filling material to the dried polymer was 4. The mixture was degassed in a vacuum, and then poured into cylindrical mold and dried carefully at 70 °C. The shaped cylindrical rotor has styrene fiber shafts of 0.5 mm in diameter glued to the both end surfaces. The diameter was varied between 1.0 and 1.5 mm with height of 1.0, 2.0, 2.5 mm. The motor performances such as rotational speed without load and torque vs. rotational speed have been investigated as a function of the DC electric field intensity and the diameter and height of the cylindrical rotors.

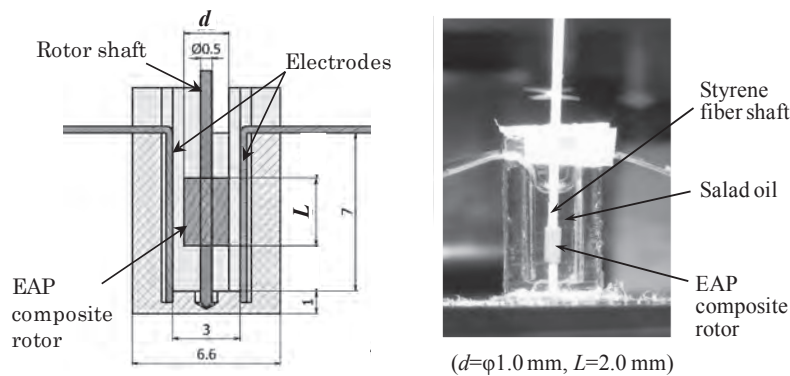


Figure1: Miniaturized cubic micro-motor of 3mm square and 7mm in height with cylindrical EAP composite rotor.

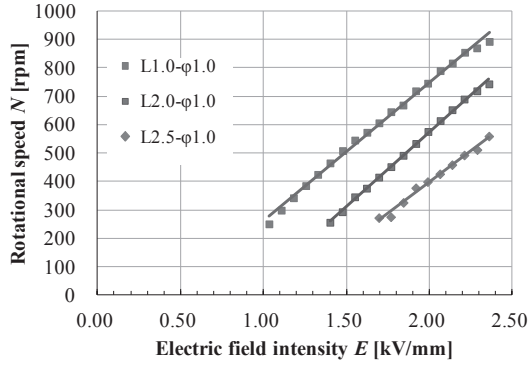


Figure 2: Relationships between N and E without load.

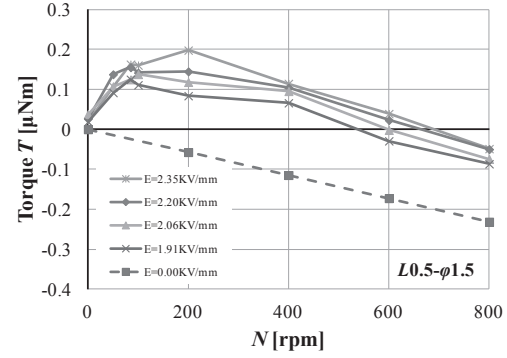


Figure 3: Changes of relationships of torque T vs. rotational speed N with E .

3. Achievements

As shown in Fig.2, the rotation of the micro-motor without load is spontaneous when the electric field exceeds a threshold value depending on the rotor height, and the rotational speed increases with increasing electric intensity E and decreasing the rotor height, showing the strong dependency on the rotor size. And the induced torque of the motor decreases with increasing the rotational speed and increases with increasing the electric intensity as shown in Fig.3. The EAP composite rotor generates the maximum torque of 0.2 μNm when the electric field intensity of 2.35kV/mm is applied.

4. Summaries and future plans

The miniaturized cubic micro-motors cubic of 3x3x7 mm inner size with novel EAP composite cylindrical rotors in dielectric liquid have been fabricated and demonstrated to rotate under homogeneous DC electric field. More careful investigation will be needed in order to study the effect of rotor diameter & length and shape on the speed and torque of electrorotation.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - [1] M. Zrinyi, and M. Nakano: Toward colloidal motors, *Periodica Polytechnica: Chemical Engineering*, Vol.61, No.1, (2017-1), pp. 15-18.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [2] M. Nakano and M. Zrinyi: Micro-motors Powered by Electro-rotation of Smart Polymer Rotor: Dependence of Rotor Size, *Proceedings of Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2016), pp. 476-477.
 - *[3] M. Nakano, and M. Zrinyi: Development of Novel Micromotors, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2016), pp. 68-69.
 - [4] M. Nakano, A. Totsuka, C. Sato and M. Zrinyi: Development of Miniaturized Micro-Motors with Electro-Active Polymer Composite Rotors working in Dielectric Liquid under DC Electric Field, *Proceedings of JSME Fluid Engineering Division Conference 2016*, Ube, Japan, Paper No.1106, (2016), pp. 1-2. (In Japanese)
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J16069
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2nd year

Development of Novel Multi-Layer Magnetorheological Elastomer Isolators

Weihua Li^{*†}, Masami Nakano^{**††}

^{*}Faculty of Engineering, University of Wollongong, Australia

^{**}Institute of Fluid Science, Tohoku University

[†]Applicant, ^{††}IFS responsible member

1. Purpose of the project

The project aims to develop innovative multi-layer magnetorheological elastomer (MRE) isolators in order to effectively control and suppress vibrations due to earthquakes. Major research tasks include: (a) fabrication and characterization of MREs; (b) optimal design and development of adaptive MRE isolators with novel multi-layer structures; and (c) implementation and evaluation of MRE isolators for structural control.

2. Details of program implement

We designed and developed a new isolator whose damping and stiffness can be simultaneously controlled by using MR elastomers and fluids. The structural schematic of the new MRE-F isolator is shown in Figure 1. It contains an MRF unit which is composed of MRF piston, piston shaft, floating piston, reservoir filled with MRF, seals, and electromagnetic coil. Obviously, the damping of the MRF unit is controllable depending on the magnetic density applied to the MRFs. The most noteworthy in terms of the structure is the attachment of the MRE unit which contains annular MR elastomers to the MRF unit. The MRE unit uses the cylinder of the MRF unit as part of its piston, which makes the design compact and consumes less space in radial direction. The cylinder of the MRE unit is fixed with the piston shaft and able to move along the MRF cylinder.

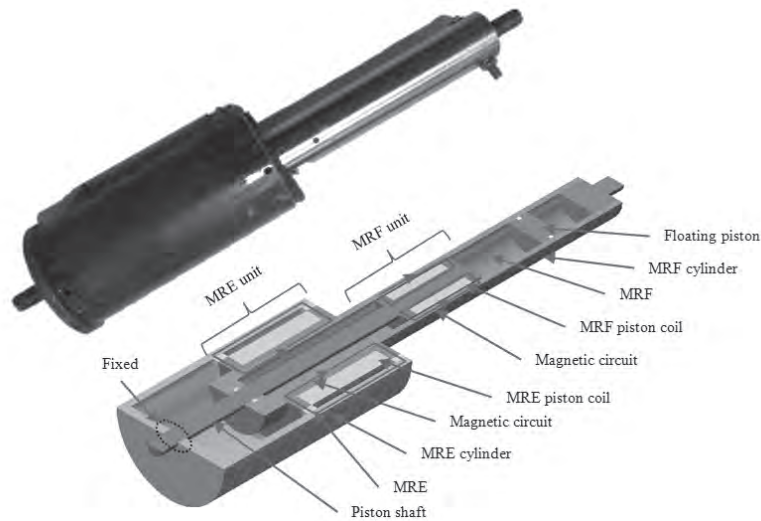


Figure 1: Structural schematic of the new MR elastomer and fluid isolator.

The field-dependent responses including stiffness variability and damping variability, together with the amplitude-dependent response and frequency-dependent responses were separately tested and analyzed successively. The experimental results prove the successful implementation of the as-designed MRE-F isolator with obvious variable damping and stiffness. A new phenomenological model incorporating Bingham model and four-parameter model was developed to describe the dynamic properties of the isolator. The successful development, experimental testing, and modelling of this innovative variable stiffness and damping isolator make the concept of variable stiffness and damping become feasible.

3. Achievements

A new MRE-F isolator was prototyped and its performance was experimentally evaluated. The research collaboration has resulted in 1 journal article and 3 conference papers, plus two other manuscripts submitted to journals and under review. One research staff and one PhD students have got excellent joint-supervision through this collaborative research project.

4. Summaries and future plans

Summaries: This is the second year of the research project on the development of novel MRE isolators for structural control, which has resulted in excellent results.

Future plans: In the third year of the collaborative research, the following two major tasks will be conducted: (1) development and implementation of appropriate control strategies to enhance MRE isolator performance; and (2) joint-supervision of research students and junior research staff.

5. Research results (* reprint included)

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

- *[1] S.S. Sun, J. Yang, W.H. Li, H. Du, G. Alici, T.H. Yan and M. Nakano: Development of an isolator working with magnetorheological elastomers and fluids, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.83, January, (2017), pp. 371-384 (14 pages).

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

- [2] S.S. Sun, W.H. Li and M. Nakano: Development of a New Nonlinear Adaptive Absorber Based on Magnetorheological Elastomer, *Proc. of the 13th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2016)*, Sendai, (2016), Paper ID: OS12-1, pp. 474-475.
- [3] S.S. Sun, D. Ning, J. Yang, H. Du and W.H. Li: A Seat Suspension with a Rotary Magnetorheological Damper for Heavy Duty Vehicles, *Proc. of the 13th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2016)*, Sendai, (2016), Paper ID: OS12-6, pp. 484-485.
- *[4] S.S. Sun, W.H. Li and M. Nakano: Development of a Novel Variable Stiffness and Damping Magnetorheological Fluid Damper, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 132-133.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J16071
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	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

各種基板上のカーボン系薄膜成長における量子・分子論的解析
Quantum Molecular Analysis for Growth of Carbon Related Thin Films

徳増 崇^{*†}, 金子 智^{**,**††}
 須藤 理枝子^{***}, 安原 重雄^{****}, 金澤 知恵^{***}, 河村 彩^{***}
^{*}東北大学流体科学研究所, ^{**}神奈川県産業技術センター
^{***}さがみはら産業創造センター・さがみはら表面技術研究所
^{****}ジャパン・アドヴァンスト・ケミカルズ
[†]申請者, ^{††}所外対応研究者

1. 研究目的

シリコン基板をはじめとする各種基板上でのカーボン系薄膜の成長プロセスを密度汎関数法や分子動力学法などの数値シミュレーションにより解析し、そのナノスケールのメカニズムを把握する。

2. 研究成果の内容

YAG パルスレーザとフェムト秒レーザを用いたレーザ蒸着法などによる炭素系材料の薄膜化を進めた。各種基板上における炭素系材料の成膜実験の結果、図1のような様々な膜表面が原子間力顕微鏡により観察された。そこで、本年度は簡単な基板表面のモデルを用いて、炭素材料成膜における安定性のシミュレーションを行なった。

現在、炭素材料の成長における表面観察結果については、応用物理学会発刊の Japanese Journal of Applied Physics に共著で投稿中である。

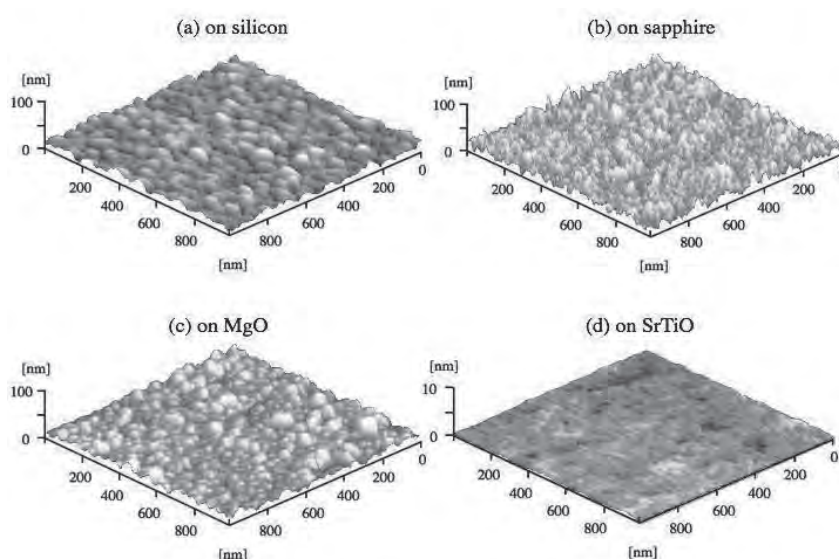


図1 各種基板上での炭素薄膜の原子間力顕微鏡(AFM)像

3. 研究目標の達成状況

単純な基板表面のモデルのシミュレーションでは周期条件が適切ではなく，炭素の六員環が基板上で安定化しなかった．定性的には実験結果と一致したため，発表論文では計算結果に言及したに留まっている．

4. まとめと今後の課題

各種基板上での炭素材料の成長過程について，簡単なモデルを用いたシミュレーションを行なった．その結果定性的には実験結果を支持するものになったが，今後は表面モデルおよび周期条件を検討し，定量的な議論を行うつもりである．

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] R. Sudo, H. Torii, T. Tokumasu, S. Yasuhara, M. Yasui, S. Kaneko: Epitaxial Growth of Wide Bandgap Semiconductor on Insulating Substrate, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 38-39.

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	J16072
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	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

触媒層内酸素輸送抵抗に対する表面散乱の影響

The Effect of Surface Scattering on the Resistance of Oxygen Transport in Catalyst Layer

中内 将隆*, 馬淵 拓哉**, 堀 琢磨***, 吉本 勇太***, 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

燃料電池発電効率を低下させる要因の一つである触媒層における酸素輸送は流路壁面における気体分子散乱が流れを決定する Knudsen 拡散機構が支配的となっている。触媒層の酸素拡散抵抗に関して、流路壁面における気体分子散乱を考慮した DSMC 解析が行われているが、拡散抵抗を過小評価してしまっており、表面を覆っているアイオノマー薄膜における酸素分子散乱現象を正確に表現できる分子散乱モデルの構築が必要である。そこで本研究では、触媒層のアイオノマー表面における酸素分子の散乱・表面拡散現象を分子動力学シミュレーションにより明らかにすることを目的としている。

2. 研究成果の内容

今年度はアイオノマー表面での酸素散乱現象を、表面から直接反射するものと、表面上にトラップされ、複数回衝突した後に反射する分子に分類し、その支配要因の特定と散乱特性について解析を行った。酸素分子の散乱過程は入射温度およびアイオノマー膜の含水率に依存しており、膜中の溶媒分子に衝突した酸素分子が複数回衝突過程になりやすいことが明らかとなった(図 1)。反射時の並進運動エネルギーは直接反射した酸素分子は入射エネルギー依存性を示すのに対して、複数回衝突過程では入射エネルギーの依存性が少なく、散乱過程によって表面との適応具合が異なることが示唆された。反射角度分布は散乱過程に依らず拡散的に反射している結果となった。

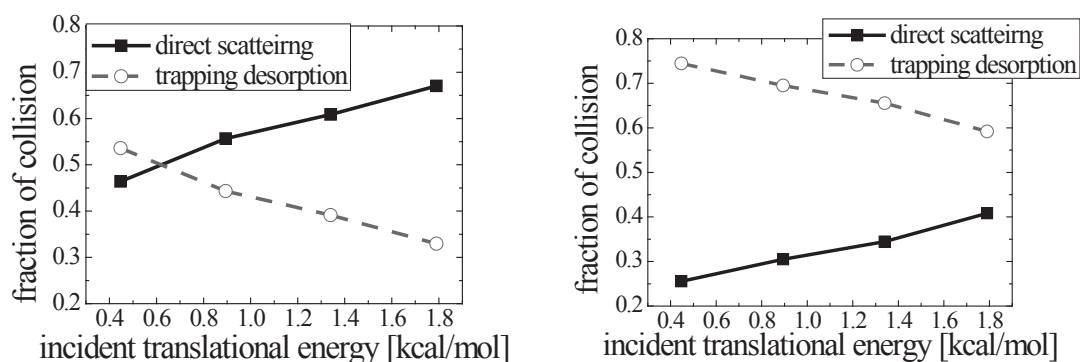


図 1 : Nafion 鎖(左)および溶媒分子(右)に衝突後の酸素分子散乱過程の割合

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について、散乱過程を分類しその支配要因を特定することができた。特に現在の分子散乱モデルでは考慮出来ていない複数回衝突過程について、その支配要因を特定できた点は分子散乱モデル構築における重要な知見であり、本研究は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。酸素分子の散乱現象は入射温度および含水率によって直接散乱するものと複数回衝突を繰り返した後散乱する過程に分類され、異なる散乱特性を示すことが明らかとなった。今後は分子散乱モデルの構築への知見を得るために、これらの異なる散乱過程における反射メカニズムの解明を行っていく。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[1] M. Nakauchi, T. Mabuchi, I. Kinefuchi, H. Takeuchi and T. Tokumasu: *RE&PQJ*, 3(2016), pp. 349-352.

*[2] M. Nakauchi, T. Mabuchi, I. Kinefuchi, H. Takeuchi and T. Tokumasu: *ECS Trans.*, 75(2016), pp. 615-621.

[3] M. Nakauchi, T. Mabuchi, I. Kinefuchi, H. Takeuchi and T. Tokumasu: *AIP Conf. Proc.*, 1786(2016), 100004.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[4] M. Nakauchi, T. Mabuchi, I. Kinefuchi, H. Takeuchi and T. Tokumasu: Analysis of the oxygen scattering behavior on ionomer surface in catalyst layer of PEFC, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Madrid, Spain, (2016).

[5] M. Nakauchi, T. Mabuchi, I. Kinefuchi, H. Takeuchi and T. Tokumasu: Scattering Dynamics of Oxygen Molecules on Nafion Membrane, *30th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Victoria, Canada, (2016).

[6] M. Nakauchi, T. Mabuchi, I. Kinefuchi, H. Takeuchi and T. Tokumasu: Dynamics of oxygen scattering on ionomer surface in catalyst layer of PEFC, *16th International Conference on Nanotechnology*, Sendai, (2016).

[7] M. Nakauchi, T. Mabuchi, I. Kinefuchi, H. Takeuchi and T. Tokumasu: Reflection Characteristics of Oxygen Molecule on Ionomer Surface, *230th ECS meeting*, Hawaii, U. S., (2016).

*[8] M. Nakauchi, T. Mabuchi, T. Hori, Y. Yoshimoto, I. Kinefuchi, H. Takeuchi and T. Tokumasu: Scattering Properties of Oxygen Molecule on Nafion Membrane, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 40-41.

[9] 中内将隆, 馬淵拓哉, 杵淵郁也, 武内秀樹, 徳増崇: 分子動力学法による PEFC アイオノマー表面における酸素分子散乱・表面拡散現象の解析, 第 53 回日本伝熱シンポジウム, 大阪, (2016).

[10] 中内将隆, 馬淵拓哉, 杵淵郁也, 武内秀樹, 徳増崇: 触媒層アイオノマー表面における酸素分子散乱・表面拡散現象の解析, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 福岡, (2016)

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（受賞）日本機械学会 三浦賞, 中内将隆, 2017.3, 24, 日本機械学会.

Project code	J16073
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Theoretical and Experimental Study of Flow Stability, Flow Controllability, and Trapped Acoustic Modes in Cylindrical Expansion Chamber–Pipe Systems

Mikael A. Langthjem*†, Masami Nakano**††

*Faculty of Engineering, Yamagata University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

- (i) To investigate the characteristics of trapped acoustic modes in a cylindrical expansion chamber-pipe system and the interaction of these modes with oscillating shear layers.
- (ii) To investigate the stability properties of the flow, with a view to flow control.

2. Details of program implement

An analytical model representing trapped (localized) acoustic modes in a cavity-pipe system has been developed. It is based on the method of separation of variables, and the complete solution is given in terms of a Fourier-Bessel series. Base on this complete solution, a special solution representing a trapped mode has been constructed. Figure 1 illustrates the a appearance of such a solution. A standing wave is trapped in the cavity domain and there is radiation of acoustic energy “to infinity”.

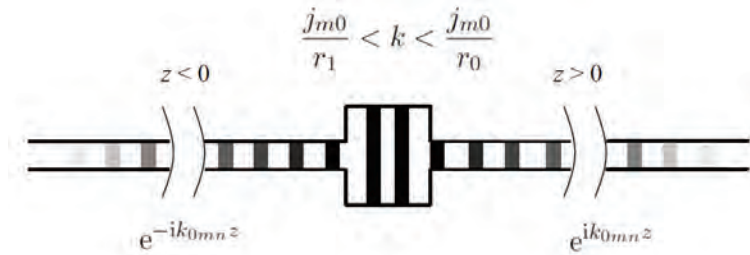


Figure 1 : Sketch of trapped modes in a cavity-pipe system.

3. Achievements

The existence of trapped modes in a system as that shown in Fig. 1 was demonstrated numerically by Hein and Koch [J. Fluid Mech. 605, pp. 401-428, 2008], but no analytical proof has been given. We have given such a proof, by direct construction of a trapped mode solution, as outlined above. Let the radius of the pipe be r_0 and that of expansion chamber r_1 . We have verified analytically that the frequency of the trapped modes is between the cutoff frequencies of waveguides of radii r_0 and r_1 . Complete analytical results are given for the case where r_1 is only slightly larger than r_0 . A journal paper is in preparation.

We have also developed an analytical solution for studying the interaction

between self-sustained flow oscillations in the cavity and standing (resonant) acoustic waves in a finite-length tailpipe. Acoustic radiation into free space is included, and comparisons with experimental results are made. Good agreement between experiments and computations is obtained when acoustic feedback is included. This work is reported in the paper [3].

4. Summaries and future plans

The described analytical solution for a trapped acoustic mode is being coupled to a discrete vortex model representation of the (unstable) shear layer which is developed when there is a mean flow through the cavity-pipe system. The aim is to study the interaction between self-sustained flow oscillations and trapped acoustic modes. A second type of interaction may occur with the standing (resonant) acoustic waves in a pipe of finite length (as mentioned above). It is our aim to study these multiple interactions.

In addition we will study the stability characteristics of the just mentioned flow, in order to better understand how interactions are realized.

5. Research results (* reprint included)

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

- [1] M. A. Langthjem and M. Nakano: Flow-acoustic interaction in an expansion chamber-pipe system, *XXIV ICTAM*, Montreal, Canada, (2016), extended abstract, (2 pages), in Book of Papers.
- [2] M. A. Langthjem and M. Nakano: Asymptotic and numerical analysis of resonance and lock-in by flow-acoustic interaction in an expansion chamber-pipe system, *JSME Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 11, No. 4, (2016), Paper No. 16-00124 (19 pages).

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

- [3] M. A. Langthjem and M. Nakano: Asymptotic and Numerical Analysis of Flow-Acoustic Interaction in an Expansion Chamber-Pipe System, taking the Radiation into Free Space into Account, *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2016), pp. 496-497.
- *[4] M. A. Langthjem and M. Nakano: Theoretical and experimental study of flow stability, flow controllability, and trapped acoustic modes in cylindrical expansion chamber-pipe systems, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 134-135.
- [5] M. A. Langthjem and M. Nakano: On trapped acoustic modes in cavity-pipe systems, *The 36th Ryuriki-souon (flow-induced noise) symposium*, Tokyo, (2016).

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J16075
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Electronic and Spin Transport of Carriers Localized in 3D Array of Nano-Disks Fabricated by Bio-Template Top-Down Etching

Natalia Stepina*†, Aigul Zinovieva, Alexaei Nenashev
Shuichi Noda, Md. Zaman Molla, Seiji Samukawa**††, Tomohiro Kubota

*Institute of Semiconductor Physics

**Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The aim of this work is to study the electronic, optical and spin-related properties of an ordered array of high-density QDs based on Si and Ge, obtained by the method of neutral beam etching through a bio-nanotemplate developed in Tohoku University.

2. Details of program implement

Separated nanocolumns (NCs) with embedded Si nanoclusters were prepared using the top-down technique (developed in IFS) that combines a bio-template and the defect-free neutral beam etching of $\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}/\text{Si}/\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}$ double-quantum-well layers (grown in ISP Russia by molecular beam epitaxy (MBE)). "Bio nano process" (BNP) is one of top-down processes that consists of bio-template technique utilizing highly orderly 2D nanoparticle arrays of a ferritin protein and the ultra-low-damage nanoscale patterning method, neutral beam etching. Two type of structures with different density of NCs were created (Fig.1).

The electron spin resonance (ESR) was studied in the dark and under illumination for the structures with different lateral sizes of NCs.

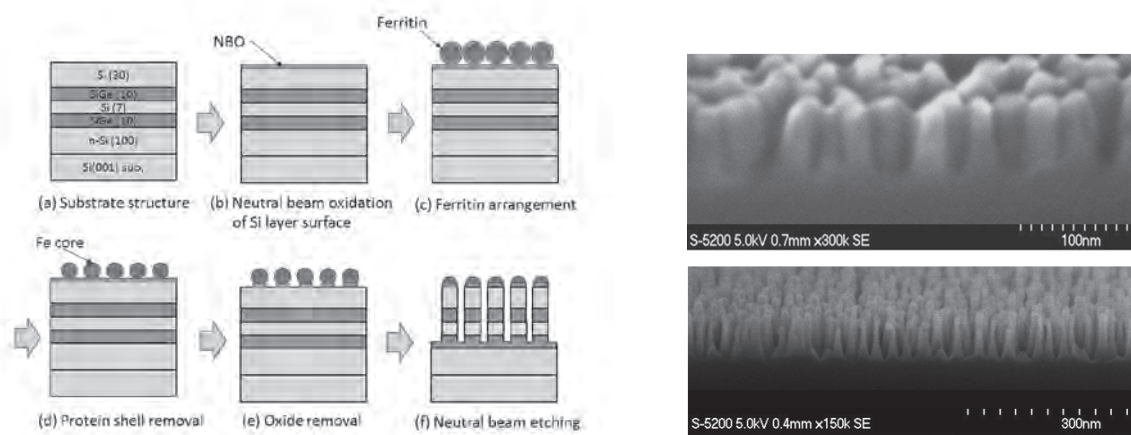


Figure 1 : BNP process (left) and SEM images (right) of the first (top panel) and second (bottom panel) structures.

3. Achievements

We have studied the spin properties of electron localized in Si quantum dots (QDs) embedded into NCs created by BNP method for the structures grown with MBE. The ESR signal, with the isotropic g-factor $g=1.9992$ corresponding to the electrons localized in Si nanoclusters, was detected. Separation of Si QDs results in the suppression of Dyakonov-Perel (DP) mechanism of spin relaxation typical for tunnel coupled self-assembled QDs. The fourfold increase of spin lifetimes under illumination was explained by a stronger localization of electrons due to the Coulomb attraction with photoholes. The spin-spin interaction with surface centers was proposed as the main mechanism of spin relaxation in the structures under study.

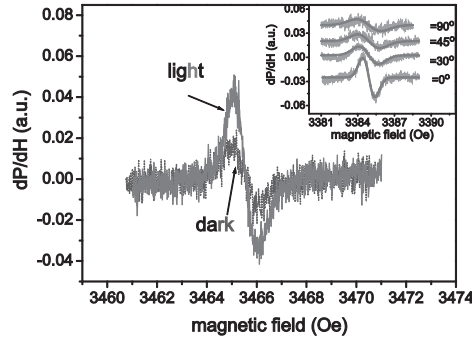


Figure 2 : The ESR signals obtained for the structures with NCs in the dark and under the illumination. Inset shows the angular dependence of ESR signal obtained for the structure with narrow NCs in the dark.

4. Summaries and future plans

We showed that the localization of the electron in separate NCs allowed to exclude DP mechanism of spin relaxation. One of the possible ways to further increase the spin relaxation times is to avoid the interaction of electron spin with surface states. We plan to use the hydrogen passivation of the surface states before taking out the samples to the air.

Second problem that plans to be solve in the future work is to creation quantum dots based on Ge/Si/Sn structures that can be shown type I heterostructure. As a results, we should increase photoluminescence response as compared with type II Ge/Si heterostructure.

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

Project code	J16077
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Charge-up on Water Surface by Cold Atmospheric Plasma for Sanitization Device

Tetsuji Shimizu*†, Gregor E. Morfill*

Chaoyi Zhou**, Takehiko Sato***††

*terraplasma GmbH, Garching, Germany

**School of Engineering, Tohoku University

***Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

A new technology for disinfection and sterilization has been desired because nosocomial infections are a growing problem. Additionally, there are many antibiotic-resistant bacteria developed in recent years. It has been already known that cold atmospheric plasmas (CAP) can inactivate many kinds of bacteria irrelevant to resistance against antibiotics. For an optimization process in the applications using CAP, it is necessary to control the plasma production, plasma chemistry, and transport of plasma-produced species. A detailed understanding in plasma-liquid interface is of importance because the surface of biological samples is often covered by a liquid layer. When CAP is applied to such an interface, the surface of liquid is charged up by charged particles from CAP. This charge-up process can change the plasma production, and the plasma chemistry is influenced accordingly. Furthermore, the transport is also influenced because the profile of electric field is modified by the charge-up. The modified electric field generates a different gas flow from that without the charge-up.

In this project, evolutions of charge on the water surface are measured and the mechanism of charge accumulation and propagation are discussed.

2. Details of program implement

The used setup in this project is shown in fig. 1. A dielectric barrier discharge plasma was produced at $z = 0$ cm between a pin electrode and water surface. The applied voltage for the plasma production was 6.2 kV with pulse shape.

The charge up on water surface was detected at 10, 20, and 40 cm away from the discharge point by electrical probes. The tip of the probes had a contact with the water surface. The waveforms of the voltages from the probes and the applied voltage were recorded by an oscilloscope together.

Figure 2 shows a typical measurement for voltage evolution. The waveforms of the measured voltage by the probes have two components; one is a spike-shape voltage observed almost simultaneously with the applied voltage, and the second is a voltage

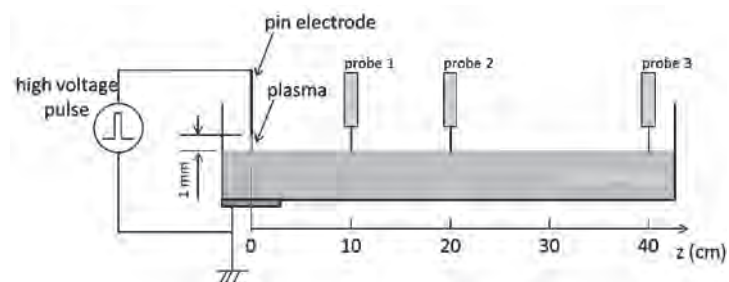


Figure 1: Setup for the measurement of charge profile.

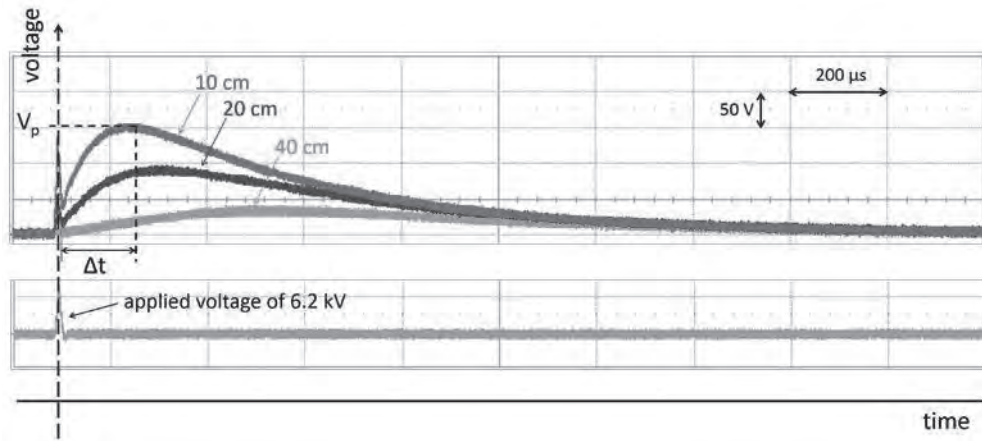


Figure 2: Applied voltage for plasma production and measured voltage by the probes.

which has a peak a few 100 μ s after the voltage was applied. The spike voltage is due to a plasma discharge itself. The other is considered to be due to charge up on the water surface. From the observed waveforms, the peak intensity decreases with the increase of distance from the discharge point. This is due to a loss of charged particles on/in water, e.g. by recombination. The time duration when the voltage evolution has a peak after the plasma discharge depends on where the voltage is measured. The time duration increases with the increase of the distance. From the time durations at several positions, the velocity of this peak movement is estimated around 1000 m/s. This velocity is much faster than the velocity of water flow.

3. Achievements

We have developed the measurement setup of charge triggered by cold atmospheric plasma on water surface with a high time resolution. Using this setup, the velocity of charge movement on water surface was estimated around 1000 m/s. It is obvious that this velocity is much faster than the velocity of water flow. This is a very important information for the discussion of the charge accumulation mechanism on water surface by plasma discharge.

4. Summaries and future plans

The charge evolution on water surface triggered by cold atmospheric plasma was measured. The propagation velocity of charge on water surface is estimated around 1000 m/s. A further discussion is necessary to understand the detailed mechanism of charge accumulation and propagation on water surface. This developing knowledge will be applied to an optimization of cold atmospheric plasma device for sanitization instrument.

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. Shimizu, G. E. Morfill, C. Zhou, and T. Sato: Charge-up on water surface by cold atmospheric plasma for sanitization device, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 6-7.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J16078
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Immersed Boundary Techniques for Building Cube Method

Arpiruk Hokpunna*††, Takashi Misaka**, Shigeru Obayashi**†

*Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering
Chiang Mai University,

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Develop a new immersed boundary method for building cube method.

2. Details of program implement

During the research collaboration we check the flaw of the immersed boundary method and determined that the forcing from the interpolation function for one momentum may not agree with the forcing in of the other directions and lead to strong pressure fluctuations which degrade the accuracy. This disagreement must be resolved through the momentum-pressure iteration which would require several inner-outer iteration before they are in agreement. In order to have a tightly coupled between the forcing and the mass-conservation, we plan to develop a second-order local refinement shown in Fig.1. This refinement can be thought as the locally non-orthogonal grid refinement which is a completely different approach from cut-cell method. Each line between the intersections is a control surface where we will store the momentums. This approach is devised to avoid a difficult generation of co-volumes. However, in order to have this method, we must have a fundamental algorithm for surface-averaged flow variables. Thus we have developed a novel Finite-Surface Method (FSM) for incompressible fluid flows.

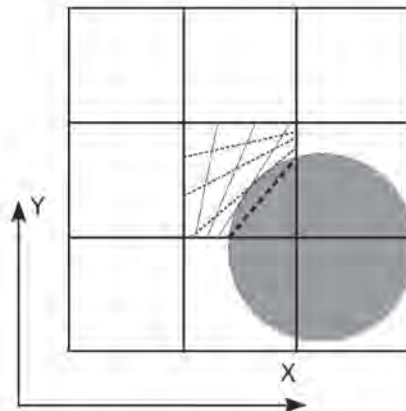


Figure 1: Geometrical refinement for the new Immersed Finite-Surface Method. The solid line is the extra y-coordinate and the dashed line is the extra x-coordinate forming locally enclosing the surface within the cell.

3. Achievements

The method develop during this collaboration is an excellent alternative to existing mathematical discretization because it has the following properties:

- *Finite surface method offers an exact mass conservation on the pressure cell.*
- *Transporting convective velocities are automatically divergence-free.*
- *The pressure Laplacian is the most compact under the projection method.*
- *FSM can be used with a less accurate pressure approximation up to four order lower.*
- *It can deliver solutions comparable to the compact fourth-order FVM 6X faster.*
- *In 3D, the sixth-order FSM require 3X less grid points and thus larger simulation can be investigated using the same computational resources.*
- *This method could eliminate the need of staggered-grid and co-volumes.*

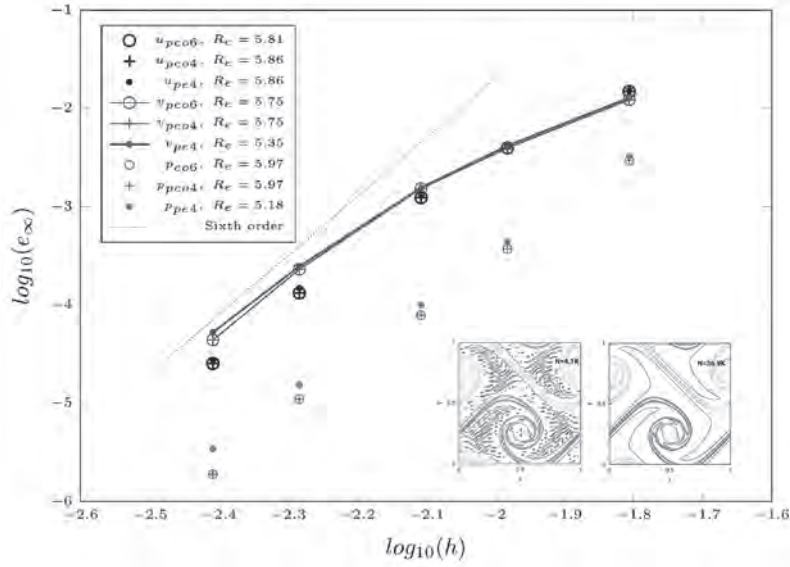


Fig 2: Convergence of the sixth-order FSM on a double shear layers problem. The embedded contours show the numerical wiggles at $N=64^2$ and a smooth solution at $N=192^2$.

4. Summaries and future plans

We planned to submit a joint JSPS-NRCT research scheme to further develop this finite-surface method and apply it to the building cube.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [1] A. Hokpunna, T. Misaka, S. Obayashi: Immersed boundary techniques for Building Cube Method, *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Flow Dynamics 2016*, Sendai, (2016).
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J16080
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2nd year

The Theoretical Modes of the Wake Flow of Road Vehicles

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

Zhongzheng Fu*, Yongyan Chen*, Kaiping Wen**

* Chongqing Institute of Automobile, Chongqing University of Technology

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

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

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

To better understand the mechanism of the unsteady three-dimensional wake structure and construct the theoretical modes of the wake flow, which can provide the key theoretical direction and basis for controlling the structures of the wake vortex and restraining the vortex excited vibration.

2. Details of program implement

To better understand the mechanism of the unsteady three-dimensional wake structure of the high speed road vehicle, the aerodynamic performance and the flow characteristics for a race car with multi-attack-angle rear wing were investigated, and the multi-objective optimization of vehicle aerodynamic shape based on intelligent algorithm is also carried out. The experimental test for the race car with a multi-attack-angle rear wing was carried out in Low Turbulence Wind Tunnel of Tohoku University (Figure 1). Combining CFD software and intelligent algorithm method, this study optimized the aerodynamic shape of SUV based on multi-objective optimization and design technique, shown as Figure 2.

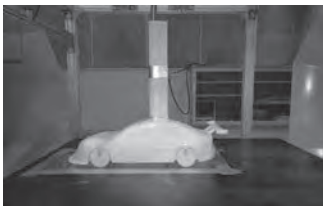


Figure 1: Experimental test in Low Turbulence Wind Tunnel



Figure 2: Aerodynamic shape optimization of a SUV

3. Achievements

The following conclusions were made based on the results of the CFD and experimental investigations: under the effect of the downwash stream, the multi-attack-angle rear wings can prevent the flow separation in the middle part of the wing, which brings to a better drag and lift performance than the fixed attach angle rear wing. And gradually changing the attach angle in the rear wing is a little better than sudden change of the angle, for it avoids the flow separation in the junction point. Through the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm Method, under the premise of that the other design objectives meet the design requirements, the aerodynamic

drag of the optimized vehicle successfully decreases by 9.5%. The research indicates that the aerodynamic design of automobile aerodynamic shape based on intelligent algorithm has excellent applicability and practical significance.

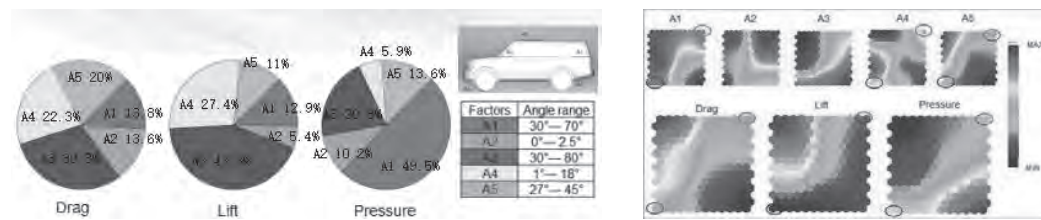


Figure 3: Some examples of the results of the multi-objective optimization of the SUV aerodynamic shape Based on intelligent algorithm.

4. Summaries and future plans

Summaries: The aerodynamic performances of notchback vehicle with fixed attach angle rear wing and multi-attach-angle rear wing are numerical investigated and compared, and this reaearch provides a new reference for the design of vehicle rear wing. The research of the multi-objective optimization of a SUV aerodynamic shape indicates that the aerodynamic design of automobile aerodynamic shape based on intelligent algorithm has excellent applicability and practical significance.

Future plans: Analyze and define the inherent mechanism and the laws of the flow on the wake of road vehicle; combining the theoretical Modes of the wake flow, based on intelligent algorithm, form an efficient, accurate and reliable optimization method on the aerodynamic design on the rear shape of vehicles.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - *[1] LAI Chen-guang, ZENG Hong-qiang, ZHUANG Yan, et al.: Numerical Investigation on the Influence of Different Vane Type Diffusers on the Performance of Centrifugal Compressor, *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, Vol. 30, No. 12, (2016), pp. 42-47.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - *[2] C. Lai, Z. Fu, et.al.: Aerodynamic Performance of Car Rear Wing with Multi-attach-angle, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 42-43.
 - [3] B. Ren, C. Lai, et al: Multi-objective Optimizzation on Aerodynamic Performance of Aerotrain Tanden Wing Layout, *Proceedings of Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2016), pp. 686-687.
 - [4] Y. Chen, C. Lai, et al: Numerical Simulation and Optimization Analysis of Combustion in a Diesel Engine Cylinder, *Proceedings of Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2016), pp. 756-757.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - Not applicable.

Project code	J16081
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamental
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Measurement-Integrated Analysis Methodology for Complex Flow Systems

Toshiyuki Hayase*†, Luca Brandt**††, Shervin Bagheri**

Fredrik Lundell**, Suguru Miyauchi*, Kosuke Inoue*

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Mechanics, Royal Institute of Technology KTH

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The collaborative research project aims to establish a measurement-integrated analysis methodology applicable to complex flow systems. It is important to exactly reproduce complex real flows in many situations, such as clarification of blood flow phenomena in a living body and estimation of flow states in turbulent flow control, but existing method of measurement or numerical simulation cannot solely solve the problem. International collaboration is performed to investigate the measurement-integrated analysis methodology and apply the method to several flow-related problems to confirm its validity.

2. Details of program implement

International collaboration is performed to apply the novel fluid-structure analysis and data assimilation schemes of KTH to the measurement-integrated (MI) simulation of IFS.

Target problems of the proposed project are 1) interaction between a red blood cell and endothelial cells on a blood vessel wall and 2) analysis method for a turbulent flow in a hybrid wind tunnel.

IFS side has the numerical analysis code for MI simulation, and experimental apparatus of the inclined centrifuge microscope (ICM) and the hybrid wind tunnel (HWT). The frictional characteristics of erythrocytes moving on a cultured endothelial monolayer on a glass plates can be measured by ICM. A turbulent flow behind a square cylinder can be analyzed by MI simulation with HWT.

KTH side has been developed a simulation code for fluid-structure simulation based on an accelerated Edwald method for Stokes flow coupled to a spectral solver for the deformation of an elastic membrane. KTH side has strong research activities in flow control problems including data assimilation methods.

As preparation of this proposal, members of both sides visited counterpart institutions and discussed about the collaboration.

3. Achievements

For the interaction between a red blood cell and endothelial cells on a blood vessel wall, the three dimensional simulation using the red blood cell model was performed. Although the applicability of our numerical method was confirmed to the red blood cell behavior in the inclined centrifugal force field, the equivalent state of the

erythrocyte model was not obtained due to the unreal large stiffness of the erythrocyte model. For the turbulent flow in a hybrid wind tunnel, the reproducibility of MI simulation to the turbulent flow far downstream from the square cylinder was investigated. The velocity variations were captured by the MI simulation far downstream from the square cylinder, but the variations were large compared to the PIV measurement. The result comes from the application of the same feedback force along the square cylinder.

4. Summaries and future plans

The purpose of the project in the period was fully achieved. The numerical simulations were performed for the interaction between a red blood cell and endothelial cells on a blood vessel wall and for a turbulent flow in a hybrid wind tunnel. Future plans are the simulations using the realistic mechanical property of the erythrocyte and the modification of the application of the feedback force along the square cylinder for the analysis of the hybrid tunnel.

5. Research results (* reprint included)

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

- [1] A. Yatsuyanagi, T. Hayase, S. Miyauchi, K. Funamoto, K. Inoue, A. Shirai, L. Brandt: Numerical analysis for elucidation of mechanical interaction between an erythrocyte moving in medium subject to inclined centrifugal force and endothelial cells on a plate, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 11, No. 4, (2016), p. JFST0029.

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

- [1] A. A. Banaei, J. Loiseau, L. Brandt, S. Miyauchi, T. Hayase: Analyzing a single deformable cell in an inclined centrifuge microscope: a numerical study, *5th Micro and Nano Flows Conference 2016*, Italy, (2016).
- [2] K. Kawamoto, T. Hayase, S. Miyauchi, K. Inoue, S. Bagheri, F. Lundell: Reproduction of turbulent flow field behind a square cylinder by hybrid wind tunnel, *Proceedings of the 13th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2016)*, Sendai, (2016), pp. 462-463.

- *[3] S. Miyauchi, T. Hayase, A. A. Banaei, J. Loiseau, L. Brandt: Three-Dimensional Numerical analysis for an erythrocyte behavior near a wall in a fluid under an inclined centrifugal force, *Proceedings of the 16th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 138-139.

- [4] S. Miyauchi, T. Hayase, L. Brandt, F. Lundell, S. Bagheri: Two-Dimensional Numerical simulation for the effect of capsule elasticity on its behavior near a plate in a fluid under an inclined centrifugal force field, *16th International Conference on Biomedical Engineering, The 16th International Conference on Biomedical Engineering*, Singapore, (2016).

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J16082
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

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

Vladimir Khovaylo*†, Toshiyuki Takagi**††
Hiroyuki Miki***, Hiroyuki Kosukegawa**, Alexander Rakoch*
Alexandra Gladkova*, Evgeniya Monakhova*, Valeria Zueva*

*National University of Science and Technology "MISiS"

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Purpose of the project is experimental study of tribological properties (microhardness, wear resistance, erosion resistance, surface roughness) of coatings obtained under optimal technological regime of plasma electrolytic oxidation on laboratory samples of functional materials; ii) investigation structure and morphology; iii) corrosion resistance; iv) porosity; v) adhesion of coatings to the substrate.

2. Details of program implement

During the last year, the research was focused on the theoretical study of the influence of nature of the alloying elements on i) growth kinetic, ii) structure iii) phase composition of the coatings obtained on laboratory samples of functional materials by PEO, iv) changes in the thickness of the outer porous coating layer due to the entering of the oxide of the bivalent metal of the coatings. Optimal silicate and silicate-alkaline electrolyte solutions with the entering of the oxide of the bivalent metal were developed.

From the experimental data it follows that alloying of functional materials in particular aluminum with bivalent metals may either decrease or increase the concentration of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and total amount of the high-temperature modifications ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 + \theta\text{-Al}_2\text{O}_3 + \delta\text{-Al}_2\text{O}_3$) in the coatings. Change in the amount of high-temperature modifications of alumina in the coatings formed on aluminum due to alloying is probably related to the formation of the metastable solid solutions. The stable diagram of $\text{CoO-Al}_2\text{O}_3$ confirms the hypothesis of the formation of metastable solid solutions. The eutectic compound of a solid solution of cobalt oxide in the aluminum oxide or a compound of variable composition $\text{CoO-nAl}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ is formed at 2229 K. The lattice parameter $7.964 \pm 0.003 \text{ \AA}$ in a solid solution containing 77.5 vol.% of Al_2O_3 is almost the same as that one of the $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ without cobalt oxide. The presence of Co, whose oxides stabilize the low-temperature modification of alumina mainly in the outer layer of the coating (Fig. 1), is one of the main reasons of the lower thickness of the outer porous layer of the coating. The concentration of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, or the total number of high-temperature modifications of aluminum oxide coatings determines their wear resistance, microhardness and erosion resistance.

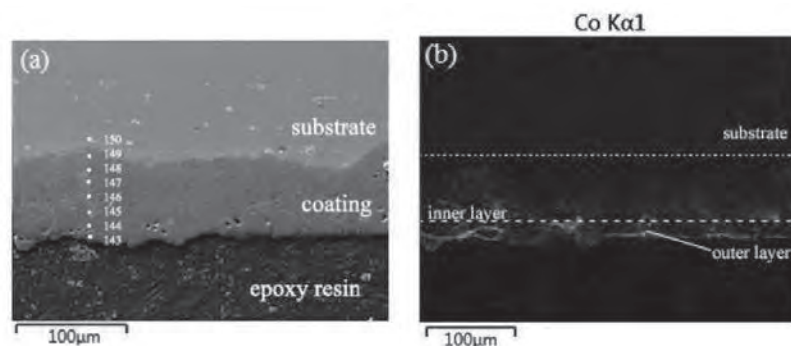


Figure 1: SEM micrographs of cross-section of coatings formed by PEO on the functional material in the solution with the small addition of with addition of $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ (a) and EDX elemental map of Co in these coating (b).

3. Achievements

The main achievements can be summarized as follow. First, experiments revealed that microhardness (up to 1500 HV) and wear resistance (pin-on-disk test) of the coatings after PEO in the base electrolyte with addition of $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ as well as their adhesion to the substrate (according to results of scratch test) remain very high. Second, according to ISO 9227, the anticorrosive characteristic of the formed coatings is high and corrosion damages are absent after 336 h in salt spray chamber.

4. Summaries and future plans

In summary, we studied structural and tribological properties (microhardness, wear resistance, erosion resistance, surface roughness) of coatings obtained on the functional materials by PEO in optimal solution containing $2 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ NaOH, $7 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ technical water glass ($7\text{Na}_2\text{O}\cdot 2.9\text{SiO}_2\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (TWG)) with addition of $1\text{--}4 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$. Future plan is to develop a methodology for wear-resistant coating formation and apply it to industrial details made of the functional materials.

Results of the collaborative research have been described in the following three papers which were accepted to per-reviewed journals:

- 1) A.I. Voronin, V. Yu. Zueva, D. Yu. Karpenkov, D.O. Moskovskikh, A.P. Novitskiy, H. Miki, V.V. Khovaylo, *Semiconductors* (in press).
- 2) A. Shubin, D. Karpenkov, A. Stepashkin, D. Arkhipov, S. Taskaev, T. Takagi, V. Khovaylo, *Key Eng. Mater.* (accepted).
- 3) A.G. Rakoch, A.A. Gladkova, H. Miki, V.V. Khovaylo, E.P. Monakhova. T. Takagi, *Wear* (accepted).

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
 - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] A.A. Gladkova, V.V. Khovaylo, A.G. Rakoch, N.A. Predein, Phan Van Truong, H. Kosukegawa, H. Miki, T. Takagi: Development of Plasma Electrolytic Oxidation Method for Formation of Protective Coatings on Functional Materials, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 140-141.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J16083
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2nd year

Numerical study on gas lubrication of a textured surface in micro/nanoscale

Shigeru Yonemura^{*†}, Yevgeniy Bondar^{**††}, Pavel Vashchenkov^{**}

Alexander Shevyrin^{**}, Anton Shershnev^{**}

^{*}Institute of Fluid Science, Tohoku University

^{**}Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics

[†]Applicant, ^{††}non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Surface texturing has been studied for improvement in tribological performance of sliding surfaces. In the case where liquid is used as a lubricant for microhydrodynamic bearings, the pressure cannot be lower than the pressure at which cavities are formed in the liquid. Therefore, the pressure rise will be greater than the pressure drop, and it has been explained that this asymmetric pressure distribution may make the pressure averaged over the whole surface higher than the ambient pressure. Since the cavitation does not appear in gas, the mechanism of gas lubrication is different from that of liquid lubrication and it had not been explained. Recently, Yonemura et al. clarified the mechanism of high gas pressure generation induced by a textured surface in micro/nanoscale. However, in order to design the optimal configuration of the surface texture for good tribological performance, further accumulation of knowledge of gas lubrication of a textured surface is required. In the present study, numerical simulations and theoretical analyses are performed in order to understand this phenomenon in more detail.

2. Details of program implement

One example of the considered lubricated surfaces is shown in Fig. 1 and the corresponding simulation result of pressure distribution for that lubricated surface is shown in Fig. 2. Here, the upper surface is textured, and the lower counter surface with flat surface is sliding in the x direction. The surface pattern on the upper surface is repeated infinitely both in the sliding direction and in the side direction. The pressure at the inlet of the dimple region becomes smaller than the ambient pressure (1 atm). In the dimple region, the pressure monotonically increases in the x direction, i.e., in the direction of the motion of the lower counter surface, and then, reaches its maximum at the outlet of the dimple region. On the other hand, in the subsequent flat region, the pressure decreases in the x direction, and then, reaches its minimum at the inlet of the next dimple region. The pressure distribution in the flat region along the centerline of the dimple region parallel to the x axis is convex upward. This shape of the pressure distribution makes the pressure averaged over the whole surface higher than the ambient pressure (1 atm).

Although the dimple pattern is repeated infinitely in the side direction in the above simulation, it must be connected to the atmospheric air eventually in the case of practical use of the lubrication system. In such a case, the side leakage of gas is problematic because it decreases the load capacity of the lubrication system. The results obtained in the present numerical analyses, which is not shown here, suggests to us the way to prevent the side leakage of gas.

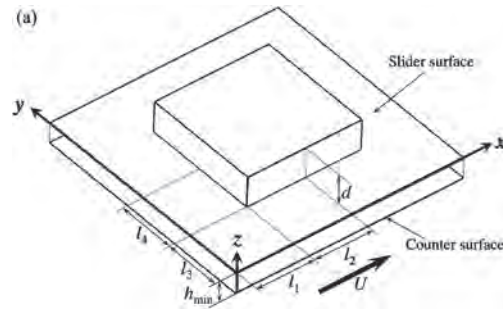


Fig. 1 Considered dimple pattern.

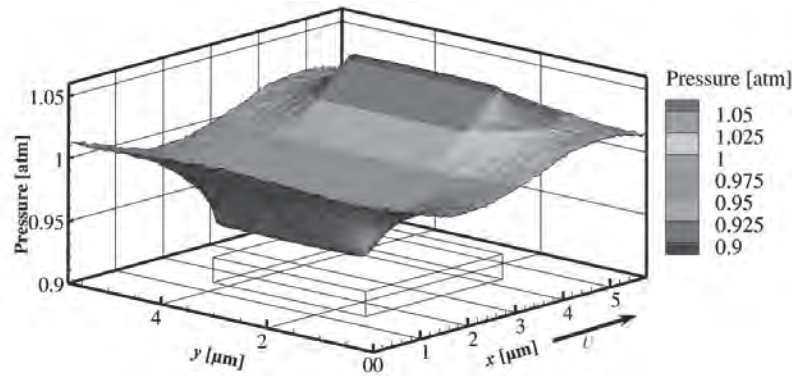


Fig. 2 Pressure distribution.

3. Achievements

We obtained the important knowledge to prevent the side leakage of gas during gas lubrication of a textured surface.

4. Summaries and future plans

In the third year, we will verify our idea to prevent the side leakage of gas by performing numerical simulations for the lubrication of a textured surface. And further more, the optimal shape of the textured pattern will be investigated.

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] Vashchenkov P.V., Belyaeva A.A., Yonemura S., Kawagoe Yo: Numerical investigation of the effect of the rotating disk surface microstructure on the lift force, *XVIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR-16)*, Perm, (2016), Abstracts part II, pp. 219-220.
 - *[2] Pavel Vashchenkov, Anastasya Belyaeva, Yevgeniy Bondar, Shigeru Yonemura, and Yoshiaki Kawagoe: Numerical Investigation of 3D Flow in Micro-/Nanoscale Channel with Sliding Surface, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 44-45.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J16088
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Aeroacoustics of Low Reynolds Number Flows Via Dynamic Hybrid RANS/LES and Stochastic Noise Generation and Radiation

Adrian Sescu*†, Shanti Bhushan**, David Thompson*

Bukhari Manshoor***, Yuji Hatoori***††

*Department of Aerospace Engineering, Mississippi State University

**Department of Mechanical Engineering, Mississippi State University

***Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective of the project is to derive and test a hybrid computational aeroacoustics technique based on a dynamic hybrid RANS-LES approach (DHRL) and the stochastic noise generation and radiation method aimed at predicting noise generation and propagation from low Reynolds number flows. The low frequency content of the acoustic source will be predicted via DHRL approach, while the SNGR method will provide the high frequency content of the acoustic source representing contributions from unresolved flow scales. The numerical results obtained via DHRL-SNGR approach will be compared to direct numerical simulations (DNS), as well as with existing experimental results.

2. Details of program implement

A flow around a cylinder at small to moderate Reynolds number was chosen by the IFS team because of the computational limitations posed by the direct numerical simulations. MSU team conducted numerical simulations using different hybrid RANS/LES methods in an attempt to show that the DHRL's performance is superior.

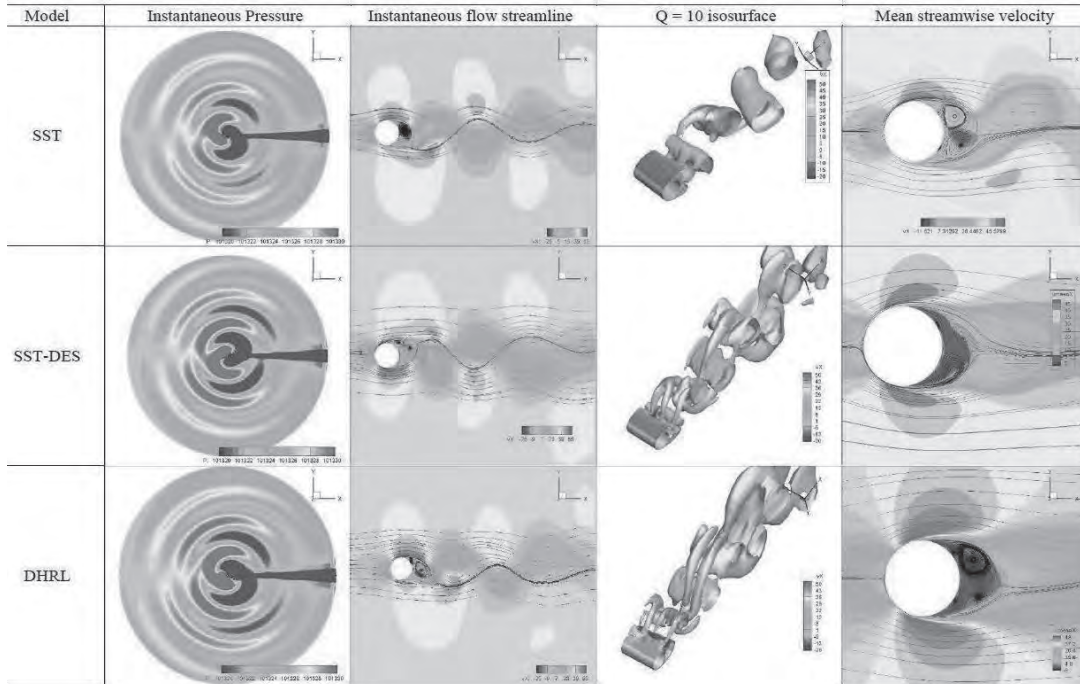


Figure 1: Comparison among three different approaches

Figure 1 show a comparison in terms of acoustic pressure contours, instantaneous flow streamlines, iso-surfaces of Q criterion and mean streamwise velocity. The IFS team is performing direct numerical simulations of flows in the same conditions.

Underway are efforts to generate stochastic velocity and scalar fields based on statistics from RANS, to be able to model the small scales of turbulence that are not predicted by the LES. Within the project, the Ffowcs-Williams Hawkins acoustic analogy has been implemented in an in-house MSU code. This will be used to estimate the sound pressure level (SPL) from acoustic waves propagating from the source. The methodology will be applied in the context of jet noise; figure 2a show density fluctuations on a cylinder around a jet, which is used in the Ffowcs-Williams algorithm to calculate the acoustic pressure history (figure 2b); the corresponding SPL is shown in figure 2c.

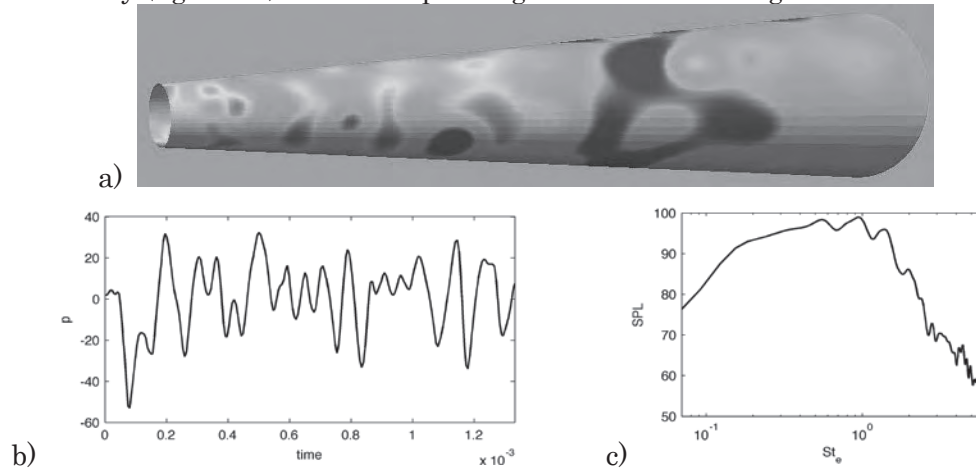


Figure 1 : a) Density fluctuation on the Ffowcs-Williams Hawkins surface; b) Acoustic pressure history in a probe location; c) sound pressure level (SPL).

3. Achievements

The project started much later than we expected, and as a result everything was delayed. While a postdoc from IFS was available right away to work on this project, the MSU team identified a PhD student who agreed on working on this project much later. The IFS team performed direct numerical simulations of several low Reynolds numbers for a cylinder in a Mach 0.2 flow. The MSU team performed DHRL simulations of the same test case, and started the research about jet noise prediction.

4. Summaries and future plans

Research is underway to apply the methodology in the framework of jet noise. To this end, DHRL is utilized to predict the large scales of the flow in the jet, while a stochastic model is employed to model the small scales. Sweeping of small scales by the large scale is taken into account to increase the accuracy of the approach. In the next year, the technique will be tested on an axisymmetric jet (conference papers and journal articles will be published).

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

Project code	J16089
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Quantitative Temperature Measurement of High Pressure Flame Applying Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS)

Akihiro Hayakawa*†, Simone Hochgreb**††

Steven Lowe**, Yi Gao**, Hideaki Kobayashi*

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Department of Engineering, University of Cambridge

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS) is a laser based diagnostics technique that has become the subject of increasing interest. The purpose of this study is to apply LITGS for high pressure flame and to acquire the flame temperature quantitatively.

2. Details of program implement

High pressure combustion experiments were carried out using the high pressure test facility at the IFS and the LITGS set up was established. OH was selected for the species of excitation. In order to increase OH concentration, oxygen enriched flame was employed. As shown in Fig. 1, LITGS signal was successfully acquired at the pressure, P , of 0.5 MPa. Here, ϕ is equivalence ratio and ξ_N is the dilution rate which is defined as the N_2 concentration in (O_2+N_2) mixture. Figure 2 shows the derived temperature for oxygen enriched cases in terms of equivalence ratio. The derived temperature was close to the adiabatic flame temperatures which were calculated from numerical simulations. And the flame temperature was higher than 2800 K. The difference between the temperature obtained from one-dimensional flame simulations and the derived temperature from LITGS signal was around 6.4 % within the present study. This result demonstrates that LITGS has the potential for highly accurate quantitative temperature measurements in flames that operate in high pressure environments, such as a rocket motors.

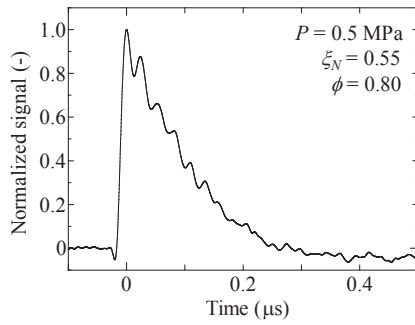


Fig. 1 Example of the LITGS signal.

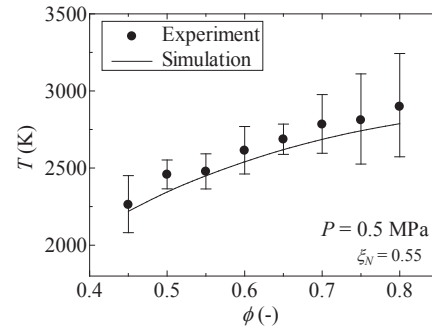


Fig. 2 Derived temperature from the LITGS signal.

3. Achievements

We have demonstrated that LITGS is available not only for CH₄/air flames but also oxygen enriched CH₄/O₂/N₂ flames whose flame temperature is close to 3000 K. Therefore, the potential for LITGS measurement in high temperature flame is also demonstrated.

4. Summaries and future plans

LITGS signals successfully acquired at 0.5 MPa and the derived temperature was close to the adiabatic flame temperature. As for the next plan, NO will be used for the species for excitation and the temperature profile from unburnt to burnt region of the flame will be acquired.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not Applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
(included international conference without peer review)
- *[1] A. Hayakawa, T. Yamagami, S. Lowe, T. Kudo, Y. Gao, S. Hochgreb, H. Kobayashi: Quantitative Temperature Measurement of High Pressure Flame by Using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS), *The Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 142-143.
- [2] A. Hayakawa, S. Lowe, K. Takeuchi, T. Yamagami, T. Kudo, Y. Gao, S. Hochgreb and H. Kobayashi: Quantitative Temperature Measurement of High Pressure CH₄/O₂/N₂ Laminar Flams Using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS), *54th Symp. (Japanese) Combust*, Sendai, (2016), p. 102.
- 3) Patent, award, press release etc.
- (Award) Best Presentation Award, “Quantitative Temperature Measurement of High Pressure CH₄/O₂/N₂ Laminar Flams Using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS)”, A. Hayakawa, S. Lowe, K. Takeuchi, T. Yamagami, T. Kudo, Y. Gao, S. Hochgreb and H. Kobayashi, November 24, 2016, Combustion Society of Japan.

Project code	J16090
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2nd year

Physical Insight into Mach Reflection Transition and Its Hysteresis
in Axisymmetric Intakes in Continuum and Rarefied Flow Conditions
for High-Speed Airbreathing Propulsion

Hideaki Ogawa*†, Sannu Mölder**

Evgeny Timofeev***, Ben Shoesmith***

Georgy Shoen****, Yevgeniy Bondar****

Kiyonobu Ohtani*****††, Shigeru Obayashi*****

*School of Engineering, RMIT University

**Department of Aerospace Engineering, Ryerson University

***Department of Mechanical Engineering, McGill University

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

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

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The air intake constitutes a key component of airbreathing engines for economical high-speed transport including ramjets and scramjets. Thorough understanding of intake physics and capabilities for accurate design are of crucial importance for efficient engine operation and reliable intake start. Shock wave interactions play a primary role in intake flow compression. The primary aim of this proposed project is to develop essential understanding of the flow characteristics and physical insight into the underlying mechanism, with particular focus on the shock structure and reflection with various intake geometries in numerical, experimental and theoretical approaches. It also aims to investigate the intake flow behavior in the rarefied regime to elucidate the underlying physics that is responsible for the difference from the continuum regime.

2. Details of program implement

The implementation of the overall program consists of the following two stages:

(1) The first stage investigates intake flowfields using **numerical** and **theoretical** approaches, focusing on Mach reflection (MR) in the stunted (axially contracted) Busemann intakes. The shock structures and behavior in continuum ambient conditions are studied numerically by probing into inviscid and viscous transitional flowfields with Euler and Navier-Stokes solvers, whereas the flow characteristics in rarefied conditions are investigated by applying DSMC at Mach 8.

(2) In the second phase, **experiments** are conducted in the supersonic wind tunnel of the IFS shock-wave facilities at Mach 2. Intake geometries to be examined include: (a) stunted Busemann intakes on the verge of Mach reflection transition (b) M-flow intakes with various shock angles. Viscous correction is applied to both configurations. Further numerical investigation via kinetic simulations with Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) is conducted to identify the key flow physics in rarefied conditions.

In particular, the present project was undertaken to advance the research, focusing on the second phase towards the experimental testing for the verification of the results obtained in computational and theoretical approaches.

3. Achievements

Desired inviscid flow characteristics have been achieved successfully in the presence of viscosity for full and stunted Busemann intakes and M-flow intake rings (Fig. 1) in hypersonic and supersonic freestream of Mach 8 and 2, respectively, by applying a boundary-layer correction method that has been developed by employing an iterative process with a boundary-layer edge detection method based on the total enthalpy. The flow behaviour in a rarefied gas at a high altitude has been examined for the Busemann intake with DSMC, exhibiting distinctly different features compared to continuum flow (Fig. 2). Physical insights have consequently been gained into the flow physics and behavior particularly for centerline shock reflection in axisymmetric compressible flow.

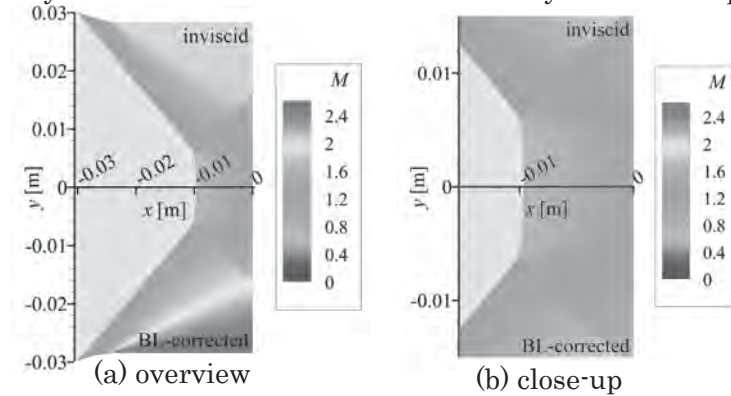


Figure 1 : Comparison of inviscid and viscous-corrected flowfields in M-flow intake ring for Mach 2 freestream

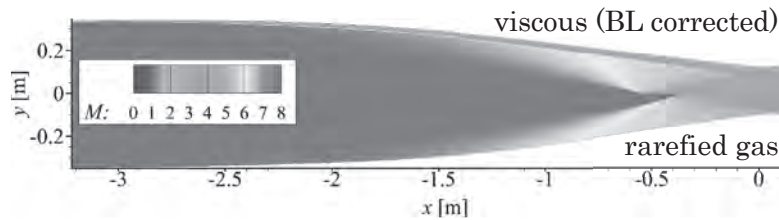


Figure 2 : Comparison of viscous-corrected continuum and rarefied gas flowfield for full Busemann intakes for Mach 8 freestream

4. Summaries and future plans

The research project has been advanced to investigate the physical characteristics and behavior of high-speed airflow subjected to axisymmetric compression. An accurate viscous correction method using an iterative process has been developed and validated in application to Busemann intakes at Mach 8 and M-flow intake rings at Mach 2.

Design of experimental models is underway by using this capability toward experiment scheduled in 2017, for which preliminary testing has been conducted in the supersonic wind tunnel at IFS. Numerical studies are being advanced for both continuum and rarefied regimes to verify and compare with the results to be obtained from experiment.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (including international conference with peer review and tutorial paper)
 - [1] S. Mölder: Curved shock theory, *Shock Waves*, Vol. 26, No. 4, (2016), pp. 337-353.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - *[2] H. Ogawa, B. Shoesmith, S. Mölder, G. Shoen, Y. Bondar, E. V. Timofeev, K. Ohtani, and S. Obayashi: Shock Behaviour and Centreline Reflection in High-Speed Air Intakes, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 46-47.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J16094
Classification	International multiple collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2nd year

Characteristic Simulation of Neutral Beam Etching Fabricated Nanodisks for New Material Applications

Yiming Li^{*†}, Seiji Samukawa^{**††}

^{*} 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 1st year investigation, we continuously examine the electrical and physical properties of neutral-beam-etching (NBE) fabricated nanodisks (NDs) by solving a set of electronic and quantum mechanical equations. The main results of this project indicate new characteristics of the explored nanometer-scaled material for advanced application in the field of energy harvesting devices.

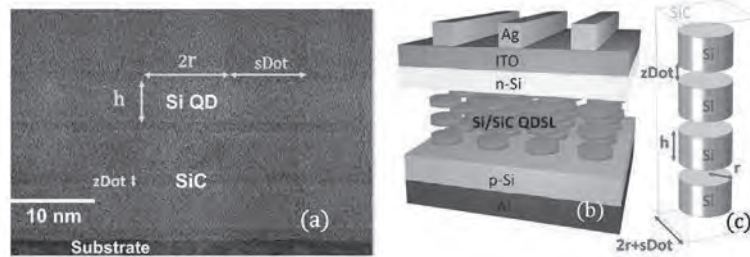


Figure 1 : (a) A cross-sectional BF-STEM image of the fabricated QDSL sample. (b) Schematic plot of the studied QD solar cell. (c) Illustration of a unit cell of four QDs for a four-layered QDSL, where the number of QDs depends on the layer number.

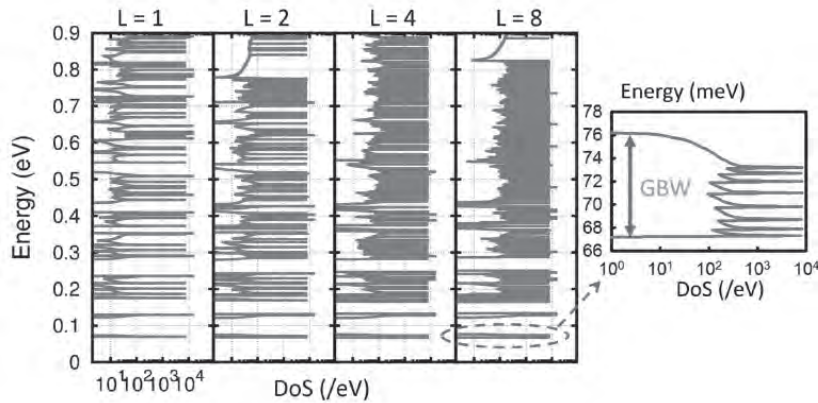


Figure 2 : Plot of the heavy hole DoS for Si/SiC QD superlattice (QDSL) with $h = 4.0$ nm, $r = 3.2$ nm, $sDot = 0.3$ nm, and $zDot = 0.5$ nm. Four different number of layers: 1, 2, 4, and 8 are simulated. The right inset shows a zoom-in plot of GBW for $L = 8$.

2. Details of program implement

As shown in Fig. 1, we explore the electrical and physical properties of the NBE fabricated multi-layer NDs by intensively performing numerical simulation of electronic structure for the nanostructure system firstly. As shown in Fig. 2, we consider density of state (DoS) with process parameters from experimental parameters of NBE. The ground state bandwidth (GBW) and optimal operation condition are examined for the fabrication of s Si/SiC NDs. The main results of this project may benefit advanced application in the field of QDSL devices.

3. Achievements

We successfully developed physical models for NBE fabricated multi-layer NDs which exactly meet the target stated in the application form. Both the electrical and physical characteristics have been explored in this project. We have reported interesting studies and have joint publication in many journals and conferences from both universities.

4. Summaries and future plans

We have reported timely the dependency of miniband energy and bandwidth on the vertical space, the horizontal space, and the number of layers for Si/SiC QDSL. For the thinner vertical space, the conversion efficiency can be enhanced by introducing more number of layers. On the contrary, a four-layered QD solar cell is able to approach the maximum efficiency for those cases with vertical space thicker than 2.0 nm. For further exploration, and for the expected utility value, the vertical space should not be broader than 4.0 nm. In the next project, we will focus on the optimization of multi-layer NDs for energy harvesting devices.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] Wataru Mizubayashi, Shuichi Noda, Yuki Ishikawa, Takashi Nishi, Akio Kikuchi, Hiroyuki Ota, Ping-Hsun Su, Yiming Li, Seiji Samukawa, and Kazuhiko Endo: Impacts of plasma-induced damage due to UV light irradiation during etching on Ge fin fabrication and device performance of Ge fin field-effect transistors, *Applied Physics Express*, January, (2017), Vol. 10, No. 2, pp. 026501 (4pp).

[2] Fu-Ju Hou, Po-Jung Sung, Fu-Kuo Hsueh, Chien-Ting Wu, Yao-Jen Lee, Yiming Li, Seiji Samukawa and Tuo-Hung Hou, "Suspended Diamond-Shaped Nanowire with Four {111} Facets for High-Performance Ge Gate-All-Around FETs," *IEEE Transactions on Electron Devices*, (2016), Vol. 63, No. 10, pp. 3837-3843.

(Other) 8 Journals

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

*[3] Yi-Chia Tsai, Ming-Yi Lee, Yiming Li, Mohammad Maksudur Rahman, and Seiji Samukawa, "Miniband Formulation of Neutral Beam Etching Fabricated Si/SiC Nanodisks Array," *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI 2016)*, Sendai, (2016), pp. 70-71.

(another) 1 Domestic Conference

3) Patent, award, press release etc.

(Award) Best Paper Award, Ming-Yi Lee, Yi-Chia Tsai, Yiming Li, and Seiji Samukawa, "Numerical Simulation of Physical and Electrical Characteristics of Ge/Si Quantum Dots Based Intermediate Band Solar Cell," *IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE Nano 2016)*, Sendai, Japan, Aug. 22-25, 2016, pp. 357-360.

Project code	J16095
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	3rd year

Characterization of Plastic Deformation Using Electromagnetic NDT Methods

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

1. Purpose of the project

Concerning the plastic deformation occurred in the structures of Reduced Activation Ferritic/ Martensitic (RAFM) steels, which is a candidate material for new generation nuclear structure, to propose and validate electromagnetic NDT methods for their quantitative evaluation are the major objectives of the third year project. With experiments and numerical simulations, the correlation and influence of the plastic strain and residual stress on the NDT signals are investigated for a typical RAFM steel.

2. Details of program implement

To evaluate the plastic deformation and the residual stress in a structure of RAFM steel at the same time by using magnetic methods, a hybrid NDE approach was proposed and validated. The feature parameters of the magnetic Barkhausen noise, magnetic incremental permeability and the magnetic flux leakage were on-line measured for test-pieces of different plastic deformation during elastic tensile loading process. The feature parameters of the NDT signals show different tendencies for the residual stress and plastic strain. An R index factor approach was proposed then to simultaneously evaluate the residual stress and plastic deformation in the RAFM steel. The experimental results show that the proposed method and testing system are efficient to evaluate the residual stress and plastic deformation in RAFM steel.

In practice, a fixture was designed and fabricated to attach the hybrid NDT probe onto the surface of test-pieces (TPs) to make online NDE measurement. Five TPs with different levels of residual plastic strains (0%, 1%, 2%, 3%, 5%) were prepared. Online MBN, MIP and MFL measurements were conducted when the TPs were being stretched to a selected stress level (0, 50, 100, 150, 250 MPa) in elastic range. The dependences of the features parameters of the measured signals on the plastic strain and stress were investigated. To obtain the residual stress and plastic deformation from the measured ENDE signals at the same time, an index parameter R is proposed as

$$R = \sqrt{\left| \frac{A-a}{A(1,1)} \right|} + \sqrt{\left| \frac{B-b}{B(1,1)} \right|} + \sqrt{\left| \frac{C-c}{C(1,1)} \right|} \quad (1)$$

where A, B, C are the feature parameter values at each stress and strain values applied in the calibration tests and at the interpolation points between them, a, b, c are the measured feature parameter values at the point to be evaluated. The residual stress and plastic deformation at the testing point can be obtained by taking the values where

the index R shows minimum value. A group of typical evaluation results are shown in Table.1. The true residual stress and plastic strain (200 MPa and 3%) were predicted as exact values and the true value (90 MPa and 1.6%) were predicted as 85 MPa and 1.4%. The result shows that the R value approach can help to get the information of residual stress and plastic strain at the same time.

Table.1 Two examples of stress and strain evaluation

		True	Predict		True	Predict
Stress (MPa)	Test1	200	200	Test 2	85	90
Strain (%)		3	3.1		1.4	1.5
R value		0.01	0.08		0.1	0.13

3. Achievements

A method to evaluate the plastic deformation and the residual stress in a structure of RAFM steel at the same time by using magnetic nondestructive evaluation methods was proposed and validated. R index method is proved effective to get the residual stress and plastic deformation in RAFM structure at the same time.

4. Summaries of the three years project

The correlations of plastic deformation in a carbon steel on signals of different methods were investigated via experiments in the first year. In the second year project, the feasibility of ENDE for evaluation of plastic deformation in a structure of biaxial strain state was investigated. In this year project, the ENDE method for simultaneous evaluation of residual stress and residual strain in a structure of RAFM steel was developed. Over 10 journal papers were published during the 3 year projects.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - *[1] Shejuan Xie, Mingming Tian, Pan Xiao, Cuixiang Pei, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi: A hybrid NDT method of PECT and EMAT Techniques for Simultaneous Surface and Volumetric Defects Inspection, *NDT&E Int.*, 86(2016), pp. 153-163.
 - [2] Hongmei Li, Dongli Zhang, Wenlu Cai, Yong Li, Zhenmao Chen, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi: Effect of phase transformation on the damage induced magnetization of 304 austenitic stainless steel, *Stud. Appl. Electromagn. Mech.*, (2016), Vol. 41, pp. 187-194.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - *[3] Zhenmao Chen, Shejuan Xie, Manru He, Tetsuya Uchimoto, Toshiyui Takagi: Characterization of plastic deformation and residual stress using ENDE method, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 48-49.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - Not applicable.

Project code	J16101
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Analysis of Transport Phenomena of Oxygen Ion in Electrolyte of Solid Oxide Fuel Cell

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

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University

***Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

For membrane materials of solid oxide fuel cell, the key properties are mixed ionic and electronic conductivity (MIEC) that allows oxygen ion to permeate through the material at various conditions. A conducting perovskite-type oxygen transport membrane (OTM) reactor has shown promising results, but requires more extensive evaluation concerning MIEC properties. To evaluate the oxygen ionic conductivity, the membrane was investigated by both experiment and simulation. From these results, we suggest a new concept of membrane which has high ionic conductivity.

2. Details of program implement

To improve the stability of the MIEC an additional exclusively ionic conductive material was added at varying ratios to the overall material composition. $\text{Ce}_{0.2}\text{Sm}_{0.8}\text{O}_{2-\delta}$ (SDC) was selected as the additive material to be combined with the high performing $\text{SrSc}_{0.1}\text{Co}_{0.9}\text{O}_{3-\delta}$ (SSC) MIEC material. Based on a weight ratio, the materials were mixed together using a ball milling technique, then formed into bar shaped samples using a dry pressing machine where they were subsequently sintered at high temperatures (1200 °C). After sintering the material morphology and structure was investigated using a scanning electron microscope (SEM).

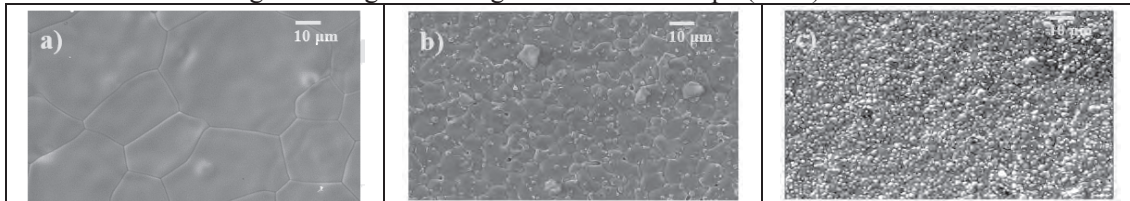


Figure 1: SEM images of the dual-phase OTM surfaces arranged in incremental order a) 0 wt.% of SDC additive b) 20 wt.% of SDC additive and c) 50 wt.% of SDC additive after sintering for 5 hours at 1200 °C

After examining the morphology and structure of the fabricated samples, it was found that the inclusion of additive materials increased the number of grain boundaries, prompting the development of an accurate simulation model. After fabrication, overall samples conductive properties were investigated. It was shown that although the additional SDC improved samples mechanical and chemical stability, the total conductivity of the material declined.

Regarding the simulation analysis, a Molecular Dynamics (MD) simulation models in which grain boundaries exist were constructed for SSC which has perovskite structure and SDC which has the fluorite structure membranes. It has been found that the mixture of these two oxides shows high MIEC. The constructed models in this study are

shown in Figure 2. The first model is membrane of SSC having grain boundaries (left figure). The second model is membrane of SDC having grain boundaries (middle figure). The third model is membrane in which grain boundaries exist between SSC and SDC (right figure). All models can be changed the distance between the grain boundaries and we have confirmed the diffusion coefficient of oxygen ion decreases due to the grain boundaries.

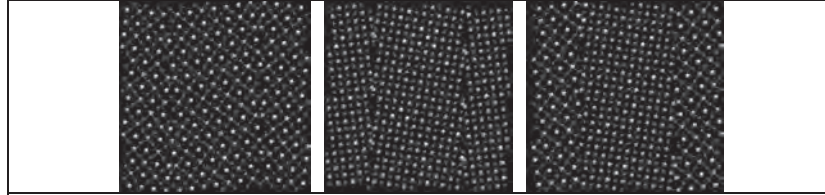


Figure 2: The constructed models which has grain boundaries

3. Achievements

The inclusion of an addition material (SDC) showed no modification to the original perovskite-type material (SSC). As more SDC was added, the fabricated samples showed an increase in grain boundaries throughout the entire structure. Upon further investigation, the total conductivity was shown to decrease with the addition of SDC. As for the simulation analysis, we have consulted the MD simulation models in which grain boundaries exist and confirmed that the effect of the grain boundaries on the diffusion coefficient of oxygen ion.

4. Summaries and future plans

The structure and conductive properties of a MIEC material comprised of two different materials was investigated. The fabricated membranes showed an increase in grain boundaries throughout the structure with the addition of SDC. Additionally, the total conductivity of the membrane material was found to decline with the inclusion of more SDC within the overall sample. Future experimental work will aim to investigate the ion and electron mobility at the interface between both materials.

In regard to the simulation analysis, we constructed MD simulation models in which grain boundaries exist and their effect were analyzed. As the future plans, the effect of nanoscale structure in MIEC on its properties will be analyzed by using the constructed models and we propose a membrane which has high ionic conductivity.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - [1] R. Falkenstein-Smith, P. Zeng, and J. Ahn: Investigation of Oxygen Transport Membrane Reactors for Oxy-Fuel Combustion and Carbon Capture Purposes, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, No. 3, (2017), pp. 3969-3976.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - *[2] R. Falkenstein-Smith, M. Rushby, J. Ahn, H. Nagashima and T. Tokumasu: Exploring the Performance of Dual Phase Oxygen Transport Membranes for Carbon Capture Purposes, *Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, (2016).
 - *[3] H. Nagashima, R. Falkenstein-Smith, T. Tokumasu, and J. Ahn: Analysis of Transport Phenomena of Oxygen Ion in Membrane of Solid Oxide Fuel Cell, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 122-123.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J16104
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Research of High-Speed Contact with Medical Devices

Makoto Ohta*†, Vincent Fridrici**

Yuta Muramoto***, Philippe Kapsa**††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Ecole Centrale de Lyon, France

***Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Purpose of this study is to measure the forces during drill such as torque or thrust to bone model. Based on the results of measurement, the bone model will be developed and evaluated.

2. Details of program implement

In the surgical field, bone biomodels are used for the purpose of improvement of doctor's skill or evaluation of medical devices. Especially for a training of dental implant surgery, jawbone models are used. However, there is no standard evaluation method of bone biomodel and therefore the best model for the performance of drilling is not clear. In this study, in order to understand drilling behavior and propose adequate evaluation method of bone biomodels, measurement of friction torque under drilling was carried out with existing bone biomodels, pig femur and PMMA (poly(methyl methacrylate)).

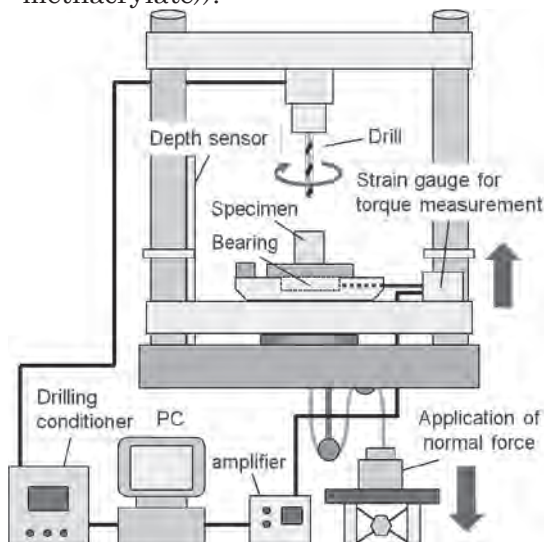


Fig. Drilling system for evaluating bone models.

3. Achievements

Expected results

4. Summaries and future plans

We will evaluate several bone models.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] Y. Muramoto, V. Fridrici, Ph. Kapsa, G. Bouvard, M. Ohta: Tribological aspects of drilling bone biomodel, *Procédés et Génie civil, JIFT2015 (Journées Internationales Francophones de Tribologie 2015, 27-29 mai 2015, Nantes, France, Edited by M. -T. Do, V. Cerezo, Ph. Kapsa, (2016), pp. 81-89.*

[2] Kaihong Yu, Ren Takahashi, Makoto Ohta: DEVELOPMENT OF THE WORKING FLUID WITH BLOOD VISCOSITY FOR EVALUATING ABLATION CATHETER IN IN VITRO SYSTEM, *International Mechanical Engineering Congress & Exposition 2016*, (2016), Phoenix Convention Center, Phoenix, AZ, USA.

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

[3] Yuta Muramoto, Joanna Seiller, Vincent Fridrici, Gaëtan Bouvard, Philippe Kapsa, Makoto Ohta: Material Investigation for the study of drilling bone biomodel, *3rd International Conference on BioTribology (ICoBT 2016)*, (2016), London, UK.

[4] Kaihong Yu, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Makoto Ohta: Evaluation of Tissue Heating for Radiofrequency Ablation Using a Vibrating Catheter, *TFC ELyT Workshop 2016*, (2016), Tohoku University & Miyagi Zao Royal Hotel, Japan.

*[5] Yuta Muramoto, Joanna Seiller, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Gaëtan Bouvard, Makoto Ohta: Drilling under constant feed rate for bone biomodel made of acrylic composites, *TFC ELyT Workshop 2016*, (2016), Tohoku University & Miyagi Zao Royal Hotel, Japan.

*[6] Gina Fauziah AKASUM, SUPRIJANTO, Kaihong YU, Makoto Ohta, Radiofrequency Ablation: Lesion Size Measurement on Agar Phantom, *TFC ELyT Workshop 2016*, (2016), Tohoku University & Miyagi Zao Royal Hotel, Japan.

[7] 太田 信, 于 凱鴻, Simon Tupin, 清水康智, 安西 眸: 力学的、熱力学的機能性を付与した生体組織モデル (バイオモデル) の開発と応用, 第12回東北大学 REDEEM シンポジウム, (2016), 東京堂ホール, 東京.

[8] Kaihong Yu, Ren Takahashi, Makoto Ohta: In Vitro Experimental Evaluation for Radiofrequency Ablation: Electrode Temperature and Lesion Size of Ablation with Open Irrigation Cooling, *3rd Biomedical Science and Technology Symposium (Macquarie-Tohoku Symposium)*, (2016), Sendai, Miyagi, Japan.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J16105
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Development of Program for Surveying Stent Strut Position

Makoto Ohta*†, Bastien Chopard**††

Kazuhiro Watanabe***, Mingzi Zhang ****, Hitomi Anzai*****

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Geneva University, Switzerland

***Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University

****Graduate School of Engineering, Tohoku University

*****RIFS, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Purpose of this study is to calculate all possibilities of place of stent strut. This study is a bottom up study and is the first time in the world. We will find a proper stent strut distance through this study.

2. Details of program implement

Flow diverter (FD) stent implantation is becoming attractive for the treatment of cerebral aneurysm because of its low level of invasiveness. However, the implantation of FD stent poses a risk of parent artery occlusion [1]. This is thought to be caused by bio-reaction to metal. Therefore, one strategy for avoiding the risk of arterial occlusion is the use of a device with a higher porosity to reduce the amount of metal used.

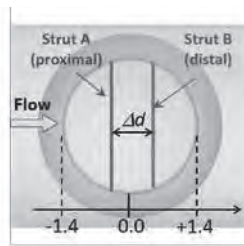


Figure 1: Strut placement on the neck plane

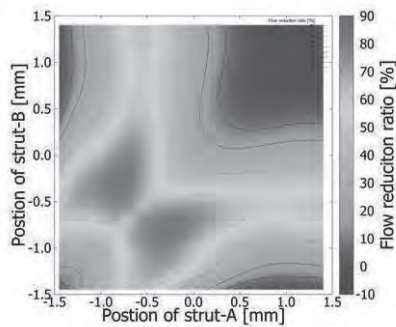


Figure 2: Flow reduction ratio with idealized aneurysm model and two struts

However, the flow diversion efficiency of a high-porosity stent is sensitive to deploying position [2].

In this study, we performed flow simulation to propose well-balanced stent design in the view points of positioning robustness, and porosity.

From the comprehensive studies, we confirmed a critical area that maintained a high flow reduction regardless of the position of another strut. This result is expected to provide important guidance on stent porosity with regard to robustness of deployment. (courtesy from Japan-Swiss Biomechanics 2017)

3. Achievements

Expected results

4. Summaries and future plans

We will expand this strategy using deep learning system.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] Kazuhiro Watanabe, Hitomi Anzai, Makoto Ohta: FLOW SIMULATIONS TO ESTABLISH THE RELATIONSHIP BETWEEN THE INFLOW ZONE IN THE NECK OF A CEREBRAL ANEURYSM AND THE POSITIONS OF STRUTS, *International Mechanical Engineering Congress & Exposition 2016*, (2016), Phoenix Convention Center, Phoenix, AZ, USA.

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

*[2] 安西眸, 渡邊和浩, 張明子, Narendra Kurnia Putra, 竹島由里子, 太田信: 医工学分野における CAVE 活用, 可視化情報, (2016), Vol. 36, No. 143.

[3] Narendra Kurnia Putra, Hitomi Anzai, Makoto Ohta: Comparison Study of Blood Flow Pattern Changes due to the Blood Vessel Deformation during Intravascular Stent Deployment, *TFC ELyT Workshop 2016*, (2016), Tohoku University & Miyagi Zao Royal Hotel, Japan.

[4] Narendra Kurnia Putra, Hitomi Anzai, Makoto Ohta: Hemodynamic Behaviors under Blood Vessel Deformation by Stent Struts, Two Dimensional Study, *Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, (2016), Sendai.

[5] Hitomi Anzai, Norman Juchler, Makoto Ohta, Sven Hirsch, Daniel A. Rüfenacht, Isabel Wanke: Correlating MR Wall Enhancement and Wall Shear Stress: Does CFD work to predict aneurysm instability? (P29) , *13th International IntraCranial Stent Meeting*, (2016), Kobe, Japan.

3) Patent, award, press release etc.

(Award)

[1] Hitomi Anzai, Poster Award (13th International IntraCranial Stent Meeting, Nov. 26-27, 2016, Kobe)

[2] Kazuhiro Watanabe, Poster Award (13th International IntraCranial Stent Meeting, Nov. 26-27, 2016, Kobe)

課題番号	J16107
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

マウス胎仔を用いた自律神経発達過程における胎仔脳出血発症リスクの検証
Verification of Fetal Cerebral Hemorrhage Risk in the Autonomic Nervous Development Stage
in Murine Fetus

船本 聖絵*, 杉林 里佳**, 船本 健一***, 伊藤 拓哉†, 早瀬 敏幸****††, 木村 芳孝*

*東北大学大学院医学系研究科 融合医工学分野

**国立成育医療研究センター 周産期・母性診療センター 胎児診療科

***東北大学学際科学フロンティア研究所

****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

胎児は出生後の外的環境に対応するため、胎児期の発育環境に対するエピジェネティックな制御を機能させて体質を作る。妊娠中の環境は、胎児の出生後の健康や疾患に大きく影響を及ぼすため、妊娠中に摂取する栄養の過不足や催奇形因子などには十分注意する必要がある。催奇形物質として知られるビタミン A は、過剰であっても不足であっても胎児に様々な奇形（心臓・顎・耳・眼・四肢など）をもたらす。特に、絶対過敏期と呼ばれる妊娠 4 - 7 週は、心臓の原基が作られ、脳や全身へ血流を循環させ始める重要な時期であるため、この時期の過剰摂取は致命的となり得る。一方、近年の出産においては、出生体重 2,500g 未満の低出生体重児が増加の一途を辿っている。特に未熟な早産児は呼吸や循環が不安定なため、脳が障害を受けやすい特徴がある。新生児の脳室内出血は、そのほとんどが出生体重 1,500 g 未満の超低出生体重児や、1,000 g 未満の極低出生体重児に発症している。しかし、先天性心奇形と脳内出血を同時に扱った研究例は少なく、両者の関係やメカニズムの解明はなされていない。そこで我々は、妊娠マウスに催奇形物質の一つであるビタミン A を過剰に投与し、マウス胎仔の先天的な心疾患・心奇形と脳出血の関係性について、自律神経系の発達過程の観点から脳出血発症リスクについて評価を行った。

2. 研究成果の内容

日本クレア株式会社より購入した 7 - 20 週齢の C57BL/6N メスマウスを、同系統のオスと一晚同居させ、翌日の朝を胎生 0.5 日目 (E0.5) とした。マウスは無処置群 (N/T 群) とビタミン A 群 (VA 群) の 2 群に分け、VA 群のマウスに対しては、胎生 7.5 日目 (E7.5) に 7,500 I.U. のビタミン A (チョコラ A 筋注, エーザイ株式会社, 東京) を母体に皮下注射した。胎生 18.5 日目 (E18.5) にマウス母体の体重に応じて混合麻酔 (ケタミンとキシラジン) を皮下注射し、麻酔下で腹壁を開腹し、子宮壁上から胎仔の体の 2 ヶ所に針電極を接触させて心電図の計測を行った。また、中心周波数 40 MHz の超音波プローブを装着した小動物用超音波高解像度イメージングシステム (Vevo2100, VisualSonics Inc., カナダ) を用い、左心室内の血流の超音波パルスドプラ計測を行った (図 1 参照)。

N/T 群および VA 群のマウス胎仔の間で、心電図や心拍数に差異は見られなかった。しかし、マウス胎仔の左心室の超音波パルスドプラ計測データから心拍出量を算出した結果、VA 群のマ

ウス胎仔の心拍出量は、N/T 群のマウス胎仔の値と比較して有意に減少していた(図 2, $p < 0.001$)。また、心電図計測装置を用いて得られたマウス胎仔の心電図データから、任意の 1 分間の心電図を周波数解析した結果を図 3 に示す。N/T 群と比較して、VA 群では周波数の分散が少なく、自律神経系のバランスが偏っていることが示された。

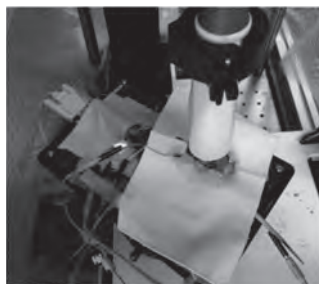


図 1. 実験の様子

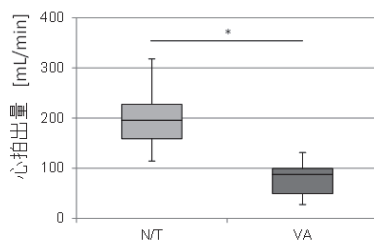


図 2. 左心室内の心拍出血流量

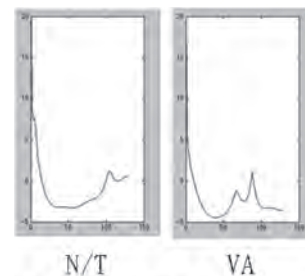


図 3. 心拍変動の周波数分布

3. 研究目標の達成状況

マウス胎仔の自律神経系の発達過程を評価するために必要不可欠な心電図計測と超音波パルスドプラ計測の同時計測に成功した。本研究で計測を行ったマウス胎仔の胎齢は E18.5 のみであり、自律神経系が確立する以前の胎齢においても同様に計測を行う必要がある。実験後の胎仔脳のサンプリングによる観察評価や、低酸素負荷を与える実験についても今後の課題である。

4. まとめと今後の課題

マウス胎仔心電図計測装置および小動物用超音波診断装置を用いて、マウス母体のビタミン A 過剰摂取による胎仔心臓の心電図と左心拍出量の変化を調べた。その結果、VA 群のマウス胎仔の心拍出量は、N/T 群のマウス胎仔の値と比較して有意に減少していた。すなわち、VA 群では脳へ拍出される血流量が少ないこと示唆され、発達障害など発育の遅れが推察された。本研究では、心疾患・心奇形と脳出血の直接的な関連性は認められなかったが、今後、出生後の新生児を対象とした心拍出量の定量化などを行い、さらに検討を行う予定である。

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] K. Funamoto, R. Sugibayashi, K. Funamoto, K. Nakanishi, T. Ito, M. Kawataki, T. Hayase and Y. Kimura: Analysis of an Autonomic Nervous System of Mouse Fetus with Congenital Heart Defect, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 92-93.

[2] K. Funamoto, M. Kawataki, K. Nakanishi, C. Yoshida, K. Funamoto, Y. Dong, T. Ito, N. Sato, and Y. Kimura: Excess Retinoic Acid to Pregnant Mouse Increases The Risk of Long QT Syndrome for The Fetal Heart, *Abstracts of the Joint Meeting of the German and Japanese Societies of Developmental Biologists*, Kiel, Germany, March, (2017), pp. 77-78.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J16108
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3 年目

移動物体周りの非定常流体現象予測の高度化のための研究

Study for Accurate Prediction of Unsteady Aerodynamic Characteristics around Moving Objects

大林 茂†*, 高橋 俊††**

*東北大学流体科学研究所

**東海大学工学部動力機械工学科

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

流れ中で運動する物体周りで生じる非定常流体現象と履歴現象に対して、実験と数値解析の両面からアプローチして高精度な予測を行う。実工学製品における非定常流体現象の性能検討は重要であるが、データ取得の困難さから未だ発展が望まれている。そこで本研究ではこれに対して試験技術と直交格子法による数値解析技術の開発と高度化により、物理現象の解明に取り組む。具体的には非定常翼周りで生じるダイナミックストールの要因解明や、ロケット後流に含まれる多数の金属微粒子の固気二相流解析を実施し、それらを応用した流体制御技術の開発や、メカニズムの解明による数理モデル化を行う。

2. 研究成果の内容

NEC SX-9 を主に用いて大規模計算を行い、ロケット後流を模擬した固気二相流解析を行った。支配方程式は圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用い、擬混合型と MUSCL-Roe 型のスイッチングスキームにより非粘性流束を評価し、高マッハ数、低レイノルズ数の流れ場の解析を行った。物体形状は immersed boundary method により表現している。流れと粒子の相対速度から求められる粒子径基準の Re 数を 300 と 600、また衝撃波マッハ数を 1.5 とし、球 1 つは 20 格子点程度で離散化されており、単体球周りの空力係数については検証を行っている。図 1 の左図はそれぞれレイノルズ数を 300 と 600 とし、微粒子の数を 18 個と 36 個にした場合の解析結果を示しており、渦度は Q 値の等値面により可視化を行っている。右図はその中のレイノルズ数 600、粒子数 36 個の可視化図を示している。この他にも粒子数を変化させて解析を実施しているが、粒子数が増えるに従って、粒子と粒子自身の後流との干渉が増加し、流れ場と粒子のエネルギー交換が活発に行われることが分かった。現在はさらに粒子数を増やすと共に粒子の温度と流れの温度比の影響、さらには粒子の回転運動の影響について調査を行っている。

3. 研究目標の達成状況

本研究の目標は、複数の任意形状が流れ場中で移動する際の非定常流れ場解析、予測技術の開発である。それに対して、本研究では多数の微粒子が壁面と干渉する流れ場の解析を行ってその精度実証と現象論について先行研究と比較する形で議論した。多数物体の高速解析技術開発は進んでいるものの、任意形状の移動物体の高速解析技術については未だ発展途上であり、今後さらに開発を進める必要がある。

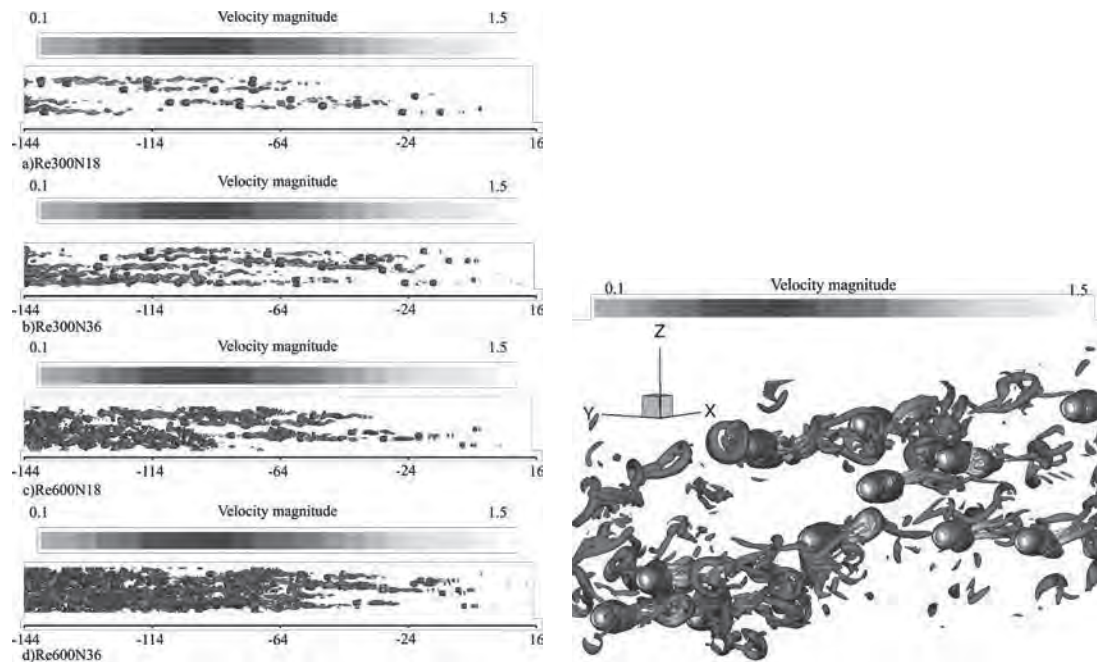


図 1：ロケット後流を模擬した多数微粒子周りの固気二相流解析例

4. まとめと今後の課題

本研究では、移動物体周りの非定常流れ場の実験と解析による計測技術開発のため、数値解析技術を中心に開発を行ってきた。本解析では多数の微粒子と流れとの干渉解析により、これまでの線形解析等よりも工学的に意義のある情報を得た。今後は球のみならずより複雑形状に対しても移動物体解析を実施し、実験との定量的な比較検討を行って移動物体周りの解析技術の開発とその精度実証に勤める。

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）なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Y. Mizuno, S. Takahashi, T. Nonomura, T. Nagata and K. Fukuda: Gas-particle flow simulation based on compressible flow solver with immersed boundary method, *Proceedings of 28th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics*, Kobe, Japan, (2016).

*[2] Y. Mizuno, S. Takahashi, T. Nonomura, T. Nagata and K. Fukuda: Direct Numerical Simulation with Heat Transfer of Gas-Particle Flow containing Shock Waves by Immersed Boundary Method, *Proceedings of 9th International Conference on Multiphase Flow*, Firenze, Italy, (2016).

[3] Y. Mizuno, S. Takahashi, T. Nonomura, T. Nagata and K. Fukuda: Investigation of Incompressible Flow with Collision of Multiple Particles and Wall by using Immersed Boundary Method, *Proceedings of 13th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, (2016).

[4] 水野裕介, 井上拓哉, 高橋俊, 福田紘大: 埋め込み境界法を用いた複数微粒子が壁に衝突する非圧縮流体の3次元直接数値解析, 第29回計算力学講演会 (2016) .

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）なし

2. 研究成果報告書

<萌芽公募共同研究>

課題番号	J16H001
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	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

木質バイオマス内部の熱分解ダイナミクス

Dynamics of Thermal Pyrolysis Occurring in the Interior of Wood Biomass

大上 泰寛^{††}, 佐々木 凌介^{*}, 大徳 忠史^{*}

中村 寿^{**††}

^{*}秋田県立大学システム科学技術学部, ^{**}東北大学流体科学研究所

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

本研究は、熱的に厚く内部に温度および密度分布を有する固体燃料を対象とし、固体内部の熱分解反応機構を解明することを目的とする。

従来、固体の熱分解に関しては、熱重量計測や示唆熱量計測を用いた反応速度の測定が行われてきた。これらの手法は、「試料が熱的に十分に薄く、内部に均一な温度・密度分布を有する」ことを前提としている。しかしながら、燃焼現象のように固体に対し高い熱流束が発生する場においては内部の均一性が保たれているとは考えにくく、熱重量計測が熱分解反応の測定に適した手法であるとは言い難い。我々は、過去の研究において、高輝度放射光施設 SPring-8 を利用し高温窒素雰囲気中の木質バイオマス内部の X 線透過光計測を行った。本測定手法は、熱分解中の木質バイオマス内部の密度変化をリアルタイムで測定するものである。反応が停止した固体に対する CT 計測は数多く行われているが、本測定法のような固体内部の非定常計測は他に例がなく、世界的に見ても極めて独創性の高いものである。

木質バイオマス内部の密度変化は、セルロース等の高分子の熱分解により生じるものである。よって、固体内部の密度分布の時間変化を計測することで、固体の熱分解反応速度を特定することが可能となると考えられる。本研究では、高温窒素雰囲気中の固体（木質系バイオマス）内部の密度分布の非定常変化の測定と固気混相流れ場に対する数値計算を組み合わせることにより、固体の熱分解反応速度を導出する新たな手法の開発を目指す。

2. 研究成果の内容

熱分解中の木質バイオマス内部の X 線透過光計測は、大型放射光施設 SPring-8 にて行った。実験は、10, 20, 40 K/min の 3 つの加熱速度条件下において温度 650 K まで昇温を行い、昇温過程で生じる X 線透過光強度と木質バイオマス質量の変化を同時に計測した。得られた測定結果より、X 線輝度積算値と木質バイオマス質量の相関を導出した（図 1）。図 1 中の曲線の傾きは平均質量吸収係数を表すが、いずれの加熱速度においても、平均質量吸収係数は質量減少とともに大きくなっていることが分かる。このような平均質量吸収係数の変化は、熱分解により放出される元素（すなわち、化学種）が時間進行に伴い異なるものとなることを表している。また、加熱速度の違いにより、平均質量係数の変化に違いが生じることがわかった。なお、平均質量係数の時間変化を計測することにより、各時刻において熱分解によりいずれの元素が放出されているのかを特定することが可能であると考えられる。

さらに、密度一定の固体に対する伝熱特性の評価を目的とし、2 次元非定常伝熱数値計算

を行った。その結果、実験と同様の加熱条件下において固体内に温度分布が存在することがわかり、固体内部で温度が均一とみなす従来の反応速度導出法には問題があることが確認された。

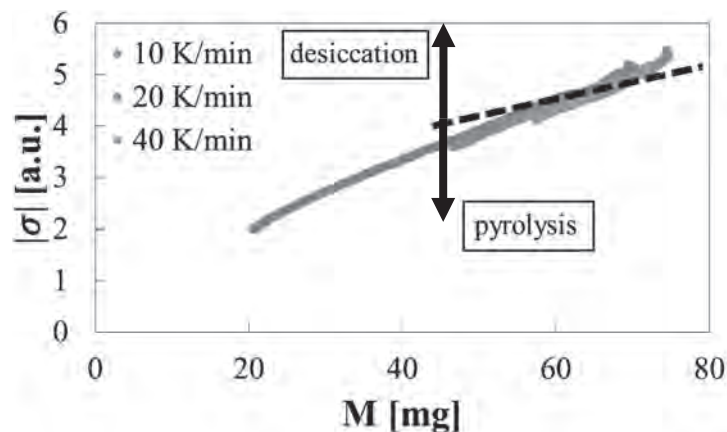


図1：熱分解中の木質バイオマスのX線透過光輝度積算値と質量との関係

3. 研究目標の達成状況

本研究では熱的に厚く、内部に密度分布を有する条件下において熱分解速度を測定することを目的としていた。平成28年度においては、実験および数値計算結果から、熱分解中の固体内部に密度分布が生じることが確認できたとともに、加熱条件の違いにより熱分解速度（化学反応）に大きな違いが生じることが分かった。以上の結果から、平成28年度の当初目的に対する達成度は80%程度であるといえる。

4. まとめと今後の課題

平成29年度は、これまでのX線を用いた計測に加え、化学反応を考慮した数値計算を行う予定ではある。化学反応によるガスの発生や体積変化のモデル化においてはいくつかの課題が存在する。特に、体積変化については加熱による膨張と化学反応による質量変化の2つを考慮する必要がある。これらについては、今年度の実験結果を基に適切にモデル化を行う予定である。以上のような数値計算を行うことにより、高精度な木質バイオマスの熱分解反応モデルの構築が可能となると考えられる。

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）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] R. Sasaki, T. Daitoku, Y. Ogami, H. Nakamura: Observation of Inside of Wooden Biomass during Thermal Pyrolysis by Synchrotron X-ray, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 146-147.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16H002
区分	萌芽公募共同研究
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	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

アルミニウム合金のイメージベース解析 Image Base Analysis of Aluminum Alloy

Vinicius Aguiar de Souza*, 鈴木 克幸**†

大林 茂***††, 下山 幸治***

*東北大学大学院工学研究科, **東京大学人工物工学研究センター

***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

(ア) 研究の背景と目的

アルミニウム合金の長期間使用に資するために、アルミニウム合金の疲労強度の数値的な評価方法を確立し、より高い耐疲労強度を持ったアルミニウム合金を開発するための方法論を構築する。具体的には、アルミニウム合金のCT画像に対し、弾塑性を考慮したイメージベース有限要素解析を行い、繰り返し荷重を負荷した際の疲労強度を評価し、最適設計を行うことにより、より高い耐疲労強度を持ったアルミニウム合金を開発する。

(イ) 研究期間内の最終目標

CT スキャンイメージの取得しこのイメージデータに対し、画像処理の技術を用いて前処理を行い、イメージベース有限要素解析技術を用いた解析により、繰り返し荷重を与えた際の合金の微視構造の弾塑性挙動を解析する。スーパーコンピュータによる大規模計算を進めることにより、き裂の進展のメカニズムを解明し、疲労強度の評価につなげる。そして、最適設計を応用して、具体的な材料の微視構造の設計、合金配分の調整などの設計を試みる。

2. 研究成果の内容

(ア) 新しい解析手法の開発

イメージベース有限要素解析の大規模計算の手法を確立することにより、様々な材料設計を可能とする技術を開発する。

(イ) 新しい現象の解明

アルミニウム合金の破壊のメカニズムを解明することにより、合金の設計の指針を与える。特に、き裂の核生成のメカニズムとして、応力の集中によるものと粒子とマトリクスとの滑りによるもの2つのタイプが考えられており、それらの最終強度への影響について考察する。

3. 研究目標の達成状況

これまで、申請者らは、Spring 8によるAl-Si-Mg合金の鋳造物のCTスキャンイメージの取

得し、このイメージデータに対し、画像処理の技術を用いて前処理を行い、イメージベース有限要素解析技術を用いた解析により、繰り返し荷重を与えた際の合金の微視構造の弾塑性挙動を調べるための準備を進めてきた。2015年からオープンソースソルバーのFrontISTRを流体科学研究所のスーパーコンピュータに移植し、非線形有限要素法を用いた弾塑性解析が行える環境を整えた。

4. まとめと今後の課題

今後、2017年度には、大規模計算を進めることにより疲労強度の評価につなげることを試みる。また、その結果を設計に反映するために、トポロジー最適設計を応用して、具体的な材料の微視構造の設計、合金配分の調整などの設計を試みる。

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] V. Aguiar de Souza, O. Kuwazuru, K. Suzuki, M. Kobayashi, H. Toda, S. Obayashi: Image-based Finite Element Analysis of Fatigue in a Cast Aluminum Alloy, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 72-73.

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	J16H003
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	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

飛行パイプの屋外観測と流れ解析 Field Observation and Flow Analysis of a Flying Pipe

中野 政身*†, 平田 勝哉**††
中井 俊宏***, 宮原 晃平***, 井上 達哉***
*東都大学流体科学研究所, **同志社大学理工学部
***同志社大学理工学研究科
†申請者, ††所外対応研究者

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 モデルの姿勢（迎角）の撮影

以前までは全体の軌道しか撮影できておらず、モデルに働く流体力について考察することにより詳細な画像を得なければならなかった。今回、ハイスピード・ビデオ・カメラを用いてモデルにより接近して撮影を行い、モデルの水平に対しての角度、およびモデルの飛行軌道に対する角度を得ることができた。

2.2 射出装置の設計・製作

これまでの実験では人の手によって投擲しており、撮影のたびに回転数、移動速度、飛行軌道などがすべて異なっていた。詳細な運動解析を行い、モデルに働く流体力を求めるためにはこれらの値を制御する必要がある。そのためにモデルの射出装置を設計し、安定した投擲を行う。本年度は装置の構造・射出機構の検討を行い、装置概形の設計を行った。

3. 研究目標の達成状況

本年度はモデルの迎角の撮影を行うことができ、迎角の時系列変化を把握することができ

た。また、射出装置の設計にも取り組むことができ、詳細なモデルの運動解析を行うための準備を進めることができた。数値解析においては実際のモデルと同形状の計算を構築することができたが、レイノルズ数を合わせた計算を行うためにコードの改良を行っている最中である。

4. まとめと今後の課題

本年度の活動で、飛行パイプの姿勢をある程度詳細に撮影することができ、これまで分かっていなかったモデルの迎角を得ることができた。今後、より詳細な撮影を行うために射出装置の開発が課題である。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うために、計算コードの改良を行う必要がある。また、汎用コード (FLUENT など) を用いてモデルの迎角の変化を考慮したシミュレーションの検討も課題となっている。

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] Kouhei Miyahara, Toshihiro Nakai, Tatsuya Inoue, Hirochika Tanigawa, Katsuya Hirata, Masami Nakano: Experimental and Numerical Study on a Flying Pipe, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 148-149.

*[2] 宮原 晃平, 中井 俊宏, 谷川 博哉, 井上 達哉, 平田 勝哉: “回転しながら飛行するパイプ周りの流れ”, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集[2016.9.11-14, 福岡], J1030105, pp. 1-5.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

(2) 乱流解析手法としてレイノルズ平均モデルを用いた結果、図1に示すように迎角40度以上のポストストール領域において、タイプ0のフラップレイアウトが良好な結果を示した。

(3) 乱流解析手法としてDES、乱流モデルとしてSST k- ω を用いて、迎角40度におけるデルタ翼単体とタイプ0の数値解析を試行した結果、タイプ0のフラップレイアウトにおいて、翼上面側の低圧領域が物体後方まで拡張している様子が確認できた。

3. 研究目標の達成状況

デルタ翼に前縁フラップを取り付け、そのレイアウトを変えることによって、ポストストール領域の空力特性が改善される事が数値計算上で確認でき、今年度の研究目標は概ね達成できたものと考えられる。

4. まとめと今後の課題

本公募共同研究の実施により、前縁フラップの有効性が一部確認できた。しかしながら、数値計算結果は風洞実験結果と比較して良好な一致を示しているとは言えず、DES、SST k- ω を用いた計算結果の積み重ねが必要である。また、風洞実験グループと有機的に連携をとり、数値解析で推測されるフラップレイアウトの有効性を、風洞実験で検証していく。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] T. Ishide, M. Itazawa, K. Nakano, R. Fujii, T. Misaka, K. Shimoyama: Aerodynamic Improvement of a Delta Wing by using in Combination of Leading Edge Flaps, *Proceeding of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 50-51.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）なし

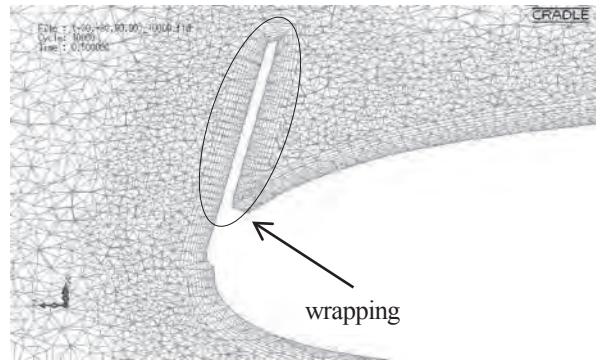


図2：前縁フラップ近傍計算格子

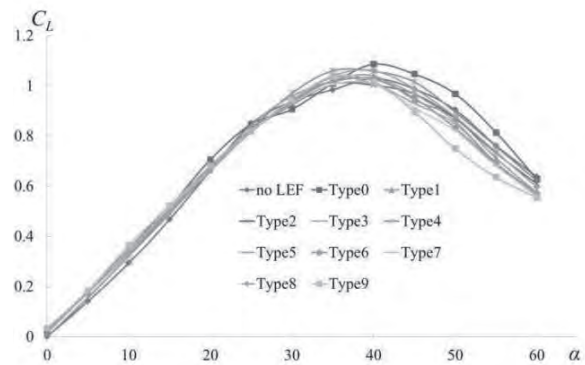


図3：揚力曲線

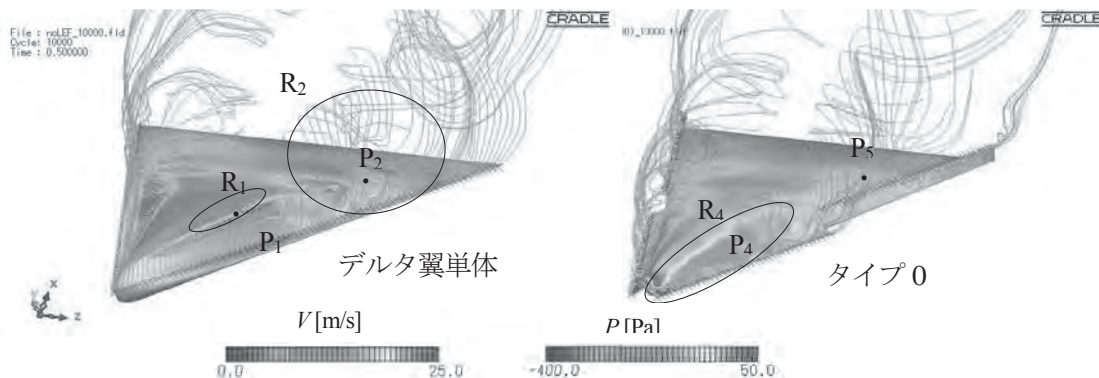


図4：表面圧力分布及び流脈線 ($\alpha=40^\circ$)

課題番号	J16H005
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	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

羽ばたき飛行における柔軟翼の有効性 Effectiveness of Flexible Wing in a Flapping Flight

石出 忠輝[†], 大林 茂^{**††}

中野 滉大^{***}, 下山 幸治^{**}

*木更津高専機械工学科, **東北大学流体科学研究所

***木更津高専専攻科機械・電子システム工学専攻

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

近年災害時における状況確認, 沿岸監視, テロ現場での情報収集等を目的として, 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 に要求されている外形サイズ, 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. 本研究では, これらの研究動向を背景として 3D プリンタを用いて種々の柔軟翼を試作し, その有効性について調査する事を目的としている.

2. 研究成果の内容

本研究では, 表 1 に示す種々の柔軟翼を 3D プリンタによって製作し, 図 1 に示す羽ばたき翼模型をエッフェル型三次元風洞内 (テストセクション 600mm×600mm) に設置し, ヒービング運動させて以下の結論を得た.

- (1) 図 2 に示す揚力曲線より, 羽ばたき運動の効果は, 迎角 10 度以上で顕著になる.
- (2) 翼幅方向に主翼厚さのテーパを付けた場合, タイプ D (テーパ比 0.50) が最も C_{Lmax} が大きくなった.
- (3) 翼弦方向に主翼厚さのテーパを付けた場合, タイプ H (テーパ比 0.33) が最も C_{Lmax} が大きくなった. また失速角 23 度であり, 前述のタイプ D より 7 度大きい値となった.
- (4) タイプ A (ステンレス翼) とタイプ D を対象として, 迎角 13 度において PIV トリガー計測を試行した結果, 図 3 及び図 4 に示すように



図 1 : 羽ばたき翼模型

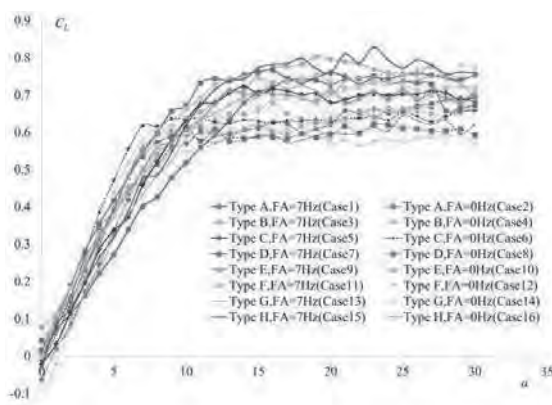


図 2 : 揚力曲線

表 1：主翼仕様

	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E	Type F	Type G	Type H
material	SUS 304	AK-clear film + SUS 304	Vero White Plus (RGD835)	Vero White Plus (RGD835)	Vero White Plus (RGD835)	Vero White Plus (RGD835)	Vero White Plus (RGD835)	Vero White Plus (RGD835)
chord length	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm
thickness	0.2mm	film:50 μ m vein:0.2mm	root:1.5mm tip:1mm	root:1.5mm tip:0.75mm	root:1.5mm tip:0.5mm	leading edge:1.5mm trailing edge:1mm	leading edge:1.5mm trailing edge:0.75mm	leading edge:1.5mm trailing edge:0.5mm

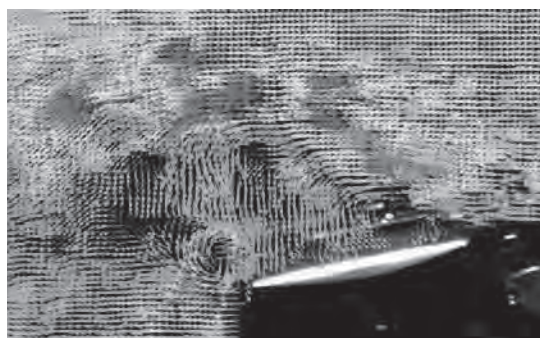


図 3：PIV 解析結果 (type A, $y/b=0.5, \theta=0^\circ$)



図 4：PIV 解析結果 (type D, $y/b=0.5, \theta=0^\circ$)

前縁剥離渦パターンが異なっている様子が確認できた。

3. 研究目標の達成状況

ステンレス製翼と比較し、最大揚力係数が増加する ABS 樹脂翼は存在し、翼幅方向及び翼弦方向に適度なテーパを付けると空力特性が改善される事が確認できた。今年度の研究目標は概ね達成できたものと考えられる。

4. まとめと今後の課題

本公募共同研究の実施により、羽ばたき飛行及び弾性翼の有効性が確認できた。しかしながら、風洞実験データは十分なものとは言えず、再現性の確認が必要である。また、今年度のデータを基に翼幅及び翼弦方向にテーパを持たせた ABS 樹脂翼を製作し、その空力特性と剥離渦配置パターンについて調査し、より明確な柔軟翼プロファイルの有効性についての知見を見出していく。

5. 研究成果（*は別刷あり）

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

*[1] T. Ishide, K. Nakano, R. Fujii, T. Kaeriyama, K. Shimoyama, S. Obayashi: Effectiveness of flexible wing in a flapping flight, *Proceeding of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 52-53.

[2] 石出忠輝, 中野滉大, 板澤磨央, 藤井亮, 歸山智治, 下山幸治, 大林茂: 羽ばたき飛行における柔軟翼の有効性, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 九州大学, (2016), J0240301.

- 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）なし

2. 研究成果報告書

<国際連携公募共同研究プロジェクト>

Multiple Collaborative Research Project	
Project code	J16R001
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

The Characteristics of the Flow Induced by an Over-Expanded Bubble

Mingyu Sun^{*†}, Jiming Yang^{**††}

Nicholas Apazidis^{***††}

Abe Akihisa^{****††}, Koita Taketoshi^{*****††}

^{*}Institute of Fluid Science, Tohoku University

^{**}Dept. of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China (USTC)

^{***}KTH, Mechanics, Sweden

^{****}Kobe University, ^{*****}Saitama Institute of Technology, Japan

[†]Applicant, ^{††}non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The collapse of a near-wall bubble has been extensively investigated mainly because of its capability to generate a high-speed jet and high-pressure shock waves, which are closely related to the cavitation erosion, a main concern of rotating machinery in the marine, pump and other industries. The recent experiment indicates that a 2mm Tantalum block can be sucked up toward the bubble of the maximum radius about 8mm generated by electric discharge. The fact strongly suggests that the motion of underwater particle is affected by a suction force towards the bubble. When a bubble is located near a thin specimen plate, the specimen can be slightly sucked up towards the bubble even during its growth. In some numerical results, the negative pressure is also recorded in the collapse phase using the fully compressible modeling. However, little attention has been paid to this issue probably because the magnitude of the negative pressure can be one or a few orders of magnitude smaller than the pressure peak at the final bubble collapse phase.

It is shown by the Rayleigh-Plesset equation that if bubble growth or collapsing velocity is low, the pressure in water monotonely increases from the bubble pressure to the ambient atmospheric pressure in radial direction. For a vapor bubble, the bubble pressure is often lower than the atmospheric pressure except at the final collapse phase, so that a negative gauge pressure field appears. The negative pressure lasts much longer than the final collapse phase that produces a high pressure. It numerically showed that the magnitude of the negative impulse (suction) can be larger than the positive one at a distance greater than one radius of the maximum bubble from the center, for the bubble initially located at 1.3 times of its radius from the wall. It is estimated that an underwater object may experience acceleration, a few orders of magnitude larger than the standard gravity near an over-expanded bubble in the negative pressure field. The existence of negative pressure may be a new factor that is responsible for the cavitation sterilization and the dust removal from surface using bubbles.

This work tries to quantitatively investigate the dynamics characteristics of objects after shock wave loading and its interaction with the primary bubble. the negative pressure field near an underwater gas bubble. A preliminary study on cavitation sterilization is also performed.

2. Details of program implement

2.1 Dynamic Characteristics of Underwater Objects after Shock Wave loading

In this study, the underwater explosion is created by the electric discharge. Figure 1 shows schematic diagram of the experimental setup. The discharge device consists of the trigger and discharge circuit. The trigger circuit comprises mainly a DC power, a manual trigger and a fly back transformer. Two electrodes are connected with a thin copper wire of 0.05 mm in diameter. The voltage of the high voltage power can be varied from 3 kV to 10 kV with the current of 1 mA. The capacitor is connected in parallel with voltage power and its capacity C is 0.2 μF . Then, the high voltage supplied in the capacitor is discharged instantly in the thin copper wire connected with two electrodes. The generated at the wire raises. When the temperature of the wire reaches the boiling point, the wire vaporizes with high temperature and pressure. The underwater explosion is then generated. Extensive studies have been conducted on the mechanism of the generation of explosion with electric discharge. The underwater shock wave is formed after the discharge, and then, a primary explosion bubble appears at the wire location. The size of tank is 270×270×275mm The size of cube is 2×2×2mm, and the sphere is 2mm in diameter.

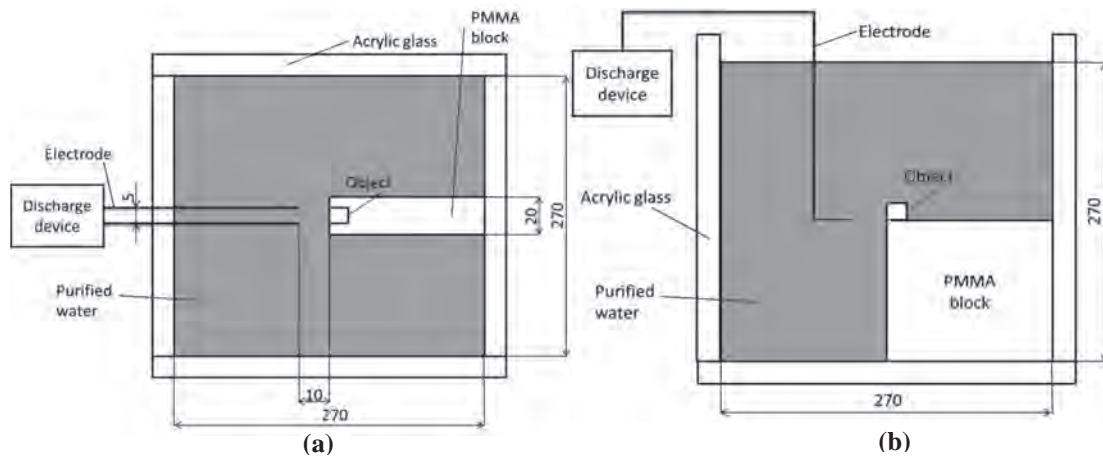


Figure 1 The experimental setup (a) Top view, (b) Side view

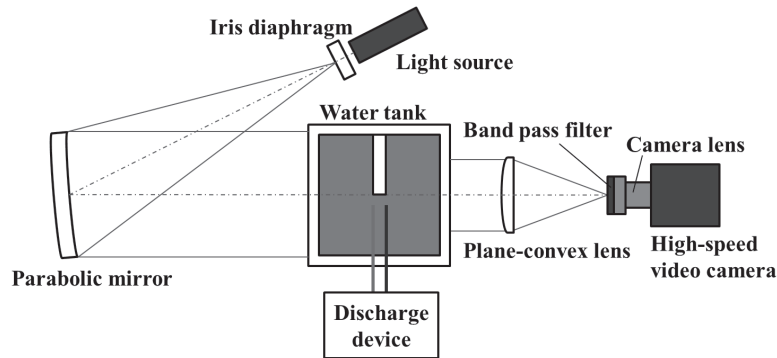


Figure 2 Optical arrangement for the experiment

Figure 2 presents schematically the optical arrangement for visualization. The shock wave and bubble evolution were recorded directly with a high speed video camera, PHANTOM V2010 (Nobby Tech. Co., Ltd.), at the frame rate of 1.2×10^5 frames/s. The visualized field is 384 pixel \times 144 pixel. The laser, CAVILUX HF (Cavitar., Ltd.) with power of 500 W, is used as the light source because it provides laser pulse of short duration of 50 ns, and high luminance light source is required in the direct visualization of small region. The shock wave and the objects will be discussed qualitatively from the

recorded photos. The location of the objects and a few flow features can be measured from recorded photos, and their velocities are then calculated from the displacement.

Figures 3 and 4 show two shadowgraph images of the experimental setup before experiment and an underwater shock wave interacting with the Aluminum block on a PMMA stand about $6.7 \mu\text{s}$ after discharge. The discharge flash around the electrode is more bright in reality. In this study, the flash is filtered by using a bandpass filter that allows the laser beam to pass through, so that the object can be resolved more clearly.

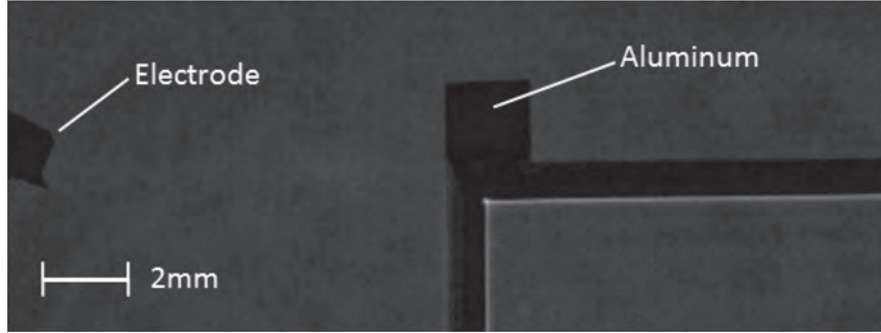


Figure 3 Experiment setup

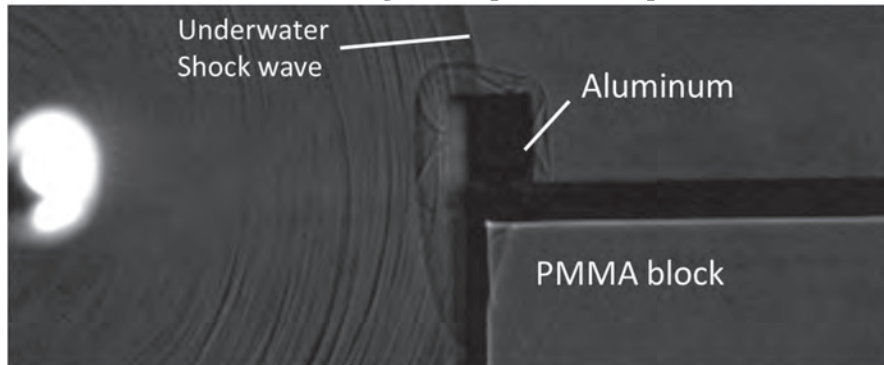


Figure 4 Shock wave interacting with the Aluminum block on a PMMA stand

From the recorded sequential images, we then analyze them to obtain dynamic characteristics of objects. We use image analysis software DIPP-MotionV 2D (DITECT corporation). This software has a subpixel resolution that approximates the target location by interpolating the grayscale of a few pixels in the neighborhood, so that almost continuous location of objects can be recorded, which is important for obtaining a proper velocity. For object identification, we set three reprehensive tracking points as shown in Figure 5. The locations of an object are given by the average one of the three tracking points.

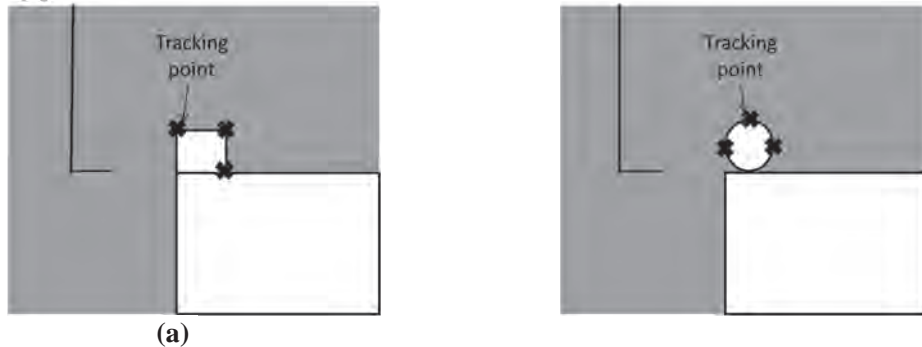


Figure 5 Tracking points for automatic object identification (a) Cubic, (b) Spherical block

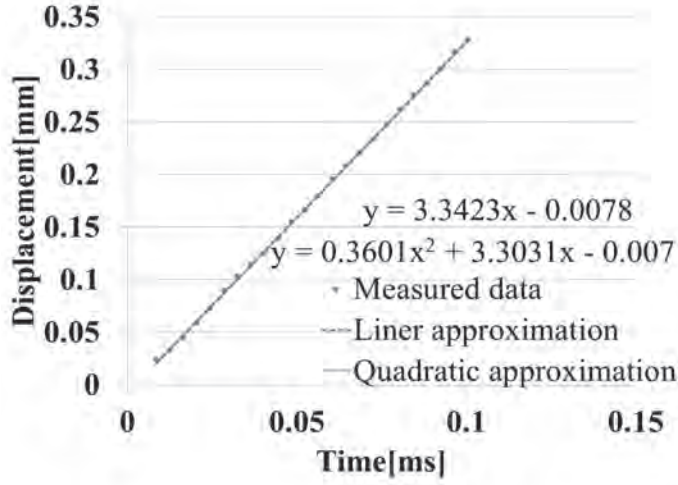


Figure 6 Displacement of PMMA cube

Table 2 Initial velocity of blocks after shock loading

Initial velocity (v)	m/s
Cu-cube	0.51±0.28
Cu-sphere	0.31±0.28
Al-cube	1.55±0.28
Al-sphere (b)	1.69±0.28
PMMA-cube	3.01±0.28
PMMA-sphere	3.08±0.28

Figure 6 shows an example of displacement of PMMA block. In this study, the instant when the shock wave reaches the block is set to be $t = 0$. We do not chase the block immediately after discharge up to $t = 10 \mu s$. The underwater shock wave affects the refractive index, so that the location of block is significantly distorted. According to Figure 6, the object moves beautifully in a linear manner up to $100 \mu s$, or the object has a constant initial velocity. We approximate the displacement by linear and second order polynomials, and then the differential of the polynomials provides velocity. Initial velocity is $t=0$. Table 1 shows the average of initial velocity. The measurement error is estimated by image resolution. The image resolution is 0.056 mm/pixel , and measurement time is 0.1 ms . In these experiments, the velocity error is thus about 0.28 m/s if the maximum measurement error is to be 0.5 pixel . Figure 7 records initial velocity against the maximum radius of primary bubble for three materials with two shapes.

Table 1 The property and the dynamic characteristics of three objects of Cu, Al and PMMA

	Density(kg/m^3)	Sonic velocity(m/s)	Pressure(MPa)	Force (N)
Cu	8960	4660	21.4 ± 11.7	85.6 ± 46.8
Al	2700	6320	26.5 ± 4.8	106.2 ± 19.1
PMMA	1200	2730	1.0 ± 0.9	39.8 ± 3.7

The pressure of shock wave and the force loading on the cubic objects can be further estimated from the measured velocity. We consider the motion equation from Newton's second law, as shown in Eq. (1), where m is the mass of the cubic block. Assuming the pressure behind the shock wave remains a constant during the shock interaction with the block, Eq. (1) can be further simplified to Eq. (2), which provides the pressure of shock wave. The force loading on the cubic is obtained by Eq. (3). Table 2 shows the property and the dynamic characteristics of three objects. The force is different from materials.

$$m \frac{dv}{dt} = P^* S - P_0 S \quad (1)$$

$$P^* = P_0 + \rho v a \quad (2)$$

$$F = P^* S \quad (3)$$

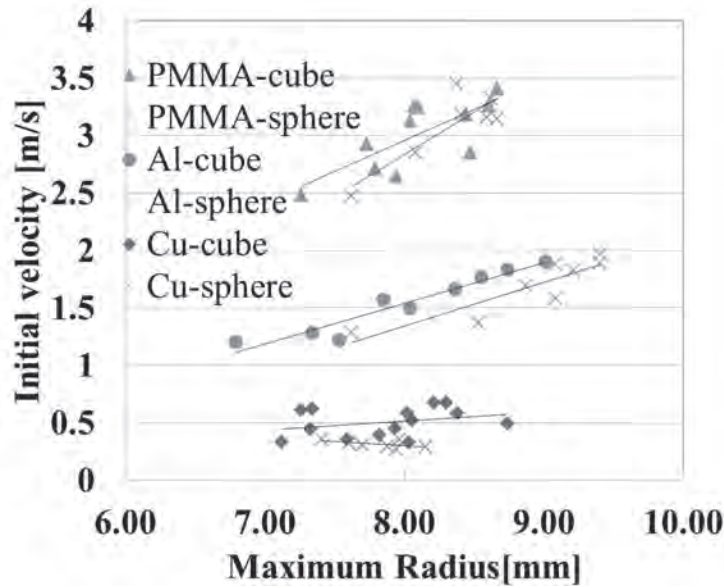


Figure 7 Relationship between initial velocity and maximum radius of primary bubble

2.2 Enhanced Shock Wave Sterilization in a Narrow Water Chamber with Cavitation bubbles

Figure 8 shows a schematic of the bio-experimental setup in a narrow water chamber. The dimensions of the narrow water chamber were 300 mm (H) × 240 mm (W) × 5 mm (D). As shown in Fig. 2, a bag made of a 0.1-mm silicone film was designed in the water chamber and filled with cell suspension of marine *Vibrio* sp.. The dimensions of the silicone bag were 120 mm (H) × 100 mm (W) × 5 mm (D). Its acoustic impedance was almost the same as that of water. The discharge point was set up at a distance of about 20 mm from the bottom of the silicone bag in the water chamber. Underwater shock waves were continuously generated by a high-voltage pulse power supply and a pulse generator.

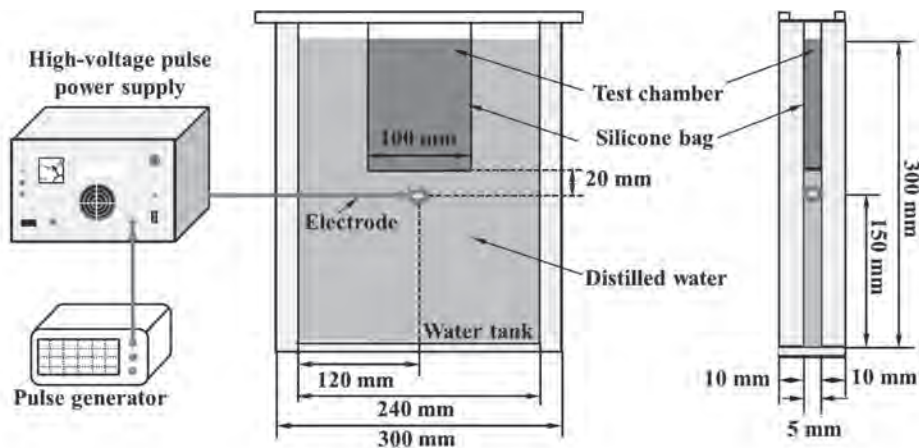


Figure. 8 Schematic of bio-experimental setup in narrow water chamber

Figure 9 illustrates a considerable sterilization mechanism in the narrow water chamber. The cavitation bubbles generated behind the underwater shock waves interact with the reflected shock waves or the next coming shock wave. Finally, rebound shock waves and free radicals are generated by the collapse of the cavitation bubbles, and the

marine bacteria around the bubbles are killed. A photo of the marine *Vibrio* sp. used in the bio-experiments is shown in Fig. 3 (c).

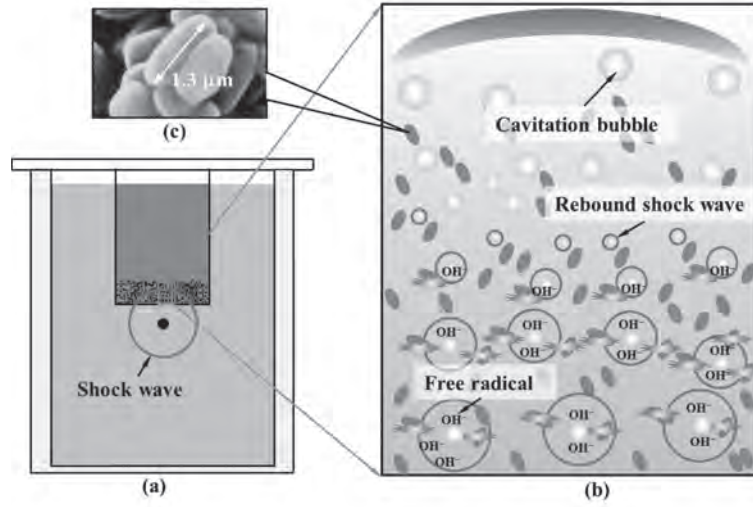


Figure 9 Concept of sterilization mechanism using cavitation bubbles behind generated underwater shock waves

To further investigate the mechanism whereby the cavitation bubbles were generated in the narrow water chamber, the optical observation was carried out in the box area by the dashed lines as shown in Fig. 10. In Fig. 10 (a), the water chamber was filled with distilled water while the silicone bag contained artificial seawater. Figure 4 (b) shows the other setup of the water chamber arranged with an air layer of L_1 between the water surface and the bottom of the silicone bag, to prevent underwater shock waves generated by electric discharge directly propagating into the silicone bag.

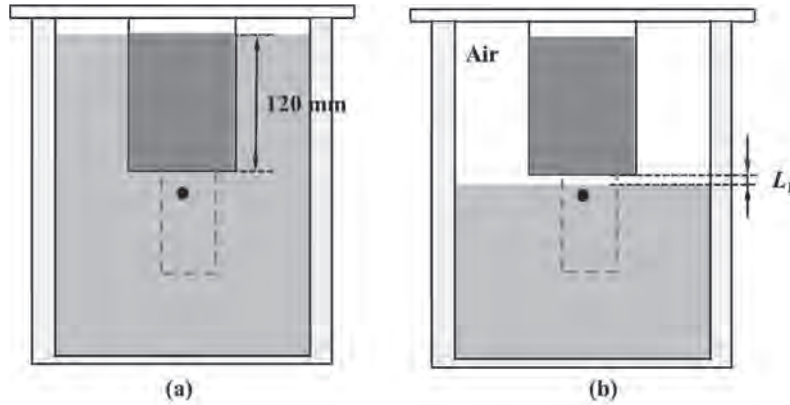


Figure 10 Schematic of narrow water chamber used for optical observation: (a) chamber full of distilled water, (b) air layer of L_1 between water surface and silicone bag

Figure 11 shows the multiple waves generated by an underwater electric discharge in the narrow water chamber, observed using the schlieren method. The output power of the electric discharge was 28.6 kV. The high-speed camera (i-SPEED 7, Nac Image Technology) captured images at a frame rate of 100 kfps and an exposure time of 300 ns. The resolution of the images was 840×216 pixels. In the figure, an ELW propagating in the acrylic wall and the SW generated by the electric discharge are observed in Fig. 11 (1). The SW is thought to be cylindrical due to the thickness of the water chamber. The

images indicate that its propagating speed is about 1500 m/s. At 20 μ s, the SW is reflected partly at the bottom of the silicone bag, as indicated by RSW 1 and then transmitted through the bag. At 30 μ s, the secondary wave (2nd wave) has passed through the bag, and then its reflected wave (RSW 2) is observed behind the RSW 1. Moreover, the area of cavitation bubbles is found and grows with the passage of the 2nd wave following the SW in the silicone bag. Therefore, we consider that the 2nd wave is an expansion wave. The expansion wave can be caused by the reflection of the ELW at the interface between the air and the wall of the water chamber [4], the propagation of the shear stress propagating in the wall material, or the concentration of underwater shock waves [3]. At 180 μ s, the rebound shock waves generated by collapses of the cavitation bubbles are captured in the silicone bag. These results suggest that the cavitation bubble behind the expansion wave following SW is potentially capable of killing marine bacteria.

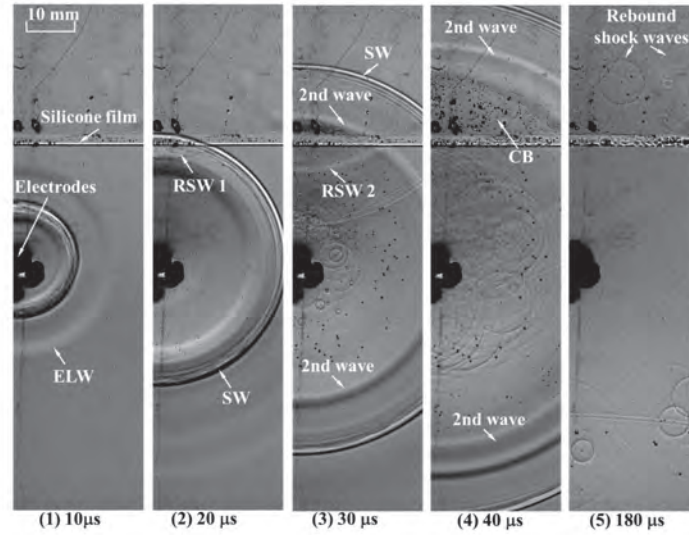


Figure 11 Observation of multiple waves generated by underwater electric discharge in narrow water chamber using schlieren method

Figure 12 shows estimates of the number of viable cells for an electric discharges of 28.6 kV. The plots shown in this figure are of the averages for six sets of bio-experimental data. The solid squares are the reference data obtained from the solution of the marine bacteria without the action of any shock waves. The number of viable cells hardly changes throughout the course of the experiment. The solid triangles and diamonds represent the results of the bio-experiments obtained using an electric discharge of 28.6 kV with and without air layer between the water surface and the bottom of the silicone bag, respectively. The figure shows that after 4 min, all the marine bacteria are completely killed without air layer, while only one order of the number of marine bacteria are killed with a 2-mm air layer because of weak underwater shock waves in the silicone bag. Consequently, we can confirm that the cavitation bubbles generated in the water chamber contribute to inactivating marine bacteria. Furthermore, a shock wave inducing collapse of bubble plays an important role in the shock wave sterilization.

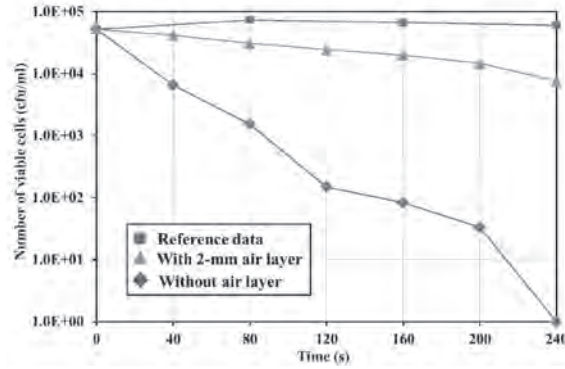


Fig. 12 Estimation of sterilization effect obtained with 28.6-kV electric discharges:

■ reference data, ▲ with 2-mm air layer, and ◆ without air layer

3. Achievements

It is found that the object gains an initial velocity immediately after the shock wave loading, and the underwater object may experience an acceleration rate two orders of magnitude higher than the gravity.

4. Summaries and future plans

In this study, the motions of cubic and spherical blocks made of different materials, copper, Aluminum and PMMA, after electric discharge is investigated experimentally. We measured the displacement of objects and analyzed shadowgraph images to obtain displacement of objects. It is found that the object gains an initial velocity immediately after the shock wave loading. The initial velocity has a closer correlation with the density and the sound impedance than their shape. The force loading on the objects are different from materials. This work implies that the PIV technique can be quantitatively applied for underwater shock wave phenomena, if the properties of objects are known, although their interaction time can be very short.

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

Multiple Collaborative Research Project	
Project code	J16R003
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2rd year

Investigation of Inhomogeneous Mixing of Plasma Species in the Hybrid-Stabilized Argon-Water Arc Discharge for Subsonic-Supersonic Quasi-Laminar Plasma Flow Regimes

Jiří Jeništa*†, Hidemasa Takana**, Satoshi Uehara**, Hideya Nishiyama**††
Milan Hrabovský*††, Anthony B. Murphy***††

*Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i., Czech Republic

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***CSIRO Materials Science and Engineering, Australia

†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Numerical simulation of mixing of plasma chemical species in the discharge and near-outlet regions of the worldwide unique type of thermal plasma generator with hybrid stabilization of electric arc by axial argon flow and tangential water vortex. Comparison of the calculated results with our former calculations and available experiments.

2. Details of program implement

- 1) Further elaboration of the existing numerical code and necessary testing, involving, for example, modification of calculation of the arc current and testing the velocity asymmetry for 400 A.
- 2) Time-demanding calculations have been carried out for a fine grid-independent mesh, for 150-400 A with 15 and 22.5 slm (standard liters per minute) of argon for both the inhomogeneous and homogeneous models.

3. Achievements

The results of the present calculation can be summarized as follows:

- (a) Mixing of water and argon plasma species is inhomogeneous under all the studied conditions (150-400A, 15-22.5 slm of argon). Argon species are dominant in the central regions of the arc, water ones in arc fringes.
- (b) All the combined diffusion coefficients exhibit highly nonlinear asymmetric profiles within the discharge, depending on temperature, pressure and argon mass fraction in the plasma. The local maxima of the coefficients in the discharge are related mostly to ionization of atoms or dissociation of steam.
- (c) Temperature and ordinary diffusions are the most dominant contributions in the equation for the argon mass diffusion flux. Diffusions due to pressure gradients and due to the electric field are about of one order lower.
- (d) Comparison with our former calculations based on the homogeneous mixing assumption confirmed the following facts:
 - There is a difference in temperature distribution – the arc is slightly squeezed with higher temperatures at the axis. Arc fringes are thicker, i.e. the regions with low temperature are wider.
 - The mixing model provides higher reabsorption of radiation, i.e. higher arc efficiency, and lower radiation flux and radiation losses in the discharge.
 - Enthalpy has a different distribution with a maximum in the nozzle region.

- Small impact was found on flow characteristics (velocity, Mach number, pressure).
- (e) Comparison with our former experiments shows very good qualitative and quantitative agreements for the radial temperature and velocity profiles 2 mm downstream of the exit nozzle.

4. Summaries and future plans

The results of the project confirm inhomogeneous mixing of argon and water plasma species in the discharge calculated by the combined diffusion coefficients method. Diffusion of species is a very complex phenomenon, influenced by highly nonlinear dependence of the combined diffusion coefficients on temperature, pressure and argon mass fraction. Our future plans include:

- 1) Solving the inhomogeneous model for currents higher than 400 A and argon mass flow rates higher than 22 slm.
- 2) Clarification of the problem of velocity asymmetry at the arc axis for currents higher or equal to 400 A through different numerical tests.
- 3) Comparison of the results with new experiments, based on the optical emission spectroscopy measurements of ArI, OI and HI lines, is intended to be carried out at IPP (Institute of Plasma Physics AS CR, v.v.i) in Prague in 2017. Updated radial profiles of argon molar fraction at the outlet are desired. The validity of former experiments carried out at IPP has to be checked.
- 4) Possible further extension of the inhomogeneous model, including the entrained surrounding air into the discharge.

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] J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, A. B. Murphy, M. Bartlová, V. Aubrecht, Investigation of mixing of plasma species in argon-water arc discharge (abstract), *2016 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, 19-23 June 2016, Banff, Alberta, Canada. Electronic ISBN: 978-1-4673-9601-1, ISBN: 978-1-4673-9602-8, Publisher: IEEE.
 - *[2] J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, A. B. Murphy, M. Bartlová, V. Aubrecht, Investigation of diffusion of plasma species in argon-steam arc discharge, *Proc. of 16th Int. Symp. on Advanced Fluid Information (AFI 2016)*, pp. 174-175, ISSN 1344-2236, IFS-TM028, October 10-12, 2016, Sendai, Japan.
 - [3] J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, A. B. Murphy, M. Bartlová, V. Aubrecht, Numerical Modeling of Mixing of Plasma Species in Argon–Water Arc Discharge for Low to Moderate Currents, *13th Int. Conf. on Fluid Dynamics (ICFD 2016)* – Proceedings, USB Flash Disc, pp. 562-563, October 10-12, 2016, Sendai, Japan.
- 3) Patent, award, press release etc.
(Lectures)
 - [1] *2016 IEEE Int. Conf. on Plasma Science (ICOPS 2016)*, 19-23 June 2016, Banff, Alberta, Canada. Title: Investigation of mixing of plasma species in argon-water arc discharge.
 - [2] *13th Int. Conf. on Fluid Dynamics (ICFD 2016)*, October 10-12, 2016, Sendai, Japan. Title: Numerical Modeling of Mixing of Plasma Species in Argon–Water Arc Discharge for Low to Moderate Currents.

Multiple Collaborative Research Project	
Project code	J16R004
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Instability and Nonlinear Dynamics of Curved Vortices

Yuji Hattori*†, Makoto Hirota*
Stéphane Le Dizès***††, Thomas Leweke**
Stefan G. Llewellyn Smith***††, Yasuhide Fukumoto****††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**IRPHE and Aix-Marseille University
***MAE, UCSD
****Institute of Math-for-Industry, Kyushu University
†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The vortical structures which appear in various flows are often curved as exemplified by vortex rings ejected from circular pipes and helical vortices emanated from rotating wings. Curved vortices are subjected to *curvature instability*, which is due to the curvature of the vortices, as first shown analytically for the vortex ring (Fukumoto and Hattori, 2005; Hattori and Fukumoto, 2003). Helical vortices with axial flow are also shown to be subjected to the curvature instability (Hattori and Fukumoto, 2009, 2012, 2014). However, this instability has been shown only for Kelvin's vortex ring which has constant vorticity inside the core at the leading order of the thickness. Vortices with smooth or continuous distribution of vorticity should be dealt with carefully since existence of critical layers change the situation significantly.

Recently Blanco-Rodríguez and Le Dizès (2017) analyzed the linear stability of a Gaussian vortex ring with axial flow and showed that it is also subjected to the curvature instability. They found that some important features of the instability are quite different from those of Kelvin's vortex ring owing to the presence of critical layers. Unfortunately, however, clear evidence of the curvature instability has not been observed in experiments or numerical simulations as far as the authors know.

The objective of the present project is to reveal the mechanism of instability, nonlinear evolution of the instability and transition to turbulence in the curved vortices encountered in various flows. The results would contribute to development of methods for predicting when the curved vortices are destabilized and controlling flows which have curved vortices.

2. Details of program implement

2.1 Plan of the research project

In order to study the dynamics of vertical structures which appear in the nature and engineering applications we should deal with vortices which have continuous vorticity distribution like Gaussian vortices. The effects of buoyancy are also important in astrophysical and geophysical flows. Thus the research plan of the project consists of the following three sub-projects.

(1) Nonlinear Dynamics of Vortex Rings with Continuous Vorticity Distribution

Nonlinear evolution of destabilized vortex rings which have continuous vorticity distribution is studied by direct numerical simulation (DNS). First, we confirm that vortex rings with continuous vorticity distribution are subjected to curvature instability as shown analytically by Blanco-Rodríguez and Le Dizès (2017). Next, the subsequent nonlinear evolution of disturbances is studied by DNS. There can be two mechanisms of saturation of evolution:

- (i) The resonance condition of curvature instability can be lost as the core of the vortex ring grows in viscous flows;
- (ii) Weakly nonlinear effects can also cause saturation.

After checking when saturation occurs, further evolution of the vortex ring is investigated to clarify whether it breaks up and ends up with a turbulent mess or it develops into a quasi-equilibrium state in the form of a turbulent vortex ring.

Vortex rings are also subjected to the elliptic instability due to the strain field induced by the vortex rings themselves. Competition between the curvature instability and the elliptic instability will be investigated by DNS.

(2) Nonlinear Dynamics of Vortex Rings with Variable Density

The linear stability of vortex rings with variable density is studied theoretically and numerically. Nonlinear evolution of disturbances and transition to turbulent state are also investigated. First, we consider the linear stability of a vortex ring which has an interface where the density changes discontinuously; the effects of surface tension are taken into account. The analysis can be performed by a method used in Fukumoto and Hattori (2005) while the matching conditions at the surface should be modified in order to take account of the density jump and surface tension. Next, the analysis is extended to vortex rings with continuous density variation.

Conditions for instability are derived based on the energetics of waves. The theoretical results by Hirota and Fukumoto (2008) are extended by including the effects of variable density and surface tension. The derived conditions will be compared to the theoretical and numerical results.

(3) Nonlinear Dynamics of Helical Vortices

Nonlinear evolution of destabilized helical vortices which have continuous vorticity distribution is studied by DNS. We consider an ideal helical vortex which extends to infinity in both directions and of which centerline is a helix of constant curvature and torsion.

First, DNS is carried out to confirm the linear stability properties found theoretically (Blanco-Rodríguez and Le Dizès, 2017). The differences between the helical vortices and the vortex rings will be elucidated by comparing with the theoretical results (Blanco-Rodríguez and Le Dizès, 2017) and by clarifying the effects of torsion and dependence on the Reynolds number. Next, nonlinear evolution of the disturbances and competition between the curvature and elliptic instabilities are investigated. Experimental studies are also performed as in Quaranta et al. (2015) to obtain characteristics of the short-wave instability of helical vortices.

2.2 Results

2.2.1 Numerical Methods

In order to investigate the linear instability of a vortex ring, first we obtain the base flow of an undisturbed vortex ring by DNS imposing axisymmetry. Then the linearized Navier-Stokes equations are integrated for sufficiently long time so that the solution becomes close to the most unstable mode.

The three-dimensional Navier-Stokes equations for a viscous incompressible flow are solved in a cylindrical coordinate system (r, θ, z) . Periodic boundary conditions are imposed in z direction, while N -fold periodicity is imposed in θ direction. For spatial discretization, the sixth-order accurate compact scheme is used in r direction, while the Fourier spectral method is used in θ and z directions. For time marching, the second-order Crank-Nicolson method is used for the viscous terms, while the second-order Adams-Bashforth method is used for the other terms. The Poisson equations are decomposed into independent second-order ordinary differential equations for Fourier modes, which can be solved accurately by a six-th order accurate compact scheme.

The simulation parameters are chosen as follows. The curvature instability occurs at the cross points of the dispersion curves of the Kelvin waves. We choose two cross points at which the growth rate is large: $[l_A, l_B]=[3, 1], [4, 2]$, where l_A and l_B denote the indices of the branches of $m=0$ waves and $m=1$ waves, respectively. The axial wavenumbers of the cross points are $k=1.144$ for $[3, 1]$ and $k=1.829$ for $[4, 2]$. The thickness of the vortex ring is $\varepsilon = 0.1$. The Reynolds number based on the circulation of the vortex ring is $Re = \Gamma/(2\pi\nu) = 10^4, 5 \times 10^4$. Periodicity in θ direction imposes $k/\varepsilon = nN$, where n is an integer.

The value of N is 11 for $[3, 1]$ and 18 for $[4, 2]$ with n being fixed to unity. The size of the domain is $0 < r < 100R_0$ and $0 < z < 4\pi/3 R_0$, where R_0 is the initial radius of the vortex ring.

2.2.2 Numerical Results

Starting from a Gaussian distribution, the axial vorticity evolves into a quasi-steady distribution as shown in Fig. 1. The initial values of the core radius and the swirl parameter are determined taking account of their time evolution so that they become given values when the flow becomes quasi-steady.

Two examples of time evolution of disturbance energy are shown in Fig. 1. Here the vorticity distribution is "randomized" initially for $Re=10^4$. In this case, the disturbance energy decays at the early stage of time evolution as irrelevant modes decay. However, as an unstable mode grows the energy tends to an exponential growth. The vorticity distribution deforms significantly initially as suggested in Fig. 2 (a), while it settles to a growing eigenmode after sufficiently long time (Fig. 2b). For $Re=5 \times 10^4$, on the other hand, the initial vorticity distribution is set to an unstable mode for $Re=10^4$ so that the disturbance energy settles quickly to an exponential growth (Fig. 1).

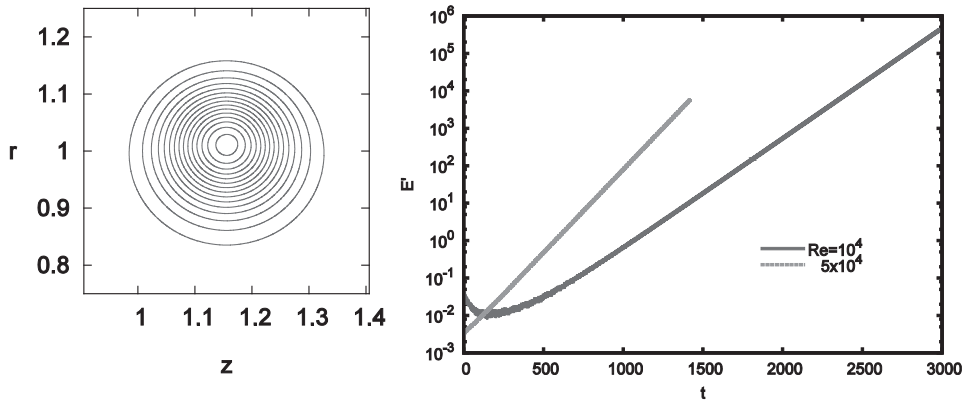


Fig. 1 (Left) Base flow shown by contours of axial vorticity. $\varepsilon = 0.1$, $Re=10^4$, $1/q=0.2$. (Right) Time evolution of disturbance energy. $\varepsilon = 0.1$, $1/q=0.2$. $Re=10^4, 5 \times 10^4$.

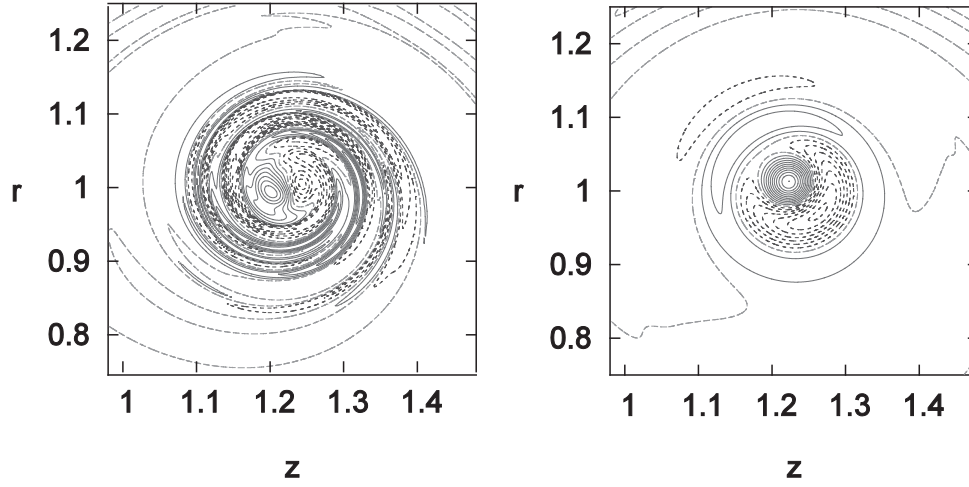


Fig. 2 Structure of unstable mode shown by contours of axial vorticity. $\varepsilon = 0.1$, $Re=10^4$, $1/q=0.2$, $[l_A, l_B]=[3, 1]$. (a) $t=1$, (b) $t=3000$.

The normalized growth rate is shown as a function of the wavenumber k in Fig. 3. The range of k is near the cross point $[3,1]$. The growth rate takes the maximum at $k=1.155$, which is close to the theoretical value $k=1.144$ (Blanco-Rodríguez and Le Dizès, 2017). The maximum growth rate is $\sigma^{(1)}=0.0424$, which is 22% smaller than the theoretical value $\sigma^{(1)}=0.0541$. This difference is most likely due to the critical layer damping, which is difficult to be taken into account for vortex rings with sufficient accuracy. They are in good agreement for the cross point $[4,2]$, for which the critical layer damping is small (Table 1).

Table 1: Growth rates and oscillation frequencies.

$[l_A, l_B]$	ε	Re	DNS			Analysis		
			k_c	$\sigma^{(1)}$	ω_c	k_c	$\sigma^{(1)}$	ω_c
[3,1]	0.1	10^4	1.1545	0.04244	0.1104	1.144	0.05413	0.109
[3,1]	0.1	5×10^4	1.1549	0.05493	0.1110	1.144	0.06442	0.109
[4,2]	0.1	10^4	1.8524	0.05134	0.0955	1.829	0.05132	0.095
[4,2]	0.1	5×10^4	1.8522	0.07107	0.0958	1.829	0.07163	0.095
[4,2]	0.18	10^4	1.8635	0.06286	0.0936	1.829	0.06240	0.095
[4,2]	0.18	5×10^4	1.8502	0.07278	0.0958	1.829	0.07401	0.095

2.3 Organized Session in ICFD2016

An organized session closely related to the present project was held in ICFD 2016 with Prof. Yuji Hattori and Prof. Stefan G. Llewellyn Smith as co-organizers. The name of the session was Vortex Motion: stability, nonlinear dynamics, and transition to turbulence. There were 25 talks including two invited talks from Prof. Stéphane Le Dizès and Dr. Dmitry Kolomenskiy.

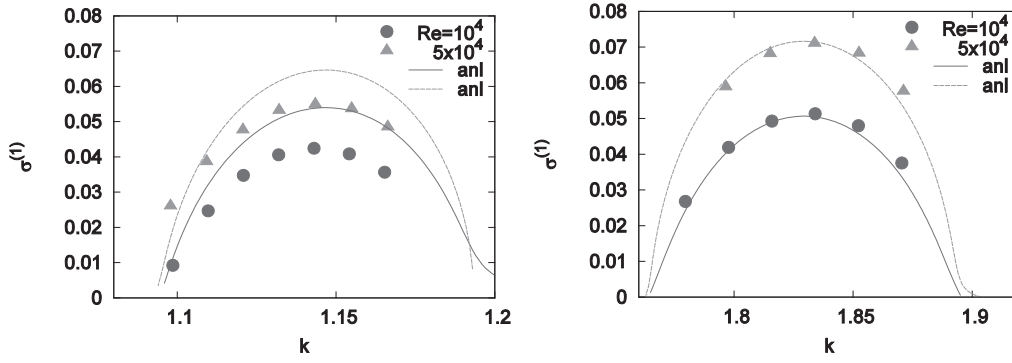


Fig. 4 Growth rate as a function of wavenumber k . $\varepsilon = 0.1$, $1/q=0.2$, $Re=10^4, 5 \times 10^4$. (Left) $[l_A, l_B]=[3, 1]$, (right) $[l_A, l_B]=[4, 2]$.

3. Achievements

Vortical structures are important since they often determine the properties of incompressible flows. They are curved in general owing to self-induced velocity, interaction with other vortices and boundary conditions in the presence of rigid bodies. Therefore, by exploring the effects of curvature in vortex dynamics the present project would contribute not only to understanding the mechanisms of flow phenomena in a wide variety of areas but also to development of control method of these flows. In particular, it would be possible to stabilize or destabilize the wing-tip vortices generated by rotating wings by changing the geometry of the wing tips based on the instability mechanisms of curved vortices which have continuous vorticity distributions. Moreover, understanding nonlinear dynamics and transition to turbulence and thereby clarifying the turbulent structures near the wing tips and wakes are indispensable for improving the performance of the wings and reducing the aeroacoustic noises. The combined effects of curvature and density change are important in understanding and prediction of vortices in aeronautical, astrophysical and geophysical flows.

This year the numerical method which are used throughout the three years' project was established and some basic properties of linear stability of vortex rings were revealed. The project has achieved this year's goal.

4. Summaries and future plans

We have investigated the curvature instability of Gaussian vortex rings by DNS. We have developed a numerical method with high accuracy for solving the incompressible Navier-Stokes equations in a cylindrical coordinate system. It is shown that the Gaussian vortex rings are subjected to the curvature instability. The structure of the unstable modes and the growth rates obtained numerically are in good agreement with the theoretical results.

Nonlinear evolution of the disturbance on vortex rings with continuous vorticity distribution will be studied in the near future. The numerical method developed this year can be used for study of nonlinear dynamics of vortex tings with variable density and helical vortices which are the other sub-projects.

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, Francisco J. Blanco-Rodríguez, Stéphane Le Dizès: Direct Numerical Simulation of Curvature Instability of a Vortex Ring, *EFMC11 – 11th European Fluid Mechanics Conference*, Sevilla, Spain, (2016).
 - [2] 服部裕司, Francisco J. Blanco-Rodríguez, Stéphane Le Dizès : 渦輪の曲率不安定性の直接数値シミュレーション, 日本流体力学会年会, 名古屋, (2016) .
 - [3] Y. Hattori, J. Blanco-Rodríguez, S. Le Dizès: Numerical Analysis of Linear Instability of a Vortex Ring with Axial Flow, *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2016), p. 556-557.
 - *[4] Y. Hattori, M. Hirota, S. Le Dizès, T. Leweke, S. G. Llewellyn Smith, Y. Fukumoto: Instability and Nonlinear Dynamics of Curved Vortices, *Proceedings of the 16th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), p. 98-99.
 - [5] 服部裕司 : 渦輪の不安定化過程の直接数値シミュレーション, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 東京, (2016) .
 - [6] 服部裕司, Francisco J. Blanco-Rodríguez, Stéphane Le Dizès : 軸流をもつ渦輪の不安定性 - 曲率不安定性と楕円型不安定性の競合-, 日本物理学会第 72 回年次大会, 豊中, (2017 年 3 月).
- 3) Patent, award, press release etc.
(Patent) Not applicable.
(Award) Not applicable.
(Press release) Not applicable.

国際連携公募共同研究プロジェクト	
課題番号	J16R005
課題分野	環境・エネルギー
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目（発展型）

省エネルギーのための知的層材料・層構造に関する国際共同研究
International Collaborative Research on Smart Layered
Materials and Structures for Energy Saving

Toshiyuki Takagi*†, Jean-Yves Cavaillé**††
Christian Boller****††, Jinhao Qiu****††
Julien Fontaine*****††, Manfred Kohl*****††
Henrik Alfredsson*****††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

INSA de Lyon, *Fraunhofer Institute for NDT

****Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

*****EC Lyon, *****Karlsruhe Institute of Technology

*****KTH Royal Institute of Technology

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. 研究目的

本研究は、東北大学とリヨンとの大学との過去10年以上にわたる研究交流を通して開拓された「知的構造材料」に関する研究分野の発展形として位置づけられ、近年進展が目覚ましいマルチマテリアル多機能性材料とセンシング技術との融合により、新たな知的構造体の創成を目指す。特に、知的構造体と流体との相互作用に着目した新しい省エネルギー機能を実現するための学理基盤を構築する。このために、東北大学科学研究所を中心とする日本とリヨン、グルノーブルを中心とするフランスの研究チームに加え、センシング技術の産業応用について実績のあるドイツ・フラウンホーファ研究機構、中国における知的材料構造研究の重点拠点である中国・南京航空航天大学、境界層制御に関する理論および実験研究において世界的に著名な拠点であるKTH スウェーデン王立工科大学が加わり、研究を加速させる。上記の研究分野を構築するための研究として、主に以下のテーマについて取り組む。

- 1) センシング機能と境界層の制御機能を有するスマート構造炭素繊維複合材料
- 2) スマート伝熱、制振、潤滑機能を有する知的層構造材料の開発
- 3) 耐食性を有する受動傾斜フィルムによる新しいエネルギープラント材料システム

これらの共同研究について、情報を共有するとともに学理を抽出するために、交流期間中に毎年セミナーを開催する。また、若手研究者の発掘と育成のために、サマースクールの開催、国際大学院の連携、を積極的に推進するとともに、若手研究者の回遊研究を通じた研究者交流を図る。本研究の全体の構想図を図1に示す。

2. 研究成果の内容

研究協力体制については、平成28年1月に設置されたCNRSのUnite Mixte Internationale (UMI, 国際混成研究所), ELyTmaX に、3名のフランス側メンバーが東北大学に常駐することになり、エネルギー、輸送機械の分野で知的層構造・層材料に関する共同

研究を推進する体制が研究支援体制とともに整備された。また、本事業や ELyTMax を核とした多国間共同をさらに推進するために、CNRS の Laboratoire international associé (LIA) の枠組みにより国際研究ネットワーク ELyTGlobal を発足させた。さらに、東北大学の訪問滞在型研究協力事業「知のフォーラム」との共催により本研究組織のメンバーを含む世界の著名な研究者を招聘し、国際ワークショップを開催するとともに、今後の国際展開について議論を行った。

知的層材料・層構造研究の基盤となる、マルチマテリアルシステムの最適化設計手法の検討、流動との相互作用による機能発現のモデル化、について重点テーマを設定した。具体的には、ナノ粒子を用いたコールドスプレー法による耐食コーティングに関する研究、イオン導電性高分子型ポリマーを用いたアクチュエータ、磁性形状記憶合金層構造の開発、微小繊維静電配向制御によるセルロースファイバ創製、知的センシングと流動シミュレーションを融合した保全、などのテーマについて選定し、重点的な研究を行った。また、挑戦的なテーマについては引き続き若手研究者による共同実験により研究を行った。以下に代表的な研究成果について記載する。

1) Innovative Cellulose Material Synthesis by Electrostatic Micro Fibril Alignment

In recent years, cellulose nanofibril (CNF) extracted from woods has gained great attention as a novel biomass material. CNF, an aggregate of 30-40 cellulose molecules, is a micro fibril with a width of 3-4 nm, a length of 2-3 μm and a high degree of crystallinity. CNF holds a considerable potential to be applied to innovative composite materials due to its outstanding properties such as low density, high strength and low thermal expansion. In order to utilize these properties effectively, the fibril alignment

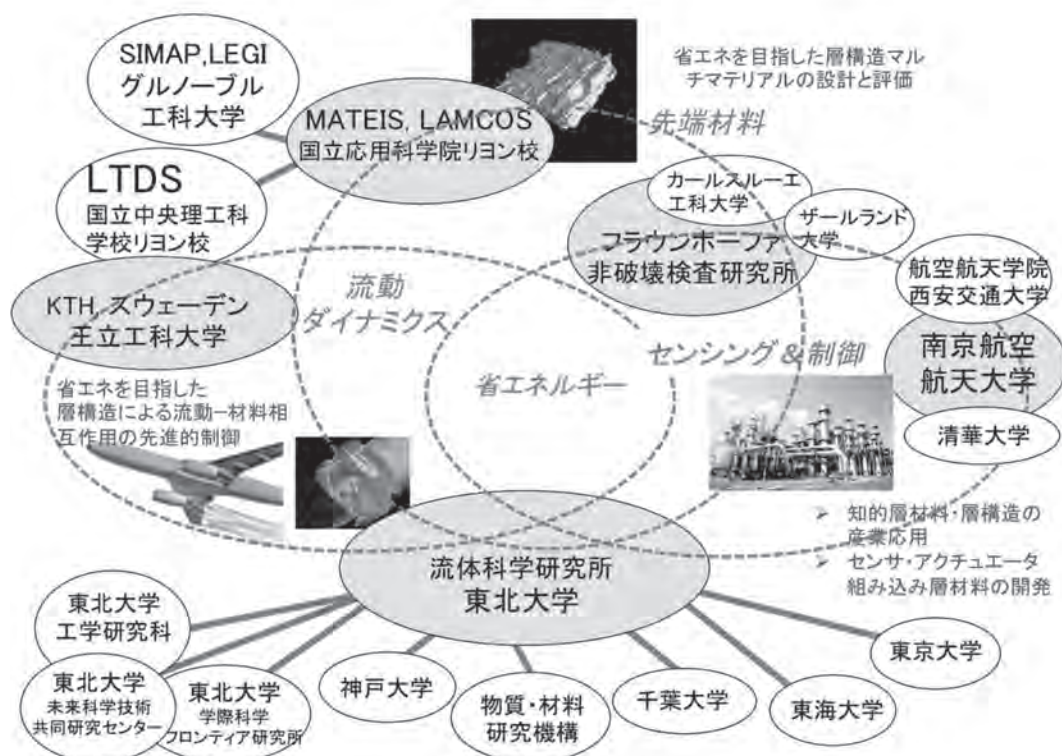


図 1：本研究の構想

inside the material must be controlled to be parallel. However, few methods for controlling the fibril alignment have been studied and developed. The fibril alignment still needs to be improved for practical applications.

In this study, aiming at innovative cellulose material synthesis, a method for controlling cellulose micro fibril alignment by AC electric field has been proposed. Characteristics of the fibril alignment under the electric field have been analyzed through visualization and qualitative evaluation by optical measurement.

Figure 2 shows a schematic illustration of experimental setup. Experiments are conducted in a simplified system using a petri dish with copper electrodes of which width is 0.5 cm. The electrodes gap is 2 cm. Sample solution is prepared by dispersing carboxymethyl cellulose sodium (CMC-Na) micro fibrils in water. The fibril has a width of 50-60 μm and its concentration in the solution is 0.2 wt.%. Sinusoidal AC electric field is applied to 20 ml sample solution and then the fibril flow is analyzed through visualization by a digital single-lens reflex camera and a background LED light.

Figure 3 show the visualization of cellulose micro fibril flow under AC electric field with applied voltage of 1 kV_{pp} and frequency of 5 kHz at $t = 10$ s and 120 s after the application of voltage, respectively. The simulated electrostatic field distribution for the effective applied voltage is shown in the lower half of the figure for reference. Under AC electric field, fibrils align parallel to the direction of the electric field (see Fig. 3) and then coagulate around the electrodes and the center axis between the electrodes through electrically induced flow by dielectrophoresis (see Fig. 4). The intensity of transmitted LED light was estimated as function of applied voltage, and it is clarified that the degree of the fibril alignment increases almost linearly with applied voltage. Higher degree of the fibril alignment is shown for higher applied voltage at lower frequency.

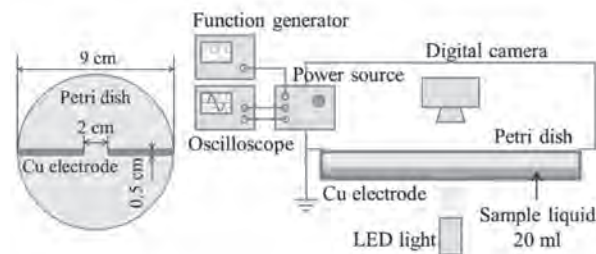


Fig. 2 Schematic illustration of experimental setup for visualization of electrically induced flow with cellulose micro fibrils.

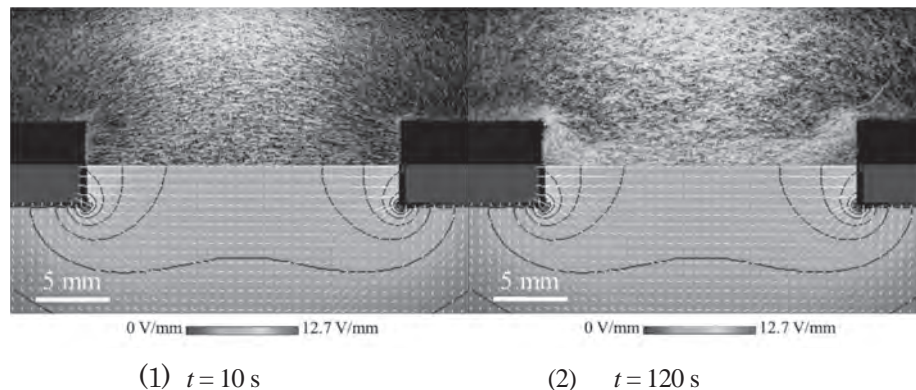


Fig. 3 Visualization of cellulose micro fibril flow at 1 kV_{pp} and 5 kHz and the simulated electrostatic field distribution.

2) ナノ粒子分散 FRP の開発と品質保証技術への応用

Vacuum-assisted resin transfer molding (VaRTM)はコスト低減効果のために繊維強化プラスチック(FRP)の成形方法として高い注目を集めている。しかしながら、ボイドの発生確率や炭素繊維の低い充填率などのために、力学的特性と信頼性においてオートクレーブ法ほど十分とは言えない。近年、我々はナノ粒子を母材である樹脂の中に均一に分散させることで成形品の力学的特性を向上させることができるナノ粒子分散 FRP(NF-FRP)を提案している(図 4)。本研究では、さらに磁性を有するナノ粒子を選択することで、成形品である FRP の力学的特性の他に透磁率を高め、FRP の非破壊検査の一種である渦電流探傷法における渦電流信号を増大させる機能の付与を試みている。この材料を用いることで、渦電流の励磁電流の周波数が 100 kHz の場合に信号強度がおよそ 28 倍上昇し(図 5)、他の非破壊検査法では発見が困難な繊維断裂の検出を可能にするなど、欠陥検出性を向上させることに成功している。

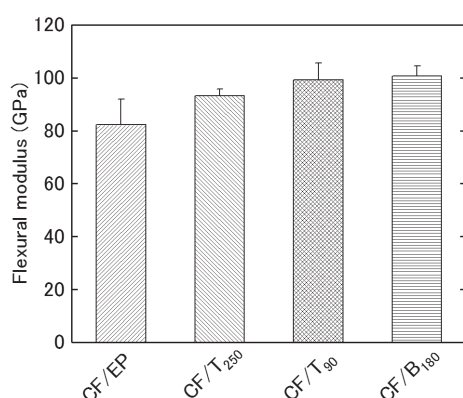


Fig. 4 Flexural modulus of NF-FRP and neat CFRP (CF/EP). The diameter of nanoparticles of T₂₅₀, T₉₀ and B₁₈₀ is 250 nm, 90 nm and 180 nm, respectively.

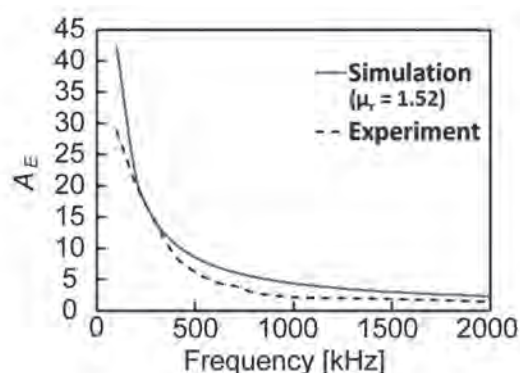


Fig 5 The ratio of eddy current signal intensity between CFRP including magnetic nanoparticles and neat CFRP.

3. 研究目標の達成状況

平成 28 年 1 月に設置された CNRS の Unite Mixte Internationale (UMI, 国際混成研究所)である ELYTMAX に、3 名のフランス側メンバーが東北大学に常駐することになり、エネルギー、輸送機械の分野で知的層構造・層材料に関する共同研究を推進する体制が研究支援体制とともに整備された。学術的な観点からは、知的層材料・層構造研究の基盤となる、最適化設計手法に基づくマルチマテリアルシステムの創成、流動との相互作用による機能発現、スマートセンシング、等の研究領域について、重点テーマについて研究を推進した。また、挑戦的なテーマについては引き続き若手研究者による共同実験により研究を行った。また、未到エネルギー研究センターの国際展開にも貢献したと考えられる。

4. まとめと今後の課題

知的層材料・層構造研究の基盤となる、マルチマテリアルシステムの最適化設計手法の検討、流動との相互作用による機能発現のモデル化、スマートセンシング、等の研究領域について、学理基盤が構築された。今後、知的層材料・層構造を実現するための研究として設定した重点課題として、ナノ粒子を用いたコールドスプレー法によるスマートコーティング、イオン導電性高分子型ポリマーを用いたアクチュエータ、磁性形状記憶合金層構造の開発、流動との相互作用に着目した複合材料のスマート創成、知的センシングと流動シミュレーションを融合した界面腐食の

スマート管理，等の研究を推進しとりまとめる．さらに，これらの成果をふまえ，先進輸送機械とエネルギープラント保全の高度化を目指した産学連携のためのインキュベーションとなるテーマの推進と産学連携研究の開拓を行う．

5. 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] Renata Troian, Koji Shimoyama, Frédéric Gillot, and Sébastien Besset: Methodology for the Design of the Geometry of a Cavity and its Absorption Coefficients as Random Design Variables Under Vibroacoustic Criteria, *Journal of Computational Acoustics*, Vol. 24, Issue 2, (2016), pp. 1650006-1-12.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0218396X16500065>
- [2] Ryoichi Urayama, Hiroyuki Kosukegawa, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi: Identifying the Orientation of Carbon Fibers in Carbon-Fiber-Reinforced Plastic by Eddy Current Testing with a Differential Probe, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.41: Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIX), (2016), pp. 18-25, DOI10.3233/978-1-61499-639-2-18.
- [3] Alexandr Stupakov, Miroslav Neslusan, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi: Non-destructive Evaluation of Milled Surfaces of a Hard Bearing Steel by the Barkhausen Noise Technique, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.41: Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIX), (2016), pp. 102-109, DOI10.3233/978-1-61499-639-2-102.
- [4] Gabor Vertesy, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Ivan Tomas: Correlation between Conductivity and Magnetic Hysteresis Measurements in Flake Graphite Cast Iron, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.41: Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIX), (2016), pp. 110-117, DOI: 10.3233/978-1-61499-639-2-110.
- [5] Hongmei Li, Dongli Zhang, Wenlu Cai, Yong Li, Zhenmao Chen, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Kensuke Yoshihara: Effect of Phase Transformation on Damage-induced Magnetization of 304 Austenitic Stainless Steel, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.41: Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIX), (2016), pp. 187-194, DOI10.3233/978-1-61499-639-2-187.
- [6] Toshihiro Yamamoto, Ryoichi Urayama, Takashi Furukawa, Tetsuya Uchimoto, Ichiro Komura, Toshiyuki Takagi: Numerical Simulations of Wave Generation by Differently-Configured EMATs, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.41: Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIX), (2016), pp. 275-283, DOI10.3233/978-1-61499-639-2-275.
- [7] Kazuhiro Nakajima, Ryoichi Urayama, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi: Improvement of Surface RFECT Probe Aiming at Quantitative Evaluation of Pipe Wall Thinning, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 41: Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIX), (2016), pp. 312-319, DOI10.3233/978-1-61499-639-2-312.
- [8] Jun Cheng, Jinhao Qiu, Xiaojuan Xu, Hongli Ji, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto: Research advances in eddy current testing for maintenance of carbon fiber reinforced plastic composites, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 51, (2016), pp. 261-284, DOI: 10.3233/JAE-150168.

- [9] Paul Profizi, Alain Combesure, Kazuhiro Ogawa: SPH modeling of fast impacts and particle rebound with adhesion, *12th World Congress on Computational Mechanics proceedings*, (2016), MS734C-1.
- [10] Jun Ishimoto: Micro-Solid Nitrogen Particulate Spray Cooling Characteristics and its Application to Wafer Cleaning Technology, *Proceedings of 1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference*, (2016).
- [11] Shejuan Xie, Mingming Tian, Pan Xiao, Cuixiang Pei, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi: A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection, *NDT&E International*, Vol. 86, (2016), pp. 153-163, DOI: 10.1016/j.ndteint.2016.12.006.
- [12] Jinhao Qiu, Jun Chenga, Chao Zhang, Hongli Ji, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto: Novel NDT methods for composite materials in aerospace structures, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 52, (2016), pp. 25-33, DOI: 10.3233/JAE-162203.
- [13] Fumio Kojima, Hardy Thomas Banks: Statistical Parameter Estimation of Dielectric Materials using MCMC for Nonlinear Hierarchical Models, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 52, (2016), pp. 49-54, DOI: 10.3233/JAE-162207.
- [14] Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Xiaoyang Wu, Hao Feng, Ryoichi Urayama: Changes in eddy current testing signals of fatigue cracks by heat processing, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 52, (2016), pp. 677-684, DOI: 10.3233/JAE-162044
- [15] Takanori Matsumoto, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Gabor Vertesy: Evaluation of chill structure in ductile cast iron by incremental permeability method, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 52, (2016), pp. 1599-1605, DOI: 10.3233/JAE-162106.
- [16] Akira Yatsuyanagi, Toshiyuki Hayase, Suguru Miyauchi, Kenichi Funamoto, Kosuke Inoue, Atsushi Shirai and Luca Brandt: Numerical analysis for elucidation of mechanical interaction between an erythrocyte moving in medium subject to inclined centrifugal force and endothelial cells on a plate, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 11, No. 4, (2016), Paper No.16-00188, DOI: 10.1299/jfst.2016jfst0029.
- [17] Marcel Gueltig, Frank Wendler, Hinnerk Ossmer, Makoto Ohtsuka, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, Manfred Kohl: High-Performance Thermomagnetic Generators Based on Heusler Alloy Films, *ADVANCED ENERGY MATERIALS*, Vol. 7, No. 5, March, (2017), 1601879.
- [18] Hiroyuki Miki, Koki Tsuchiya, Makoto Ohtsuka, Marcel Gueltig, Manfred Kohl, Toshiyuki Takagi: Structural and Magnetic Properties of Magnetic Shape Memory Alloys on Ni-Mn-Co-In Self-standing Films, *Advances in Shape Memory Materials*, Volume 73 of the series Advanced Structured Materials, March, (2017), pp. 149-160, DOI 10.1007/978-3-319-53306-3_11.
- [19] Hiroyuki Miki, Koki Tsuchiya, Eijiro Abe, Makoto Ohtsuka, Marcel Gueltig, Hinnerk Ossmer, Manfred Kohl, Toshiyuki Takagi: METAMAGNETIC SHAPE MEMORY ALLOY PLATE SOLIDIFIED BY THE DYNAMIC MOLDING METHOD, *Proceedings of The International Workshop on Advances in Shape Memory*, March, (2017), pp. 31-32.

- [20] Paul Profizi, Alain Combesure, Kazuhiro Ogawa: Coupled Finite Elements – SPH simulation of particle impact and adhesion for Cold Spray, *Proceedings of 11th International SPHERIC Workshop*, (2016), 975.
- [21] Y. Muramoto, V. Fridrici, Ph. Kapsa, G. Bouvard, M. Ohta: Tribological aspects of drilling bone biomodel, *Procédés et Génie civil, JIFT2015 (Journées Internationales Francophones de Tribologie 2015)* Edited by M. -T. Do, V. Cerezo, Ph. Kapsa, (2016), pp. 81-89.
- [22] Chisato Kubo, Masae Kanda, Olivier Lame, Jean-Yves Cavaille, Yoshitake Nishi: Effects of Homogeneous Low Energy Electron Beam Irradiation (HLEBI) on Adhesive Force of Peeling Resistance of Laminated Sheet with Polyethylene (PE) and Austenitic 18-8 Stainless Steels, *Materials Transactions*, Vol. 57, No. 3, (2016), pp. 373-378, DOI 10.2320/matertrans, MBW201509.
- [23] Jun Ishimoto, Toshinori Sato and Alain Combesure: Computational approach for hydrogen leakage with crack propagation of pressure vessel wall using coupled particle and Euler method, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.161 [IF: 3.205], online.
- [24] Yoshimizu, K., Yamamoto, Y., Asahina, K., and Makihara, K.: Strategy for Enhancing the Active Harvesting of Piezoelectric Energy, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, October 2016, online.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [25] Paul Profizi, Alain Combesure, Kazuhiro Ogawa: Coupled Finite Elements - SPH simulation of particle impact and adhesion for Cold Spray, *11th International SPHERIC Workshop*, Munich, Germany, Oral presentaion, 975, (2016).
- [26] Paul Profizi, Alain Combesure, Kazuhiro Ogawa SPH modeling of fast imapcts and particle rebound with adhesion, *Proceedings of 12th World Congress on Computational Mechanics*, Seoul, Korea, Oral presentation, (2016), MS734C-1.
- [27] Jun Ishimoto: Micro-Solid Nitrogen Particulate Spray Cooling Characteristics and its Application to Wafer Cleaning Technology, *1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference*, Kanazawa, Japan., Oral presentation, (2016).
- [28] T. Uchimoto, T. Takagi, T. Matsumoto and G. Dobmann: Evaluation of Residual Strain in the Structural Materials of Nuclear Power Plants by Magnetic Incremental Permeability Method, *Laser Solutions for Space and the Earth 2016*, Yokohama, Japan, Oral Presentation, (2016), LSSE7-1.
- [29] Kazuhiro Ogawa: High Temperature Oxidation Behavior and Improvement of Interface Strength of Thermal Barrier Coatings Using Oxide Ceramics-Containing Bond Coatings, *9th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites and Global Forum on Advanced Materials and Technologies for Sustainable Development 2016*, Toronto, Canada, Oral presentation, G8-002-2016, (2016).
- [30] Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Gerd Dobmann, and Shohei Ogata: Development and Performance Evaluation of High Temperature Electromagnetic Acoustic Transducer, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 2016*, Atlanta, USA, Oral presentation, (2016).

- [31] Hiroyuki Miki, Koki Tsuchiya, Eijiro Abe, Makoto Ohtsuka, Marcel Gueltig, Hinnerk Ossmer, Manfred Kohl, Toshiyuki Takagi: Development of Ni-Mn-In Type Magnetic Shape Memory Alloy Thin Plate for Magnetically-actuated Devices, *The fifth International Conference on Ferromagnetic Shape Memory Alloys*, Sendai, Japan, Oral presentation, Oral-49, (2016).
- [32] Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Ryoichi Urayama: Pipe-wall-thinning measurement from electromagnetic acoustic resonance at an elevated temperature, *The 7th International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications*, Xi'an, China, Oral Presentation, (2016), pp.5-5,
- [33] Alexandr Stupakov, Takanori Matsumoto, Tetsuya Uchimoto, Gabor Vertesy, Toshiyuki Takagi: MAGNETIC NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF DUCTILE CAST IRON WITH A RETAINED CHILL CONTENT, *The 21st International Workshop on Electroagnetic NonDestructive Evaluation*, Lisbon, Portugal, Oral Presentation, (2016), pp. 47-48.
- [34] Takanori Matsumoto, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Klaus Szielasko, Madalina Rabung: NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF STRUCTURAL CHANGE DUE TO CREEP DEGRADATION IN P91 STEEL BY MICROMAGNETIC PROPERTIES, *The 21st International Workshop on Electroagnetic NonDestructive Evaluation*, Lisbon, Portugal, Oral Presentation, (2016), pp.122-123.
- [35] Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, XiaoYang Wu, Ryoichi Urayama: MECHANISM STUDY OF EDDY CURRENT TESTING SIGNALS CHANGE BY HEAT TREATMENT, *The 21st International Workshop on Electroagnetic NonDestructive Evaluation*, Lisbon, Portugal, Oral Presentation, (2016), pp. 114-115.
- [36] Christian Boller: Materials Characterization Technology and Structural Health Monitoring Systems for Engineering Structures' Sustainability, *TFC ELyT Workshop (Plenary Lectures)*, Sendai, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [37] T. Takagi, T. Uchimoto: Core-to-core Program Now and Future: International Research Core on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [38] JY. Cavaille, K. Ogawa: ELyTMaX, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [39] D. Fabregue, J. Fontaine, T. Uchimoto: ELyTGlobal - Initiatives toward a global network between academic and industry partners, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [40] N. Wada, V. Fridrici, A. Fave: ELyT Summer School, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [41] J. Chevalier: 70 years of Orthopedics: On the role of biomaterials for implants and tissue engineering, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [42] A. Chiba: Microstructure and Mechanical Properties Evolution of Biomedical Co-Cr-Mo Alloys Manufactured by Electron Beam Additive Manufacturing, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [43] F. Lundell Assembly of protein- and cellulose fibrils with potential applications in bioengineering, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).

- [44] M. Ohta, V. Fridrici, P. Kapsa, Y. Muramoto, J. Seiller, G. Bouvard: Study of Mechanical Properties of Acrylic Composite for Drilling Bone Biomodel, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [45] D. Hartmann, K. Yamanaka, A. Chiba, D. Fabrègue: Influence of the carbon content of CO based alloys on cytotoxicity, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [46] G. Courbebaisse, M. Ohta: Optimization of stent Flow Diverter for cerebral aneurysms, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [47] JA. Chafino Aixa, D. Fabrègue, A. Chiba, K. Yamanaka: Improving the mechanical properties of Ti-6Al-4V ELI alloy through its TRIP effect, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [48] A. Liens, H. Kato, JM. Pelletier, D. Fabrègue, Metallic glasses for biomedical applications: case of the Ti₄₀Zr₁₀Cu₃₆Pd₁₄ BMG, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [49] B. Ter Ovanessian, A. Chiba: Corrosion of CoCrMo alloys, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [50] G. Dobmann: German Contributions to ELyT Global Program, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [51] D. Nélías: Propriétés mécaniques du Nitrure de Silicium (Si₃N₄), these de Nacer Azzegagh, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [52] LJ. Pottuz, Y. Higuchi, M. Kubo: Crystallization Process of Alumina-Zirconia Ceramics Composites by Molecular Dynamics Simulation, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [53] M. Kanda, K. Yuse, D. Guyomar, Y. Nishi: Effects of Homogeneous EB-Irradiation on Electrostriction of Electroactive Polymer, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [54] Y. Higuchi, M. Kubo, L. Chazeau, JY. Cavaille, T. Shoji: Simulation approaches for a better understanding of polymer ageing, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [55] P. Profizi, A. Combescure: On adhesion modelling: application to cold spray mechanism understanding, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [56] G. Sebald, M. Nakano, M. Lallart, JY. Cavaille: Development, Modeling and Characterization of Efficient Magneto-Rheological Elastomers for Vibrational Energy Harvesting, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [57] B. Duchane, G. Sebald, T. Uchimoto, T. Takagi: Modeling of dynamic magnetic properties and its application to magnetic nondestructive evaluation, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [58] S. Maruyama, A. Komiya: Collaborative Research Activities between INSA and IFS Heat Transfer Control Laboratory, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).

- [59] J. Ishimoto, T. Sato, A. Combescure: FSI Approach of Hydrogen Leakage Problems with Crack Propagation, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [60] Y. Watanabe, H. Abe, B. Normand, B. Ter-Ovanessian: Material design dedicated for severe environments - Nuclear applications, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [61] P. Guy, T. Uchimoto, T. Takagi: Non destructive damage evaluation of high voltage overhead transmission lines by Electro Magnetic Acoustic Transducers, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [62] S. Hemette, K. Kurihara, J. Cayer-Barrio, D. Mazuyer: Rubber-Ice Friction mechanisms: Multi-Physical and multi-scale approach, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [63] K. Shimoyama, R. Troian, F. Gillot, S. Besset: Design of the Geometry of a Cavity and Its Absorption Coefficients Under Vibroacoustic Criteria, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [64] A. Takahashi, J. Okajima, A. Komiya, S. Maruyama: Effective thermal conductivity measurement of vacuum insulation panel, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [65] S. Ikawa, H. Nagashima, S. Tsuda, T. Tokumasu: Study of the quantum effect on potential barrier for hydrogen diffusion in metal by molecular simulation, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [66] Y. Xue, K. Ogawa: Conversion Efficiency Improvement of Cold Spray Fabricated Dye-Sensitized Solar Cell by TiO₂/Dye mixture particle, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS6, (2016).
- [67] Y. Muramoto, G. Bouvard, V. Fridrici, P. Kapsa, M. Ohta: Drilling under constant feed rate for bone biomodel made of acrylic composites, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS7, (2016).
- [68] S. Tupin, Y. Shimizu, H. Anzai, K. Takase, M. Ohta: In-vitro evaluation of the effect of a multi-layer stent device deployment on the aorta-renal artery bifurcation hemodynamics, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS8, (2016).
- [69] Narendra Kurnia Putra, Hitomi Anzai, Makoto Ohta: Comparison Study of Blood Flow Pattern Changes due to the Blood Vessel Deformation during Intravascular Stent Deployment, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS9, (2016).
- [70] Kaihong Yu, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Makoto Ohta: Evaluation of tissue heating for Radiofrequency ablation Using a Vibrating Catheter, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS10, (2016).
- [71] MC. Faudree, R. Nomura, R. Ourahmoune, H. Takei, M. Kanda, N. Inoue, M. Salvia, Y. Nishi: Effects of EB-irradiation on Charpy impact value and Bending Elastic modulus of Fibers Reinforced Thermoplastic Polymers, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS11, (2016).
- [72] T. Matsumoto, T. Uchimoto, T. Takagi, G. Dobmann: Nondestructive Evaluation of Residual Strain of Carbon Steels by Magnetic Incremental Permeability Method, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS12, (2016).

- [73] S. Takeda, H. Miki, J. Fontaine, M. Guibert, L. Billaut, T. Miyazaki, T. Takagi: Interparticle Bonding of Metal Powder Particles by Compression Shearing Process, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS13, (2016).
- [74] B. Normand, BT. Ovanessian, CD. Loughian, L. Gremillard, A. Impergre, A. Chiba: Development of CoCrMo alloys for biomedical applications: Biocompatibility, Corrosion, Tribocorrosion, Biotribocorrosion, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS15, (2016).
- [75] S. Aota, T. Takashima, T. Saito, Y. Li, Y. Koizumi, K. Yamanaka, K. Aoyagi, A. Chiba: Influence of Building Position on Phase Distribution in Co-Cr-Mo Alloy Additive Manufactured by Electron-Beam Melting, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS18, (2016).
- [76] Y. Zhao, Y. Koizumi, A. Chiba: Molten Pool Behavior during Electron Beam Melting of Co-Cr-Mo Alloy Simulated by Computational Fluid Dynamics, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS19, (2016).
- [77] N. Mary, A. Romaine, B. Normand, F. Dufour: Design and implementation of a corrosion fatigue test for brass steel cords in tire environment, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS20, (2016).
- [78] N. Mary, A. Romaine, B. Normand: Stainless steels repassivation behavior from tribocorrosion, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS21, (2016).
- [79] GF. Akasum, K. Yu, Suprijanto, M. Ohta: Radiofrequency Ablation: Lesion Size Measurement on Agar Phantom, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS22, (2016).
- [80] B. Ter Ovanessian, A. Chiba: Corrosion of CoCrMo alloys, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Poster Presentation, PS23, (2016).
- [81] K. Shimoyama, F. Gillot, S. Besset: Overview of the achieved and future collaborative research work on Robust Design Optimization, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [82] K. Xiong, J. Qiu, H. Ji: Application of semi-active vibration and noise control in aerospace engineering, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [83] Y. Nishi, M. Kanda, MC. Faudree, A. Minegishi, S. Takase, O. Lame, T. Deplancke, JY. Cavaille: Effects of EB-Irradiation on Mechanical properties of Polymers, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [84] K. Ravi, K. Ogawa, O. Lame, JY Cavaille: Development of High Functional Polymer/Metal Integrated Systems by Using Cold Spray, *TFC ELyT Off-campus Workshop for Intensive Discussions*, Zao, Japan, Oral Presentation, (2016).
- [85] Andrei Kozlov, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi: Multi-Element High-Lift Configuration Aerodynamics Using Building Cube Method, *JSPS Core to Core Program 6th Workshop The 2nd NUA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology*, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS15-6, (2016).

- [86] Fumio Kojima, Noritaka Nakajima: Numerical Studies on Transmitter-Receiver type EMAT NDT System, *JSPS Core to Core Program 6th Workshop The 2nd NUAU-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology*, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS15-7, (2016).
- [87] Bin Wang, Yihui Da, Zhenghua Qian: Quantitative Reconstruction of The Surface Notch Using Rayleigh Surface Waves, *JSPS Core to Core Program 6th Workshop The 2nd NUAU-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology*, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS15-8, (2016).
- [88] Hongjun Sun, Ryoichi Urayama, Tetsuya Uchimoto, Fumio Kojima, Toshiyuki Takagi: Modeling Study of EMAT Using Pancake Coil for Magnetic Material, *JSPS Core to Core Program 6th Workshop The 2nd NUAU-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology*, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS15-9, (2016).
- [89] Christian Boller, Ramanan Sridaran Venkat, Oscar Bareiro, Adrià Taltavull, Lei Qiu, Shenfang Yuan, Christian Dürager: Configuring Structural Health Monitoring Solutions for Metallic Aeronautical Structures through Simulation, *JSPS Core to Core Program 6th Workshop The 2nd NUAU-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology*, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS15-10, (2016).
- [90] Jinhao Qiu, Chao Zhang, Hongli Ji, Jinling Zhao: Laser Ultrasonic Method for Detection of Damage and Fatigue in Composite Materials, *JSPS Core to Core Program 6th Workshop The 2nd NUAU-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology*, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS15-12, (2016).

他 51 件

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Multiple Collaborative Research Project	
Project code	J16R006
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Filtrational Gas Combustion in Porous Media and Micro Combustion

Sergey Minaev^{*†}, Roman Fursenko^{**††}
Alexander Kirdyashkin^{***††}, Vladimir Gubernov^{****††}
Andrey Shmakov^{*****††}, Kaoru Maruta^{*****††}
^{*}Engineering School, Far-Eastern Federal University
^{**}ITAM SB RAS, Novosibirsk
^{***}Department Structural Macrokinetics, TSC
^{****}ICKC SB RAS, Novosibirsk
^{*****}Lebedev Physical Institute RAS
^{*****}IFS Tohoku University
[†]Applicant, ^{††}IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Currently, the actual problem is the creation of efficient and environmentally friendly technologies of hydrocarbon fuels burning based on combustion devices with heat recirculation. Effective heat recirculation as well as combustion management and control allow increasing efficiency of combustion-based devices and reducing the pollutants. These advantages may be achieved in micro channel combustors or in porous burners manufactured on the base of new porous materials. Project was aimed at obtaining of fundamental knowledge of the detailed structure of combustion waves in porous media and micro channels which are necessary for the development of new eco-friendly and efficient combustion technologies for power engineering and industry.

2. Details of program implement

The following studies were conducted to obtain new fundamental knowledge on combustion in the porous media and micro channels:

- 1) Investigations of flame dynamics and stabilization in the set of micro channels of different diameters to model the discrete structure of filtration gas combustion wave in porous media.
- 2) Investigations of flame stabilization in micro systems with heat recirculation and spatially non-uniform mixture flow.
- 3) Modelling of minimal ignition energy and flame initiation in spatially non-uniform flows.
- 4) Creation of the reduced phenomenological kinetic mechanisms of oxidation of hydrogen and hydrocarbon fuels and development of verification methods of kinetic models on the base of micro flow reactor.
- 5) Development of SHS methods for sintering of metal-ceramic porous media burners and investigations of the burner characteristics made of SHS materials.

3. Achievements

The following results were obtained during first year of the project realization.

- 1) The general similarity of gas combustion in the micro channels and in porous

medium were found. The similarity is based on preheating of combustible mixture by solid phase, which transfers heat from the combustion zone to the unburned mixture. The traditional models of filtration gas combustion in porous media are phenomenological and they suppose existence of two interpenetrating media - solid and gas. At the same time, these models meet principal difficulties in the description of certain phenomena. It was proposed to treat porous medium as a set of micro channels [1]. The simulations within discrete models reveal new effects, such as flame “anchoring”, local flame oscillations and widening of the combustion zone. At the same time, in the limiting cases the proposed discrete models transform into traditional models.

- 2) Numerical and theoretical investigations of the premixed flames in counter-flow slot-jet configuration reveal existence of the following combustion regimes: twin planar and wrinkled flames, multiple and isolated flame tubes [2]. The diagrams of existence of these regimes in the fuel concentration/flow rate plane were determined. The results demonstrate extension of flammability limits of low-Lewis-number flame that is related with formation of the non-planar flame structures due to diffusive-thermal instability. The obtained theoretical results are in good agreement with available experimental data. The new configuration of slot-jet burners was proposed and tested in experiments. The new type burner allows investigating structure of stretched flames at very low flow rates compare with conventional counter current burners.
- 3) Theoretical approaches and numerical algorithms were developed to model ignition in turbulent flows. The numerical simulations of gas ignition were performed within thermal – diffusion model in the cube domain. The three-dimension gas flow consists of regular vortexes which are described by ABC-flow solutions. The effects of Lewis number, vortex size and the flow intensity on minimal ignition energy have been studied. It was found that in large – scale vortex flow, the ignition energy is almost constant until the intensity of turbulence exceeds a critical value. While exceeding the critical value, the ignition energy rapidly increases. Numerical results reveal existence of a characteristic size of vortexes corresponding to the maximal ignition energy. These conclusions qualitatively agree with experimental observations of the ignition in the turbulent flow and were predicted for the first time within proposed model.
- 4) The global two stages phenomenological kinetic mechanism was proposed in order to model complex regimes of combustion of rich hydrogen/air mixtures. In particular, dynamics of rich hydrogen–air flames in a micro flow reactor with controlled temperature of the walls was investigated numerically using the thermal-diffusion model with two-step kinetics [3]. The sequence of bifurcation was revealed leading to the formation of complex spatio-temporal patterns that include pulsating, chaotic, mixed-mode and FREI (Flames with Repetitive Extinction and Ignition) oscillations. The new type of diffusive–thermal pulsations has been identified for the first time.

The properties and stability of premixed flame were theoretically investigated in the model, which includes the two-step chain-branching reaction mechanism, first order reaction of conversion of radicals into products and heat losses [4]. It was demonstrated that the depletion of radicals through the additional termination reaction enhances the onset of instabilities and extinction. The solutions emerging once the travelling deflagration wave becomes unstable were studied.

These investigations of premixed flame in micro channel are important for both theoretical knowledge and technological applications such as verification of combustion kinetics, flame diagnostics, etc.

- 5) The high temperature self propagating combustion synthesis methods were

developed to synthesize Al/Ni ceramic porous materials with required porosity and geometry. Effective cylindrical radiative burners of wide spectrum of applications were designed on the basis of the porous materials. In particular, premixed gas combustion in cylindrical porous radiant burners with different thickness of the porous walls was studied [5]. Experimental results demonstrate existence of external and internal regimes of combustion, observed at the same values of gas flow rate and mixture composition. Dependencies of porous-shell temperature, total radiation power and radiation efficiency on the firing rate and mixture composition were obtained.

4. Summaries and future plans

Future investigation within the project will allow to get the following results.

- I. The knowledge about mechanism of flame stabilization under surface of porous burner will facilitate designing of new generation of effective radiative burners on the basis of well structured porous materials or multichannel burners with regular packing of micro channels. Absence of understanding of the flame stabilization mechanism in the solid matrix hampers development of the technology.
- II. The investigations of flame structures near stagnation zone using new type of the counterflow burner on the basis of plane micro channel will give new knowledge about effects of heat losses and stretched flow on the flame characteristics. The experimental results can be used for verification of existing models describing transport and chemical processes of combustion. The use of mass spectrometry methods to study stretched flame in the micro channel burner can open way in creation of new precise instrument for detailed investigation of combustion chemistry.
- III. The modelling of flame ignition in turbulent flows allows to distinguish mechanisms responsible for rapid increase of minimal ignition energy with intensification of turbulence and to clarify role of chemical effects. The knowledge are important for designing of internal combustion engines operating at high pressure with lean mixtures of practical fuels.
- IV. The creation of reliable global combustion reaction mechanisms of practical fuels and their experimental verification are necessary to overcome difficulties related with high computation load in simulations of combustion processes in practical devices.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - [1] F. Sirotkin, R. Fursenko, S. Kumar and S. Minaev: Flame anchoring regime of filtrational gas combustion: Theory and experiment, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, No.3, (2017), pp. 4383-4389.
 - [2] R. Fursenko, S. Mokrin, S. Minaev and K. Maruta: Diffusive-thermal instability of stretched low-Lewis-number flames of slot-jet counterflow burners, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, No.1, (2017), pp. 1613-1620.
 - [3] T. Miroshnichenko, V. Gubernov, K. Maruta and S. Minaev: Diffusive-thermal oscillations of rich premixed hydrogen-air flames in a microflow reactor, *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 20, No.2, (2016), pp. 313-327.
 - [4] V. Gubernov, A. Kolobov, V. Bykov, and U. Maas: Investigation of rich hydrogen-air deflagrations in models with detailed and reduced kinetic mechanisms, *Combustion and Flame*, 168(2016), pp. 32-38
 - [5] R. Fursenko, A. Maznoy, E. Odintsov, A. Kirdyashkin, S. Minaev and S. Kumar: Temperature and radiative characteristics of cylindrical porous Ni-Al burners, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 98 (2016), pp. 277-284.

- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [6] A. Maznoy, A. Kirdyashkin, S. Minaev, R. Gabbasov: Filtration Combustion Synthesis in Forced Oscillation Mode, *Proceedings of the thirteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2016)*, Sendai, (2016).
 - [7] A. Kirdyashkin, V. Salamatov, V. Kitler, R. Gabbasov, S. Minaev: Features of Combustion for Melting Metal Wires, *Proceedings of the thirteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2016)*, Sendai, (2016).
 - [8] T. Miroshnichenko, S. Minaev: Quenching Distance for Flame Propagation along the Gas Flow in Microchannel with Narrowing, *Proceedings of the thirteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2016)*, Sendai, (2016).
 - [9] V. I. Babushok, V. V. Gubernov, S. S. Minaev, T. P. Miroshnichenko: Generalized Model of Inhibition of Chain Branching Combustion Processes, *Proceedings of the thirteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2016)*, Sendai, (2016).
 - [10] S. Mokrin, E. Odintsov, G. Uriupin, S. Minaev, T. Tezuka, K. Maruta: Flammability Limits of Counterflow Stretched Flames Stabilized in a Planar Microchannel, *Proceedings of the thirteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2016)*, Sendai, (2016).
 - *[11] A. Korsakova, V. Gubernov, A. Kolobov, V. Bykov, U. Maas, K. Maruta: Investigation of Pulsating Instabilities of Hydrogen-Air Flames in the Model with Detailed Reaction Mechanism, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 178-179.
- 3) Patent, award, press release etc.
- (Patent) Not applicable.
 - (Award) Not applicable.
 - (Press release)
- [1] Russian News Agency, <http://tass.ru/nauka/3973048>
 - [2] <http://primamedia.ru/news/528088/>

2. 研究成果報告書

<リーダーシップ共同研究>

課題番号	J16L003
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

熱遷移流に対する分子動力学解析
Molecular Dynamics Study on Thermal Transpiration Flow

山口 浩樹^{*†}, 菊川 豪太^{**††}

^{*}名古屋大学大学院工学研究科, ^{**}東北大学流体科学研究所

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

流れにおいて、流体を構成している分子が他の分子と衝突するまでに平均的に移動できる距離である平均自由行程の、系の代表長さに対する比は、クヌッセン数と呼ばれる無次元数であり、流れの希薄化の効果を表す重要な無次元数である。流動場の微細化に伴い、クヌッセン数の大きい「高クヌッセン数流れ」と呼ばれる流動場がみられるようになってきた。この高クヌッセン数流れにおいて生じる特異な現象の一つに、流れ方向の温度勾配によって低温側から高温側へと誘起される熱遷移流（熱匍匐流）がある。様々な解析や実験が行われてきているが、熱遷移流の作り出す詳細な流動構造についてはまだ十分明らかになったとは言いがたい。これまで希薄気体流の数値解析で用いられてきた DSMC（直接シミュレーションモンテカルロ）法などでは分子の衝突過程をモデル化しているために解析手法として不十分であり、現象全体の大きな時空間スケールに対して詳細な流動構造の解明を行うためには結果として大規模な MD（分子動力学）シミュレーションが要求される。

そこで、本研究では、分子動力学法を用いて大規模数値シミュレーションを行うことにより直接的に熱遷移流の流動構造を解析し、その特性を明らかにすることを試みる。具体的には、微細流路を構成する壁面に温度勾配を課し、その内部での流動を解析する。

2. 研究成果の内容

構築済みの汎用分子動力学計算プログラムを利用し、壁面分子を陽に取り扱った流路を構築し、流路壁面に温度勾配を与えて、流路内部における流動を解析した。境界条件としては周期境界条件を満たすように、流路の流れ方向に低温、高温、低温の領域を配置し、その間に温度勾配を設定した。初期条件として、分子の流速を流れ方向位置に対応した壁面温度と一致するようにサンプリングして決定することにより、壁面と同じ温度分布が流体にも形成されるようにした。さらに、初期分子の配置として、数密度が流れ方向位置に応じた温度に反比例するようにランダムサンプリングして決定することにより、流路内の温度分布が存在しても圧力分布が生じないようにした。

より多くの統計量が求められることから、全体で 1 ns に相当する時間の解析を行い、ほぼ定常状態とみなせる範囲に対してサンプリングを行い、流路内の温度分布および流速分布の可視化を行った。結果を図 1 に示す。壁面において誘起された低温側から高温側への流速ベクトルを観察することができる。一方、流路断面内における流速分布という観点で見ると、流路中心部においては誤差が大きいもののほとんど流速分布がないことが見て取れる。これは熱遷移流が誘起される領域と流路高さの関係によると考えられる。



図1：マイクロ流路における温度分布（色）および流速分布（ベクトル）

クヌッセン数も変化させて解析を試みたが、高クヌッセン数流れに分類される領域ではおむね壁面近傍で誘起された熱遷移流を観測することができた。

3. 研究目標の達成状況

当初の目標であった、系の大きさという有次元量が結果に与える調査を行った。また、クヌッセン数を変化させたときの流動構造の変化についての予備調査も行った。どちらも統計量が十分ないと調査できなかったため、相当な時間が必要となった。

一方で、分子動力学法の大規模解析において問題となる計算負荷から考えられる流路サイズと、流路内の詳細な流動構造を明らかにするために必要な流路サイズという二つの観点から計算条件を絞り込む必要性も明らかになった。

4. まとめと今後の課題

微細流路の壁面において流れ方向に対して温度勾配を課した系を構築し、分子動力学法による大規模数値シミュレーションを行うことによって、直接的に熱遷移流を再現することを目指した。初期条件を詳細に検討して工夫することにより、壁面近傍において誘起される熱遷移流の再現に成功した。しかし、一方で流路断面内での流速分布については誤差が大きく更なる統計量が必要であることも判明した。

今後は、流路サイズを工夫することによって、流路断面内の流動構造まで詳細に解析できるように計算条件を絞り込む必要がある。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[1] H. Yamaguchi and G. Kikugawa: Molecular Dynamics Study on Thermal Transpiration Flow in Nanochannels, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 150-151.

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	J16L004
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

腹足類這行運動の粘液の特性解析とその壁面移動ロボットへの応用
Characteristic Analysis of Mucus of Crawling Locomotion in Gastropods
and Its Application to a Wall Climbing Robot

塚越 秀行*†, 中野 政身**††

*東京工業大学, **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

様々な環境に吸着しながら移動するカタツムリは、粘液の粘度を巧みに操作している。本研究では、カタツムリの粘液の基本特性を解明し、その原理を応用して多様な壁面に吸着しながら移動できるロボットの創成を目指す。

2. 研究成果の内容

カタツムリの粘液に類する人工粘液の設計方法を明らかにするため、シリコンオイルとナノシリカからなる混合液体に着目し、その特性を計測した。

まず、人工粘液のせん断降伏応力に関する設計パラメータとして、①ナノシリカの濃度、および②シリコンオイルの粘度、の2種類に着目した。図1はざり速度一定 $\dot{\gamma}=1[1/s]$ でレオメータを動作させたときの人工粘液のせん断応力と時間応答の関係を示す。これより、人工粘液のせん断降伏応力は、ナノシリカの濃度の増加にともない増加することが分かる。一方、シリコンオイルの粘度を変えても、せん断降伏応力は増加しなかった。これより、せん断降伏応力は、ナノシリカの濃度により設計可能と考えられる。

次に、人工粘液の垂直吸着力に関する設計パラメータとして、ナノシリカの濃度に着目した。引張試験機を用いた垂直吸着力の測定実験の結果、濃度の増加とともに吸着力が増加すること、および吸着力を最大化する最適な粘液の厚みが存在することが明らかとなった(図2)。

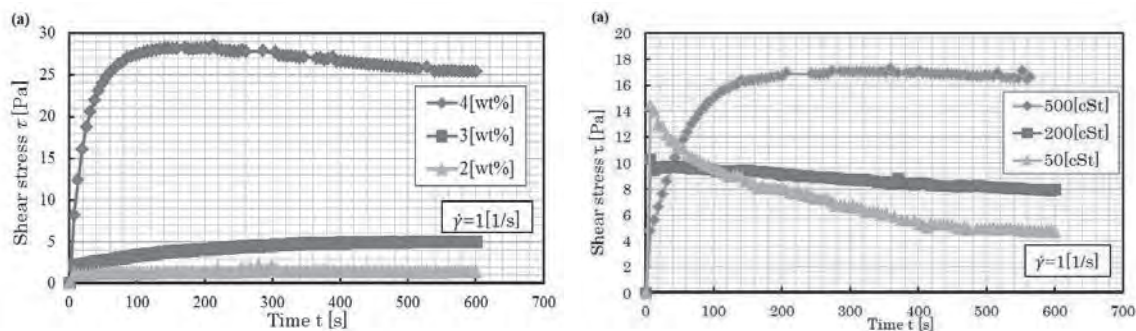


図1：せん断応力の時間応答 ($\dot{\gamma} = 1.0 \text{ s}^{-1}$) (濃度の変化(左)と粘度の変化(右))

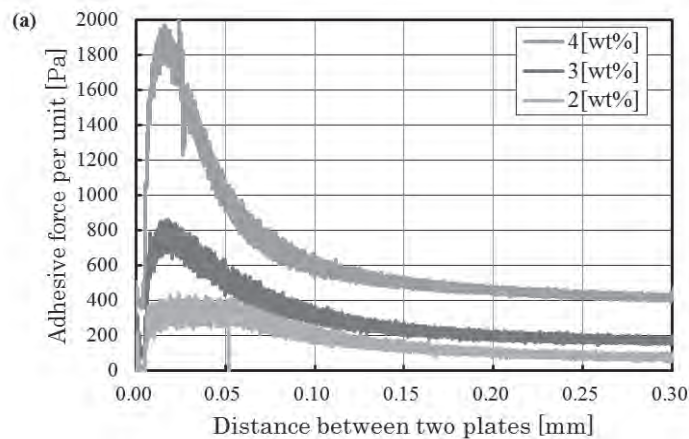


図2：粘液の厚みと垂直吸着力との関係

3. 研究目標の達成状況

本研究の最終目的は、カタツムリのように粘液を利用しながら凹凸面に吸着しながら移動する壁面・天井移動ロボットを工学的に再現することである。

平成 28 年度の成果として、カタツムリの粘液に類する静特性を再現するうえで有効な人工粘液の設計パラメータを明らかにした。

4. まとめと今後の課題

カタツムリの這行動作に着目し、壁面に吸着しながら移動できるロボットの実現を目指して、人工粘液の設計方法を検討した。今後は、本研究で試作した人工粘液を用いて、コンクリート壁面に吸着しながら移動可能な機械モデルを開発する予定である。

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] Hideyuki Tsukagoshi, Masahiro Watanabe, and Masami Nakano: Snail Inspired Mobile Robot Using Fluid Adhesion to Travel on Rough Concrete Surface, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2016)*, Sendai Japan, (2016), pp. 152-153.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16L006
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

海洋細菌に対する衝撃波殺菌効果の向上に関する研究
Study of Improvement in Sterilization Effects on Marine Bacteria
Using Underwater Shock Waves

阿部 晃久*†, 孫 明宇**††

*神戸大学海事科学研究科, **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

国際的な海洋環境保全のため、2004年に国際海事機関（IMO）で船舶バラスト水管理条約（BWM）が採択された。その発効条件が2016年に満たされ、国際船舶輸送における船舶バラスト水中の微生物の処理が2017年9月から大型船舶に義務付けられることとなった。すでに様々な形式のバラスト水処理装置が開発されているが、コレラ菌や大腸菌などの微小な細菌の処理方法は基本的に化学薬品処理に頼るところが多く、それらに代わる安全安心な殺菌処理技術が求められている。本研究では、薄型水槽を用いることで、水中衝撃波の生成・伝播に伴って生じるキャビテーション気泡を利用し、海洋細菌の衝撃波殺菌効果と殺菌効率の向上を実現するための条件について検討を行う。

2. 研究成果の内容

本研究では、前年度に引き続き、水を満たした間隙5mmの薄型水槽内に、高圧放電による細銅線の線爆現象により水中衝撃波を発生させ、BWMの規制対象となる細菌と同属だが毒性の無い海洋ビブリオ属細菌を用いて、殺菌効果の検証実験を実施した。昨年度の報告書で示された通り、衝撃波背後に多数の微小気泡が発生する放電電圧4.5kVでの実験結果では、全体的に生存菌体数はかなりバラついているものの、15回以上の放電回数で、菌体の減少傾向が見出された。電圧4.5kVの衝撃波背後に生じた多くのキャビテーション気泡の運動が、菌体減少の原因であると考えられた。しかしながら、放電毎に電極先端部の取り換え作業を伴うため、衝撃波照射の時間間隔は3～5分を要した。したがって、35回の放電に要する実験時間は、全体で2時間以上であった。放電の時間間隔が長いことから、衝撃波背後に生じるキャビテーション気泡を効果的・効率的に運動させることが難しく、殺菌効果の向上が期待できないと考えられたため、これまで続けてきた細銅線の線爆方式の衝撃波生成方法を止めて、電極先端にギャップを設ける火花放電による方法で実験を行った。最大1Hzの周波数で放電を続けることができる電源装置を用いて、連続的な衝撃波照射を行った。水槽内で発生させた衝撃波背後に生じたキャビテーション気泡が、その1秒後に、引き続き放電により発生・伝播された衝撃波と干渉することで、キャビテーションに強い気泡運動を誘起させ、リバウンド衝撃波およびフリーラジカルの生成を促進させることで、殺菌効果を向上させられると考えた。図1に、実験装置の構成を示す。菌体溶液で満たされるシリコンバッグの底面から20mmの位置で、パルスジェネレーターにより、1Hz、0.2Hzおよび0.1Hzの3種類の周波数で連続放電させ、衝撃波を発生させた。図2に実験結果を示す。図中のシンボルは、それぞれ、■ 1Hz、▲ 0.2Hz、

および ● 0.1 Hz を意味している。実験開始時に 1 ml 中 10^5 弱の個数いた菌体が、約 240 回から 300 回の放電で、完全に不活性化されたことがわかる。すなわち、1 Hz で約 4 分間、0.2 Hz で約 25 分間の短時間照射で、シリコンバッグ内の菌体の完全不活性が達成された。従来の線爆による衝撃波照射方法では、数時間かかる実験によって菌体数減少の傾向を把握する程度の結果しか得られなかったことに比較して、本結果では、明確な殺菌効果および処理時間の著しい短縮が得られた。これらから、「水槽内に生じたキャビテーション気泡の運動をいかに効率的に誘起させられるか」が、殺菌効果を高めるための重要な要因となることが示唆された。

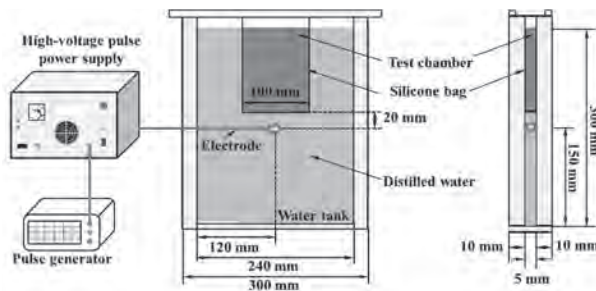


図1：火花放電による衝撃波連続生成実験

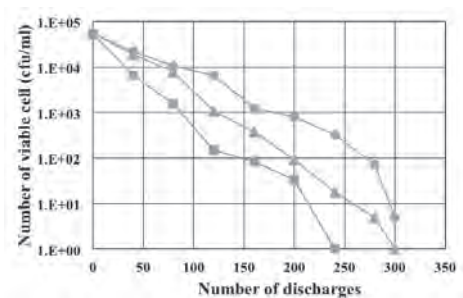


図2：照射周波数による不活性効果

3. 研究目標の達成状況

薄型水槽を用いることで、マイクロバブルの注入無しに、放電衝撃波照射のみで、海洋ビブリオ属細菌を不活性化できることが明らかにされた。さらに、衝撃波照射の周波数を高めることにより、線爆方式の結果よりも著しく処理効果および効率を向上させることが実験的に明らかにされた。以上から、本研究における当初の目標は 100% 達成された。今後、これまでの研究成果を論文にまとめ、公表する予定である。

4. まとめと今後の課題

本研究では、薄型水槽内で放電によって生成された衝撃波による水槽内における波動伝播や干渉によってキャビテーション気泡を生成し、気泡運動によるフリーラジカルとリバウンド衝撃圧の作用による殺菌効果の確認、および、殺菌効果や殺菌処理効率の向上について実験的に検討した。海洋ビブリオ属細菌を用いた実験の結果、薄型水槽を用いて、高周波数で衝撃波を照射させることで、効果的で効率的な不活性化処理が可能であることが示された。今後、これまでの研究成果を論文にまとめると共に、本研究成果を活用して新たな衝撃波殺菌処理システムの構築提案と将来的な海水処理を想定した実証試験へ繋げることが次の課題である。

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
なし
- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）
なし

課題番号	J16L026
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3年目

水および液体窒素の高圧環境下における噴霧特性の研究

Atomizing Characteristics of Water and Liquid Nitrogen Jets under High Pressure Environment

渡邊 力夫*†, 小林 秀昭**††

*東京都市大学工学部, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

東京都市大学では、液体窒素の気化膨張圧を利用したロケットエンジンの開発をしている。このエンジンの特性を解析するためには、背景圧力が高い混合室内部における推進剤（水と液体窒素）の噴霧特性を明らかにする必要があるため、東北大学流体科学研究所小林研究室所有の「高圧環境噴霧試験装置」を利用して、推進剤噴流の粒子径分布や流速分布を明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果の内容

平成 26 年度より開始した共同研究の 3 年目にあたる平成 28 年度では、水／液体窒素ロケットエンジンで使用される過熱水をスプレイノズルで高圧環境下に噴射し、形成される噴霧様態を高速度ビデオカメラにより観察した。実験パラメータとしては水温と雰囲気圧力を取り、実験データの整理には過熱度を採用した。過熱度とは水温と各雰囲気圧力に対応した飽和温度の差であり、過熱度 0 K が沸点に対応する。噴霧形態としては、主に噴霧角（正面および横）を調べた。流体科学研究所の噴霧実験装置は過熱水噴霧に対応していなかったため、水を加熱するタンクと高温高圧に対応した配管や計測器を東京都市大学で準備し、流体科学研究所の噴霧チャンバに接続して実験を行った。流体科学研究所における実験は平成 28 年 12 月 12 日から 12 月 15 日までの 4 日間実施され、表 1 に示す試験条件範囲内で 72 ケースに及ぶ実験を実施した。試験内容としては、過熱水をスプレイノズルによりチャンバ内に噴射し、後方から光源により照射した状態で高速度ビデオカメラにより撮影するバックライトイメージング法による光学可視化試験を行った。

表 1：試験条件

噴射圧力 P_i , MPa	0.6～1.6
雰囲気圧力 P_a , MPa	0.3～0.7
水温 T_w , K	373～423

図 1 に代表的な光学可視化試験の結果を示す。雰囲気圧力と噴射圧力を変えた場合の結果を縦方向に、水温を変えた場合の結果を横方向に示す。雰囲気圧力が低い場合は、常温水噴射と同様な液膜振動による液糸形成から液滴への分裂が観察されるが、高雰囲気圧の場合には、スプレイノズルから噴射された直後から高い雰囲気圧力により噴流が乱されて波面振幅が増大し、背景光の透過率が低くなることから噴霧画像は暗くなる。水温を上昇させると、飽和蒸気圧が上昇し、密度、表面張力、動粘度が減少する。飽和温度は雰囲気圧力が高くな

っても上昇するため、本実験においてはほとんどの場合過熱度が負、すなわち沸点以下での噴射条件となり、減圧沸騰に起因するノズル出口付近でのバブルによる噴流の乱れは観察できなかった。正面から観察した噴霧幅に関していえば、温度の影響は大きくはなかった。噴流の乱れに関係するレイノルズ数・ウェーバー数・オーネゾルゲ数の温度による変動なども加味して噴霧現象の考察を試みたが、現時点では現象が複雑すぎて大局的な観点からの実験結果の考察はできておらず、平成 29 年度以降の課題とした。

3. 研究目標の達成状況

これまで常温水の噴射のみを実施していたが、今年度より過熱水の噴射を実施することができ、達成目標は満たせたといえる。しかし、液体窒素の噴射にはさらなる設備が必要なので現時点では実施していない。

4. まとめと今後の課題

平成 28 年度は流体科学研究所における 4 日間の実験により、過熱水噴霧の噴霧特性を明らかにした。雰囲気圧の影響は定性的に把握できたが、温度の影響は沸騰現象との影響も加味しなければならず、解明に至っていない。

5. 研究成果（※は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] R. Watanabe, H. Ishii, T. Tanaka, H. Kobayashi: Liquid Sheet Wave Characteristics of Water Spray from a Fan Spray Nozzle under High Ambient Pressure, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 154-155.

*[2] 田中宇真, 渡邊力夫, 小林秀昭, 工藤琢: ファンスブレイノズルによる高温水噴射における噴霧特性に関する研究, 第 25 回微粒化シンポジウム, (2016), pp. 47-51.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

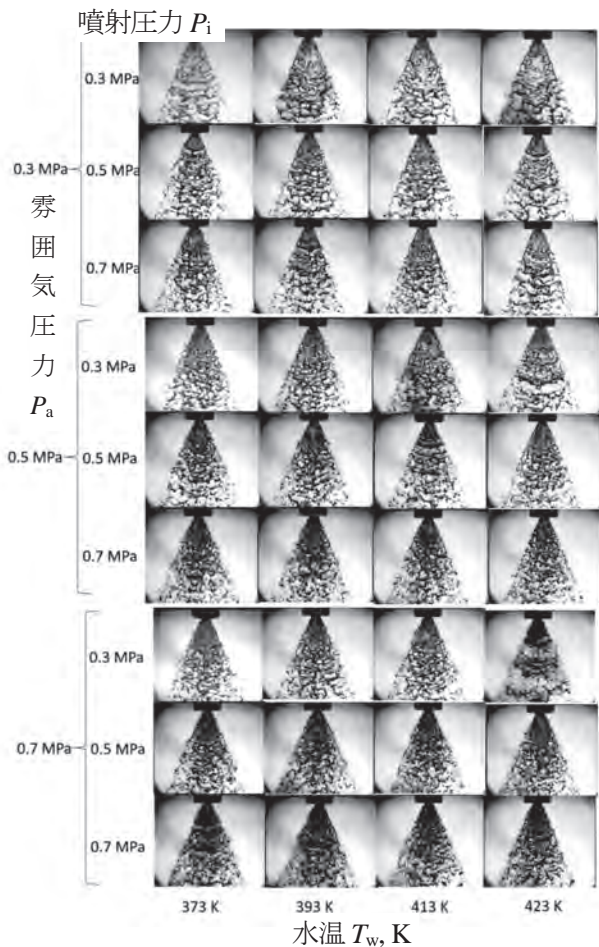


図 1：噴霧正面画像（噴射圧力，雰囲気圧，水温変化の影響）

課題番号	J16L029
区分	共同研究集会
課題分野	環境・エネルギー
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3年目

次世代高温センサ研究会（フェーズ2）

Seminar for Next Generation Sensors for Super-High Temperature Environment (Phase 2)

内一 哲哉[†], 矢口 仁^{††}
 三木 寛之^{***}, 青木 孝行^{****}, 志波 光晴^{*****}
 荒川 敬弘^{*****}, 西村 昭彦^{*****}
 古村 一郎^{*****}, 森永 雅彦^{*****}
 米津 豊作^{*****}, 金澤 兼治^{*****}
 高木 敏行^{*}, 小助川 博之^{*}

^{*}東北大学流体科学研究所, ^{**}(株)インテリジェント・コスモス研究機構

^{***}東北大学学際科学フロンティア研究所, ^{****}東北大学

^{*****}(国研)物質・材料研究機構, ^{*****}(株)IHI 検査計測

^{*****}(国研)日本原子力研究開発機構

^{*****}(財)発電設備技術検査協会, ^{*****}(財)電力中央研究所

^{*****}旭硝子(株), ^{*****}(株)福電

[†]申請者, ^{††}所外対応研究者

1. 研究目的

本研究会では、高温での様々な物理量の計測を必要としている関係者と高温領域でのセンサのシーズを有する関係者が集い、各種産業において求められている500℃以上の高温環境に耐えるセンサの可能性と今後の開発の動向について議論する。シーズ側とニーズ側それぞれの立場から、より活発な議論を目指し、様々な産業において求められている500℃以上の高温に耐える温度センサ、電磁センサ、超音波センサ等のセンサについて調査する。これらの高温領域でのセンサに求められる機能とシーズ研究、実現した場合の産業上のインパクト、また、ノイズ除去、センサネットワークの観点からの情報処理、等についても議論する。関連する学協会との連携を行いながら、技術開発戦略の構想を立案する。

2. 研究成果の内容

平成28年度は、本研究所に高温センサや非破壊評価に関する専門家を招聘し今後の運営方法について検討を行った。また以下の研究会を、開催しニーズおよびシーズに関する研究を中心に調査を行った。

日本非破壊検査協会新素材に関する非破壊試験部門主催の「安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム」との共催により行った。特別講演については、摂南大学の久保司郎先生より、これまでの破壊力学に関連した逆問題解析に関する研究のレビューとその非破壊評価への応用についてご講演頂いた。今後、高温センシングの領域においてデータサイエンスやIoTの活用は非常に重要になるものと

考えられるが、逆問題解析もその重要なツールになるものと思われる。三菱重工業(株)の山本裕子より、同社において開発されている高温配管のモニタリングのための薄膜 UT センサについて、その開発や適用事例についてご紹介頂いた。プラントにおける配管の新しい管理のためのツールとして非常に重要な技術である。特に開発時の苦労話や、現場にセンサを設置した時の失敗談なども交えてご紹介頂き、多くの方々の関心を集めた。一般講演と併せて、高温センシングが材料開発、設備管理、ビッグデータ解析と融合して、新しい領域の開拓に向けた情報が得られたと考えられる。

日 時： 平成29年3月13日(月) 15:00~18:20

場 所： サン・リフレ函館(函館市)

参加者数： 45名

特別講演

特別講演1 「逆問題解析と非破壊評価への適用」

摂南大学 久保司郎

特別講演2 「高温配管検査のための薄膜UTセンサの開発」

三菱重工業(株) 山本裕子

一般講演 11件

500℃SUS配管に実装したFBGセンサ、ロケット燃焼室銅合金の非破壊計測、プラント運転データによるリアルタイム状態検査の可能性、高速赤外線サーモグラフィによる高温観察事例など、高温環境におけるセンシングやその周辺技術に関して多数の講演がなされた。

3. 研究目標の達成状況

第1フェーズの活動を通して明らかになった、高温環境センサが求められている産業分野に関する情報を参考に、シーズ側およびニーズ側の情報交換を通じて高温計測の位置づけ、技術開発の戦略について検討を行った。さらに、ニーズについての調査も継続して行い、ニーズとシーズの両者から課題を抽出した。

4. まとめと今後の課題

本研究会では、本年度を含め合計 12 回の研究会を開催してきた。今後、非破壊検査協会等の研究会との連携や、学協会における常設委員会の可能性を探る。

5. 研究成果（※は別刷あり）

1) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

なし

2) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16L034
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

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

岩川 輝^{*†}, 佐宗 章弘^{*}

大林 茂^{**††}

^{*}名古屋大学大学院工学研究科, ^{**}東北大学流体科学研究所

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

直径 10 mm の鈍頭円柱模型に対して、同一の静圧・静温条件下で同様のパルスエネルギー及び周波数でエネルギー付加を行った場合の抗力低減効果のマッハ数依存性について、マッハ数を 1.8 から 3.2 の範囲で変え、数値解析を行った。図 1 に異なるマッハ数における密度場の違いを、図 2 にマッハ数と抗力の関係を示す。図 2 のエラーバーは計算時間のうち抗力が最大及び最低の値、プロットした点は時間平均値を示す。この図から、初期の抗力とエネルギー付加した場合の抗力の差は、マッハ数が高くなるともに大きくなっており、抗力低減量はマッハ数の増加とともに大きくなることがわかる。また、マッハ数が 2 以下の範囲ではエネルギー付加することによって常に抗力がエネルギー付加しない場合を下回っているが、マッハ数が 2.5 を超えると抗力の瞬間的な最大値は初期の抗力よりも大きくなっていった。図 3 に抗力低減率とマッハ数の関係を示すが、この図から抗力低減率はマッハ数の増大とと

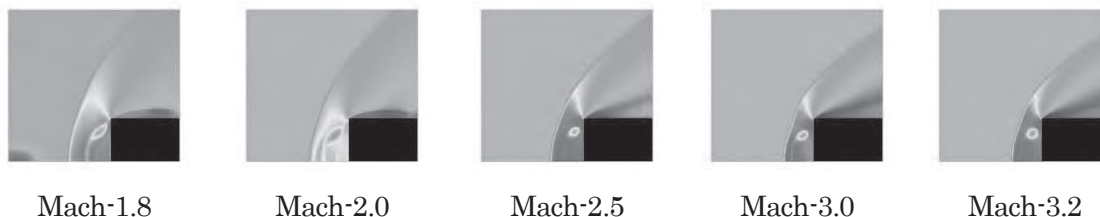


図 1 異なるマッハ数におけるエネルギー付加による密度場の違い。主流条件：静圧 13 kPa, 静音 160 K, 付加エネルギー 5.5 mJ/pulse, エネルギー付加繰返し周波数 30 kHz.

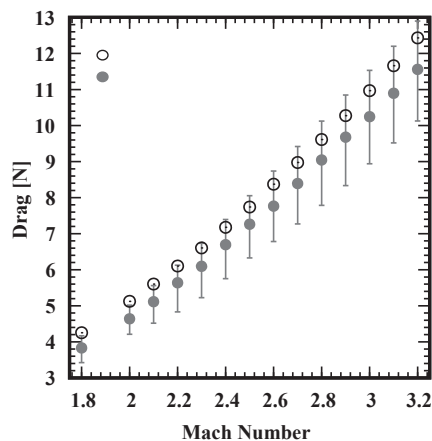


図2 抗力とマッハ数の関係

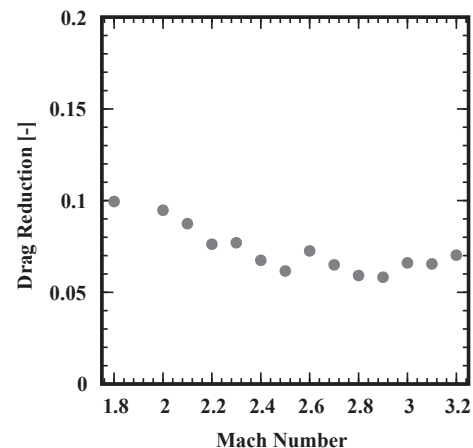


図3 抗力低減率とマッハ数の関係

もに減少する傾向が確認された。

3. 研究目標の達成状況

現時点では非定常な現象が周期的となるまでの長時間の数値解析結果が揃っていないが、各マッハ数において十分な計算時間を確保し、時間平均処理を行うことによって抗力低減量（図2）及び抗力低減率（図3）、などを指標とした評価を行うことにより、マッハ数による違いを詳しく調べる必要がある。

4. まとめと今後の課題

これまでの研究から実験と数値解析がよく一致することが判明している「エネルギー付加を用いた抗力低減」の手法について数値解析を用いてマッハ数をパラメータにした場合の違いを解析した結果、抗力低減量はマッハ数とともに増加するものの、抗力低減率はマッハ数が大きくなると低下する傾向が得られた。今回パラメータとしていないエネルギー付加の条件についても同様にパラメータとし、最適なエネルギー付加条件を決定する他の評価指標を模索するとともに、並行して取り組んでいるモデル化との比較検証を行う。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] A. Iwakawa, T. Sakai, A. Sasoh, S. Obayashi: Supersonic Drag Reduction Model using Thermal Bubble Generated by Repetitive Laser Pulses, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 54-55.

*[2] 岩川輝，正田達郎，ファンホアンソン，丹波高裕，佐宗章弘エネルギー付加による超音速抗力低減のマッハ数依存性，第48回流体力学講演会／第34回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム，1B04.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16L039
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2 年目

プラズマ流による密閉小型容器内のウイルス不活化法の開発
Inactivation of Virus by a Plasma Flow in a Closed Small Vessel

佐藤 岳彦*†, 押谷 仁**††

中嶋 智樹*, 神山 秀人***

*東北大学流体科学研究所, **東北大学大学院医学系研究科

***東北大学大学院工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

新型インフルエンザを始めとした新興感染症の発生や、医療機関におけるウイルスによる感染事故などは、健康を脅かす大きな社会問題となっている。近年、低温で発生するプラズマを利用した空気清浄機などが製品化されているが、これらの効果は未だ学術的に証明されているとは言えない。そこで、本研究では、低温プラズマ流によるウイルスの不活性化の効果について検証を行い、ウイルスへの感染リスク低減の可能性について明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果の内容

平成 28 年度は、平成 27 年度までに開発した小型密閉型プラズマ殺菌装置の低電圧化・高周波化ならびにオゾン生成効率の向上と窒素酸化物の発生抑制について取り組んだ。平成 27 年度では、印加電圧を $\pm 3.1 \text{ kV}_{\text{pp}}$, 27 kHz としていたが、本年度は、印加電圧を $\pm 1.4 \text{ kV}_{\text{pp}}$, 40 kHz まで低減することに成功した。これは、誘電体の厚さと材料を 0.15 mm のガラス板に変更することで達成した。しかしながら、機械的強度が小さく破損しやすかったため、さらに厚さ 0.2 mm のアルミナ板に変更し、機械的強度の高い電極を製作した。このように低電圧化をすることで、図 1 に示すように、オゾン生成量の大幅な増加と窒素酸化物生成量の削減に成功した。これは、基板温度を 60℃から 30℃まで低下したことが要因だと考えられる。滅菌も気中で 4 分、水中で 30 分と、高濃度の窒素酸化物が生成されるケースと概ね同じ滅菌性能を得た。

さらに、新たに開発した低電圧アルミナ板タイプ（電極は直線形状）のプラズマ発生装置を利用してウイルスの不活化実験を行った。表 1 に不活化結果の一覧を示す。ここでは、エンベロープの有無と DNA/RNA の組み合わせから 4 種類のウイルス：インフルエンザ（エンベロープ有, RNA）、ヘルペス（エンベロープ有, DNA）、アデノ（エンベロープ無し, DNA）、エンテロ（エンベロープ無し, RNA）、を抽出した。照射時間は 30 分と 60 分、容器内の液量は 2000, 300, 50 μL とした。これより、インフルエンザウイルスは液量 2000 μL で 60 分、ヘルペスウイルスは液量 300 μL で 30 分、アデノウイルスは液量 300 μL で 60 分照射することで不活化できることが明らかになった。一方、エンテロウイルスは、液量 50 μL

で 30 分照射しても不活化されなかった。

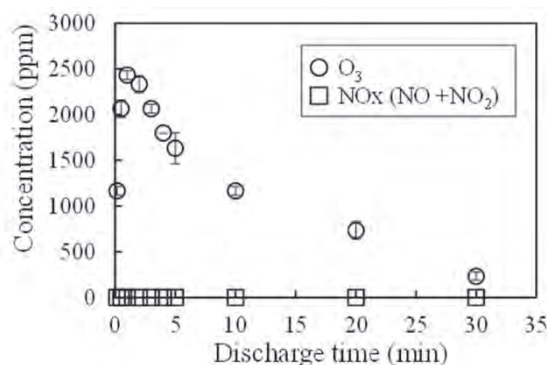


Fig. 1 Concentrations of O₃ and NOx (NO+NO₂) in gas phase versus increasing discharge time.

Table 1 Inactivation of virus by exposure to the plasma

		Control	Plasma-treated (Discharge time [min], Liquid volume [μL])				
			30, 2000	60, 2000	30, 300	60, 300	30, 50
Virus titer (log ₁₀ (TDID ₅₀))	<i>Influenza</i> (RNA, Env +)	7.25	7.00	< 1.50	< 1.50		
	<i>Herpes</i> (DNA, Env +)	4.75	4.50	4.50	< 1.50		
	<i>Adeno</i> (DNA, Env -)	6.00	5.75	5.00	4.50	< 2.50	< 1.50
	<i>Entero</i> (RNA, Env -)	4.75		4.25	4.00	4.25	4.50

3. 研究目標の達成状況

本年度は、目標とするオゾンの主成分とするプラズマガス発生装置を低電圧化により達成した。さらに、新たに開発した装置を利用してウイルスの不活化装置の開発と不活化の評価を行い、不活化効果があることを示した。これより、当初の目標は達成したと考えている。

4. まとめと今後の課題

今後は、ウイルス不活化の評価を開発したプロトコルに沿って行い、再現性の確認やさらに改良した装置による不活化性能の検証が必要である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[1] K. Okazaki, T. Sato, T. Nakajima, H. Oshitani, M. Okamoto, T. Nakatani and S. Fujimura: Development of small sterilization device using a low-temperature plasma flow at atmospheric pressure, *6th International Conference on Plasma Medicine (ICPM6) - Book of Abstracts*, Bratislava, Slovakia, (2016), p. 53.

外 国際学会 1 件 国内学会 1 件

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	J16L040
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	2年目

MR流体流動場中における微粒子挙動の解明
Investigation on Behavior of Particles in MR Fluid Flows

井門 康司*†, 中野 政身**††, 岩本 悠宏*

*名古屋工業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

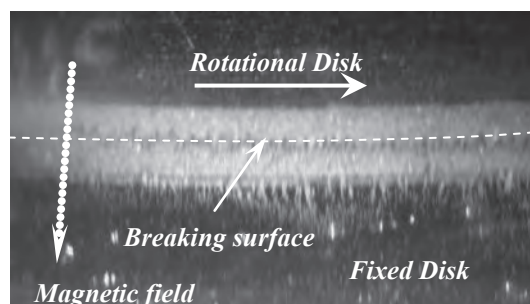
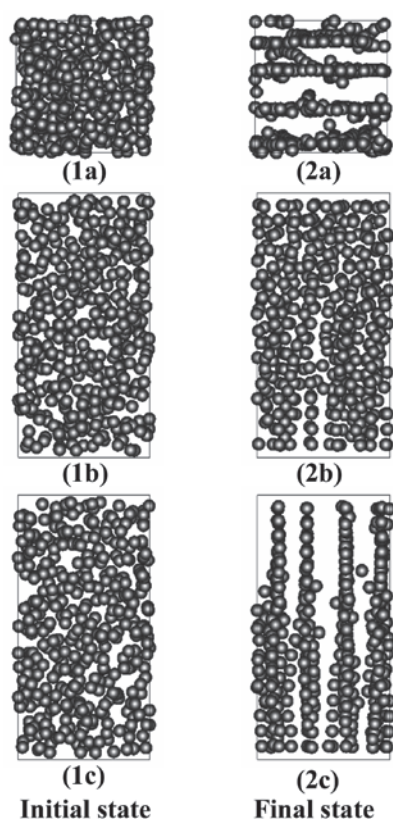
1. 研究目的

MR流体中の強磁性粒子が形成するマイクロ構造や挙動は、流体のマクロな特性や応答に対して重要な役割を果たしているものの、特に流動中の強磁性粒子の挙動については不明な点が多い。本申請課題では、離散粒子法などの数値解析と可視化実験によってMR流体の単純せん断流れにおける印加磁場下でのMR流体中強磁性粒子の挙動を明らかにすることを目的とする。

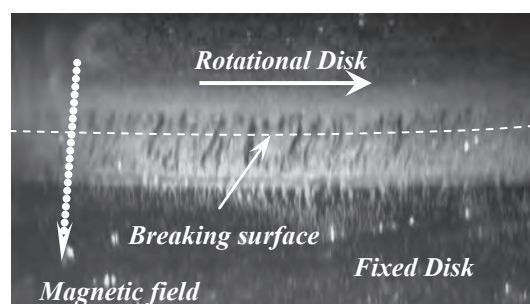
2. 研究成果の内容

MR流体に含まれる強磁性粒子の挙動を、離散粒子法を用いたハイブリッド数値解析法を用いて調べた。MR流体の平行平板間せん断流れ中における強磁性微粒子挙動について、HSMAC法と離散粒子法および埋め込み境界法のハイブリッド手法による数値解析コードを開発し、流れ場中での強磁性微粒子挙動の解析を行った。強磁性粒子の体積分率や印加磁場強度や流動条件などが、強磁性粒子が形成するマイクロ構造に与える影響について調べる。一方、微小間隔の平行平板間MR流体のせん断流れ中の強磁性粒子挙動について、マイクロスコープを利用した可視化実験を行うとともに、数値解析結果の妥当性を確認した。

数値解析結果の一例を図1に示す。図1には初期状態とレイノルズ数0.4、印加磁束密度 $B=25$ mT の場合について強磁性微粒子が形成するクラスター構造がほぼ定常となった状態での微粒子分布状態を示している。初期状態ではランダムに分散配置されていた強磁性微粒子は、磁場を印加して上壁面が一定速度で動き始めると、印加磁場の方向に鎖状クラスターを形成し始める。図1での条件の場合、鎖状クラスターはさらに合体して流れの方向に層状の構造を形成する。層状の構造を形成する鎖状クラスターは、流れ場の中央近傍で上側鎖状クラスターと下側鎖状クラスターのつなぎ替りが発生していることが確認された。同様の現象は図2(間隙0.5 mm, せん断速度 1.0 s^{-1})に示す可視化実験による観察結果でも確認され、印加磁束密度 B が大きくなるとその鎖状の粒子クラスター(図2(a))はより太い粒子カラム構造(図2(b))を形成するようになる。数値解析で観察された層状の構造が形成されるのは、同じ鎖状クラスター内の強磁性微粒子間に作用する磁気的な引力と、異なる層の間に作用する磁気的な斥力のバランスによるものと考えられる。レイノルズ数がある程度大きい場合には、鎖状クラスターはせん断流れの影響で磁場方向に対してクラスターの軸が傾いた状態となる。この粒子クラスターの軸が傾く現象についても、可視化実験においても同様に観察される。



(a) $B=200$ mT



(b) $B=400$ mT

図1：MR流体せん断流れ中の強磁性微粒子分布（数値解析結果） 図2：MR流体せん断流れ中の粒子クラスター及びカラム構造の挙動（可視化結果）

3. 研究目標の達成状況

流動するMR流体中の強磁性微粒子挙動を定量的に解析可能なハイブリッド解析コードを新たに開発した。解析結果は可視化実験結果と定性的に一致した。定量評価については可視化実験との条件の整合性などの問題があり、今後の課題である。

4. まとめと今後の課題

さらに大きなスケールでの解析が必要と考えられる。そのため膨大な数の強磁性微粒子の相互作用を考慮した、計算効率のよい計算コードの開発が必要であるとする。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[1] 井門康司, 岩本悠宏, 堤浩晃, 中野政身: MR流体単純せん断流れ中強磁性体微粒子挙動の可視化, 第94期日本機械学会流体工学部門講演会 USB講演論文集, 宇部市, Paper No.1101 (2016), pp. 1-2.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

Project code	J16L041
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	3rd year

Numerical Simulation for Reducing Future Tsunami Damage

Shigeru Obayashi*†, Fumiya Togashi**††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Applied Simulations Inc.

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

To develop effective protecting objects (*e.g.* sea walls) to protect people and buildings from a future huge tsunami using a state-of-art computational code integrating a computational fluid dynamics, computational structured dynamics, and a multi-objective genetic optimization code

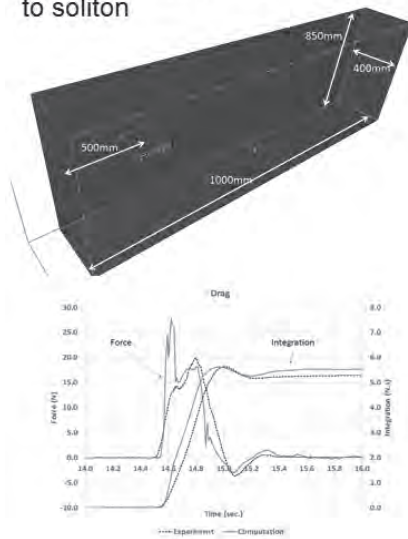
2. Details of program implement

We have been developing a coupled code of a computational fluid dynamics code using the volume of fluid methodology and a computational structural dynamics code. The developed code will have the capability of handling the building collapse, floating wreckages, and infrastructure damage, which will be very effective tool to estimate real local damage by Tsunami. We have been discussing the need from the society with professors at Tohoku University and worked up the future plan of our code development.

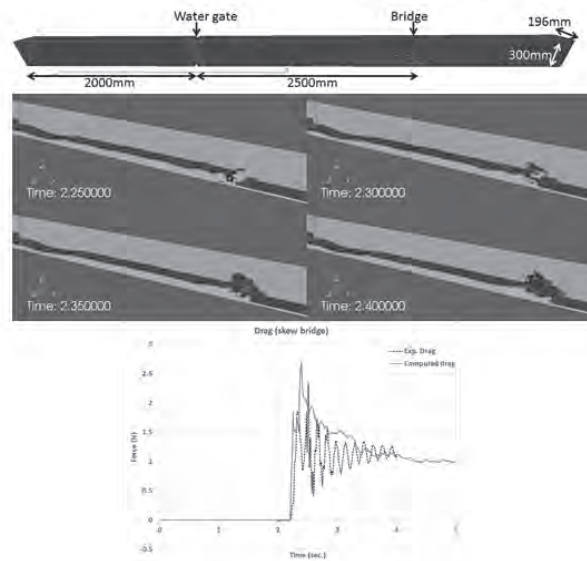
3. Achievements

A state-of-art coupled code of computational fluid dynamics and structured dynamics to handle tsunami simulation has been developed. We participated in the benchmark tests designed by the Japan Society of Civil Engineers. Our predictions showed good agreement with the experimental data as shown in Fig.1. The developed code will be applied to assess the future tsunami damage and to develop protective objects to protect people and buildings from a future tsunami disaster.

Test #1, Force on the bridge due to soliton



Test #2, Dam break type wave



4. Summaries and future plans

A state-of-art coupled code of computational fluid dynamics and structured dynamics to handle tsunami simulation has been developed. The code was validated by the benchmark tests designed by the Japan Society of Civil Engineers. Future work includes extensive validation as well as applying to practical 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] F. Togashi, R. Lohner, O. A. Soto, M. Beppu, and S. Obayashi: Numerical Simulation of an Object Washout by Floodwater, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp.156-157.

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

課題番号	J16L044
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー
研究期間	2016.4 ～ 2017.3
継続年数	1 年目

しゅう動面における Me-DLC 由来軟質金属層の諸物性と摩擦・摩耗特性に関する研究
Research on the Physical and the Tribological Properties of a Soft Metal Layer Originating
in Me-DLC on Sliding Surface

後藤 実^{††}, 高木 敏行^{††}

伊藤 耕祐^{***}, 三木 寛之^{****}, 伊竹野 貴法^{*****}, 小助川 博之^{**}

*宇部工業高等専門学校機械工学科, **東北大学流体科学研究所

日本大学工学部, *東北大学学際科学フロンティア研究所

*****東北大学大学院工学研究科

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

高周波マグネトロンスパッタ法によって水素非含有 DLC マトリクス中に銀または銅を分散したナノコンポジットコーティング (Me-DLC) を成膜する方法を成膜し, 膜中金属濃度を広範囲に制御する手法を確立し, そのナノ構造とトライボロジー特性のを複合成膜法により成膜した水素含有 DLC マトリクス中に軟質金属を分散した Me-DLC との比較を行い, しゅう動面における Me-DLC 由来軟質金属層の諸物性と摩擦・摩耗特性の関係を明らかにすることで, 機械要素の摩擦損失低減手法を確立し, 省エネルギー効果による温室効果ガス低減と地球環境保全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, 機械的・電気的特性は東北大学の機器を利用する.

2. 研究成果の内容

高周波マグネトロンスパッタ法によって水素非含有 DLC マトリクス中に銀または銅を分散させるために, スパッタ収率の低い炭素ターゲット中央にスパッタ収率の極めて高い銀または銅タブレットを同心円状に配置した同心円複合ターゲット (CCT) を考案した. CCT は, 直径 50 mm の炭素ベースターゲット (焼結グラファイトおよび焼結無定形炭素) 上中央に直径 5 mm から 20 mm の Ag または Cu のタブレットを配置したものを使用した.

各成膜条件において成膜した Ag-DLC および Cu-DLC の金属含有量と硬さの関係を Fig.1 に示す. CCT のタブレット径を 5~20 mm に変化させることで, Ag-DLC 中の Ag 含有量を 6~65 at.% に, Cu-DLC 中の Cu 含有量を 7~75 at.% にそれぞれ変化させ得ることが明らかになった. 膜中の金属濃度の減少に従って膜の硬さが増加し, 金属を含まない DLC の硬さへ近づいていくことがわかる.

RF 出力を 75, 125 および 175W の条件で成膜した Ag-DLC および Cu-DLC のラマン分光分析を行った析結果, RF 出力の変改によって若干の波形形状変化が認められた. DLC 膜の ID/IG 比は膜中の C ネットワーク構造と関係しているため, RF 出力の変化によって DLC マトリクスの構造が変化している可能性があると考えられる. 今後, 詳細な解析が必要である. 膜断面の TEM 観察を行った結果, いずれの膜も DLC マトリクス中に Ag または Cu の

クラスターが分散した構造であり、金属含有量に応じて粒径が 3 nm 以下～20nm 程度に変化することが確認できた。この構造は、複合プロセスによって成膜した Ag-DLC および Cu-DLC と定性的に同一の構造であった。

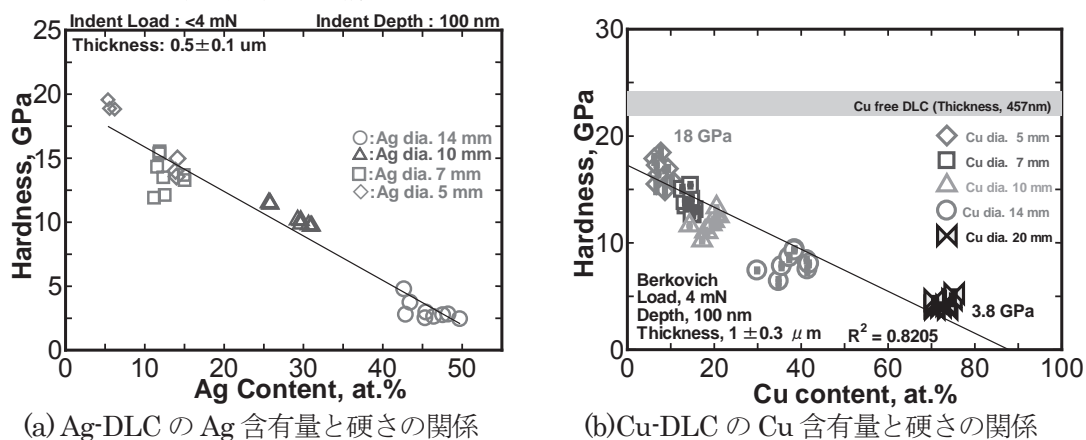


図 1：各種成膜条件で成膜した Ag-DLC と Cu-DLC の金属含有量と硬さの関係

3. 研究目標の達成状況

本研究によって、水素非含有 DLC マトリクス中に広範囲の添加濃度に銀または銅を含有させた Me-DLC の成膜手法を確立し、硬さと金属添加濃度の関係を明らかにした。この知見は次世代炭素ナノコンポジット摺動材料の設計手法の確立に資するものである。

4. まとめと今後の課題

本研究によって同心円複合ターゲットを用いた高周波マグネトロンスパッタ法によって銀または銅を任意の濃度で添加した水素非含有 DLC マトリクスと軟質金属のナノコンポジット膜の成膜手法を確立した。膜中の金属濃度を変化させることで、膜のナノ構造と機械的性質が変化することを確認した。今後、金属添加量をパラメータとした Me-DLC の摩擦・摩耗特性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] Minoru GOTO: PREPARATIONS AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SOFT-METAL / DLC COMPOSITE COATINGS BY RF MAGNETRON SPUTTER USING COMPOSITE TARGETS, *Proceedings of 5th International Conference on Integrity-Reliability-Failure*, Porto, Portugal, (2016), pp. 437-438.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] 小田 稔, 後藤 実: Ag/DLC ナノコンポジット膜の摩擦特性—膜中 Ag 濃度と摩擦係数の関係—, トライボロジー会議 2016 秋 新潟予稿集 E21, (2016), pp. 403-404.
- [3] 縄田 哲寛, 小田 稔, 後藤 実: Cu/DLC ナノコンポジット膜の銅含有量の低下と摩擦・摩耗特性, トライボロジー会議 2016 秋 新潟 E20, (2016), pp. 401-402.
- [4] 丸山 将尚, 後藤 実: RF マグネトロンスパッタ法による DLC 膜の成膜時 Ar 圧力とトライボロジー特性, トライボロジー会議 2016 秋 新潟 E19, (2016), pp. 399-400.

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	J16L048
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

膨張波照射による生体組織への影響

Influence of Biological Tissue by Underwater Expansion Wave Irradiation

橋本 時忠[†], 金丸 拓史^{*}

大谷 清伸^{**††}

^{*}佐賀大学大学院工学系研究科, ^{**}東北大学流体科学研究所

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

医療分野において、膨張波は新たな治療に応用できる可能性を持っているが、膨張波の生体内および水中での挙動に関する報告はほとんどない。さらに、圧力波の生体組織に対する作用は複雑で不明な点が多く、そのメカニズムの解明が望まれている。本研究では、膨張波照射が生体に及ぼす影響について知見を得るために、水中で膨張波照射による模擬組織の破壊、変形などからその影響を明らかにする。さらに圧力波照射が粘弾性を有する生体組織への力学的効果を把握するために、模擬生体内に設置した単一気泡に圧力波を照射した時の気泡挙動を実験的に観察して、粘弾性を考慮した Rayleigh-Plesset 方程式による気泡挙動の数値解析との比較を試みる。

2. 研究成果の内容

最初に膨張波の力学的な効果を知るために強度を変えられる模擬生体カプセルを作成して膨張波を照射した。カプセルの変形、破壊から生体組織への影響について考察を行った。

本研究では膨張波の発生と集束が同時に可能なリフレクターを用いた。上部には水を充填できる領域を設け、その内部にある第一焦点で発生させた衝撃波は境界面で反射して膨張波に変わり、下部の第二焦点で集束する。第二焦点近

傍は生体内部を模擬するための領域を設けてカプセルを挿入した。衝撃波の発生源は高圧放電装置を使用した。本研究では照射エネルギーは約 1.22 mJ と推定される。模擬生体カプセルは、アルギン酸ナトリウムを塩化カルシウム (CaCl₂) 水溶液に滴下して作成した。作成したカプセルの直径は約 2mm で、アルギン酸ナトリウムの着水時間によりカプセルの肉厚を調製した。カプセルの着水時間は 1, 2, 5, 10, 20, 40, 80 秒である。

図 1 に膨張波照射により破壊されたカプセルを示す。着水時間の増加につれてカプセルの膜厚比は増加し、80 秒間着水すると膜厚比はおおよそ 80% に達する。それに従いカプセルが破壊に至るまでの膨張波照射回数も増加したが、カプセルは亀裂を伴って破壊された。用いた膨張波は低エネルギーであるが、集束することで限局された領域にある模擬生体を破壊させることができた。

次に、模擬生体として粘弾性有する PVA ハイドロゲル内に単一気泡を設置して、衝撃波照射を行い、実験的に計測された気泡挙動が粘弾性を考慮した Rayleigh-Plesset 方程式による数

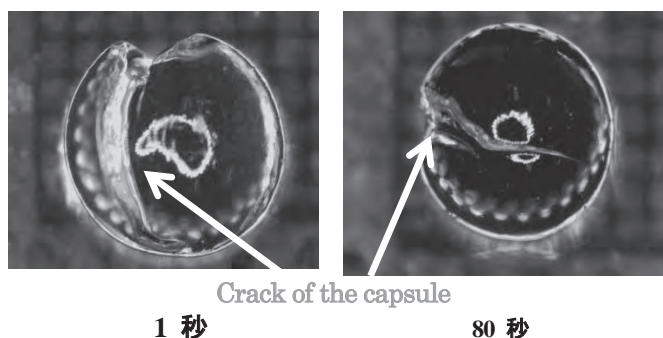
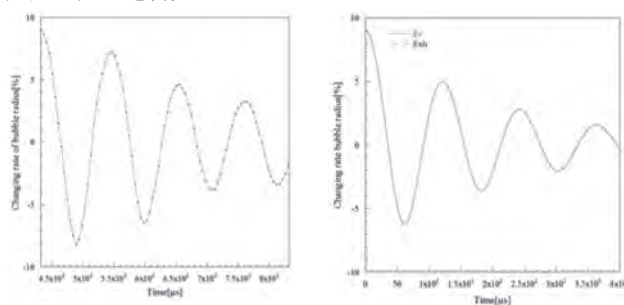


図 1：膨張波照射により破壊された模擬生体カプセル

値解析と比較された。PVA ハイドロゲルは生体組織の音響特性に近く、その配合により粘弾性を制御できる。ここでは濃度 5% の PVA ハイドロゲルを用いた。

衝撃波照射時の PVA ハイドロゲル内に設置した気泡挙動を観察した。初期気泡半径は 0.40 mm と 0.24 mm の 2 種類である。可視化はシャドウグラフ法により高速度カメラを用いた。数値解析では単一気泡の挙動について粘弾性を考慮した Rayleigh-Plesset 方程式によって数値解析を試みた。方程式中の弾性項 E に粘弾性体の構成式として Voigt モデルと neo-Hookean モデルの 2 種類を用いた。



(a) 実験結果 (b) 数値解析

図 2：衝撃波照射時の気泡半径の変化

図 2 に衝撃波照射後の初期半径

0.40 mm の時間変化を示す。(a)は実験結果および(b)は数値計算結果を示す。ともに気泡が最大になった時間からの変化を示している。実験結果から衝撃波通過後、気泡の振幅は大きくなり、徐々に減衰した。数値解析結果から剛性率は気泡振動の周期に影響を及ぼし、粘性率は主に気泡振動の振幅に影響を与える。実験結果と解析結果を比較すると解析結果の方が長くなった。

3. 研究目標の達成状況

作成したカプセルの膜厚によって膨張波照射回数は変化するが破壊することが出来た。比較的低いエネルギー照射でこのような結果が得られたことは重要な結果であり当初の目標を達成したといえる。粘弾性体内に設置した単一気泡への衝撃波照射による気泡挙動の実験結果と数値解析の比較では、圧力波の生体への正確な力学的効果を予測できる方法として期待される。

4. まとめと今後の課題

本研究では圧力波が生体に与える影響について検討するため 2 種類の実験を実施した。模擬生体カプセルの変形と破壊実験では、比較的低いエネルギーの膨張波でも集中的に作用させることで効果を与えられる可能性を示した。さらに、粘弾性体内に単一気泡を設置した気泡挙動の観察実験では、Rayleigh-Plesset 方程式による数値解析との比較を行った。気泡運動の周期は実験結果における周期のほうが短くなる傾向があった。また、実験結果と解析結果は定性的に一致しているため、今後、圧力波が生体に与える影響を解析によって明らかにできる可能性がある。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議、解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] T. Kanemaru, T. Hashimoto and K. Ohtani: Fundamental Study on Biological Influence by Underwater Expansion Wave Irradiation, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2016), pp. 94-95.

[2] 竹下海渡, 堂之下雄也, 金丸拓史, 住隆博, 橋本時忠, 瀬戸口俊明: 膨張波と気泡の干渉現象の観察, 日本機械学会九州支部第 70 期総会講演論文集, 佐賀 (2017), No. 178-1, pp. 59-60.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J16L052
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3 年目

自然環境中の大規模非定常高速流体現象の定量的可視化計測法
Quantitative Visualization of Unsteady High-speed Fluid Phenomena in Nature

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

1. 研究目的

非定常高速流体現象研究では、光学的流れの可視化計測法は、研究手法として確立したものであり、定量・定性を問わず、様々な可視化計測法が提案され、実用化されてきた。一方、実験室を一步出た自然環境下では、流れ場の状態量を定量的に比較的容易に取得できる可視化計測法は実用化されていない。これは、実験室内と比較し、自然環境下では、制御不能な外的擾乱が多く、実験室内と同等の光学的に静粛な環境を担保できないことが大きな理由である。衝撃波現象など非定常高速流体現象を 3 次元かつ定量的に可視化計測が提案できれば、航空宇宙機開発など応用空気力学分野にとって有益な情報をもたらすことが可能である。たとえば、実機飛行条件での機体まわりの流れ場の直接計測が可能となる。これは、実飛行状態での翼面での離現象、機体と搭載物間での衝撃波干渉、大気中を広範囲に瞬時に伝播するソニックブームの地表付近の挙動の直接計測が可能となり、今まで培われてきた数値解析法や多点計測法と併用することで、測定精度・確度の向上、ならび流れ場全体の把握が容易になる。

本年度の研究では、超音速飛しょう体周囲の複雑で非定常な流れ場を利用して、視野中心から辺縁部に至る計測精度を評価した。自然環境下では BOS 計測に非テレセントリック光学系（計測に平行光束を用いない光学系）の利用が適用範囲も広く、利便性も高い。一方、BOS では、注目現象による屈折率分布変化でおきる背景移動量が計測対象であるため、非テレセントリック光学系では、背景移動量が現象を見込む角度に影響を受ける。高精度の定量計測の実現には、視野角を関数とした評価関数の取得が不可欠である。

2. 研究成果の内容

テレセントリック光学系および非テレセントリック光学系の配置において、超音速飛しょう体後流発達様態の BOS 計測を行った。飛しょう体は、直径 30 mm のナイロン製球体で、高圧ガス銃により Mach 2 まで加速され、観測部に到達する。テレセントリック光学系の集光系には大型凹面鏡（直径 1.0 m, 焦点距離 8 m）を用いた。撮影には高速度カメラを利用し、フレーム間隔 10 μ s, 露光時間 400 ns で撮影した。実験では平行光束を使用するテレセントリック光学系で得られたズレ量と非テレセントリック光学系の誤差を評価できた。飛しょう体の前方には弓形衝撃波が明りょうに確認でき、また、後方での超音速流が後流と干渉し、再付着衝撃波の発生が従来の可視化計測法と同様に確認できた。さらに、視野中心と辺縁部における背景移動量比較したところ、非テレセントリック光学系による視野中心部との移動量計測誤差は、光学系の幾何学的配置に基づく視差広がり角に基づく予測値と同等であることがわかった。

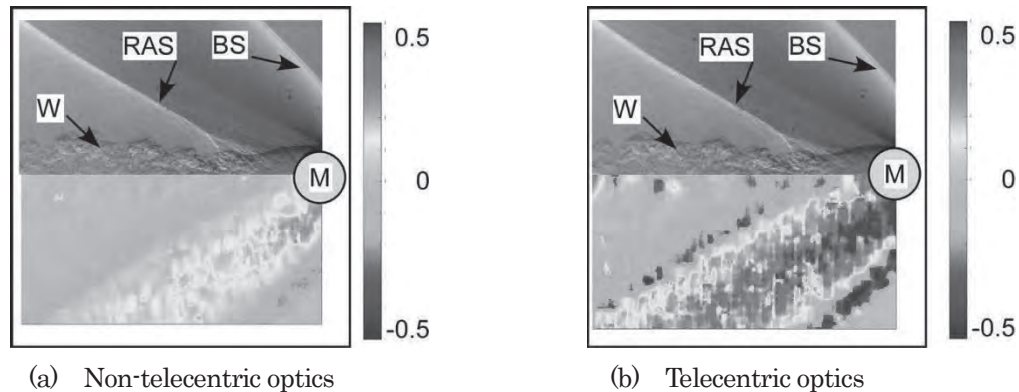


図 1. 超音速飛しょう体周りの非定常流れ場の BOS 法による可視化画像: 上) 従来型のシュリーレン法, 下) BOS 法, M, 飛しょう体; BS, 弓形衝撃波; RAS, 再付着衝撃波; W, 後流

3. 研究目標の達成状況

本研究の目標は, 非テレセントリック光学系による背景型シュリーレン法における視野辺縁部での計測誤差を評価するものである. 超音速飛しょう体周囲の非定常流れ場をテレセントリック光学系と非テレセントリック光学系双方で計測し, その結果から視野辺縁部での計測精度においてテレセントリック光学系が優れていることが定性的に評価できた. また, 非テレセントリック光学系を利用した際の計測誤差は, 報告者が提案している誤補正法による範囲に収まることが確認できた.

4. まとめと今後の課題

測定部に平行光束を形成するテレセントリック光学系に対する非テレセントリック光学系を利用した背景型シュリーレン法 (BOS) における視野辺縁部での誤差が, 幾何学的な関係から導かれる予測式で評価可能であることを実験で示した. このことは, 自然環境下での大規模流体现象の定量的可視化計測に BOS を適用した際にも同様と考える. 今後の課題として, 背景照射光の拡散を抑える光学系に変更することで, 背景面での一様性を向上させ, 定量的に精度の優位性を評価する. さらに, 背景模様の空間周波数と解析精度の関連を系統的な評価を行う.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] T. Mizukaki, K. Otani, and S. Obayashi: Dependence of Angle of Sight on Precision of Background-Oriented Schlieren, *Proceedings of Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2016), p. 41.

* [2] 水書稔治, 小田切太郎, 大谷清伸, 大林茂: Background-Oriented Schlieren 法による超音速飛しょう体周りの流れ場可視化, 可視化情報全国講演会 (日立 2016), B203 (2016).

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	J16L055
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3年目

バリスティックレンジへ適用可能な感圧塗料技術の開発 Development of Pressure-Sensitive Paint Techniques for Ballistic Range Experiments

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

1. 研究目的

本研究では、従来までは影写真法やシュリーレン法など、いわゆる「定性的」な方法により行われてきた超音速飛翔体周りに生じる非定常現象に関する実験的研究に対し、新たに「定量的」な非定常計測手法を提供することを最終的な目的としている。その目的の下、感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint, PSP) 技術に着目し、本技術を飛翔体発射装置 (バリスティックレンジ) を用いた実験に適用可能とすることを目指している。しかしながら、本目的の達成のためには、飛翔体に適用する時間応答に優れた感圧塗料を加速管から射出されフリーフライト状態となるまでの間可能な限り接触の少ない形で保持し続ける必要がある。また、飛翔体に適用する感圧塗料そのものについても、時間応答性に優れてかつ計測に必要十分となる発光強度を有するものが必要となる。さらには、移動体上の感圧塗料計測を行う上でのいくつかの技術的な課題もあり、目的達成のためにはそれらの解決が不可欠である。

そこで本研究では、それぞれの技術課題について、その解決を目指した基礎研究を実施する。飛翔体の射出法の解決や感圧塗料の開発、計測法の確立などの個別課題について、それぞれ取り組むものとする。また、これらを解消することにより、最終的には超音速飛翔体周りに生じる非定常現象に起因した非定常圧力場が時系列的及び面情報で取得できることを目指し、飛翔体物理の解明に資する情報の取得を可能とすることを目指す。

2. 研究成果の内容

研究目的の際に述べた課題のうち、特に飛翔体の射出法について検討を行った。可能な限り飛翔体を理想的な形に近い状態で保持し、かつ感圧塗料を適用しやすい状態で飛翔体を作成可能とするために、飛翔体形状及びそれを加速管内で保持するためのサポの構造の最適化を行った。

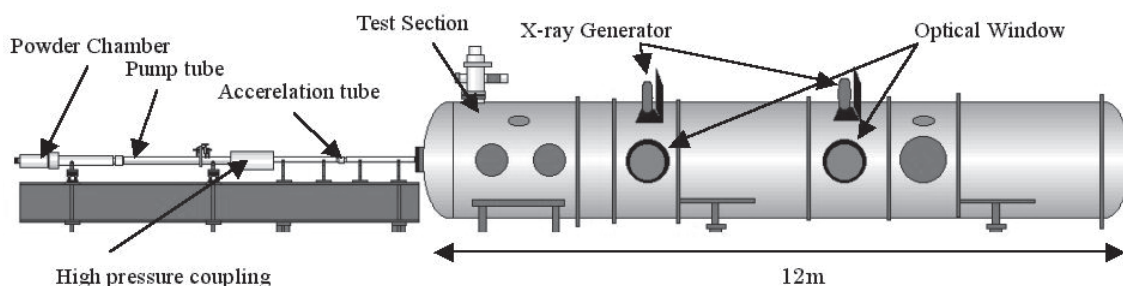


図1：バリスティックレンジ (東北大学 流体科学研究所)

図1に、本研究で用いたバリスティックレンジ（東北大学 流体科学研究所）を示す。本研究では、バリスティックレンジの作動形態を $\Phi 51 \text{ mm}$ のガス銃モードとして用いた。また、飛翔体としては直径 15 mm のシングルコーン形状及び円柱形状の2つを採用した。飛翔体の素材はアルミニウムである。また、本研究では、飛翔体の自由飛行距離が極めて長いため、その飛行姿勢が観測窓の段階で正常であるかを確認する必要があった。そこで、飛翔体の撮像系として影写真法と直接撮影の同時計測を行い、飛翔体周りの現象及び飛翔体の飛行姿勢の同時把握を目指した。飛翔体射出速度はマズル出口速度で概ね 440 m/s 及び 630 m/s であり、それぞれの速度でそれぞれの飛翔体形状における飛翔体周りの現象の可視化及び飛行姿勢の確認を行った。

図2に、マズル出口速度 630 m/s におけるフリーフライト過程のシングルコーン飛翔体の影写真－直接撮影の同時可視化結果例を示す。図より、新型サボを用いた飛行体射出を行った場合、飛行体は長距離の自由飛行後でもその姿勢を維持した。また、円柱飛行体を用いた射出実験においても飛行体は姿勢を維持し、新型サボを用いた場合は飛翔体を安定して射出可能であることがわかった。



図2：フリーフライト過程のシングルコーン飛翔体の影写真＋直接撮影の同時計測画像

3. 研究目標の達成状況

本研究期間においては、バリスティックレンジを用いた飛翔体射出実験において、感圧塗料を適用した状態における飛翔体射出実験の実現に向けた新型サボの性能実証及び飛翔体の姿勢評価を行い、計測に必要となる飛行体射出性能が実現されたことを実証した。そのため、概ね目標とした実証段階は達成できたと考えている。

4. まとめと今後の課題

感圧塗料を適用した飛翔体を射出するための新型サボの評価及び飛翔体姿勢の確認を行い、良好な結果を得た。今後については、実際のフリーフライト時における感圧塗料計測を実施する際の計測系の構成、及び、感圧塗料自体の性能向上に向けた更なる改良が課題となる。これらに対する検討を進め、今後飛翔体に対する感圧塗料適用及びフリーフライト状態における飛翔体の可視化実験を実施する。現在、飛翔体に適用する感圧塗料部分については、サブマイクロ秒の時間応答性を有する「超高速応答型感圧塗料」をベースとして開発を進めており、時間応答性を損なわない形で優れた特性を有する塗料の開発を目指す。

5. 研究成果

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）
なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
なし
- 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）
なし

Project code	J16L058
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year(progressing)

P-Selectin Printing on PDMS Substrates

Atsushi Shirai*†, Jean-Paul Rieu**††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

** Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, ILM

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Neutrophils are known to roll on endothelium of postcapillary venules as the early event in their immune response. We focus correlative effects of contact with erythrocytes, surface topography of endothelial surface and localized expression of selectins to the rolling characteristics. It is known that P-selectin expresses along border of the endothelial cells, which binds with PSGL-1 on the neutrophils to mediate the rolling. In this study, a methodology to coat hollow part of the bumpy PDMS substrate which mimics the endothelial cell layer with P-selectin was developed to mimic this localized P-selectin expression.

2. Details of program implement

Figure 1 shows a microscopic photograph of the PDMS substrate to be coated with P-selectin. The substrate has two patterns on it; one is short hexagonal poles with a height of 3.5 μm arranged in zigzag with a clearance of 12 μm , and the other is stripes with a clearance of 12 μm and a depth of 3.5 μm .

A flat PDMS plate is immersed in 0.4% BSA (Wako) diluted in PBS for 1 hour. The plate then is dried in a clean air to immobilize the BSA. The PDMS substrate which has the pattern is put on the plate immediately after exposure to air plasma for 120 s to make its surface hydrophilic, and hold 5 minutes being mildly pressed. After peeling off the substrate, it is then immersed in 1 $\mu\text{g}/\text{ml}$ P-selectin solution in pure water (Recombinant Human P-selectin; R&D Systems) for 3 hours. After the immersion, the substrate is rinsed with pure water. Figure 2 shows a fluorescent microscopic image of the P-selectin-coated substrate. We see that the hollow part of the substrate is bright by Alexa Fluor 555 (Abcam), where P-selectin exists.

3. Achievements

It is expected that we can confirm appropriate selective coating of P-selectin along the hollow part of the substrate without staining to introduce this substrate to the rolling experiment. Then, we substituted FITC-BSA for BSA. In this case, it was found that fluorescent part of Alexa Fluor 555 and FITC was the same, implying that the antibodies potentially bind with the FITC-BSA. Therefore, we have to find another methodology to stain only P-selectin.

We also examined to coat P-selectin whole the surface of the substrate at first and peel off the P-selectin at the top of the pattern later. Since it was found that P-selectin is more adhesive to glass than to PDMS, P-selectin at the top of the pattern was peeled off by contacting the substrate with a flat glass plate for several

times. We have expected to indirectly check the quality of the selective coating by staining transposed P-selectin on the glass plate, but the quality of the substrate was poor and thus this methodology admits of some improvement.

4. Summaries and future plans

Selective coating of P-selectin on hollow part of a bumpy PDMS substrate was developed in this study. A remaining issue is to confirm appropriate coating without staining before introducing the substrate for the neutrophil rolling experiment. In the next step, the rolling experiment is conducted on a bumpy PDMS substrate whole on which is coated with P-selectin.

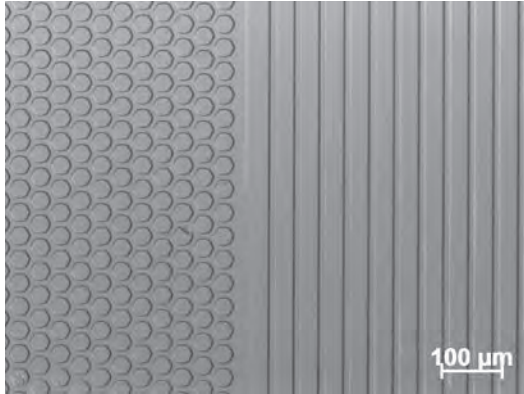


Figure 1: Microscopic image of a PDMS substrate introduced in this study.

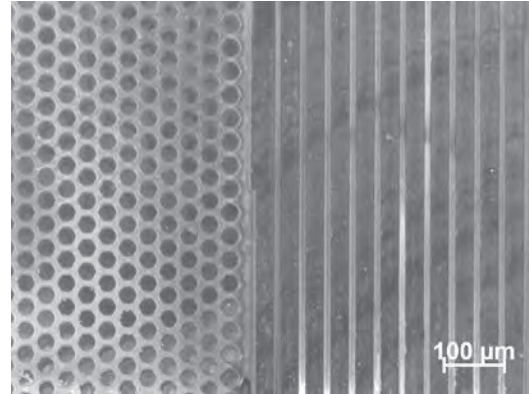


Figure 2: Fluorescent microscopic image of P-selectin on a PDMS substrate.

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. Arai, A. Shirai, J.-P. Rieu: Fundamental study on coating PDMS substrate by P-selectin and BSA, *Proceedings of the 29th Bioengineering Conference 2016 Annual Meeting of BED/JSME*, Nagoya, January, (2017), #1C34. (in Japanese).
- [2] A. Shirai, J.-P. Rieu, R. Sugimoto, D. Yoshino: Influence of pressing force on rolling characteristics of HL-60 cell line on a bumpy substrate mimicking the endothelium topography, *Proceedings of the 16th International Conference on Biomedical Engineering (ICBME2016)*, Singapore (2016), #E2-0006.
- [3] A. Shirai, J.-P. Rieu, R. Sugimoto, D. Yoshino: Rolling characteristics of neutrophils on PDMS surface mimicking the endothelial topography: PTV analysis of the cells motion on regular hexagonal pattern, *Proceedings of the 13th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2016)*, Sendai (2016), pp. 286-287.
- [4] R. Sugimoto, A. Shirai, D. Yoshino, J.-P. Rieu: Correlative effect of normal force and P-selectin concentration on rolling behavior of neutrophils, *Proceedings of the 13th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2016)*, Sendai (2016), pp. 704-705.
- [5] A. Shirai, J.-P. Rieu, R. Sugimoto, D. Yoshino: Rolling characteristics of HL-60 cells on PDMS substrate mimicking the endothelial topography, *Proceedings of the Annual Meeting of JSFM 2016*, Nagoya (2016), #163.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J16L059
区分	一般共同研究
課題分野	環境・エネルギー
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3年目

歪み Ge-on-Insulator 基板の作製とデバイス応用
Fabrication of Strained Ge-on-Insulator and Device Application

澤野 憲太郎*†, 寒川 誠二**††

*東京都市大学総合研究所, **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

近年, Si-CMOS はスケーリング限界をむかえつつあり, Si に代わる高移動度チャネルとしてゲルマニウム(Ge)が注目されている. Ge はもともと Si の数倍のバルク移動度を有するが, 高度結晶成長技術によって Ge に結晶歪みを導入することで, さらなる移動度の増大が実現可能である. 本研究では, Si 基板上に, 高品質 Ge-on-Insulator (GOI) 構造を作製し, それを使った高移動度 Ge チャネル MOS デバイスの開発を行う. 特に, 高移動度実現に最重要となる Ge 上のゲート絶縁膜について, 本研究では, 中性粒子ビーム酸化 (NBO) 法を利用した, ダメージフリーの Ge 酸化膜形成を目指している. Ge エピ膜は歪みを有しているが, NBO 法が低温での酸化が可能であるため, Ge チャネルの歪みを維持 (歪み緩和を抑制) することが期待でき, 超高移動度を有する歪み GOI チャネル MOS デバイスの実現を目指す.

2. 研究成果の内容

今年度の研究では, NBO 酸化の前段階として, Ge エピ膜表面上への直接 ALD による $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$ 構造形成について検討した. 分子線エピタキシー (MBE) によりエピタキシャル成長させた Ge 上に, 基板を大気暴露せず, 直接 ALD 法を用いて Al_2O_3 を堆積することで, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$ 構造を作製し, 界面の化学結合状態並びにその電気的特性を解析した. その結果, 大気から搬入した $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$ 構造と比較して界面特性の向上が確認された.

試料作製プロセスを Fig. 1 に示す. p-Ge (100) 基板に NH_3 水溶液洗浄, 希 HF 水溶液洗浄を施した後, MBE チャンバーに導入し, Ge 膜 50nm を 300°C でエピタキシャル成長させた. その後, 試料 A については, MBE から ALD へ超高真空中を搬送した. 一方試料 B は, 基板を一端 MBE チャンバーから取り出し, 大気に晒した後, 上記と同様の化学洗浄を施し, ALD チャンバーに導入した. 両試料とも, トリメチルアルミニウム (TMA) と H_2O による ALD により, 基板温度 200°C で Al_2O_3 を堆積させた. その後, Al を真空蒸着法で堆積させ Al/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$ MOS キャパシタを作製した. これら 2 つの試料に対して X 線光電子分光法 (XPS:SSX-100) 及び硬 X 線光電子分光法 (SPring-8) を用いて界面の化学結合状態を評価した.

XPS スペクトルの解析より, エピタキシャル成長後大気暴露した試料 B において, 試料 A と比較して, GeO_x のピークが大きくなっていることが分かった. これは, 大気暴露によってより多くの自然酸化膜が形成されていることを示唆している. 表面敏感である $\text{TOA}=35^\circ$ で測定した結果, 試料 A に対する試料 B の GeO_2 の強度比が大きくなっていることが確認され, これは $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$ 界面近傍に GeO_2 が多く存在していることを示している. また, 硬 X 線光電子分光法によって $\text{Ge}2p$ ピークを観察したところ, 同様に試料 B においてより多くの GeO_x の存在

を示す結果が得られた。以上のことより、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$ 界面に GeO_x , GeO_2 が存在するものの、Ge エピ成長後に真空搬送し ALD を行うことでそれらは抑制されることが示された。さらに、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$ 界面付近に大気暴露による極薄の GeO_2 膜が存在していることが分かった。また、試料 A には自然酸化膜が無く、直接 ALD による GeO_2 層は形成されにくいことを示唆している。このことより、Ge 表面に直接 ALD することによって形成される GeO_2 層は十分に薄いと考えられる。

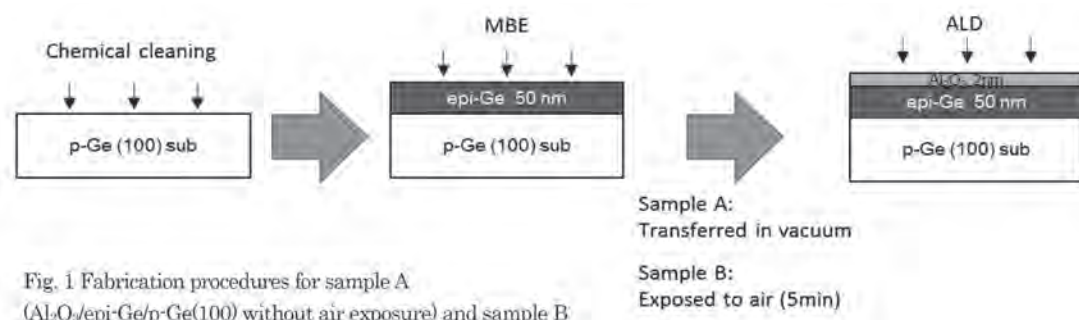


Fig. 1 Fabrication procedures for sample A ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{epi-Ge}/\text{p-Ge}(100)$ without air exposure) and sample B

3. 研究目標の達成状況

今回、NBO 酸化の前に、Ge と絶縁膜の高品質界面を形成することを目的として、MBE エピタキシャル成長から真空搬送によって ALD を行うことで、界面特性向上が確認され、今後 NBO につなげられる結果が得られたといえる。

4. まとめと今後の課題

Ge 基板上に MBE でエピタキシャル Ge を成長させた後、真空搬送によりこのエピ Ge 上に直接 ALD 法を用いて Al_2O_3 を堆積することで $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ge}$ 構造を作製した。XPS による界面での化学結合状態解析、並びに CV による電気特性評価より、大気暴露をした試料に比べて、真空搬送によって界面特性が向上することを示した。これは、エピ成長 Ge に直接 ALD を行うことで、 GeO_x 形成が抑制されることを示唆している。

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

なし

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16L061
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	2016.4～2017.3
継続年数	3年目

中性粒子ビームプロセスによる高性能高移動度 MOS トランジスタに関する研究
Study on the High-Performance and High-Mobility MOS Transistor by the Neutral Beam Process

遠藤 和彦^{*†}, 寒川 誠二^{**††}
水林 亘^{*}, 野田 周一^{**}, 尾崎 卓也^{**}
^{*}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

次世代高移動度材料として注目されているゲルマニウムにチャネル材料を進展させ、ニュートラルビームプロセスを用いた、省電力ゲルマニウムトランジスタの試作とその省エネルギー性能向上を目標とする。

2. 研究成果の内容

低ダメージ中性粒子ビームを用いたゲルマニウムのエッチング、酸化、および界面特性の向上に注力し、垂直加工条件の確立と良好な界面準位密度を実現した。特に昨年度は、ゲルマニウムのフィン型立体トランジスタ試作に向けたプロセスフローの確立と、エッチング条件の最適化を行い、フィン型立体トランジスタ試作に対するプロセスの整備を終えた。

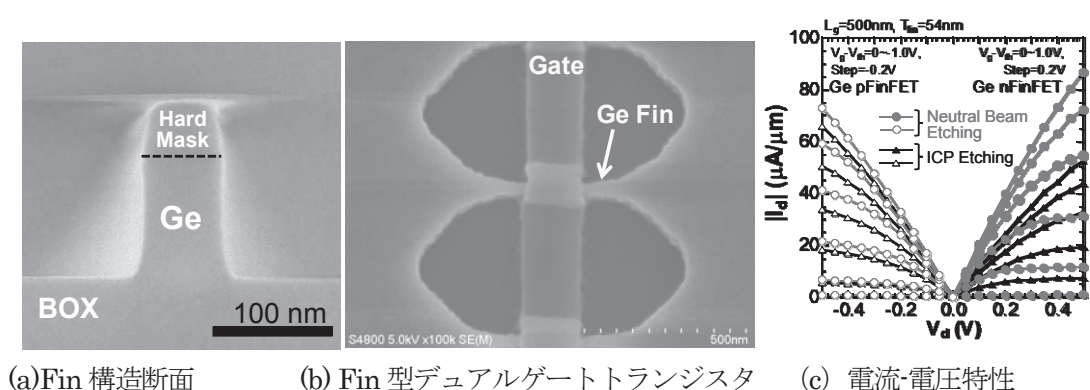


図 1：ゲルマニウムトランジスタ試作結果

3. 研究目標の達成状況

ゲルマニウムの低ダメージ中性粒子ビーム加工により，良質なゲルマニウムチャネルが形成できることが分かった．フィン型立体トランジスタを作製したところ，移動度向上によるデバイス特性の向上を実現した．シリコントランジスタに比べて **On** 電流が高く，シリコントランジスタを凌駕する省エネルギー素子を実現した．以上より，研究目標をほぼ達成した．

4. まとめと今後の課題

無損傷ニュートラルビーム加工により，ゲルマニウムトランジスタの性能向上を実証した．今後は信頼性向上に向けて更なる検討を進める予定である．

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）

*[1] W. Mizubayashi, S. Noda, Y. Ishikawa, T. Nishi, A. Kikuchi, H. Ota, P. H. Su, Y. Li, S. Samukawa, K. Endo: Impacts of plasma-induced damage due to UV light irradiation during etching on Ge fin fabrication and device performance of Ge fin field-effect transistors, *Appl. Phys. Express*, Vol.10, No.2, (2017), 026501.

[2] W. Mizubayashi, H. Ota, S. Migita, Y. Morita, and K. Endo: Lowering of Effective Work Function Induced by Metal Carbide/HfO₂ Interface Dipole for Advanced CMOS, *Proceedings of the 16th International Conference on Nanotechnology*, Sendai, Japan, (2016), pp. 123-126.

[3] En-Tzu Lee, Shuichi Noda, Wataru Mizubayashi, Kazuhiko Endo, Seiji Samukawa: Defect-Free Germanium Etching for 3D Fin MOSFET Using Neutral Beam Etching, *Proceedings of the 16th International Conference on Nanotechnology*, Sendai, Japan, (2016), pp. 816-818.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[4] 野田周一，水林亘，菊池亜紀応，遠藤和彦，寒川誠二，中性粒子ビームエッチングによる Ge Fin 構造の作製，第 64 回応用物理学会春季学術講演会，17a-313-9.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞） IEEE Nano 2016 Best Paper Award, "Defect-Free Germanium Etching for 3D Fin MOSFET Using Neutral Beam Etching", En-Tzu Lee, Shuichi Noda, Wataru Mizubayashi, Kazuhiko Endo, Seiji Samukawa, 2016/8, IEEE Nano Organizing Committee.

（マスコミ発表）なし

課題番号	J16L064
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	1 年目

生体内光熱伝播制御による温熱治療の研究
Study on Hyperthermia by Radiation and Heat Transfer Control in Biological Tissue

圓山 重直^{*†}, Victoria Timchenko^{**††}, 小玉 哲也^{***},
岡部 孝裕^{****}, 小宮 敦樹^{*}, 岡島 淳之介^{*}

^{*}東北大学流体科学研究所

^{**}School of Mechanical and Manufacturing Engineering, UNSW

^{***}東北大学医工学研究科, ^{****}弘前大学理工学部

[†]申請者, ^{††}所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、生体内のふく射伝熱と生体伝熱の観点から温度制御することを試み、それを利用し、ガン治療を目指した温熱治療の研究を行う。また、合わせて皮膚表層ガンである悪性黒色腫の高精度温度計測および熱物性計測による診断方法の検討も合わせて行う。

2. 研究成果の内容

高精度温度プローブを用いた有効熱伝導率測定によって、悪性黒色腫の定量的診断が可能か検証するための数値計算を行った。図1は二次元軸対称数値計算モデルであり、サーミスタが皮膚表面に接触していることを表している。計算では、悪性黒色腫の定量的な診断の可能性を検討するため、熱伝導率計測のためのサーミスタの加熱時間と悪性黒色腫の体積を変化させ、解析した。

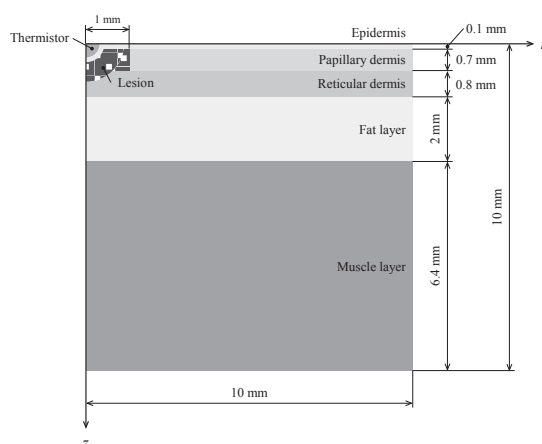


図1 悪性黒色腫および皮膚層の二次元軸対称生体伝熱モデル。

図2に異なる加熱時間を用いた場合の悪性黒色腫体積に対する有効熱伝導率の変化を示す。加熱時間を長くすることで、熱の浸透が深くなり、悪性黒色腫の体積を推定できる可能性が示唆された。悪性黒色腫の体積は、進行度に対応しており、高精度な温度計測・熱伝導率計測が診断の一助になる可能性が解析より示された。

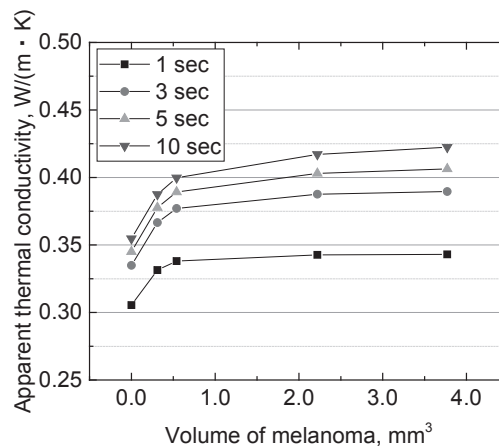


図2 異なる加熱時間を用いた場合の悪性黒色腫体積に対する有効熱伝導率の変化

3. 研究目標の達成状況

本研究では、高精度温度プローブを用いた非侵襲熱物性測定による悪性黒色腫の定量的診断の実現可能性を検討した。熱伝導率計測のための加熱時間を長くすることで、悪性黒色腫の進行度によって有効熱伝導率に差が生じることが明らかになった。本プローブを用いた悪性黒色腫の診断は、困難とされてきた初期段階の診断が実現できる可能性を示した。

4. まとめと今後の課題

ガンの治療と診断のための生体組織の局所的な加熱手法を、伝熱現象の定量評価により提案した。今後は、本診断手法を臨床的に確認し、また治療法においてはふく射伝熱の観点から効果的な加熱手法を検討する。

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] T. Okabe, J. Okajima, T. Fujimura, A. Komiya, S. Aiba and S. Maruyama: Investigation of Effects of Skin Structure and Temperature Distribution in Body on Non-invasive Measurement of Effective Thermal Conductivity of Human Skin, *Proc. Int. Forum Heat Trans.*, Sendai, (2016), pp. IFHT2016-1910 (6 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] T. Okabe, J. Okajima, T. Fujimura, A. Komiya, S. Aiba and S. Maruyama: Effect of Thermal Penetration Depth on Diagnosis of Skin Cancer by Thermophysical Property Measurement, *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, (2016), pp. 350-351.
- [3] T. Okabe, J. Okajima, T. Fujimura, A. Komiya, S. Aiba and S. Maruyama: Precise and Non-invasive Measurement of Effective Thermal Conductivity of Human Skin by Thermistor Probe utilizing Guard Heater, *Proceedings of The 53rd National Heat Transfer Symposium*, (2016), pp. G214 (6 pages).

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J16L070
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	2016.4～2017.3
継続年数	3年目

腸骨内の骨髓流れの数値流体モデルの構築 Constructing CFD Model of Marrow Flow in an Ilium

中山 敏男^{*†}, 太田 信^{**††}

^{*}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

白血病の有力な治療方法の一つは骨髓移植である。骨髓移植とは健康なドナーの腸骨内の骨髓中に存在する造血幹細胞を穿刺針により採取，その造血幹細胞を白血病の患者の静脈内に注入する（移植）する治療法である。骨髓採取では1回の穿刺における骨髓液の吸引量に制限がある。そのため，吸引された骨髓液に含まれる造血幹細胞の数が少なく，必要な量の造血幹細胞を得ることができない。現段階ではドナーに50回から100回の穿刺が行うことで，必要な造血幹細胞を得ている。この穿刺回数はドナーに大きな肉体的・精神的負担となり，問題である。そこで，本研究では骨髓採取時の穿刺回数を減らす方法を見いだすために，骨髓採取用の針（穿刺針）周りの骨髓の流れについての知見を得ることを目的とする。

2. 研究成果の内容

2015年度はブタ腸骨内の骨髓流れの数値モデル構築のための浸透率の測定を行った。本年度はブタ腸骨（海綿骨）の3次元形状の再構築と数値流体力学解析を実施した。

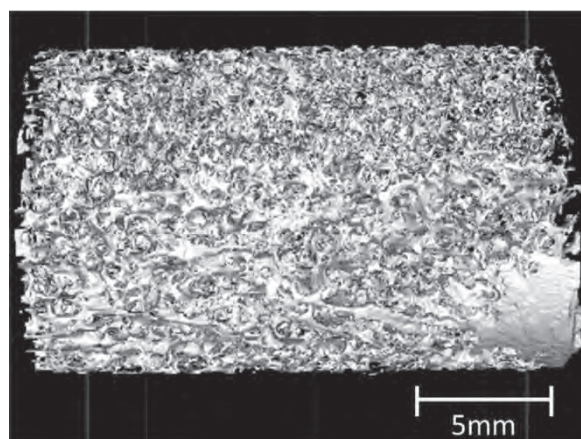


図1：再構築された海綿骨形状

3 次元形状再構築

ブタ腸骨（海綿骨）の3次元形状再構築にあたってはMicro-CT（コムスキャンテクノ社製，ScanXmate-D180RSS 270）を用いた。Micro-CTではブタ腸骨を38.5[μm/pixel]の解像度で撮影を行い，複数枚のスライス画像を出力した。このスライス画像から3次元形状を再

構築した（図1）．その後，CAD ソフトウェアを用いて，腸骨内の海綿骨のみを $2 \times 2 \times 3$ [mm³] の領域で切り出し，数値流体力学解析用の形状を作成した．

数値流体力学解析

再構築した 3 次元形状に対して $2.5 \times 2.5 \times 3.5$ [mm³] の直方体領域を設定し，これを計算領域とした．この計算領域に対して，メッシュジェネレーター（Ansys 社製，ICEM CFD）を用いてメッシュを作成し，商用ソルバ（Ansys 社製，Fluent）を用いた．支配方程式は非圧縮のナビエストーク方程式と連続の式となる．境界条件として壁面はすべりなし，入口端と出口端には圧力境界条件を設定，圧力差は穿刺針で吸引するときの圧力が 7500 [Pa]であるので，この値を採用した．

3. 研究目標の達成状況

「予想される成果」は設定した目標を達成することができた．数値流体力学解析の結果を図2に示す．この図2は流れを流線，髄液の流れの速度をカラーで示した．海綿骨内の髄液の流れを示すことができるようになった．

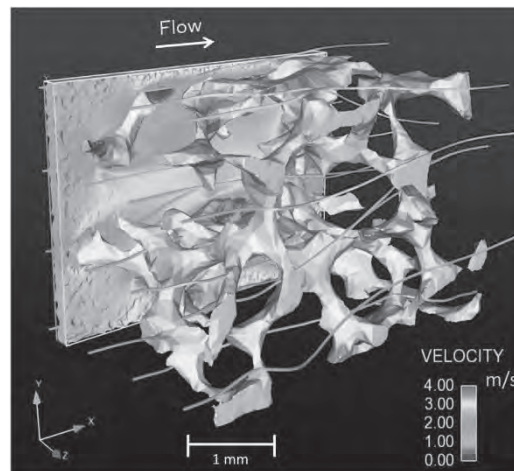


図2：海綿骨内の髄液の流れと流線図

4. まとめと今後の課題

穿刺針周りの骨髄流れに関する知見を得るために数値流体力学解析が実施できるシステムを開発した．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Makoto Ohta, Wataru Sakuma, Toshio Nakayama, Hitomi Anzai, Makoto Ito, Katsuyuki Sado, Shuji Nakamura: *International Mechanical Engineering Congress & Exposition 2016*, Phoenix, AZ, USA, (2016).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

なし

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J16L074
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	3rd year

Development of a Smart Material with Cellulose

Hidemasa Takana*, Fredric Lundell**††

Makoto Ohta*†, Tetsuya Uchimoto*

Hiroyuki Kosukegawa*, Go Yamamoto

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**KTH, Sweden

**Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

We will develop a new smart material or a methodology for mixture with cellulose and polymer or by electrostatic flow control.

2. Details of program implement

In recent years, cellulose nanofibril (CNF) extracted from woods has gained great attention as a novel biomass material. CNF, an aggregate of 30-40 cellulose molecules, is a micro fibril with a width of 3-4 nm, a length of 2-3 μm and a high degree of crystallinity. CNF holds a considerable potential to be applied to innovative composite materials due to its outstanding properties such as low density, high strength and low thermal expansion. In order to utilize these properties effectively, the fibril alignment inside the material must be controlled to be parallel [1]. However, few methods for controlling the fibril alignment have been studied and developed. The fibril alignment still needs to be improved for practical applications.

In this study, aiming at innovative cellulose material synthesis, a method for controlling cellulose micro fibril alignment by AC electric field has been proposed. Characteristics of the fibril alignment under the electric field have been analyzed through visualization and qualitative evaluation by optical measurement.

In another theme, we provided material property data for acrylic composite for bone biomodel. Along the improvement of prosthesis, drilling bone screws is becoming a more and more important skill for doctors. Dental implant is one of cases in a field of orthodontics. Bone biomodel provides an education system for younger generation of medical doctors and the evaluation of medical devices for implants. Specimens were prepared from acrylic dental resin and various additives such as CNF (cellulose nano fiber), CF (cellulose fiber) and wood powder. Friction torque measurement was carried out to investigate mechanical behaviors under drilling.

3. Achievements

Expected result

4. Summaries and future plans

We performed successfully synthesis of CNF. We will look for an application with this material.

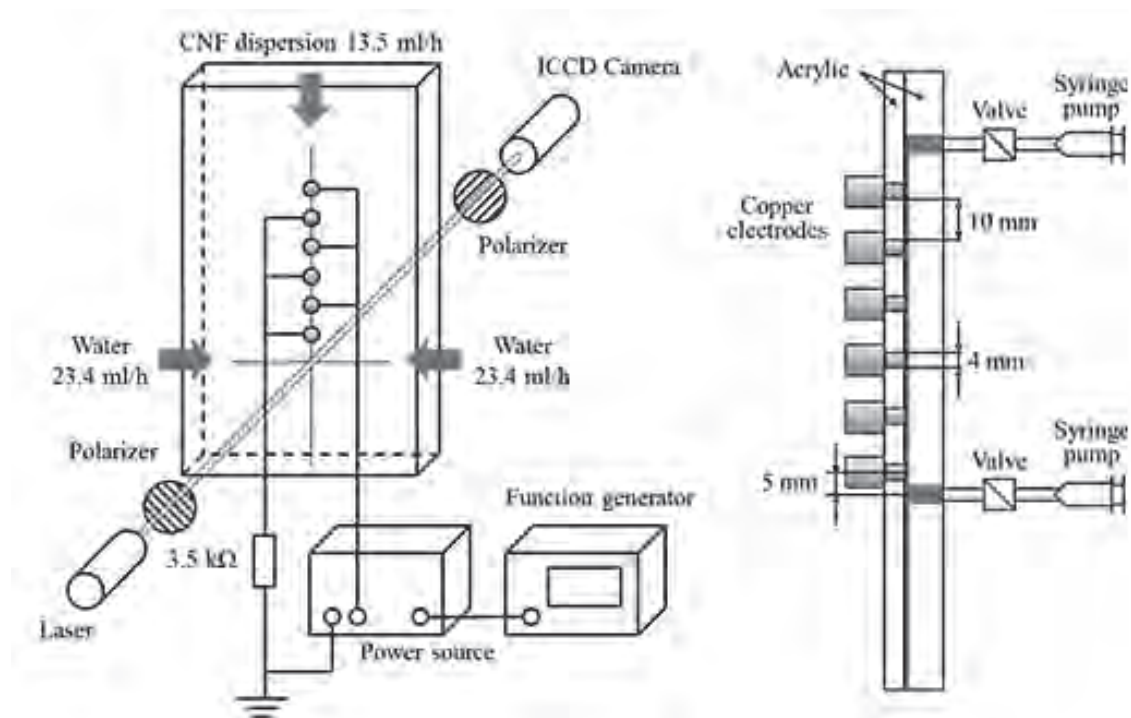


Fig. Schematic illustration of experimental setup with a flow-focusing channel imposing electrostatic field for the alignment of charged fibrils in the upstream of flow-focusing section.

5. Research results (* reprint included)

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

- [1] Y. Muramoto, V. Fridrici, Ph. Kapsa, G. Bouvard, M. Ohta: Tribological aspects of drilling bone biomodel, *Procédés et Génie civil, JIFT2015* (Journées Internationales Francophones de Tribologie 2015), 27-29 mai 2015, Nantes, France, Edited by M. -T. Do, V. Cerezo, Ph. Kapsa, (2016), pp. 81-89.

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

- *[2] Yusuke Takeda, Hidemasa Takana, Fredrik Lundell: Innovative Cellulose Material Synthesis by Electrostatic Micro Fibril Alignment, *Thirteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2016).

- *[3] Yusuke Takeda, Christophe Brouzet, Nitesh Mittal, Fredrik Lundell, Hidemasa Takana: Innovative Cellulose Material Synthesis by Electrostatic Fibril Alignment, *JSME Fluids Engineering Division, Newsletter*, February, (2017), online.

- [4] Yuta Muramoto, Joanna Seiller, Vincent Fridrici, Gaëtan Bouvard, Philippe Kapsa, Makoto Ohta: Material Investigation for the study of drilling bone biomodel, *3rd International Conference on BioTribology (ICoBT 2016)*, London, UK, (2016).

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J16L076
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2nd year

Tornado Formation Research with Wind Tunnel

Rongjia Tao*†, Masami Nakano**††

*Department of Physics, Temple University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Tornado is one of the most serious natural disasters. Especially in Tornado Alley of USA, tornadoes are the most violent annually recurring threat. Recently, Dr. Tao published a theoretical paper, indicating that violent tornadoes in Tornado Alley start from the clash between northbound warm air flow and southbound cold air flow. As there is no mountain in Tornado Alley ranging from west to east to weaken or block the air flows, some clashes are violent, creating vortex turbulence, supercells. These supercells are initially in horizontal spinning motion at the lower atmosphere, and then tilt as the air turns to rise in the storm's updraft, creating a component of spin around a vertical axis. About 30% of supercells develop into tornadoes, causing tremendous damages. Dr. Tao proposes that if we build east-west walls, 300m high and 50m wide, we will weaken or block such air mass clashes and diminish the major tornado threat in the Tornado Alley forever. This project will utilize the wind tunnel, carrying out experiments to verify the above basic mechanism of tornado formation, obtain various data for future design of tornado walls, and investigate the best way to prevent tornadoes from occurring.

2. Details of program implement

Our original plan is to use the wind tunnel at Tohoku University to carry out experiments to examine the interaction between a vertical wall and air flow first. While our team has modified and set up the facilities (Fig.1), the preparation process takes much more time than the original plan. As a result, the tests have been delayed.

Meanwhile, we carried out some computer simulations about tornado formation. As



Fig.1 Our wind tunnel setup

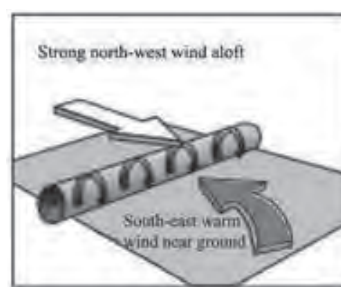


Fig.2 Violent clash creates a vortex

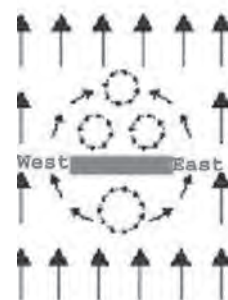


Fig.3 The area protected by a vertical wall .

shown in Fig.2, when the south wind and north wind collide, a vortex is created, which is the starting point to develop tornadoes. We will use the wind tunnel to examine the vortex formation when two air flows collide each other. In addition, we need to find the precise location of the vortex produced in the collision. The flow pattern indicated in Fig.3 is from our theoretical model, showing that high walls will effectively reduce the wind speed and eventually eliminate the vortex formation, hence preventing major tornado. We need to use the wind tunnel to check if this theoretical estimation is correct. If it is true, Afterwards, We need to verify it with the wind tunnel.

3. Achievements

Table 1 lists our computer simulation results. Here we assume that the north wind and south wind have the same speed before they collide. The collision produces a vortex, which would stretch to reduce the diameter. During this development, the wind speed increases dramatically. As noted from Table1, when the initial speed is 15m/s, the chance to form tornado is very high. However, when the wind speed is below 7.5m/s, the chance to form tornado is very low. We expect that the experiments will confirm the theoretical predictions and provide more details about the tornado formation and how we can eliminate the major tornado threats.

Table 1 : Wind Speed and Tornado Formation

<i>Wind speed</i>	<i>D/2</i>	<i>D/3</i>	Tornado ?
15m/s	30m/s	45m/s	Yes
10m/s	20m/s	30m/s	EF0
7.5m/s	15m/s	22.5m/s	No
5m/s	10m/s	15m/s	No

4. Summaries and future plans

After several pre-tests, we have made the wind tunnel ready for the experiment. We plan to carry out the tests in near future. Afterwards, we will analyze the results and compare them with theoretical and numerical results. In addition, our work has received much attention in USA. We presented the project at Smart Cities Innovation and Defense Energy & Resilience Challenges, Austin, Texas, June 13-15, 2016. We are encouraged to organize an international conference to discuss how to eliminate major tornadoes.

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] The Program of Smart Cities Innovation and Defense Energy & Resilience Challenges invited our “eliminating tornado” project for showcase in Austin Convention Center, Austin TX, USA, June 13-15, (2016) at the Smart Cities Innovation Summit.
 - [2] R. Tao and M. Nakano: Eliminating Major Tornadoes in US Tornado Alley, *Environment Research Conference*, March, (2017), Philadelphia, PA, USA.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J16L079
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2nd year

Application of Data Assimilation to Aviation Safety System

Junho Cho*, Takashi Misaka**, Shigeru Obayashi**†
Kwanjung Yee*, Shinkyu Jeong***††

*Department of Aerospace Engineering, Seoul National University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Air traffic has been forecasted to be the largest on record in this year and has grown steadily by about four percent every year. The airport capacity has reached its limit with the steady increase of aviation demands. Thus a method for improving the efficiency of airport capacity has been required. For this it is recommended to adjust the time interval of the take-off and landing between consecutive aircrafts. Meanwhile, unreasonable shortening would cause an accident due to the wake turbulence. In this study, data assimilation will be applied to predict the wake vortices which restricts the number of aircraft take-off and landing in airport. Aircrafts generate a pair of long-lived counter-rotating wake vortices which is a potential risk for the following aircraft especially when it is taking off and landing. The decay process of wake vortex is dependent on various factor such as clear air turbulence, horizontal wind velocity, and the strength of wake vortex pair. In this collaboration we have developed a fast-time prediction model of wake vortices. Such a prediction model helps to adjust take-off and landing separations at airports.

2. Details of program implement

In this study, measurement integrated simulation using incremental four-dimensional variational (4D-Var) data assimilation method was used for accurate wake vortex prediction and the POD reduced order model was used for efficient prediction. Turbulence fields were generated using stochastic noise generation and radiation (SNGR) forcing technique. To achieve physically realistic turbulence field three-dimensional fast furrier transform (FFT) at every time step was done. And add a constant amplitude f to all of the modes with integer wave numbers less than three.

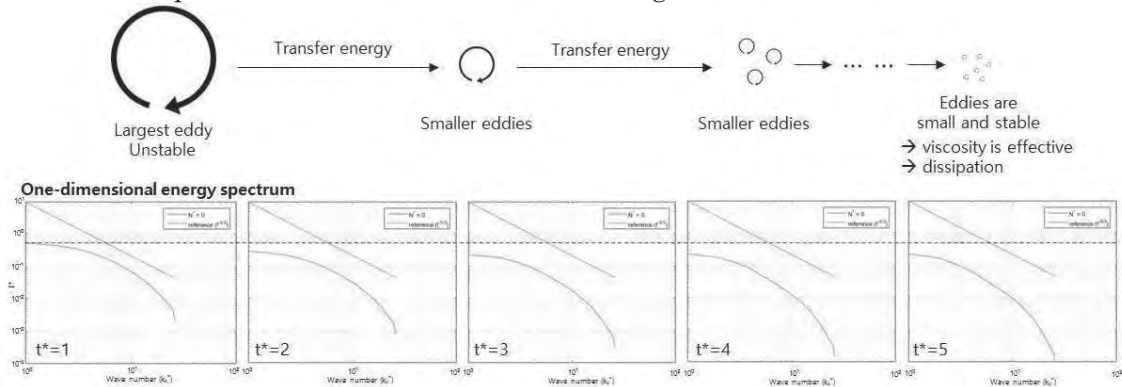


Figure 1 : Turbulence energy spectrum and its dissipation without SNGR

Inverse FFT back to the physical space. Repeat this process until the viscous dissipation of the simulation reaches a statistically steady state. The stratified turbulence fields can also be generated using LES of forced stratified turbulence.

3. Achievements

The prediction of wake vortex according to atmospheric weather condition had been done with numerical simulation and data assimilation technique. We have introduced a forcing technique to achieve realistic initial turbulence field. It was confirmed that crow instability was observed by checking the behavior and dissipation of wake vortex under turbulent atmospheric conditions at around $t^*=6$.

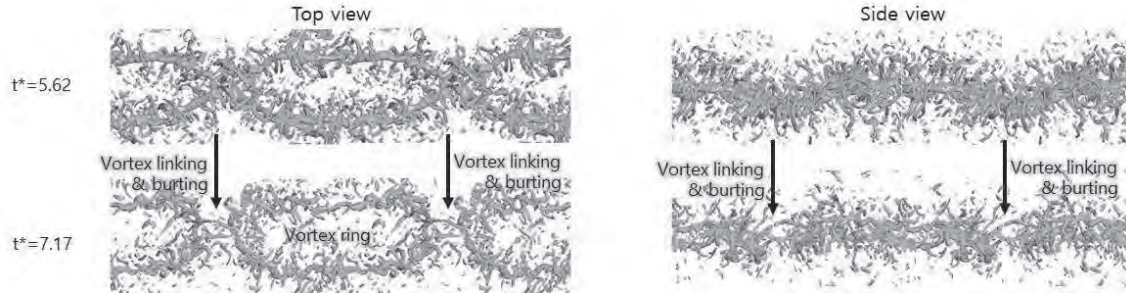


Figure 2 : wake vortex dissipation process

4. Summaries and future plans

The behavior and dissipation of wake turbulence are simulated under physically valid turbulence conditions using forcing techniques. The secondary vortex was formed as the wake vortex was dissipated. Finally, crow instability occurred and it was confirmed that the vortex was curled in a ring shape. For a more quantitative comparison, the time-dependent vortex spacing, vertical displacement, and circulation strength are shown in Figure 3. Prediction using POD technique will be carried out for fast-time prediction of wake vortex pair using analysis results at various atmospheric conditions.

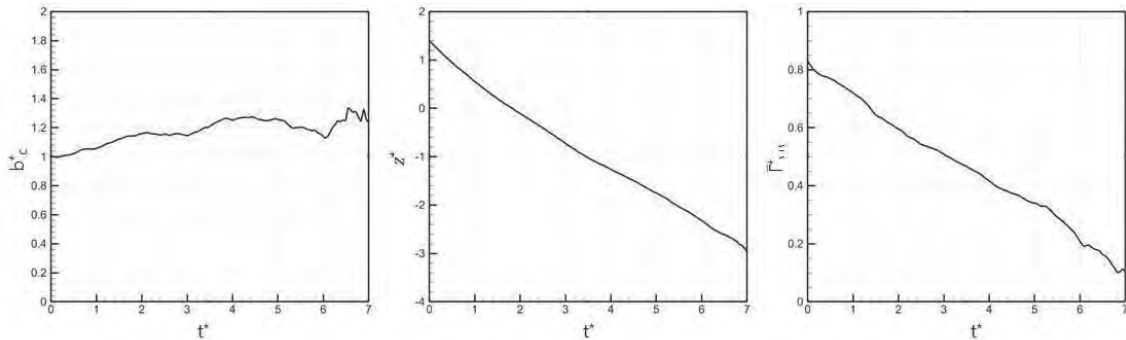


Figure 3 : the vortex spacing, vertical displacement, and circulation strength history

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
*[1] Junho Cho, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Yee Kwanjung, Shinkyu Jeong: Model-Reduced Variational Data Assimilation to Aviation Safety, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 74-75.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J16L084
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2nd year

Development of Conservative Kinetic Force Method

Vladimir Saveliev*†, Shigeru Yonemura**††

Svetlana Filko***, Kawagoe, Yoshiaki**

*Institute of Ionosphere, NCSRT, Kazakhstan

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Zhetysu State University, Kazakhstan

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Early by applicants, the equation for a two-particle distribution function equivalent to the Boltzmann equation was proposed. The equation describes the interaction in pairs of quasiparticles in terms of their rotation around the centers of mass with angular velocity, which depends on the velocity distribution function. Distribution functions of real molecules and quasiparticles coincide. In the first variant of Kinetic Force method, energy of quasiparticles representing real molecules was not conserved. In the second variant, we introduced the kinetic equation for auxiliary two-particle distribution function of quasiparticle pairs. We have shown that the compensation of the energy deficit in the plain Method of Kinetic Force by changing the filter parameter of small scales was physically correct.

In our newest algorithm, the energy of a system of molecules conserves without any additional corrections. Thus, the advantages of modeling on the base of two-particle distribution function of quasiparticle pairs are used more effectively. The new algorithm of Kinetic Force Method named serial recalculation of the velocities of quasiparticles pairs was suggested. Thus, the advantages of modeling on the base of two-particle distribution function of quasiparticle pairs are used more effectively.

2. Details of program implement

The equilibrium two-particle distribution function $F_M = f_M(v)\psi_M(u)$ is a product of two Maxwellians. In the variables: the relative velocity \mathbf{v} and the center of mass velocity \mathbf{w} , the function F_M depends on \mathbf{v} through the vector squared: $F_M = F_M(v^2)$. So that, near the equilibrium a small anisotropy of the two-particles distribution function can be approximated by the finite sum of spherical harmonics. Therefore, only a few first eigenvalues of the scattering operator play a role and one can replace it by a simpler operator, which has the same few first eigenvalues. In a pure gas $F(\mathbf{v}) = F(-\mathbf{v})$ and it can be expanded in even spherical harmonics only. That is why only even eigenvalues should coincide. We offered to use the differential approximation for scattering operator:

$$\hat{\chi} \approx \frac{1}{4} \langle 1 - \mu^2 \rangle \hat{\sigma}^2; \quad \langle 1 - \mu^2 \rangle = 2\pi \int_{-1}^1 (1 - \mu^2) b(v, \mu) d\mu; \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} \cdot (\mathbf{v}^2 - \mathbf{v}\mathbf{v}) \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} \quad (1)$$

The first two even eigenvalues of the operator $1/4 \langle 1 - \mu^2 \rangle \hat{\sigma}^2$ coincides with eigenvalues of the scattering operator $\hat{\chi}$ and all other are negative that provides stability. As a result, we obtain significantly simplified equation for angular velocity of quasiparticle pair rotation:

$$\Omega(v, u) = \frac{1}{8} \langle 1 - \mu^2 \rangle (v - u) \times \left[\frac{\partial}{\partial v} \ln f(v) - \frac{\partial}{\partial u} \ln f(u) \right]. \quad (2)$$

Using this approximation significantly reduce calculation time consumption. Boltzmann collision integral constructed with this scattering operator coincides with Landau collision integral for “grazing” collisions.

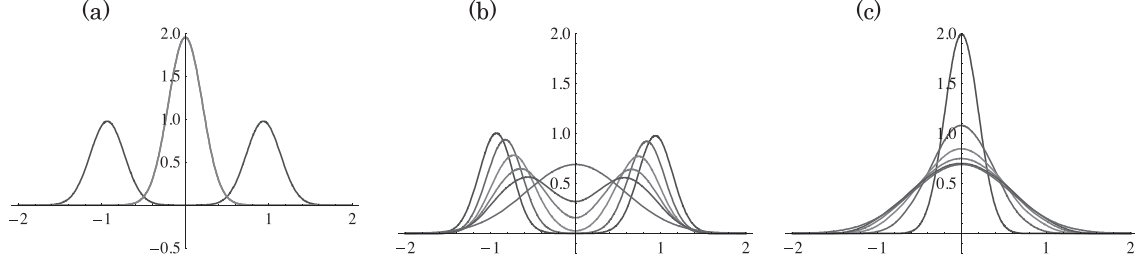


Figure 1 : Evolution of the distribution functions of 1000 quasiparticles in 3-D velocity space to equilibrium: (a) – Initial distribution functions $f(v_z)$ and $f(v_x) = f(v_y)$; (b) and (c) – Evolution of distribution functions $f(v_z)$ and $f(v_x)$ to Maxwellian: $t = 0, 1, 2, 3, 4$

3. Achievements

A new expression for angular velocity of quasiparticle pairs rotation, based on differential approximation for scattering operator, don't contain integration. It provides much more efficient numerical calculations. Thus, simulation of rarefied gas flows near equilibrium based of two-particle distribution function can be used more effectively.

4. Summaries and future plans

We will consider the non trivial improvement of the algorithm of quasiparticles pairs in the framework of Landau approximation for scattering operator in the case of spherical symmetry that provides considerably more efficient numerical calculations. We will compare results obtained by improved Kinetic Force Method with exact solutions for velocity moments

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] V.L. Saveliev, Shigeru Yonemura, and Yoshiaki Kawagoe: Rarefied Gas Simulations Using Quasiparticle Pairs, *30th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, AIP Conf. Proc.*, Vol. 1786, (2016), 040008, (6pages); doi: 10.1063/1.4967546 (peer-reviewed).

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

*[2] V. L. Saveliev, S. A. Filko, S. Yonemura, Y. Kawagoe: Development of Conservative Kinetic Force Method with Quasiparticles Pairs, *Proceedings of the 16th International symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 160-161.

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

Project code	J16L085
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	3rd year

Numerical Study of Thermal and Chemical Non-Equilibrium Effects in Near-Continuum Hypersonic Flows

Georgy Shoev*†, Shigeru Yonemura**††
Yevgeniy Bondar*, Pavel Vashchenkov***

*Novosibirsk State University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The main challenge of the project is validation of different models of vibration-dissociation coupling for accurate simulation based on the numerical solution of the Navier-Stokes equations in the two-temperature approximation.

2. Details of program implement

A numerical simulation of a steady N_2/N high-enthalpy flow over a cone with real gas effects was performed for different conditions (Nos. 2 and 4 in Table 1) of tests in ground facilities (Leyva, PhD thesis, 1999). A supersonic flow ($M_\infty > 1$) of almost pure molecular nitrogen was considered (Y_N is the mass fraction of N). The total enthalpy h_0 was varied in accordance with the uncertainty given in Leyva (PhD thesis, 1999) through the free-stream velocity variation. The numerical simulation was performed with the numerical tool suggested in previous years of the project. The vibrational relaxation rate was calculated by a principally new model, which is a modified Landau-Teller model derived directly from the kinetic Boltzmann equation (Kustova, Oblapenko, Phys Fluids, 2015) for an arbitrary deviation from thermal equilibrium. The dissociation rate was computed by different two-temperature models: β -model, Marrone-Treanor, Macheret-Fridman, Kuznetsov, and Park model.

Table 1 : Free-stream conditions

No.	M_∞	ρ [kg/m ³]	T_∞ [K]	Y_N	h_0 [MJ/kg]	$Re_{d/2=4cm}$
2	5.66	0.0437	1416	0.0006	10.3±0.9	1.5·10 ⁵
4	5.85	0.0266	1239	0.0009	9.82±0.38	9.4·10 ⁴

The results of computations are given in Fig. 1. The pressure coefficient and heat flux on the cone surface are in good agreement with the experimental measurements. To assess the sensitivity of the computational results to the choice of coefficients in the Arrhenius law, we considered two sets of the coefficients: set 1 is taken from Park (AIAA-85-0247) and set 2 is taken from Moss et al. (AIAA-88-0081). The uncertainties related to the free-stream conditions and coefficients of chemical reaction kinetics contribute approximately equally to the numerical solution. The uncertainty caused by using different models of dissociation is smaller, which allows us to conclude that all considered models can be used for the accurate prediction of the pressure coefficient and heat flux on the body surface in the considered range of

the free-stream parameters.

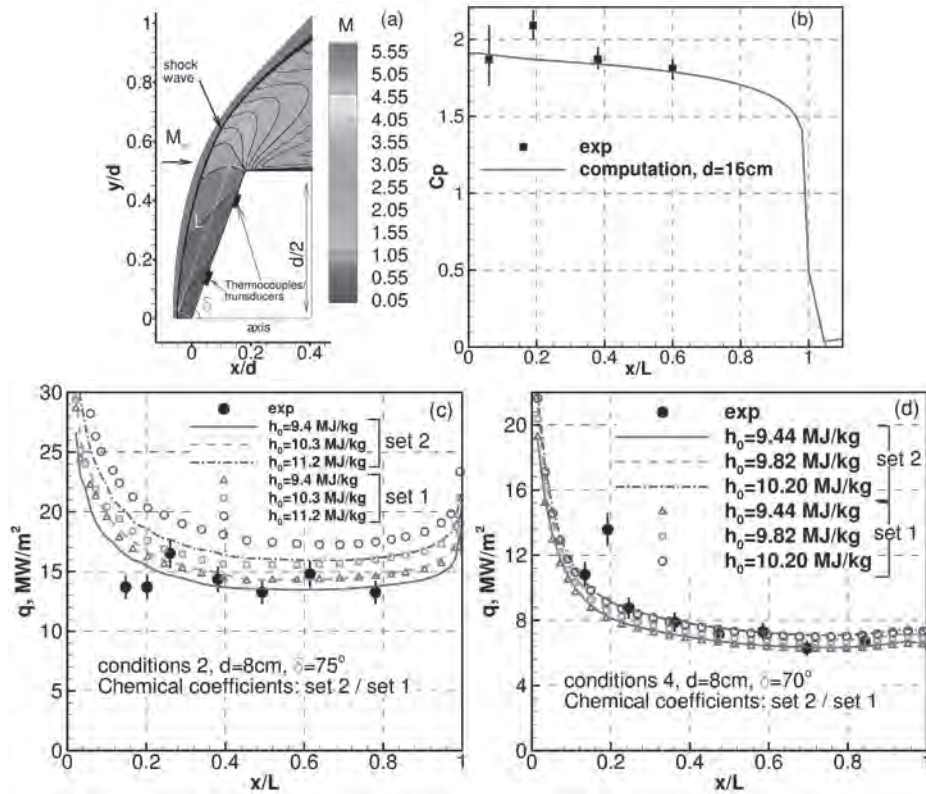


Figure 1 : Results of numerical simulations. Mach number (a), pressure coefficient (b), and heat flux (c,d) on the cone surface.

3. Achievements

The expected results were achieved completely.

4. Summaries and future plans

Validation of different models of vibration-dissociation coupling, including the state-of-the-art model of vibrational relaxation derived by using methods of the kinetic theory of gases, has been performed through comparison with available experimental measurements in ground facilities. The next step of the project is to extend the current numerical tool for the simulation of a weakly ionized air mixture flow in order to perform validation of vibration-dissociation coupling via comparison with available flight data.

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] Georgy Shoev, Pavel Vashchenkov, Shigeru Yonemura, Yevgeniy Bondar: Numerical Modeling of Hypersonic Flow over a Cone with Real Gas Effects, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 162-163.

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

Project code	J16L086
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	3rd year

Cavity Formation Mechanism in a Cavitation Process

Takehiko Sato*†, Mohamed Farhat**††

Outi Supponen**, Kiyonobu Ohtani*, Tomoki Nakajima*, Sayaka Kamata***

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)

***Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Cavitation bubble dynamics is still a major issue for a variety of industrial applications, including hydraulic machines, marine propellers and space rocket inducers among others. We plan to continue our research with a focus on the last stage of the bubble collapse to clarify peculiar phenomena that may occur within sub-microsecond time scale. State-of-the-art instrumentation will be deployed. We strongly believe that the complementary skills developed by the research groups led by Prof. Farhat (EPFL) and Prof. Sato (Tohoku University) will greatly help achieving the project goals.

2. Details of program implement

Figure 1 shows the schematic diagram of the experimental setup. The plasma-induced bubble was formed by focusing a beam of a nano pulse laser and visualized by a high speed camera. A signal from a photodiode at the emission of laser used for synchronizing with the camera and a high voltage amplifier. At the maximum size of the laser-induced bubble, a discharge was generated in the bubble using a needle electrode. The tip of electrode was set in the bubble when the bubble became maximum.

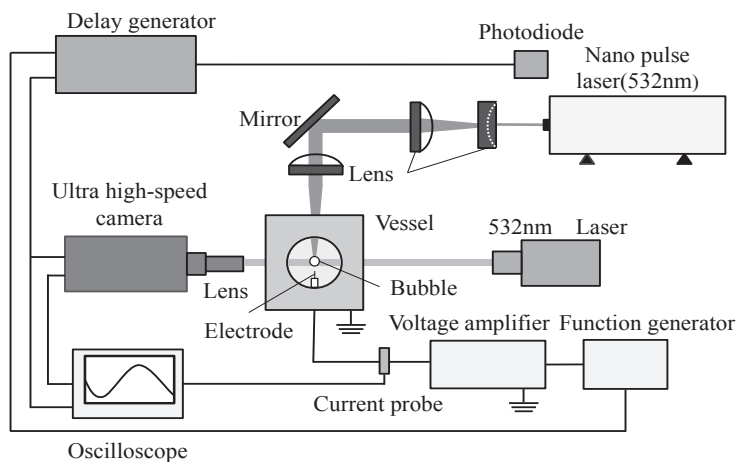


Fig. 1 Schematic of experimental

Figure 2 shows the series images of processes of growth, collapse and rebound in the cases of without, positive and negative discharges. When the negative discharge was generated, the shape of the rebound bubble was deformed. It implies that accumulation of electric charges affects to the processes of the collapse and rebound.

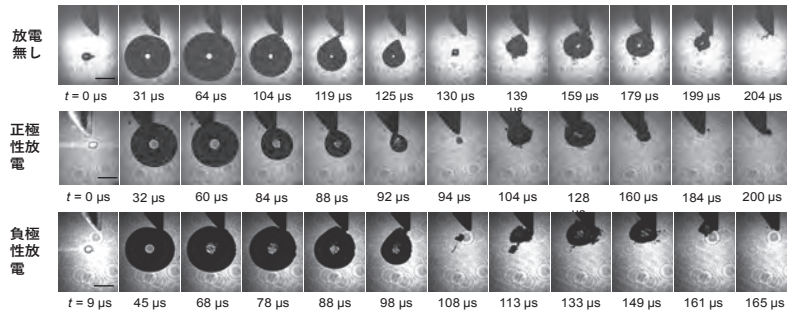


Fig. 2 The series images of processes of growth, collapse and rebound in the cases of without discharge (upper), positive discharge (middle) and negative discharge (row). The scale bar is 0.5 mm.

3. Achievements

We succeeded in discharging inside a plasma-induced bubble at the maximum radius. It was clarified that the behavior of plasma-induced bubble was influenced by the discharge generated in the bubble at the maximum diameter.

4. Summaries and future plans

It was shown that the behaviors of the charged bubbles were different from the case of without charges. To understand the mechanism, theoretical approaches using the Rayleigh Plesset equation which considers charge accumulation and noncondensable gases will be performed in the next step.

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. Sato, M. Tinguely, M. Oizumi and M. Farhat: Study on underwater spark and residual bubbles after the collapse of laser-induced bubbles, *94th JSME Fluids Engineering Division Lecture Meeting*, Yamaguchi, (2016), Presentation No. 0729.

(Other) 2 International Conferences and 2 Domestic Conferences

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award)

[1] Excellent Oral Presentation Award, “Effect of discharge in a plasma-induced bubble on cavitation dynamics”, Sayaka Kamata, Outi Supponen, Tomoki Nakajima, Seiji Kanazawa, Yuka Iga, Mohamed Farhat and Takehiko Sato, December 16, 2016, 3rd Taiwan-Japan Workshop on Plasma Life Science and Technology (2016TJPL).

[2] Excellent Poster Presentation Award, “Pressure Measurement of Underwater Shock Waves by Optical Fiber Hydrophone”, Takahito Akimura, Tomoya Minami, Tomoki Nakajima, Kiyonobu Ohtani, Toshiro Kaneko, Outi Supponen, Mohamed Farhat and Takehiko Sato, December 16, 2016, 3rd Taiwan-Japan Workshop on Plasma Life Science and Technology (2016TJPL).

(Press release) Not applicable.

Project code	J16L087
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	2nd year

Investigation of Nozzle Flows at Low Reynolds Numbers

Yevgeniy Bondar*†, Alexey Kudryavtsev*, Anton Shershnev*

Kaoru Maruta**††

*Novosibirsk State University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The main goal of the projects is to investigate numerically the flow in the plane and axisymmetric nozzles and to evaluate the possibility of aerodynamic focusing in such nozzles.

2. Details of program implement

Steady dusty-gas flow through a plane wedge-like nozzle with a 100 μm throat half-width and rounded critical part (Fig. 1a) was considered. The design Mach number of the nozzle is equal to 4. The gas-particle mixture flow is described by the one-way coupled point-particle approach. The carrier phase is a perfect viscous heat-conducting gas, power law dependence of the gas viscosity on the temperature is assumed. The dispersed phase, treated as a discrete set of identical spherical particles of radius σ , mass m , particle material density ρ_{sm} ; particle mass loading was assumed negligibly small.

The carrier-phase Mach number distribution is presented in Fig. 1b for the following parameters: $\gamma = 5/3$, $\text{Pr} = 2/3$, $\text{Re} = 350$. Downstream of the nozzle throat gas accelerates progressively as the gas density decreases, so the influence of the carrier-phase on a particle is low in the expanding part of the nozzle. Because of this fact the particle focusing regime is possible despite the flow expansion.

Figure 1c shows trajectories of particles with $\sigma = 1.2 \mu\text{m}$. Here the particle velocity at the inlet is set to $2/3$ of the gas velocity at the inlet, particle material density $\rho_{\text{sm}} = 2000 \text{ kg/m}^3$. Trajectories intersect in a small area around the nozzle axis, the position of trajectory intersection point depends on particle inertia properties. With the increase of the particle size, this point moves downstream. The longitudinal velocity of the dispersed phase along different trajectories is almost the same (in Fig. 1d corresponding lines coincide). Particles accelerate in the region of the nozzle throat, downstream of the nozzle throat the dispersed-phase velocity grows slowly and at the end of the computational domain it is about 0.36 of gas velocity in the nozzle throat.

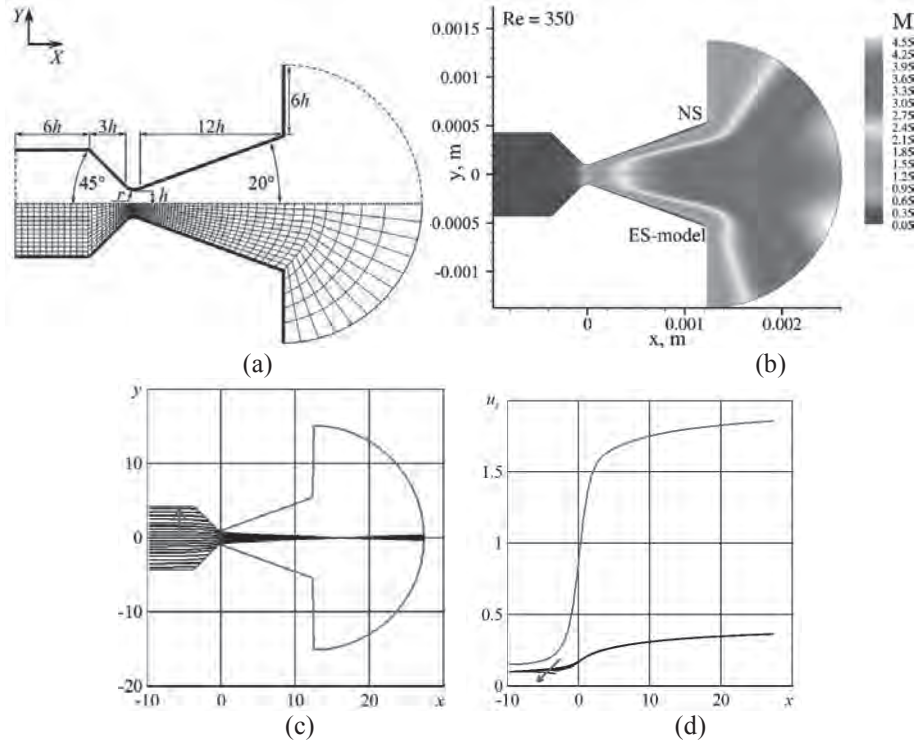


Figure 1 : Parameters and results of the numerical simulations. Nozzle geometry (a), local Mach number flowfield (b), particle trajectories (c), particle longitudinal velocity along trajectories (d).

3. Achievements

In the course of the project all of the expected results were obtained.

4. Summaries and future plans

Numerical simulations of the gas-particle flow in a plane wedge-like micronozzle were performed. The results of numerical simulation give clear evidence that aerodynamic focusing of small particles in supersonic micronozzles is possible and the divergence of streamlines in the supersonic part of the nozzle does not prevent generation of a collimated particle beam. The next step of the project is to investigate numerically the unsteady starting process in the plane and axisymmetric micronozzles, which is another important problem associated with micronozzle flows. This study will allow us to evaluate the influence of the rarefaction on the flow structure.

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] Kaoru Maruta, Yevgenyi Bondar, Alexey Kudryavtsev, Anton Shershnev: Investigation of Nozzle Flows at Low Reynolds Numbers, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 170-171.

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

Project code	J16L100
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	3rd year

Transport Phenomena of Nanoscale Water Droplet in a Nano Pore

Akinori Fukushima*, Takashi Tokumasu**†, Vergne Philippe***††

*Graduate school of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

*** LaMCoS, Université de Lyon

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Recently, many useful mechanical and energy devices that have nm-order structure are realized. Factors to determine the efficiency of these small devices are mass transport phenomena in devices. Many papers report that when substances are in nm-order structures, their transport properties are greatly different from those in macroscopic case. We have focused on the droplet shearing phenomena. In both macroscopic and microscopic cases, a liquid-vapor interface has nm-order thickness. In the macroscopic case, the friction force between droplets and solid walls can be written with contact angle and its surface tension coefficient. On the other hand, when a channel size is in nm-order scale, the relation between the velocity and the contact angle is not known in detail. Therefore, the momentum transport through the liquid-vapor should be clarified. In this study, we focus on effects of liquid-vapor interface onto the momentum transport phenomena seen in the interface region. In this year, for the first step to construct the numerical model of the friction force, we consider the temperature increase via the shear stress between the droplet and the solid walls.

2. Details of program implement

We evaluated friction forces between an argon droplet and honeycomb walls using a nano channel model shown in figure 1. The velocity of the upper wall was set at 10 m/s and the velocity of the lower wall was set at -10 m/s. The shearing direction is perpendicular to the liquid-vapor interface. To keep the solid wall at the constant temperature, the temperature of the second outside layers of the slabs was kept constant in all time steps by velocity scaling method. The temperature was set at 85 K. The channel size is defined by the distance between two slabs and changed from 3 nm to 10 nm.

To make numerical models of shear stress, considering the condition that the heat flux generated by the shear stress is balanced to the heat flux from the liquid to the solid wall, we solve time-independent 1D heat transport equation including energy dissipation. For the liquid temperature, we employ the space averaged temperature. Moreover, we evaluate the liquid viscosity using this liquid temperature.

Figure 2 shows the shear stress on the center region. The vertical axis means the shear stress and the horizontal axis shows the channel width. Red circles show the shear stress by molecular dynamics, black solid line shows the shear stress from our new model, and black dotted line shows the shear stress by the Couette flow with constant liquid temperature. Compared with results of two lines, due to the shear stress, the value of the solid line is smaller than that of the dotted line. Moreover,

compared with results of our new macroscopic model with that of molecular dynamics simulation, two results agree well. As a result, it can be said that our model can represent the shear stress with temperature increase.

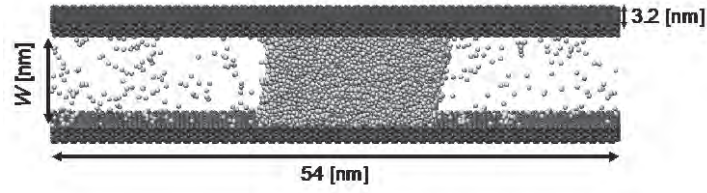


Figure 1 Snapshot of simulation system

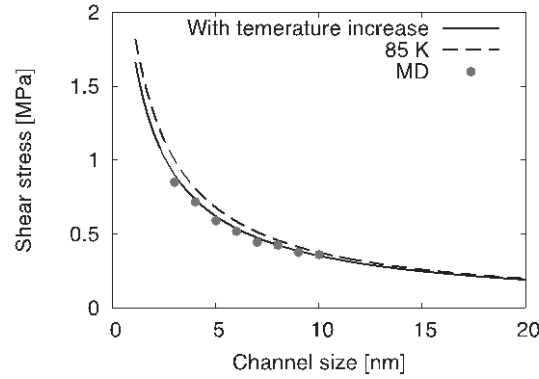


Figure 2 Channel size dependence of shear stress. Black solid line is expected value of our new model, black dotted line is expected value in constant temperature case, and red dots show the results by molecular dynamics simulation.

3. Achievements

In this project, we expected to clarify the momentum transport phenomena on the liquid-vapor interface in nano scale. In this year, we make the numerical model to obtain the accurate description. We have obtained the important and sufficient results. We will write full papers as soon as possible.

4. Summaries and future plans

We have constructed the numerical model of the shear stress including the temperature increase. Moreover, compared with result of molecular dynamics simulation, expected results of our model agree with results of molecular dynamics simulation. In future plan, we construct simulator to evaluate the friction force between the droplet and the solid walls based on the continuum model. Compared with expected results and results by the molecular dynamics, we find the characteristic phenomena in nano scale.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] Akinori Fukushima, Nicolas Fillot, Takashi Tokumasu, Philippe Vergne: Transport phenomena of Nanoscale Droplet in a Nano Pore, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 56-57.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J16L103
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2016 ~ March 2017
Project status	1st year

Shock Amplification behind Fabrics

Loïc Ehrhardt*†, Mingyu Sun**††,
Pascal Magnan*, Ryo Maruyama**

*French-German Research Institute of Saint-Louis, France

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective of the project was to investigate the shock-fabric interaction. It has been observed experimentally in the literature that such interactions indeed lead to strong pressure amplification in a reflecting surface behind the fabric. This effect can be dramatic in case of human exposed to a blast event (catastrophic event, terrorism, demining ...). The emphasis was put on the fundamental phenomena leading to pressure increase, and the sensitivities to fabric (permeability, surface mass ...) or configuration (stand-off distance, number of fabric layers ...) parameters.

2. Details of program implement

The first step has been to identify the physical processes leading to the amplification of overpressure on a reflective surface behind a fabric layer. The bibliographic review showed that the two phenomena are (i) the successive shocks transmissions and reflections due to the partially transparent fabric layer and the reflective surface, and (ii) the compression of the air gap between the fabric and the reflective surface due to the fast fabric movement.

In the second step, an original modeling of the fabric transparency was developed and implemented in a 1D hydrocode. The 1D fabric movement due to pressure on both sides was also implemented. The new model allowed to reproduce the main features of the amplification, as showed the comparison to experimental shock tube data.

The final step of the study was the use of the new model for studying the sensitivity of the amplification to fabric or configuration parameters. The aim was to investigate which parameters play a role on the pressure amplification and how they should be chosen to decrease the amplification effect.

3. Achievements

The expected results were:

1. Detailed description of the shock-fabric interaction

Achieved: the bibliographic review stressed the two main physical processes responsible from the shock amplification behind the fabric, which was the main phenomenon of interest. A deeper understanding of the fluid-structure interaction at the stitch level is however required for a finer understanding of the global interaction.

2. Numerical formulation of this interaction

In progress: a numerical formulation has been proposed and reproduces the shock amplification. Further comparison to experimental data is still necessary to consolidate the model.

3. Recommendations for mitigating shock amplifications

Achieved: based on the new numerical model, the sensitivity of the amplification to fabric parameters has been evaluated. The tests showed that the fabric transparency to the air flow is the key parameter and that the amplification is less important with larger transparencies.

4. Summaries and future plans

The Figure 1 shows the pressure recorded in a shock tube on a reflecting surface (tube end) in front of which a fabric layer was set. A shock was generated in the tube and leads to the pressure waveform observed. The figure shows the pressure waveform with and without the fabric layer. The results of the simulation are also shown on the same Figure for comparison.

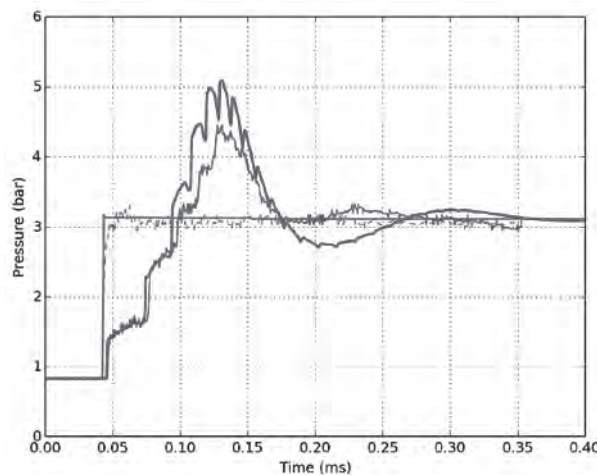


Figure 1 : End wall pressure (gray) without fabric and (red) with polycotton fabric. (thin line) experimental data, and (thick line) numerical data.

The main results of the study are visible on this Figure. The amplification is evident as the maximum pressure increase in presence of fabric is almost doubled. The waveform, depicting successive shocks and slower pressure increases, is characteristic from the fabric amplification effect. The simulations matches the experimental recordings.

In the next steps of the study, the influence of air viscosity on the shock/fabric interaction will be evaluated. A 3D simulation of the shock propagation around a fabric stitch will also be attempted. The objective is to link the air and fabric properties to the more global scale fabric transparency.

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] Ehrhardt, L., Magnan, P., Sun, M., Blast amplification by fabrics: a new numerical formulation, *MABS 24, Halifax, Canada*, (2016), 15 pages.
 - *[2] Ehrhardt, L., Sun, M., Maruyama, R., Magnan, P.: Shock amplification behind fabrics, *Proceedings of the Sixteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2016), pp. 164-165.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.