

平成29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 2017 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 29 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、112 件の公募共同研究およびリーダーシップ共同研究の成果報告書、主な発表論文の別 刷等を収録している。本拠点は、本公募共同研究を通じて、国内外の様々な異分野の英知 を結集させ、流動現象の基礎研究とそれを基盤とした先端学術領域との融合ならびに重点 科学技術分野への応用によって、世界最高水準の多様な流動現象に関する学理の探求及び 研究を推進し、社会に貢献するとともに、次世代の若手研究者及び技術者を育成するよう 努めて参る所存である。今後ともご支援ご鞭撻をお願い申し上げると共に、本報告書につ いて、忌憚のないご意見を頂ければ幸甚である。

平成 31 年 1 月

東北大学流体科学研究所長

大林 茂

1. 平成 29)年度流体科学国際研究教育拠点活動のまとめ	
1.1 相	既要	1
1.2 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「流体科学国際研究教育拠点」活動報告書	3
1.5 2	公募共同研究実施状況	3
1.6 负	研究成果の発表件数	6
1.7 픽	平成 21 年度から平成 27 年度までの活動成果	6
2. 研究成界	果報告書	
<平成2	29年度東北大学流体科学研究所一般公募共同研究採択課題>	
J17I001	低温度感度高速応答 PSP の低速流れへの適用とその評価	9
	江上 泰広 (愛知工業大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J17I002	2 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	1
	槙原 幹十朗 (東北大学)、大谷 清伸 (東北大学)	
J17I003	3 複雑形状の空隙媒体による水中爆発環境の減衰効果	3
	北川一敬(愛知工業大学)、大谷清伸(東北大学)	
J17I004	4 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	5
	田中 克史 (京都工芸繊維大学)、中野 政身 (東北大学)	
J17I005	5 エッジトーンの音響流体解析	7
	高橋 公也(九州工業大学)、服部 裕司(東北大学)	
J17I006	うプラズマ-生体界面における活性種挙動の大規模数値解析	9
	内田 論(首都大学東京)、佐藤 岳彦(東北大学)	
J17I008	3 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	1
	山崎 渉 (長岡技術科学大学)、下山 幸治 (東北大学)	
J17I009) 流体・構造・制御の異分野融合による展開翼モデリング法の確立	3
	槙原 幹十朗 (東北大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J17I010)ナノスケール固液複合系の熱伝導メカニズム	5
	小原 拓(東北大学)、芝原 正彦(大阪大学)	
J17I011	自励振動ヒートパイプの設計高精度化に向けた気液二相流の熱流体解析の応用	7
	高橋 俊(東海大学)、永井 大樹(東北大学)	
J17I012	2 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	9
	高山 哲生(山形大学)、小助川 博之(東北大学)	
J17I013	3 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	1
	高木 敏行 (東北大学)、伊藤 浩志 (山形大学)	
J17I014	1 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	3
	高橋 庸夫(北海道大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J17I015	5 非平衡乱流現象の解明と制御	5
	酒井康彦(名古屋大学)、早瀬 敏幸(東北大学)	
J17I016	3 高密度水素安全管理に関する連成解析	7
	石本 淳(東北大学)、Alain Combescure(INSA de Lyon)	
J17I018	3 光駆動型マイクロ・ナノ流体デバイスの開発	9
	山田 昇(長岡技術科学大学)、小宮 敦樹(東北大学)	

J17I022	衝撃波の細胞内伝播動態の解析
	中川 敦寛(東北大学病院)、大谷 清伸(東北大学)
J17I023	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
	高橋 俊(東海大学)、大林 茂(東北大学)
J17I025	Nanostructured Heusler Alloys and Related Compounds Prepared by Mechanical Alloying and
	Plasma Electrolytic Methods for Energy Saving Thermoelectric Power Generation and
	Protective Coatings ······ 45
	Vladimir Khovaylo (National University of Science and Technology "MISiS")、高木 敏行 (東北大学)
J17I026	Quantitative Temperature Measurement of High Pressure Flame Applying Laser Induced Thermal
	Grating Spectroscopy (LITGS)
	早川 晃弘 (東北大学)、Simone Hochgreb(University of Cambridge)
J17I029	Investigation of a Time Response of cntTSP Sensor for a Dynamic Visualization
	of the Laminar-to-Turbulent Boundary Layer Transition
	依田 大輔(German Aerospace Center - DLR)、永井 大樹(東北大学)
J17I030	Theoretical and Experimental Study of Flow Stability, Flow Controllability,
	and Trapped Acoustic Modes in Cylindrical Expansion Chamber-Pipe Systems
	Mikael A. Langthjem (山形大学)、中野 政身 (東北大学)
J17I031	スプレイノズルから噴射される過熱水の微粒化特性に関する研究
	渡邉 力夫(東京都市大学)、小林 秀昭(東北大学)
J17I032	流体現象解明によるスポーツ分野への適用
	長谷川 裕晃 (宇都宮大学)、大林 茂 (東北大学)
J17I033	Kinetic Modeling of High-Pressure Surface Ionization Waves Generated by Ns Pulse Discharges
	高奈 秀匡(東北大学)、Igor Adamovich(The Ohio State University)
J17I034	MHD 攪拌を活用した水素生成プロセスの高度化
	岩本 悠宏(名古屋工業大学)、高奈 秀匡(東北大学)
J17I035	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
	佐々木 大輔 (金沢工業大学)、下山 幸治 (東北大学)
J17I036	超並列脳型LSIのためのナノ構造アナログメモリ素子の開発
	森江 隆(九州工業大学)、寒川 誠二(東北大学)
J17I037	量子ナノディスクのバンド構造制御とデバイス応用
	福山 敦彦(宮崎大学)、寒川 誠二(東北大学)
J17I038	飛翔体物理の解明を目指した分子イメージング計測技術の開発
	沼田 大樹 (東海大学)、大谷 清伸 (東北大学)
J17I039	超音速流中における高周波運動量付加型アクチュエータの作動特性の解明
	半田 太郎 (豊田工業大学)、大谷 清伸 (東北大学)
J17I040	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
	山下一郎(大阪大学)、寒川 誠二(東北大学)
J17I043	火星探査航空機高高度試験機の動特性に関する数値的研究
	金崎 雅博(首都大学東京)、永井 大樹(東北大学)
J17Í044	Development, Modeling and Characterization of Efficient Magneto-Rheological Elastomers for
	Vibrational Energy Harvesting
	Gael Sebald (Université de Lyon)、甲野 政身 (東北大学)
J17I045	Development of Novel Multi-Layer Magnetorheological Elastomer Isolators
	Weihua Li (University of Wollongong)、中野 政身 (東北大学)

J17I047	プラズマ流による気泡生成機構に関する研究
	佐藤 岳彦(東北大学)、中谷 達行(岡山理科大学)
J17I048	Discharge Phenomenon in Laser-Induced Bubble and Formation Mechanism of Microjet by
	Cavitation Bubble 81
	佐藤 岳彦 (東北大学)、Mohamed Farhat (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL))
J17I049	数値流体力学を用いた脳血管内治療における流動現象の解明
	中嶋 伸太郎 (順天堂大学)、太田 信 (東北大学)
J17I051	航空宇宙流体科学サマースクール
	今村 太郎 (東京大学)、大林 茂 (東北大学)
J17I055	The Theoretical Modes of the Wake Flow of Road Vehicles
	Chenguang Lai (Chongqing University of Technology)、大林 茂 (東北大学)
J17I056	Application of Nanostructure Surfaces to Enhance the Thermal Performance of Heat Pipe
	Peng Zhang (Shanghai Jiao Tong University)、永井 大樹 (東北大学)
J17I057	Application of a Data Assimilation Methodology to a Numerical Simulation of Pedestrian Flow
	Fumiya Togashi (Applied Simulations Inc.)、大林 茂 (東北大学)
J17I060	Effect of Wall Elasticity on Reduction of Wall Shear Stress in a Patient-Specific Aneurysm Model
	in Middle Cerebral Artery
	山口 隆平 (千葉大学)、太田 信 (東北大学)
J17I064	電磁超音波探傷法のシミュレーション方法の確立とその活用
	山本敏弘((一財)発電設備技術検査協会)、高木敏行(東北大学)
J17I065	Eddy Current Testing and Electromagnetic Acoustic Transducers: Modelling Materials Behavior for
	Advanced Non Destructive Testing Techniques
	Gael Sebald (Université de Lyon)、内一 哲哉 (東北大学)
J17I066	Molecular Dynamics Study of Transport Phenomena of Nanoscale Water Droplet in a Nano Pore
	德增 崇 (東北大学)、Philippe Vergne (INSA de Lyon)
J17I069	2017 Maintenance Science Summer School in Sendai
	内一 哲哉 (東北大学)、Christian Boller (Saarland University)
J171070	離脱衝撃波脈動を利用した超音速飛行体の姿勢制御 103
1171071	水書 稔冶(東海大字)、大林 戊(東北大字)
J171071	水中放電とマイクロハブルを用いた樹脂漙板破碎へのマイクロハブル径の影響の実験的研究 105 小板 丈敏 (埼玉工業大学)、孫 明宇 (東北大学)
J17I072	粒子-流体連成解析による高濃度ナノフルイドの流動特性の解明に関する研究 107
	塚田 隆夫 (東北大学)、小宮 敦樹 (東北大学)
J17I076	Electronic and Spin Properties of Carriers Localized in 3D Array of Ge/Si and Ge/Si/Sn
	Nano-Disks Fabricated by Bio-Template Top-Down Etching
	Stepina Natalia (Institute of Semiconductor Physics)、寒川 誠二 (東北大学)
J17I078	Development and Applications of Micro-Motors Consisting of Smart Polymer Rotor and
	Dielectric Liquid 111
	中野 政身 (東北大学)、Miklos Zrinyi (Semmelweis University)
J17I082	水中ストリーマの開始・進展機構 113
	佐藤 岳彦(東北大学)、金澤 誠司(大分大学)
J17I083	Numerical Study on Gas Lubrication of a Textured Surface in Micro/Nanoscale
	米村 戊(東北大学)、Yevgeniy Bondar (ITAM, Siberian Branch of Russian Academy of Science)
J17Í084	Simultaneous Evaluation of Plastic Deformation and Residual Stress with ENDE Methods 117
	Zhenmao Chen (Xi'an Jiaotong University)、高木 敏行 (東北大学)

J17I085	The Development and Applications of Pressure-Sensitive Paint on the Investigations of	
	Gases Mixing in T-Type Micromixers	119
	Chih-Yung Huang(National Tsing Hua University)、永井 大樹 (東北大学)	
J17I086	Me-DLC ナノ構造による摩擦面温度検出機能を有する薄膜しゅう動材料の研究	121
	後藤 実(宇部工業高等専門学校)、高木 敏行(東北大学)	
J17I088	Analysis of Transport Phenomena of Oxygen Ion in Electrolyte of Solid Oxide Fuel Cell	123
	徳増 崇 (東北大学)、Jeongmin Ahn (Syracuse University)	
J17I096	Microcombustion for Clean and Efficient Syngas Formation and Fuel Cell Applications	125
	Jeongmin Ahn (Syracuse University)、丸田 蕉(東北大学)	
J17I097	Measurement-Integrated Analysis Methodology for Complex Flow Systems	127
	早瀬 敏幸 (東北大学)、Luca Brandt (KTH Mechanics)	
J17I100	Characteristic Simulation of Neutral Beam Etching Fabricated Nanodisks for	
	New Material Applications	129
	Yiming Li(National Chiao Tung University)、寒川 誠二(東北大学)	
J17I102	Development of Program for Surveying Stent Strut Position	131
	太田 信 (東北大学)、Bastien Chopard (Geneva University)	
J17I103	Research of High-Speed Contact with Medical Devices	133
	太田 信 (東北大学)、Vincent Fridrici (Ecole Centrale de Lyon)	
J17I104	Optimization and Data Mining of Transonic Compressor Blade via Active Subspace Method for	
	an Energy-Efficient Turbomachinery Design	135
	Lavi Rizki Zuhal (Bandung Institute of Technology)、下山 幸治 (東北大学)	
J17I105	The Sensitity Analysis and Multi-Objective Optimization of the Biodegradable Zinc Alloy Stent	137
	Aike Qiao(Beijing University of Technology)、太田 信(東北大学)	
J17I107	Aerodynamic Design and Optimization of High Speed Transport Aircraft	139
	Romie Oktovianus Bura (Bandung Institute of Technology)、大林 茂 (東北大学)	
J17I108	Evaluation of Flow Field in Closed Cavity under Temporally Variable Thermal Condition	141
	小宮 敦樹 (東北大学)、Nicholas Williamson (The University of Sydney)	
J17I109	Application of Data Assimilation to Aviation Safety System	143
	Shinkyu Jeong (Kyunghee University)、大林 茂 (東北大学)	
J17I110	Interfacial Design and Functionalization of Triboelectric Materials for High-Performance	
	Energy Harvesters	145
	Dukhyun Choi(Kyung Hee University)、寒川 誠二(東北大学)	
< 半成 2	9年度東北大子流体科学研究所明牙公募共同研究採択課題>	1 4 7
J17H001	複数の前縁フラップの組合せによるアルタ翼の空力特性の改善	147
	石出 思輝(木更津工美局寺専門字校)、下山 辛治(東北大字)	
J17H002	、羽はたき飛行における柔軟異の有効性 	149
1101000	石田 忠輝 (不更准上美局寺専門字校)、大林 茂 (東北大字)	151
J17H003	「不買ハイオマ人内部の熱分解タイナミクス	151
	大上 泰寛 (秋田県立大学)、甲村 寿 (東北大学)	. –
J17H004	飛行バイブの屋外観測と流れ解析	153
	中野 政身 (東北大学)、平田 勝哉 (同志社大学)	

<平成 29	9年度東北大学流体科学研究所国際連携公募共同研究採択課題>	
J17R001	Physical Insight into Mach Reflection Transition and Its Hysteresis in Axisymmetric Intakes in	
	Continuum and Rarefied Flow Conditions for High-Speed Air Breathing Propulsion	155
	Hideaki Ogawa (RMIT University)、大谷 清伸 (東北大学)、Sannu Mölder (Ryerson University)、	
	Evgeny Timofeev (McGill University)、Georgy Shoev (ITAM SB RAS)	
J17R002	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	165
	高木 敏行 (東北大学)、Jean-Yves Cavaiile (INSA de Lyon)、	
	Christian Boller (Fraunhofer Institute for NDT)、	
	Jinhao Qiu (Nanjing University Aeronautics and Astronautics)	
	Julien Fontaine (Ecole Centrale de Lyon)、Manfred Kohl (Karlsruhe Institute of Technology)、	
	Henrik Alfredsson (KTH Mechanics)	
J17R003	Investigation of Inhomogeneous Mixing of Plasma Species in the Hybrid-Stabilized	
	Argon-Water Arc Discharge for Subsonic-Supersonic Quasi-Laminar Plasma Flow Regimes	177
	Jiri Jenista (Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i.)、西山 秀哉 (東北大学)、	
	Anthony B. Murphy (CSIRO Materials Science and Engineering)	
J17R004	Instability and Nonlinear Dynamics of Curved Vortices	179
	服部 裕司 (東北大学)、Stephane Le Dizès (IRPHE, Aix-Marseille University)、	
	Stefan Llewellyn Smith (UCSD)、福本 康秀 (九州大学)	
J17R005	Link between Tracer and Microseismic Analysis to Comprehensive Understanding of Hydraulic	
	Feature of Fractured Geothermal Reservoir	185
	鈴木 杏奈 (東北大学)、Roland N. Horne (Stanford University)、	
	Michael Fehler (Massachusetts Institute of Technology)	
J17R006	Filtrational Gas Combustion in Porous Media and Micro Combustion	189
	Sergey Minaev (Far-Eastern Federal University)、丸田 薫 (東北大学)、	
	Roman Fursenko (ITAM SBRAS)、Alexander Kirdyashkin (TSC)、	
	Vladimir Gubernov (Lebedev Physical Institute RAS)、Shmakov Andrey (ICKC SB RAS)	
<平成 29	9年度東北大学流体科学研究所重点公募共同研究採択課題>	
J17J001	Multiphase Flow and Interfacial Transport Phenomena at Phase and Material Boundaries	197
	小原 拓 (東北大学)、Kwak Dongyoun (JAXA)、Sakaue Hirotaka (University of Notre Dame)、	
	和田 浩史 (立命館大学)、橋本 光男 (㈱ニレコ)、	
	飯島 高志 (産総研)、Combescure Alain (INSA de Lyon)	
J17J002	カーボンフリーエネルギーキャリア利用における科学と技術	199
	小林 秀昭 (東北大学)、橋本 望 (北海道大学)、渡邉 豊 (東北大学)	
<平成 29	9 年度東北大学流体科学研究所リーダーシップ共同研究採択課題>	
J17L017	バドミントンシャトルコックの非定常空力特性	201
	長谷川 裕晃(宇都宮大学)、永井 大樹(東北大学)	
J17L019	常温圧縮せん断法を用いたマイクロ成形技術の開発	203
	中山 昪(信州大学)、高木 敏行(東北大学)	
J17L020	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	205
	山田 剛治 (東海大学)、大林 茂 (東北大学)	
J17L021	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	207
	門脇 敏(長岡技術科学大学)、小林秀昭(東北大学)	
J17L024	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	209
	安藤 康高 (足利工業大学)、西山 秀哉 (東北大学)	

J17L027	飛翔体周りの非定常流れ場に対する定量的密度計測	211
	太田 匡則 (千葉大学)、永井 大樹 (東北大学)	
J17L028	Shock-Fabric Interaction	213
	Loïc Ehrhardt (French-German Research Institute of Saint-Louis)、孫 明宇 (東北大学)	
J17L041	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	215
	岩川 輝(名古屋大学)、大林 茂(東北大学)	
J17L042	マッハ1近傍の流れの非定常性の研究	217
	菊池 崇将(日本大学)、大谷 清伸(東北大学)	
J17L046	Physicochemical Modelling in Computations of High-Enthalpy Hypersonic Flows with	
	Strong Shock Waves	219
	Georgy Shoev (Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (ITAM)),	
	米村 茂(東北大学)	
J17L050	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	221
	千葉 一永 (電気通信大学)、大林 茂 (東北大学)	
J17L054	Combustion Characteristics of Biogas at Various Pressures	223
	Willyanto Anggono (Petra Christian University)、早川 晃弘 (東北大学)	
J17L058	Investigation of Nozzle Flows at Low Reynolds Numbers	225
	Yevgeniy Bondar (Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, SB RAS)	
	丸田 薫(東北大学)	
J17L061	Aeroacoustics of Low Reynolds Number Flows Via Dynamic Hybrid RANS/LES and Stochastic	
	Noise Generation and Radiation	227
	Adrian Sescu(Mississippi State University)、服部 裕司(東北大学)	
J17L062	微細加工を施した伝熱面を流れる液膜流の熱流動特性	229
-	足立 高弘 (秋田大学)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J17L063	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	231
	福井 智宏 (京都工芸繊維大学)、早瀬 敏幸 (東北大学)	
J17L067	殺菌用大気圧低温プラズマ照射による水中の電荷輸送機構	233
	佐藤 岳彦 (東北大学)、清水 鉄司 (産業技術総合研究所)	
J17L068	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	235
	佐藤 岳彦 (東北大学)、押谷 仁 (東北大学)	
J17L073	ふく射要素法を用いたレーザー温熱治療に関する研究	237
	櫻井 篤(新潟大学)、岡島 淳之介(東北大学)	
J17L074	触媒層内酸素輸送抵抗に対する表面散乱の影響	239
	徳増 崇(東北大学)、杵淵 郁也(東京大学)	
J17L075	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	241
	徳増 崇(東北大学)、金子 智(神奈川県立産業技術総合研究所)	
J17L077	Development of Conservative Kinetic Force Method	243
	Vladimir Saveliev (National Center of Space Researches and Technologies)、米村 茂 (東北大学)	
J17L079	Thermodynamic Effect on Tip Leakage Vortex Cavitation	245
	姜 東赫(青山学院大学)、伊賀 由佳(東北大学)	
J17L081	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	247
	徳増 崇(東北大学)、津田伸一(九州大学)	
J17L089	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	249
	藤野 貴康 (筑波大学)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J17L090	飛翔動物から着想・進化させた高 L/D 翼の探索とその空力特性	251
	川添 博光 (鳥取大学)、大林 茂 (東北大学)	

J17L092	中性粒子ビームプロセスによる新材料ナノデバイスの特性向上に関する研究	253
	遠藤 和彦(産業技術総合研究所)、寒川 誠二(東北大学)	
J17L094	中性粒子ビームプロセスを利用した高効率ゲルマニウム発光素子開発	255
	澤野 憲太郎 (東京都市大学)、寒川 誠二 (東北大学)	
J17L098	微分位相構造に基づく後方乱気流の多感覚呈示	257
	竹島 由里子(東京工科大学)、大林 茂(東北大学)	
J17L099	次世代高温環境センサ研究会 (フェーズ 3)	259
	内一 哲哉 (東北大学)、矢口 仁 (インテリジェント・コスモス研究機構)	
J17L101	Surface Pressure Measurement over Free Flight Object in Ballistic Range Facility	261
	坂上 博隆(University of Notre Dame)、永井 大樹(東北大学)	

- 1. 平成 29 年度流体科学国際研究教育拠点活動のまとめ
- 1.1 概要

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

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

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

平成 29 年度公募共同研究は、平成 29 年 4 月 1 日から平成 30 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 28 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 29 年 11 月には、運営委員会、共同研究委員会、公募共同研究成果報告会が開催 された。

1.2 公募共同研究成果報告会
平成 29 年 11 月 2 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-2017 において仙台国際センターにて開催した。本報告会では 97 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 4 件を含む)のプレゼンテーションとポスター発表が行われ、161 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	P	ク	セ	ス	数
-----	---	--------	-----	-----	-------	---	---	---	---	---	---

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

1.4 共同利用·共同研究拠点「流体科学国際研究教育拠点」活動報告書

平成29年11月に、平成28年度の共同利用・共同研究拠点活動の成果を取りまとめ た共同利用・共同研究拠点「流体科学国際研究教育拠点」活動報告書を作成し、関係 機関、研究者に配布した。報告書の内容(著作権の都合により論文別刷りは除く)は 流体科学研究拠点ホームページに掲載されている。

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

1.5 公募共同研究実施状況

1) 申請·採択状況

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

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

表2:一般公募共同研究の申請・採択状況

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

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

萌芽 公募共同研究	平成 28 年度	平成 29 年度
申請数(件)	5	4
採択数(件)	5	4
採択率(%)	100	100
申請金額(千円):a	994	697
採択金額(千円):b	525	559
充足率(金額)(%):b/a	53	80
一件あたりの採択金額(千円)	105	140

平成 29 年度
2
2
100
3,042
3,599
118
1,799

※採択額には、20%のインセンティブが含まれる。

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

表4:リーダーシップ共同研究の実施状況

2) 研究者の受け入れ状況

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

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

表5:研究者の受け入れ状況

3) 研究費

本公募共同研究にて使用した研究費の内訳を表6に示す。

	平成 28 年度	平成 29 年度
物件費(千円)	16,377	12,911
旅費(千円)	16,177	18,201
合計 (千円)	32,554	31,112

表6:研究費の内訳

1.6 研究成果の発表件数

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

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

表7:研究成果の発表件数

1.7 平成 21 年度から平成 27 年度までの活動成果

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

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	7,546

		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
申請娄	汝(件)	52	64	77	85	94	98	98
採択数	汝(件)	52	63*	77	85	93*	96*	97
日内,日欧	国内	32	35	47	51	59	60	58
国内・国际	国際	20	28	30	34	34	36	39
	エアロ	7	7	10	12	13	16	16
	スペース	(5/2)	(5/2)	(7/3)	(9/3)	(10/3)	(12/4)	(3/13)
	アマルギー	16	14	18	20	21	21	21
	工 117-	(8/8)	(5/9)	(6/12)	(7/13)	(7/14)	(7/14)	(7/14)
分野別件数	ライフ	7	13	13	14	19	17	15
(国内/国際)	サイエンス	(5/2)	(8/5)	(9/4)	(8/6)	(12/7)	(12/5)	(8/7)
	ナノ・	17	17	23	24	24	24	22
	マイクロ	(10/7)	(10/7)	(17/6)	(17/7)	(18/6)	(17/7)	(14/8)
	甘般	5	12	13	15	16	18	23
	巫 '血	(4/1)	(7/5)	(8/5)	(10/5)	(12/4)	(12/6)	(16/7)
採択率	嶅 (%)	100	98	100	100	99	98	99
充足率(金額)(%)		$26\sim$	$77 \sim 95$	$59 \sim 97$	49~83	$44 \sim 73$	$19 \sim 70$	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	脸額(千円)	320	391	333	301	248	229	222

表9:一般公募共同研究の申請・採択状況

*取り下げ

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

表 10:分野横断プロジェクト申請・採択状況

	連携公募	真共同研究プロ :	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 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

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	J17I001
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

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

> 江上 泰広*†, 小倉 弘也* 松田 佑**, 永井 大樹***†† *愛知工業大学工学部, **早稲田大学創造理工学部 ***東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年,感圧塗料(Pressure Sensitive Paint; PSP)を用いて模型上の圧力分布を非定常の 時系列データとして計測する研究が多くの研究機関で盛んに行われてきている.さらに従来 の超音速や遷音速域の動圧の大きい現象の計測から,低速域における微小な圧力変動の計測 にもチャレンジする意欲的な研究が行われ始めている.しかし感圧塗料は絶対圧センサであ り,温度変化の影響も受けるため微小な圧力変化を捉えることは不得手である.申請者らは 従来の高速時間応答 PSP で問題となっていた温度依存性を低減しつつ時間応答性を大幅に 向上させた PSP の開発に成功した.この新規の非定常 PSP を低速非定常流れに適用し,微 小圧力変動の測定限界の評価を行う.また得られた時系列画像を用いて FFT 解析や固有直 交分解(POD),動的モード分解(DMD)などのポスト画像処理の有効性についても検証する.

2. 研究成果の内容

実験は東北大学流体科学研究所の小型検定風洞を用いて行った.図1に示す通り測定部は 開放型とし、高速応答 PSP をスプレー塗布した回転ステージ上に角柱を設置した.高輝度 LED で励起した PSP からの燐光は高速度カメラを用いて撮影レート 1kfps で各試験条件毎 に 21.841 枚づつ撮影した.今回の計測では、

尾色素には PtTFPP と Ru(dpp)₃の 2 種類の 高速応答 PSP を用いた. PtTFPP ベースの高 速応答 PSP はポリマに PTMSP を用い,応答 時間が 65µ 秒,温度依存性が-0.73%/℃である. 一方 Ru(dpp)3ベースのものは応答時間が 3.1µ 秒と非常に高速で,温度依存性は PtTFPP より やや高い-1.2%/℃ であった.双方とも従来の高 速応答 PSP(応答時間 100µ 秒以上,温度依存 性 -1.5%/℃ 以上)と比較して優れた特性を持 つ. 今回の実験より PtTFPP よりも Ru(dpp)₃ を感圧色素に用いた高速応答 PSP の方が高い 発光強度が得られた. そのため取得した画像も



図1:実験装置の概略図

高い S/N のものが得られることが分かった. 図 2 はそれぞれの PSP を用いて主流速度 50,30m/s で取得された,角柱から放出されるカルマン渦による壁面上での圧力変化である. Ru(dpp)₃ベースの高速応答 PSP では主流速度 30m/s においては,画像の平均化処理を行わ なくても明瞭に圧力変化を計測する事ができていることがわかる.



図2:2つの高速応答 PSP で取得されたカルマン渦による圧力分布図の比較

3. 研究目標の達成状況

開発した2種類の高速応答 PSP を実際の流れ場に適用した実証試験を検定風洞で行い, 各条件に於いて実験を行い,多くの時系列データを取得することができた.特に,Ru(dpp)₃ は発光強度が高く高い S/N が取得できるため過去の同一条件における実験結果と比較して も良好な結果が得られることが分かった.また,実証試験に於いて開発した PSP の改善す べき問題点(模型表面への付着性やさらなる高発光強度化の必要性)が見出されるなど,研 究目標は達成されつつあると言える.

4. まとめと今後の課題

風洞試験により得られた多くの時系列データを用いて、ポスト画像処理の効果の比較・検討を早急に進めていく.また実証試験で見出された高速応答 PSP の改善すべき点に関する知見を活かし、改良版の高速応答 PSP の開発を行っている.今後は、改良された高速応答 PSP を用いて微小な圧力変化の測定限界をさらに高められるよう、今回共同研究を推進したグループで引き続き研究を行っていく予定である.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] <u>Y. Egami, H. Ogura, Y. Matsuda</u>, and H. Nagai: Application and Low-Temperature Sensitive Fast Response PSP on Low-Speed Unsteady Flow and its Validation, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), CRF-71, pp.148-149.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I002
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2年目

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

植原 幹十朗*†,大谷 清伸**††,長谷川 美貴***,石井 あゆみ***,笹原 一将* 上蓑 義幸*,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を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

- 計測装置を設置した後超高速衝突実験を行った. 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・飛散は許容する方針を取ることにした.まず、真空中での試料において真空膨張(図1)を観測した.
- 試料を2枚組アルミ板の2枚目に塗布してから超高速衝突実験を行い、貫通穴の周りが 長い間発光するかの検証実験を行った.図2に塗布した試料を示すように、複数の光化 学試料において検証した.
- チャンバー内に光ファイバー(図3)を設置し、真空中であっても分光器を用いて計測 することに成功した。
- 衝突箇所近傍では急激な衝撃波生成により剥がれたが、周辺物質は一緒に剥がれることなく、物質がバンパーに残存していることが確認された.
- 高速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.高速衝突後に発光体に化学変化を起こしたことが確認できた.

市販の接着剤に混合させた希土類蓄光材料の混合比の粉末をアルミ製のバンパーに塗布 した.発光体を塗布したバンパーと 10 cm の間隔で別のバンパーを配置し与圧壁に設置し た.3km/s で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4に希土類の単斜相の概念図を示すように,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した.このような実験によ る3価のユウロピウムの還元の現象を報告した例はなく、世界初の結果に繋がる.



図1:真空膨張の様子





図2:塗布した光化学試料 図3:光ファイバー計測

3. 研究目標の達成状況

図4に示すようなユウロピウムの価数が変化することを赤 色から青色への変化という形で確認できた.本実験研究は学術 雑誌に投稿論文として纏めている最中である.目標である発光 試料のスペクトルが観測されており、十分に研究目的を達成し ている.



4. まとめと今後の課題

- 今後の課題として、以下の物質を創成すべく試料合成と衝突実験を続けていく.
 - 高速衝突後に発光減衰時間が3分間程度になるような試料の創生
 - 高速衝突のみでの化学反応性と超残光性を兼ね備えた試料の創生
- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- *[1] <u>Makihara, K.</u>, and Oki, Y.: Bayesian Cloud Extraction for Assessment of Space-Debris Impact Using Conditional Entropy, *AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 54, No. 6, (2017), pp. 1235–1245.
- [2] <u>Makihara, K.</u>, and Kondo, S.: Structural Evaluation for Electrodynamic Tape Tethers against Hypervelocity Space Debris Impacts, *AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 55, No. 2, (2018), pp. 462-472.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[3] <u>Sasahara, K., Uwamino, Y., Hasegawa, M.</u>, Ohtani, K., and <u>Makihara, K.</u>: Identification of Air-Leakage Region by Space-Debris Impact Utilizing Photoluminescent Substance, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 38-39.
- [4] <u>Sasahara, K.</u>, Kondo, S., <u>Uwamino, Y.</u>, Hasegawa, S., and <u>Makihara, K.</u>: Determination of Fracture Toughness of Hollow Cylindrical Tether at Space Debris Impact, ISTS-2017-r-43, *Proceedings of the 31st International Symposium on Space Technology and Science*, (2017).
- [5] <u>上蓑義幸</u>,藤原路大,<u>植原幹十朗</u>:捩れたテープテザーのスペースデブリ衝突による損傷,日本航空宇宙学会北部支部2018年講演会,(2018).
- [6] <u>長谷川美貴</u>, <u>尾形周平</u>, <u>近藤一希</u>, <u>川口拓馬</u>, <u>石井あゆみ</u>, <u>槙原幹十朗</u>: 強い衝撃を受けた材 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, (2017).
- [7] <u>笹原一将</u>, 近藤周, <u>上蓑義幸</u>, 長谷川直, <u>槙原幹十朗</u>: 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, (2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

課題番号	J17I003
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2 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.本研究では、衝撃波と気泡振動の減衰特性 を考慮した音響インピーダンスを持つ気泡構造の複雑媒体で、水中爆発時の衝撃圧減衰、爆 発ガスの気泡膨張収縮の抑制と水流ジェットの軽減による衝撃環境の減衰法の確立する.

2. 研究成果の内容

図 1(a)と図 1(b)は可変形空隙媒体面から下方 30mm で水中爆破した場合,爆発生成ガス の変形挙動を示す.図1(a)は凹凸形壁面,図1(b)は半円形壁面の2次元変形の可視化である. 各図の時間間隔はΔt =0.60ms である. No.1 は爆薬が起爆時 0ms, No.2~No.4 爆発生成ガ ス膨張過程, No.5~No.9 は収縮過程である. 図 1(a)では,可変形凹凸形フォーム境界面か らの反射膨張波に伴ってキャビテーションが発生する. 爆発生成ガスは均等に膨張, No.4 で最大となった.No.5 では,上半球から収縮,下半球は膨張する.No.6 では,上半球の収 縮が速く、No.7から下半球の収縮が始まる。収縮速度は上半球 7.1m/s、下半球 10.1m/s と なった. No.9 では爆発生成ガスが最小面積となり、下半球が爆発生成ガス中心方向に貫入 し媒体の方向(起爆部上方向)に水流ジェットが発生する. 図 1(b)の No.5 では半円形表面での 反射膨張波と上半球の爆発生成ガスと干渉し収縮がはじまる. No.6 以降,下半球も収縮を はじめ全周で収縮を始める. 収縮速度は上半球 4.8m/s, 下半球 3.0m/s となった. No.7 以降, 収縮速度は上半球 13.8m/s,下半球 13.2m/s となり、爆発生成ガスは上下非対称、左右対称 の横長楕円状となった. No.8 で爆発生成ガス最小となり、内部は高圧、高密度となり、二 次衝撃波が発生する. No.9 以降, は再膨張の過程となり, 爆発生成ガスは再膨張をしなが ら上部の半円形壁面と反対方向(下方)に移動する.よって、半円形壁面が圧縮される.図2(a) と図 2(b)は各壁面状態の最大過剰圧と応力値を示す.図 2(a)は入射衝撃波の最大ピーク圧, 図 2(b)はバブルパルスのピーク圧を示す. 半円形壁面 Foam80>凹凸形壁面 Foam80>半円 形壁面 Foam50>楔形壁面 Foam50>凹凸形壁面 Foam13>凹凸形壁面 Foam50 となり,可 変空隙媒体の密度が高いほど最大過剰圧・応力値が減少した.これは、フォーム骨格固体の 非定常抵抗により圧力減衰が誘発される.

3. 研究目標の達成状況

水中爆発時の衝撃圧・動的破壊挙動を、複雑構造媒体を用いた物体損傷軽減の評価法を導

くことである.フォームの表面形状と印加圧の関係から,半円形壁面 Foam80>凹凸形壁面 Foam80>半円形壁面 Foam50>楔形壁面 Foam50>凹凸形壁面 Foam13>凹凸形壁面 Foam50となり,可変空隙媒体の密度が高いほど最大過剰圧・応力値が減少する.



(a) Rugged wall (b) Semicircle wall 図1 爆発生成ガスの可視化

(b) Bubble pulse 図2 最大過剰圧と応力値の関係

4. まとめと今後の課題

水中爆発時の衝撃圧・バブルパルスと水流ジェットの減衰と軽減効果を柔軟空隙媒体の利 用で有効性を示した. 今後の課題は,効果的に水中爆発の軽減法の向上を図る.

- 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・ロ頭発表等
- K. Kitagawa, D. Nagahiro, K. Ohtani, <u>A. Abe</u>: Collision of underwater explosion with compressible porous wall, *31st International Symposium on Shock Waves (ISSW31)*, Nagoya, (2017), #SBM000128.
- [2] <u>K. Kitagawa</u>, D. <u>Nagahiro</u>, K. Ohtani, Y. Konishi, <u>A. Abe</u>: Attenuation and Reduction Effect of Underwater Explosion by Porous Materials, *The Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2017)*, Sendai, (2017), #CRF-62, pp.130-131.
- [3] <u>K. Kitagawa, D. Nagahiro</u>, K. Ohtani: Experimental investigation of washing effect for textile using the underwater explosion, *The 6th International Symposium on Energetic Materials and their Applications (ISEM2017)*, Sendai, (2017), #P-50, pp.172.
- [4] <u>長廣大樹</u>,<u>北川一敬</u>:水を満たした円管内の水中爆発現象について,火薬学会 2017 年度年 会講演要旨集,青山学院大,東京,(2017), pp.138-141.
- [5] <u>北川一敬</u>, 長廣大樹, 大谷清伸, <u>阿部淳</u>: 可変形空隙媒体による水中爆発の軽減, 平成 29 年 度衝撃波シンポジウム, 東北大, 仙台, (2018), #2C2-4.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I004
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	2017.4 ~2018.3
継続年数	3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**††, 市川 新*** *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、粒径がナノメーター 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

粒子径 400 nm 程度の酸化チタンナノ粒子と、変性シリコーンオイル(粘度 $\eta_c = 0.04$ Pas, 0.02 Pas 及び混合系)を用いた流体(粒子濃度 $\phi = 15$, 20 vol%)を検討した. 粒子、及び、分散媒の乾燥(前処理)は、既報(K. Tanaka, M. Nakano et al., Colloid Polym. Sci, Vol. 295, No. 3 (2017), pp. 441-451.) に従った. Fig. 1 に、無電場で測定した 2nd run の流動曲線を示している. 1st run の結果では、0.04 Pas、15 vol%試料、及び、0.02 Pas、20 vol%試料の流動曲線は、ほぼ一致しており、低せん断速度側において 1 Pa 程度の応力値が認められた. 一方、2nd run では、0.02 Pas、20 vol%試料の応力レベルが、0.04 Pas、15 vol%試料に比べてやや高い傾向を示している. 粒子体積分率 20 vol%と固定した場合、0.02 Pas 試料の応力レベルは、0.04 Pas 試料より低く、低せん断速度側で 1 Pa 程度であり、セルへの注入は比較



的良好であった. Fig. 2 に示すように,直流電場に対する ER 応答について,比較的良好な 結果が得られた.また,分散媒のブレンド効果は一定程度認められたが,分散媒の前処理に 依存して,無電場の流動曲線における応力レベルが1桁程度高い結果が得られた.

3. 研究目標の達成状況

分散媒粘度の効果・ブレンド効果が一定程度認められた.

4. まとめと今後の課題

分散媒粘度の効果・ブレンド効果とともに、分散媒の前処理の検討が必要と考えられる.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- [1] <u>田中克史</u>, 中野政身: 第3編 第4章 3. ナノ粒子分散系におけるレオロジー, 高分子微粒子 ハンドブック, 藤本啓二監修, シーエムシー出版, (2017), pp. 157-166.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] <u>K. Tanaka</u>, A. Ichikawa, M. Takasaki, H. Kobayashi, M. Nakano, and A. Totsuka: Improvement and Micro-Channel Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proc. of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 70-71.
- *[3] <u>K. Tanaka</u>, M. Takasaki, H. Kobayashi, and M. Nakano: Micro-Gap Flow Behavior and Micro-Structure of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proc. of the 14th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2017), pp. 450-451.
- [4] 田中克史,西本美功,小松弘樹, 髙崎 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正弦波電場における流動挙動,日本レオロジー学会第44年会 講演予稿集,京都,(2017), pp. 133-134.
- [5] <u>田中克史</u>, 市川 新, 青木 悟, 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における ER 効果の電場周波数依存性と流動挙動, 第65回レオロジー討論会講演要旨集, 新潟, (2017), pp. 74-75.
- [6] <u>田中克史</u>, 市川 新, 髙崎 緑, 小林治樹, 中野政身, 戸塚 厚: ナノ粒子分散系の微細間隙 における流動挙動と電場応答, 日本レオロジー学会第 45 年会講演予稿集, 東京, (2018), 2 pages.
- [7] <u>K. Tanaka</u>, A. Ichikawa, M. Takasaki, H. Kobayashi, M. Nakano, and A. Totsuka: Micro-Channel Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, 第67回高分 子学会年次大会予稿集, 名古屋, (2018), 1 page.
- [8] <u>K. Tanaka</u>, A. Ichikawa, M. Takasaki, H. Kobayashi, M. Nakano, and A. Totsuka: Micro-Gap Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proc. of the 7th Pacific Rim Conference on Rheology*, Jeju, (2018), 1 page.
- [9] <u>K. Tanaka</u>, A. Ichikawa, M. Takasaki, H. Kobayashi, M. Nakano, and A. Totsuka: Micro-Channel Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proc. of the* 16th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, University of Maryland, (2018), 1 page.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I005
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3年目

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

高橋 公也*†, 岩上 翔*, 小林 泰三**, 服部 裕司***†† *九州工業大学情報工学府, **帝京大学 ***東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

低マッハ数における流体音(空力音)の発音メカニズムは、これまでにあまり注目されてこな かった.本研究では、エアリード楽器(リコーダー、フルート等)の音源となるエッジトーン に注目する.エッジトーンでは、振動するジェットが音源となり、物体後流の乱流から出る 流体音とは異なる性質があることが期待される.本研究では、圧縮性 LES および DNS を用 いてエッジトーンを数値的に再現し、Lighthill の音響的類推理論に用いて流体音発生のメカ ニズムの厳密な解析を行う.

2. 研究成果の内容

2次元のDNSの計算を行い,エッジトーンの発振を確認できた.図1にその結果を示す.ジェットの流速が早くなるに従い,発生している音圧が強くなり,波長が短くなっているのがわかる.U=3.3m/sとU=6.7m/Sでは、ジェットの波形より基準振動モードであることがわかるが,U=13.7m/sでは、ジェットの波形より倍モードの発振が起きていると考えられる.LESの計算では,倍モードの発振は起きていないので,LESの精度を考える上で,重要な成果が得られたと考えられる.



図 1 DNS で再現されたエッジトーン

3. 研究目標の達成状況

最も重要な目標であった DNS を用いたエッジトーンの再現に成功した.特に,ジェットの 流速が比較的早い領域で DNS の計算が可能になったことは大きな収穫である.これにより, エアリード楽器の演奏に使われる比較的流速が早い領域でのエッジトーンの性質を明らかに できると考えられる.今後長時間の解析を行うことで,ジェットの速度と音圧の関係を定量的 に議論できることが可能になり,さらに,Lighthill の音響的類推理論に用いて流体音発生の メカニズムの厳密な解析を行ことも可能であると考えられる.また,DNS を用いた2次元エ アリード楽器の再現も可能であると考えられる.

4. 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] 高橋公也:研究室の窓「管楽器の数理」数理科学 No.651 (2017), pp.69-76.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] <u>S. Iwagami</u>, <u>T. Kobayashi</u>, <u>K. Takahashi</u>, Y. Hattori: Fundamental Mechanism of Fluid-Acoustic Interaction in Edge Tone, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.10-11.
- [3] <u>岩上翔</u>,<u>小林泰三</u>,<u>高見利也</u>,服部裕司,<u>高橋公也</u>:エッジトーンの基礎問題の流体音響解 析 III, 24aPS-76,日本物理学会 2017 年秋季大会,(2017), 岩手大学.
- [4] <u>岩上翔</u>, <u>小林泰三</u>, 服部裕司, <u>高橋公也</u>: エッジトーンの DNS を用いた解析, 第5回非線形 の捉え方, (2018), FIS セミナーハウス, 大分県由布市.

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	J17I006
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

プラズマー生体界面における活性種挙動の大規模数値解析 Numerical Analysis of the Active Species Dynamics between Discharge Plasma and Biological Surface

内田 諭*†, 佐藤 岳彦**†† *首都大学東京理工学研究科, **東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

プラズマー生体界面の研究は、医療応用において臨床レベルに到達しているが、理論的な数値 検証が十分でない.また、細胞膜中における放電活性種の輸送は重要な工程であるが、プラズマ ー生体相互作用を加味した検証は極めて限定的である.ゆえに分子スケールから医療効果を定量 的に俯瞰することは、極めて有意義である.

本研究の目的は、生体膜内における放電活性種の力学的挙動について、分子動力学法(MD) により輸送特性および構造変位を定量的にモデル化することである.具体的には、①放電活性種 を内在する生体膜モデルの構築、②生体膜中における酸素活性種の輸送係数の導出、③活性種投 入量に対する損傷膜の密度変化及び残存分布の推定、④複合細胞膜中の活性種輸送における電界 重畳効果の検証、を行った.

2. 研究成果の内容

作成した DPPC 脂質二重層膜モデルに対して, 電界強度が 0-0.7 V/nm の範囲で電界を印加し, 30 ns の MD 計算を行った. チャネルの形成は電界強度が 0.4 V/nm において陽極側膜界面に存 在する水分子が起点となり生じた(図 1 参照). これは陽極側脂質頭部基が外部電界により対向 し,互いの斥力によって細孔が形成されたためである. チャネル形成時間は電界強度に比例して 指数関数的に減少した.また, 外部電界が増加すると細胞膜の静電ポテンシャルの勾配が増大し, 内部電界も増大した. なお,本条件下では電界強度を大きくしてもチャネル形成までの傾向は同 様であった.



図1:界面の水分子によるチャネルの形成

上記の電界印加特性を踏まえて、電界重畳時における各種放電活性種の膜浸透挙動を解析した. なお、本計算においては活性酸素種を 30 個添加し、0.5 V/nm の電界印加とした. H_2O_2 の輸送 は、細胞膜にチャネルが形成されることで促進された. 親水性である H_2O_2 はチャネル形成時に 外部の水と流入しやすいためである. HO_2 及び OH は H_2O_2 よりもさらに高効率的に細胞膜間へ 輸送された. チャネルの形成は水ー膜界面に滞在する水分子が起点となっているため、多くが界 面に局在化している HO_2 及び OH が浸透しやすいものと推察される.

3. 研究目標の達成状況

今回の研究目標において、これまでに構築した生体膜の数値モデルを用い、電界重畳時における膜中チャネルの形成過程を詳細に模擬し、放電活性種の浸透変化を定量的に検証することにより、所定の成果が得られたと言える.また、本計算センターに実装された分子動力学ソフトウエア(GROMACS)で、より実際的な並列高速計算による大規模膜解析の検証も行えた.ゆえに本研究期間における目標はおおむね達成できたと思われる.

4. まとめと今後の課題

本研究では、生体膜内における放電活性種の力学的挙動について、分子動力学解析における生体膜モデルの構築および高速並列計算による長時間の膜挙動解析の工程を確立し、電界重畳時における生体膜へのチャネル形成や放電活性種の浸透変化を定量的に模擬することができた.今後、これらの成果を早急に論文等にまとめて、幅広い公開を行っていく予定である.

5. 研究成果(*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] <u>R. Imai</u>, <u>S. Uchida</u>, and <u>F. Tochikubo</u>, "Transport Characteristics of Reactive Oxygen Species in Cell Membranes with Molecular Dynamics - Superposition Effect of Electric Field -," *The 33rd International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIII ICPIG)*, Estoril/Lisbon, Portugal, (2017), p. 172.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] <u>S. Uchida</u>: Comprehensive Modeling of Nanointerface between Plasma and Biomolecules with Molecular Dynamics, *The 15th International Conference on Advanced Materials* (*IUMRS-ICAM 2017*), Kyoto, Japan, (2017), C5-I01-003.
- *[3] <u>R. Imai, S. Uchida, F. Tochikubo</u> and T. Sato: Large Scale Numerical Analysis of Reactive Oxygen Species Behavior at Plasma-Biological Interface, *The 17th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2017)*, Sendai, Japan, (2017), CRF-2, pp. 4-5.
- [4] <u>S. Uchida</u>: Numerical Investigation of Interactions between Reactive Oxygen Species and Biological Membrane in Atmospheric Nonequilibrium Plasma with Molecular Dynamics, *70th Annual Gaseous Electronics Conference (GEC2017)*, Pittsburgh, USA, (2017), DT3 1, p. 17.
- [5] <u>今井亮太</u>,<u>内田諭</u>,<u>栃久保文嘉</u>,佐藤岳彦,「分子動力学法を用いた細胞膜間への水チャネル形成による活性酸素種の膜内輸送特性解析」,第65回応用物理学会春季講演会講演予稿集, 東京,(2018),19p-C201-7,07-070.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I008
区分	一般公募共同研究
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	2017.4 ~2018.3
継続年数	2年目

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

山崎 涉*†,下山 幸治**††,本間 翼一*,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・効率的な 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次元浅水流方程式に多 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 を解析解に基づいた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

本稿ではThacker の遡上問題と呼ばれる問題について検討した結果を示す.本問題は放物 面の地形上にある流体が遡上・下降を周期的に繰り返す状態であり,解析解が存在する事か ら,解析解に基づいた MCS による高精度な不確実性解析結果との比較が可能である.図1 に示すように,地形・初期水面の両方に正規分布の不確実性を与えた場合について検討を行 った(図中の破線は平均値±標準偏差を示す).一周期後(1774 秒後)の MCS・PC の解析 結果の比較を図2に示す.解析結果は定性的に一致しており,高精度な不確実性解析が PC においても実現している事が確認できる.図3には一周期中の流れ場の可視化図を示す.こ こで図中の地形・水面はその平均値を,水面上に可視化されたカラーバーは水深の標準偏差 を示し,流体が遡上・下降すると共に標準偏差分布も伝播していく様子が確認できる.得ら れた解析結果からは任意の座標における浸水確率を求める事もでき,この分布も MCS と定 性的に一致する事が確認された.以上の結果より,開発した手法により高精度で高効率に確 率的なハザードマップを作成できる事が示された.





図3: PC による不確実性解析結果の時系列可視化

3. 研究目標の達成状況

当初の予想される成果、として「不確かさ・確率に関するメトリクスが評価できるため、 浸水確率などを考慮した高度なハザードマップの作成が効率的にできるようになる」として いたが、上記の通り確率的なハザードマップ作成が効率的にできる事が示されており、当初 の研究目標としては十分に達成された状況にある.

4. まとめと今後の課題

本研究では、二次元浅水流方程式を用いた津波氾濫流解析に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 による結果は解析解に基づいた MCS の結果と十分に一致しており、高精度かつ低コストな不確実性解析を実現できたと言える. 今後は、開発手法を実際の地形の現実的な問題に適用していき、確率的な指標を含む有益な ハザードマップを提供できるように応用していく.

- 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・ロ頭発表等
- *[1] <u>W. Yamazaki</u>, <u>T. Homma</u>, <u>T. Kato</u>, K. Shimoyama, S. Obayashi: Tsunami Inundation Flow Simulation Considering Bathymetric Uncertainties, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2017), pp.22-23.
- [2] <u>本間翼一</u>,<u>加藤達也</u>,<u>山崎渉</u>,下山幸治,大林茂:不確実性を考慮した津波氾濫流の数値解 析,日本機械学会北陸信越支部第55期総会・講演会 (2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I009
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2017.4 ~2018.3
継続年数	1年目

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

植原 幹十朗*†, 永井 大樹**†† 大塚 啓介* *東北大学工学研究科, **東北大学流体科学研究所 †申請者, †↑所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

共同研究1年目として,流体と構造に焦点を当てたモデリング法の構築を行った.構築したモデリング法を用いた数値解析の妥当性実証の為に,下記の翼展開実験を流体研・低乱熱伝達風洞で行った.実施期間は2017年9月25-29日と2018年2月19-23日である.

2 つの塩ビ板を回転バネ付き蝶番で結合した平板矩形翼を供試モデルとして用いた. 図1に使用した実験系を示す.可変翼は鉛直に配置した.計測は高速度カメラで行った. 図2は流速を変更した場合の展開に要した時間を示す.図3は実験と解析で得られた展開挙動を0.06 sごとに示す.両図において,実験と提案モデルによる解析は良好な一致を示していることから,提案するモデリング法の妥当性が実証できたといえる.

3. 研究目標の達成状況

次世代航空機に搭載される可変翼の設計に役立つ高精度なモデリング法を構築できた.また, 柔軟変形と可変機構を高精度にモデル化できたことから,大型風車を始めとした様々な次世代柔 軟可変構造物に対しても,提案手法の適用可能性が広がったといえる.

4. まとめと今後の課題

本年度は、実験と解析を比較することで、提案する「流体・構造」連成モデリング法の精度を 実証できた.「制御」に関する進捗は、詳細な学術調査の結果、可変機構制御と親和性の高い制御 理論を発見したが、単純な低自由度システムへ適用するのみに留まった.制御と流体・構造の連 成が今後の課題となる.

次年度より航空機制御の専門家であるインペリアルカレッジロンドンの Yinan Wang 博士と可 変翼設計の専門家である流体研の藤田昂志助教が共同研究者として加わることとなったため,今 後はさらなる進捗が見込める.
- 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)
- <u>Otsuka, K., Wang, Y.</u>, and <u>Makihara, K.</u>: Deployable Wing Model Considering Structural Flexibility and Aerodynamic Unsteadiness for Deployment System Design, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 408, (2017), pp. 105-122.
- * [2] <u>Otsuka, K.</u>, and <u>Makihara, K.</u>: Deployment Simulation Using Absolute Nodal Coordinate Plate Element for Next-Generation Aerospace Structures," *AIAA Journal*, Vol. 56, No. 3, (2018), pp. 1266-1276.
 - 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
 - [3] <u>Otsuka, K., Makihara, K.</u>, and Nagai, H.: Deployable Wing Simulation using Flexible Multibody Dynamics, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.160-161.
 - [4] <u>Otsuka, K.</u>, and <u>Makihara, K.</u>: Deployment Simulation Model based on ANCF Plate Element for Next-Generation Aerospace Structures, *SciTech Forum 2018*, Gaylord Palms, Kissimmee, Florida, USA, January 8-12, (2018).
 - [5] <u>大塚啓介</u>,<u>植原幹十朗</u>:展開挙動シミュレーションと空力弾性解析のための展開翼モデル, 第 59 回構造強度に関する講演会,福井,8月 3-5 日,(2017).
 - [6] <u>大塚啓介</u>, <u>植原幹十朗</u>: 低次元化マルチボディ構造モデルを用いた展開翼の空力弾性解析, Dynamics and Design Conference, 愛知, 8月 29日-9月1日, (2017).
 - [7] 大塚啓介, <u>植原幹十朗</u>: 空力弾性変形を考慮したモーフィング翼のマルチボディ解析,日本 航空宇宙学会北部支部 2018 年講演会,宮城,3月 5-6日,(2018).
 - 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし



図3展開挙動(上段:実験,下段:解析)

課題番号	J17I010
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	2017.4 ~2018.3
継続年数	2年目

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

> 小原 拓*†, 芝原 正彦**††, 菊川 豪太* *東北大学流体科学研究所, **大阪大学大学院工学研究科 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

固液界面における輸送現象,とりわけ,熱エネルギーが界面を通過する特性は,MEMS/ NEMS、微粒子が懸濁された液体、生体内の構造など、ナノスケールの液体-固体系が示す 特性を理解し設計するための重要な問題である。マクロな熱流体力学においては、界面にお ける熱輸送特性を定量化するための概念として、界面における温度ジャンプと熱流束との比 として与えられる熱抵抗が広く用いられており、 超雷導マグネットのクエンチなど従来から 存在する応用上の問題に加えて、高発熱機器からの熱回収・放熱問題に関連して、様々な応 用研究が始まっており、これを制御するための TIM(界面熱材料)など関連分野も萌芽期を 迎えつつある。固液界面の熱抵抗では、固体一固体界面とは異なり、固体一液体間で何らか の熱輸送メカニズムにミスマッチを生じることが因子となると考えられているが、その分子 動力学レベルのメカニズムは未だ詳細な検討が行われていない。本研究においては、分子ス 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,ナノ粒子の特性がそれを含有する液体の有効熱伝導率およびエネルギー輸送機構に及 ぼす影響を調べるために、非平衡分子動力学シミュレーション(NEMD)を用いて、ナノ粒 子混合液体のエネルギー伝搬の機構を調べた.(2)では、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)ナノ粒子混合液体 液体分子,壁面およびナノ粒子構成原子には、それぞれアルゴン分子,白金原子を仮定し、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て、非 平衡シミュレーションを行った.本モデルに対して、ナノ粒子の結晶構造、特性スケール、

濡れ性がナノ粒子混合液体の有効熱 伝導率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、圧力やナノ粒子の体積分率を一定 として直径1~3nmの結晶構造のナノ 粒子を混合したアルゴン液体の有効 熱伝導率に対するナノ粒子-液体分子 間相互作用強さ(*a*_n)の影響を示す.図 1より、*a*_nやナノ粒子の特性スケール によって、混合液体の有効熱伝導率が





有意に変化することが分かる.エネルギー流束の内訳を調べた結果より,固液間相互作用が 強くなるとナノ粒子中を通過する流束とともに液体分子中を通過する流束も増加すること が分かった.

(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 ている系にせん断を加え,粘性加熱により液体中に生じた熱エネルギーが固体壁に向かって 固液界面を通過する系に対する分子動力学シミュレーションにより,熱通過と運動量通過の それぞれに対する界面抵抗の特性や,せん断を加えない静止系における界面熱抵抗との比較 検討を行った。図2と図3は液体分子の鎖長を横軸にとってそれぞれ界面運動量抵抗と界面 熱抵抗を示したものである。鎖長の影響は両者で同様であるが、結晶面の影響は異なること がわかる。図4は、同じ固液界面系においてせん断を加えない場合の界面熱抵抗を横軸に、 せん断を加えた場合の界面熱抵抗を縦軸としてプロットしたものである。ほぼ全ての場合に ついて、せん断により界面熱抵抗が増加することが明らかとなった。



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、固液界面の複合的な重畳効果など現在進行中の解析を完遂するとともに、固体表 面構造と固液界面領域の熱抵抗の相関、表面構造スケールの変化が界面熱抵抗に及ぼす影響 などについて、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

- Abdul Rafeq bin Saleman, Hari Krishna Chilukoti, G. Kikugawa, <u>M. Shibahara</u> and T. Ohara: A molecular dynamics study on the thermal energy transfer and momentum transfer at the solid-liquid interface between gold and sheared liquid alkanes, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 120 (2017), pp. 273-288.
- *[2] <u>Y. Ueki, Y. Miyazaki, M. Shibahara</u> and T. Ohara: Molecular dynamics study of thermal resistance of solid-liquid interface in contact with single layer of nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 120 (2018), pp. 608-623.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[3] <u>M. Shibahara</u>, G. Kikugawa and T. Ohara: Mechanism of thermal energy transfer in nanoscale solid-liquid systems, *Proc. of the 17th Int. Symp. Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.74-75.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I011
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

自励振動ヒートパイプの設計高精度化に向けた気液二相流の熱流体解析の応用 Application of Two-Phase Thermo-Fluid Simulation for Accurate Design of Oscillating Heat Pipe

高橋 俊*†,永井 大樹**†† *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

近年様々な用途への展開が図られているヒートパイプの中で自励振動ヒートパイプは入熱部 と放熱部の温度差のみによる外力の必要が無い簡易な駆動源と、管内部の圧力振動を駆動力とし た大容量熱輸送が期待されているが、安定な動作とその作動限界の予測等に困難が残っており、 現在も研究開発が盛んである.そこで本研究では、高精度に性能予測を行うことが可能な二相流 の熱流体数値解析法の開発と、さらにそれを応用した 1D シミュレーションの活用により、高性 能かつ高効率熱輸送デバイスの開発を目指す.

2. 研究成果の内容

ヒートパイプ内部の流動現象を再現するため、気液二相流解析中において接触角を表現する手法の開発と、物体を含む気液二相流の熱流体解析手法を開発した.図1は空気—水(A)と冷媒 R410A(B)の二相流中に物体を配置した際の無次元温度の等温線の時系列の可視化である.0は 壁面平均温度と等しい事を指している.中央の白丸が円柱状物体、下部の黒丸が気泡で、気泡が 流動して物体にぶつかり、熱伝達を促進している様子が確認できる.



図1:管内に置かれた障害物周りの気泡を含む気液混相流内の無次元温度分布

3. 研究目標の達成状況

研究計画では、自励振動ヒートパイプに対する研究は 1D 解析、実験、CFD 解析のいずれかに よる研究事例が多く、これらを統合して多角的な研究を行って、より信頼性に富む結果と実際の 設計に活用できる結果を得ることを目的としていた.図1は CFD 解析により気液二相流中の熱伝 達解析の例であり、このような解析も世界的にも未だ例が少ない状況で、ヌセルト数等の定義や 他者との比較についても実施しようとしているが、実験との比較が難しく定量的な検討には至っ ていない. 今後はそのような比較検証を経て、1D 解析に活かして実際のヒートパイプの設計に活 用する.

4. まとめと今後の課題

自励振動ヒートパイプの高効率,高精度設計を最終目的として,それに資する CFD 解析技術の 開発を行い,接触角表現方法の開発と,二相流中に置かれた物体周りの熱流体解析手法を開発し た.今後は実験との定量的な比較検証により開発した CFD 解析手法の妥当性を示すと共に,1D シミュレーションに活かす知見を得るべく,より実際のヒートパイプにより近い条件での解析を 行う.

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

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] <u>井上拓哉,高橋俊,井出脩太</u>: 熱輸送機器内部における気液二相流の熱伝達予測,第 30回計算力学講演会,(2017).
- [2] <u>T. Inoue, S. Takahashi, S. Ide</u>, H. Nagai: Application of Two-phase Thermo-fluid Simulation for Accurate Design of Oscillating Heat Pipe, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.34-35.
- [3] <u>S. Takahashi, T. Inoue, S. Okazaki, H. Fuke</u>: Prediction of Heat Transfer in a Heat Pipe by Two-phase Flow Simulation based on Conservative Level Set Method, 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, (2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I012
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2年目

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

高山 哲生*†,小助川 博之**††,高木 敏行** *山形大学大学院有機材料システム研究科,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

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

CFRP 中に微粒子を分散させるための多くの試みがなされており,有用な結果が報告されている.しかし,そのメカニズムを理論的に分析した報告はほとんどない.高山らは,不連続ガラス 繊維強化ポリプロピレンに粒径 80nm 程度の炭酸カルシウム粒子を少量分散させることにより, 引張り弾性率が向上することを実験的に明らかにした.さらに高山らはこの力学的特性の向上効 果について説明する理論の構築を試みた.この理論では,微粒子が不連続繊維間に分散しており, 繊維/微粒子間に生じるヘテロ構造を考慮している.この構造の領域では,繊維が占める面積が最 も大きいため、具体的には弾性率が高くなり,結果的に複合材料の弾性率を高める要因となる.

この理論は連続繊維強化プラスチックにも適用可能であると考えられるが、まだ研究されていない.本研究では、昨年度の成果であるナノサイズ粒子が分散した CFRP の機械的特性を高山らによって提案された理論に基づいて分析することで 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

【理論】:不連続繊維とナノ粒子を混合して均一に分散すると、複合材料の弾性率 E は、下記の式(1)で表される.

$$E = E_{p-f} V_{p-f} + E_{p-p} V_{p-p}$$
(1)

ここで, Epf, Eppは, 以下の式(2), (3)で表される.

$$E_{p-f} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left\{ \left(\frac{d_{pi}}{2E_{p}} + \frac{L_{i}}{E_{m}} + \frac{d_{fi}}{2E_{f}}\right) / \left(\frac{d_{pi}}{2} + L_{i} + \frac{d_{fi}}{2}\right) \right\}^{-1}}{n} \qquad (2), \quad E_{p-p} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left\{ \left(\frac{d_{pi}}{E_{p}} + \frac{a_{i}}{E_{m}}\right) / \left(a_{i} + d_{pi}\right) \right\}^{-1}}{n} \qquad (3)$$

Eおよび d は弾性率および直径を意味し,添え字 m, p および f は母相, 粒子および繊維を意味 する. L は粒子と繊維の距離, a は粒子間距離であり, いずれも下記の式(4)で表される.

$$L = \left\{ \left(\frac{\pi}{6V}\right)^{1/3} - 1 \right\} \cdot d_p$$

ここで、Vは繊維あるいは粒子の体積分率を意味する.これらの式において、繊維長分布および 粒度分布はガウス分布であると仮定される.上記の式(1)~(4)によれば、繊維長分布および粒度分 布が一定であれば、d₀および d₆が小さくなるにつれて L および a が減少し、E_{pf}および E_{pp}が増 加する.この効果は粒子径の小さいナノ粒子の分散によって生じると考えられる.

【結果】: 走査型電子顕微鏡 (SEM) によって得られた CFRP の断面像からは,炭素繊維が均一 に分散されず,多量の樹脂を含む領域が存在していた. これは CFRP の弾性率の分布を引き起こ す可能性を示唆している. 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 下記の式 (5) を用いて曲げ弾性率を算出した.

$$EI = 2E_0I_0 + 2E_0A_0h^2 + E_{90}I_{90}$$
 (5)

*I*は断面 2 次モーメントを,*h*は層の厚さを意味する.理論に基づいて計算された曲げ弾性率 は参考文献で報告された実験値(*E*_x)と比較した. CF/T₂₅₀はナノサイズの二酸化チタン(TiO₂)(*D*₅₀ = 250nm)を含む CFRP であり, CF/T₉₀は TiO₂ナノ粒子(*D*₅₀=90nm)を含む CFRP である.ナノ 粒子の濃度は,エポキシマトリックス樹脂中に4 重量%である.ここで,炭素繊維のヤング率は 繊維軸方向を 230GPa,繊維径方向を 6GPa とし,繊維径は 7 μ m,繊維長は 500mm,繊維長の 標準偏差は 35~42.5mm とした.標準偏差は CFRP の弾性率が分布を有することを表すために使

用した.理論に基づいて計算した CFRP の曲げ弾性率の結果を表1に示す.今回 使用した理論による計算結果は実験結果 をよく再現しており、ナノ粒子分散 CFRPの弾性率が説明できたといえる.

表1 ナノ粒子分散 CFRP の曲げ弾性率

(4)

	E ₀ [GPa]	E ₉₀ [GPa]	E [GPa]	Eex [GPa]
CF/EP	85.2	4.2	82.2	82.2±9.7
CF/T250	96.7	4.7	93.3	93.1 ± 2.7
CF/T ₉₀	105.9	5.4	102.9	99.2±6.3

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を理論的に解明できた.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)
- 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
- T. Takayama, H. Kosukegawa, T. Takagi: Theoretical Consideration on Mechanical Properties of Nanoparticle Dispersed Carbon Fiber Reinforced Plastic, *Proc. of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 116-117.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I013
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	2017.4~2018.3
継続年数	3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29年度は、商用炭素繊維の開発者と三菱重工業複合材研究室の方を招いて下記の講 演会を開催し、CFRPの基礎と最先端の応用技術について学ぶ機会を設けた.また、県内の 地元企業2社が進める複合材料関連事業について紹介していただき、本研究会が産業界に貢 献した事例を確認した.

(1) 第七回 CFRP 研究会講演会 ~複合材料の基礎から応用技術まで~

日時: 平成30年1月15日(月) 13:00-17:25

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: 51名

講演:

「高機能繊維強化複合材料とその応用」

(一社)強化プラスチック協会	技術・開発担当部長	角田	敦 兌	七生
「航空機複合材構造の非破壊検査技術」				
三菱重工業(株)	主席研究員	植松	充良	先生
「レーザー微細加工を施した金属と異種材	料の直接接合技術の開発」			
ヤマセ電気(株)	主任技師	佐藤	昌之	先生
「(仮)航空機用 CFRP 部材の自動修復装置	の開発」			
(株)倉元マシナリー	代表取締役社長	菅山	勝美	先生
「CFRP研究会分科会(CFRP評価・検査、	リサイクル)活動について」			

小助川博之(東北大学),佐藤勲征(宮城県産業技術総合センター)

3. 研究目標の達成状況

これまで行った7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,ニーズ側とのマッチングを進め た.「検査・評価」「補修」に関する分野では産学官の共同著者による国際学会での発表と学 術論文執筆やJAXA 航空技術イノベーションチャレンジ(連携フェーズ)への採択など,当研 究会の活動が学術界と産業界の両方に成果となって現れる段階に至った.

4. まとめと今後の課題

本研究会は、平成26年10月に発足したものであり、これまでに7回の講演会と4回の 技術調査会を実施した.「検査・評価」分科会においては、宮城県の受託事業を受けて産学官 連携による共同研究が開始され、学術論文執筆と特許出願にまで至った.今後は対象を CFRPから複合材料全般に拡大し、技術分野を「検査・評価・補修」という保全活動の3技 術に絞り込み、複合材料の高度保全技術を中心に研究会の拡大を進める.さらに、ヨーロッ パとアメリカの研究開発動向の調査を強化し、共同研究を行うなどして、最先端の知識を研 究会にフィードバックできるよう活動地盤の国際化を進める.

5. 研究成果

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

 H. Kosukegawa, <u>R. Yamada, S. Tamonoki, N. Sato, K. Ura</u>, T. Takagi: Nondestructive Evaluation of Hardening Degree of Epoxy Resin in CFRP with Eddy Current Testing, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, **21** (2018), accepted.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] 小助川博之, 高木敏行, <u>山田理恵</u>, <u>佐藤勲征</u>, <u>浦啓祐</u>: CFRP の品質保証に関するラウンドロ ビンテスト -樹脂硬化度-, プラスチック成形加工学会第28回年次大会, 東京, (2017), pp. 223-224.
- [3] Hiroyuki Kosukegawa, <u>Rie Yamada</u>, <u>Noriyuki Sato</u>, <u>Keisuke Ura</u>, Toshiyuki Takagi: Nondestructive Evaluation of Hardening Degree of Epoxy Resin in CFRP with Eddy Current Testing, *22nd International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, Saclay, (2017).

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許) 導電性フィラー強化プラスチックスの樹脂硬化度測定方法,高木敏行,小助川博之,2017.6.13,出願.

(研究会講演会)

[1] 第七回 CFRP 研究会講演会~複合材料の基礎から応用技術まで~, 2018.1.15.

課題番号	J17I014
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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**†† 有田 正志*,大野 武雄***,野田 周一****,李 遠霖* *北海道大学情報科学研究科,**東北大学流体科学研究所 ***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

東北大流体研が持つ低損傷の中性粒子ビームを用いた手法により形成したナノ構造デバイス(抵抗変化メモリ(ReRAM)や量子効果デバイス)を、北大が有する評価技術用いて評価し、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

流体研の独自技術である,中性酸素ビ ームによる酸化物形成法により流体研 において作製された,損傷のない Cu/TaO_x/Pt ReRAM を対象に,北大の 独自技術である,TEM 内その場観察法 により,サンプルの断面からの高解像度 観察を行いながら電気的特性を評価し た.ReRAM 動作を繰り返し評価した TEM 観察結果を図1に,そのときの電 気的特性を図2に示す.40回を越える 繰り返し動作特性を評価し,抵抗変化メ

モリといての動作特性を得た.特性評価が可能で あることは十分確認したが、より安定した動作を 得るためには、サンプル作製プロセスの改善が必 要であることがわかった.

同時に、AI 実現のためのディープラーニング (ニューラルネットワーク)を目指して、 Cu/TaO_s/SiN/Pt 構造の ReRAM による多値のア ナログメモリ動作を検討した.作製した ReRAM デバイスにおいて、正電圧の SET により低抵抗 化した後、負電圧の最大値を段階的に変化させて



図1:TEM 内での繰返し測定評価





測定した I-V 特性を図3に示す.この結果から I-V スイープ測定において,リセット時の最大の負電圧を徐々に増加させることにより,抵抗値が段階的に増大するアナログメモリ動作が得られることを確認した.また,同様に SET 後に,負電圧パルス電圧印加を行ったところ,パルス電圧を増加させることでの抵抗値の段階的な増加することが確認できた.これらの結果より,多値・アナログメモリ動作が得られることが示された.



による多値のアナログメモリ動作

3. 研究目標の達成状況

低損傷の中性粒子ビームを用いた手法により形成したナノ構造抵抗変化メモリ(ReRAM) に対し電子顕微鏡内で、微細ナノ構造を観察しながらの特性評価を行い、評価までは漕ぎ着 けることができた.また、数ナノメートルという TaO_xの抵抗変化層を観察しながらの特性 も得られている.この手法によるこのような微細構造の観察は、世界的にも例がない.加え て、同種構造のTaO_x 系 ReRAM において、昨年度の報告で示したよりは一桁以上広範な抵 抗変化と安定したアナログ可変抵抗特性を得ることができた.加えて、より現実のアナログ 動作のドライブ条件に近いパルス電圧による特性も確認できている.

4. まとめと今後の課題

共同研究が効果的に作用して、微細な ReRAM 抵抗変化層の TEM その場観察・測定を確認した.ただし、特性評価は確認したが、良好な特性を得られたとは言えず、その原因がサンプル作製プロセスにあることを確認しており、改善を始動している.アナログメモリ特性に関しては、ニューラルネット素子実現に向けて寒川研究室と共同して進めていく.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- *[1] <u>R. Ishikawa, S. Hirata, A. T.-Fukuchi, M. Arita, Y. Takahashi, M. Kudo</u>, and <u>S. Matsumura</u>: In-situ electron microscopy of Cu movement in MoO_x/Al₂O₃ bilayer CBRAM during cyclic switching process, *ECS Transactions*, Vol. 80, No. 10, (2017), pp. 903-910.
- [2] Y. Li, R. Katsumura, M. K. Gronroos, A. T. Fukuchi, M. Arita, H. Andoh, T. Morie, and Y. <u>Takahashi</u>: Evaluation of Multilevel Memory Capability of ReRAM Using Ta₂O₅ Insulator and Different Electrode Materials, 2017 Silicon Nanoelectronics Workshop, Workshop Abstracts, (2017), pp. 85-86.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[3] Y. Li, R. Katsumura, M. K. Gronroos, A. T.-Fukuchi, M. Arita, H. Andoh, T. Morie, Y. Takahashi, and S. Samukawa: Realization of Analog Memory using Ta₂O₅ Based ReRAM for the Application of Neural Network, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 50-51.
- [4] <u>李 遠霖</u>, <u>勝村 玲音</u>, <u>Mika Kristian Grönroos</u>, <u>福地 厚</u>, <u>有田 正志</u>, <u>高橋 庸夫</u>, <u>安藤秀幸</u>, <u>森江 隆</u>: 酸素欠陥を導入した Ta₂O₅₋₈抵抗変化型メモリにおける多値動作特性の検討, 応用 物理学会 春季学術講演会, 18p-G203-10 (2018), 早稲田大学.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I015
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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* 渡邉 智昭***, 岩野 耕治*, 高牟礼 光太郎****, Pravin Ananta Kadu****, 長屋 宗馬* *名古屋大学大学院工学研究科機械システム工学専攻, **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 ***名古屋大学大学院工学研究科機械理工学工学専攻 *#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

これまでの本研究グループによる実験研究から、噴流出口に取り付けられたタブなどのヴ オルテクスジェネレータが、非平衡的性質を有すると考えられる噴流発達領域の速度場や温 度場を大きく変化させ、条件により流体の巻き込み量が増大も減少もすることが示された. しかしその三次元構造やスカラ輸送に及ぼす影響は未解明である.そこで本研究では、直接 数値計算により実験と同様の場を再現し、タブにより作られる渦構造の可視化を行った.図 1に、タブ近傍における流線を示す.図より、タブにより生成された縦渦状の渦により周囲 流体成分が噴流に取り込まれること、またスカラが混合されることがわかる.しかしながら、 下流域では明確な縦渦構造が見られないことから、縦渦によるスカラ輸送は出口の極近傍に 限られ、下流域では乱流スカラ輸送が支配的になることが示唆された.



図1: 噴流出口タブ近傍における流線

3. 研究目標の達成状況

昨年度までに、これまで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 見出し、論文や学会で発表した.本年度は噴流の制御に関する有益な知見を得た.このことか ら、本共同研究の最終年度である本年度は、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,非平衡的性質を有する乱流が速度こう配を有するせん断乱流場にも表れる ことを明らかにできた.また,その領域での乱流制御法についての研究も行い基礎的な知見を 得た.このことから,本研究の目的はある程度達成されたと考えられる.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] <u>K. Takamure, Y. Ito, Y. Sakai, K. Iwano</u>, and T. Hayase: Momentum transport process in the quasi self-similar region of free shear mixing layer, *Phys. Fluids*, Vol. 30 (2018), 015109 (12 pages).
- [2] K. Tanaka, T. Watanabe, K. Nagata, A. Sasoh, Y. Sakai, and T. Hayase: Amplification and Attenuation of Shock Wave Strength Caused by Homogeneous Isotropic Turbulence, *Phys. Fluids*, Vol. 30 (2018), 035105 (10 pages).
- [3] <u>K. Takamure</u>, <u>Y. Ito</u>, <u>Y. Sakai</u>, <u>K. Iwano</u>, and T. Hayase: Mass Transport Mechanism in a Spatially Developing Free Shear Mixing Layer, *The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9)*, Okinawa, (2017), TFEC9-1223 (4pages).
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [4] Y. Sakai, Y. Ito, K. Nagata, K. Iwano, T. Watanabe, T. Hayase, K. Takamure, K. Tanaka, and S. Nagaya: Investigation of Non-Equilibrium Turbulence and Its Application to Flow Control (Cases of Inhomogeneous, Anisotropic and Compressible Turbulence), *Proc. of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI-2017), Sendai, (2017), No. CRF-65, pp.136-137.
- [5] <u>K. Takamure</u>, <u>Y. Ito, Y. Sakai</u>, <u>K. Iwano</u>, and T. Hayase: Transition of Local Homogeneity in a Turbulent Mixing Layer, *Proc. of the 14th International Conference* on *Fluid Dynamics (ICFD2017)*, Sendai, (2017), pp.596-597.
- [6] S. Nagaya, K. Iwano, Y. Sakai, Y. Ito, T. Watanabe, and T. Hayase: Direct Numerical Simulation of Planer Turbulent Jet with Chemical Reaction, Proc. of the 14th International Conference on Fluid Dynamics (ICFD2017), Sendai, (2017), pp.434-435.
- [7] <u>長縄 洸佑</u>,伊藤靖仁,酒井康彦,岩野耕治:半デルタ翼形状タブの影響を受けた噴流の発達,日本機械学会東海支部第 67 期総会・講演会,(2018), USB 講演論文番号 310 (2pages).
- [8] 伊藤靖仁, 酒井康彦, 岩野耕治: 半デルタ翼型タブによる軸対称噴流の制御, 日本機械 学会流体工学部門・第4回せん断流分科会, (2017), ロ頭発表のみ.
- [9] 長縄 洸佑,伊藤靖仁,酒井康彦,岩野 耕治,早瀬 敏幸:ボルテックスジェネレータが 噴流の混合・拡散に及ぼす影響解明,第31回数値流体シンポジウム,(2017),USB 講演論 文番号 A06-1 (3pages).
- [10] 長屋 宗馬, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁: 直接数値シミュレーションによる化学反応を伴う二次元乱流噴流に関する研究, 日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集, (2017), USB 講演論文番号 J0520302 (5pages).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

課題番号	J17I016
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	$2017.4 \sim 2018.3$
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すると考えられているものの改質が必要 とされる二次エネルギーであり、かつ常圧でのエネルギー密度は従来の化石燃料に比べて非 常に小さいため、高密度水素として貯蔵輸送を行う必要がある.また、高圧に充填された水 素を安全に運用するためには、水素の引火限界濃度や安全性を十分考慮した水素ステーショ ン設計、ならびに水素脆化や繰り返し応力の発生に基づく材料劣化の影響を考慮した高圧水 素タンクの設計が必須となる.そこで本研究では、高圧水素容器が破壊されたときに付随し て発生する水素ガスの漏えい現象を研究対象とし、材料の構造解析と流体解析を同時に扱う 連成解析手法の開発を目的とする.また、高圧容器の隔壁のき裂破壊時に発生する水素の漏 えい拡散現象を連成解析する計算手法を開発することにより、安全性の高い水素設備の設計 に貢献することを目的とする.

2. 研究成果の内容

本研究では、き裂伝播に伴う水素漏えい現象を二つのステップに分けて解析を行う. 高圧 容器にき裂が発生・伝播するまでの材料側の解析と、き裂伝播後の隔壁から高圧水素が漏え いする流体側の解析の2ステップである.本年度においては材料側の構造体解析には粒子法 の一種である 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,粒子法の一種である Peridynamics モデルによる材料 き裂伝ば解析を実施した.また,3分間高速充填連成解析システムの開発を行い,70MPa 高 圧水素高速充填現象に関する流体-材料連成コンピューティングにより気相状態と材料応 力分布の同時解析が可能となった.

4. まとめと今後の課題



図1 正方形初期欠陥を有する脆性平板に生じるき裂伝ばに関する粒子法解析結果

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

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)

 Jun Ishimoto, <u>Toshinori Sato</u>, <u>Alain Combescure</u>; Computational approach for hydrogen leakage with crack propagation of pressure vessel wall using coupled particle and Euler method, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 42, Issue 15, (2017), Pages 10656-10682, ISSN 0360-3199, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.161.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Jun Ishimoto, <u>Toshinori Sato</u> and <u>Alain Combescure</u>: Computational study for dynamic crack propagation in pressure vessel wall with hydrogen leakage using coupled particle and Euler method, *Proceedings of the Fifth International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures (CFRAC 2017), 14-16 June 2017, La Cité, Nantes Events Center, Nantes, France, (2017). [in USB memory]*
- [2] Jun Ishimoto, <u>Toshinori Sato</u> and <u>Alain Combescure</u>: Coupled Computing of Hydrogen Leakage with Crack Propagation Using Hybrid Particle and Euler Method, *Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Nov. 1, 2017, Sendai International Center, Sendai, Japan, (2017).
- [3] 石本 淳, <u>佐藤寿則</u>, <u>Alain Combescure</u>: 高圧タンクのき裂伝ばを伴う水素漏えい現象に関 する粒子法-オイラー連成コンピューティング, 第64回理論応用力学講演会プログラム, 2017 年 8 月 22 日 (火) ~24 日 (木), 機械振興会館 (東京都), (2017).
- [4] Jun Ishimoto, <u>Alain Combescure</u>; Coupled Analysis of High-Density Hydrogen Safety Managemen, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.98-99.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I018
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

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

山田 昇*†,小宮 敦樹**††,岡島 淳之介** *長岡技術科学大学工学部,**東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

初年度は、光マイクロモータ周りの速度場を把握するため PIV による可視化を実施した. また、温度場、濃度場を可視化するための干渉計の設計と一部立ち上げを行った. 図1(左) に平均粒径1ミクロンのシリカ粒子を分散させたアセトン液中で回転する光マイクロモータ の様子を示す(回転数は31rpm).この動画を PIV 処理して得られた速度場を図1(右)に 示す.これより、本条件における速度境界層厚さは 10 ミクロン程度であることが明らかと なった.図2に、小宮准教授らと共同で設計した温度場・濃度場可視化計測システムの概要 と計測結果のイメージを示す.現在、次年度での可視化実施に向けて、組立を行っている.



図1:シリカ粒子を分散したアセトン中で回転する光マイクロモータ(左) PIV 処理結果(右)



図2:温度場・濃度場可視化計測システムの基本構成と計測結果のイメージ

3. 研究目標の達成状況

本研究の実施により、光マイクロモータの駆動原理を流体科学的にはじめて明らかにする ことを目標としており、今年度は PIV による速度場の可視化と定量化ができた点において、 有意義な成果が得られた.本結果を流体解析結果と比較・考察することにより、マイクロ流 体デバイス中での物質の高速攪拌等への指針を得ることが期待できる.

4. まとめと今後の課題

新たなマイクロ流体デバイスである光マイクロモータについて、モータ近傍の速度場を PIVにより可視化できた.また、温度場、濃度場の可視化に向けたシステム設計を実施できた.次年度は、温度場、濃度場の可視化を行い、駆動原理と熱流体挙動の解明に繋げる.

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

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- Noboru Yamada, Vuong Van Thai, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama: Development of Light-driven Micro/Nano Fluidic Devices, Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information, (AFI2017), Sendai International Center, November 2, (2017), CRF-80. pp.166-167.
- [2] Vuong Van Thai, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama, <u>Noboru Yamada</u>: Fabrication and Test of Light-driven Micromotor for Microfluidic Devices, *The 14th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2017)*, The 13th International Students / Young Birds Seminar on Multi-scale Flow, Sendai International Center, November 1, (2017), OS17-7.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I0022
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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、衝撃波が細 胞に及ぼす影響を明らかにすることである.

2. 研究成果の内容

閉鎖空間内において微小爆薬で発生させた衝撃波の挙動については模擬モデルを用いた光 速度撮影,圧測定で一定の知見を得ることができた.

3. 研究目標の達成状況

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,細胞培 養系を模擬した環境における高速度撮影に関する基礎的な知見を得ることができた.

4. まとめと今後の課題

実細胞培養内での高速度撮影は細胞培養環境の最適化と閉鎖空間内での衝撃波の反射や 透過の制御とのトレードオフとなるため、撮影条件、材質条件など解決することが課題であ り、可視化および圧測定について引き続き検討を行う.

5. 研究成果(*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] <u>A. Nakagawa</u>, K. Ohtani, <u>R. Armonda</u>, <u>H. Tomita</u>, <u>A. Sakuma</u>, <u>S. Mugikura</u>, <u>K. Takayama</u>, <u>S. Kushimoto</u>, and <u>T. Tominaga</u>: Primary blast-induced traumatic brain injury: lessons from lithotripsy, *Shock. Waves*, 27 (2017), pp. 863-878.
- *[2] <u>A. Nakagawa, T. Kumabe, Y. Ogawa, T. Hirano, T. Kawaguchi</u>, K. Ohatni, <u>T. Nakano, C. Sato, M. Yamada, T. Washio, T. Arafune, T. Tsujita, A. Konno, S. Satomi, K. Takayama, and <u>T. Tominaga</u>: Pulsed laser-induced liquid jet: evolution from shock / bubble interaction to neurosurgical application, *Shock. Waves*, 27 (2017), pp. 1-14.</u>
- [3] <u>A. Nakagawa, T. Kawaguchi</u>, K. Ohtani, and <u>T. Tominaga</u>: Biological effect of shock waves: Mechanism of blast-induced traumatic injury to medical application, *Proc. of 31st International Symposium on Shock Waves (ISSW31)*, (2017), #SBM000434 (Invited).
- [4] K. Ohtani, T. Ogawa, <u>A. Nakagawa</u>, <u>K. Nakagawa</u>: Underwater Shock Wave by Explosion in a Closed Space, *Proc. of 31st Int. Symp. on Shock Waves (ISSW31)*, (2017), #SBM000087.

- [5] Y. Takahashi, M. Iwasaki, A. Nakagawa, S. Sato, N. Nakasato, and T. Tominaga: Predicting Tissue Breaking Strengths in the Epileptic Brain with T2 Relaxometry: Application of Pulsed Water Jet Dissection System for Epilepsy Surgery, J. Neurol. Surg. A. Cent. Eur. Neurosurg, 78 (2017), pp. 561-565.
- [6] Y. Kamiyama, S. Yamashita, A. Nakagawa, S. Fujii, K. Mitsuzuka, Y. Kaiho, A. Ito, T. Abe, T. Tominaga and Y. Arai: The Piezo Actuator-Driven Pulsed Water Jet System for Minimizing Renal Damage after Off-Clamp Laparoscopic Partial Nephrectomy, *Tohoku. J. Exp. Med*, 243 (2017), pp. 57-65.
- [7] <u>H. Endo, T. Endo, A. Nakagawa, M. Fujimura</u>, and <u>T. Tominaga</u>: 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. Rev*, 40 (2017), pp. 485-493.
- [8] <u>A. Nakayashiki, T. Kawaguchi, A. Nakagawa, M. Sato, F. Mochizuki, T. Endo</u>, and <u>T. Tominaga</u>: Water Veil Effect to Control Splashing from the Pulsed Water Jet Device: Minimizing the Potential Risk of Dissemination Using Surgical Aspirators, *J. Neurol. Surg. A. Cent. Eur. Neurosurg*, (2018), [Epub ahead of print].
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [9] K. Ohtani, <u>A. Nakagawa</u>, <u>K. Nakagawa</u>: Explosive-induced shock wave propagation phenomena in the simulated biomedical materials, *2nd Japan-USA Technical Information Exchange Forum on Blast Injury (JUFBI 2017)*, Hotel Grand Hill Ichigaya, (2017) pp.63-64 (Invited).
- [10] <u>A. Nakagawa</u>, K. Ohtani, and <u>T. Tominaga</u>: Mechanism of shock wave propagation within the cell: Experimental model, *Proceedings of 17th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2017)*, Sendai, (2017), #CRF-61, pp.128-129.
- [11] <u>A. Nakagawa</u>, K. Ohtani, <u>K. Takayama</u>, and <u>T. Tominaga</u>: Mechanisms of Primary Blast-Induced Traumatic Brain Injury: Insights from 30 years of Shock-Wave Research at Tohoku University, *the 6th International Symposium on Energetic Materials and their Applications*, Sendai, (2017), #003-4, pp.30.
- [12] K. Ohtani, T. Ogawa, <u>A. Nakagawa</u>, <u>K. Nakagawa</u>, Underwater shock wave generation phenomena by detonating a micro-explosive in a closed space, *the 6th Int. Symp. on Energetic Materials and their Applications (ISEM2017)*, Sendai, (2017), #P-41, pp.163.
- [13] <u>A. Nakagawa</u>, K. Ohtani, <u>A. Sakuma</u>, <u>M. Yagihashi</u>, <u>C. Nakanishi</u>, <u>H. Karasawa</u>, <u>S. Yamashita</u>, <u>N. Matsui</u>, <u>Y. Terui</u>, <u>S. Kudo</u>, <u>A. Saito</u>, <u>S. Inoue</u>, <u>K. Furuya</u>, <u>T. Tsujita</u>, <u>A. Konno</u>, and <u>T. Tominagal</u>: Blast-induced traumatic brain injury: Clinical features, Mechanism, and Prevention, *ACDT*, Tokyo, (2017).
- [14] 大谷清伸, <u>中川敦寛</u>, <u>中川桂一</u>, 小川俊広: 閉空間内微小爆薬起爆による水中衝撃波発生挙動, 平成 29 年度衝撃波シンポジウム, 横須賀, (2017), #1C3-3.
- [15] 大谷清伸, <u>中川敦寛</u>, <u>中川桂一</u>, 小川俊広: 閉空間内微小爆薬起爆による水中衝撃波発生挙 動解析, 火薬学会 2017 年度春季研究発表会, 青山学院大(青山), (2017), #53, pp.146-149.
- [16] 大谷清伸, <u>中川敦寛</u>, <u>中川桂一</u>, 小川俊広: 金属管内起爆による衝撃波増幅効果に関する研究, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, 北大, (2017), #0426, pp.307-311.
- [17] 大谷清伸,小川俊広,<u>中川敦寛</u>,<u>中川桂一</u>:水中閉空間内衝撃波増幅効果に及ぼす金属円管 内径の影響,高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2017,東海大 学,(2017),#9-1.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I023
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2017.4 ~2018.3
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

高橋 俊*†,大林 茂**†† *東海大学工学部,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

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,風洞実験と数値解析 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 して風洞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.

2. 研究成果の内容

レベルセット法と埋め込み境界法の応用により、図1のように多数の微粒子が物体に衝突する 流れ場の数値流体解析を行い、ショットピーニング加工時の流れ場の再現に取り組んだ.この解 析では微粒子の大きさを数ミクロン程度、気流速度を約10メートル毎秒程度を仮定している.こ の解析により、加工面におけるカバレッジ分布(粒子の衝突痕の分布)も得られており、現在実 験との比較検証を行う段階である.これにより、加工物への衝突において解析と実験で整合性が 取れた場合、世界的にも先駆的な研究結果となると考えられる.

3. 研究目標の達成状況

移動物体に関する非定常流体現象の解析手法を構築し、相対移動する物体周りの流体場の研究 手法を開発した.高レイノルズ数、複雑形状への対応については今後の適用性の検討が必要にな るが、低 Re 数における多数の物体周りの解析に関しては大規模解析を応用して工学問題に応用 することが出来ることを示した.

4. まとめと今後の課題

移動物体を含む非定常流体の解析手法を構築し、ショットピーニングを模擬した多数微粒子周 りの流れ場の解析を行った. 今後は得られた解析結果と実験値の定量的な比較検証を行う必要が あり、現在実験データの取得に務めている. また解析手法の今後については、さらに高レイノル ズ数における移動物体解析に応用するため、レベルセット関数に基づいた壁関数による乱流解析 法を本解析手法に導入し、回転機械周りの乱流解析を目指す.



図1:ショットピーニングを模擬した数千個の微粒子が平板と衝突する流れ場の解析 (微粒子と後流に生じる渦のQ値による等値面の可視化図)

5. 研究成果(*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] <u>Y. Mizuno, T. Inoue, S. Takahashi, K. Fukuda</u>: Investigation of a Gas-particle Flow with Particle-particle and Particle-wall Collisions by Immersed Boundary Method, *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, Volume 6, Issue 1 (2018), pp. 132-138.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] Y. Mizuno, Y. Hamagata, Y. Goda, S. Takahashi, K. Fukuda and S. Obayashi: Study for Accurate Prediction of Unsteady Aerodynamic Characteristics around Moving Objects, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.142-143.
- [3] <u>T. Kubota, Y. Mizuno, S. Takahashi, K. Nakashino, K. Fukuda</u>: Flow-Structure Simulation of Shot Peening and Related Phenomena using FEM-IBM Coupling Method, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J17I025
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	2nd 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 (2018 year) is adaptation and transferring developed technology from laboratory samples to the industrial detail and experimental study of properties of these coatings obtained under optimal technological regime of plasma electrolytic oxidation.

2. Details of program implement

During the last year 2017, the research was focused on the 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.

We have investigated the influence of the concentrations of a salt of the bivalent elements, entered into alkaline-silicate solution (optimal solution containing 2 g·l⁻¹ NaOH, 7 g·l⁻¹ technical water glass ($7Na_2O \cdot 2.9SiO_2 \cdot 9H_2O$ (TWG)) with addition of 1-4 g·l⁻¹ Co(NO₃)₂; 1-4 Cu(OH)₂;), on the structure, morphology, corrosion resistance, porosity, microhardness, wear resistance, and surface roughness of the coatings synthesized by PEO on the samples made of pure aluminum and commercial 2024 aluminum alloy.

From the experimental data it follows that that small addition (less than $4 \text{ g} \cdot 1^{-1}$) of salt of bivalent elements (Co, Cu) into the base electrolyte by PEO do not significantly change phase composition; do not prone the wear resistance of the inner layers of the coatings obtained on commercial 2024 aluminum alloy. It is indicated that alloying coatings based on aluminum oxide with cobaltous and copper oxides reduces thickness of the outer porous layer of the coating formed on commercial 2024 aluminum alloy.

3. Achievements

Based on provided results, the novel method of coating sintering with high tribological properties, hardness, corrosion resistance and small thickness of the outer porous layer is developed. This method might be successfully applied for the industrial products. Therefore, further research will be carried out in year 2018.

4. Summaries and future plans

It is well known that adaptation and transferring developed technology from laboratory samples to the industrial detail is a complex process that requires a range of experiments and, at some stages, strong modification. Based on the results of the previous (2016,2017) years, future plan of research is following:

i) to form the coating on the surface of industrial details using optimal solutions (to adapt it to industrial details);

ii) to study the structure, morphology, corrosion resistance, porosity, microhardness, wear resistance, and surface roughness of the coatings obtained under optimal technological regime of PEO on industrial details;

iii) to develop a methodology for wear-resistant coating formation and apply it to industrial details made of the functional materials.

The most important results will be prepared and published in per-reviewed journal of Web of Science/Scopus base.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1. Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] S. Tailor, <u>A. G. Rakoch, A. A. Gladkova</u>, P. V. Truong, D. M. Strekalina, G. Sourkouni, S. Y. Manjunath, and T. Takagi: Kinetic Features of Wear-Resistant Coating Growth on Ti-Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation, *Surface Innovations*, 6 (2017), (9 pages).
- 2. International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [2] <u>A. A. Gladkova, V. V. Khovaylo, A. G. Rakoch</u>, N.A. Predein, Phan Van Truong, Hiroyuki Kosukegawa, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi: Influence of Bivalent Alloying Elements of Alloys on Tribological Properties of Protective Coatings Formed on Functional Materials by Plasma Electrolytic Oxidation, *Proceedings of XVII International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2017), pp.90-91.
- 3. Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I026
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	2nd year

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

Akihiro Hayakawa*†, Simone Hochgreb**†† *Institute of Fluid Science, Tohoku University **Department of Engineering, University of Cambridge †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Temperature is an important parameters in combustion. In order to achieve high combustion load in combustor, combustion operates in high pressure environment. Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS) is a promising laser diagnostics for quantitative temperature measurements of flames at high pressure.

Nitric oxide (NO) is potential target for the purpose of flame structure measurements using LITGS. In this study, temperature measurement in LITGS was employed to non-reacting NO/N_2 mixture and reacting flow.

2. Details of program implement and achievement

LITGS optics for NO was developed. An Nd:YAG laser (Spectra-physics, GCR-250, laser energy was 300 mJ, 355 nm) and a dye laser (Sirah, PrecisionScan) were employed to obtain the laser with the wavelength of 226.298 nm for NO excitation. The laser beam was separated by a 50/50 beam splitter and the beams were introduced to a plano-convex lens having 1000 mm focal length. A CW semiconductor laser (Omicron, BrixX445-2500, wavelength: 445 nm) was used as the probe beam. The diffracted signal was detected by a photo multiplier tube (PMT, Hamamatsu photonics, R928). The LITGS signal was acquired by a digital oscilloscope with 20 GS/s and 500 MHz bandwidth.

First of all, NO-LITGS experiments using a high pressure cell was conducted. NO concentration was varied from 305 - 30000 ppm and the pressures inside the cell were set to 0.1, 0.3 and 0.5 MPa. Figure 1 shows the derived temperature in terms of NO concentration and pump energy. The derived temperature increased with an increase in NO concentration but the change in derived temperature was small in pump energy within the examined conditions of NO mole fraction.



Figure 1: Derived temperature in terms of NO concentration (left) and pump energy (right)

The NO-LITGS technique was applied to the laminar flames. In order to produce NO in the burnt gas, CH₄/NH₃/Air flames were employed. Strain stabilized laminar flame was employed in this study. Equivalence ratio was set to 0.9 and the ammonia concentration in the fuel was set to 0.1, so 10 % of the total heat is generated from ammonia. The pressure was 0.5 MPa. The left figure of the Fig. 2 shows the schematics of the burner configuration used in the study. The right figure of the Fig. 2 shows the obtained signal from the burnt gas region. Although the signal from burnt gas was acquired, the derived temperatures were different from an expected flame temperature because of low signal-noise ratio of the signal.



Figure 2 : Schematic of experimental setup (left) and LITGS signal from the flame (right)

3. Summaries and future plans

NO-LITGS signal was acquired from NO/N_2 mixture and $CH_4/NH_3/Air$ flames. As for the future plan, the combustion experiments will be performed at atmospheric pressure using bigger burner to generate larger volume of the burnt gas.

- 4. 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: Non-intrusive Temperature Measurement using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS) and Its Development, *the 3rd workshop of the Ensemble Project for Young Researchers in Tohoku University*, Sendai, (2017) (in Japanese).
- [2] A. Hayakawa, <u>S. Lowe</u>, T. Yamagami, K. Takeuchi, T. Kudo, <u>Y. Gao</u>, <u>S. Hochgreb</u>: Quantitative Measurement of Temperature using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy with OH or NO excitation, *Gordon Conference - Laser Diagnostics in Combustion -*, United States, (2017).
- *[3] A. Hayakawa, <u>S. Lowe</u>, T. Yamagami, T. Kudo, <u>Y. Gao</u>, <u>S. Hochgreb</u>: Quantitative Measurements of Temperature using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy with Resonant Excitation of Nitric Oxide, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 14-15.
- [4] A. Hayakawa, T. Yamagami, K. Takeuchi, Y. Higuchi, S. Lowe, Y. Gao, S. Hochgreb, H. Kobayashi: Quantitative Temperature Measurement of Oxygen Enriched CH₄/O₂/N₂ Premixed Flames at High Pressure by using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy, *The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences* Northern Branch 2018 Annual Meeting and the 19th Symp. on Propulsion System for Reusable Launch Vechicles, Sendai, (2018), JSASS-2018-H011 (in Japanese).
- 3) Patent, award, press release etc.

(Award) Good poster award, "Non-intrusive Temperature Masurement using Laser Induced Thermal Grating Spectroscopy (LITGS) and Its Development", Akihiro Hayakawa, July 3, 2017, the 3rd workshop of the Ensemble Project for Young Researchers in Tohoku University (in Japanese).

Project code	J17I029
Classification	General collaborative research
Subject area	Foundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

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

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

1. Purpose of the project

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

In this project, an applicability of cntTSP to 'dynamic' wind tunnel tests is investigated. The wind tunnel test is conducted in the low-turbulence heat-transfer wind tunnel facility in Tohoku University. A robot manipulator is used for making continuous model motions (pitch-angle sweep in this test). In the test, several parameters such as a model sweep speed are investigated for optimizing the use of cntTSP in the dynamic wind tunnel tests.

2. Details of program implement

Evaluation of the cntTSP sensor on a model in continuous pitch-sweep tests was conducted in Tohoku University. The model was a simplified airplane configuration featuring wings with NACA0012 airfoil profile (prepared by DLR). The cntTSP sensor was applied on the suction side of the airfoil. Due to a trouble of the robot manipulator, a remote rotating stage was used for making the required model pitch-angle sweep motion (Figure 1).

Figure 2 shows one visualization result of the surface heat transfer distribution which is generated by the boundary-layer transition. Two different test cases, the pitch-fixed test (left) and the pitch-sweep test (right), are compared in this result. A model pitch angle is +5 degrees and the sweep speed is +0.25 degrees per second with a flow speed of 25 m/s. The flow is coming from the left side and the wing tip is situated on the bottom of the image. In the images the darker areas towards the trailing edge of the wing indicate a higher heat transfer, which is caused by the turbulent flow. The cntTSP works well in the pitch-sweep test as well as the pitch-fixed test. The positions of the boundary-layer transition (change from lighter areas on the leading part of the wing and darker areas on the trailing part) are comparable in both results. The transition position in this case is not straight along the span due to interactions with the model fuselage and wing tip vortex.





Figure 1: Setup of the model

Figure 2: One example of the obtained result

3. Achievements

The wind tunnel test was successfully finished and results more than expected were obtained. Especially the influence of the sweep direction and time response of the sensor were very important knowledge for future applications. Base on the knowledge from this test, several industrial applications of cntTSP sensor are under discussion in DLR.

4. Summaries and future plans

The purpose of the project in 2017 was fully achieved.

From 2017 activities, three major technical interests arose;

[1] Further improvement of CNT heating layer for lower resistance and more homogeneous heating distribution. Optimization of the sensor thickness for fast time response.

[2] Possibility of detection of separation bubble, separation point, transition point and reattachment point

[3] Quantitative surface heat transfer measurement.

To investigate above interests, we will continue the cooperation of Tohoku University and DLR in this research field.

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

Project code	J17I030
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	2nd 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**†† *Graduate School of Science and 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. Solutions are 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 appearance of such a solution. A standing wave is trapped in the cavity domain and there is no radiation of acoustic energy "to infinity".



Figure 1 : Trapped mode in a cavity-pipe system. The velocity potential is shown.

3. Achievements

We have found that for a shallow cavity and for low values of the circumferential mode number m there is just one trapped mode in the allowable wave number domain, and this mode is symmetric about a radial axis in the center of the cavity. By increasing cavity depth (i.e. increasing cavity radius) additional trapped modes come into play. Contrary to the first trapped mode, the second trapped mode is antisymmetric about a radial axis in the center of the cavity. When a third trapped mode comes into play, by increasing the cavity radius yet further, it is again symmetric, a fourth mode is antisymmetric, and so on. Increasing the circumferential mode number m has a similar effect (see Fig. 2).



Figure 2 : Appearance of trapped modes for increasing value of the circumferential mode number *m*. From bottom to top: m = 1, 2, 3, 4, 5, 6. The allowable wavenumber domain is 0 < s < 1. Each 'peak' in the graphs corresponds to a trapped mode.

4. Summaries and future plans

In the continuation of this work we wish to give analytical proofs of the numerical findings. Following this, interaction with an oscillating shear layer in the cavity domain will be studied.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] <u>M.A. Langthjem</u>, M. Nakano: A combined analytical and numerical analysis of the flow-acoustic coupling in a cavity-pipe system, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics.*, Accepted for publication (2018), (30 pages).
- [2] <u>M.A. Langthjem</u>, M. Nakano: Acoustic trapped modes in a cylindrical expansion chamber-pipe system, Submitted for international publication, (2018), (25 pages).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[3] <u>M.A. Langthjem</u>, M. Nakano: Interaction between Self-Sustained Flow Oscillations and Trapped Acoustic Modes, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2017), pp. 474-475.
- [4] <u>M.A. Langthjem</u>, M. Nakano: Theoretical and experimental study of flow stability, flow controllability, and trapped acoustic modes in cylindrical expansion chamber-pipe systems, *Proceedings of the Seventeenths International Symposium* on Advanced Fluid Information, (2017), pp. 178-179.
- [5] <u>M. A. Langthjem</u> and M. Nakano: Acoustic trapped modes in a cylindrical expansion chamber-pipe system, *The 37th Ryuriki-souon (flow-induced sound)* symposium, Tokyo, 11 December (2017).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J17I031
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

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

渡邉 力夫*†,小林 秀昭**†† *東京都市大学工学部,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

水/液体窒素ロケットエンジンにおける推進剤噴霧には、微粒化特性と噴霧分散特性に優 れているファンスプレイノズルを利用している.本年度は貴研究所「高圧環境噴霧試験装置」 を使用し、2017年12月4日から7日にかけて噴霧観測実験を実施した.噴霧の可視化には 高速度ビデオカメラによるバックライト撮影法により行った.水の温度が飽和温度以上であ る過熱水をノズルより噴射する場合、液体中の微小気泡がノズル噴出口付近で急速に膨張し 破裂する減圧沸騰現象が起こり、噴霧形態に大きな影響を与える.そのため、ノズル噴出口 付近の拡大撮影を実施することにより、噴流内気泡の状態を観察することとした.実験パラ メータとしては、噴射圧力、雰囲気圧力、水温度をとり、それぞれ表1に示す条件を設定し た.また、水温度も過熱状態となる温度まで昇温した.

噴射圧力P _i , MPa	$0.6 \sim 1.6$
雰囲気圧力Pa, MPa	$0.3 \sim 0.7$
水温度Tw, K	373 ~ 423

表1:試験条件

図1に代表的な可視化結果を示す.今回使用したファンスプレイノズルは正面から見る と扇状に噴流が拡大する噴霧となるが、横から観察すると薄くて一様な平面噴流となる.し かしながら、平面噴流(液膜)は液体の表面張力や剪断力に起因する波面不安定性により波 面が変動し最終的に噴流の微粒化へつながる.図1は噴射圧力と雰囲気圧力の差圧がすべて 一定の噴流のうち、縦方向に噴射圧力を、横方向に水温を変更した場合の典型的な噴流可視 化写真を示している.噴射圧力が高いほど、また水温が高いほど液膜変動の程度が強くなり、 噴流が拡散している.これは噴射の微粒化がより促進されることを意味し、推進剤同士の接 触界面における伝熱促進につながる.特に水温が 423 K の時は噴流液膜の幅も広くなり、よ り拡散している.また、ノズル出口付近から大きな液塊が噴出している様子が観察されるが、 これは噴流内気泡が瞬間的に膨張する減圧沸騰現象である.このように、高温かつ高圧な噴 射においては噴流がより拡散されて微粒化が促進されていることがわかる.



図1:ファンスプレイノズルから噴射される高温過熱水の噴霧様態(横から撮影)

3. 研究目標の達成状況

高圧過熱水をスプレイノズルから高圧下に噴射した場合の噴霧形態の観測をすることができ、噴射圧力や雰囲気圧力の影響を明らかにすることができた.また、水温が高い場合にはノズル噴射孔付近での減圧沸騰現象が顕著になることがわかった.液体窒素の噴射に関しては設備構築ができず研究を実施出来なかった.

4. まとめと今後の課題

今年度の流体科学研究所における噴霧観測実験結果から、過熱水噴霧の噴霧様態に対する 温度の影響を明らかにすることができた、今後はさらに実験を重ね、温度の影響をモデル化 し、噴霧様態解析に適用する.

- 研究成果(*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- <u>R. Watanabe</u>, <u>D. Tsuchida</u>, <u>T. Tanaka</u>, H. Kobayashi: Spray Characteristics of High-temperature Water Jet Injected from a Fan Spray Nozzle, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), CRF-84, pp. 174-175.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I032
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目(発展)

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

長谷川 裕晃*†,大林 茂**†† 瀬尾 和哉***,川端 鷹亮*,前田 龍生* *宇都宮大学大学院,**東北大学流体科学研究所,***山形大学 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

本研究は、スキージャンプスーツ生地を対象とする.これまでの研究成果として通気量を 規定値よりも大きくすることで失速角の後退が確認することができた.しかし、通気量を変 えたことによる生地表面での流れ場に関してはまだよくわかっていない.そこで、通気量を 変えた生地を用いて空力特性と通気量の関係を明らかにする.

2. 研究成果の内容

図1は、生地を巻き付けた楕円柱の揚力係数曲線である. 通気量はそれぞれ Case-1:43.4, Case-2:58.2, Case-0:0.0 (単位:L/m²・s) であり、通気量を増加させることで失速角が後退する. 図2は、熱線流速計により取得した生地表面近傍の速度プロファイルである. 左は Case-0, 右は Case-2 であり、生地の通気量が増加することで、生地表面近傍では流れの増速が見られる. これは、楕円柱と生地の間を通った流れの影響が予測される. そのため、生地表面近傍の流れを煙で可視化した. ただし、低乱風洞では煙の使用が不可だったので、この実験は宇都宮大学の風洞で、小型の模型を製作し確認した. 迎角 $\alpha = 0^{\circ}$ のとき、楕円柱前縁部分で発生させた煙が通気性の無い Case-0 では生地に沿って流れる様子がみられるが通気性のある Case-2 ではみられなかった. これは生地の通気性によって生地と楕円柱の間に流れが流入した結果によるものである. このように生地内部に入り込んだ流れが表面に流出することによって、楕円柱上面の流れに影響を及ぼす. そのため、通気量を増加させることにより失速特性に違いが見られた.



図1: 揚力係数曲線(横軸は迎角 a,縦軸は揚力係数 CL)



図2:生地表面近傍の速度プロファイル(c:楕円長軸長さ,迎角 α = 30°)

3. 研究目標の達成状況

通気量を増加させた生地を被せることで、生地と物体の間に入った流れが物体表面に流れ 出て境界層の状態を変えるという流体現象が失速特性に影響することを明らかにできた.ス キージャンプ競技における飛距離延伸の可能性を示唆する結果が得られたことを考慮する と、目標は概ね達成できている.しかし、スキージャンプ競技としてはスタートから踏み切 りまでも考慮した全フライトにおいての通気量と飛距離の関係を結論付けるには、まだ不十 分である.そのため、生地の通気量を部分的に変え、迎角の違いでの通気量の影響を詳細に 調べる必要がある.

4. まとめと今後の課題

本研究では、生地の通気量が異なることで楕円柱周りの流れ場にどのような影響を及ぼす かを調べた。しかし、生地の通気量が同じ場合でも、再現性に問題があった.これは、実験 を行うごとに生地を取り換える必要があり、前回の実験と生地の付け方が僅かに変わってし まうからだと考えられるため、その改善を行う必要がある.また、これまで流体力測定では 揚力と抗力の測定を行ってきたが、飛距離計算にはモーメントも考慮した方がより正確にな る.そのため、今後はモーメントについても取得・評価も行っていく予定である.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- [1] Y. Kawabata, H. Hasegawa, M. Murakami, K. Seo and S. Obayashi: Effect of Air Permeability of Ski Jumping Suit on Aerodynamic Characteristics, 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Kanazawa, (2017).
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[2] <u>R. Maeta, Y. Kawabata, H. Hasegawa, K. Seo</u> and S. Obayashi: Study of Ski Jumping Suit of Different Air Permeability on Aerodynamic Characteristics, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.144-145.
- [3] <u>前田龍生</u>,<u>川端鷹亮</u>,<u>長谷川裕晃</u>,<u>村上正秀</u>,大林茂:スキージャンプスーツ用生地の通気 量が空力特性に及ぼす影響,スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017, 金沢, (2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(マスコミ発表)朝日新聞「スキー大ジャンプの謎」2018.1.25.

Project code	J17I033
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	2nd year

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

Hidemasa Takana*†, Hideya Hishiyama* Marien Simeni Simeni**, Edmond Baratte**, Igor Adamovich**†† *Institute of Fluid Science, Tohoku University **Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Ohio State University †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Provide quantitative insight into mechanisms of formation and development of transient plasmas generated by high voltage, ns pulse duration electric discharges in air and in a hydrogen diffusion flame. Such insight is critical to predictive analysis of plasma-assisted combustion applications.

2. Details of program implement

Time-resolved electric field in ns pulse discharge plasmas generated in room air and in an atmospheric pressure hydrogen diffusion flame has been measured by ps four-wave mixing, for plane-to-plane electrode geometry, with sub-ns time resolution. The results have been presented at 14th Int. Conf. on Flow Dynamics, Sendai, Japan: I.V. Adamovich, and at 17th Int. Symp. on Advanced Fluid Information,: M. Simeni Simeni, E. Baratte, C. Zhang, K. Frederickson, I. Adamovich, H. Takana, and H. Nishiyama.



Figure 1 : Pulse voltage waveforms and electric field in the discharge in room air and in H₂ diffusion flame for the discharge gap of (a) d=1.3 mm and (b) d=1.7 mm.

3. Achievements

Figure 1 shows pulse voltage wave forms and measured electric field in the discharge in room air and in H_2 diffusion flame. The results show that peak electric field during

breakdown in the flame, approximately 40 kV/cm, is significantly lower compared to that in room air, 75 kV/cm, due to higher temperature of combustion products. In both cases, peak electric field is higher compared to DC breakdown field. Both in air and in the flame, the electric field follows the applied voltage before breakdown and decreases rapidly after breakdown, due to charge separation and plasma self-shielding. The electric field in air is compared with the predictions of an analytic model of ns pulse breakdown, showing good agreement between the predicted and the measured breakdown field. The model also predicts earlier breakdown and breakdown voltage reduction as the temperature is increased, in qualitative agreement with the experimental data. The use of the present ps four-wave mixing diagnostics for measurements of electric fields below ~20 kV/cm in atmospheric pressure flames is challenging, due to low signal-to-noise. The sensitivity of the present diagnostics is controlled by the high temperature and low N_2 fraction in the combustion product mixture, as well as by limited bandwidth of the Stokes beam generated by the stimulated Raman cell, which provides access only to several rotational levels of nitrogen molecules. The present diagnostics will have much better sensitivity in high-pressure flames, since the four-wave mixing signal scales as squared number density of nitrogen.

4. Summaries and future plans

The present results have shown that the sensitivity of four-wave mixing diagnostics in the flame is significantly lower compared to that in room-temperature air, primarily due to higher temperature and lower N_2 fraction in the combustion product mixture. This limits the applicability of four-wave mixing to electric field measurements to high-pressure flames, where plasma generation and control become more challenging. In the future, we are planning to use ps second harmonic generation recently developed in our group. Second harmonic generation measurements of electric field in air shows that it is much more sensitive compared to four-wave mixing, generating much higher signal at significantly lower laser power. This demonstrates that it would be more effective for diagnostics of atmospheric pressure flames.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- M. Simeni Simeni, B. M. Goldberg, C. Zhang, K. Frederickson, W. R. Lempert, and I. V. Adamovich: Electric Field Measurements in a Nanosecond Pulse Discharge in Atmospheric Air, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 50, (2017), p. 184002.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [2] E. Baratte, I. V. Adamovich, M. Simeni Simeni, and K. Frederickson: Measurements of Electric Field in a Nanosecond Pulse Discharge by 4-Wave Mixing, 72nd International Symposium on Molecular Spectroscopy, June 19-23, (2017), Champaign-Urbana, Illinois.
- [3] M. Simeni Simeni, E. Baratte, C. Zhang, K. Frederickson, I. Adamovich, H. Takana, and H. Nishiyama; Kinetic Modeling of High-Pressure Surface Ionization Waves Generated by Ns Pulse Discharges, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2017), Sendai, pp.42-43.
- [4] M. Simeni Simeni, E. Baratte, C. Zhang, K. Frederickson, and I. V. Adamovich: Ps Four-Wave Mixing Measurements of Electric Field in Nanosecond Pulse Discharges in Ambient Air, AIAA Paper 2018-1419, 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 8-12 January (2018), Kissimmee, FL.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J17I034
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

MHD攪拌を活用した水素生成プロセスの高度化 Development of Hydrogen Production Process by MHD Mixing

岩本 悠宏*†, 高奈 秀匡**††, 米 浩然*, 井門 康司* *名古屋工業大学工学研究科, **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

水素エネルギー社会の形成に向けた機運が高まる中,再生可能エネルギーを用いた水素生成プロセスの高度化が期待されている。そこで本研究では、電気化学分野で盛んに研究がなされつつある水電解プロセスにおける MED 攪拌効果を電磁流体力学の観点から数値解析的に明らかにし、水素生成プロセスの高度化を目指すと共に、電気化学と電磁流体力学の分野横断型新学術領域を開拓する。

2. 研究成果の内容

水電解プロセスにおける MHD 攪拌効果を電 磁流体力学の観点から数値解析的に明らかに するため, MHD 効果と電気二重層 (Gouy-Chapman model)を考慮した混相流方 程式系を構築し,それらの数値解析手法を決 定した.また,初期解析コードとして,電解 溶液内部(電解溶液は静止系として仮定)に 気泡を想定した誘電率の異なる剛体球が存在 する系(図1参照)での,電気二重層 (Gouy-Chapman model)を考慮した電位ポテ ンシャル分布を BiCGSTAB法(共役勾配法)を 用いて解析する解析コードを開発した.電気





二重層を考慮した電気ポテンシャル離散方程式は、以下の式で表される.

$$\frac{\phi_{i-1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j}}{\Delta x^2} + \frac{\phi_{i,j-1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j+1}}{\Delta y^2} \\
= -\frac{1}{\varepsilon_{i,j}} \frac{\varepsilon_{i+1,j} - \varepsilon_{i,j}}{\Delta x} - \frac{1}{\varepsilon_{i,j}} \frac{\varepsilon_{i,j+1} - \varepsilon_{i,j}}{\Delta y} + \frac{2zen_0}{\varepsilon_{i,j}} \sinh\left(\frac{ze\phi_{i,j}}{k_BT}\right)$$
(1)

ここで、 ϕ は電気ポテンシャル、 ε は誘電率、zは電荷、eは電気素量、 n_0 は単位体積中のイオン数、 k_B はボルツマン定数、Tは温度、また、 $\Delta x \ge \Delta y$ はそれぞれx方向とy方向の空間刻み幅である.式(1)の離散化ポアソン方程式をBi-CGSTAB法を用いて計算した.なお、解析領域は、図


図2:電気ポテンシャル分布

1に示すように、軸対称とし、50×50 µm²の領域に、半径 5 µm の気泡(剛体)が存在するものとした.メッシュ数は、100×100 である.図2(a)に示すように、電極表面付近で電気二重層の形成により大きい電気ポテンシャル勾配が形成されることがわかる.また、図2(b)(気泡近傍の拡大図)より、気泡と電解質の誘電率の差により気泡表面の電気ポテンシャルが高くなることがわかった.

3. 研究目標の達成状況

1年目において、水電解プロセスにおける MHD 攪拌効果の理論体系を調査し、MHD 効果と電気 二重層(Gouy-Chapman model)を考慮した混相流方程式系を構築した.また、静止系における混 相流での電気ポテンシャル分布を計算し得るコードを開発した.以上より、1年目の研究計画を 十分に達成した.

4. まとめと今後の課題

今後は開発した解析コードを発展させ、イオンの拡散方程式とローレンツ力を考慮したナビ エ・ストークス方程式を連成解析することで、水電解プロセスにおける MHD 攪拌効果を電磁流 体力学の観点から数値解析的に明らかにする.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- Y. Iwamoto, H. Mi, Y. Ido and H. Takana: Development of Hydrogen Production Process by MHD Mixing, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.46-47.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I035
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2年目

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

> 佐々木 大輔*†, 下山 幸治**††, 大林 茂** 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、マルチコプタ等の低レイノルズ数域における直交 格子法の解析精度向上を目的とした CFD 手法を開発すると共に、回転翼等の移動物体問題に適 用可能な解析手法の構築を目的とする.

2. 研究成果の内容

2.1 低レイノルズ数流れの流体解析

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, 揚力曲線等に非線形性が現れる低アスペクト比翼の流体解析を低レイノルズ数下で行い, 翼端渦の効果により剥離が抑えられることで揚力の向上が引き起こされていることが明らかとな った. ただし, 格子密度により失速点位置が大きく異なり,実験との差が大きいことから, 格子 密度及び細分化領域に関して更なる検討が必要である.

2.2 回転翼周りの流体解析

直交格子法に基づく CFD 手法を構築し,ファンでの3次元解析を行った.しかし,実験値とのずれが大きく,現在の手法では妥当な解析ができないことが明らかとなった.また,市販ソルバーである Fluent を使用し,ダクテッドファン周りの流れ場の可視化を行った.



図1:一様流れ中のダクテッドファン前縁からの剥離流れの様子

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、低アスペクト比翼の流体解析 を低レイノルズ数下で行い、非線形性の理由を明らかにすることができた. その一方、直交格子 による回転翼の実現には至っていないが、Fluentの結果からダクテッドファン周りの流れ場を類 推することはできた.

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、実験では明らかとなっていなかった低アスペクト比翼の揚力向上の原因 を解析結果を可視化したことで解明できた.一方、マルチコプタ周りの流れ場を詳細に解明する には至っていないため、直交格子を用いて回転翼を精度良く解析するためには、これまでと異な る手法の構築が必要である.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- T. Iwafune, D. Sasaki, T. Kojima, <u>T. Misaka</u>, K. Shimoyama and S. Obayashi: Numerical Prediction Capability of Cartesian-mesh CFD for Basic Unsteady Flow, *Proceedings of* the Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2017).
- *[2] <u>T. Kunishio, T. Akasaka, M. Okamoto, D. Sasaki, S. Takahashi, H. Otsuka, K. Nagatani, T. Misaka</u>, K. Shimoyama, S. Obayashi: Numerical and Experimental Flow Visualizations on a Shrouded Rotor, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.30-31.
- [3] 三輪恭也,夏目雄太,岡本正人,下山幸治,佐々木大輔:超低レイノルズ数領域における低 アスペクト比矩形翼の流体解析,日本機械学会北陸信越支部第55期総会・講演会講演論文 集,(2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I036
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	2017.4 ~2018.3
継続年数	3年目

超並列脳型LSI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*,原田 將敬* 大野 武雄***,野田 周一**** *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

アナログメモリ素子を実ニューロン方式脳型集積回路に適用する際のアーキテクチャに ついて検討した.通常用いられている電圧/電流値で情報を表現する純アナログ方式はオペア ンプなどの消費エネルギーが大きく、実用化に難点がある.研究代表者らは、パルスタイミ ングに情報を表現して、抵抗と容量で構成される回路の過渡応答でシナプス演算(積和演算) を実行する時間領域アナログ方式を提案している(図1,図2).この方式では正負の各荷重 総和を等しくすることで制御が簡単化できるため、アナログメモリ素子を正負どちらの荷重 総和ラインに接続するかをスイッチで切り替える構造を用いることで効率的な実装ができ る.アナログ抵抗およびスイッチを抵抗変化型メモリ素子で実現することで、実用的かつ高 集積・超低消費電力な脳型集積回路を構成できることを明らかにした.

3. 研究目標の達成状況

アナログメモリ素子を用いた脳型集積回路アーキテクチャを提案し、有効性を実証した. アナログメモリ素子については基本特性を確認し、ナノ積層構造の製造技術を開発中である.

4. まとめと今後の課題

ナノ構造アナログメモリ素子の基本構成および脳型集積回路構成を提案して高集積・超低 消費電力脳型システム実現に道筋を付けた. 今後, デバイス構造実現に向けて検討を進める.



- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- *[1] <u>T. Morie</u>: Analog Memory Devices and Circuits for Future Brain-like AI Processors (Invited), 2017 Int. Workshop on Dielectric Thin Films for Future Electron Devices -Science and Technology - (IWDTF 2017), Nara, (2017), pp. 6-9.
- [2] <u>森江隆</u>: 【招待論文】 脳型アナログ演算と専用集積回路, 人工知能, 33 (2018), pp. 39-44.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[3] <u>M. Harada, H. Ando, T. Morie, A. T. Fukuchi, M. Arita, Y. Takahashi</u>, and S. Samukawa: Analog Memory Operation of Parallel Connected Resistance Change Memory Devices, *Proc. of the Seventeenth Int. Symp. on Advanced Fluid Information (AFI-2017)*, Sendai, (2017), pp. 60-61.
 - [4] <u>森江隆</u>: 【招待講演】 脳型人工知能のためのアナログ VLSI の回路とデバイス,日本学術振興会シリコン超集積化システム第 165 委員会, VLSI 夏の学校関西,「LSI 技術者のための人工知能基礎講座」,大阪,(2017).
 - [5] <u>森江隆</u>:【招待講演】脳型人工知能ハードウェアの物理モデルと実装課題,分子アークテクトニクス研究会,愛媛,(2017).
 - [6] <u>森江 隆</u>: 【招待講演】 脳型アナログ集積回路開発の経緯と展望, 第23回電子デバイス界面 テクノロジー研究会, 静岡, (2018).
 - [7] <u>森江隆</u>: 【招待講演】 脳型人工知能ハードウェア開発の現状と課題, *Electron Devices Technology and Manufacturing (EDTM) Conference*, 日本語チュートリアル, 神戸, (2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) 積和演算装置,森江隆,王権,田向権,2017.08.03,PCT出願,台湾特許取得.

課題番号	J17I037
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2年目

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

福山 敦彦*†,寒川 誠二**††
碇 哲雄*,岡田 健**,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
***東京大学大規模集積システム教育設計センター
‡申請者, ††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本年度は、アスペクト比つまりナノディスクの直径と高さの比がほぼ1:1である QND を流体科学研究所内で作製し、その発光再結合過程を宮崎大学のフォトルミネッセンス(PL)法で 測定した.所内の成長技術により従来の作製法にくらべて高さのあるナノ構造を作製可能で あるため、QND における面内方向量子閉込め効果についてより詳細な議論が可能である.

まず GaAs 基板上に GaAs と Al_{0.15}Ga_{0.85}As を厚さ 8 nm ずつ交互に積層した量子井戸(MQW)試料を用意し、直径 7 nm、厚さ 8 nm の GaAs QND を内包したナノピラー構造を分子線エピタキシー(MBE)法によって作製した. その後、Al_{0.15}Ga_{0.85}As で埋め込み再成長を行うことでエッチング表面にパッシベーション処理を行った. PL 測定を行ったところ、図1に示すように極低温で 1.64 eV の PL ピークを得、ガウス関数 fit により二つのピークに分離できた. nextnanoソフトウエアを用いたモデルシミュレーションから、これらピークは GaAs QND からの発光であることが確認された. つまり今回、アスペクト比がほぼ 1:1 の QND を作製することで、強い面内方向の量子閉じ込め効果を初めて実験的に実証することができた.

図2に極低温から室温に至るまでのPLピークエネルギー温度依存性を示す.図から明ら かなようにピーク温度変化が単調ではなく、Varshniの経験式から期待値(点線)の温度傾斜 から大きく異なる傾向を示した。これは、QNDの大きさにばらつきがあり温度上昇によるキ ャリア分布や遷移エネルギーの変化、パッシベーション層からQNDへのキャリア流入プロセ スの変化等が関係していると考えられる.QNDのデバイス応用の観点からも、より安定した 温度変化が必要なため、QNDサイズの厳密な制御と併せて、良質なパッシベーション層を作 成することも重要な事項であることが明確になった.



3. 研究目標の達成状況

本年度は、アスペクト比がほぼ 1:1 である QND を用意し、その光学的特性評価を行った. 従来の液滴法による量子ドット作成では高さを大きくすることが難しいが、流体研究所が有 する技術ではこれが可能である.本研究により面内方向の強い量子閉じ込め効果を初めて実 験的に実証することが可能となった.ただし、直径分布のばらつきおよびパッシベーション 層の品質低下が懸念されたことから、達成度は8割と判断する.

4. まとめと今後の課題

アスペクト比がほぼ 1:1 である QND を用意し、その発光スペクトルを評価することで、面 内方向の強い量子閉じ込め効果を初めて実験的に実証した. 今後は作製条件を精査し、量子 ナノディスクを利用したデバイス実現の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)
- D. Ohori, <u>A. Fukuyama</u>, <u>K. Sakai</u>, <u>A. Higo</u>, <u>C. Thomas</u>, S. samukawa, <u>T. Ikari</u>: Photoluminescence emission from GaAs nanodisks in GaAs/AlGaAs nanopillar arrays fabricated by neutral beam etching, *Jpn. J. Appl. Phys.* 56 (2017), pp. 050308-1-4.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- [2] <u>大堀大介</u>, 石塚史典, <u>トーマス セドリック</u>, 寒川誠二, <u>碇哲雄</u>, <u>福山敦彦</u>: ナノピラー中 のナノディスク配列による発光再結合の直径依存性, 平成 29 年秋季第 78 回応用物理学会学 術講演会, (2017), 6a-A404-10.
- *[3] <u>A. Iwamoto, D. Ohori, C. Thomas</u>, S. Samukawa, <u>T. Ikari, A. Fukuyama</u>: Quantum confinement effect in lateral direction of GaAs nanodisk fabricated by neutral beam etching, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 48-49.
- [4] <u>T. Goda, A. Iwamoto, T. Ikari, D. Ohori</u>, S. Samukawa, <u>A. Fukuyama</u>: Effect of Diameter Distribution on the Photoluminescence Spectral Shape of GaAs Quantum Nanodisks in Nanopillar Array Structure, *The 2nd Asian Applied Physics Conference*, Miyazaki (2017), 1Cp-14.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I038
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

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

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

1. 研究目的

本研究では、自由飛行過程にある飛翔体の動的挙動の解明を目指し、飛翔体上に形成され る非定常圧力場を計測可能な分子イメージング技術の開発を目指すものである.具体的には、 (1)自由飛行過程にある物体上の分子イメージング計測を実現するための技術開発と計測手 法の確立、及び(2)それら開発技術を用いた飛翔体上の非定常圧力場の定量計測の実現、の 二つを目的に据えている.これらを実現することで、従来までは影写真法やシュリーレン法 などによる定性的な計測手法が主だったバリスティックレンジ試験において、飛翔体表面に 現れる流れ場もしくはそれに起因する圧力場、温度場の理解を可能とする、感圧塗料や感温 塗料技術をベースとする計測手法を確立することを目指している.

2. 研究成果の内容

上述した目的の実現を目指し、本研究では、開発した分子イメージングセンサを適用した 飛翔体可視化計測実験、及びその実現のための幾つかの基礎実験を行った.

本研究で実施した飛行体射出実験は、東北大学流体科学研究所衝撃波関連施設に設置され たバリスティックレンジを用いて行った.本装置はガス銃モード及び火薬銃モードで運用さ れており、飛翔体のサイズや射出速度に応じてその運用形態を選択している.マズル径は 15 及び \$ 51 の2 種類を選択可能である.本研究では、飛翔体を超音速域で射出すること、 そして比較的大型の飛翔体を射出するという目的から、 \$ 51 のガス銃モードを用いて実験 を行った.試験部内は大気圧条件としており、大気圧環境下でのフリーフライト試験を行っ た.

飛翔体は φ 15 mm の円柱飛行体,及び先端を円錐形とした円柱飛翔体を用いた.本飛翔 体は φ 51 mm のサボに格納しており,マズル出口付近のサボ分離部において飛翔体とサボ が分離し,飛翔体のみが試験部内に射出される.飛翔体は後部可視化窓までフリーフライト するが,可視化領域への到達タイミングに合わせて起動する光学システムにより可視化される.

飛翔体材質はアルミである.飛翔体表面には陽極酸化処理を施しており,多孔構造を実現 して陽極酸化皮膜型感圧塗料(Anodized-Aluminum PSP, AA-PSP)が実現可能な状態とし ている. 陽極酸化条件は Numata et al. (2017)に従っており,本皮膜構造を用いた AA-PSP を作製した場合に,圧力変化に対して発光強度変化がマイクロ秒オーダーで追従可能な程度 の時間応答が実現可能な細孔径及び細孔深さを実現している.

本研究では、飛翔体上の圧力場の可視化を目的として、バソフェンルテニウムとフルオレ

セインの 2 つの色素を陽極酸化皮膜に同時吸着させた複合感圧塗料を用いた. これらを同 時溶解可能な溶媒に溶かして色素溶液を作製し,その後ディッピングにて飛翔体に吸着し, 感圧塗料として用いている. バソフェンルテニウム及びフルオレセインの発光は 2 分岐光 学系を用いて検出しており,光学系内でそれぞれの特有の波長に分離された後に,2 分岐光 学系の設置されたカメラの撮像素子上に結像される. 実験時に撮影されたこれら画像は試験 後に画像処理を行い,事前の較正式に則り圧力値に変換される.

これらを用いてバリスティックレンジによる射出試験を行ったが、2 分岐光学系を取り付けた高速度カメラを用いた可視化実験において、短時間露光環境下において超音速で飛翔する飛行体からの発光を検出することに成功した.2 分岐系を用いたことで飛翔体からの発光の検出レベルに大幅な減少が見られたが、撮像素子上には2 つの色素からの発光を捉えることが出来た.

3. 研究目標の達成状況

上述したように、現状では目標技術の基盤となる移動物体からの発光検出に関し、2 分岐 光学系を用いた場合でもそれが実現可能であることが実証された段階である.計測系の実証 が完了し、感圧塗料を適用した超音速で自由飛行する物体からの発光も検出できたため、次 年度以降の研究開発において必要となる基礎データはおおむね取得できたものと考えてい る.

4. まとめと今後の課題

研究課題の初年度の目標を達成し、自由飛翔する物体表面に適用した感圧塗料からの発光 検出を実現した.また、計測技術の実現に必要となる2分岐光学系を中心とした光学系に ついても基本形を確立することが出来た.しかしながら、例えばより高いマッハ数で飛翔す る物体上の圧力場などの計測には露光時間の短時間化が必須であり、それを実現するために は感圧塗料からの発光強度の更なる増加を図る必要がある.また、射出試験環境下で高い圧 力感度を有する感圧塗料の開発もまた必要である.今後においては、感圧塗料に対してさら に改良を重ね、発光強度の増加及び圧力感度の向上を図る予定である.また、感圧塗料の改 良に併せて光学系にもより一層の改良を加える計画である.

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

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- D. Numata and K. Ohtani: Development of Molecular Imaging Technology for Investigation of Projectile Aerodynamics, *Proceedings of the Seventeenth International* Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, CRF-64, (2017), pp.134-135.
- [2] <u>沼田大樹</u>,大谷清伸,浅井圭介:超音速飛翔体上の非定常圧力場計測を目指した分子イメージング技術の開発,高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2017, 7-4,(2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I039
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

超音速流中における高周波運動量付加型アクチュエータの作動特性の解明 Study on the Fundamental Characteristics of an Actuator for Adding High-Frequency Oscillatory Momentum to Supersonic Flows

半田 太郎**, 武村 実穂*, 大谷 清伸****, 鵜飼 孝博** *豊田工業大学, **東北大学流体科学研究所 *申請者, **计**所内対応教員

1. 研究目的

近年,エネルギーや運動量を付加して流れを能動的に制御する研究が盛んに行われている. しかし,工学的重要性が高いものの遷音速・超音速流れのように高速流れに有効な制御法は 少ない.本研究の目的は高周波数で振動する小さい超音速噴流を応用した高周波運動量付加 装置を提案し,本装置の優位性を実証することである.本装置を用いることで,流れに大き な運動量を高周波で負荷できるので,高速流れの能動的な制御が期待できる.本研究では, 超音速流中における本装置の作動状態を明らかにするとともに騒音や機器の疲労破壊の原 因となる超音速流れの圧力振動を本装置により低減することを試みる.

2. 研究成果の内容

本装置をマッハ数1.84の超音速流中で作動させて状態で圧力振動を測定し、スペクトル解析をしたところ、図1に示すように48kHzの高周波で本装置が作動していることが明らかになった.また、本装置を用いて超音速キャビティ流れの圧力振動低減を試みた.図2に示すように本装置をキャビティ前縁から7mm上流に設置して、キャビティ後縁から3.9mm下流の位置で圧力振動を測定した.その結果、本装置を作動させると、本装置を作動させない場合と比較して、圧力振動が小さくなることが確認された.

3. 研究目標の達成状況

本装置の超音速流中での作動状態が確認され、超音速流れの制御における本装置の有効性が 示されたので、本研究の目的はある程度達成されたが、超音速振動流れの制御において振動 強さが大きく低減できたとは言い難く、この点が今後の課題である.



図1:本装置の超音速流中における作動状態を表す圧力振動スペクトル



(b) B-B'断面図図2:本装置を用いた超音速キャビティ流れ振動制御実験用の測定部



図3:本装置による超音速キャビティ流れの振動低減効果

4. まとめと今後の課題

本研究では、高周波で流れに運動量を付加できる装置の高速流れにおける作動特性を実験 で調べるとともに、本装置を高速流れの振動低減に適用した.その結果、本装置が高速流中 において高周波数で作動することを確認するとともに、高速流れの振動低減に有効であるこ とを実証した.ただし、振動が低減されたことが示されたものの、大きな振動低減率は得ら れなかったので、今後、装置の配置や作動周波数など流れ場に応じた本装置の適用法を考え る必要がある.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- M. Takemura, A. Urita, T. Handa, K. Ohtani, Y. Matsuda, Y. Egami: Experimental Study on High-Speed Flow Control Using Small-Sized Oscillatory Jet, *Proc. of the 17th Int. Symp. on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), CRF-63, pp.132-133.
- [2] <u>半田太郎,武村実穂</u>,大谷清伸,鵜飼孝博:高周波運動量付加用スモールジェットの超音速 流中での動作とその効果に関する研究,平成29年度衝撃波シンポジウム,仙台(2017), P-22.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I040
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2年目

人工改変タンパク質バイオテンプレートによる大面積 2 次元高密度および 分散型ナノ粒子エッチングマスク作製の理論解析

Analytical Development of Artificially Modified Bio-Template for 2D Ordered or Dispersed Nanoparticles Etching Array Mask

> 山下 一郎*,寒川 誠二** *大阪大学大学院工学研究科,**東北大学流体科学研究所 †申請者,**††**所内対応教員

1. 研究目的

これまで直径 8 nm の内部空間を持つ外径 12nm の球殻状フェリチンタンパク質を利用し、バイオ ミネラリゼーションによるコア形成とタンパク質の基板上単層吸着機能を用いてナノドットエッ チングマスクを作製し、酸化シリコンにサンドイッチされたシリコン薄膜をエッチングして基板内 に量子ナノディスクアレイを構築してきた.アレイの電子エネルギー準位を多様に制御するために は、量子ナノディスクの小型化が必要となり、小さなナノ粒子エッチングマスクが求められる.そ こでフェリチンに替えて超小型球殻状タンパク質Dpsを導入して直径4nm以下のナノ粒子の単層高 密度分散配置マスクを実現し、5nm 級高密度ナノディスクアレイ作製を狙う.

2. 研究成果の内容

Dpsはフェリチンファミリーであるが内外表面をつなぐチャネルにはフェリチンと異なり2種 類のものがある.昨年は2種類のチャネルの表面を考察し、一種類のチャネル表面が酸性アミノ 酸でできていることから、正電荷を持つイオンは、チャネル内で一時トラップされつつ比較的自 由に内部に到達できると考えられたため、フェリチンでのコア合成時の反応溶液を参照して溶液 条件を検討し、酸化鉄と酸化コバルトのナノ粒子合成に成功した.またナノドットマスクの材料 の種類を増やすことに資するため、他金属イオンの導入を継続して検討し、その結果InOx、ZnO、 Cu水酸化物,Ni水酸化物のコア形成を確認した.作製したナノ粒子内包Dpsをスピンコーティン グ手法でSi基板上に2次元単層で分散配置し、タンパク質部の選択除去することを検討した.まず スピンコートするDps溶液は、Dpsに電荷を持たせて粒子間反発を持たせるように緩衝液pHを調整 した.スピンコーティング時や乾燥過程で緩衝液成分が残ることを避けるため、緩衝液は揮発性 である酢酸アンモニウム緩衝液を用いた.タンパク質の選択除去はUV/0zone処理を採用し検討し た. 図1は, Dpsのバイオミネラリゼーションにより合成された酸化鉄コアのTEM像と得られた高 密度分散4nm級ナノドットエッチングマスクを示す.Dps内に平均直径3.6nmのナノ粒子が合成さ れたことが確認される(左図).スピンコーティングによる2次元配列化では、Dps外部タンパク 質殻間の反発と基板吸着により基板上に単層分散配置され,その後のUV/0zone処理によりタンパ ク質殻が選択除去された(右図).ナノサイズの粒子の配置で問題となる凝集が見られず、4mm級 のナノ粒子が完全に分散配置されていることがわかる。これはタンパク質殻が保護膜となりナノ 粒子間の凝集を防いでいたためと思われる.



- 図1:(左図) 球殻状タンパク質 Dps 中バイオミネラリゼーションした 3.6nm 酸化鉄ナノ粒子 (右図) Dps によりシリコン基板上単層高密度分散配置されたナノ粒子エッチングマスク
- 3. 研究目標の達成状況

超小型球殻状タンパク質 Dps による4nm 級ナノ粒子のバイオミネラリゼーションにおいて, 内外をつなぐチャネルの表面分析に基づき,正電荷を持つ金属イオンを中心にナノ粒子の合成 検討を行い,ナノ粒子,ナノエッチングマスク材料の種類を増やすことに成功した.またナノ 粒子内包 Dps を用いた,ナノ粒子のシリコン基板上高密度単層分散配置につて理論的な緩衝液 の検討と,スピンコーティング条件の実験的検討を行うことで,シリコン基板上に高密度分散 配置 4nm 級ナノ粒子エッチングマスクが構成できる目途が示された.

4. まとめと今後の課題

高密度分散配置2次元配列ナノドットエッチングマスクの作製が可能になったが、今後は Dpsの第2層の積層を排除しながら、Dps間の静電的反発を弱めることにより、現状を超える高 密度化が可能かを理論的、実験的に進め、さらにこの高密度分散配置ナノドットを用いたエッ チング、ナノディスク作製研究を進める.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
 - [1] Akio Higo, Takayuki Kiba, Shula Chen, Yafeng Chen, Tomoyuki Tanikawa, Cedric Thomas, Chang Yong Lee, Yi-Chun Lai, Takuya Ozaki, Junichi Takayama, <u>Ichiro Yamashita</u>, Akihiro Murayama, and Seiji Samukawa: Optical Study of Sub-10 nm In_{0.3}Ga_{0.7}N Quantum Nanodisks in GaN Nanopillars, *ACS Photonics*, 4 (7), 2017, pp 1851–1857.
 - 他2件
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
 - [2] <u>Ichiro Yamashita</u>, Naofumi Okamoto and Seiji Samukawa, "Development of 2D Etching Mask by Artificially Modified Cage-shaped Proteins", *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.52-53.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
 - (受賞) Surface Innovations Prize, Journal Prize for best paper in journal, "Biological path for functional nanostructure fabrication and nanodevices", Ichiro Yamashita, Oct. 6th 2017, Institute of Civil Engineering.

課題番号	J17I043
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

火星探査航空機高高度試験機の動特性に関する数値的研究

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

金崎 雅博*†, 永井 大樹**††

*首都大学東京大学院システムデザイン研究科,**東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

火星探査飛行機は火星の大気中で揚力を得て飛行しする.世界でも前例のない火星探査飛 行機が実現できれば、高精度な磁場観測や地質調査などの理学観測が可能になる.しかしながら、 火星大気密度は地球上の 1/100 程度しかなく、実現には機体の空力的な詳細情報が必要である. そこで、H28 年度は実機としても成立できる大気球試験機の概念の設計(図1(b))を行った. 本機体 MABE-2β はあくまで概念段階であり、今後は数値流体力学(Computational Fluid

Dynamics: CFD) と風洞試験の両輪により,詳細設計や制御系設計を行う必要がある.提案研究 では、ワーキンググループにおいて副代表を務める東北大学流体科学研究所 永井教授と,設計 に参加した申請者とが連携しつつ,空力係数・微係数の取得を行い,構造成立性や,運動御性の 評価を行うことを目的とした粘性計算に基づく CFD を援用した再設計機空力特性の詳細検討を 行った.また,先代機 MABE-1 (図 1(a)) との比較も行った.



図1 計算する機体の鳥観図. (a) MABE-1, (b) MABE-2.

2. 研究成果の内容

計算条件は、マッハ数 0.2、動圧 16.4 Pa、レイノルズ数 1.7×104(代表長さは主翼翼弦長 0.49m)、 ガス定数 1.4 とした.計算格子生成には、JAXA で開発された非構造格子生成ソフトの HexaGrid を用い、空力計算に JAXA 開発の高速流体計算ソフト FaSTAR を用いた.結果の例として図 2 に全機形状の CFD による水平尾翼要素のピッチングモーメント係数と、水平尾翼のみの CFD に よるピッチングモーメント係数の比較を示す.(両者とも全機での重心周り(MABE-1S:30%c, MABE-28:38%c)のモーメント係数.) MABE-2 では水平尾翼容積比を増加させたことにより、 後流干渉の影響の有無に関わらず、 $|(\partial C_M) \partial \alpha|$ が MABE-1 よりも大きい.翼胴後流干渉の 影響が無い場合(w/o wake)を比較すると、MABE-1 の水平尾翼は AoA=8°付近から失速が始ま っているが、MABE-2 βの水平尾翼で失速が始まるのは AoA=12°付近であり、舵面の効きの改



図2 水平尾翼のピッチングモーメント係数への後流干渉の影響.

3. 研究目標の達成状況

平成 29 年度の検討では、次期大気球試験機に向けた設計機体の空力検討を行った. MABE-2 に対して CFD を実施して、基礎空力特性 を取得し、風洞実験模型 MABE-1 との比較を行った. MABE-2 では、水平尾翼容積比を増加させたことで、水平尾翼の(*∂*C_M)*∂a*|が増加した.水平尾翼は、AoA=2~12°で胴体後流と干渉し、AoA=6°で主翼後流と干渉し始めるが、AoA=8°以上において MABE-1 で見られた水平尾翼の失速が MABE-2 では抑えられたことから、蛇面の効きの改善を期待できる.こうした知見は、今後の構造、制御を含めた実設計、申請者が開発しているフライトシミュレーションに必要不可欠である. H29 年度はこうした空力特性取得のために不可欠な基盤作りを達成した.一方で、最終的な目標である動特性の取得やフライトシミュレーションは今後の課題であり、次年度継続申請において解決を目指す.

4. まとめと今後の課題

H29 は火星探査航空機次期大気球試験機の空力特性について, CFD を用いて取得を行った. 次期大気球試験として設計された MABE-2 は安定性の改善を達成した.要因として,尾翼容積 の再検討の他,レイアウト検討によって主翼後流の尾翼への影響を低減できたことが挙げた.今 後は,CFD 結果を用いた動特性の取得や構造,制御の検討が必要であり,実フライトに対応した CFD の実施が課題である.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [1] K. Tomisawa, K. Fujita, A. Oyama, H. Nagai and <u>M. Kanazaki</u>: Mars Airplane Design for the Next Balloon Experiment and Its Aerodynamic Characteristics Using CFD, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.36-.37.
- [2] <u>金崎雅博</u>: 宇宙工学における最適設計と進化計算法の適用, 日本機械学会第 26 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス [SEC'17], 三浦市, (2017).
- *[3] 富澤海,藤田昂志,大山聖,永井大樹, <u>金崎雅博</u>:火星探査航空機次期大気球試験機に向け た設計検討と CFD による基礎空力特性,宇宙科学技術連合講演会,新潟, (2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J17I044
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	2nd year

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

Gael Sebald*†, Masami Nakano*,**†† Mickaël Lallart ***, Gildas Diguet*, Jean-Yves Cavaillé* *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 developing magneto-rheological (MR) elastomers for magneto-mechanic energy conversion and vibrational energy harvesting. It is expected that, as being mechanically very soft, MR elastomers may constitute smart materials suitable for large amplitude and low frequency vibrations, hence offering an attractive alternative compared to conventional magnetostrictive or piezoelectric materials that are quite stiff.

The project had 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 depend on the shear strain, which can be seen as a pseudo-Villari effect.

In this fiscal year, extensive measurements were conducted on 4 different kinds of MR elastomers, soft / hard elastomers, and isotropic / anisotropic elastomers. Characterizations were conducted for their magneto-rheological properties of MR elastomers on one hand, and their pseudo Villari effect (change in magnetic properties as a result of applied shear strain) on the other hand.

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

Finally, the results were summarized and led to two publications in peer reviewed journals, as well as several international conferences. Preliminary application to energy harvesting has also been tested, and a paper on this topic is currently under consideration. Further scientific publications on particle interaction model are also under consideration.

Furthermore, such collaborative research has opened new approaches that will still be developed after the end of this IFS CRP project, both on the material itself and on its application.

3. Achievements

The magneto-elastic coupling - in the view of energy harvesting - was successfully quantified. It was shown that the magneto-rheological properties do not depend on the nature of the polymer matrix. Indeed, the relative change in storage shear modulus was observed to be very similar for both soft and hard elastomers. Similarly, the pseudo-Villari effect was found to be also of similar amplitude.

Finally, several hypotheses regarding the physical origin of this Multiphysics coupling drew basics of modeling attempts, although further detailed microstructure analyses would be necessary to further understand the physical insights.

4. Summaries and future plans

The objectives set at the beginning of this collaboration were achieved: it was proved that magneto-rheological elastomers have the capability of converting mechanical energy into electrical energy. During the project, several attempts of energy harvesting were performed, leading to estimations of energy density in the range of mJ/cm³.

Further work will deal with testing other polymer matrix, and testing some more realistic energy harvesting devices.

Hence, the project allowed initiating new research fields within IFS (MR materials for mechanical to electrical energy conversion and their application to energy harvesting systems) as well as establishing long-lasting collaboration within and outside TU. This IFS-CRP project helped in initiating the research axes and collaborations, and, although this project is over, the research is still continuing, working together on these topics.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - *[1] G. Sebald, M. Nakano, <u>M. Lallart</u>, T. Tian, G. Diguet, J.-Y. Cavaille: Energy conversion in magneto-rheological elastomers, *Science and Technology of Advanced Materials*, **18 (1)**, (2017), pp.766-778. (doi: 10.1080/14686996.2017.1377590)
 - [2] M. Lallart, G. Sebald, G. Diguet, J.-Y. Cavaille, M. Nakano: Anisotropic magnetorheological elastomers for mechanical to electrical energy conversion, *Journal of Applied Physics*, **122**, (2017), 103902. (doi: 10.1063/1.4998999)
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
 - [3] G. Diguet, G. Sebald, M. Nakano, <u>M. Lallart</u>, MR Elastomers for Energy Harvesting System, *INTERMAG 2018*, April 23-26, Singapore, (2018).
 - [4] <u>M. Lallart</u>, G. Sebald, G. Diguet, J-Y. Cavaille, M. Nakano: Modeling of Anisotropic Magneto-Rheological Elastomers for Mechanical to Electrical Energy Conversion, *Fourteenth International Conference on Flow Dynamics*, November 1-3, 2017, Sendai, Japan (invited), (2017).
 - [5] G. Sebald, M. Nakano, <u>M. Lallart</u>, T. Tian, G. Diguet, J. Y. Cavaille: Experimental Testing of Pseudo-Villari Effect in Magnetorheological Elastomers, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.18-19.
 - [6] G. <u>Sebald</u>, M. Nakano, M. Lallart, J-Y. Cavaille, G. Diguet: Pseudo-Villari Effect in Magneto-Rheological Elastomers, 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Chamonix - Mont Blanc, France, 3 to 6 September, (2017).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I045
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	3rd 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 semi-active tuned mass damper (TMD) working with MREs. The structural schematic and photograph of the MRE TMD is shown in Figure 1. One of the innovations of the current research is the adoption of four multilayered MREs and steel structures. It can be seen that the four multi-layered structures form a square layout, and this increases the stability of the MRE TMD while still retaining sufficient lateral flexibility. These four coils are connected in series before current is applied. The most noteworthy point of this design is that one totally closed magnetic circuit forms between any two adjacent multi-layered structures have opposed winding directions of their solenoids, so that they will generate opposite magnetic fields when the current is applied.



Figure 1: Design and photograph of the MRE tuned mass damper.

To verify the capability of the MRE TMD to protect a building from earthquake, extensive simulation and experimental testing were conducted. The swept sinusoidal signal and the scaled 1940 El Centro earthquake record were used to excite a scaled three story building. Both simulation and experiment have verified that the MRE TMD outperformed all other passive tuned mass dampers under either swept sinusoidal or seismic conditions. This new design not only maintains the advantage of large lateral flexibility but also improves the efficiency of the magnetic field by generating four closed magnetic circuits. The frequency shifted from 3.1Hz to 7.1Hz when the current was changed from 0A to 2.5A and this demonstrated the effectiveness and controllability of the MRE TMD as a method to reduce vibrations. The simulation and experimental results verified the potential of this method to protect the building from ground motion. The transmissibility responses, the relative displacement, and the relative acceleration, as well as the peak displacement and the acceleration have clearly shown the superiority of semi-active MRE TMD over passive TMDs or no TMDs.

3. Achievements

A new MRE TMD was prototyped and its performance was experimentally evaluated. The research collaboration has resulted in 2 journal articles and 3 conference papers. 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 third year of the research project on the development of novel MRE isolators for structural control, which has resulted in excellent results.

Future plans: As Prof. Masami Nakano has retired from the IFS, I am seeking an opportunity to do collaborative research with a new IFS researcher for another research project.

- 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, (2017), pp.371-384 (14 pages).
- *[2] S.S. Sun, J. Yang, H. Du, S. Zhang, T.H. Yan, M. Nakano and W.H. Li: Development of a magnetorheological elastomer-based tuned mass damper for building protection from seismic events, *Journal of Intelligent Material Systems* and Structures, Vol.29, (2018), pp.1777-1789 (13 pages).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [3] S.S. Sun, J. Yang, W.H. Li and M. Nakano: Overcoming the conflict requirement between high speed stability and curving trafficability of the train using an innovative MR rubber joint, *Proc. of the 14th Int. Conf. on Flow Dynamics* (*ICFD2017*), Nov. 1-3, 2017, Sendai, Miyagi, Japan, Paper ID: OS12-3, (2017), pp.452-453.
 - [4] <u>S.S. Sun, X. Tang, J. Yang, W.H. Li</u> and M. Nakano: Experimental verification of an advanced vehicle suspension with variable stiffness and damping MR damper, *Proc. of the 14th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2017)*, Nov. 1-3, 2017, Sendai, Miyagi, Japan, Paper ID: OS12-5, (2017), pp.456-457.
 - [5] S.S. Sun, T. Yildirim, W.H. Li and M. Nakano: A smart-passive nonlinearity broadband magnetorheological elastomer vibration energy harvester, *Proc. of the* 17th Int. Symp. on Advanced Fluid Information (AFI-2017), Sendai Japan, CRF-87, (2017), pp.180-181.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J17I047
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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 ***静岡大学学術院工学領域数理システム工学系列 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

水中で放電させる際に形成される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 29 年度は、平成 28 年度に開発した、微細気泡の固気判別法を基盤に、微 細気泡の気泡径計測法の原理を検証した.図1に実験装置の概要を示す.最初に、 圧縮波の圧力と反射膨張波の相関を求め、図2に示すように、圧縮波の圧力から 水面下の各位置における膨張波の圧力を推測する手法を開発した.これにより、 圧縮波の圧力の計測だけで膨張波の圧力を求めることに成功した.その後、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、図3に示すように、



Fig. 1 (a) Schematics of pressure measurement method. Distance between focus point of laser and the tip of a pressure sensor was set to 5 mm. (b) Waveform of pressure measured at 1.0 mm from water surface. The peak pressure of the compression wave is indicated as (i) and the peak pressure of the expansion wave is indicated as (ii).





Fig. 3 The maximum bubble radius against the estimated negative pressure using the ratio shown in Fig. 2.

膨張波により形成されるキャビテーション気泡の最大径と圧縮波の圧力との相関を明らかにした.この結果より、キャビテーション気泡の最大径は、概ね膨張波の圧力 と線形の相関があることが示され、初期気泡径の計測の可能性を示すことに成功した.しか しながら、本来であれば膨張波が0の場合に初期気泡径は2µm程度となることから、 線形の相関とはならないことが予想され、さらに詳細に検討していく必要がある.

3. 研究目標の達成状況

本年度は、圧縮波と膨張波の圧力の相関を明らかにし、異なる位置における膨張波の圧力 の推定に成功した.また、膨張波の圧力と気泡最大径の相関も明らかにし、初期気泡径の予 測に向けた原理の提案を行ったことから、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)
- 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, Y. Nagasawa, T. Nakajima, K. Ohtani, <u>T. Miyahara</u>, and <u>T. Nakatani</u>: Development of Bubble Measurement Method Using Pressure Wave, *Proceedings of the* 17th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2017), Sendai, (2017), pp.2-3.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許) なし(受賞) なし(マスコミ発表) なし

Project code	J17I048
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year (progressing)

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

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

1. Purpose of the project

This project aims to elucidate the micro-jet formation occurring in the last stage of the primary and rebound bubble collapse processes of cavitation bubbles. We strongly believe that the complementary skills developed by the research groups led by Prof. Farhat (EPFL) and Prof. Sato (Tohoku University) will greatly help achieving the project goals.

2. Details of program implement

Formation of micro-jets under traveling pressure waves that change their phases due to reflection at a water-air interface is a complex phenomenon and it is still unclear. To verify whether such pressure waves are expansion or compression waves, high-speed imaging of pressure waves was combined with simultaneous pressure measurements by an optical hydrophone, as shown in Fig. 1. Fig. 1 (a) and (c) show that a spark discharge produced a shock wave 1, of which the phase inverted at the surface of the water, making it into an expansion wave 2. The wave 2 further changed into the compression phase, producing wave 3, at the surface of the spark-generated bubble. Figures 1 (b) and (d) show that a shock wave 1 traveled in the water and changed its phase at the surface of water. Then, the resulting expansion wave 2 was reflected without a phase change at the surface of an alumina plate placed above the spark-induced bubble due to the large acoustic impedance of the alumina, and continued traveling as an expansion wave 3.

3. Achievements

We succeeded in imaging the traveling pressure waves and in synchronizing them with pressure measurements, which allowed for the verification of the phase change of each pressure wave by the reflection at the interface of water and air.

4. Summaries and future plans

We will investigate the interaction between the phase of pressure waves and direction of the micro-jets based on the results obtained this year.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal
- Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.

- T. Akimura, T. Minami, T. Nakajima, K. Ohtani, <u>T. Kaneko</u>, <u>O. Supponen</u>, <u>M. Farhat</u>, and T. Sato: Directed Jetting from Cavitation Bubbles Subject to Traveling Pressure Wave, *4th Japan-Taiwan Workshop on Plasma Life Science and Technology (2017 JTPL)*, Morioka, Iwate, (2017).
- [2] T. Akimura, T. Minami, T. Nakajima, K. Ohtani, <u>T. Kaneko</u>, O. Supponen, <u>M. Farhat</u>, and T. Sato: Effect of Pressure Wave on Direction of Cavitation Bubble Microjets, 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9), Okinawa, (2017), Presentation No. TFEC9-1322.
- *[3] T. Akimura, T. Minami, T. Nakajima, K. Ohtani, <u>T. Kaneko, O. Supponen, M. Farhat</u>, and T. Sato: Pressure Measurement of Traveling Pressure Waves for Cavitation Bubble Generation, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2017)*, Sendai, (2017), pp.8-9.
- [4] T. Sato, <u>M. Tinguely</u>, <u>M. Oizumi</u>, and <u>M. Farhat</u>: Hydrogen gas generation in plasma-induced cavitation bubbles, 10th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT 2017) Abstract Book, Taoyuan, Taiwan, (2017), p.27.
- [5] T. Akimura, T. Minami, T. Nakajima, K. Ohtani, <u>T. Kaneko</u>, O. Supponen, M. Farhat, and T. Sato: Micro-jets from microbubble clouds under the effect of traveling pressure waves, 10th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT 2017) Abstract Book, Taoyuan, Taiwan, (2017), p.133.
- [6] 秋村隆仁,南共哉,中嶋智樹,大谷清伸,金 子俊郎, O. Supponen, M. Farhat, 佐藤岳彦: マイクロジェット生成方向に対する水中圧力 波の影響, 平成 29 年度衝撃波シンポジウム, Sendai, (2018), Presentation No. 3C1-5.
- [7] 秋村隆仁,南共哉,中嶋智樹,大谷清伸,金 子俊郎, O. Supponen, M. Farhat,佐藤岳彦: 水中圧力波により生成されたキャビテーション気泡およびマイクロジェットの挙動の解析, 日本機械学会東北支部第53期総会・講演会, Sendai, (2018), Presentation No. 124.

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

Best Poster Presentation Award, "Directed Jetting from Cavitation Bubbles Subject to Traveling Pressure Wave", Takahito Akimura, Tomoya Minami, Tomoki Nakajima, Kiyonobu Ohtani, Toshiro Kaneko, Outi Supponen, Mohamed Farhat and Takehiko Sato, June 3, 2017, 4th Japan-Taiwan Workshop on Plasma Life Science and Technology (2017JTPL).

4th Trek Award of the Institute of Electrostatics Japan in 2017, Takahito Akimura, October 26, 2017.

(Press release) Not Applicable.

(a)







Fig. 1 (a), (b): Successive images of pressure waves traveling between the surfaces of water and the bubble (a). and between the surfaces of water and the alumina plate (b). The scale bars are 200 μ m (a) and 500 μ m (b). The frame rates are 10 Mfps (a) and 2.3 Mfps (b). The exposure times are 10 ns in the cases of (a) and (b). The temporal pressure variation traveling between the surface of water and the bubble (c) and between the surface of water and the alumina plate (d). The figures with arrows in the images denote the pressure waves synchronized with the magnitude of the pressure.

課題番号	J17I049
区分	公募共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

数値流体力学を用いた脳血管内治療における流動現象の解明

Computational Fluid Dynamics Study of Neuro-Endovascular Treatment for Cerebrovascular Diseases

中嶋 伸太郎*†,杉山 慎一郎**,*** 太田 信***†† *順天堂大学医学部脳神経外科,**東北大学大学院医工学研究科 ***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

脳血管内治療、特に脳動脈瘤に対するコイル塞栓術およびフローダイバージョン治療の臨例に 関する数値流体力学的解析を行い、血行動態が治療効果に及ぼす影響を検討する.

2. 研究成果の内容

研究対象: 10 症例(10 動脈瘤), Single FD(PEDs;Covidien/ev3, Irvine, California) 対象期間: 2015年10月から2016年8月

研究方法:治療効果をOKM 分類を用いて評価.

Virtual stenting (Hemoscope), CFD(ANSYS Fluent)を用いた.

Table1.

Case	8 3 a	Sex	AN size (mm)	AN neck (mm)	AN volume (mm*)	Stentill (mm)	Location	OKM EM	OKM 1Y
3	67	F	10.3	5.5	299	5x20	U. IC Pandioki.	D	D
7	76		11.15	6.08	90.8	4.5x20	R. C Paraditold.		
9	72		8.01	4.33	219	3.75x16	RLIC Optimistic	D	D
11	68		14.40	7.35	315	4.25x25	U.IC Paradical.	D	
13	38		8.46	5.61	158	3.75x18	Lt. 10 Paraclinoid.	D	D
16	55		11.3	8.64	62.0	4.25x16	RLIC Cavarious	D	D
19	69		10.0	4.9	206	4.0x18	U. IC Paraditold	D	D
24	74		11.71	7.00	20.5	5.0x25	R. C Paraditold	D	D
28	50		10.2	4.5		4.5x16	RLIC Cavarious	D	
30	78	F	10.1	6.5	235	4.75x25	R. K. Gavanous	С	•
Averag	64.7		10.56	5.80	188				

Table1: 動脈瘤の部位は paraclinoid 傍前床突起部, opthalmic、cavernous で分けられ, 患者の平均年齢は 64.7 才, 動脈瘤の平均サイズは 10.56mm であった.

figure1.



Figure2.

inflow rate



figure1,2:動脈瘤内の平均流速とネック面を通過する血流量の結果. 横軸が症例 1 から 10 で, 縦軸が流速と血流量となる.青グラフが術前で,赤グラフが術後.全ての症例で動脈瘤内の平均 流速の有意な低下を認めたが,ネック面を通過する血流量は incomplete occlusion group である 症例 2 と 10 では低下を認めなかった.

3. 研究目標の達成状況

大型,巨大脳動脈瘤に対する single FD 症例に対して CFD を用いた数値流体力学的解析を行い,解析症例数は少ないものの,動脈瘤内の平均流速や動脈瘤ネック面を通過する血流量の結果から,これらのパラメーターを用いて治療効果を予測できる可能性があることが考えられる.

4. まとめと今後の課題

今回は CFD を用いて FDs による治療効果とその血行動態を検討致した. 全症例で瘤内の流速 は低下を認めたが、ネック面を通過する血液量は complete occlusion group では低下し、 incomplete occlusion group では不変であり、FDs の治療効果を予測するパラメーターとして期 待されると考える.

ただし解析症例数がまだ少ないため、今後はまだまだ症例数を増やし、統計解析を加えていく 必要があると考える.

5. 研究成果

1) 学術雑誌(査読つき国際会議,解説等を含む) なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] <u>中嶋伸太郎</u>: 脳動脈瘤のサイズと血行動態との関係 未破裂中大脳動脈瘤 34 例に対する数 値流体力学的解析結果,日本脳神経外科学術第 76 回学術総会,名古屋,(2017).
- [2] <u>S. Nakajima</u>, S. Sugiyama, M. Ohta, <u>K. Yatomi</u>, <u>M. Yamamoto</u>, <u>H. Ohishi</u>: Computational Fluid Dynamics Simulation of Intracranial Aneurysm treated by Pipeline Flow Diverter Embolization Device, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on* Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp.84-85.
- [3] <u>中嶋伸太郎</u>: フローダイバーターステント留置前後の大型脳動脈瘤症例に対する CFD 解析 を用いた血行動態変化の検討,第33回日本脳神経血管内治療学会学術集会,東京,(2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I051
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

航空宇宙流体科学サマースクール The Summer School for Aerospace Fluid Science Researches

今村 太郎***††**, 大林 茂****†** *東京大学大学院工学系研究科, **東北大学流体科学研究所 **†**申請者, **††**所外対応教員

1. 研究目的

学会では実現できない,成果発表だけでなく萌芽的な研究アイデアをも含む発表を通し, 国内の主要な航空宇宙関連研究者と学生との濃密な議論を行う.

2. 研究成果の内容

期:2017年9月7日(木)-9日(土)

於:裏磐梯レイクリゾート

969-2701 福島県耶麻郡北塩原村大字桧原字湯平山 1171-1

開催概要:社会人19名,学生20名,合わせて39名が参加した.今回頂いた助成金を活用し,初めてポスタセッションを実施した.近年学生の参加者数増加に伴い,学会と同じような時間制限の下での講演であったため,本来の会の趣旨から逸脱していた.この状況を打破するため,学生の発表を全てポスタとし,1セッション2時間程度の枠にしたところ議論が活発化し,盛況で時間が足りないぐらいであった(図1は修士学生のポスタ発表の様子である).今回の経験は次年度以降につながり,有意義な会となった.



図1:ポスタ発表の一風景.

研究目標の達成状況

JAXA からの参加者 4 名を含め、3 日間に渡り濃密な議論を行え、新たな研究の種を議論 する発表もあったことから、国内の航空宇宙流体科学分野の底上げが間違いなく達成され、 終了後の感想からも将来を担う学生にとっても有意義な場であった.

4. まとめと今後の課題

本会の目的を十分に達成することができ、盛況のうちに終えることができた。ポスタセッ ションが有効に機能することを確認した一方,発表者はそのセッションの他の発表を聞きに 行けないという意見を頂いたため、これを解決することが次回の課題である.

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

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] 石川 信之介, "気液二相流解析を用いたサーフボード底面形状が抗力に及ぼす影響調査"
- [2] 菅野 寛喜, "光学カメラで生成された模擬デブリ画像の特徴点検出 - 簡易的運動推定の実現を 目指して-"
- "マイクロダクト内における超音速流れの特性に関する研究" [3] <u>北原 圭一郎</u>,
- "感圧塗料の応答遅れ計測用衝撃波管の製作" [4] 桑田 哲平,
- [5] 小松 竜郎, "ヨー方向回転自由度を有するフラップの空力効果"
- [6] 佐野 正和, "超音速インテークにおける非定常振動(バズ)の数値的解析"
- [7] 菅谷 圭祐, "簡易カットセル法を用いた2次元流体解析手法の検討"
- [8] 仙田 裕紀, "高迎角時空気力取得に向けた 1-m 磁力支持天秤装置の改良"
- "アーク加熱風洞気流のエンタルピ決定法に関する研究" [9] <u>高木 耀一</u>, "アーク加熱風洞気流のエンタルピ決定法に関す"
 [10] <u>田口 航太郎</u>, "主翼上垂直舵翼の横の運動に関する空力特性"
- [11] 橘 一輝, "プラズマアクチュエータ剥離抑制性能最適化への EGO 多数サンプル追加法の適用"
- [12] 田中 一成, "磁力支持天秤装置を用いた超音速風洞試験における6軸制御技術の適用"
- [13] 田村 丞, "コーナーに突起を持つ角柱周りの剥離流に関する研究"
- [14] 辻村 光樹, "粒子法 (MPS 法) を用いた気流下における液滴破壊現象の模擬"
- [15] 山下 雄輝, "減速度の違いによる衝撃波形状の違いに関する実験"
- "直交格子・埋め込み境界法を用いた航空機周り乱流解析手法の開発と検証" [16] <u>玉置 義治</u>,
- "乱流干渉が垂直衝撃波に及ぼす影響の定量評価" [17] <u>丹波 高裕</u>,
- [18] 前山 大貴, "格子ボルツマン法を用いた乱流解析に向けた検討"
- "高速噴流を用いた非定常圧縮による遠隔高インパルスの発生" [19] <u>三谷 奈々</u>,
- "圧縮性流れを対象とした Flamelet モデルの効率化" [20] 山本 姫子,
- [21] 内山 貴啓, "JAXA 実験空力系の研究紹介"
- [22] <u>大道 勇哉</u>, "非定常大規模 CFD データのモード分解解析"
- [23] 豊田篤, "エクサスケール CFD に向けたポストプロセス"
- [24] 松尾 裕一, 河合 宗司, "空力の未解決問題"

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許)なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

Project code	J17I055
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	3rd year

The Theoretical Modes of the Wake Flow of Road Vehicles

Chenguang Lai*†, Shigeru Obayashi**††, Yuting Zhou***, Chengping Yan* Hailin Zhang* and 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

Four control volumes (Fig. 1) are used to control the parametric deformations of the four variables of a rear car model. Parameters x_1 , x_2 , x_3 , x_4 are used to quantify the deformation of the 4 variables. Kriging response surface is fitted by the training samples. Then, accuracy of the response surface will be verified by "cross validation". At last, one should Determine whether the response surface meets the final stop criterion (maxEI < 0.1%). If satisfied, the algorithm stops and outputs the optimal design; otherwise the point with maxEI will be added to the training samples and refit the response surface. The initial sample points are constructed by a sample strategy named uniform design (UD) and a self-adaptive differential evolution algorithm named SMODE is used to search the point of maxEI.



Fig. 1: Original model and the control volumes

3. Achievements

EGO algorithm is used to complete the 4-dimensional drag reduction optimization and only 29 sample points are used to fit the response surface. Aerodynamic drag of the optimal design in the limited design space is 1.56% less than the original vehicle. The engine hood inclination and the tail upturn angle play a leading role in the vehicle's aerodynamic drag in the design space. It demonstrates that the method combine EGO algorithm, CFD numerical simulation technology and Data mining technologies is promising for the computationally expensive black box problems.





Fig. 2 Main effects of the parameters

Fig. 3 ANOVA results

4. Summaries and future plans

Summaries: efficient Global Optimization (EGO) algorithm, based on Kriging response surface and EI function, is used to complete the aerodynamic drag reduction of a vehicle combine with CFD simulation technology. Data mining technology is used to uncover the influence mechanisms of design variables on aerodynamic drag. Aerodynamic drag of the optimal design is 1.56% lower than that of the original vehicle. Data mining results show that the engine hood inclination and the tail upturn angle play a leading role in the vehicle's aerodynamic drag in the design space.

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

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- C. Lai, B. Ren and Y. Zhou: Numerical Investigation on the Influence of Different Vane Type Diffusers on the Performance of Centrifugal Compressor, Advances in Mechanical ngineering, Vol. 9 (8), (2017),1–12.
- [2] <u>C. Lai</u>, M. Duan, <u>X. Chen</u>, <u>Y. Zhou</u> and P. Wen: Multi-objective Optimization of Vehicle Aerodynamic Shape Based on Intelligent Algorithm, *Journal of Beijing University of Technology*, Vol.43, No. 9, (2017), pp: 1230-1236.
- [3] <u>C. Lai, Y. Wang, Y. Si, Y. Zhou</u>: Study on the Effects of Pilot Injection Parameters on Engine Performance, *MACHINE TOOL & HYDRAULICS Hydromechatronics Engineering*, Vol. 45, No. 24, (2017), pp: 1-6.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [4] <u>Z. Fu, C. Lai, Y. Zhou</u>, and S. Obayashi: Experimental Study on Y250 Vortex of Formula 1 Racing, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2017), CRF-60, pp.122-123.
- [5] C. Yan, Q. Wang, C. Lai, and Y. Zhou: Aerodynamic Drag Reduction of a Vehicle Based on EGO, Proceedings of Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai (2017), pp.750-751.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I056
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

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

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

1. Purpose of the project

Heat pipe has been widely used in many occasions, where good thermal performance is indispensable in order to dissipate increasingly high heat fluxes especially in large scale industries. In the present research, the functionalized nanostructured surfaces is used to enhance the thermal performance of the heat pipe. Furthermore, the surface durability and the corresponding thermal performance as well as heat transfer mechanism of heat pipe instituted with nanostructured surfaces are experimentally investigated and physically uncovered to facilitate their further applications.

2. Details of program implement

We have proposed to use the nanostructured surface infused with lubricant, which in turn forms a slippery surface, enabling the condensate droplet removed timely from the surface of the condenser. As a consequence, the drop-wise condensation can be maintained in the condenser, resulting in a better condensation heat transfer and therefore enhanced thermal performance of a heat pipe. This idea has been deeply discussed with Prof. Hiroki Nagai at IFS of Tohoku University during a visit stay there in Sept. 2017, and this idea will be further tested at IFS using loop heat pipe. Shown in Figure 1 is the test facility built using the nanostructured surface in condenser to maintain high heat transfer capacity. We have tested two kinds of thermosyphons with nanostructured surface and pristine surface, respectively so as to understand the performances.



2.0 1.5 1.0

Heat flux (W/cm²) Figure 2 : The ratio of the thermal resistance of the thermosyphons

Figure 1 : The schematic illustration of the experimental setup

Shown in Figure 2 is the ratio of the total thermal resistances of the two kinds of thermosyphons, it is seen that the ratio first decreases and then increases with the heat fluxes, and it is below 1.0 in the experiments, which implies that heat transfer performance of thermosyphon with the nanostructured surface is better than that with the pristine surface.

3. Achievements

The outcome of the collaboration will lead to the understanding of heat transfer mechanisms of nanostructure surfaces under the conditions that heat pipe works. And the thermal performance of heat pipe can be possibly enhanced by using such nanostructured surfaces. The durability investigation of the surfaces will pave the way towards the practical applications in industries.

4. Summaries and future plans

From the research conducted so far, it has been proved that the nanostructured surface can be used in a thermosyphon to enhance the thermal performance. The current enhancement is mainly due to the occurrence of drop-wise condensation in the condenser, and further enhancement should lie in the boiling heat transfer in the evaporator. In the future work, we will put more emphasis on the boiling side and try to find a way to enhance the boiling or evaporation heat transfer by using nanostructured 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] <u>Peng Zhang</u>, <u>Fengyong Lv</u> and Hiroki Nagai: Application of nanostructured surfaces to enhance the thermal performance of a heat pipe, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), CFR-76, pp.158-159.
- 3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

"A kind of thermosyphon and the method to fabricate it", <u>Peng Zhang, Fengyong Lv</u>, January 30, 2018, Approved.

(Award)

Best Poster Presentation Award, "Effect of Surface Structure and Oil Viscosity during Condensation on Slippery Lubricant-Infused Porous Surfaces", <u>Y. Maeda, P. Zhang, F. Lv, B. Shen, A. Askounis, Y. Takata, D. Orejon</u>, March 15, 2018, The 10-th International Conference on Boiling and Condensation. Nagasaki, Japan.

(Press release)

Not applicable.

Project code	J17I057
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

Application of a Data Assimilation Methodology to a Numerical Simulation of Pedestrian Flow

Fumiya Togashi*†, Takashi Misaka** Rainald Löhner***, Shigeru Obayashi**†† *Applied Simulations Inc. **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***College of Science, George Mason University †Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

A data assimilation methodology has been proactively developed in atmospheric modeling. Since atmospheric conditions change drastically over time with even a tiny change of initial conditions, it is inevitable to utilize measurements to improve the accuracy of a prediction. The methodology must be useful in the prediction of pedestrian flow that shares common difficulties such as a sensitivity of the initial conditions and difficulty in the prediction of human motion. The objective of this project is to apply a data assimilation methodology that has been developed at IFS, Tohoku University to our numerical simulation code to improve the accuracy of pedestrian flow simulation

2. Details of program implement

Ensemble Kalman Filter (EnKF), which is a type of the data assimilation methodology, was applied within a computational pedestrian and crowd dynamics simulation tool. The co-author at IFS has developed the EnKF source code, while the computational pedestrian and crowd dynamics code has been developed by the co-author at George Mason University. The codes have been incorporated by the author. The new code was applied to improve the simulation accuracy in the experiment of unidirectional flow in straight corridors as shown in Fig.1. A total of 28 runs were performed in corridors with widths of 1.8m, 2.4m, and 3.0m. To regulate the pedestrian density in the corridors, the widths of the entrance and the exit were changed in each run. In this way, the inflow and outflow of the corridors are controlled by the entrance and exit. The density, velocity of the pedestrian and the evacuation time, which is the time when all the examinees reached the exit, were observed.

EnKF was applied to improve 8 empirical input parameters, namely, desired pedestrian velocity, variability of velocity, relaxation time to achieve desired velocity, variability of relaxation time, variability of pedestrian radius, pushiness (min/max), and comfort zone. The measured pedestrian density and velocity were utilized as the observation data for EnKF.

Figure 2 shows the comparisons of evacuation time of all 28 runs. New runs using the estimated parameter set provided much closer results to the experimental data than the results using the original parameters.



Figure 2 : Comparison of evacuating time of all 28 runs between the experiment (circle) and the computed results using the original parameters (triagle), and using the estimated parameters (diamond)

3. Achievements

We applied the EnKF to our pedestrian flow code, PEDFLOW, to estimate the empirical parameters on the specific experiment. The new runs using the estimated parameter set provided much closer results to the experimental data than the results using the original parameters. The application of EnKF to pedestrian flow simulation will be a useful approach for future pedestrian flow simulations.

4. Summaries and future plans

A numerical simulation code for pedestrian flow which has a data assimilation capability has been developed. The demonstration on unidirectional experimental pedestrian flow was performed in the first year. We confirmed that the methodology is promising. In second year, the methodology will be applied to realistic pedestrian flow prediction such as sightseeing spots.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] <u>F. Togashi</u>, T. Misaka, <u>R. Lohner</u>, and S. Obayashi: A data assimilation application to pedestrian flows, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.20-21.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project Code	J17I060
Classification	General Collaborative Research
Subject Area	Environment and energy
Research Period	April 2017~March 2018
Project year	1st year

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

Ryuhei Yamaguchi*†, Gaku Tanaka*, Taihei Kotani*, Hitomi Anzai**, Makoto Ohta**†† Kahar Osman***, Nadia S. Shafii***

*Chiba University, Graduate School of Engineering

** Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Faculty of Medical and Biological Engineering, Universiti Teknologi Malaysia †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The middle cerebral artery MCA is one of predilection vessels of aneurysm in circle of Willis. The effect of wall elasticity on flow behavior was examined for the comparison of elastic with non-deformable models in pulsatile blood flow wave *in vitro*. In the present study, the effect of wall elasticity on wall shear stress in a patient-specific aneurysm model located at middle cerebral artery was measured using particle image velocimetry in pulsatile blood flow wave *in vitro*. The elasticity significantly affects the behavior of wall shear stress.

2. Details of program implement

The flow behavior inside aneurysm induced at the apex where MCA: M1 bifurcates to M2 and M3 was examined for both elastic and non-deformable models as shown in Fig.1. The configuration of a patient-specific aneurysm with width of N= 9.8 mm, depth of D= 12.1 mm and lateral width of W= 22.0mm (AR= D/N= 1.23) which was scaled up in 3.25 folds of full scale model. We experimentally examined the flow behavior inside aneurysm and the wall deformation using 2D-PIV. Aneurysm wall is made from silicone resin (KE-1606, Shin-Etsu Chemical Ltd.). The elastic modulus E is 0.5 MPa. The working fluid is 51.5% aqueous glycerin solution with a refractive index of 1.41 identical to that of silicone resin, a density of $\rho = 1130$ kg/m³.

3. Achievements

The elastic model deforms accompanying with the flow wave is shown in Fig.2. The elongation ratios of lateral width and bleb neck diameter in elastic model are $\Delta W/W=$







Fig. 2 Deformation of elastic aneurysm model (Re_m = 435, α =1.41).

4.4% and $\Delta db/db = 2.7\%$, respectively. The flow behavior at four phases A, B, C and D is depicted in Fig.3. Globally, the velocity through the inlet of aneurysm in non-deformable model is a little larger that in elastic model. than The distribution of WSS in the bottom half of aneurysm is shown in Fig. 4 for models at mid-systole systole of t/T=0.125. The absolute temporal and spatial averaged value of 0.42 Pa of WSS at four phases in the elastic model. which was significantly smaller than that of 0.81 Pa in the non-deformable model in the range of $s/d_1=0$ to 3.8. Comparing of elastic with non-deformable models, the wall elasticity attenuates WSS. Furthermore, at mid-systole there was the site with negative WSSG adjacent to the site with positive WSSG around the stagnation point S where the internal elastic lamina is thin and might cause injury.

4. Summaries and future plans

Comparing of elastic with nondeformable models, the wall elasticity attenuates WSS. Furthermore, at midsystole there was the site with negative WSSG adjacent to the site with positive WSSG around the stagnation point S where the internal elastic lamina is thin and might cause injury. The positive and negative WSSGs imply "stretch and compression", respectively. In next step, the full- scale model will be fabricated. Using this full-scale model, the WSS reduction and the flow instability will be clarified in future.

- 5. Research Results
- 1) Journal Not applicable.
- 2) International and domestic conferenced, meeting, oral presentation
- R. Yamaguchi, G. Tanaka, T. Kotani, H. Anzai, M. Ohta, K. Osman, N. S. Shafii: Effect of Elasticity on Wall Shear Stress in a Patient-Specific Aneurysm Model in Middle Cerebral Artery, 14th Int. Conf. on Flow Dynamics, (2017), OS4-10, pp.278-288.
- [2] <u>R. Yamaguchi, G. Tanaka, T. Kotani</u>, H. Anzai, M. Ohta, <u>K. Osman, N. S. Shafii</u>: Characteristics of Flow Behavior in Elastic Cerebral Aneurysm Model, *Proceedings* of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), CRF-43, pp.88-89.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.



Fig.3 Flow at median plane in elastic model. (A, B, C, D: *t*/T= 0.00, 0.125, 0.250, 0.375)



Fig. 4 WSS of elastic and non-deformable model at mid-systole (t/T=0.125).

課題番号	J17I064
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	2017.4~2018.3
継続年数	1年目

電磁超音波探傷法のシミュレーション方法の確立とその活用

Establishment of a Simulation Method for Electromagnetic Ultrasonic Testing and Its Application

山本 敏弘*†,高木 敏行**†† *発電設備技術検査協会,**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

電磁超音波探傷法のシミュレーション方法を確立し、電磁超音波探触子(EMAT)の構造や 検査における EMAT の適用方法の最適化にシミュレーションを活用し、EMAT を使用した検 査の改善を目指す.

2. 研究成果の内容

電磁超音波探傷法は、電磁超音波探触子(EMAT)を使用してローレンツ力や磁歪により導体に超音波を発生させ、超音波探傷を行う検査手法である. 我々は、これまで、電磁場の計算にはサイエンスソリューションズ社の電磁場解析ソフトウェア EMSolution を使用し、超音波の伝搬の計算には伊藤忠テクノソリューションズ社の超音波解析ソフトウェア ComWAVE を使用してきた. これにより、EMAT が発生する超音波の伝搬をシミュレーションで再現することができたが、その一方で、汎用の電磁場解析ソフトウェアに共通する仕様による制約でEMAT による超音波の受信過程が再現できなかった. 本年度は、ComWAVE-EM およびComWAVE を利用した電磁超音波探傷法のシミュレーションを行い、超音波の発生と伝搬および超音波の受信過程の再現性の確認を行った.

図1は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316の直方体のブロックの上から EMAT により超音波を入射したときにブロックの側面で観測される超音波の伝搬を実験とシミュレーションで比較したものである. EMSolution が任意波形を扱えるのに対し、ComWAVE-EM では正弦波のみしか扱えないため、EMSolution を使用した場合の方が細かい部分まで再現できているが、どちらのシミュレーション方法で縦波と横波の波面の位置と形状がおおむね再現できている.

図2は、上記と同じ条件において実験とシミュレーションで得られた受信信号を比較したものである。上述の汎用の電磁気解析ソフトウェアを使用する場合の問題は ComWAVE-EM でも解消されていないため、ComWAVE-EM では受信信号を直接計算するのではなく、受信信号と相関があると思われる別の計算を行うことで疑似的に受信過程を再現している。シミュレーションでは、計算時間の関係上、板厚を 10 mm として計算を行ったが、超音波の伝搬の観測では確認されている縦波が受信されていない現象がシミュレーションでも再現されている。


図1:実験およびシミュレーションで得られた超音波伝搬の様子の比較



3. 研究目標の達成状況

これまで難しかった電磁超音波探傷法の受信過程のシミュレーションの計算方法の一つについて検証し, EMAT の最適化に有用なシミュレーション技術の確立が進められた.

4. まとめと今後の課題

超音波の発生と伝搬および超音波の受信過程について ComWAVE-EM を使用したシミュレーションの結果がおおむね妥当であることを確認した.ただし、今年度行った受信過程のシミュレーション結果の妥当性の確認は不十分であり、より詳細な再現性の確認が必要である.また、現在のシミュレーション方法では材料が強磁性体である場合に対応できていないため、この場合のシミュレーション方法についても検討する必要がある.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- [1] <u>T. Yamamoto</u>, R. Urayama, T. Uchimoto and T. Takagi: FEM simulation method for electromagnetic ultrasonic testing and its application, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 96-97.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J17I065
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

Eddy Current Testing and Electromagnetic Acoustic Transducers: Modelling Materials Behavior for Advanced Non Destructive Testing Techniques

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

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

The modeling of tested materials include conductivity and ferromagnetism, as well as frequency dependent properties (such as domain wall motion in ferromagnetic structural materials). Researches show that mechanism study of frequency response of magnetic properties is essential to nondestructive evaluation of materials by electromagnetic techniques. The materials show a particular dependence of their high frequency magnetic behavior that is aimed to be modeled by a macroscopic lumped model. More precisely, losses can be introduced by the use of fractional order time derivatives, which is highly effective for both ferroelectric and ferromagnetic materials. This mathematical operator finds deep physical interpretation as a consideration for electronic conductivity in metallic materials and is a solution of a diffusion equation. During FY2017 following tasks were started:

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

3. Achievements

In this fiscal year, various hysteresis models were tested in regard to their capability to simulate accurately magnetic hysteresis, but also hysteresis minor loops, typically encountered in the Magnetic Incremental Permeability technique. For example, Preisach model, or Dry-friction based model being congruent, these models are unable to exhibit the butterfly loop shape of local permeability versus excitation field.

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

4. Summaries and future plans

Further steps of this collaboration are:

- Refinement of hysteresis models, in order to be able to simulate accurately typical signals encountered in Non-Destructive Techniques
- Other materials will be tested, in order to check the validity of our newly developed techniques and interpretations.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto: A space discretized ferromagnetic model for non-destructive eddy current evaluation; *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54(3), (2018), 6200204, (*Proc. of Computing 2017*, Daejon, Korea).
- [2] <u>B. Zhang</u>, B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto: Preisach's model extended with dynamic fractional derivation contribution; *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54(3), (2018), 6100204, (*Proc. of Computing 2017*, Daejon, Korea).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [3] G. Sebald, <u>B. Ducharne</u>, B. Gupta, T. Uchimoto, T. Takagi: Fractional Order Derivative for Magnetic Hysteresis Dynamics and Interpretation of Non-Destructive Testing Techniques, *Proceedings of the 17th International Symposium* on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp.16-18.
- [4] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto, <u>Y. Herbrard</u>: Characterization and Modeling of Magnetoc Barkhausen Noise Envolope under both Magnetic and Mechanical Stress Excitation, XXII International Workshop on Electromagnetic Nondestruction Evaluation, Saclay, France, (2017).
- [5] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto, <u>Y. Hebrard</u>: From magnetic Barkhausen noise to quasi-static vector Preisach hysteresis model distribution, *18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Chamonix, France, (2017).
- [6] <u>B. Ducharne</u>, B. Gupta, G. Sebald, T. Uchimoto: Dynamic hysteresis lump model including fractional operators for the incremental permeability nondestructive testing, 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Chamonix, France, (2017).
- [7] <u>B. Zhang</u>, B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto: Dynamic magnetic scalar hysteresis lump model, based on Preisach model quasi-static contribution extended with dynamic fractional derivation contribution, *Computing 2017*, Daejon, Korea, (2017).
- [8] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto: Space discretized ferromagnetic model for non-destructive eddy current testing, *Compumag 2017*, Daejon, Korea, (2017).
- [9] B. Gupta, <u>B. Ducharne</u>, G. Sebald, T. Uchimoto: Magnetic lump model for the hysteresis frequency dependence of a polymer matrix, *Computing 2017*, Daejon, Korea, (2017).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I066
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year (progressing)

Molecular Dynamics Study of Transport Phenomena of Nanoscale Water Droplet in a Nano Pore

> Akinori Fukushima*, Takashi Tokumasu**†, Philippe Vergne ***†† *Facility of Engineering, University of Fukui **Institute of Fluid Science, Tohoku University *** LaMCoS, Université de Lyon †Applicant, †† Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The phenomenon of momentum and energy transfer between two different kinds of material is an important issue for both theoretical and applied fields. The transfer of momentum and heat between liquids and solids is a particular focus in a variety of fields of study. Moreover, as a result of developments in microfabrication, nano-scale mechanical devices can be realized, and the transfer of heat and momentum between liquids and solids on the nano-scale can therefore be studied. Among the various phenomena, we focused on liquid bridge shearing by solid walls. The dynamics of a liquid bridge is more complex than that of filled liquid, which has no liquid-vapor interface. In this study, we focus on effects of liquid-vapor interface onto the momentum and heat transport phenomena seen in the interface region. In this year, we improve the previous numerical model of the shear stress.

2. Details of program implement

In this study, we consider that a liquid fills a channel bounded by two parallel walls, and is sheared by solid walls moving with a constant velocity. After a sufficient time, the system reaches a steady state with a certain liquid temperature and velocity distribution. Assuming that a viscosity of a liquid depends on an average temperature of a whole liquid, we can derive an equation that evaluate an average temperature based on an energy transport and momentum transport equations as follow,

$$\overline{T} = T_W + \left(\frac{\mu_0 W}{2\alpha} + \frac{\mu_0 W^2}{12\kappa}\right) \left(\frac{2V}{W + 2\frac{\mu_0}{\beta} \exp\left[-\frac{E}{k_b \overline{T}}\right]}\right)^2 \exp\left[-\frac{E}{k_b \overline{T}}\right]$$

where $T_{\rm w}$ is a temperature of a solid wall, V is a wall velocity, W is a channel width, μ_0 is a standard viscosity, $k_{\rm b}$ is Boltzmann constant, E is an activation energy, β is a Navier's friction coefficient, a is a parameter to describe a temperature gap between a liquid and a solid wall. Using this equation, we evaluate channel size dependences of temperature and shear stress. We evaluate all parameters related to the viscosity and energy and velocity gaps by molecular dynamics simulation. After those additional simulations, we evaluate the channel size dependence of the temperature in the steady state. Figure shows obtained temperature by our modified equations. Figure (a) shows a left hand side and right hand side terms in our new equation in the case that the channel size is in 10 nm. A horizontal axis is an average temperature and a vertical axis is an expected value by our equation. The point where two lines intersect is the temperature in the steady state. Figure (b) shows the channel size dependence of the temperature of the liquid. In the case of nm order channels, the temperature rises greatly compared with the temperature in the case of µm order channels.



Figure Evaluated temperature by our equation. (a) A right-hand side and left-hand side terms in 10 nm channels. (b) Channel size dependence of the temperature of the liquid.

3. Achievements

In this project, we expected to clarify the momentum and heat transport phenomena between the liquid and solid walls in nano scale. In this year, we modify our numerical model to obtain the accurate description of the temperature of the liquid and the shear stress inside the liquid. We obtain the sufficient results and start to write a full paper. Moreover, as the next step of the project, we start to build the simulator to evaluate the droplet dynamics in meso scale with lower simulation cost than that in molecular dynamics simulation.

4. Summaries and future plans

We have constructed and modified the numerical model of the temperature and the shear stress including the temperature increase by the friction force. Compared with previous models, the parameters that should be evaluated are less. Nevertheless, the expected results of our model agree with results of molecular dynamics simulation. In future plan, we construct simulator to evaluate the dynamics of the droplet in meso scale channel based on the continuum model with lower cost than that in molecular dynamics simulation.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- <u>Akinori Fukushima</u>, <u>Nicolas Fillot</u>, Takashi Tokumasu, <u>Philippe Vergne</u>: Molecular Dynamics of Nano Droplet Shearing, *Proceedings of the Seventeenth International* Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp.106-107.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I069
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

2017 Maintenance Science Summer School in Sendai

Tetsuya Uchimoto*†, Toshiyuki Takagi* Christian Boller **†† *Institute of Fluid Science, Tohoku University ** Saarland University, 66123 Saarbrücken, Germany †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Maintenance Science Summer School aims at providing participants with the opportunity to learn practice and theory for the maintenance activities of nuclear power plants. It also intends to the friendship exchange of students and young researchers in Asian countries.

2. Details of program implement

The 8th Maintenance Science Summer School was held at Institute of Fluid Science (IFS) from July 27th to August 1st, 2017. The first school was hold in 2010 at IFS with support from the Global COE Program Word Center of Education and Research for Trans-disciplinary Flow Dynamics (GCOE, 2008-2012), and the schools were annually organized at various universities: Osaka University in 2011, Tsinghua University (China) in 2012, Hokkaido University in 2013, National Tsing Hua University (Taiwan) in 2014, The University of Tokyo in 2015, KAIST in 2016.

This year we focus on nuclear decommissioning at the Fukushima Nuclear Power Plants where we will consider very difficult tasks in extreme environments, and learn and elaborate on how the maintenance science can enhance nuclear decommissioning.

33 participants (5 from China, 2 from Korea, 4 from China, 22 from Japan) were joined the school. Looking at the nationality of students, 22 students are from foreign countries such as China, Taiwan, Indonesia, France, India (Fig. 1).

1) <u>Classroom Lectures</u>

Lecturers were sent to the school from the utility and vendor companies to give lectures on the fundamental and practical aspects of design, operation and decommissioning of nuclear power plants (NPPs). After that the current status and future challenges for the decommissioning and decontamination of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station from Tokyo Electric Power Company. In addition, Mr. D. Chapin from MPR who served as a consultant of TMI accident gave a lecture on decommissioning and decontamination (D&D) of shutdown accident-free NPPs and Accident-Damaged NPPs. After that, students learned various technological fields such as material degradations, nondestructive testing and health monitoring, big data analysis and so on.

2) Project Works

For the project works, participants were divided into five groups, and each group investigated the state-of-the-art and novel ideas about the following subjects in relation to decommissioning of Fukushima nuclear power plants:

- Corrosion and other damages
- Health monitoring & big data analysis
- NDT and robotics

Figure 2 shows the photographs of group works and presentation.

3) <u>Scientific Tour</u>

Students toured to Naraha Remote Technology Development Center, Japan Atomic Energy Agency, and



Figure 1 : Fig. 1 Group photograph.







Figure 2: Group work and presentation

Figure 3: RPV Pedestal of Fukushima Dai-ni.

Fukushima Dai-ni Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company.

At Naraha Remote Technology Development Center, students experienced the virtual reality system of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, and visit technology. Then, they visited Fukushima Dai-ni Nuclear Power Station that is a sister plant about 10 facilities at Fukushima Dai-ni, and learned how they escaped Daiichi's fate after the severe damage by the earthquake and Tsunami.

3. Achievements

Graduate students especially who participated this school learned a lot about the maintenance activities from academic point of view, which was expected when we planed the summer school. Many of them are stimulated by the scientific tour.

4. Summaries and future plans

Students are highly motivated and learned a lot about the maintenance science. In addition, they developed friendship through various social events in the summer kilometers to the south and also suffered severe damage by the Tsunami. They visited inside of the primary containment vessel as shown in Fig. 3 as well as various some test facilities to develop robots and other remote schools such as parties and cultural events. Next year, the school will be organized by Shanghai University.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] 内一哲哉, 高木敏行: 保全科学サマースクール 2017, 保全学, 第16巻 (2017), pp. 53-55.
- [2] 陳偉熙: 第8回保全科学サマースクール 2017 体験記, 保全学, 第16巻 (2017), pp. 56-57.
- [3] An-Lun Li, Yun-Tsu Tsai, Ching Ju Yang, Yu Hsuan Li: Maintenance Science Summer School 2017 Report, 保全学, 第 16 巻 (2017), pp. 58-60.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. Not applicable.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J17I070
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

離脱衝撃波脈動を利用した超音速飛行体の姿勢制御 Attitude Control of Supersonic Projectile by Detached Shock Pulsation

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

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

流体科学研究所共同利用施設の弾道飛行実験装置を利用し、4 種類の模型(図1)をM1.8 で大 気環境下の測定部に自由飛行させ、周囲で発生する衝撃波脈動の可視化計測を実施した(図2.お よび図3).また、今回の実験では、本弾道飛行実験装置では、未経験の形状の模型を射出する. そのため、軽量化と強度確保という相反する条件を満たす模型構造を見いだすことを第2の目的 とし、射出時の模型の健全性を確認した.



Model	L	D1	D2
Type 0	50	0	0
Type 1	70	42	10
Type 2	97	80	0
Type 3	52	20	5

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



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



図3. 弾道飛行実験装置から射出直後の模型飛しょう姿勢と周囲の衝撃波の可視化

3. 研究目標の達成状況

研究目標(申請時の予想される結果)は、前向きキャビティ模型に旋転運動が生じ、慣性モー メントが発生することで飛しょう体の姿勢が安定する効果を得ること.また、小孔取付位置と形 状による多様な姿勢制御の可能性を明らかにすること、であった.この目標に鑑みると、達成率 は低いといわざるを得ない.大きな要因は、弾道飛行実験装置による射出模型形状が過去にない ものであるため、所望の射出 Mach 数達成のための模型製作方法の最適化に多くの試作と試射が 必要であったため、研究の主要な目的達成の予備実験的な実験にとどまったためである.

4. まとめと今後の課題

Forward-Facing Concave Cavity にスパイク (1/D = 1.25) を M1.8 前後で超音速自由飛行させ、模型周囲の衝撃波振動による模型内部の昇圧を利用した姿勢安定法の予備実験を行った. その結果をまとめると;

- 1) 高圧室へのヘリウム 40 気圧充てんで、100 g 前後の模型を M1.8 で自由飛行可能である.
- 2) 模型の自由飛行は、撮影範囲では安定している.
- 3) 衝撃波振動周波数は、風洞実験と同様に、L/Dの関数であることが示された.

4) 加速の衝撃のため, 重心調整用金属リングの脱落が発生した. 固定方法の検討が必要である.

5. 研究成果(*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [1] <u>Toshiharu Mizukaki</u>, Kiyonobu Otani, and Shigeru Obayashi: Attitude Control of a Supersonic Projectile by Pulsation of Bow Shock, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.140-141.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I071
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

水中放電とマイクロバブルを用いた樹脂薄板破砕へのマイクロバブル径の影響の実験的研究 Experimental Study of the Influence of Microbubble Diameter on Disintegration of Thin Resin Plate Using the Underwater Electrical Discharge and Microbubbles

> 小板 丈敏*†, 孫 明宇**†† *埼玉工業大学工学部, **東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

本研究では衝撃波破砕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, 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を用い た高効率樹脂薄板破砕を可能とするマイクロバブル径の調査を目的とする.

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、マイクロバブル直径 $D_{\rm MB}$ 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砕の 一連の挙動を解明した.そして、マイクロバブルを活用した衝撃波樹脂薄板破砕を誘起する $D_{\rm MB}$ を調査した.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 旋回方式マイクロバブル発生装置(M2-LM/SUS)を用いて、マイクロバブル直径 $D_{\rm MB}$ =10,20, 40 µm と変化させた.そして、マイクロバブルをポリスチレン (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 J、 $D_{\rm MB}$ =10 µm、 $L/R_{\rm max}$ =1.00 (E_e =3.6 Jにお ける放電誘起単一気泡の最大半径 $R_{\rm max}$ =9.0 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 ms (h) t = 2.317 ms (i) t = 2.707 ms (j) t = 3.107 ms (k) t = 3.237 ms (l) t = 3.767 ms 図 1 樹脂薄板のマイクロバブル利用放電誘起破砕の可視化画像 ($E_e=3.6 \text{ J}, D_{MB}=10 \text{ } \mu\text{m}, L/R_{max}=1.00$)

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、 $E_e=3.6 \text{ J}$ 、 $L/R_{max}=1.00$ の場合、 $D_{MB}=10 \, \mu m$ 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 板破砕を誘起するマイクロバブル直径の解明を行い,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.

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マイクロバブル直径を解明し、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、放電エネルギーが本破砕法の高 効率化に与える影響の調査である.高効率な衝撃波樹脂薄板破砕法の開発には最適な放電エネル ギー、爆発深さ、および、マイクロバブル半径の調査が必要である.今後の課題を実施すること により、本放電破砕法に最適な放電エネルギーが解明され、そして、最適放電エネルギー、およ び、申請者の過去の研究で解明した最適な爆発深さとマイクロバブル半径を使用することにより、 高効率な衝撃波樹脂薄板破砕法の開発が完成することが見込まれる.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] <u>T. Koita</u>, M. Sun, <u>T. Koike</u>, <u>M. Numata</u>: Experimental Study of the Effect of Microbubble Diameter on Fragmentation of Thin Resin Plate by Underwater Explosion, *Proceedings* of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp. 188-189.
- *[2] 小池貴大,小板丈敏,孫明宇:マイクロバブルと放電誘起水中爆発を用いた樹脂薄板破砕現象に関する基礎研究,関東学生会第57回学生員卒業研究発表講演会,(2018),112.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17I072
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

粒子-流体連成解析による高濃度ナノフルイドの流動特性の解明に関する研究 A Study on Flow Characteristics of High Concentration Nanofluids Using a Coupled Particle-Fluid Flow Simulation

塚田 隆夫*†,小宮 敦樹**†† 庄司 衛太*,薄根 真*,高橋 龍司*,山際 幸士郎* *東北大学大学院工学研究科,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

金属や金属酸化物などのナノ粒子を有機溶媒中に高濃度に分散した懸濁液である高濃度ナノフルイドは、3Dプリンティングやプリンテッドエレクトロニクス用の高濃度低粘性ナノインクなど、様々な分野への応用が期待される新たな機能性流体材料である.高濃度ナノフルイドの開発においては、溶媒中でのナノ粒子の分散・凝集制御技術、特にナノ粒子表面の有機分子修飾によるナノ粒子/溶媒間の親和性制御技術が重要となる.本研究では、高濃度ナノフルイドの最適設計法の確立に資するため、表面を有機分子で修飾した無機ナノ粒子を含むナノフルイドの最適とし、流体運動(CFD)とナノ粒子表面の修飾有機分子による相互作用を考慮した粒子運動(DEM)の連成シミュレータを用いて、ナノフルイドのせん断流中におけるナノ粒子構造(分散・凝集挙動)及びナノフルイドの流動状態に及ぼす諸因子(修飾有機分子,溶媒の種類、有機分子の表面修飾率、せん断速度など)の影響を検討し、表面修飾有機分子/溶媒間の親和性、ナノ粒子構造とナノフルイドの流動特性との相関を解明する.さらに、同シミュレータを固/気/液3相接触線近傍の流体及び粒子運動の解析に展開し、ナノフルイドの濡れ性について詳細に検討する.

2. 研究成果の内容

2.1 新しい解析手法の開発

本研究で利用する CFD-DEM 連成シミュレータは, SNAP 研究会が開発した固液混相流シミュ レータ SNAP-F を基本とする.本研究では,既存のシミュレータに対してナノ粒子表面の修飾有 機分子の相互作用の影響を新たに考慮することにより,表面修飾ナノ粒子を含むナノフルイドの 流動特性を厳密な解析を可能とした.本シミュレータにより,平板間のせん断流中におけるナノ フルイドを対象として,表面修飾ナノ粒子の分散・凝集挙動,流動特性に及ぼす諸因子の影響を 検討できるようになった.

2.2 せん断流中におけるナノ粒子の分散・凝集挙動及びナノフルイドの流動特性の解明

粒径 25 nm の Al₂O₃ ナノ粒子/トルエンからなるナノフルイドを対象として,固体平板間(間隔: 250 nm)のせん断流中におけるナノ粒子の分散・凝集挙動に及ぼす諸因子(表面修飾有機分子の種類,表面修飾率,ナノ粒子体積分率,せん断速度)の影響について検討した.図1にシミュレーション結果の一例を示す.トルエンとの親和性の高いオレイン酸修飾ナノ粒子においては,修飾率が高い場合は良く分散するが,修飾率が低くかつ高せん断速度の場合は凝集体を形成する.

一方,トルエンに対して低親和性のデカン酸修飾ナノ粒子においては,限られた範囲のせん断速 度においてのみ分散することが示された.以上のナノ粒子の分散・凝集メカニズムを粒子間ポテ ンシャルエネルギーに基づき説明するとともに,ナノ粒子の分散・凝集状態によって,ナノフル イドの流動特性が大きく変化することを明らかにした.



0 6

図1:高濃度ナノフルイド内のナノ粒子の分散・凝集挙動に及ぼす表面修飾有機分子の影響

3. 研究目標の達成状況

CFD-DEM 連成シミュレータにより高濃度ナノフルイドのせん断流中におけるナノ粒子の分散・凝集挙動及びナノフルイドの流動状態に及ぼす修飾有機分子等の諸因子の影響を明らかにすること,および表面修飾有機分子/溶媒間の親和性ーナノ粒子構造ーナノフルイドの流動特性との相関を解明することに関して,ほぼ達成できたと考える.

4. まとめと今後の課題

本研究では、ナノ粒子表面の修飾有機分子による相互作用を考慮した CFD-DEM 連成シミュレータにより、高濃度ナノフルイドのせん断流中におけるナノ粒子分散・凝集挙動、ナノフルイドの流動特性を明らかにした.また、本研究では主に閉空間内の固/液2相の流動シミュレーションを行い、その流動特性を評価してきた.今後は、本シミュレーションを固/気/液3 相接触線近傍の流体および粒子運動の解析への展開が課題である.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- <u>Shin Usune</u>, <u>Masaki Kubo</u>, <u>Eita Shoji</u>, Atsuki Komiya, <u>Takao Tsukada</u>: A study on flow characteristics of high concentration nanofluids using a coupled particle-fluid flow simulation, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.168-169.
- [2] <u>Shin Usune, Masaki Kubo, Takao Tsukada, Osamu Koike, Rei Tatsumi, Masahiro Fujita, Tadafumi Adschiri</u>: Numerical Investigation of Rheological Properties of Nanofluids Containing Organic Modified Nanoparticles, 2017 AIChE Annual Meeting, Minneapolis, (2017).
- [3] 高橋太郎, 薄根真, 久保正樹, 庄司衛太, 塚田隆夫, 小池修, 辰巳怜, 藤田昌大, 阿尻雅文: 溶媒蒸発に伴う表面修飾ナノ粒子の構造形成に関する数値シミュレーション, 化学工学会第 49 回秋季大会, 名古屋, (2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J17I076
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	2nd year

Electronic and Spin Properties of Carriers Localized in 3D Array of Ge/Si and Ge/Si/Sn Nano-Disks Fabricated by Bio-Template Top-Down Etching

> Stepina Natalia*†, Seiji Samukawa**†† *Institute of Semiconductor Physics **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Details of program implement

Spin resonance of electron states in a Ge/Si heterosystem with Si nanoclusters prepared by Bio-template Top-down etching has been investigated. Electron localization in Si nanoclusters is confirmed by an analysis of the obtained g-factor values. An isotropy of the ESR linewidth is considered as consequence of the absence of Dyakonov- Perel mechanism in the structures under study.



FIG. 1: The ESR signals obtained for the heterostructure with Si nanoclusters with/without illumination; microwave power and frequency P=0.063 mW, temperature T=6.5K.

2. Achievement

It was grown and etched QD arrays with different diameter of nanodiscs. The ESR signal and spin relaxation time will be measured on the structures with different size of Ge/Si QDs.

3. Summaries and future plans

In summary, using the ESR-measurements, we have studied the electron localization in the Si nanoclusters embedded in NCs that were fabricated by neutral beam etching of Si0.75Ge0.25/Si/Si0.75Ge0.25 double-quantum-well layers. It was shown that spatial localization of electrons depends on the NC diameter. In the structures with narrow NCs (13–15 nm), electron localization inside NCs is realized only under the illumination. In the dark, electrons are localized in the strain-induced potential wells under the bottom of NCs. In this case, localization sites are not separated by air barriers, and so, the electrons can easily tunnel between them and lose the spin orientation by the DP mechanism.

The illumination pulls electrons into Si nanoclusters embedded in NCs due to Coulomb attraction to photoholes trapped in NCs, which results in one order increase in spin relaxation times. In the structure with a NC diameter in the range of 20–25 nm, the electron localization inside NCs is realized both in the dark and under the illumination. In this case, a separation of NCs leads to the suppression of the DP mechanism that reveals itself in the isotropy of the ESR linewidth. The fourfold increase in spin lifetimes under illumination in the thick NC structure is explained by the suppression of surface- center-induced spin relaxation due to electron wave function shrinking caused by the Coulomb interaction with photoholes.

For future we plan to change the initial composition of layers to increase spin-relaxation time.

- 4. Research results
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- <u>Natalia Stepina</u>, <u>Aigul Zinovieva</u>, <u>Anatolii Dvurechenskii</u>, Shuichi Noda, <u>Md.</u> <u>Zaman Molla</u>, Daisuke Ohori and Seiji Samukawa: Spin Relaxation in Si Nanoclusters Embedded in Free-Standing SiGe Nanocolumns, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.58-59.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I078
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	3rd 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 ** Department of Biophysics and Radiation Biology, Semmelweis University †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Electrorotation is the circular movement of an electrically polarized micron sized particle or material. Wide range of applications (e.g. microscopic motor) motivates researchers to find materials showing electrorotation with microfabrication possibilities. In our previous work, we have reported the development of micron-sized EAP composite disks that showed electrorotation in uniform DC and AC electric fields, and presented the first direct observation of DC electric field induced rotation of epoxy-based polymer (SU8 2075 photoresist) rotors with variable size.

As a direct continuation of our previous research work, 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 miniaturized cubic micro-motors of 3x3x7 mm inner size with a cylindrical EAP composite rotor in dielectric oil have been fabricated using a 3D printer. 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 two 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 diameter and height of the cylindrical cylindrical rotors. And also, we have performed rotational direction control





Figure 1: Relationships between N and E without load.

Figure 2: Changes of relationships of torque T vs. rotational speed N with E.

using two extra electrodes both sides of GND electrode to break the symmetry of the electric field.

3. Achievements

As shown in Fig.1, at the same electric field intensity, the shortest rotor (L=1.0mm) performs the most intensive rotary motion. And the induced torque of the motor decreases with increasing the rotational speed and increases with increasing the electric intensity as shown in Fig.2. The electric torque $T_{\rm E}$ is obtained by adding viscous resistive torque $T_{\rm v}$ to the measured torque T. where the viscous torque $T_{\rm v}$ is the measured torque at *E*=0 kV/mm and is proportional to the rotational speed Nas seen in Fig.2. So, the electric torque $T_{\rm E}=T^{-}T_{\rm v}$ might be constant above 200 rpm, independent of the rotational



Figure 3 : Alteration of the rotational direction by extra electrodes that modify the field distribution.

speed. We have succeeded in controlling the rotational direction using two extra electrodes A and B both sides of a GND electrode to break the symmetry of the electric field, as shown in Fig.3(a). When the side electrode A is connected to the GND, we always observed directed clockwise rotation of the rotor. On the other hand, the connection of the side electrode B to the GND leaded to counter-clockwise rotation of the rotor as seen in Fig.3(b).

4. Summaries and future plans

The obtained results will provide fundamental information on micro-motor characteristics which is important for further micro-engineering development.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- M. Nakano, A. Totsuka, C. Sato and <u>M. Zrinyi</u>: Miniaturized Micro-Motors with EAP Composite Rotors in Dielectric Liquid under DC Electric Field, *Proceedings of* the 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2017), France, Paper No.SP_135 (2017), (2 pages).
- [2] <u>M. Zrinyi</u> and M. Nakano: High electric field used in material science, *Proceedings of 138th IIER (International Institute of Engineering and Researchs) International Conference on Chemical and Biochemical Engineering (ICCBE)*, Taiwan, Paper ID: II-CBETAI-29117-7904 (2017), (6 pages).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [3] <u>M. Zrinyi</u> and M. Nakano: Micro-Motors of Electro-Active Polymer Rotor Rotating in Dielectric Liquid, *Proceedings of Fourteenth International Conference on Flow Dynamics (14th ICFD2017)*, Sendai, OS12-9 (2017), pp.464-465.
- *[4] M. Nakano and <u>M. Zrinyi</u>: Miniaturized Micro-Motor with EAP Composite Rotor Rotating in Dielectric Liquid under DC Electric Field, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2017)*, Sendai, CRF-35, (2017), pp.72-73.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J17I082
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目(発展)

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

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

1. 研究目的

水中プラズマ流における放電現象は、相変化や熱流動場、電場、化学反応場を含む現象が 重畳する複雑流動場を形成している。特に、放電形態の一つであるストリーマが、水中をど のように進展するかについては十分に解明されていない。水中プラズマ流の産業分野への応 用において、化学種生成の鍵を握るストリーマの進展機構を明らかにすることは大変重要な 課題である。そこで、本研究ではストリーマの進展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、マッハツェンダー干渉法やシャドウグラフ法では可視化できなかっ た微弱な圧力波を可視化する手法の開発を行った.可視化は、シャドウグラフ法 の光学系において観察対象物の前後に偏光板を設置することで行った.これによ



Fig.1. A series of shadowgraphs of the negative streamer propagation with pressure waves taken with an exposure time of 5 ns at 10 Mfps when the voltage of -23 kV was applied (a) and the synchronized waveforms of the applied voltage and the discharge current (b), and the magnification of the discharge current with camera gate signals (c).

り、今まで観察ができなかったストリーマの進展に伴う圧力波の発生を可視化す ることに成功した.図1に電極先端から進展する負極性ストリーマが圧力波を形 成している様子を示す.圧力波の形成は、パルス状の放電電流波形の発生と同期 していることから、ストリーマ発生時に形成されることが明らかになった.過去 の研究において、このように断続的に圧力波が発生することは報告例がなく、世 界で初めてこの現象を明らかにすることができた.

3. 研究目標の達成状況

本年度は、負極性ストリーマの進展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に伴う圧力波の発生の可視化に成功し、放電電流と圧 力波の相関を示すことで、ストリーマ発生時に圧力波が形成されることを明かにした。今後 は、圧力波を詳細に解析することで、断続的に進展する機構や分岐の機構について解析を進 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] T. Sato, R. Kumagai, T. Nakajima, K. Ohtani, A. Komiya, <u>T. Kaneko</u>, and <u>S. Kanazawa</u>: Visualization of inception, propagation and collapse process of underwater positive streamer, *31st International Symposium on Shock Waves (ISSW31)*, Nagoya, (2017), Presentation No. SBM000288.
- [2] R. Kumagai, <u>S. Kanazawa</u>, K. Ohtani, A. Komiya, <u>T. Kaneko</u>, T. Nakajima, and T. Sato: Propagation analysis of negative streamer channel in water, *23rd International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC23)*, Montreal, Canada, (2017), Presentation No. U4-10-359.
- *[3] R. Kumagai, <u>S. Kanazawa</u>, K. Ohtani, A. Komiya, <u>T. Kaneko</u>, T. Nakajima, and T. Sato: Visualization of Pressure Field of Negative Discharge in Water, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2017)*, Sendai, (2017), pp.6-7.

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) (特許) なし (受賞) なし (マスコミ発表) なし

Project code	J17I083
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	3rd 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 entire surface higher than the ambient pressure. Since cavitation does not appear in gas, the mechanism of gas lubrication is different from that of liquid lubrication and was not explained. Recently, the applicant 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

The lubricated surface of the slider is given by the grid of 4x4 dimples cut out of the repeated dimple pattern. The lower counter surface is sliding in the *x* direction. Considering the bisecting plane along the *x*-axis as a symmetry plane, we only needed to simulate the flow field in the half of the lubricated region, as shown in Fig. 1a. Each dimple has the same shape of a right-angled parallelepiped, as shown in Fig. 1b. In the reference case (Case 1), the 4x4 dimples were located inside the slider surface, the flat parts between neighboring dimples in the repeated dimple pattern were chosen as the front and trailing edges of the slider surface, as shown by the solid outline in Fig. 1a. In the other case (Case 2), the centerlines of the first dimple and the fifth dimple of the repeated dimple pattern were chosen as the front and trailing edges of a shown by the dashed outline seen in Fig. 1a. The ambient gas was atmospheric air with a pressure of 1 atm. The slider surface is stationary, while the counter surface, the ambient air is involved in the narrow gap between the two sliding surfaces and the pressure changes spatially.

Figure 2a shows the pressure distribution on the counter surface for Case 2. Here, the ratio of local pressure P to the ambient pressure P_{∞} is presented. The lubrication system considered here was connected to the atmospheric air in the direction normal to the sliding direction. In such a case, the side leakage of gas is problematic because it causes a loss of generated high pressure, i.e., it decreases the load capacity of the lubrication system. In Fig. 2a, we see that the changes of the pressure do not extend to the side edge of the slider. In Fig. 2b, the pressure distributions along the dashed-dotted centerlines of the outer and inner rows of dimples are shown. The pressure distributions under the two rows of the dimples are almost the same. It means that we successfully restrained the side leakage to some extent based on the knowledge which we obtained in the former years. Nevertheless, the peak value of pressure gradually decreases in the *x*-direction. This means that a small amount of air leaks from the side edge of the slider.



Fig. 1: Schematic diagrams of (a) lubricated region and (b) one dimple pattern.



Fig. 2: Pressure distributions (a) on the counter surface and (b) along the centerlines of the rows of dimples.

3. Achievements

We demonstrated that the knowledge obtained in the former years to prevent the side leakage of gas is useful.

4. Summaries and future plans

In the new project, which is developed from the present project, we will accumulate knowledge of the collective function of a group of dimples and the side leakage to the atmosphere for practical use of this lubrication system.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] <u>Pavel_Vashchenkov</u>, <u>Yevgeniy_Bondar</u>, Yoshiaki Kawagoe, Shigeru Yonemura: Numerical Investigation of 3D Flow in Textured Micro-/Nanoscale Channel by the DSMC Method, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2017)*, Sendai, (2017), pp. 114-115.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I084
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year (progressing)

Simultaneous Evaluation of Plastic Deformation and Residual Stress with ENDE 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

To investigate the feasibility of the magnetic NDE method for simultaneous evaluation of the plastic deformation and residual stress in a structure of ferromagnetic steel, the influence of environmental conditions, i.e., rolling direction, operation temperature and biaxial stress state was studied experimentally. The feature parameters of the MBN and the MFL were measured with a plastic deformation introduced under different conditions. The experimental results show that the MFL method is more robust against the environmental influence.

2. Details of program implement

An integrated magnetic NDE system developed in the project of previous years was adopted to measure the MBN and MFL signals for TPs of different conditions. 2 groups of TPs of parallel and perpendicular rolling directions and of different plastic deformations were fabricated at first. Then, plastic deformations were introduced under high temperature to investigate the influence of the operation temperature. In addition, a group of biaxial TPs were also designed and fabricated. Finally, the MBN and MFL signals of TPs with different plastic deformations were measured at different rolling direction, loading temperature and stress state.

Fig.1 gives example testing results of MFL for TPs with different rolling direction, plastic deformation introduced under different temperature, and TPs of uniaxial and biaxial stress state. One can find that the MBN signals were influenced by the rolling direction while the MFL signal shown less difference. On the other hand, both the MBN and MFL signals are quite different for room and high temperature. In addition, there is no significant change in the MFL signals but the MBN signals show clear difference for the uniaxial and biaxial stress state. From comparison, it was found that the MFL technique has better robustness against the practical testing conditions.



Fig.1 Comparison of MFL signals for different environmental conditions

3. Achievements

The influence of the rolling direction, operation temperature and biaxial stress state on the evaluation of plastic deformation was experimentally investigated. The results show that the MFL method is relative robust against the rolling direction and biaxial stress state, but can be influenced by temperature. On the other hand, the MBN signals can be affected by all the three conditions significantly. In practice, a proper calibration under practical conditions is helpful for the simultaneous evaluation of plastic strain and residual stress.

4. Summaries and future plan

Based on the experimental results of this year and those of last project, it was proved that the plastic deformation and the residual stress can be evaluated at the same time by using the hybrid electromagnetic nondestructive techniques of MFL, MBN and MIP method. However, to apply the method to the practical application environment, a proper calibration under practical conditions is necessary especially for the case with high temperature. As future plan, the nondestructive evaluation of fatigue damage in a ferromagnetic material will be studied by using the integrated electromagnetic NDE method and signals fusion approach.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] C. Pei, P. Xiao, S. Zhao, <u>Z. Chen</u>, T. Takagi: A Flexible Film Type EMAT for Inspection of Small Diameter Pipe, *J. Mech. Sci. Tech.*, 31 (2017), pp.3641-3645.
 - [2] <u>S. Xie</u>, M. Tian, <u>H-E. Chen</u>, Y. Zhao, L. Wu, <u>Z. Chen</u>, T. Uchimoto, T Takagi: Evaluation of Wall Thinning Defect in Magnetic Material Based on PECT Method under Magnetic Saturation, *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, 55 (2017), pp.49-59.
 - [3] <u>S. Xie</u>, M. Tian, C. Pei, <u>H-E. Chen</u>, <u>Z. Chen</u>, T. Takagi: Composite Defects Evaluation Using the Hybrid NDT Methods of PECT and EMAT, *Studies in Appl. Electromagn. Mech.*, 42 (2017), 139-149.
 - [4] X. Li, S. Xie, H. Yuan, Z. Chen, T. Takagi: A Research on Numerical Simulation of ACFM Signals for Nondestructive Inspection of Buried Pipes in Nuclear Power Plants, *E-Journal of Advanced Maintenance*, 9-2 (2017), pp.104-111.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[5] <u>Z. Chen, S. Xie</u>, <u>M. He, H-E. Chen</u>, T. Uchimoto, T. Takagi: Simultanous evaluation of plastic deformation and residual stress with ENDE methods, *Proc. 17th Int. Symposium Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), 92-93.
 - [6] <u>S. Xie</u>, L. Wu, Z. Tong, <u>H-E. Chen</u>, <u>Z. Chen</u>, T. Uchimoto, T. Takagi: Combination Effect of Plastic Deformation and Fatigue Loads on Electromagnetic Properties for 304 Austenitic Stainless Steel, *Proc. 22th ENDE*, Saclay, (2017), 106-107.
 - [7] <u>S. Xie</u>, M. Tian, <u>Z. Chen</u>, T. Uchimoto, T. Takagi: A signal separation method for hybrid PECT/EMAT NDT method based on wavelet analysis, *Proc. of 4th Int. Symp. Smart Layered Material Structure for Energy Saving*, 3-4, Sendai, (2017).
 - [8] <u>M. He</u>, S. Zhao, C. Pei, <u>S. Xie</u>, <u>Z. Chen</u>, T. Uchimoto, T. Takagi: Experimental Research on EMAT of Plastic Deformation Based on the Polarization of Rayleigh Wave, *Prof. of 14th Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2017), 726-727.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I085
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

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

Chih-Yung Huang*†, Hiroki Nagai**††

*Dept. of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In this project, Pressure-Sensitive Paint (PSP) has been developed for the application of detecting gas mixing in T-type micromixers. This technique has been used and demonstrated as the promising experimental for macroscale pressure measurements in wind tunnel test. This is the first time adapting this technique to quantitatively visualizing different gases mixing in T-type micromixers with great details. The evolution of gas mixing due to diffusion effect can be characterized at low Reynolds numbers as in laminar flow regime. Enhanced mixing as the twisted flow patterns can be identified at high Reynolds numbers, as in engulfment flow regime.

2. Details of program implement

The PSP sensor of Rudpp has been successfully applied to T-type micromixers, which were made by micro-fabrication using PMMA plates. A fluorescence microscope with a scientific grade CCD camera was used to acquire the luminescence images inside the micromixers, and those images were later translated to the oxygen concentration after in-situ calibration. Different gases mixing, such as Nitrogen-Oxygen, Argon-Oxygen, and Helium-Oxygen, have been carefully examined through different Reynolds numbers ranging from laminar flow regime to engulfment flow regime. Simulation results using ANSYS CFX have been included for the comparison, and favorable agreement was established. From the experimental results, Helium-Oxygen has better performance at low Reynolds number around 120, which is due to the superior diffusion coefficient. On the other hand, Argon-Oxygen showed greater mixing efficiency at high Reynolds number of 600, which is attributed to the early triggering of engulfment flow.



Figure 1 : Nitrogen-Oxygen mixing at Reynolds number of 120: (a) PSP experiment (b) simulation (c) lateral Oxygen distribution in the mixing channel.







Figure 3 : Mixing quality of different gas mixing in the mixing channel at the Reynolds number of 600.

3. Achievements

The detailed flow profiles as well as the oxygen concentration of different gases mixing between Oxygen-Nitrogen, Oxygen-Argon and Oxygen-Helium inside T-type micro-mixers has been successfully obtained by using PSP technique. The numerical data from ANSYS CFX was also included for comparison, and good agreement has been established.

4. Summaries and future plans

The detailed flow fields and the evolutions of oxygen concentration with different gas mixing have been successfully acquired by using PSP technique, which demonstrates the capability of PSP experiments in detecting various gas mixing. The experimental results have been compared with numerical simulation with good agreement. For future plan, novel design of micromixers will be studied instead of conventional T-type micromixers to further enhance the mixing efficiency. Different gases will also be applied to examine the performance of new type micromixers.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] <u>C.-Y. Huang. Y.-H. Hu</u> and H. Nagai: The Development and Applications of Pressure-Sensitive Paint on the Investigations of Gases Mixing in T-type Micromixers, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on* Advanced Fluid Information, Sendai, Sendai, Japan, (2017), pp.150-151.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J17I086
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目(発展)

Me-DLC ナノ構造による摩擦面温度検出機能を有する薄膜しゅう動材料の研究 Study on the Function of Me-DLC Nano-Composite Coatings Acting as Thermo-Sensor in the Sliding Interface

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

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

申請者らが考案した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)によって,高周 波マグネトロンスパッタ法(RF-MS)による成膜において水素非含有DLCマトリクス中に 銀または銅を10 at.%以下の低濃度から60at.%以上の高濃度まで分散させた種々の金属含 有量のAg-DLCおよびCu-DLCを成膜し,それぞれの金属含有量における膜の物性・電気的 性質および,摩擦特性について調査を行った.



a) 6 at.% b) 12 at.% c) 28 at.% Fig.1 異なる Ag 含有量における Ag-DLC のナノ構造の TEM 観察結果

Me-DLC の構造観察結果の一例として, 濃度の異なる Ag-DLC の断面構造の透過電子顕微鏡 (TEM) 観察結果を Fig. 1 に示す. Ag 濃度が 10 at.%以下の場合は添加した Ag の結晶

化は認められなかったが, Ag 含有量が 10 at.%を超えると DLC マトリクス中 に Ag クラスターが出現し, 含有量の増 加に伴い平均粒径が増加して結晶性が 高まることが確認できた. また, Ag 含 有量が増加すると表面に偏析層を形成 することが確認できた. Cu-DLC につい ても定性的に同様の結果が得られた.

Me-DLCの金属含有量と室温状態における比抵抗の例として,Ag-DLCの測定例をFig.2に示す.金属濃度の増加に伴い比抵抗は減少するが,金属濃度が約30at.%以上で比抵抗の減少率が増加しており,膜の構造との関係性が示唆された.



3. 研究目標の達成状況

CCT による RF-MS によって, Me-DLC の金属含有量を 10 at.%以下から 60 at.%以上の 広範囲に制御する方法を確立し, Me-DLC の Ag または Cu 含有量と室温状態における電気 的性質(比抵抗)の関係を明らかにした.

4. まとめと今後の課題

Me-DLCの金属濃度制御法を確立し、膜のナノ構造と電気的性質の関係を調査した.金属 濃度が高いときに形成される添加金属による表面偏析層の生成条件と Me-DLC 中への金属 の添加濃度限界を明らかにすることが今後の課題である.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- *[1] <u>Minoru GOTO</u>: Preparations and tribological properties of soft-metal / DLC composite coatings by RF magnetron sputter using composite targets, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, (2017) DOI 10.1007/s10999-017-9376-3.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] <u>M. Goto, M. Oda</u>, and <u>T. Nawata</u>: Effect of Chemical Composition of Tribofilm for Tribological Properties of Soft-Metal/DLC Nanocomposite Coatings, *Proc. 44th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, Lyon, France, (2017), USB P3-3 (2017) p.69.
- [3] <u>Minoru Goto</u>, Toshiyuki Takagi, <u>Kosuke Ito</u>, Hiroyuki Miki, Hiroyuki Kosukegawa: Study on the function of Me-DLC nano-composite coatings acting as thermo-sensor in the sliding interface, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 94-95.
- [4] <u>丸山将尚</u>, <u>後藤実</u>: 異なるしゅう動相手材に対する Ag-DLC および Cu-DLC のトライボロジー特性, トライボロジー会議 2017 秋 高松予稿集 (2017) USB 配布 E17.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J17I088
Classification	General Collaborative Research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	3rd 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

The key properties of solid oxide fuel cell membranes are mixed ionic and electronic conductivity (MIEC) that allows oxygen ions to permeate through the material at various conditions while simultaneously maintaining chemical stability. A dual-phase membrane consisting of perovskite-type and fluorite-type materials has shown promising results but requires more extensive evaluation concerning MIEC properties. To evaluate the oxygen ionic conductivity, the membrane was investigated experimentally and through simulation. From these results, we suggest a new dual-phase membrane concept which exhibits 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. $Ce_{0.2}Sm_{0.8}O_{2\cdot\delta}(SDC)$ was selected as the additive material to be combined with the high performing $SrSc_{0.1}Co_{0.9}O_{3\cdot\delta}(SSC)$ 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 were investigated using a scanning electron microscope (SEM). 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, the composite samples' total (ionic and electronic) conductive properties were investigated. The ionic and electronic conductivity was measured by a four-probe D.C. method. It was found that the addition of SDC into the membrane's composition, reduced the total conductivity.

Regarding the simulation analysis, we focused on the grain boundary (GB), which is a nanoscale structure in the membrane. Molecular Dynamics (MD) simulation models including GBs were constructed for $SrSc_{0.1}Co_{0.9}O_{3-\delta}$ membrane having perovskite



Figure 1: SEM images of the dual-phase OTM surfaces arranged in incremental order a) 0 wt.% of SDC additive b) 30 wt.% of SDC additive and c) 50 wt.% of SDC additive after sintering for 5 hours at 1200 °C



Figure 2: a) A constructed MD simulation model including GBs. b) MSDs in different GB distance systems. e.g. GB2 denotes the distance between GBs is two coincident site lattices. c) MSDs in bulk region and GB region of GB2.

structure (see Figure 2-a)). By using constructed models, mean square displacement (MSD) of oxygen ion was analyzed. In this analysis, we changed the distance between GBs to evaluate the effect of GB on oxygen ion diffusivity. This analysis clarified that the GB reduces the oxygen ion diffusivity (see Figre2-b)). Moreover, we analyzed the effect of GB in detail by dividing the simulation system into GB region (near the GBs) and bulk region (far from the GBs). The MSD in the regions was compared (see Figure 2-c)). This comparison shows that the oxygen ion diffusivity decreases in GB region.

3. Achievements

The inclusion of an additional 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 constructed MD simulation models including GBs and clarified that the GB reduces the oxygen ion diffusivity.

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 membrane's composition. Future experimental work will aim to investigate the ion and electron mobility at the interface between both materials.

Regarding the simulation analysis, we constructed MD simulation models including GBs and clarified their effect. As plans, the oxygen ion diffusivity in dual-phase membrane will be analyzed and we will propose a membrane showing high ionic conductivity.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) [1] <u>H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, A. K. Hayashi</u>, and T. Tokumasu: *J. Chem. Phys.*,
- [1] <u>H. Nagasnima, S. Isuda, N. Isuboi, A. K. Hayasni</u>, and I. Tokumasu *J. Chem. Phys.*, 147, (2017), 024501.
- *[2] <u>R. Falkenstein-Smith, M. Rushby, H. Nagashima</u>, T. Tokumasu, and <u>J. Ahn</u>: *J. Fluid Science and Technology*, 12, (2017), JFST0028.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [3] <u>R. Falkenstein-Smith</u>, <u>M. Rushby</u>, <u>H. Nagashima</u>, T. Tokumasu, and <u>J. Ahn</u>: *Fourteenth International Conference on Fluid Dynamics*, OS2-13.
- [4] <u>H. Nagashima, R. Falkenstein-Smith</u>, T. Tokumasu, and <u>J. Ahn</u>: Characterization of Transport Phenomena of Oxygen Ion in Electrolyte of Solid Oxide Fuel Cell, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), CRF-53, pp.108-109.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I096
Classification	General collaborative research
Subject area	Mechanical
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

Microcombustion for Clean and Efficient Syngas Formation and Fuel Cell Applications

Jeongmin Ahn *†, Kaoru Maruta**†† Ryan Milcarek*, Takuya Tezuka** *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Superadiabatic combustion utilizing heat recirculation has been identified as a way of surpassing the upper flammability limit of a fuel and thus allowing for greater syngas generation at high fuel/air equivalence ratios. Many microcombustion and mesocombustion based superadiabatic combustion studies have achieved over 30% syngas in the exhaust. Recent work utilizing a conventional burner for combustion reforming only generated 20% syngas in the exhaust. Higher syngas generation with microcombustion is predicted to result in higher power density and electrical efficiency when utilized in a fuel cell.

In this work, a microcombustor is combined with a Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) in a dual chamber configuration for syngas and heat cogeneration in the reactor and heat and power cogeneration in the fuel cell.

2. Details of program implement

To investigate fuel-rich micro combustion and to assess the fuel utilization and efficiency of the SOFC, a plan consisting of three main tasks was developed.

Task 1) The micro flow reactor has already been developed and investigated at Tohoku University for other areas of research in micro combustion. To assess the potential of creating a micro combustion based SOFC the reactor was integrated with a micro-tubular SOFC and tested with the following methods. The I-V (current–voltage) method with the 4-probe technique was used to investigate the electrochemical behavior of the FFC. The open circuit voltage (OCV), power density and polarization were assessed using a Keithley 2420 sourcemeter interfaced with a computer for data acquisition. The polarization curves were used to assess the SOFC fuel utilization and efficiency.

Task 2) Combustion exhaust composition was examined computationally in fuel-rich combustion conditions. Chemical equilibrium analysis using CHEMKIN software and NASA Chemical Equilibrium with Applications code was conducted. The computational investigation was used to predict the syngas concentration after combustion at fuel-rich equivalence ratios of propane/air.

Task 3) After assessing the micro combustor computationally, a micro flow reactor was designed and assessed experimentally. A gas chromatograph was used to measure the exhaust composition at different equivalence ratios. The micro combustion exhaust was examined for the generation of H₂, CO, CO₂, N₂, O₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, and C₂H₆ and soot formation. The experimental results were compared with the computational results. The maximum micro flow reactor wall temperature was fixed at 800°C, 900°C, and 1000°C. A fixed total flow rate of fuel and air was investigated at equivalence ratios of 1-5.2. Total flow rates of 10, 50, 150, 250 and 350 mL.min^{-1} were investigated.

3. Achievements

As a result of Task 1, a SOFC achieved a significant power density (~450 mW.cm⁻²) and electrical efficiency (23%). The power density is among the highest reported to date for this type of fuel cell system and was achieved without optimizing the micro combustion conditions. The electrical efficiency was achieved in a furnace. Heat recirculation is needed to achieve that electrical efficiency in practice, but the result indicates that a higher electrical efficiency than ever previously reported for micro power generation may be possible.



Figure 1: SOFC polarization and power density curves with propane/air at equivalence ratios from 1.4-5.2.

As a result of Task 3, the micro combustion exhaust composition was investigated. The results confirm that the reforming reactions to syngas are temperature dependent. Higher wall temperatures and local flame temperature resulted in higher syngas concentration. Optimal conditions for H_2 (19%) and CO (23%) concentration occurred around an equivalence ratio of 3 which reflects chemical equilibrium predictions.

4. Summaries and future plans

To summarize, high FFC power density, electrical efficiency and syngas concentrations were achieved which will be among the highest ever reported by researchers in this field. The potential for creating a high electrical efficiency micro power generation system is evident from these results. With a better understanding of the micro combustion exhaust variation with temperature, flow rate and equivalence ratio, more research is needed on the SOFC performance in these conditions.

- 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.
- <u>R. J. Milcarek</u>, H. Nakamura, K. Maruta, <u>J. Ahn</u>: Microcombustion for Micro-tubular Flame-assisted Fuel Cell Cogeneration, *Proceedings of the* Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp. 110-111.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I097
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamental
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	3rd 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 measurementintegrated 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.

In this fiscal year, we did numerical simulations for elucidating the interaction between a red blood cell and endothelial cells. We shared the program code for the fluid-membrane coupling analysis developed by KTH side. The basic equations of the fluid and membrane were discretized by the finite difference method and spectral method using the sphere harmonics, respectively. The interaction model for coupling the fluid and membrane was the immersed boundary method. IFS and KTH sides investigated the erythrocyte and spherical capsule behaviors in a fluid subject to the inclined centrifuge force, respectively.

3. Achievements

As the results of the capsule simulation, the steady state in which the inclined centrifugal force and hydrodynamic force balance was obtained, and capsule deformation in the steady state was investigated in the wide range of the angle of the inclined centrifugal force. In spite of the different shape of the capsule from erythrocytes, the frictional characteristics obtained by the simulation are in agreement to that of measurement data using actual erythrocytes.

In the erythrocyte simulation, the steady state was not reached due to the numerical instability. However, the simulation indicated that the deformation of the erythrocyte model was largely affected by the bending stiffness of the erythrocyte model and the steady state was reproduced only in the small bending stiffness case (figure 1).



Fig. 1 The shapes of the erythrocyte models at nondimensional time t = 35. left: with zero bending stiffness, right: with bending stiffness

4. Summaries and future plans

In order to obtain insights on the interaction between the erythrocyte and blood vessel wall, the simulations using the erythrocyte model and spherical capsule were performed. Future plan are the implementation of the numerical code with high numerical stability for the longer-term simulation and modeling of the endothelium on the blood vessel.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] S. Miyauchi, T. Hayase*, <u>A. A. Banaei</u>, <u>J-C. Loiseau</u>, <u>L. Brandt</u> and <u>F. Lundell</u>: Twodimensional numerical simulation of the behavior of a circular capsule subject to an inclined centrifugal force near a plate in a fluid, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.12, No. 2, (2017), JFST0015.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[2] S. Miyauchi, T. Hayase, <u>A. A. Banaei</u>, <u>J-C. Loiseau</u> and <u>L. Brandt</u>: Three-Dimensional Numerical Analysis for an Erythrocyte Behavior near a Wall in a Fluid under an Inclined Centrifugal Force: The Effect of Bending Stiffness of an Erythrocyte on the Deformation, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2017), pp.138-139.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I100
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	3rd year

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

Yiming Li*†, Seiji Samukawa**††

*Department of Electrical and Computer Engineering, National Chiao Tung University **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Based on the investigation in the 1st and 2nd years, we in this project successfully examine the electrical and physical properties of neutral-beam-etching (NBE) fabricated nanodisks (NDs) by solving a set of electronic transport and quantum mechanical equations. The key findings of this study show promising characteristics of the explored nanometer-scaled materials for advanced applications of energy harvesting devices.



Figure 1 : The SEM image of the Si/SiC QD superlattice before passivation. (b) A schematic plot of each nanopillar, where the L = 4, r = 3.2 nm, h = 4 nm, and zDot = 2 nm. (c) The illustration of the unit cell with four QDs for L = 4 QD superlattice. L increases as the number of QD layer increases.



Figure 2 : (a) The measured (brown line) I-V curve of Al_2O_3 -QDSL. The simulated $J_{sc} = 4.77 \text{ mA/cm2}$ (symbol) is well matched with the experimental $J_{sc} = 4.75 \text{ mA/cm}^2$. (b) The simulated conversion efficiency and (c) the J_{sc} of square SiC and Al_2O_3 QDSLs as a function of *L* and *zDot*. (d) The conversion efficiency (solid lines) and the J_{sc} (dash lines) as a function of *sDot* and *zDot* under square and hexagonal QDSLs. The Al_2O_3 -QDSLs with *sDot* = 0.3 nm feature a high J_{sc} and efficiency due to its high v.

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 3D numerical simulation of

electronic structure for the nanostructure system firstly. As shown in Fig. 2, the measured (brown line) I-V curve of Al_2O_3 -QDSL is shown and the simulated $J_{sc} = 4.77 \text{ mA/cm}^2$ (symbol) is well matched with the experimental $J_{sc} = 4.75 \text{ mA/cm}^2$. The key findings of this study benefit advanced applications in the field of QDSL devices.

3. Achievements

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

4. Summaries and future plans

We have explored the electrical characteristics of SiC-QDSLs and Al₂O₃-QDSLs by the miniband engineering. Under the consideration of QD geometry, structure patterning, and passivation layer, Al₂O₃-QDSLs outweigh SiC-QDSLs in terms of the compatible minibands which accounts for the high J_{sc} and the conversion efficiency. The main finding indicates that the performance of Al₂O₃-QDSLs is less sensitive to the process variation, so that the Al₂O₃ passivation treatment on QDSLs is expected to provide a plausible way toward advanced applications of QDSLs. In the next project, we will control the energy of multi-layer NDs for thermoelectric devices.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- Yi-Chia Tsai, Ming-Yi Lee, Yiming Li, and Seiji Samukawa: Design and Simulation of Intermediate Band Solar Cell with Ultradense Type-II Multilayer Ge/Si Quantum Dot Superlattice, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 64, No. 11, Nov. (2017), pp. 4547-4553.
- [2] <u>Yi-Chia Tsai</u>, <u>Yiming Li</u>, and Seiji Samukawa: Physical and electrical characteristics of Si/SiC quantum dot superlattice solar cells with passivation layer of aluminum oxide, *Nanotechnology*, Vol. 28, No. 48, Nov. (2017), 485401 (9pp).
- [3] Mohammad Maksudur Rahman, <u>Yi-Chia Tsai</u>, <u>Ming-Yi Lee</u>, Akio Higo, <u>Yiming Li</u>, <u>Yusuke Hoshi</u>, <u>Noritaka Usami</u>, Seiji Samukawa: Effect of ALD-Al₂O₃ Passivated Silicon Quantum Dot Superlattices on p/i/n+ Solar Cells, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 64, No. 7, July (2017), pp. 2886-2892.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [4] <u>Yi-Chia Tsai, Ming-Yi Lee, Yiming Li</u>, and Seiji Samukawa: Numerical Simulation of Silcion/Silcon Carbide Quantum Dot Superlattice Solar Cells, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI 2017)*, Sendai, Japan, (2017), pp. 62-63.
- [5] <u>Yi-Chia Tsai, Ming-Yi Lee, Yiming Li</u>, and Seiji Samukawa: Design and simulation of Si/SiC quantum dot superlattice solar cells with Al2O3 passivation layer, *Proceedings of 2017 IEEE 17th International Conference on Nanotechnology (IEEE NANO 2017)*, Pittsburgh, PA, July 25-28, (2017), pp. 341-344.
- [6] <u>Yi-Chia Tsai, Ming-Yi Lee, Yiming Li</u>, and Seiji Samukawa: Modeling of Minibands for Si/SC Quantum Dot Superlattice Solar Cells, *Proceedings of NSTI Nanotechnology Conference Expo. (NSTI Nanotech. 2017)*, Washington, DC, USA, May 14-17, (2017), vol. 2, pp. 41-44.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I102
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	2nd 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, Swizterland ***Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University ****Graduate School of Engineering, Tohoku University ***** Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, 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

The lattice Boltzmann (LB) methods was used for fluid simulation which is performed using the open source LB solver Palabos, version 1.5. One idealized aneurysm model was used for simulation. Parabolic velocity boundaries with U=0.230 m/s was imposed on the inlet. A constant pressure boundary was imposed

on the outlet. Rectangular solids were used as a simple model of struts. The struts were defined only in the plane of the aneurysm neck (Figure 1).

Two comprehensive studies were performed using one strut and two struts. The struts were defined perpendicular to the aneurysmal inflow. Then, the average flow velocity (V) within the aneurysm was calculated. Evaluation of the flow reduction was based on the flow reduction ratio (F_{v}), as follows:

$$R_f = \frac{V_{W/o} - V}{V_{W/o}} \times 100$$

where $V_{0,2,2}$ denotes the average velocity without the strut.



Figure 1: Strut placement on the neck plane



Figure 2: Flow reduction ratio with idealized aneurvsm model and two struts
3. Achievements Expected results

- 4. Summaries and future plans We will try to make a stent.
- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] Mingzi Zhang, Yujie Li, Xi Zhao, David I. Verrelli, Winston Chong, Makoto Ohta, Yi Qian: Haemodynamic effects of stent diameter and compaction ratio on flowdiversion treatment of intracranial aneurysms: A numerical study of a successful and an unsuccessful case, *Journal of Biomechanics*, 58 (2017), 179-186.
- *[2] Narendra Kurnia Putra, Pramudita Satria Palar, Hitomi Anzai, Koji Shimoyama, Makoto Ohta: Comparative Study between Different Strut's Cross Section Shape on Minimizing Low Wall Shear Stress along Stent Vicinity via Surrogate-based Optimization, 12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimisation, (2017).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [3] Narendra Putra, Pramudita Satria Palar, Hitomi Anzai, Koji Shimoyama, and Makoto Ohta: Variation of strut parameter effects with wall deformation on stent deployment via surrogate model 5th International *Conference on Computational and Mathematical Biomedical Engineering*, April 10-12, (2017), Pittsburgh, US.
- [4] Hitomi Anzai, Norman Juchler, Makoto Ohta, Sven Hirsch, Daniel A. Rüfenacht, and Isabel Wanke: Where does CFD identify lesion instability in small aneurysms?, 5th International Conference on Computational and Mathematical Biomedical Engineering, April 10-12, (2017), Pittsburgh, US.
- [5] M. Ohta, K. Watanabe, M. Zhang, <u>B. Chopard</u>, H. Anzai: Development of Program for Surveying Stent Strut Position, *Proceedings of the Seventeenth International* Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp.80-81.
- Patent, award, press release etc. (Patent)

Not applicable.

(Award)

- [1] Travel Award "HOW TO FIND OUT OPTIMAL INTERVAL OF STRUTS FOR CEREBRAL ANEURYSM?" Kazuhiro Watanabe, Hitomi Anzai, Makoto Ohta, Sep. 14, 2017, Parkhotel Beau Site, Zermatt, Switzerland, 5th Switzerland-Japan Workshop on Biomechanics.
- [2] Best Paper Award, "Effects on Pulsatile Inlet Conditions on the Hemodynamic Conditions of Stent with Deformed Wall Simulation" Narendra Kurnia Putra, 6-7 November 2017, 2017 5th International Conference on Instrumentation Communications Information Technology and Biomedical Engineering.

Not applicable.

⁽Press release)

Project code	J17I103
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	2nd 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

Poly(methyl methacrylate) (PMMA) of dental application was used as a base material since PMMA is used to replace human hard tissue. The obtained dental PMMA was composed of monomer liquid (Miky liquid, Nissin Dental Products Inc.) and polymer powder (Miky blue, Nissin Dental Products Inc.). Solid specimen of PMMA was obtained by mixing the monomer and the polymer, so-called quick polymerization method.

Number	Name, Combination ratio (Additive)/(Total weight)	Notation
1	(Acrylic, 100wt%)	PMMA
2	Wood flour, 4wt%	WF
3	Cellulose fiber, 10wt%	CF
4	Cellulose nano fiber, 20wt%	CNF
5	Polyurethane foam 20pcf	PU20
6	Polyurethane foam 50pcf	PU50
7	Porcine femoral bone	Bone

Table 1 Materials prepared for drilling tests

Table 1 lists materials obtained for drilling tests, including additives, detailed compositions of materials and notations. Additives used in this study can be classified into plant-derived organic materials such as wood flour (Cellulosin #100 derived from hemlock, 100 mesh pass, Kajino Seizo Co., Inc.), cellulose fiber (Just Fiber BH200FCC, Morimura Bros. Inc.) and cellulose nano fiber. Cellulose nano fiber was kindly supplied by Prof. Fredrik Lundell through Innventia AB as a bottle of slurry, where 1.87% of cellulose nano fiber was dissolved in pure water.

3. Achievements

Expected results.

4. Summaries and future plans

Comparison between drill methods of load constant and speed constant for regulating the drill method.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] 芳賀洋一,太田信,松永忠雄: 医療用能動カテーテルにおける先端技術 摩擦を考慮 した低侵襲医療 - ,トライボロジスト, Vol.62, No.1 (2017), pp.30-36.
- [2] Ren Takahashi, Kazuma Tamura, Tadashi Yamaguchi, Yasutomo Shimizu, Makoto Ohta: Development of a poly (vinyl alcohol) hydrogel phantom to allow physical measurtement in ultrasonographic conditions: a model for scatter, 2017 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems, Oct. 17-19th (2017), Beijing, China.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [3] Yuta Muramoto, <u>Vincent Fridrici</u>, <u>Philippe Kapsa</u>, Gaëtan Bouvard, <u>Fredrik Lundell</u>, Makoto Ohta: Drilling of PMMA-based bone biomodel: effect of additives, *The 6th World Tribology Congress (WTC 2017)*, 17-22 September, (2017), Beijing China.
- [4] Yuta Muramoto, Gaëtan Bouvard, <u>Vincent Fridrici</u>, <u>Philippe Kapsa</u>, <u>Fredrik Lundell</u>, Makoto Ohta: Research of high-speed contact with medical devices, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Miyagi, Japan, (2017), pp.82-83.
- [5] Makoto Ito, Simon Tupin, Hitomi Anzai, Anna Suzuki, Makoto Ohta: Location Related Variability of Permeability Characteristics in Cancellous Bone, *The 14th International Conference on Flow Dynamics*, November 1-3, (2017), Sendai, Miyagi, Japan.
- [6] Yuta Muramoto, Dominik Hüsener, Gaëtan Bouvard, Makoto Ohta, Vincent Fridrici, <u>Philippe_Kapsa</u>: Effects of temperature elevation on drilling of acrylic composite materials for bone biomodel, *ELyT Workshop 2018*, March 6-8, (2018), La Gentilhommière, Satillieu, France.
- 3) Patent, award, press release etc.
- *[7] Makoto Ohta, Dominik Huesener, Yuta Muramoto, Simon Tupin: Biomodel of Hard Tissue for Dynamic Mechanical Testing of Medical Device, *The Reports of the Institute of Fluid Science, Tohoku University*, Vol. 29, (2017), pp. 11-20. (Patent)

Not applicable.

(Award)

Not applicable.

(Press release)

Not applicable.

Project code	J17I104
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

Optimization and Data Mining for Transonic Compressor Blade via Active Subspace Method for an Energy-Efficient Turbomachinery Design

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

Pramudita Satria Palar**, Cahya Amalinadhi*, Yohanes Bimo Dwianto * *Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Bandung Institute of Technology **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

To discover important and useful knowledge for the optimum design of transonic compressor blade that would be useful for improving the energy efficiency of a turbomachinery system.

2. Details of program implement

Multi-objective and knowledge exploration of transonic compressor blades were performed. In this research, we utilized the NASA Rotor 37 as the datum shape to be optimized in a multi-objective fashion. Initially, we wanted to apply active subspace methods for both optimization and data mining since we expected that the number of shape variables would be high. However, we found out that the utilization of active subspace is not applicable since the number of design variables could be reduced to only two.



Figure 1 : Pressure contours on the datum and optimized blade shapes

We then refocused the research to solely optimization and knowledge exploration. To that end, we developed a code for performing multi-objective optimization using Kriging surrogate model and combined it with computational fluid dynamics tool in order to obtain the aerodynamic performance of the datum and optimized designs. The outcome of this procedure is the set of optimized designs that lies in the Pareto front, where we thoroughly analyze the shapes of these new designs and compare it with the datum design to uncover important knowledge and physics.

3. Achievements

We were able to find a set of optimum blade shapes using the multi-objective optimization algorithm code that we developed and the datum shape of NASA Rotor 37. We observe that the negative twist angle should be added to the reference blade in order to increase the pressure ratio, On the other hand, an additional swept-black angle results in an increasing efficiency. The results also show that the pressure ratio and the efficiency are two conflicting objectives that could not be attained simultaneously.

4. Summaries and future plans

In this research, our focus is on multi-objective optimization and data mining of transonic compressor blades. For this research, we have to change the main focus since the number of design variables could be reduced to only two variables. We successfully uncovered important physics that would be important for future design processes of transonic compressor blades.

The optimization method developed in this project will be carried on to the next project, i.e., "Multipoint Wind Turbine Blade Optimization by Utilizing Gradient Information for Maximum Power Coefficient". Both problems are similar in the sense that they involve shape optimization of blade designs. The technical knowledge that are obtained from the present research would also be transferred to the next project.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] <u>Zuhal, LR</u>, <u>Amalinadhi C</u>, <u>Dwianto YB</u>, Palar PS, Shimoyama K: Benchmarking Multi-Objective Bayesian Global Optimization Strategies for Aerodynamic Design, 2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, (2018), p. 0914.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [2] <u>Zuhal, I.R, Amalinadhi C</u>, Palar PS, Shimoyama K: Multi-Objective Optimization and Data Mining of Transonic Compressor Blade, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.28-29.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I105
Classification	General collaborative research
Subject area	Health, welfare and medical care
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

The Sensitity Analysis and Multi-Objective Optimization of the Biodegradable Zinc Alloy Stent

Aike Qiao*†, Makoto Ohta**†† Koji Shimoyama**, Kun Peng* Hitomi Anzai***, Narendra Kurnia Putra** *College of Life Science & Bioengineering, Beijing University of Technology **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Unlike a permanent stent, a biodegradable zinc alloy stent provides only a temporary opening into the stenotic artery. Thus, they are a prospective solution for complications caused by the incompatibility between an artery and permanent stent. However, insufficient scaffolding has limited the clinical application of biodegradable zinc alloy stents. Therefore, in this project, a new stent concept is designed to improve the scaffolding. Furthermore, the mechanical performance of the newly designed stent is investigated and analyzed by finite element method.

2. Details of program implement

The collaborators discussed and made the detailed research plan and the division based on this program. Besides, an non-IFS member of this program stayed in IFS as a special research student last year to carry out the program better. The research has been finished well up to now and the results have been published in The Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2017). The detailed research results are described as follows:

As shown in Fig. 1, the new stent design is presented. Similar to the traditional stent design, two sinusoidal struts are connected by straight links and each strut comprises six sinusoidal peaks. The width and thickness of the struts and links are both fixed at 0.17 mm. The lengths of the struts and links are kept constant at 1.7 and 0.4 mm, respectively, and the outer diameter when crimped is 2.4 mm.

Different from the traditional stent structure, the highlight of the new design is two semicircular structing rings that are inserted through the links, as shown in Fig. 2: the gray and white parts represent the links and structing rings, respectively. Two semicircular structing rings are connected to a symmetrical pair of solid links and run through other links that have trapezoidal holes. These two semicircular structing rings can allow the stent to expand but not contract as the result of the interaction between them and the links. Thus the scaffolding performance of the newly designed stent can be improved.

Besides, a traditional stent structure is chosen as the control group to investigate and analyze the mechanical performance of the newly designed stent. The analysis results are shown in Table 1. Both the newly designed stent and the traditional stent expand to the same diameter 0.24mm. The recoil displacements are 0.11 and 0.20 mm for the new stent design and the traditional design, respectively. Thus, the new design enhances the scaffolding performance by 44.8% compared with the traditional stent. This suggests that the new stent design can provide strong support for remodeling of the vessel, which is of significance in clinical applications.



Fig. 1 New design of biodegradable zinc alloy stent

Fig. 2 Sectional view of the links and rings

	New design stent	Traditional design stent
Expansion Pressure	0.58 MPa	0.45 MPa
Diameter after expansion	2.88 mm	2.88 mm
Expansion Displacement	0.24 mm	0.24 mm
Recoil Displacement	0.11 mm	0.20 mm
Recoil Rate	45.8%	83%

Table.1 The analysis results of the newly designed stent and the traditional stent

3. Achievements

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

4. Summaries and future plans

The torsion and bending stresses of the newly designed stent must be considered along with the usual mechanical tests. These analyses are reserved for future studies.

- 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)
- <u>Aike Qiao</u>, <u>Kun Peng</u>, Makoto Ohta, Koji Shimoyama, Hitomi Anzai, Narendra Kurnia Putra: A Novel Structure Design of the Biodegradable Zinc Alloy Stent, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.86-87.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I107
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	3rd year

Aerodynamic Design and Optimization of High Speed Transport Aircraft

Romie Oktovianus Bura*†, Shigeru Obayashi**†† *Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering, Bandung Institute of Technology **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The focus of the proposed research is the study of sonic boom propagation in real atmospheric condition, by estimating the pressure wave through the turbulence field, using a high fidelity numerical method, i.e. Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) solver. Previously, the study was carried out by the Khokhlov -Zabolotskaya-Kuznetsov (KZK) equation-based tool. The numerical results will be compared with experimental results.

2. Details of program implement

The research was proposed to be implemented in three year times. The general research plan is:

The Year 1/Former Year:

In the first year of preliminary study, the research activity is directed in evaluating loudness effect of supersonic flight, by developing a method which is based on general CFD tools, that has been used generally by industries. To simplify the process, wedge configuration is used, because this configuration is easy to be predicted. This method is based on N wave evaluation that is produced by supersonic flight. Then, by doing FFT, N wave could be converted to Sound Pressure Level with respect to Frequency to measure its loudness.

The Year 2:

Finally, the proposed tool is applied to the real-world case. We employ the low boom model (LBM), which utilizes a sonic boom reduction technique in the D-SEND#1 experiment, as the present application. Turbulent field is considered in the atmospheric boundary layer at less than 1000 [m] above the ground. each column. This study has been carried out using KZK tool. In the present year, high fidelity numerical method, i.e. Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) solver will be used and very fine meshes of the models have been generated.

The Year 3:

Effort is centered on refinement of the high-fidelity numerical results, based on Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) solver and the incorporation of sonic boom analysis methods into conceptual design studies of high speed transport aircraft.

3. Achievements

We have obtained some results thorough this project as follows:

• Low boom model (LBM) and NWM (new wave model) of the D-SEND#1 experiments have been modelled with RANS numerical methods.

• Sound pressure levels at several heights and the density gradients of both models have been generated.

4. Summaries and future plans

For the present/second year results are still ongoing and I plan to have the final results of the second year by early or middle of March 2017, by publishing the results in an international journal. Another journal paper is also planned for submission in 2017. I also have planned to register in two international conferences in aerospace and acoustic in 2017 for result publication. At least 1 journal paper and 1 international conference paper are planned for 2018, containing 2018 research results. Hence, in total, it is planned to generate at least 3 international journal papers and 4 international conference papers.

In future, it is expected to generate better analysis of the sonic boom propagation through turbulence atmosphere using both proven and high-fidelity methods for better high speed transport aircraft.

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

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

Project code	J17I108
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	2nd year

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

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

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

In this research, visualization experiments and two dimensional numerical simulations of flow fields in a closed cavity were performed to evaluate the effect of a temporally variable boundary condition on natural convection thermal boundary layer. The phase-shifting interferometry setup developed by Tohoku University was used to precisely measure the temporal variation of thermal boundary layer. To enhance the spatial resolution of temperature field, a phase-shifting technique was installed in a Mach-Zehnder type interferometer, and an unwrapping method shown in Fig.1 was applied. To achieve a precise temperature control of side walls, a specially designed thermal cell shown in Fig.2 was used.





Figure 1: Visualized image of temperature field and unwrapping method

Figure 2: temperature controlled cell

Using above-mentioned equipment, the visualization experiments of temperature field in a closed cavity were performed. The temperature on the left side wall was varied sinusoidally in time using a controlled Peltier module. Two dimensional numerical simulations were also performed using the same boundary conditions. Both results are shown in Fig.3. As is obvious from Fig.3, the numerical results are qualitatively accordance with experimental ones, and the simulation method presented in this study is able to evaluate and analyze the transient natural convection problem in a square cavity. However, there are differences between experimental and numerical results. Especially, the low temperature area remains at the bottom of square cavity in case of experimental result compared with numerical one. This will be caused by incomplete thermal insulation. For more complete evaluation, the difference should be minimized.



Figure 3: Experimental and numerical results of temporal changes of temperature distribution.

3. Achievements

At the University of Sydney, two dimensional numerical simulations of temporal variation of temperature field were performed to analyze the natural convection thermal boundary layer problem. In parallel, at Tohoku University, a series of visualization experiments measuring the temperature field in a square cavity were performed. The progress in this fiscal year will be evaluated to be good and 90% of the research plan was completed.

4. Summaries and future plans

In this fiscal year, we performed both numerical simulation and visualization experiment, and compared both results. A PhD student in the University of Sydney stayed in Sendai for 1 month and performed the experimental work. This contributes to an educational activity in this research framework. From the comparison between numerical and experimental results, it was clear that the present numerical method qualitatively gives a temporal change of thermal boundary layer and we're ready to discuss the possibility of thermal boundary layer control. In the future, we will modify the temperature control cell and quantitatively evaluation will be achieved.

- 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] L. Zhou, S. Armfield, N. Williamson, M. Kirkpatrick, W. Lin and A. Komiya: Evaluation of Flow Field in Closed Cavity under Temporally Variable Thermal Condition, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 66-67.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I109
Classification	General collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility for humans and materials
Research period	April 2017 ~ March 2018
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, ††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. we investigated the difference in the behavior of vortices between when they are generated in a calm atmosphere and when they are interacted with vortices from another aircraft. The validity of the LES simulation was confirmed by comparing the results to a previous study under same conditions. The results of present study are expected to be useful for adjusting the interval between aircraft during the take-off and landing. The results are divided into two parts. First, a general one pair of wake vortices behavior is examined, and then the results are to be verified by comparing them to those of previous research. The second part of the paper is about the behavior of wake vortices under the interaction with other wake vortices.

3. Achievements

The behavior of post roll-up vortices with respect to turbulence intensity is described in figure 1. The Two-phase decay is shown in evaluation of wake vortices. In the first phase, the circulation intensity does not substantially decrease before the vortices form a ring. The second phase begins with the formation of a ring due to Crow instability. The larger the dimensionless turbulence intensity, the faster the point

becomes. This is consistent with previous studies and De Visscher's model can be applied to explain the results.



Figure 1 Wake vortices transport and decay at three different times for the case of weak ($\epsilon^* = 0.0789$) and strong ($\epsilon^* = 0.5844$) turbulence intensities

4. Summaries and future plans

Although vortices from light aircraft dissipate quickly, there is also an impact on the vortices from medium aircraft (Figure 2). At the beginning, the lateral separation of the vortices from medium aircraft is slightly reduced by the induced effect of vortices from light aircraft. In addition, the slope of the time-vertical position graph shows that the descent rate also becomes slightly higher. At the same time, the circulation intensity is slightly increased as the vortices from medium aircraft reach the vertical position of the vortices from light aircraft. Once the circulation is added, the vortices from medium aircraft make the vortices from light aircraft dissipate. As a result, it can be seen that secondary vortices are generated more compared to the case when just a single pair of wake vortices from medium aircraft is considered. For more detailed comparison with the separation parameter will be adjusted to more realistic case to integrate current result in real airport operation system.



Figure 2 Lateral separation, vertical position, circulation with respect to t^* and top-view snapshot at $t^* = 4.86$ of medium wake vortices interacted with light and without interaction

- 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.
- Junho Cho, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Yee Kwanjung, Shinkyu Jeong: Automatic Differentiation Based Discrete Adjoint Method for Aviation Safety, Proc. of the 17th Int. Symp. on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp.68-69.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17I110
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

Interfacial Design and Functionalization of Triboelectric Materials for High-Performance Energy Harvesters

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

1. Purpose of the project

In this project, we design and fabricate functionalized triboelectric materials. The output performance of triboelectric nanogenerators (TENGs) as next-generation mechanical energy harvesters are critically dependent to the surface characteristics. We investigate the effects of the interfacial properties on output behaviors of TENGs. Based on the surface treatments, we find and understand the optimization design of surfaces for output performance and life-time of TENGs. This project has three objectives: (1) Investigation of the effects of the interfacial properties on output behaviors of TENGs; (2) Characterization and Optimization design of surfaces for output performance and life-time of TENGs; (3) Development of high-performance and sustainable TENGs.

2. Details of program implement

We utilized the neutral beam (NB) treatment to modify the surface properties of triboelectric materials for high performance. To understand the effects of NB treatment on output performance of polymeric material based TENGs, the following actions were progressed:

(1) Fabrication of NB treated polymers:

First, polydimethylsilane (PDMS) and thermoplastic polyurethane (TPU) were selected as treatment target materials to confirm the property changes of negative and positive triboelectric materials. Secondly, two different gas sources (i.e. O_2 and N_2) were selected to obtain the effects of gas types on surface properties. To suggest the optimized treatment condition, four different beam energies per gas were applied on PDMS and TPU.

(2) Triboelectric characterization:

The triboelectric output signal evaluation was conducted to compare the functionality changes before and after NB treatment. We controlled the contact area, frequency and load to be 300 mm^2 , 2.5 Hz, and 5 N, respectively. Based on the material group, the individual performance was evaluated and combination tests of NB treated polymers were conducted.

(3) Physical and chemical characterization:

The physical and chemical analysis were conducted to objectively understand the changes in triboelectric behavior. Chemical changes were confirmed by chemical bonding analysis and physical changes were defined by surface roughness and surface image analysis.



Figure 1: (a) Triboelectric performance of NB treated TPUs with pristine PDMS; (b) Triboelectric performance of NB treated PDMSs with pristine TPU.

3. Achievements

Figure 1 shows the output performance of NB treated polymers at addressed test conditions. Figure 1a indicates the output voltages of NB treated TPUs with PDMS as a counter triboelectric material. The output voltages proportionally increased with increment of beam energy after N₂ gas based treatment. After applying O₂ gas based treatment, the maximum output voltages were observed at beam energy of 6 eV. However, the voltages were noticeably dropped in higher beam energies (i.e. 25 and 40 eV). Therefore, we confirmed that N₂ gases based NB treatment at high beam energy and O₂ based treatment at low beam energy are proper for enhancing output performance of TPU. In NB treated PDMS cases, the different trend was observed as shown in Figure 1b. After N₂ treatment, the output performances significantly decreased at beam energy range from 6 to 10 eV. For PDMS, O₂ based treatment was more effective than N₂ treatment. The output performance was enhanced 1.39 times at beam energy of 6 eV. From these results, we could verify the proper process conditions for TPU and PDMS.

4. Summaries and future plans

We confirmed that O_2 and N_2 gases based NB treatments are effective method to enhance the output performance for TPU and PDMS. Based on the triboelectric behavior, physical and chemical analysis, the mechanism will be proposed to optimize the NB treated TENGs. Furthermore, we will utilize a different gas to enhance the output performance of negative triboelectric materials.

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

2. 研究成果報告書 <萌芽公募共同研究>

課題番号	J17H001
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2年目

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 Aerodynamic Improvement of a Delta Wing by Using Combination of Leading Edge Flaps

石出 忠輝**, 下山 幸治********

板澤 磨央***, 三坂 孝志****

*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, *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、無人航 空機や小型飛行体の研究開発が盛んに行われている. 一方, 2020 年頃の打ち上げを目標と した火星探査飛行機の開発も様々な視点から精力的に進められている. このような背景下に おいて、構造強度が高く、突風等の外乱に強いデルタ翼が、翼の平面形の候補として考えら れている. デルタ翼は、前縁剥離渦による渦揚力によって主たる揚力を得ており、低迎角領 域においては剥離渦の渦度を強めつつ物体壁面に近づけ、高迎角領域においては渦崩壊現象 (Vortex breakdown)をなるべく遅らせる事が空力特性改善に繋がるものと考えられる.本研

究では、上向き及び下向きの前縁フラップを組み合わせ、迎角によって取付け角度を変化さ せる事により低迎角から高迎角に至る広範囲

で、空力特性を改善する事を目的としている.

研究成果の内容

本研究では, 翼型 NACA0012, 最大翼弦長 572mm, 翼幅 400mm, 後退角 70°, アスペク ト比1.5のデルタ翼を対象にして,表1のよう に前縁フラップを様々な角度に取り付け, SIMPLEC 法を用いた数値解析,空気力測定及 びPIV 計測を実施し、以下の結論を得た. (1) 乱流解析手法として RANS, 乱流モデルと して標準k-cを用いて数値解析を行い,低迎角 領域(0°≦α≦20°)において翼根元部-30°, 中間部(1)90°,中間部(2)90°,翼端部90°の 取付け角度 (Typell) を有する前縁フラップの 有効性が示された. 高迎角領域 (20°≦α≦40°) では, 翼根元部-60°, 中間部(1)90°, 中間部 (2)90°, 翼端部 90°の取付け角度(Type13), Post stall 領域 (40° $\leq \alpha \leq 60$ °) では, 翼根元部 -60°,中間部(1)-60°,中間部(2)90°,翼端 部 90°の取付け角度(Type14)が有効である

表1 LEF レイアウト

Tumo	root	mid1	mid2	tip
Туре	(°)	(°)	(°)	(°)
0	-30	-30	90	90
1	-30	-30	30	60
2	-45	-45	30	60
3	-15	-15	30	60
4	-45	-30	-15	30
5	-30	-15	30	60
6	-30	-15	30	60
7	-15	30	60	90
8	-30	-30	30	90
9	NA	30	60	90
10	0	0	0	0
11	-30	90	90	90
12	-45	90	90	90
13	-60	90	90	90
14	-60	-60	90	90

事が確認できた.

(2) 数値解析結果を基に6分力ロードセルを用いた空 気力測定を行い,低迎角領域において数値解析と同 様の結果が得られた.高迎角領域($20^{\circ} \le \alpha \le 40^{\circ}$)で は数値解析結果とほぼ同様の,翼根元部- 30° ,中間 部(1)- 30° ,中間部(2)90°,翼端部 90°の取付け角 度(Type0),Post stall領域では,翼根元部- 60° ,中 間部(1)90°,中間部(2)90°,翼端部 90°(Type13) の取付け角度が有効である事が確認できた.

(3) 空気力測定において示された前縁フラップの有効性を,流体力学的に解明するために PIV 計測を行った.その結果,図1(a)(b)に示すように,高迎角領域の α=40°, x/L=0.6(x:模型先端からの流れ方向距離, L:最大翼弦長)において,デルタ翼単体では渦核近傍にバースト現象が確認できるが,適切な前縁フラップレイアウトを有するデルタ翼では高い渦度の前縁剥離渦が壁面近傍に付着している様子が確認できる.この傾向は,x/L=0.8になるとより顕著となり,90° LEF は前縁剥離渦を後縁まで物体表面近傍にとどまらせる効果のある事が示された.

(4) シャインフルーグアタッチメントを有する2台の CCD カメラとX軸クロスローラにより精密位置決め 可能なキャリブレーションプレートを用いて,ステ レオ PIV 計測システムを構築し,シート面内三次元 速度ベクトルの算出が可能となった.その結果,図2 に示すようにバースト現象が発生している領域にお いて,流れ方向速度成分大となる事が示された.



図1 PIV 解析結果(x/L=0.6, a=40°)



図 2 PIV ステレオ計測結果 (x/L=0.8, a=40°)

3. 研究目標の達成状況

第1段階として数値解析によって有望なLEFレイアウトを絞り込み,第2段階として風洞 実験を実施する事によって効率良く低迎角領域,高迎角領域,Post stall領域における最適な LEFレイアウトを提案する事ができ、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、各迎角領域において空力特性を改善させる前縁フラップレイアウトを見出す事ができた。今後の課題として、Post stall 領域におけるより詳細な PIV 解析を実施し、空気力変動データと照らし合わせて Vortex Breakdown を自動回避できるシステムの開発を進めていく。

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- *[1] <u>T. Ishide</u>, <u>M. Itazawa</u>, <u>T. Misaka</u>, K. Shimoyama: Aerodynamic Improvement of a Delta Wing in Combination with Leading Edge Flaps, *Proceeding of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.26-27.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17H002
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2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

本研究では前年度に引き続き,表1に 示す種々の柔軟翼を3Dプリンタによっ て製作し,羽ばたき翼模型をエッフェル 型三次元風洞内に設置し,ヒービング運 動させて以下の結論を得た.

- (1) 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)が前 年度に引き続き、最もCLmaxが大きくな り再現性を確認することができた(図 1参照).
- (2) 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)が前 年度に引き続き、最も C_{Lmax} が大きくな り再現性を確認することができた(図 1 参照).



	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E	Type F	Type G	Type H
material	SUS 304	AK-clear film	Vero White Plus	Vero White Plus	Vero White Plus	Vero White Plus	Vero White Plus	Vero White Plus
		+ SUS 304	(RGD835)	(RGD835)	(RGD835)	(RGD835)	(RGD835)	(RGD835)
chord length	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm	60mm
thickness	0.2mm	film:50µm	root:1.5mm	root:1.5mm	root:1.5mm	leading edge:1.5mm	leading edge:1.5mm	leading edge:1.5mm
		vein:0.2mm	tip:1mm	tip:0.75mm	tip:0.5mm	trailing edge:1mm	trailing edge:0.75mm	trailing edge:0.5mm

表1: 主翼仕様

- (3) 図2に示す揚抗比曲線より,翼幅方向にテーパを有するタイプ Eは、迎角 α=3°~4°にかけて CL/CD絶対値最大となり,優れた 特性を示している事が確認できた。
- (4) タイプ D (テーパ比 0.50) にお いて翼根元部から翼端部にかけ て,翼弦方向にシート光を照射 し,PIV トリガー計測を実施し た結果,図3に示すように翼端 付近において複数の前縁剥離渦 が翼上面に張り付いている出現 確率が,PIV 解析結果200 枚を



図 3 PIV 解析結果(Type D, a=16°, θ=0°, y/b=0.75)

母集団に対して43%であり、他の主翼タイプと比較して高い値である事が確認できた.

3. 研究目標の達成状況

前年度に引き続き,3D プリンタで製作した弾性翼の翼弦及び翼幅方向テーパ比の空力的効果再 現性を確認でき、対応する PIV 解析結果から前縁剥離渦パターンとの関連性もより明確になり、 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,弾性翼の空力的効果についての知見を得る事ができた.今後は, 翼弦及び翼幅方向共にテーパを有する主翼を製作し,その有効性を探っていきたい.

- 5. 研究成果
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
 - T. Ishide, K. Nakano, R. Fujii, T. Kaeriyama, K. Shimoyama, S. Obayashi: Effectiveness of flexible wing in a flapping flight, *Proceeding of the Seventeenth International* Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp.24-25.
- [2] <u>中野滉大,石出忠輝,板澤磨央,藤井亮,歸山智治</u>,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 2017 年度年次大会,埼玉大学,(2017), J0240203.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17H003
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2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

従来,固体の熱分解に関しては,熱重量計測や示唆熱量計測を用いた反応速度の測定が行われてきた.これらの手法は、「試料が熱的に十分に薄く、内部に均一な温度・密度分布を有する」ことを前提としている.しかしながら、燃焼現象のように固体に対し高い熱流束が発生する場においては内部の温度、密度の均一性が保たれているとは考えにくく、熱重量計測が熱分解反応の測定に適した手法であるとは言い難い.

我々は、過去の研究において、高輝度放射光施設 SPring-8 を利用し高温窒素雰囲気中の 木質バイオマス内部のX線透過光計測を行った.本測定手法は、熱分解中の木質バイオマス 内部の密度変化をリアルタイムで測定するものである.反応が停止した固体に対する CT 計 測は数多く行われているが、本測定法のような固体内部の非定常計測は他に例がなく、世界 的に見ても極めて独創性の高いものである.

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、高温雰囲気中の固体(木質系バイオマス)内部の密度の非定常変化を測定することにより、固体内部で生じる熱分解反応速度を導出する新たな手法を開発することを目的とする.

2. 研究成果の内容

熱分解中の試料(ヒノキ,直径 6 mm,高さ 6 mm)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、昇温過程における試料の質量減少と試料を透過する X 線の輝 度変化を同時に計測した.

昇温により熱分解が進むことで、試料の質量は減少し、X線透過光輝度は増大する.X線 輝度積算値と木質バイオマス密度の間には、以下の関係が成立する.

$$I = I_0 exp(-\mu_m \rho l)$$

ここで、I は物質透過後のX線の輝度、 I_0 [a.u.]は物質透過前のX線輝度、 μ_m [m²/kg]は平均の質量吸収係数、 ρ [kg/m³]は物質の密度、l [m]は光路長である.式1を試料全体で積分することにより、以下の関係が得られる.

$$\sigma = \mu_m M$$

(2)

(1)

ここで、 σ [a.u.]は、試料全体のX線輝度積算値、M [kg]は試料の質量である.式2より、

 μ_m は σ とMの相関における傾きを示していることがわかる.

図1は、各昇温速度における μ_m と雰囲気温度の関係を示している。熱分解過程は、雰囲気 温度により μ_m の値の異なる3つの過程(脱水、熱分解A、熱分解B)に分かれていることが わかる。とりわけ、熱分解Bの領域では、昇温速度の違いによって μ_m の値が異なることに 加え、開始温度にも違いが見られる。これは、昇温速度の違いにより、放出される元素が異 なっているためであると考えられる。2次元非定常伝熱数値計算により密度一定の固体に対 する伝熱特性の評価を行った結果、実験と同様の加熱条件下において固体内にはほとんど温 度差が生じないことがわかった。すなわち、図1に見られる結果は、試料内部に変換率の分 布が生じた結果である可能性が高い。



図1:各昇温速度における質量吸収係数μmと雰囲気温度の関係

3. 研究目標の達成状況

本研究では熱的に厚く、内部に温度、密度の不均一性が生じ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.これまでの研究により、昇温条件の違いにより異なる反 応が生じていることが分かったが、これは熱天秤等の手法では判断できない.よって、本研 究により新たな計測手法の利点が確認された.

4. まとめと今後の課題

固体内部の熱分解反応機構の解明には、密度分布の正確な測定が必要である.本測定手法の精度を上げるためにも、今後、X線透過光計測の精度向上が必要である.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- [1] <u>R. Sasaki, G. Hirabayashi, Y. Ogami, T. Daitoku</u>, H. Nakamura: Reaction Rate of Thermal Pyrolysis for Thermally-Thick Wood Biomass, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), CRF-16, pp.32-33.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17H004
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2年目

飛行パイプの屋外観測と数値解析 Field Observation and Flow Analysis of a Flying Pipe

中野 政身*††, 平田 勝哉**† 宮原 晃平***, 内藤 悠介**, 井上 達哉*** *東北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, ††所内対応研究者

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 モデルの流体力の算出

今回,ハイスピード・ビデオ・カメラを用いて撮影したモデルの姿勢画像に三次元運動解 析を行うことで,モデルに作用する流体力(揚力/抗力),モーメントを算出し,流体力・モ ーメントがモデルの軌道にどう影響しているかを確認した.

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.

2.3 数値解析によるモデル周囲の詳細な流れの解析

数値解析では実験と同様の条件で3次元シミュレーションを行い、モデル周囲の詳細な流 れを得ることができた.

3. 研究目標の達成状況

本年度はモデルに作用する流体力(揚力/抗力),モーメントを算出し,流体力・モーメントがモデルの軌道にどう影響しているかを確認できた.また,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 ることができた.

4. まとめと今後の課題

本年度の活動で,飛行パイプに働く流体力・モーメントがパイプの軌道にどう影響してい るかを確認できた. 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い,モデル周囲の詳 細な流れを得ることができたものの,現在結果が出ているのは一例のみであるため,今後さ まざまなパラメータで数値解析を行い,することが望まれる.

- 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
 - Kouhei Miyahara, Yusuke Naito, Tatsuya Inoue, Hirochika Tanigawa, Katsuya Hirata, Masami Nakano: Field Observation and Flow Analysis of a Rotating Pipe in Flight, Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp.176-177.
 - *[2] <u>宮原晃平</u>, <u>内藤悠介</u>, 中野政身, <u>谷川博哉</u>, <u>井上達哉</u>, <u>平田勝哉</u>: 回転する飛行パイ プの屋外観測と数値解析, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 日本機械学会 2017 年度 年次大会講演論文集, さいたま, 2017.9.3-6, G0500306, (2017), pp.1-5.
 - [3] <u>Kouhei Miyahara, Tatsuya Inoue, Hirochika Tanigawa, Katsuya Hirata, Masami</u> Nakano: Field Observation and Flow Analysis of a Rotating Pipe in Flight, *The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, TFEC9-1061, 2017.10.28-30, Okinawa, (2017), pp.1-5.
 - *[4] <u>内藤悠介</u>, <u>宮原晃平</u>, <u>谷川博哉</u>, <u>平田勝哉</u>: 飛行する回転パイプの屋外観測と数値解 析, 日本機械学会関西支部第 93 期定時総会講演会, 日本機械学会関西支部第 93 期定 時総会講演論文集, 2018.3.12-13, 大阪, No.184-1, (2018), pp.630.
- 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	J17R001			
Subject area	Environment and energy			
Research period	April 2017 ~ March 2018			
Project status	3rd year			

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

Hideaki Ogawa*†, Georgy Shoev**††, Sannu Mölder***††, Ben Shoesmith**** Nicolas Téa****, Ramandeep Kaur*, Evgeny Timofeev***††, Yevgeniy Bondar** Kiyonobu Ohtani*****††, Shigeru Obayashi***** *School of Engineering, RMIT University **Khristianovich Inst. of Theo. and Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences ***Department of Aerospace Engineering, Ryerson University ****Department of Mechanical Engineering, McGill University *****French Air Force Academy *****Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS or non-IFSresponsible member

1. Purpose of the project

The air intake constitutes a key component of airbreathing engines such as turbojet, turbofan, ramjet and scramjet engines for economical high-speed transport including supersonic and hypersonic aircraft. It is responsible for diffusion and compression of incoming supersonic airflow to conditions suitable for combustion, while ensuring a high total pressure for thrust production. Thorough understanding of intake physics and accurate prediction of the flowfield is of crucial importance for efficient engine operation and reliable intake start. In particular shock wave interactions play a primary role in diffusion and compression of incoming flow.

Busemann intakes feature axisymmetric geometries that can enable highly efficient flow compression through initial isentropic compression followed by a downstream conical shock, which is the only entropy source and realigns the flow to parallel stream in the inviscid flow regime (Figure 1).

The theoretical axisymmetric Busemann intake is generally regarded as producing an efficient compression field and is often used as a basis for hypersonic intake studies. The axisymmetric full Busemann intake for a



Figure 1: Supersonic Busemann intake flowfield for Mach 1.95 freestream.

Mach 8 freestream can achieve a total pressure recovery of 97% and uniform outflow in inviscid flow, with the 3% loss occurring over a downstream conical shock wave at the end of the initial isentropic compression. Boundary layer losses, on the long (and heavy) isentropic surface, of such intakes, can lead to as much as a 50% decrease in total pressure recovery. The presence of the boundary layer also has a considerable effect in modifying the inviscid flow (Figure 2). These two factors suggest that the inviscid intake should be shortened and that the effect of such shortening on the inviscid core flow be

compensated so as to retain as much as possible of its original performance.



Figure 2: Hypersonic Busemann intake flowfields for Mach 8 freestream.

Intake stunting (axial contraction) has been suggested as a shortening method to improve the overall performance of the Busemann intake. These studies noted that mode transition of the centerline shock reflection occurred from a configuration with an infinitesimally small Mach disk, resembling a regular reflection (which is prohibited theoretically at the centerline due to singularity that exists on the symmetry axis) to that with a distinct Mach disk (stem), as seen in Figure 3.



Figure 3 : Centerline shock reflection in stunted Busemann intakes before/after transition (Mach number). Left: apparent regular reflection, right: Mach reflection.

The intermediate transition process is characterized by highly unsteady, complex flow structures including a toroidal (ring) vortex, as shown in Figure 4. The variations of the centerline pressure in the stunting process in inviscid flow indicated that the shock reflection features a reflected shock in the two-shock regular reflection before mode transition and a three-shock Mach reflection after transition. Simulations for the reverse (stretching) process revealed possible existence of hysteresis during mode transition of shock reflection, that is, occurrence of mode transition at differing intake lengths.



Figure 4 : Flow structure of centerline shock reflection in stunted Busemann intakes (Mach number and adaptive grid). Left: during mode transition, right: Mach reflection after transition.

Such pronounced effects of the intake geometry on the internal flowfield observed here suggest substantial impact on the engine performance. New theories and physical modeling are thus required essentially to predict the shock behavior for axisymmetric configurations accurately and reliably. The present project has been proposed to develop fundamental understanding of the flow characteristics and physical insight into the underlying mechanism, with particular focus on the shock structure and reflection associated with various intake geometries. The intake flowfields are primarily investigated by means of computational and analytical approaches including Euler and Navier Stokes solvers, the curved shock theory, and method of characteristics. The flow structures are further scrutinized by Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) to examine the influence of viscosity on the shock behavior as well as the characteristics in the rarefied regime. Experimental investigation is conducted in the IFS Shock Wave Research Facilities to examine the flow behavior in reality by means of flow visualization and measurement.

2. Details of program implement

The overall proposed program is described below, consisting of two phases:

- (1) The first stage investigates intake flowfields using numerical and theoretical approaches, focusing on Mach reflection (MR) and flow behavior in the stunted (*i.e.*, axially contracted) Busemann intakes as well as so-called M-flow intake rings:
 - (a) The shock structures and behavior in continuum ambient conditions have been studied numerically by probing into inviscid and viscous transitional flowfields with Euler and Navier-Stokes solvers (namely CFD++ and Masterix/Fluent, respectively) in Mach 8 freestream for stunted Busemann intakes and Mach 2 freestream for M-flow intake rings. Analytical investigation is conducted in light of shock polar analysis and curved shock theory. A reliable boundary layer correction method is to be developed to enable intake design that can reproduce the inviscid flow features in the presence of viscous effects.
 - (b) The characteristics of the intake flowfield in rarefied flow environments are investigated by applying an in-house DSMC (direct simulation Monte Carlo) software system SMILE to airstream at a large Knudsen number due to large mean free path at Mach 8 for stunted Busemann intakes and Mach 2 for M-flow intake rings. Simulation is performed at Kn = 0.03, where the mean free path of molecules is greater than the Mach stem height, and the results are compared with continuum flow.
- (2) In the second phase, experiments are conducted in shock wave facilities for various representative configurations. Intake geometries to be examined include: (a) stunted Busemann intakes on the verge of Mach reflection transition to be tested at Mach 4 or 5 in a ballistic range (b) M-flow intakes with various shock angles to be tested at Mach 2 in a supersonic wind tunnel. Viscous correction is employed for both configurations to account for the influence of the boundary layers. Annular rings with the forebody contours are employed to allow visualization of the shock structures via the Schlieren method, while establishing the intended flow features of interest. Further numerical investigation via DSMC will be conducted to identify the key flow physics and examine the MR behavior and hysteresis of axisymmetric flow in the rarefied environment.

The **Phase 1** was implemented in the preceding projects (J15R005 and J16090), while the present project (J17R001) has undertaken the Phase 2, as follows:

In Multiple Collaborative Research Project J15R005, a boundary-layer correction method was developed at RMIT and McGill University in collaboration by coupling CFD++ with an edge detection method based on total enthalpy coded to iteratively converge on the corrected surface geometry coded in MATLAB. Its capability was verified by comparison of flowfields between the viscous-corrected and inviscid simulations. Desired inviscid flow characteristics have been achieved successfully in the presence of viscosity in hypersonic freestream of Mach 8 for full and stunted Busemann intakes (Figure 5) and supersonic freestream of Mach 2 for M-flow intake rings (Figure 6).



Figure 5 : Comparison of the inviscid and viscous-corrected flowfields in full Busemann intake for Mach 8 freestream (Mach number, right: close-up).



Figure 6 : Comparison of inviscid and viscous-corrected flowfields in M-flow intake ring for Mach 2 freestream (Mach number).

The characteristics and behavior of flowfields in rarefied gas environment were investigated at Russian Academy of Sciences using the SMILE (Statistical Modeling In Low-density Environment) software system. DSMC simulations were performed for these configurations at a Knudsen number of 0.003, at which the mean free path of molecules is greater than the Mach stem height, resulting in a distinctly different shock structure from those in the continuum flow regime. The flow behavior in a rarefied gas at a high altitude has been examined for the Busemann intake with DSMC, exhibiting distinctly different features including a peak in centerline pressure occurring at a further downstream location, as compared to inviscid and viscous flowfields in continuum regime (Figure 7).



Figure 7 : Comparison of the Mach number (left) and centerline pressure (right) distributions for viscous-corrected continuum and rarefied gas (Kn = 0.003) flowfields.

In General Collaborative Research Project J16090, the flow characteristics were further investigated for full and stunted Busemann intakes as well as M-flow intake rings in hypersonic and supersonic freestream, respectively, in numerical and analytical approaches. The flowfields were scrutinized with particular attention to the behavior

and possible hysteresis of centerline shock reflection at the symmetry axis at RMIT University. Unique phenomena originating from the singularity were observed, including a drastic change in the flow attributes behind the Mach stem across transition and a ring vortex structure featuring toroidal flow recirculation, such as features displayed in Figure 4. Analytical studies were conducted for the M-flow intake geometries at shock angles from 100° to 150° at Mach 2 by means of the curved shock theory and method of characteristics at Ryerson University and McGill University, respectively. Numerical simulations were performed for these geometries with viscous correction applied. The results were examined and compared for validation and further understanding of the flowfields.

The **Phase 2** has been undertaken in the present project (J17R001), with particular focus on the centerline shock reflection in supersonic freestream at Mach 2 in numerical and experimental approaches, as outlined below:

Conditions and configurations

Busemann intakes (full, stunted) and M-flow intake rings have been considered in the numerical studies, while the experiment employed the latter configuration.

The Busemann intake captures a uniform supersonic airflow at Mach 1.95 with a static pressure of 13,996 Pa and temperature of 166 K, based on the total pressure of 1 atm and temperature of 293 K corresponding to the experimental conditions (Table 1). It has an entrance radius of 22.2 mm and an area contraction ratio of 1.55, with a conical shock angle of 51.9° (Figure 1).

Table 1 Busemann intake configurations and flow conditions ($M_{\infty} = 1.95$)

Entrance radius	$22.2\mathrm{mm}$	Area contraction ratio	1.55
Static pressure p_{∞}	13,996 Pa	Static temperature T_∞	166 K
Reynolds number Re	2.89×10^{5}	Specific heat ratio γ	1.4 (air)

Table 2 M-flow intake ring configurations and flow conditions $(M_{\infty} = 2)$

Entrance radius	30 mm	Internal cone angle	100°	
Static pressure p_{∞}	55.8 Pa	Static temperature T_{∞}	$166.7\mathrm{K}$	
Continuum fl	ow	Rarefied gas		
Specific heat ratio γ	1.4 (air)	Specific heat ratio γ	1.4 (N ₂)	
Reynolds number Re	1,450	Knudsen number Kn	0.01	

Table 3 M-flow intake ring configurations and flow conditions ($M_{\infty} = 1.95$, experiment)

Entrance radius	$22.5\mathrm{mm}$	Internal cone angle	100°
Total pressure p_{∞}	101,325 Pa	Total temperature T_∞	$293\mathrm{K}$
Reynolds number Re	2.94×10^{5}	Specific heat ratio γ	1.4 (air)

The M-flow ring, which produces a supersonic, axisymmetric internal flow behind an inward-turning conical shock wave, captures a uniform airflow a static pressure of 55.8 Pa and temperature of 166.7 K at Mach 2.0 for comparison with kinetic simulation, and a total pressure of 1 atm and temperature of 293 K at Mach 1.95 for comparison with experiment. The Reynolds number is 1,450 and 2.94×10^5 , based on the entrance radius 30 mm and 22.5 mm, respectively (Tables 2 and 3). The air is taken to be calorically perfect with a specific heat ratio of 1.4. Kinetic simulations employ a diatomic nitrogen gas, which is treated to be calorically perfect. The specific heat ratio and Prandtl number are 1.4 and 0.72, respectively. A Knudsen numbers of 0.01 is considered in this study (Table 2).

Computational fluid dynamics

For steady flowfields in continuum regime, simulations have been performed by utilizing a commercial high-fidelity code CFD++, which solves the Navier-Stokes equations implicitly with 2^{nd} -order spatial accuracy, assisted by multigrid convergence acceleration. The advanced wall-function technique is used for near-wall treatment and turbulence is modeled by the two-equation SST $k-\omega$ RANS model. The air is treated to be a calorically perfect gas with a specific heat ratio of 1.4. The intake surface is set to be adiabatic for viscous simulations. The axisymmetric computational domains are represented by two-dimensional fully structured meshes. The domain for the stunted Busemann intakes is composed of 220,000 cells. The minimum cell thickness on the wall is 10^{-5} m for viscous computations, which provides a dimensionless wall distance value y^{+} of 1.4. Stunting simulations are performed using an inviscid solver Masterix featuring adaptive meshing for unstructured grids.

In the rarefied gas regime, the flowfields are simulated by means of the Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method using the SMILE (Statistical Modeling In Low-density Environment) software system. Rectangular grids are used for modeling molecular collisions and sampling the gas dynamic parameters, refined to ensure the linear cell size smaller than the local mean free path of molecules. The domain is initially populated by the model particles according to the Maxwell distribution function corresponding to the freestream parameters. Supersonic flow is assumed for the outflow boundary, while the specular reflection condition is imposed on the lower boundary.

Experiment

Experimental testing has been performed in the supersonic wind tunnel at the IFS Shock Wave Facilities. It is a suction type tunnel connected to a vacuum chamber, with the air taken from the ambient through a square intake. Supersonic freestream generated with a Mach 2 de Laval nozzle is measured to be at Mach 1.95. The flow conditions are tabulated in Table 3 (while the ambient flow conditions were subject to minor variations). The Mflow intake ring has an entrance diameter of 45 mm and produces an internal cone at an angle of 100°. Its contour has been designed by applying the aforementioned viscous correction method, aiming to reproduce the flowfield simulated by inviscid Euler computation. The Reynolds number based on the entrance radius is and 2.94×10^5 . Figure 8 presents



Figure 8 M-flow intake ring model installed in the IFS supersonic wind tunnel with a support ($M_{\infty} = 1.95$)

the M-flow intake ring model mounted in the working section with a support. The flowfields are visualized by Schlieren photography with a high speed camera.

3. Achievements

The results obtained from numerical and experimental studies are described below, followed by the statement on the achievement levels with respect to the expected result.

Busemann intakes (stunting in continuum)

Simulations have been performed for a Busemann intake in Mach 1.95 freestream with dynamic stunting with $100\% \rightarrow 70\%$ of full length and restretching for $70\% \rightarrow 80\%$ length. Figure 9 compares the instantaneous flowfields at 80% length in the nominal (stunting) and reverse (restretching) processes. Sizable Mach stems can be seen in both processes, characterized by differing positions and heights, indicating an apparent hysteresis. However it may be attributed to the change rate of intake length, which is found to be 0.0348 m/s on average, comparable to the intake length.



Figure 9: Comparison of stunted Busemann intake flowfields.

The centerline pressure distributions are compared in Figure 10 at various lengths. All distributions are commonly characterized by an initial peak across shock reflection followed by a gradual decrease downstream. The pressure rise becomes more perpendicular with stunting due to the coalescence of isentropic compression waves. The pressure peak is maximum at 90% length, indicative of completion of transition from the RR-like shock reflection to MR between 95% and 90% lengths.



Figure 10 Centerline pressure distributions in stunted Busemann intake flowfields.

M-flow intake rings (continuum vs rarefied)

Behavior of a conical shock wave in a M-flow intake ring in a low-density environment is simulated. Flowfields in the absence and presence of boundary layers are simulated by Euler and Navier-Stokes solvers for the former, and applying specular and diffusive boundary conditions for the latter, respectively.

Mach number distributions are compared in Figure 11, where continuum flowfields from Euler/Navier-Stokes simulations are shown by black contours, overlaid on kinetic flowfields from DSMC simulations. Close agreement can be seen between continuum and kinetic results in both cases, especially in Figure 11b. The difference in the radius and position of the curved Mach disk observed in Figure 11a is assumed to originate from the shift of the triple point due to small difference in the incident shock angle, which is slightly larger for kinetic than Euler results.





M-flow intake ring experiment

The M-flow intake ring configuration was tested in the experimental campaigns conducted in July and October 2017 in the supersonic wind tunnel at the IFS Shock Wave Facilities, following preliminary testing with a simple ring intake in April.

The flowfields visualized by the Schlieren method showed transient flow structures that seemingly resemble an internal cone with a sizeable Mach disc (somewhat similar to the flowfield in Figure 6) in the first campaign in July 2017. However, considerable fluctuation was observed in the entire flowfield as well as the motion of the internal cone including the Mach disc. Closer assessment also revealed the discrepancy of the internal cone angle as well as the position and size of the Mach disc. Upon further inspection it was concluded that supersonic flow was not established in the internal passaged inside the ring but rather remained subsonic, that is, the M-flow intake ring was choked and unstarted. This was attributed to excessive blockage incurred in the channel due to the boundary layer development on the ceiling, floor, and side walls, exacerbated by a detached bow shock that formed at the leading edge of the model support with a wedge-shaped cross section in front, which was assumed to merge with the thick boundary layer on the tunnel floor.

An M-flow intake ring with reduced cross section hence blockage was fabricated and tested in the second campaign at the end of October 2017, mounted with a model support that was also shaved to suppress the blockage. However, supersonic flow was not established successfully, with the model bent at the connection with the support at its bottom due to large moment from dynamic pressure experienced.

Achievements level

The project has been advanced reasonably and yielded new insights into the behavior of centerline shock reflection in a dynamically stunted Busemann intake in the supersonic flow regime and the characteristics of M-flow intake ring flowfields with supersonic freestream in continuum flow and rarefied gas environment by means of Euler/Navier-Stokes simulations and kinetic simulations, respectively.

In particular, an apparent hysteresis was observed between the stunting and reverse processes in Mach 2 Busemann intakes, while it called attention to the importance of the change rate of the intake length during stunting relative to the flow speed in the intake, which is considerably lower than that of the Mach 8 Busemann intake investigated in the preceding studies.

In the studies for the M-flow intake ring, the effectiveness of the viscous correction method was verified and the influence of the boundary layer in the rarefied gas regime was revealed from numerical investigation. On the other hand, the experimental study was hampered by unexpected difficulty in establishing supersonic flow in the M-flow intake ring, which resulted in highly unsteady (presumably subsonic) flowfields caused by blockage in the flow channel.

Overall, the objectives may well be deemed partially fulfilled in terms of the achievements in the numerical aspect (albeit the need to further examine or exclude the effects of the change rate of the intake length during the stunting process), whereas progress was obstructed by an unforeseen situation in the experimental aspect. Consequently, new physical insights have been gained into underlying physics of centerline shock reflection, its transition, and potential hysteresis during stunting/restretching processes owing to international collaboration, while further investigation and efforts remain necessary particularly from the experimental perspectives for the establishment of the new criteria for shock reflection and elucidation of the driving mechanism of its transition and (possible) hysteresis as well as the acquisition of essential knowledge for the design of high-performance axisymmetric airbreathing engines that operate reliably and efficiently in supersonic and hypersonic regimes.

4. Summaries and future plans

This activity report has described the background, objectives, methodology, and progress of the International Multiple Collaborative Research Project on the intake physics for high-speed airbreathing propulsion with particular focus on the characteristics and behavior centerline shock reflection, which is yet to be fully understood and has been investigated in our preceding IFS Collaborative Research Projects extensively. The overall project has progressed to a stage where supersonic intake flowfields are examined in order to acquire thorough physical understanding in both numerical and experimental approaches in conjunction with analytical methods. It generated new insights into the stunted Busemann intakes and M-flow intake rings in Mach 2 freestream in continuum and rarefied regimes from the numerical perspectives, while experimental progress was impeded by the difficulty encountered in starting the tunnel in the presence of the ring.

The research will be further advanced and pursued in the General Collaborative Research Project entitled "Investigation of centreline shock reflection and viscous effects in axisymmetric supersonic flow" (Project code: J18I042). This project will continue the endeavor to scrutinize the M-flow intake ring in the IFS supersonic wind tunnel with a revised setup to improve the startability, which will allow the investigation of the effects of viscosity on centerline shock reflection in conjunction with numerical analysis.
- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] <u>H. Ogawa, B. Shoesmith, S. Mölder and E. Timofeev</u>: Viscous Correction and Shock Reflection in Stunted Busemann Intakes, *Shock Wave Interactions*, Springer, (2018), pp. 179-196.
- [2] <u>B. Shoesmith, S. Mölder, H. Ogawa, E. Timofeev</u>: Shock reflection in axisymmetric internal flows, *Shock Wave Interactions*, Springer, (2018), Springer, pp. 355-366.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [3] H. Ogawa, G. Shoev, S. Mölder, B. Shoesmith, N. Téa, R. Kaur, E. Timofeev, Y. Bondar, K. Ohtani and S. Obayashi: Investigation on Behaviour and Characteristics of Centreline Shock Reflection in Supersonic Flow, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017),pp.64-65.
- [4] <u>H. Ogawa and G. Shoev</u>: Numerical Investigation of Viscous Effects on Centreline Shock Reflection, the Fourteenth International Conference on Fluid Dynamics, Sendai, (2017).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

国際連携公募共同研究プロジェクト	
課題番号	J17R002
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2年目

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 †申請者, ††所外対応研究者

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、近年進展の目覚ま 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した研究 者交流を図る.本研究の全体の研究組織を図1に示す.

2. 研究成果の内容

東北大学に設置されたリヨン大学連合,フランス CNRS との国際混成研究所 ELyTMaX のミラーサイトとして ELyTMaX@Lyon をリヨン大学連合に設置し,双方の大学が相手国に滞在し,

共同研究を進める強固な研究協力体制を構築した.また日仏のELyTMaXメンバーが,科研費, 国際共同研究費,企業との共同研究費などの外部資金を獲得している.また,日仏のジョイ ントラボラトリである ELyTMaX を核とし、多国間共同研究ネットワークを構築するための ELyTGlobal プログラムをフランス CNRS の支援のもと開始した.本研究課題や ELyTMaX を通 して実施してきた要素研究を社会実装するために、エネルギー、先進輸送システム、医工学 の分野で共同研究テーマを設定し、立ち上げを行った.また、複数の日仏の企業が参加して おり、今後産学国際連携ネットワークとしても機能する.ELyTGlobal プログラムでは、ド イツ研究者(フラウンホーファー非破壊検査研究所、カールスルーエ工科大学)も参画して いる.南京航空航天大学と流体科学研究所とのジョイントラボラトリを設置し、これまでの 共同研究をさらに推進する体制を整えた.南京航空航天大学と KTH スウェーデン王立工科大 学は今後、ELyTGlobal プログラムにおいて共同研究を推進する.

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について、今年度は 取り組むとともに、これまでの成果を取りまとめた.超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)を 固相のまま金属あるいはセラミック基材上へ成膜可能なコールドスプレー成膜技術を世界 に先駆けて成功させた.セルロースナノファイバー(CNF)を原料とする高強度・高弾性セ ルロース単繊維を流動との相互作用に着目したスマート創成法を開発し、その製法としての 検証を行った.また、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 ト管理について研究を進めるとともに、福島第一原子力発電所の廃止措置に適用するために、 具体的な国際協力による研究プロジェクトを立ち上げた.このように、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 マの推進がなされつつある.

以下に代表的な研究成果について記載する.



図1:本研究の研究組織

1) Mechanical characterization of Inter-particle sintering of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)-Fumed nano-alumina (FNA) composites

UHMWPE, due to its molecular weight, is used in several applications like orthopedic implants, armor plates, ship rudders because of its high wear resistance, impact resistance, and cavitation erosion resistance. Processing of UHMWPE via a technique called cold-spray was made possible thanks to an understanding of classical compression sintering and the high-speed compaction of UHMWPE. Cold spray is a coating technology in which fine particles (5-100 µm) are impacted onto a target surface at high velocities (200-1000 m/s) to obtain thick coatings/sintered consolidates avoiding the traditional tools like monitored temperature presses. In the case of UHMWPE, Ravi et al. reported that particle binding agents like FNA and particle temperature were the primary parameters that permitted the buildup of coating thickness. This research work aims at understanding the effect of interfacial loading during the processing of UHMWPE interfaces because of effect of shot-peening seen during coating process. Thereby, helping to predict and understand the cold spray buildup mechanism. Hence, the study is a first step towards understanding the cohesive strength and physical properties of the cold-sprayed deposited material with respect to the interfacial loading conditions and effect of FNA particles.

2) Piping sYstem, Risk management based on wAll thinning MonItoring and preDiction (PYRAMID)

We aim to develop new tools and techniques to detect and quantify wall thinning due to Flow Assisted Corrosion in piping systems. Corrosion modes and rate will be predicted by numerical simulations at any position for actual layouts of piping systems. These predictions will be validated by electrochemical experiments under controlled mass transfer coefficient. From the previous results ultrasonic guided modes EMAT networks will be designed. Their performances will be investigated in corrosion test facilities and the adequate signal processing techniques based on bayesian approaches will be developed. To increase the method reliability, simulations will help selecting the best technical solution, based on Probability of Detection and flaw characterization performance. Special ultrasonic imaging techniques will also be applied if necessary. From all the data gathered during the project, an industrial risk evaluation of any kind of piping system subject to corrosion will be performed.

3) MIniature-Scale Energy Generation by Magnetic Shape Memory Alloys

Recently, ferromagnetic shape memory alloy (FSMA) attract attention as a new SMA with the magnetically induced shape memory effect. Using FSMA as the actuator element, it is expected that high-speed operation and high stress load become the possible. As the example of the shape memory alloy in which magnetic property is greatly related to mechanism of the generation of shape memory effect, Ni-Mn-X (X = In, Sn) type FSMAs have been found and their meta-magnetic phase transition (MT) has been observed from ferromagnetic austenitic (A) phase to antiferromagnetic or paramagnetic martensitic (M) phase. FSMAs are expected to exhibit the shape memory

effect (SME) associated with the reverse MT induced by a magnetic field. For the properties described above, metamagnetic shape memory alloys (MSMAs) are attractive for micro-actuation due to their multifunctional properties.

The project MISTRAL exploits the potential of magnetic shape memory alloys (MSMAs) for use in energy generation on a miniature scale. The objectives are two-fold: (1) The Villari effect in single crystalline NiMnGa will be implemented in a new generation of vibration energy harvesting devices. (2) The temperature-induced change of magnetization in Ni-Mn-X (X = In, Sn) films and plates will implemented in novel thermomagnetic energy generators. In both cases, resonance effects will be exploited to energy conversion and efficiency. Experiments include material maximize characterization (thermal, magnetic, mechanical properties) as well as characterization of device performance (force-/temperature-induced change of magnetization, mechanical performance, generation of electrical energy). Based on obtained empirical data, finite element and lumped element models will be developed to simulate coupled physical properties and device characteristics in order to enable performance prediction as well as efficiency improvement.

3. 研究目標の達成状況

研究および研究体制の構築について当初の目的を十分達成した.特に本研究交流を通じて, CNRSのUnite Mixte Internationale (UMI,国際混成研究所),ELyTMaXの設置のために重要 な役割を担った.ELyTMaXにより,日仏が一体となって研究を行う実体ある組織を構築した. また,平成30年4月に,これらの成果を基盤として,概算要求により流体科学研究所附属リヨ ンセンターを設置した.リヨンセンターでは,教員と学生がリヨンに滞在し,国際共同研究を推 進する.従って,本センターはELyTMaXと連携して多国間国際共同研究を推進するとともに, 本研究交流における国内協力機関や国内の流体科学研究コミュニティーとリヨン大学との研究 協力を推進する役割を担う.

4. まとめと今後の課題

本研究交流では、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とともに、応用展開のための研究を推進した.主な成果は下記の 通りである.

- 超高分子量ポリエチレン (UHMWPE)を固相のまま金属あるいはセラミック基材上へ成膜可能なコールドスプレー成膜技術を世界に先駆けて成功させるとともに、材料科学と流体科学の観点から成膜法を体系化した.
- 2) 炭素系硬質薄膜を用いた摩擦システムにおいて、摩擦過程で自己形成される低摩擦発現表面層の存在を明示するとともにその制御の可能性を明らかにした.さらに、硬質材料に加え、トライボロジーの新たなる研究として、強硬度ゲルのトライボロジーの研究を開始した.
- 3) セルロースナノファイバー(CNF)を原料とする高強度・高弾性セルロース単繊維の創製法 について、流動との相互作用に着目した CNF 配向制御法に交流電場による配向促進を重 畳させた革新的プロセス法を確立した。
- 4) エネルギープラントにおける配管減肉管理を、腐食科学に立脚したモデルと知的センシングを活用したモニタリングを融合させ、新しいリスク管理のための学問領域を開拓した.

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] Jun Ishimoto, Toshinori Sato and Alain Combescure, "Computational approach for hydrogen leakage with crack propagation of pressure vessel wall using coupled particle and Euler method", International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 15, 13 April (2017), pp. 10656-106822017, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.161
 - [2] Kenji Yoshimizu, Yuta Yamamoto, Kei Asahina and Kanjuro Makihara., "Strategy for enhancing the active harvesting of piezoelectric energy", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 28 (8), (2017), pp. 1059–1070, https://doi.dox.org/10.1177/1045389X16672592
 - [3] Kanjuro Makihara and Kei Asahina., "Analog self-powered harvester achieving switching pause control to increase harvested energy", Smart Materials and Structures, Volume 26 (2017), 055007, April 2017, https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa676c
 - [4] Sho Takeda, Hiroyuki Miki, Hiroyuku Takeishi, Toshiyuki Takagi, "Cu-Bases MoS₂-Dispersed Composite Material Formed by the Compression Shearing Method at Room Temperature", Tribology Online, Vol.12, No.2, April (2017), pp.29-36, https://doi.org/10.2474/trol.12.29
 - [5] Yuya Kurihara, Takuya Mabuchi, and Takashi Tokumasu, "Molecular Analysis of Structural Effect of Ionomer on Oxygen Permeation Properties in PEFC", Journal of The Electrochemical Society, 164 (6), April (2017), F628-F637.
 - [6] Jun Ishimoto, Toshinori Sato and Alain Combescure, "Computational study for dynamic crack propagation in pressure vessel wall with hydrogen leakage using coupled particle and Euler method", Proceedings of the Fifth International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures (CFRAC 2017), June (2017) [in USB memory].
 - [7] Sagiri Takase, Helmut Takahiro Uchida, Arata Yagi, Masae Kanda, Olivier Lame, Jean-Yves Cavaille, Yoshihito Matsumura and Yoshitake Nishi, "Adhesion of Polyethylene/Polyethylene Terephthalate (PE/PET) Laminated Sheets by Homogeneous Low Potential Electron Beam Irradiation (HLEBI) Prior to Assembly and Hot-Press above Melting Point", Materials Transactions, Vol. 58, No. 7, July (2017), pp.1055-1062, https://doi.org/10.2320/matertrans.M2016460
 - [8] Suguru Miyauchi, Toshiyuki Hayase, Arash Alizad Banaei, Jean-Christophe Loiseau, Luca Brandt, Fredrik Lundell, "Two-dimensional numerical simulation of the behavior of a circular capsule subject to an inclined centrifugal force near a plate in a fluid", Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 12, No. 2, August (2017), Paper No. 27-00190, DOI: 10.1299/jfst.2017jfst0015
 - [9] Cuixiang Pei, Pan Xiao, Siqi Zhao, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi, "A flexible film type EMAT for inspection of small diameter pipe", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.31, No.8, August (2017), pp.3641-3645, DOI 10.1007/s12206-017-0701-4
 - [10] Shejuan Xie, Mingming Tian, Hong-En Chen, Ying Zhao, Lei Wua, Zhenmao Chen, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, "Evaluation of wall thinning defect in magnetic material based on PECT method under magnetic saturation", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.55, No. S1, pp.49-59, October (2017), DOI 10.3233/JAE-172257
 - [11] Gael Sebald, Masami Nakano, Mickaël Lallart, Tongfei Tian, Gildas Diguet, Jean-Yves

Cavaille, "Energy conversion in magneto-rheological elastomers", Science and Technology of Advanced Materials, Volume 18, Issue 1, October (2017), pp. 766-778, https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1377590

- [12] Masataka Nakauchi, Takuya Mabuchi, Takuma Hori, Yuta Yoshimoto, Ikuya Kinefuchi, Hideki Takeuchi, Takashi Tokumasu, "Gas-Surface Interaction Study of Oxygen Molecules on Ionomer Surface in Catalyst Layer", 80 (8), ECS Transactions, October, (2017), pp. 197-203, doi: 10.1149/08008.0197ecst
- [13] "Hiroyuki Kosukegawa, Sophia Berkani, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, ""Structure and electrical properties of molybdenum-containing diamond-like carbon coatings for use as fatigue sensors"", Diamond & Related Materials, Volume 80, November (201), pp. 38-44, https://doi.org/10.1016/j.diamond.2017.09.018"
- [14] G. Vértesy, T. Uchimoto, T. Takagi, I. Tomáš, H. Kage, "Graphite structure and magnetic parameters of flake graphite cast iron", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 442, 15 November (2017), pp. 397-402, https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.07.014
- [15] Hitoki Hasegawa, Michael C. Faudree, Yuichi Enomoto, Sagiri Takase, Hideki Kimura, Akira Tonegawa, Yoshihito Matsumura, Itaru Jimbo, Michelle Salvia and Yoshitake Nishi, "Enhanced Tensile Strength of Titanium/Polycarbonate Joint Connected by Electron Beam Activated Cross-Weave Carbon Fiber Cloth Insert, Volume 58, November (2017), pp. 1606-1615, https://doi.org/10.2320/matertrans.M2017012
- [16] 小島史男, "電磁超音波を用いた探傷の基礎と最新動向", 計測と制御, 第56巻11号, 2017 年11月, (2017), pp. 839-844, https://doi.org/10.11499/sicejl.56.839
- [17] Satish Tailor, Alexander G Rakoch, Alexandra A Gladkova, Phan Van Truong, Daria M Strekalina, Georgia Sourkouni, Manjunath S. Y., Toshiyuki Takagi, "Kinetic features of wear-resistant coating growth by plasma electrolytic oxidation", Surface Innovations, December (2017), https://doi.org/10.1680/jsuin.17.00054
- [18] Jun ISHIMOTO, "Vitrification of Biological Cells Using a Cryogenic Fine Solid Particulate Spray", Interdisciplinary Information Sciences, Volume 23 (2017), Issue 2, December (2017), pp.167-170, https://doi.org/10.4036/iis.2017.S.01
- [19] Yoshitake Nishi, Junya Ohkawa, Michael C. Faudree, Masae Kanda, Kaori Yuse, Daniel Guyomar and Haru-Hisa Uchida, "An Improved H2-Gas Pressure Operated LaNi5 Powder-Dispersed Polyurethane/Titanium 2-Layer Actuator with Reversible Giant and Rapid Expansion by Hydrogenation", Materials Transactions, Vol. 59, No. 1, January (2018), pp. 129-135, https://doi.org/10.2320/matertrans.M2017212
- [20] Sho Takeda, Hiroyuki Miki, Julien Fontaine, Hiroyuku Takeishi, Toshiyuki Takagi, "Role of MoS2 Addition in the Consolidation of Metal from Powder to Plate by the Compression Shearing Method at Room Temperature", Tribology Online, Vol. 13, No.1, February (2018), pp.15-19.
- [21] Naruya Tsuyuki, Anna Takahashi, Sagiri Takase, Daisuke Kitahara, Masae Kanda, Noriyuki Inoue, Kaori Yuse, Daniel Guyomar, Akira Tonegawa, Yoshihito Matsumura and Yoshitake Nishi, "Effect of 100 keV Class Electron Beam Irradiation on Impact Fatigue Behavior of PZT Ceramics", Materials Transactions, Vol. 59, No. 3, March (2018), pp. 450-455, https://doi.org/10.2320/matertrans.M2017250

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [22] Jun Ishimoto, Toshinori Sato and Alain Combescure, "Computational study for dynamic crack propagation in pressure vessel wall with hydrogen leakage using coupled particle and Euler method", The Fifth International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures, Nantes, France, Oral Presentation, MS5, June 14, (2017).
- [23] Atsuki Komiya and Sébastien Livi, "Experimental Study on Active Control of Protein Transport Phenomena by Membrane", The 28th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-28), Paradeniya, Sri Lanka, Oral presentation, September 24, (2017).
- [24] Masataka Nakauchi, Takuya Mabuchi, Takuma Hori, Yuta Yoshimoto, Ikuya Kinefuchi, Hideki Takeuchi, Takashi Tokumasu, "Gas-Surface Interaction Study of Oxygen Molecules on Ionomer Surface in Catalyst Layer", 232nd ECS MEETING, MD, U.S,. Oral Presentaion, 1377, October 1, (2017).
- [25] Jun Ishimoto, "Computationally Assisted Study for Cryogenic Fine Particulate Spray in Application to Photoresist-Removal Cleaning Technology", The 26th Surface Cleaning Users Group Meeting, Cleaning Technology Symposium (KSCUGM), Ansan, Korea, Oral Presentation, October 26, (2017).
- [26] K. Ogawa, K. Lee, Y. Ichikawa, K. Sato, "Functionally Graded Thermal Barrier Coatings Fabricated by Cold Spray Technique", The 12th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA, Oral Presentation, May 24, (2017).
- [27] T. Uchimoto, T. Takagi, T. Matsumoto, G. Dobmann, "Evaluation of Degradation of Structural Materials by Magnetic Incremental Permeability Method", 14th International Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing, Xi' an, China, Oral Presentation, Invited, EB1015, June 22, (2017).
- [28] Kalpakli Vester, Y. Nishio and P. H. Alfredsson, "Unraveling tumble and swirl in a unique water-analogue engine model", 12th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Busan, Korea, June 18-22, (2017).
- [29] Yuta Yamamoto, Yushin Hara, and Kanjuro Makihara, "Sensor-Less Control for Switch-Regulated Energy Harvester Using Alternate State-Estimators", The 31st International Symposium on Space Technology and Science, Matsuyama, Japan, Oral Presentation, ISTS-2017-q-09, June 9, (2017).
- [30] Yuya Kurihara, Takuya Mabuchi, Takashi Tokumasu, "Molecular Analysis of Oxygen Permeation Properties in Ionomer on Pt Surface in PEMFC", 6th EUROPEAN PEFC & Electrolyser Forum, Lucerne, Switzerland, Poster Presentation, B0807, July 6, (2017).
- [31] Masataka Nakauchi, Takuya Mabuchi, Takuma Hori, Yuta Yoshimoto, Ikuya Kinefuchi, Hideki Takeuchi, Takashi Tokumasu, "Molecular Simulations of Oxygen Scattering and Surface Diffusion on Ionomer Surface", 6th EUROPEAN PEFC & Electrolyser Forum, Lucerne, Switzerland, Oral Presentation, B0804, July 6, (2017).
- [32] Hiroyuki Kosukegawa, Ryoichi Urayama, Toshiyuki Takagi, "Characterization of Laminated Structure on Scarfed Slope of CFRP by Utilizing Eddy Current Testing", The 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Chamonix Mont Blanc, France, Oral Presentation, 436, September 4, (2017).

- [33] Takanori MATSUMOTO, Tetsuya UCHIMOTO, Toshiyuki TAKAGI, Gerd DOBMANN, Satoru ABE, Hideki YUYA, "Electromagnetic NDE of plastic deformation in carbon steels by incremental permeability method", The 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Chamonix Mont Blanc, France, Poster Presentation, P-NDE-3:6, September 5, (2017).
- [34] Tetsuya UCHIMOTO, Toshiyuki TAKAGI, Mitsuo HASHIMOTO, Ziyue XU, Yanzhen ZHAO, "Length Sizing of Cracks in Ferromagnetic Steels by Transmitter-receiver Type Eddy Current Testing Probe by Transmitter-receiver Type Eddy Current Testing Probe", The 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Chamonix Mont Blanc, France, Oral Presentation, 453, September 5, (2017).
- [35] Hongjun SUN, Ryoichi URAYAMA, Mitsuo HASHIMOTO, Fumio KOJIMA, Tetsuya UCHIMOTO, Toshiyuki TAKAGI, "Novel Electromagnetic Acoustic Transducer for Measuring the Thickness of Small Specimen Areas", The 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Chamonix Mont Blanc, France, Oral Presentation, 246, September 5, (2017).
- [36] Fumio Kojima, "Inverse Problem for Internal Temperature Distribution of Metal Products using Pulser-Receiver EMAT", The 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2017), Chamonix Mon Blanc, France, Oral Presentation, September 5, (2017).
- [37] Bhaawan GUPTA, Benjamin DUCHARNE, Gael SEBALD, Tetsuya UCHIMOTO, Yoann HEBRARD, "From magnetic Barkhausen noise to quasi-static vector Preisach hysteresis model distribution", The 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Chamonix Mont Blanc, France, Oral Presentation, September 4, (2017).
- [38] Benjamin DUCHARNE, Bhaawan GUPTA, Gael SEBALD, Tetsuya UCHIMOTO, "Dynamic hysteresis lump model including fractional operators for the incremental permeability nondestructive testing", The 18th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Chamonix Mont Blanc, France, Oral Presentation, September 4, (2017).
- [39] Tetsuya Uchimoto, Kazuhiro Nakajima, Toshiyuki Takagi, Eiichi Sato, Mitsuharu Shiwa, Shusuke Hori and Masao Takegoshi, "Eddy Current Testing of Copper Alloy Combustion Chamber of Rocket Engine", The 22nd International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Saclay, France, Oral Presentation, 93, September 8, (2017).
- [40] Hiroyuki Kosukegawa, Rie Yamada, Noriyuki Sato, Keisuke Ura, Toshiyuki Takagi, "Nondestructive Evaluation of Hardening Degree of Epoxy Resin in CFRP with Eddy Current Testing", The 22nd International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Saclay, France, Oral Presentation, 68, September 7, (2017).
- [41] Takanori Matsumoto, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Gabor Vertesy, Hidehiko Kage and Gerd Dobmann, "Nondestructive Evaluation of Mechanical Properties of Cast Iron by Magnetic Incremental Permeability Method", The 22nd International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Saclay, France, Poster Presentation, 66, September 8, (2017).
- [42] Hongjun Sun, Ryoichi Urayama, Mitsuo Hashimoto, Fumio Kojima, Tetsuya Uchimoto,

Toshiyuki Takagi, "Continuous Wave and Pulse Wave Electromagnetic Acoustic Res-onance for the Measurement of Pipe Wall Thickness", The 22nd International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Saclay, France, Oral Presentation, 49, September 7, (2017).

- [43] Fumio Kojima, Naoyuki Kubota, "Void Detection of Steel Products for Process Monitoring System using Electromagnetic Acoustic Transducer", The 22th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Sacley, France, Oral Presentation, September 8, (2017).
- [44] Toshiyuki Takagi, Hiroyuki Kosukegawa, Tetsuya Uchimoto, "Simulation and Measurement of Electromagnetic Nondestructive Testing for Carbon Fiber Reinforced Plastic", The 18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Lodz, Poland, Oral presentation, Invited(IL1), September 14, (2017).
- [45] Shigeru Obayashi, "Multi-Objective Design Exploration Fusion of Optimization and Data Mining," EUROGEN2017, Madrid, Spain, Plenary Lecture, September 15, (2017).
- [46] Yuta MURAMOTO, Vincent FRIDRICI, Philippe KAPSA, Gaëtan BOUVARD, Fredrik Lundell, Makoto OHTA, "Drilling of PMMA-based bone biomodel: effect of additives", The 6th World Tribology Congress, Beijing, China, Oral Presentation, September 22, (2017).
- [47] Toshiyuki Takagi, Hiroyuki Kosukegawa, Tetsuya Uchimoto, "Functional Fiber-reinforced Plastic and Nondestructive Evaluation for Advanced Maintenance", The 3rd Symposium on SIP Innovative measurement and analysis for structural materials (SIP-IMASM 2017) and TIA-Fraunhofer workshop, Tsukuba, Japan, Oral Presentation, Invited, October 4, (2017).
- [48] Hidemasa Takana, Yusuke Takeda and Fredrik Lundell, "Control of Cellulose Nanofibril Alignment and Rotary Diffusion in Flow by Alternative Electric Field", The 4th International Cellulose Conference 2017 (ICC 2017), Fukuoka, Japan, Poster Presentation, P-070, October 18, (2017).
- [49] Gerd Dobmann, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Takanori Matsumoto, "R&D to NDT-Tasks in Energy-relevant Pipeline-Steel-Applications - Sensitive Detection of Residual Strain and a special View on the Qualification Procedure to a Hardness-Spot Detection Technique", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-1, November 1, (2017).
- [50] Shejuan Xie, Mingming Tian, Zhenmao Chen, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, "A Signal Separation Method for Hybrid PECT/EMAT Nondestructive Testing Method Based on Wavelet Analysis", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-2, November 1, (2017).
- [51] Jun Ishimoto, Toshinori Sato, Alain Combescure, "Coupled Computing of Hydrogen Leakage with Crack Propagation Using Hybrid Particle and Euler Method", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-3, November 1, (2017).
- [52] Xiaojuan Xu, Hongli Ji, Jinhao Qiu, Toshiyuki Takagi, "Interlaminar Electrical Resistance and its Influence on Eddy Currents in CFRP Composites", Fourth

International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-4, November 1, (2017).

- [53] Hiroyuki Kosukegawa, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Gerd Dobmann, "Advanced Maintenance Technique on CFRP - Eddy Current Testing and Functionalization in Mechanical/electromagnetic Properties -", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-5, November 1, (2017).
- [54] Hidemasa Takana, Yusuke Takeda, Mengfei Guo, Christophe Brouzet, Nitesh Mittal, Fredrik Lundell, "Experimental and Numerical Study on Control of CNF Alignment by Alterative Electric Field", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-6, November 1, (2017).
- [55] Li Qian, Hongguang Liu, Kan Bian, Kongjun Zhu, Ke Xiong, "Nonlinear Deformation Behavior of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators under DC Voltages Applied", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-7, November 1, (2017).
- [56] Hiroyuki Miki, Koki Tsuchiya, Eijiro Abe, Sho Takeda, Makoto Ohtsuka, Marcel Gueltig, Manfred Koh, Toshiyuki Takagi, "Improvement in Magnetic Properties of Metamagnetic Shape Memory Alloy Processed by Compression Shearing Method at Room Temperature", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-8, November 1, (2017).
- [57] Kongjun Zhu, Juntao Hu, Jing Wang, Ke Xiong, Jinhao Qiu, "Preparation and Properties of Polyvinylidene Fluoride / Nd-doped BaTiO3 Nanocomposites", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-9, November 1, (2017).
- [58] Ai Suzuki, Ryuji Miura, Nozomu Hatakeyama, Jean-Yves Cavaille, Gildas Diguet, Gael Sebald, "Multiscale Modeling of Electro-mechanical Coupling in Electroactive Polymers", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-10, November 1, (2017).
- [59] Kesavan Ravi, Olivier Lame, Kazuhiro Ogawa, Jean-Yves Cavaille, Tiana Deplancke, Chrystelle Bernard, "Inter-Particle Sintering of UHMWPE-FNA Nano-Composites Under Different Interfacial Loading Conditions", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-11, November 1, (2017).
- [60] Yukie Ishizawa, Kenji Inaba, Ryuji Miura, Ai Suzuki, Naoto Miyamoto, Nozomu Hatakeyama, Akira Miyamoto, Kazuhiro Ogawa, Chrystelle Bernard, Jean-Yves Cavaille, Olivier Lame, Kesavan Ravi, "Molecular Simulation Analysis for Adhesion Mechanisms Involved in Polyethylene Processed by Cold Spray", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-12, November 1, (2017).
- [61] Stéphanie Lafon-Placette, Julien Fontaine, Maria-Isabel De Barros-Bouchet, Christophe Héau, "Tribochemistry of Hydrogen-Free DLC Coatings in Base Oil: the Origin of Wear", Fourth International Symposium on Smart Layered Materials and

Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS16-13, November 1, (2017).

- [62] G. Sebald, B. Ducharne, B. Gupta, T. Uchimoto, T. Takagi, "Fractional Order Derivative for Magnetic Hysteresis Dynamics and Interpretation of Non-Destructive Testing Techniques", Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Japan, Poster Presentation, CRF-8, November 2, (2017), pp.16-17.
- [63] G. Sebald, M. Nakano, M. Lallart, T. Tian, G. Diguet, J. Y. Cavaille, "Experimental Testing of Pseudo-Villari Effect in Magnetorheological Elastomers", Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Japan, Poster Presentation, CRF-9, November 2, (2017), pp.18-19.
- [64] Y. Muramoto, G. Bouvard, V. Fridrici, P. Kapsa, F. Lundell, M. Ohta, "Research of High-Speed Contact with Medical Devices", Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Japan, Posterl Presentation, CRF-40, November 2, (2017), pp.82-83.
- [65] J. Ishimoto, A. Combescure, "Coupled Analysis of High-Density Hydrogen Safety Management", Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Japan, Posterl Presentation, CRF-48, November 2, (2017), pp.98-99.
- [66] T. Takayama, H. Kosukegawa, T. Takagi, "Theoretical Consideration on Mechanical Properties of Nanoparticle Dispersed Carbon Fiber Reinforced Plastic", Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Japan, Posterl Presentation, CRF-57, November 2, (2017), pp.116-117.
- [67] S. Miyauchi, T. Hayase, A. A. Banaei, J. C. Loiseau, L. Brandt, "Three-Dimensional Numerical Analysis for an Erythrocyte Behavior near a Wall in a Fluid under an Inclined Centrifugal Force: The Effect of Bending Stiffness of an Erythrocyte on the Deformation", The Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, Japan, Poster Presentation, CRF-66, November 2, (2017), pp.138-139.
- [68] Xiaobo Han, Naoya Sakamoto, Noriko Tomita, Hui Meng, Masaaki Sato, Makoto Ohta, "The Influence of TGF- β 1 from ECs on SMC MMP Productions under Shear Stress using a Co-Culture Model", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS4-6, November 3, (2017).
- [69] Hongjun Sun, Ryoichi Urayama, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Lalita Udpa, "Influence of Signal Frequency on Thickness Measurement by Electromagnetic Acoustic Transducer", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Poster Presentation, OS17-3, November 1, (2017).
- [70] Sho Takeda, Hiroyuki Miki, Julien Fontaine, Matthieu Guibert, Takamichi Miyazaki, Toshiyuki Takagi, "Interparticle Bonding of Metal Powder under Repetitive Unidirectional Friction Force", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Poster Presentation, OS17-5, November 1, (2017).
- [71] Satoshi Yamazaki, Hiroyuki Kosukegawa, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, "Investigation of Electromagnetic Properties and Morphology of Cobalt-containing Diamond-like Carbon Aiming for Magnetic Sensor", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Poster Presentation, OS17-6, November

1, (2017).

- [72] Yuki Tokita, Tetsuya Uchimoto, Yoshikazu Ohara, Toshiyuki Takagi, "Evaluation of Superconducting Electromagnetic Acoustic Transducer with Large Amplitude", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Poster Presentation, OS17-9, November 1, (2017).
- [73] Hiroyuki Furuya, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Mitsuo Hashimoto, Eiichi Sato, Mitsuharu Shiwa, Shusuke Hori, Masao Takegoshi, "Application of Multi-frequency Eddy Current Testing to Crack Detection in Rocket Engine Combustion Chambers", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Poster Presentation, OS17-10, November 1, (2017).
- [74] Takanori Matsumoto, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Gerd Dobmann, Shinji Oozono, Hideki Yuya, "Investigation of Magnetization Methods to Evaluate Residual Strain in Carbon Steel by Eddy Current Magnetic Signature Method", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Poster Presentation, OS17-13, November 1, (2017).
- [75] Riona Hayashi, Hiroyuki Kosukegawa, Toshiyuki Takagi, "Improvement of the Interfacial Shear Strength of Surface Modified Carbon Fiber and Polymer Blend", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Poster Presentation, OS17-16, November 1, (2017).
- [76] Y. Kiso, H. Kosukegawa, R. Urayama, T. Uchimoto, T. Takagi, L. Udpa, "Eddy Current Evaluation of Ground Laminated Structure of CFRP Aiming for Automation of Scarf Repair", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Poster Presentation, OS17-17, November 1, (2017).
- [77] S. Nagai, S. Takeda, H. Miki, T. Miyazaki, H. Kosukegawa, T. Takagi, "Grain Refined Al Thin Plate Fabricated by Compression Shearing Method at Room Temperature", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Poster Presentation, OS17-18, November 1, (2017).
- [78] M. Guo, H. Takana, "Computational Simulation on Electrostatic Alignment of Cellulose Nano-fibrils in Flow", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Poster Presentation, OS17-24, November 1, (2017).
- [79] H. Yamamoto, T. Uchimoto, T. Takagi, Y. Ohara, "Elucidation of Change in Eddy Current Testing Signals of Fatigue Cracks by Heating", Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Poster Presentation, OS17-61, November 2, (2017).
- [80] Siyuan Gao, Kazuhiro Ogawa, "Development of Laser Pre-treatment technique for improvement of deposition efficiency of Cold Spray Coatings", 8th Asian Thermal Spray Conference (ATSC 2017), Jeju, Korea, Oral Presentation, Nov. 6, (2017).
- [81] Kazuhiro Ogawa, "New Concepts of Thermal Barrier Coatings", 8th Asian Thermal Spray Conference (ATSC 2017), Jeju, Korea, Oral Presentation, Nov. 6, (2017).

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

他 68件

Multiple Collaborative Research Project		
Project code	J17R003	
Subject area	Environment and energy	
Research period	April 2017 ~ March 2018	
Project status	3rd year	

Investigation of Inhomogeneous Mixing of Plasma Species in the Hybrid-Stabilized Argon-Water Arc Discharge for Subsonic-Supersonic Quasi-Laminar Plasma Flow

Jiří Jeništa*†, Hidemasa Takana**, Satoshi Uehara**, Hideya Nishiyama**†† Milan Hrabovský*, Shiu-wu Chau***, Anthony B. Murphy****†† *Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i., Czech Republic **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***National Taiwan University, Taiwan ****CSIRO Materials Science and Engineering, Australia †Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Numerical simulation of 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

Further elaboration of the existing numerical code and its necessary testing, involving, for example, investigation of the peculiar velocity maximum shift for currents higher than 400 A or the influence of boundary conditions on behavior of plasma plume.

3. Achievements

1) Preparation and submission of a paper "Modeling of inhomogeneous mixing of plasma species in argon-steam arc discharge" to Journal of Physics D: Applied Physics. The paper was issued on-line in January 2018.

2) Testing the performance of the numerical code for different grid sizes, especially in the radial direction. Motivation for this task was the appearance of a high numerical viscosity on relatively rare grids used for testing and tuning purposes with high aspect ratios (i.e., when the distance between the neighboring grid points in one direction is much larger than in the other direction). In a consequence, physically unrealistic peaks of temperature emerged in a time-fluctuating plasma plume in the outlet region showing the Kelvin-Helmholtz vortex sheet structure with the main plasma flow directed perpendicularly to the larger distance between the neighboring grid points. We finally suppressed this unwanted numerical phenomenon by decreasing the aspect ratio and finding the appropriate grid size.

3) Checking the influence of the radial velocity boundary condition on the level of plasma plume fluctuations at the plasma outlet.

4) Elucidation of the problem of double-peak velocity at the arc axis near the exit nozzle for currents higher or equal to 400 A. At first it was assumed that plasma transport and thermodynamic properties, masses and combined diffusion coefficients depend in one case on temperature, pressure and argon mole fraction, while in the other case on temperature and pressure only. The results of simulation did not confirm disappearance of the double-peak velocity profile. It was finally confirmed that the velocity profile with double peaks in the downstream region can appear or disappear depending on the upstream argon mole fraction profile boundary condition, unknown from experiments.

4. Summaries and future plans

1) Further clarification of the problem of double-peak velocity at the arc axis for currents higher or equal to 400 A through different numerical tests: Influence of the argon mole fraction profile at the inlet boundary on the velocity and temperature distributions in the outlet region. Possible extension of the existing calculation domain in the argon-inlet upstream region with the aim to obtain more realistic condition for the argon mole fraction profile in the vortex-stabilized arc section.

2) Improvements of the numerical model (for example: taking the radial current density component and the induced axial magnetic field into account; the way of calculation of pressure and temperature from the energy and state equations).

3) Calculations of the inhomogeneous model for currents higher than 400 A and argon mass flow rates between 15 and 40 slm.

4) Comparison of the results with more recent experiments, based on the optical emission spectroscopy measurements of ArI, OI and HI lines, obtained at IPP (Institute of Plasma Physics AS CR, v.v.i) in Prague. Radial profiles of argon mole fraction at the outlet will be evaluated from experiments and they will be compared with the calculations carried out within this project.

5) Possible further extension of the inhomogeneous model, including the entrainment of surrounding air into the plasma discharge.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, <u>M. Bartlová</u>, <u>V. Aubrecht</u>, <u>A. B. Murphy</u>: Modeling of inhomogeneous mixing of plasma species in argon-steam arc discharge, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 51, no. 4, (2018), 045202 (22pp). On-line: <u>https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa9f6f</u>
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [2] J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, <u>M. Bartlová</u>, <u>V. Aubrecht</u>, <u>A. B. Murphy</u>: On the effect of inhomogeneous mixing of plasma species in argon-steam arc discharge, *Book of Extended Abstracts*, 23th Int. Symp. on Plasma Chemistry (ISPC 23), 30. 7. 4. 8. (2017), Montréal, Canada. On-line: http://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc23/301.pdf
- [3] J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, <u>A. B. Murphy</u>, <u>M. Bartlová</u>, <u>V. Aubrecht</u>: Effect of Inhomogeneous Mixing of Plasma Species on the Properties of Argon–Steam Arc Discharge, *Proceedings of the 17th Int. Symp. on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 194-195.
- [4] J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, <u>A. B. Murphy, M. Bartlová</u>, V. <u>Aubrecht</u>: Numerical Modeling of Diffusion of Plasma Species in Argon-Water Arc Discharge: Comparison Between Inhomogeneous and Homogeneous Mixing Assumptions, *Proc. 14th Int. Conf. on Fluid Dynamics* (ICFD2017), November 1-3, (2017), Sendai, Japan, USB Flash Disc, pp. 612-613.
- 3) Patent, award, press release etc.

(Lectures)

14th Int. Conf. on Fluid Dynamics (14th ICFD), November 1-3, 2017, Sendai, Japan. Title: Numerical Modeling of Diffusion of Plasma Species in Argon-Water Arc Discharge: Comparison Between Inhomogeneous and Homogeneous Mixing Assumptions.

Multiple Collaborative Research Project		
Project code	J17R004	
Subject area	Fundamentals	
Research period	April 2017 ~ March 2018	
Project status	2nd 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 vortical structures which appear in the nature and engineering applications we should deal with vortices which have continuous vorticity distribution like Gaussian vortices. The effects of buoyancy are also important in astrophysical and geophysical flows. Thus the research plan of the project consists of the following three sub-projects. (1) Nonlinear Dynamics of Vortex Rings with Continuous Vorticity Distribution

The destabilization of the vortex rings with continuous vorticity distribution is studied by DNS. In viscous flows the core radius of vortex rings grows as time proceeds to break the resonance condition for parametric instability; as a result the unstable growth saturates depending on the initial energy of the disturbance. We investigate how nonlinear evolution of vortex rings depends on the initial disturbance and the Reynolds number and clarify whether the vortex rings break up after becoming turbulent or turbulent vortex rings survive.

(2) Nonlinear Dynamics of Vortex Rings with Variable Density

Vortex rings having interface across which density has a jump is studied by linear stability analysis. A criterion for instability is derived based on the energetics of the waves on vortex rings; the theory developed by Hirota & Fukumoto (J. Math. Phys., 2008) is extended by taking account of density distribution and surface tension. (3) Nonlinear Dynamics of Helical Vortices

The stability of helical vortices is studied by DNS. Characteristics of linear stability including resonance condition and growth rate are compared to theory so that the effects of torsion and dependence on the Reynolds number are elucidated.

2.2 Results

2.2.1 Nonlinear Dynamics of Vortex Rings with Continuous Vorticity Distribution

Prior to DNS, numerical linear stability analysis is performed to investigate competition between curvature and elliptic instabilities. We consider a vortex ring in cylindrical coordinates (r, θ, z) , where the z axis coincides with the axis of symmetry of an undisturbed vortex ring. A numerical method with high accuracy is developed to solve the incompressible Navier-Stokes equations. The base flow is a vortex ring with swirl (axial flow) also obtained numerically solving axisymmetric equations starting with Gaussian distributions of axial vorticity and velocity. Then the linearized equations for disturbances are integrated for sufficiently long time starting with randomized initial conditions; if there is an unstable mode, the most unstable mode is obtained. We impose N_s -fold symmetry in θ : $f(r, \theta + 2\pi / N_s, z)=f(r, \theta, z)$. The linearized Navier-Stokes equations are decomposed into independent equations for Fourier modes in θ , which reduces numerical costs. The axial wavenumber k should satisfy $k = \varepsilon N_s$, where ε is the ratio of the core to ring radius of the vortex ring. The Reynolds number is set to $Re = \Gamma/(2\pi v) = 10^4$. The magnitude of swirl is set to $W = 0.638 v \theta + max/v_{rot, max} = 0.2$.

In figure 1 growth rate is plotted against axial wavenumber. For $\varepsilon = 0.1$ (left figure) both curvature instability (triangles) and elliptic instability (circles) appear as narrow bands since these instabilities are due to parametric resonance. Three modes of curvature instabilities found by Blanco-Rodríguez and S. Le Dizès (2017) are identified: $(m,m+1;[1_A,1_B])=(-1,0;[1,3])$ at k=1.16, (-1,0;[1,4]) at k=1.30 and (-1,0;[2,4]) at k=1.85. Several modes of elliptic instability are also identified, among which the (-2,0;[2,2]) mode at k=3.33 has the largest growth rate. For $\varepsilon = 0.18$ (right figure), on the other hand, the instability bands widen and at least one unstable mode exists at almost all values of k. The curvature instability mode (-1,0;[2,4]) survives but the other two found for $\varepsilon = 0.1$ are surpassed by the elliptic instability as the growth rates of the curvature and the elliptic instabilities are proportional to ε and ε^2 , respectively.



Figure 1: Growth rate plotted against axial wavenumber. Triangles: curvature instability, circles: elliptic instability. Re=10⁴, W=0.2. (Left) ε =0.1, (right) ε =0.18.

Next, we investigate nonlinear evolution of a destabilized vortex ring. Figure 2 shows time evolution of a vortex ring destabilized initially with curvature instability mode (-1,0;[2,4]). The Reynolds number is Re=5000. The left figure shows time evolution of energy decomposed in $\theta : E_n = \int |\mathbf{u}_n|^2 r dr dz$, $\mathbf{u}(r, \theta, z) = \sum_n \mathbf{u}_n (r, z) e^{i n Ns - \theta}$. Here Ns=10 is chosen to satisfy $k=\varepsilon Ns$ with k=1.84 and $\varepsilon =0.18$. At first the linear mode grows exponentially. It saturates at t=50 and decays. Then it grows again. This second growth is due to elliptic instability. The second growth also saturates at t=130. Shortly after this, however, the vortex ring goes into breakdown process as higher-order modes grow rapidly, small scale structures develop and the circulation is lost. The right figure shows structures of the vortex ring during the breakdown (t=160). Structures like bending waves are observed around the core of the vortex ring; they are surrounded by elongated vortex tubes.



Figure 2: Nonlinear evolution of disturbed vortex ring with axial flow. Re=5000, W=0.2. (Left) time evolution of mode energy; (right) iso-surface of magnitude of vorticity at t=160.

2.2.2 Contour dynamics

We have been investigating the nonlinear dynamics of a confined vortical region extending the contour dynamics technique presented by Zabusky et al. (1979). The advantage of the method is only the evolution of the boundary needs to be computed rather than a full DNS calculation. The technique was originally developed initially for 2D domains, but was subsequently extended to axisymmetric problems (see Pozrikidis 1986 and Shariff et al. 1989). We have been considering two extensions: first the role of buoyancy and second a formulation for contour dynamics with helical symmetry.

(1) Axisymmetric contour dynamics with buoyancy

We first consider a vortex ring with a density that differs from the environment's. The flow is assumed to be inviscid and incompressible. Buoyancy is included and both non-Boussinesq and Boussinesq (weak density jump) cases are considered. In both scenarios, a vortex sheet forms on the interface due to baroclinic generation of torque because of the density jump across the interface. The density difference is quantified by the Atwood number, A. As the density difference increases (A decreases), the interface forms an outcrop that rolls up. This is associated with the evolution of the vortex sheet and a singularity that begins to develop (Figure 3).



Figure 3: The evolution for A= 0.01, Ω = 1 and ST= 0 from t= 0–2.5 (Left) non-Boussinesq case; (Right) Boussinesq limit.

Surface tension is also included in our theoretical formulation. We find that surface tension delays the onset of the singularities but does not appear to prevent them altogether, and can also introduce numerical stiffness to the problem. We have used this formulation to further study for the motion of a vortex ring as the Atwood number and Weber number vary. The bulk motion is presented by calculating the centroid of vortical region. We see that the density difference magnifies the expansion rate and the translation of the buoyant vortex ring, but the surface tension has only a minimal effect on its bulk motion.



Figure 4: The evolution of centroid for different (Left) Atwood; (Right) Weber numbers.

(2) Helical symmetric case

A family of vortex equilibria was obtained by Lucas et al. (2009) in the case of helical symmetry. The nonlinear evolution problem has been studied using DNS calculation (see Delbende et al. 2012). However, a contour dynamics calculation has not been yet been developed. We have outlined a formulation for helical contour dynamics and started to develop a numerical scheme. Unlike the axisymmetric case, the major challenge here will be inverting the linear operator and finding its Green's function. This will probably need to be carried out numerically since a closed form does not seem attainable. While this means that the formulation is no longer strictly limited to computing quantities on the contour, it remains an exact solution of the Euler equations and hence of intrinsic interest.

2.3 Organized Session in ICFD2017

An organized session closely related to the present project was held in ICFD 2017 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 26 talks including two invited talks from Prof. Bartosz Protas and Prof. Mark Blyth.

3. Achievements

Vortical structures are important since they often determine the properties of incompressible flows. They are curved in general owing to self-induced velocity, interaction with other vortices and boundary conditions in the presence of rigid bodies. Therefore, by exploring the effects of curvature in vortex dynamics the present project would contribute not only to understanding the mechanisms of flow phenomena in a wide variety of areas but also to development of control method of these flows. In particular, it would be possible to stabilize or destabilize the wing-tip vortices generated by rotating wings by changing the geometry of the wing tips based on the instability mechanisms of curved vortices which have continuous vorticity distributions. Moreover, understanding nonlinear dynamics and transition to turbulence and thereby clarifying the turbulent structures near the wing tips and wakes are indispensable for improving the performance of the wings and reducing the aeroacoustic noises. The combined effects of curvature and density change are important in understanding and prediction of vortices in aeronautical, astrophysical and geophysical flows.

This year the numerical method established last year was used to explore the linear stability of vortex rings with continuous vorticity distribution and nonlinear evolution. The numerical method for contour dynamics taking account of buoyancy was also established. 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. The linear stability of vortex rings with continuous vorticity distribution has been investigated in further detail using the numerical method developed last year. It is shown that the curvature instability can be dominant for thin vortex rings, while the elliptic instability is dominant nearly for all values of the wavenumber when $\varepsilon = 0.18$. Nonlinear evolution of the disturbance on vortex rings with continuous vorticity distribution was also studied. The process leading to the breakdown of the vortex ring

was clarified. The numerical method for contour dynamics taking account of buoyancy was also established.

In the third year the linear stability and nonlinear evolution of helical vortices will be studied by direct numerical simulation and contour dynamics. Detailed stability diagram and the process leading to turbulence are to be explored.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] Y. Hattori, M. Hirota, <u>S. Dizes</u>, <u>T. Leweke</u>, <u>S. G. Llewellyn Smith</u>, <u>Y. Fukumoto</u>: Instability and Nonlinear Dynamics of Curved Vortices, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 192-193.
- [2] Yuji Hattori, <u>Francisco J. Blanco-Rodríguez</u>, <u>Stéphane Le Dizès</u>: Nonlinear Evolution of Destabilized Vortex Ring with Axial Flow, *IUTAM Symposium on Dynamics and Topology of Vorticity and Vortices*, June 13 – 16, (2017), Marseille, France.
- [3] 服部裕司, <u>F. Blanco-Rodriguez</u>, <u>S. Le Dizes</u>: 軸流をもつ渦輪の不安定化過程, 日本物 理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 盛岡, (2017).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Multiple Collaborative Research Project		
Project code	J17R005	
Subject area	Environment and energy	
Research period	April 2017 ~ March 2018	
Project status	1st year	

Link between Tracer and Microseismic Analysis to Comprehensive Understanding of Hydraulic Feature of Fractured Geothermal Reservoir

Anna Suzuki *†, Roland N. Horne **††

Michael Fehler ***, Yusuke Mukuhira*,***

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Department of Energy Resources Engineering, Stanford University

*** Earth Resources Laboratory, Massachusetts Institute of Technology

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Geothermal energy that is widely available in US and Japan would provide sustainable energy systems. However, the lack of understanding of the hydraulic properties in the geothermal reservoir leads to large risks for the development and management. Generally, tracer testing has been conducted by monitoring the fluid flow between the injection well and the production well to obtain the hydraulic properties between the two wells. On the other hand, micro seismic monitoring observe fracture creation due to water injection and water movement to extract fracture properties (i.e., position, number, scale, etc.) in the whole reservoir. In this way, both are measurement methods performed on different objects with completely different measurement principles and techniques and try to elucidate the hydraulic properties from each limited information. In this research, a new approach integrating tracer and microseismic analyses to evaluate comprehensive hydraulic properties is proposed for designs of sustainable geothermal development. The results from tracer testing are influenced on connectivity of the fracture networks that can be apparent in micro seismic analysis. Both results should have correlations between each other. Our approach would not only improve the reliability of the hydraulic properties obtained from both but lead to an understanding of more comprehensive hydraulic properties.

2. Details of program implement

Overview of this study is shown in Figure 1. We use tracer response curves and microseismic data obtained from the geothermal EGS site. Tracer and microseismic data will be analyzed separately. The applicant (Suzuki) is in charge of tracer analysis, and the MIT group (Mukuhira) is in charge of microseismic analysis.

2.1. Tracer analysis

Tracer response curves at production wells are analyzed to determine flow rate and pore volume at each flow path, and effective heat transfer areas are optimized by short-term thermal response curves from the same production wells. The estimation method was validated by comparing with numerical simulation results [2][3]. The estimation results show good accuracies of the effective heat transfer areas in the numerical simulation. This method was applied to data from the Balcova geothermal field[4]. The estimated heat transfer areas were reasonable.

2.2. Microseismic data analysis

Because microseismicity is caused by injected fluid of hydraulic stimulation, the hypocenter of microseismicity provides the information of fracture where its permeability has been enhanced by shear slip. Spatio-temporal distribution of microseismicity can offer the fracture system of the reservoir. Here, we will use the microseismic information of hydraulic stimulation and extract the hydraulic parameter between the injection and production well, where tracer test was conducted afterwards. We will infer the existing fracture density between injection and production well and the orientation and stress state of those fractures. In addition to these analyses of each microseismic events, we also will infer macroscopic permeability tensor from time series hypocenter distribution of microseismic events, and 3-D shape of the microseismic cloud.



Figure 1: Overview of this study.



Figure 2: Schematic of flow path model.



Figure 3: (a) Estimated results of fracture surface area. The color difference shows each surface area for each flow path. The total surface area is the sum of each surface area. The black line describes the objective function (i.e., fitting errors of temperature decline curves). (b) Fitting curves in the case of six flow paths in the flow path model, which gives the lowest objective function in (a).

3. Achievements

We attempted to analyze using data from Soultz field in France, but because the temperature data was insufficient, we did not reach the analysis. Therefore, we shifted to using data of Fenton hill and reacquired the data. Fenton Hill is a field that Professor Mike Feller (MIT) has been analyzing for many years. We organized its findings.

We also held a research seminar in terms of this project and deepened the discussion. Especially, we invited Dr. Ishibashi from AIST to the seminar, and were able to proceed active discussion. Dr. Ishibashi will participate in this project from this year.



Figure 4: Field data from Fenton Hills: (a) thermal breakthrough curves and (b) tracer response results.

4. Summaries and future plans

Current geological developments have studied in each field and technology independently. Comprehensive analyses and interpretations would achieve a novel breakthrough in the geoscience. The applicant (Suzuki) and Professor Horne developed a mass transport model in heterogeneous media that succeeded to analyze tracer responses in fractured reservoirs. They recently conducted tracer test by using 3D printed fracture networks and clarify correlations between fractures and hydraulic properties. This is the world's first research to verify experimental results that was not able in previous studies.

On the other hand, the MIT group (Fehler and Mukuhira) succeeded to integrate

crustal stress into micro seismic analysis first in the world and extract hydraulic properties by using micro seismic data. The Stanford group has been developed an integrated model for description of dynamic behavior. The collaborations among three research groups are most suitable for integrating tracer and micro seismic data analyses.

Also, since this year, Dr. Ishibashi (AIST) and Dr. Kang (KIST) will participate in the meeting, which will enable us to expect multifaceted discussions. Dr. Ishibashi has been doing AE measurement and flow experiments in a laboratory experiment using rocks, and it is related to our research target. Dr. Kang has been progressing pioneering research in the field of inverse analysis using field data of groundwater, They would provide great discussion.

The expected outcome of this research is contribution to the design of sustainable geothermal energy extraction system. The findings obtained in this research can contribute directly to geothermal energy production planning, position determination of production wells and reduction wells, and maintenance capacity planning of reservoirs.

- 5. Research results
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- A. Suzuki, <u>Y. Mukuhira</u>, <u>R. N. Horne</u>, and <u>M. C. Fehler</u>: Link between Tracer and Microseismic Analysis to Comprehensive Understanding of Hydraulic Feature of Fractured Geothermal Reservoir, *The fourteenth International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, Japan, November 1-3, (2017).
- [2] A. Suzuki: Estimation of Fracture Surface Area Based on Tracer and Temperature Histories, *Geothermal Resources Council Transactions*, 41, (2017), 2865-2879.
- [3] 鈴木杏奈: トレーサー・熱応答を用いたき裂表面積の推定,日本地熱学会平成 29 年学 術講演会,Hakodate, Japan, October 18-20, (2017).
- [4] F. Ikhwanda, A. Suzuki, and T. Hashida: Development of Numerical Methods for Estimating Fluid Flow Path in Fractured Geothermal Reservoir, *The 43rd Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, USA, February 12-14, (2018).
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Multiple Collaborative Research Project		
Project code	J17R006	
Subject area	Environment and energy	
Research period	April 2017 ~ March 2018	
Project status	2nd year	

Filtrational Gas Combustion in Porous Media and Micro Combustion

Sergey Minaev*†, Kaoru Maruta**†† Roman Fursenko***††, Alexander Kirdyashkin ****††, Vladimir Gubernov****†† *Far-Eastern Federal University, Vladivostok, Russia **Institute of Fluid Science, Tohoku University *** ITAM SB RAS, Novosibirsk, Russia **** Department Structural Macrokinetics, TSC, Russia ***** Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia † Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

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 project plan of the first year has been realized in the course of collaborative research performed by four Russian teams and team from IFS. The participants discussed current scientific problems related with project at the international conferences and workshops held in Russia (Ginsburg centennial conference on physics, Lebedev Institute, Moscow May29-June3, 2017; 9th International seminar on flame structure, 10-14 July, 2017, Novosibirsk; Workshop on Dynamics and Structures of Combustion Waves, 23-28 October 2017, Vladivostok) and ICFD 2017 conference held in Japan. The on-line seminars using internet were organized for discussion and approbation of the scientific results obtained by all teams involved in the project. The visits of young Russian researchers in Energy Dynamics Lab of IFS Tohoku University were organized for conducting of experimental works related with project.

3. Achievements

The following results were obtained by team from **Far-Eastern Federal University** (responsible member Prof. Sergey Minaev) in collaboration with other teams 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. The combustion wave stabilization under the surface of porous body, flame "anchoring", origin of nose and other effects require new approaches. It was proposed to treat porous medium as a set of micro channels [1]. The simplest representation of a porous matrix may be a system of parallel plates between which the gas combustion occurs. In this case the problem can be reduced to the consideration of interacting flames in straight micro channels with different diameters. The more complex discrete model was analyzed too and the simulations within both 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 two-temperatures model of filtrational gas combustion.

2) The new configuration of slot-jet burners was proposed and tested in experiments [2]. The new type burner allows investigation of stretched flames structure at very low flow rates compare with conventional counter current burners at normal gravity conditions. 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 and isolated flame tubes [2], [3], [6]. 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 [3]. The obtained theoretical results are in good agreement with available experimental data.

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 with prescribed flow field. 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. These conclusions qualitatively agree with experimental observations of the ignition in the turbulent flow and were predicted for the first time within proposed model [7].

4) A detailed gas-phase kinetic model of inhibition of hydrocarbon-air flames by potassium compounds data has been developed [8]. To this end we analyzed the thermochemistry of K-containing species relevant to the combustion environment. The kinetic model was compiled from the data available in literature and additional reactions were considered. Using the suggested model, we analyzed the inhibition mechanism of potassium bicarbonate in methane-air flames, and inhibition and promotion effects of potassium-containing compounds It was shown that the flame inhibition performance of potassium-containing compounds is approaching that of Fe-, Pb- and Cr-containing compounds.

The researchers from FEFU's team conducted also experimental research on the properties of coal-based briquettes [9]. These studies directed to the increase of efficiency of combustion of low-grade coals that is one of the most important and urgent problems of the energy sector. Thermo-physical characteristics of materials, compositions of thermal decomposition products and temperature ranges of the output of various combustible gases were investigated. Also, time parameters and CO concentrations during complete combustion of samples in a combustible gaseous medium (propane / butane-air mixture) were estimated.

The flame sampling molecular beam mass spectrometry (MBMS) has been used for the first time to study the detailed chemical kinetics in flames at elevated pressures [10]. The measurements of the mole fractions of different species including important flame intermediates in different flames are reported. The goal was to understand the effect of pressure on the species mole fractions in the flames of hydrogen, methane, and fuel blends like H2/CO, H2/CH4/C3H8 stabilized on a flat burner at the pressures from 1 to 5 atm. The investigation of the chemical flame structure of natural gas (methane is its main component) and syngas (as a rule a mixture H2/CO) mixed with air are needed for validation of chemical kinetic mechanisms. The new data find application in CFD simulations of the processes in the combustion chambers of the gas turbines and other energy conversions devices with gas combustion. These investigations of premixed flame at elevated pressures are important for both theoretical knowledge and technological applications such as verification of combustion kinetics, flame diagnostics, etc.

The following results were obtained by team from **ITAM SB RAS** (responsible member Dr. Roman Fursenko) in collaboration with other teams during first year of the project realization.

Combustion processes in various systems with heat recirculation were theoretically considered because they have large number of applications such as lean mixtures burning, reduction of pollutants emission, methane to hydrogen conversion, power engineering, etc. The representative example of meso-channels system with effective heat recirculation is a counter-current reactor. Such reactors consist of two thermally conjugated channels with oppositely directed gas flows, as shown in Fig.1. Previously, it was shown that thermal coupling between the channels results in superadiabatic flame temperature and in possibility of ultra-lean mixtures burning. In the course of project implementation two new problems related with meso-scale counter-current reactor were studied. The first problem is related with investigation of effect of heat extraction (used for useful work production) on the operation range



Fig. 1. Schemes of meso-scale counter-current reactors with heat extraction (a) and with endo- and exo-thermic reactions (b).

and on the flame stabilization in the reactor [11]. The second problem is fundamental studies of characteristic features of endo- and exo-thermic reactions thermally coupled in meso-scale reactors [12].

The scheme of the counter-current combustor with heat extraction is shown in Fig.1a. The heat extraction is modelled by heat sink with total heat flux Qout which is located in the plane of symmetry $\zeta = 0$. One-dimensional thermal-diffusion model was employed for theoretical and numerical studies of combustion processes in this system. Figure 2 demonstrates dependencies of flame position on inlet mixture velocity calculated for different intensities of heat extraction. The stable branches at Fig.2a are marked by solid symbols. In general, an increase in the intensity of heat extraction leads to a narrowing of the range of gas flow rates within which flame stabilization is possible. Numerical and theoretical investigations of system efficiency showed that the maximal efficiency is reached at the moderate gas velocities in the region corresponding to the middle of stable branch of the $\zeta f(V)$ curve (Fig.2). Thus, it is shown that operation range of micro burner with any energy

conversion device have to be estimated from solution of the conjugate problem taking into account effects of heat extraction on the flammability limits and flame stability.



Fig. 2. ζ_f (V) dependencies (Fig.2a) evaluated for different intensities of heat extraction. The largest heat extraction corresponds to the curve with green points and the curve with black points marks smallest heat extraction.

Counter-current system with thermally coupled endo- and exo-thermic reactions is schematically shown in Fig. 1b. In the top channel the exothermic reaction takes place while in bottom channel endothermic reaction occurs. For qualitative analysis of reaction waves behavior the one-dimensional thermal-diffusion model was proposed. It was found that at high velocities in the endothermic channel (V_2) the incomplete consumption of the reagent in this channel is observed. Contrary, at small V_2 reagent in the endothermic channel is completely consumed. We defined critical velocity in endothermic channel (V_{2c}) as the maximal V_2 for which the almost complete "reforming" (with incompleteness 0.01) can be achieved. This critical velocity corresponds to the optimal operating regime of the reactor characterized by maximal "reforming" rate with complete conversion. Dependencies of critical velocity in the endothermic channel (V_{2c}) on non-dimensional channels transverse size characterizing by non-dimensional Peclet number ($Pe=U_{bd_{1}}/D_{th,1}$) are shown in Fig.3. Red and blue curves in Fig.3 correspond to adiabatic and non-adiabatic cases, respectively. As is seen from Fig.3, the optimal channel size for which the maximal conversion efficiency is reached exists.



Fig. 3. Non-dimensional dependencies $V_{2c}(Pe)$ typical for adiabatic and non-adiabatic cases.

Interestingly that optimal channels transverse size is slightly less than quenching distance which is denoted in Fig.3 as Pecr. Results of numerical simulations showed that to gain maximum conversion efficiency the system size and flows characteristics should be appropriately chosen.

The following results were obtained by team from **Department Structural Macrokinetics** (responsible member Dr. Alexander Kirdyashkin) in collaboration with other teams during first year of the project realization.

This study has been motivated by the experimental research findings on temperature and radiative characteristics of cylindrical burners from Ni-Al alloy that reveal a significant improvement in the radiation efficiency of burners operated in the internal combustion mode [13]. It can be expected that in this combustion mode the flue gases will be characterized by low NOx concentrations. A cylindrical or spherical axis-symmetrical configuration provides natural stabilization of the combustion front inside the porous emitter due to a decrease in the filtration speed with the radius growth. Therefore, for the internal combustion mode, the size of the emitter pore channels can be optimized for low NOx emissions and a high radiation efficiency. The effects of cylindrical emitter pores structure on environmental and radiation characteristics of the burner for methane-air fuel mixture were experimentally studied.

The cylindrical emitters in the form of hollow cylinders with a hemispherical head, the diameter of 48 mm, total length of 76 mm, and the wall thickness of 8.5 mm with equal overall porosity of 55% but different structure parameters: conventionally fine-pored, medium-pored and coarse-pored (the average size of the frame elements is DE = 600, 1000 and 1350 µm respectively) have been studied.

It has been found that at firing rate of 160 and 260 kW/m2 burners with fine-pored emitters are characterized by increased radiation efficiency in comparison with medium-pored and coarse-pored burners. The dependencies of radiation efficiency, CO and NOX concentrations in combustion products on the equivalence ratio are shown in Figure 4. This tendency can be explained by the fact that in the internal combustion mode the convective heat exchange between combustion products and the wall of the emitter is more effective if the specific surface of pores is higher. The measured values of the radiation efficiency of a fine-pored burner are somewhat below the level of theoretically possible efficiency for burners with an absolutely black emitter. It has been found that the porous structure of the emitter significantly determines CO emission: the larger are the structural elements of the material, the lower is CO concentration in the flue gases (Fig.4c). An increase in the radiation efficiency by 5% is possible when the combustion products are additionally cooled by about 100 K. It is known that the oxidation of CO to CO2 is suppressed if the combustion products undergo rapid cooling to low temperatures. Apparently, this explains the observed dependence of CO concentration on the structure of the emitter in the present work. It has been also established that as the firing rate increases, the CO emission decreases. Thus, at $\phi \approx 0.77$, the CO concentration decreases from 50 ppm at 160 kW/m2 to 5 ppm at 420 kW/m2. Similar concentrations of CO are given for radiation burners with emitters made of foamed ceramic. It should be noted that for flat-flame burners CO emission can be significantly higher than that of radiation burners where the lowest achieved concentration of CO is about 100 ppm at $\phi = 0.8$.

It has been found that at the firing rate of 160 kW/m2 the contribution of NO_2 to NO_X is up to 10 ppm, which can be explained by the rapid cooling of combustion products. At firing rate of 260 and 420 kW/m2, the predominant nitrogen oxide in the combustion products is NO. As can be seen from Fig.4b, the emission of nitrogen oxides is practically independent of the size of the emitter's structural elements. It has been established that with a decrease in the equivalence ratio, the NOx concentration in the combustion products is significantly reduced, while the NOx



Figure 4. Dependences of radiation efficiency (line a), NO_X concentration (line b) and CO concentration (line c) on the equivalence ratio at firing rates 160 (column 1), 260 (column 2) and 420 kW/m2 (column 3), respectively. Square, round, and triangular markers are fine-pored, medium-pored and coarse-pored emitter, respectively. The calculated levels of the maximum radiation efficiency of the burner are marked with dashed lines.

emission is practically independent of the firing rate. From the engineering point of view, in order to assess the prospects of using the analyzed cylindrical burners in practice, it is important to correlate NOx emissions with the world-wide environmental standards and parameters of competitive solutions. As shown in Fig.4, at $\phi \approx 0.95$ the NO_X concentration is about 40 ppm, which corresponds to the highest environmental class of EU standards CEN/TC 109 for use in gas boilers. At $\phi < 0.9$, the NO_X concentration is less than 30 ppm, which corresponds to the SCAQMD Rule 1111 standard for the use of boilers in the Greater Los Angeles Area. At $\phi < 0.75$, NO_X < 15 ppm is provided, which corresponds to the DB 11/139-2015 standard for Hebei province, the metropolitan region of China. Thus, our study shown that cylindrical burners from Ni-Al alloy are perspective for using in eco-friendly combustion devices.

The acoustic emission was measured in experiments on combustion of heterogeneous systems [14]. The measurements have shown that acoustic oscillations are generated in the frequency range of 50Hz÷1.1MHz during the combustion of heterogeneous systems (Ni-Al, Zr-B, FeO-Al) forming condensed products. The combustion of various systems is characterized by the certain parameters of acoustic emission for the modes of discrete pulses and ordered self-oscillations. The emission mechanism was analyzed.

The following results were obtained by team from **Lebedev Physical Institute RAS** (responsible member Dr. Vladimir Gubernov) in collaboration with other teams during first year of the project realization.

The mathematical modeling of deflagration waves propagation in solid fuel samples with transverse thickness comparable to the thermal thickness of the flame will be given in papers [4, 5,15]. The samples are assumed to have a cylindrical geometry and homogeneous or layered structure. Different regimes of flame propagation are identified and investigated, which include traveling, pulsating, chaotic and spinning waves. As e[ample, the three-dimensional instantaneous temperature isosurface illustrating a three-headed spinning regime is shown in Figure 5. The samples are considered to be either homogeneous or with the layered shell-core structure so that the inner core consists of inert highly thermal conducting material and outer shell of energetic material. The interest to such systems is due to the fundamental and applied aspects. The former is related to the properties of combustion waves such as superadiabatic flame temperature, flame stabilization and acceleration, extended flammability limits. The latter is related to the possible applications in micro propulsion and power generation, thermopower waves, combustion synthesis of advanced materials.



Figure 5. Three-dimensional instantaneous temperature isosurface illustrating a three-headed spinning regime.

In the case of the shell-core system there exists an optimal geometrical configuration which provides superadiabatic flame temperature, flame stabilization and acceleration, extended flammability limits in such configurations as compared to the pure solid fuel combustion.

4. Summaries and future plans

The results obtained by all teams give new fundamental knowledge on combustion in the porous media and micro channels that will facilitate the development of new eco-friendly combustion technologies. The outlined research plan was fulfilment in generally. 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 counter flow 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. The all obtained results will be were presented at ICFD 2018 and submitted for publication in reviewed journals.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- F. Sirotkin, R. Fursenko, S. Kumar and S. Minaev: Flame anchoring regime of filtrational gas combustion: Theory and experiment, *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(3) (2017), pp. 4383-4385.
- Institute, 36(3) (2017), pp. 4383-4385.
 [2] S. Mokrin, E. Odintsov, G. Urjuipin, S. Minaev and K. Maruta: Flammability limit of moderate-and low-stretched premixed flames stabilized in planar channel, *Combustion and Flame*, 185 (2017), pp. 261-264.
 [3] R. Fursenko, S. Mokrin, S. Minaev and K. Maruta: Diffusive-thermal instability of
- [3] 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, 36(1) (2017), pp. 1613-1620.
- [4] R. Fursenko, V. Gubernov and S. Minaev: One-dimensional modelling of flame propagation in solid composite fuel with different geometrical configurations, *Combustion Theory and Modelling*, 21(3) (2017), pp. 560-573.
 [5] V. Gubernov and R. Fursenko: Controlling of flame propagation in a composite
- [5] V. Gubernov and R. Fursenko: Controlling of flame propagation in a composite solid energetic material: From stabilization to chaotic regimes, *Combustion and Flame*, 182 (2017), pp. 1785-1791.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [6] S. Mokrin, R. Fursenko, E. Odintsov, G. Urjupin, S. Minaev and K. Maruta: Numerical and Experimental Study of Stretched Flames Stabilized in a Planar Channel, *Proc. of the 14th Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2017), p.210.
 [7] E. Sereshchenko, R. Fursenko and S. Minaev: Two-Dimensional Modeling of Flame
- [7] E. Sereshchenko, R. Fursenko and S. Minaev: Two-Dimensional Modeling of Flame Dynamics Near the Multi-Channel Burner Outlet, *Proceedings of the 14th International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2017), p.186.
- [8] V. I. Babushok: Dual Effect of Potassium-Containing Compounds on Combustion Processes, *Proc. of the 14th Int. Conf. on Flow Dynamics,* Sendai, (2017), p.180.
- [9] A. Ponomareva, A. Lesnykh, K. Tsoy, G. Urjipin, V. Babushok and K. Shtym: Thermal Behavior and Combustion Properties of Coal-Containing Composite Materials, *Proc. of the 14th Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2017), p.208.
- [10] D. Knyazkov, A. Dmitriev, T. Bolshova, V. Shvartsberg, K. Osipova, A. Shmakov and O. Korobeinichev: Application of Molecular Beam Mass Spectroskopy for Studying Laminar Premixed Burner-Stabilized Flames at 1-5 atm, *Proceedings of the 14th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2017), p.182.
- [11] S. Minaev and E. Fernandez-Tarrazo: Flame Stabilization in a Counter-Flow Micro Combustor with Power Extraction, *Proceedings of the 14th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2017), p.190.
- [12] R. Fursenko, S. Minaev, M. Sanches-Sanz and E. Fernandez-Tarrazo: Onedimensional Modeling of Meso-scale Counter-current Reactor with Endo-and Exothermic Reactions, *Proc. of the 14th Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2017), p.174.
- [13] A. Maznoy, A. Kirdyashkin and S. Minaev: Radiative and Environmental Characteristics of Cylindrical Infrared Burners, *Proceedings of the 14th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2017), p.178.
- International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2017), p.178.
 [14] A. Kirdyashkin, R. Gabbasov and V. Salamatov: Acoustic Emission during Combustion of Heterogeneous Systems with the Formation of Condensed Reaction Products, Proc. of the 14th Int. Conf. on Flow Dynamics, Sendai, (2017), p.228.
- Products, Proc. of the 14th Int. Conf. on Flow Dynamics, Sendai, (2017), p.228.
 [15] V. Gubernov, V. Kurdyumov, A. Kolobov and A. Polezhaev: Mathematical Modeling of Combustion Waves in Thin Solid Fuel Samples, Proceedings of the 14th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2017), p.194.
- [16] S. Minaev, K. Maruta, R. Fursenko, A. Kirdyashkin, V. Gubernov, A. Shmakov: Filtrational Gas Combustion in Porous Media and Micro Combustion, *Proceedings* of the 17th Int. Symp. on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp.126-127.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

2. 研究成果報告書 <重点公募共同研究>

Project code	J17J001
Classification	Priority collaborative research
Subject area	Multi-scale mobility of humans and materials
Research period	November 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

Multiphase Flow and Interfacial Transport Phenomena at Phase and Material Boundaries

Shigeru Obayashi¹, Seiji Samukawa¹, Toshiyuki Takagi¹, Hirofumi Wada² Yutaka Watanabe³, Mitsuo Hashimoto¹, Takashi Iijima⁴, Philippe Guy⁵, Lalita Udpa⁶ Yuji Hattori¹, Hiroki Nagai¹, Koji Shimoyama¹, Makoto Hirota¹, Aiko Yakeno¹ Gota Kikugawa¹, Atsuki Komiya¹, Takeru Okada¹, Jun Ishimoto¹ Tetsuya Uchimoto¹, Hiroyuki Kosukegawa¹ Taku Ohara¹† ¹Institute of Fluid Science, Tohoku University ²Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

²Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University
 ³Graduate School of Engineering, Tohoku University
 ⁴National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
 ⁵Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA de Lyon
 ⁶College of Engineering, Michigan State University
 [†]Applicant

1. Purpose of the project

Boundaries between materials or phases are of critical importance in fluid science and technology. Various interfacial and boundary phenomena, such as boundary layer flow, electrokinetics and mass transport, are analyzed here and the multiscale mechanisms are clarified. Some important applications, aircraft drag reduction by laminarized wing, electricity generation from flowing water-graphene interface for energy harvesting, and characterization of phase transition at hydrogen-metal material interfaces related to hydrogen energy equipment are studied.

- 2. Details of program implement
- 2.1 Aircraft drag reduction by laminarized wing

The ultimately optimal design of an aerospace transport machine is expected to be realized by achieving an extremely low viscous drag from the surrounding flow. About half of the total drag of an aircraft is due to the air's friction. The flow around an aircraft is subject to the transition from laminar to turbulent states, and viscous drag increases dramatically in the turbulent state. If the laminar flow is covered over 50% of the wing surface, about 10% of the total drag can be reduced. Following recent improvement of computational power and development of surface processing technology, the feasibility of laminarized wing attracts growing attention from world-wide aircraft industries and air companies. Our goal is to find a feasible method of reducing viscous drag on aircrafts, by using a super high-performance computer, which is a collaborative project by Tohoku University, JAXA and Mitsubishi Heavy Industry Co., LTD.

Currently, Tohoku University and JAXA are studying the laminar-turbulence transition on a swept wing in detail by nonlinear stability analysis and direct numerical simulation. In particular, we focus on the role of artificially placed small roughness, often called the discrete roughness elements (DRE), which is thought to suppress the crossflow instability and delay the transition to some extent. The mechanism and robustness of this laminar flow control method will be studied numerically and theoretically.

2.2 Electricity generation from flowing water and graphene interface Energy harvesting from the environment has been a topic of interest in recent
years. Liquid-flow-induced generation of electricity adds to the portfolio of energy harvesting system. Ocean wave, waterfalls, and rain are abundant source of energy, showing potential for developing a novel electricity system. Electricity generation from the interface between graphene and flowing water has reported, however, the mechanisms are still not deterministic. Here, the effect of the surface condition of graphene on flow-induced electricity generation is demonstrated by heteroatom doping using neutral bean system, which tunes the wettability of the graphene surface in addition to modulating the electronic state including the surface potential.

The electricity generation from flowing water and graphene was demonstrated using single water droplet. The voltage generation by the droplet motion on graphene was observed. The generated voltage from pristine graphene (non-doped) was 0.08 V. In comparison, a high voltage of over 0.23 V, which is three times higher, was observed with the nitrogen-doped graphene. This surprising result can be explained by surface charge and hydrophilicity of the graphene, which is tuned by nitrogen doping without forming defect.

We found the doped-nitrogen plays a strong role in higher voltage generation. Our approach has potential to realize novel electricity system in energy harvesting.

2.3 Characterization of phase transition at hydrogen-metal material interfaces

For austenitic stainless steels that are used for structural materials of components in hydrogen stations, hydrogen embrittlement (HE) is one of key issues for design and maintenance of hydrogen stations. So far, detailed mechanism of HE of austenitic stainless steels is not fully understood in view of phase transition.

In this study eddy current testing (ECT) is applied to evaluate the phase transition of hydrogen charged austenitic stainless steels and the effect of phase transition on hydrogen embrittlement is discussed.

Each specimen made of type 304 austenitic stainless steel was put in a high-pressure hydrogen container for 336 hours that was kept at a temperature of 300 °C and a pressure of 100 MPa. Next, a tensile test with the strain rate of 5.0×10^{-5} s⁻¹ was performed. The hydrogen charged specimen was ruptured at the strain of 25% which is less than half of the uncharged material due to HE.

Eddy current testing was carried out and the relative permeability was estimated. In both cases with and without hydrogen charged, the amount of α' phase increases with the increase of plastic strain. Focusing on the signals of 0% strain specimens, relative permeability is increased by hydrogen charging, which indicates that magnetic phase appears by hydrogen charging. In the low strain region, the ECT signals of charged specimens behave in different way from uncharged ones, and the mechanism will be discussed through microstructure analysis.

3. Achievements

The study is in progress as has been planned.

4. Summaries and future plans

Three subjects studied here covers a wide range of scale and physical mechanisms specific to interfaces and boundaries. Through this study, in-depth understanding of the mechanism will be derived which leads to novel technologies in the near future.

- 5. Research results
- 1) Journal

Not applicable.

- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- [1] 岡田他, グラフェン・水界面の動電現象における窒素ドーピング効果, 第 65 回応用物 理学会春季学術講演会, (2018).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J17J002
区分	重点公募共同研究
課題分野	環境・エネルギー分野
研究期間	$2017.11 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

カーボンフリーエネルギーキャリア利用における科学と技術 Science and Technology for Utilizations of Carbon Free Energy Carriers

小林 秀昭*†,橋本 望**††,小原 拓*,内一 哲哉*,高木 敏行*,丸田 薫* 中村 寿*,早川 晃弘*,渡邉 豊***†† *東北大学流体科学研究所,**北海道大学大学院工学研究院 ***東北大学大学院工学研究科 †申請者,††所外対応研究者

1. 研究目的

地球温暖化物質である CO₂の排出削減に寄与するエネルギーチェーンを構築することは我が 国にとって急務である.特に海外で製造された CO₂フリー水素やアンモニアを国内に輸送しエネ ルギー源として更に輸送,貯蔵,活用するためのインフラストラクチャーの整備が不可欠であり 流体科学の役割は大きい.本研究ではカーボンフリーエネルギーキャリアの利用に関する研究を 流体科学の基礎と応用の両面から推進する.

2. 研究成果の内容

本研究は当年度後期から開始された重点公募研究であり,流体科学研究所,北海道大学大学院, 東北大学大学院の教員による共同研究体制を構築している.今後数年をかけてより大型の研究に 展開する予定であるため,本稿では研究計画の概要を述べた後,当年度の成果のいくつかに触れ る.研究課題は大きく分けて,1)貯蔵・輸送機器ならびに燃焼器等の材料技術,2)燃焼等の エネルギー機器高度化の技術,3)エネルギー機器から排出される窒素酸化物処理や航空機等へ の更なる応用展開に向けたシステム技術に大別される.これらはエネルギー機器の基盤技術に止 まらず,高圧アンモニア雰囲気や水素雰囲気中の金属の表面科学など,流体科学の広い基礎科学 分野を包含している.

表1に主な燃料(エネルギーキャリア)の熱物性ならびに燃焼特性を示す.アンモニアは常 温液化圧力10気圧以下であり、常圧液化温度も-33.4℃と、広く流通しているプロパンと大差な い.水素の液化温度-256℃と比較すると貯蔵、輸送の両面で非常に扱いやすい燃料である.大型 火力発電所の脱硝触媒に広く使われており、流通面でもコスト低減が可能である.課題として燃 焼速度、着火温度などで燃焼性が低いことや窒素原子を多量に含むため窒素酸化物 NOx が生成 しやすいことがあるが、これらを克服することによって温室効果ガスを排出しないエネルギーキ ャリアとしての可能性が格段に高まる.NOx 排出抑制燃焼に関しては、アンモニア火炎からの NOx や未燃 NH₃排出が化学量論比よりもやや過濃側で最小になることを利用して、上流で過濃、 下流で希薄燃焼を行う2段燃焼による低 NOx 燃焼の可能性があり、当グループではガスタービ ン燃焼器を模擬したスワールバーナで2段燃焼を行う数値解析によりその効果を確認した(図1).

さらに、アンモニア燃焼器の設計開発を進めるために必要不可欠な高精度アンモニア燃焼反応 モデルを目的とし、温度分布制御マイクロフローリアクタを用いてアンモニア反応過程の化学種 分布計測を行い、モデル予測精度の改善を進めた.計測にはマイクロリアクタから微量ガスをサ ンプリングし、質量分析計により行った.図2に計測結果および数値計算を示す.数値計算には 過去の研究で著者(中村ら)が開発したモデルを用いた.本モデルは反応物,生成物およびNOx 中間体の分布を再現できることを確認しているが,水素の分布については実験値を過大評価して

いる.そこで、感度解析により水素生成に感度が高い素反応を抽出し、文献調査により不確かさの大きい素反応を修正したモデルを修正した.修正モデルを用いた計算結果を図中の「Mod.」に示している.修正により、モデル予測性能が改善していることが確認された.

Fuel	NH ₃	H ₂	CH₄	C ₃ H ₈
Boiling temperature at 1 atm (°C)	-33.4	-253	-161	-42.1
Condensation pressure at 25 °C (atm)	9.90	-	-	9.40
Lower heating value, LHV (MJ/kg)	18.6	120	50.0	46.4
Flammability limit (Equivalence ratio)	0.63~1.40	0.10~7.1	0.50~1.7	0.51~2.5
Adiabatic flame temperature ('C)	1800	2110	1950	2000
Maximum laminar burning velocity (m/s)	0.07	2.91	0.37	0.43
Minimum auto ignition temperature (°C)	650	520	630	450



表1 アンモニアおよび代表的な燃料の熱物性値 と燃焼特性

図1 スワールバーナにおける2次空気噴 射による NOx 低減効果の数値解析



図2 水素分布の計測結果及び数値計算結果(a:当量比1.0;b:当量比1.2)

3. 研究目標の達成状況

採択後の実施期間が約4か月間であるため、成果創出よりも組織体制の拡充とテーマの整理を 重点的に行い、次年度以降の本格的な準備期間とした.

4. まとめと今後の課題

化石燃料によるエネルギー輸入国である我が国にとって温室効果ガス削減に向けた取り組みは 急務であり、総合エネルギー効率やコスト面で可能性が高いアンモニアに関し、特に基礎科学の 観点から研究に取り組んでいく.

- 5. 研究成果
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
 - K.D.K.A. Somarathne, S. Hatakeyama, A. Hayakawa, H. Kobayashi: Numerical Study of a Low Emission Gas Turbine Like Combustor for Turbulent Ammonia/Air Premixed Swirl Flames with a Secondary Air Injection at High Pressure, *Int. J. Hydrogen Energy*, 42 (2017), 27388-27399.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
 - [2] M. Shindo, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa: Study on Chemical Structure of Ammonia/Air Weak Flames in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, 14th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2017), OS17-66.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

2. 研究成果報告書 <リーダーシップ共同研究>

課題番号	J17L017
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目(発展)

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

> 長谷川 裕晃*†,永井 大樹**†† 沖 大善*,藤澤 勇貴* *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

バドミントンシャトルコックの独特な構造である隙間部により生じる流体力の違いをシャ トル周りの流れ場から明らかにする.

2. 研究成果の内容

本研究ではシャトルの隙間部が反転挙動時の空力安定性に及ぼす影響を調べる為に、煙による可視化での流れ場の評価と0から360°の迎角での流体力の測定を行った.

シャトルはインパクト直後にクルリと反転し急激に迎角変化(縦回転)し、非常に短い時 間で安定した飛翔を行う. このシャトルの急激迎角変化中の飛翔メカニズムについて明らか にするために、通常シャトル(Standard)とシャトルの隙間部を滑らかなテープで塞いだ隙間 無しシャトル(w/o.gaps)の2つのシャトルモデルを用意し、流体力特性の比較を行った.図 1 に縦回転時における隙間の有無でのシャトルの縦回転挙動を示す. レイノルズ数 Re の代 表寸法はシャトル最大幅である羽根部後端径とした. 迎角 a はシャトルの先端(コルク部) が風上方向に向いている状態を迎角 a=0°と定義する。隙間なしシャトルに比べ、通常シャ トルは最大オーバーシュート角が小さく、シャトルが安定するまでの時間が短くなることが 分かった. 図2に縦回転時におけるシャトル周りの流れ場の可視化画像を示す. オーバーシ ュート中、隙間無しシャトルではシャトルスカート後方に反時計回りの渦が存在している (w/o. gaps, -30°). 一方, 通常シャトルではスカート後方に渦は確認できない. スカート 部付け根の隙間を通った流れが後方に流れ出ることで、渦の生成が抑制されている.この隙 間無しシャトルにおけるスカート後方の渦は、シャトルまわりに時計回りの循環を生む. その結果、 シャトルにはオーバーシュート角を大きくする方向の力が働くことになる.こうして,通常シャトルと 比べ,隙間無しシャトルではオーバーシュート角が大きくなる.また,オーバーシュート後のシャト ルが迎角 a=0°へ戻る際の流れ場では、通常シャトルではスカート部後方に大きな渦が存在し ている(Standard, -44°). この大きなスケールの渦の存在は, 隙間無しシャトルが 0°に戻 る際には確認できない. 通常シャトルでは大きな時計回りの渦が存在する. この渦がシャトル周り の反時計回りの循環を強め、α=0°に戻る力を大きくしている.こうして、通常シャトルでは隙間があ ることで,オーバーシュート角が抑えられ,オーバーシュート後に 0ºの姿勢に戻りやすくなる. 図3 に各シャトルの揚力係数 CLを示す. 高迎角時においてシャトルの隙間部の有無で揚力係数 に大きな差が生まれることが分かった. その理由をシャトル表面圧力分布から評価するため に PSP 計測を行った.



3. 研究目標の達成状況

縦回転時の反転挙動における安定性にシャトル隙間部の流れがどう影響しているかを解明 したことに関して,研究目標は概ね達成した.強制回転や非定常な力評価に関しては,実験 系の見直しが必要となった.

4. まとめと今後の課題

シャトルのインパクト直後の急激な姿勢変化について、シャトルスカート付け根の隙間部 がシャトルの高い空力安定性に寄与していることが分かった。今後は強制回転や非定常流体 力測定の実験系の確認を早めに終わらせたうえで、PSPによるシャトルの表面圧力分布を評 価し、シャトルの独特な構造である隙間部により生じる流体力の違いを流れ場とシャトル表 面圧力分布から明らかにする。また、シャトルに強制回転を与えた場合(カットショットを 想定)の挙動に関しても隙間部の影響を調べる。

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- [1] <u>中川 健一</u>, <u>長谷川 裕晃</u>, <u>村上 正秀</u>, 大林 茂: バドミントンシャトルコックの空力安定性, 日本機械学会論文集, 83・856 (2017), p. 17-00165.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[2] Y. Fujisawa, D. Oki, H. Hasegawa, H. Nagai: Badminton Shuttlecock as an Airborne Projectile, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 146-147.
 - [3] <u>沖 大善</u>, 長谷川 裕晃, <u>村上 正秀</u>, 大林 茂: 反転挙動時におけるバドミントンシャトルコ ックの空力安定性, 第 49 回流体力学講演会, 東京, (2017).
 - [4] <u>沖 大善</u>, 長谷川 裕晃, 村上 正秀, 大林 茂: バドミントンシャトルコックの反転挙動, 日本機械学会関東支部第24期総会・講演会, 東京, (2018).
- [5] 藤澤 勇貴, <u>沖</u>大善, 長谷川 裕晃, <u>村上 正秀</u>, 永井 大樹: 強制的にスピン回転を与えたバドミントンシャトルコックの空力特性, スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017, 金沢, (2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17L019
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
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**††,小平 裕也*,井上 勇人*
三木 寛之***,小助川 博之**,武石 洋征****
*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,*千葉工業大学
*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ため生体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、不規則な凹凸面で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成形したチタン薄板の転写特性を明らかにする ことを目的とし、せん断距離、及び転写させる微細形状を変化させることで、成形体の転写 特性を明らかにした.

研究成果の内容

本研究では、純度 99.6%、平均粒径 45µm 以下の非球形の純 Ti 粉末を使用した. 図1に示 すように、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 P_{HV} = 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、50µm となった. 隣り合うビッカース圧痕との距離を 300µm と設定した. また、ビッカ ース圧痕の角度を 45°変化させたビッカース圧痕も付与させた.

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 $40 \times 10 \times 0.25$ mm, 圧縮応力を 1250 MPa(圧縮荷重 500 kN), せん断速度を 5 mm/min, せん断距離 $L_s \in L_s = 10$ mm と一定として成形を行った.

成形した試料の転写体 SEM 像を図2に示す.図2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3に金型の微細形状と純チタン 薄板の転写部の形状との比較を示す.図3よりせん断距離の増加とビッカース圧痕の転写性 は関係性が良いことがわかる.従って,角度を変化させても転写製が良いことがわかった.



図1:ビッカース圧痕の模式図





(a) $D = 35 \mu m$, $\phi = 0 \text{ deg}$ (b) $D = 35 \mu m$, $\phi = 45 \text{ deg}$







(c) D=50µm, Ø=0 deg (d) D=50µm, Ø=45 deg
 図 2: FE-SEM により観察したマイクロ成形体

 (c) D=50µm, Ø=0 deg (d) D=50µm, Ø=45 deg
 図 3:超深度形状測定顕微鏡を用いた転写特性 評価の結果 (x axis).

3. 研究目標の達成状況

マイクロしケールの部品製造開発が可能であることが示唆された.従って、100%の達成 であるといえる.

- 4. まとめと今後の課題 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・ロ頭発表等
- [1] <u>Hayato Inoue, Noboru Nakayama, Yuya Kodaira</u>, Hiroyuki Kosukegawa, Toshiyuki Takagi Hiroyuki Miki, <u>Hiroyuku Takeishi</u>: Micro Square Pyramid Shape Molding on Titanium Thin Plate formed by Compression Shearing Method at Room Temperature, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.76-77.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17L020
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2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**†† 野内 昌平*,川添 博光*** *東海大学工学部,**東北大学流体科学研究所 ***鳥取大学大学院工学研究科 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

本研究は、プラズマ気流の特性と材料表面の改質特性の関係性を明らかにすることを目的 としている.本年度は高温のアーク加熱プラズマ中に設置した供試体表面の窒化特性に着目 して研究を行った.そこで窒化処理中の衝撃槽内からの輻射光の発光分光計測を行い、気流 特性を評価した.また、窒化処理後の供試体表面の表面分析を実施して、気流特性との相関 関係について調査した.

2. 研究成果の内容

本研究では、窒化処理の評価として、発光分光計測によるプラズマ気流の特性評価と電子線マイクロアナライザー(EPMA)による材料表面の成分分析を行った.供試体前面 3mm 位置における回転・振動温度の径方向分布を図1に、数密度比 N/N2の径方向分布を図2に示す.図1より、回転温度が振動温度よりも低くなっているが、温度評価のエラーバーが1000K程度であることを考慮すると、衝撃層内のプラズマ流は熱的平衡状態に近いと考えられる. 図2より数密度比に関しては、最大で0.4 となり、窒素が解離していることが分かる.図3にEPMAによる成分分析結果を示す.それぞれ上から順に供試体表面から20µm、50µm、80µmの位置で計測したものである.表面から深くなるにつれて、窒素原子固有のX線スペクトル強度が低下しており、窒素の含有量が減少することが分かる.





図3: EPMA による定性分析結果

3. 研究目標の達成状況

本研究では、供試体表面のアーク加熱プラズマ流の気流温度、数密度比 N/N₂を発光分光計測 より取得でき、また EPMA による定性分析から供試体内部で窒化処理が生じていることが明ら かになった. これらの相関関係については、まだ明らかにすることができていないが、本研究を 実施することで気流特性診断と窒化特性を評価する手法を確立することができた.

4. まとめと今後の課題

本研究では、高温のアーク加熱プラズマ流に設置した供試体の窒化特性について、発光分光計 測を EPMA により表面分析により調査した.供試体表面のプラズマ流は、ほぼ熱的平衡状態に あり、解離反応が生じていることが分かり、また EPMA による定性分析から窒化処理が生じて いることを明らかにできた. 今後は、実験パラメータを増やして、これらの相関関係を明らかに する.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- *[1] <u>G. Yamada, M. Nakanishi</u> and <u>H. Kawazoe</u>: Flow Characterization of CO₂-N₂-Ar Plasma in a Hollow Electrode Arc Heater, *Trans. JSASS, Aerospace Tech. Jan.*, 15 (2017), pp. a61-a66.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
 - [2] <u>G. Yamada, S. Yanai, H. Kawazoe</u> and S. Obayashi: Spectroscopic Evaluation of High Enthalpy Plasma Flows for Heat Shield Material Testing, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 186-187.
 - [3] <u>G. Yamada, S. Yanai, M. Nakanishi, H. Katsurayama, T. Sakai</u> and <u>H. Kawazoe</u>: Spectroscopic Analysis of Shock Layer Flows in a High Enthalpy Arcjet Facility, 44th European Physical Society Conference on Plasma Physics, (2017), P5.307
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
 - なし

課題番号	J17L021
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2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、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 広領域における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.前年度は主に未燃ガス温 度の影響を精査しており、本年度は主に熱損失の影響を調べている.

2. 研究成果の内容

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

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熱損失の影響 を調べた.





図2 セル状火炎のOH 濃度分布(左図:断熱;右図:非断熱)

図1は、断熱と非断熱の条件下における分散関係(増幅率ωと波数 k の関係)を示したものである.熱損失が増大すると共に増幅率は小さくなり、不安定領域は狭くなる.これは熱損失により火炎温度が低下し、密度比の変化が小さくなり、流体力学的効果が弱くなるからである.また、特性波数は小さくなり、特性波長は短くなる.

図2は、セル状火炎のOH 濃度分布を示したものである. 未燃ガス側に凸な火炎面の下流 側に高い濃度分布がみられる. この様な現象がみられるのは、拡散熱的効果により下流側の 温度が上昇するからである.

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 は時間に依存しないこと,並びに計算領域長さが十分な場合は計算領域に依存しないことを 示した.

3. 研究目標の達成状況

本研究では、水素/空気予混合火炎の数値計算を遂行し、予混合燃焼における火炎のダイナ ミクスに及ぼす熱損失の影響を精査した.そして、水素の希薄予混合燃焼において、熱損失 が火炎面の不安定挙動に大きな影響を及ぼすことを示した.

以上のことから、火炎のダイナミクスに及ぼす未燃ガス温度や熱損失の影響に着目した本 研究は、充分な成果を得ていると考えられる.

4. まとめと今後の課題

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

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議,解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] <u>Kadowaki, S., Ohki, R., Takahashi, T., Thwe Thwe Aung, Katsumi, T.</u>, and Kobayashi, H.: Numerical study on the intrinsic instability of premixed flames based on the one-step and detail chemical reaction models, *Proceedings of the 17th International Symposium* on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp. 112-113.
- [2] 大木涼資, トエトエアウン, 勝身俊之, 門脇敏, 小林秀昭: 水素・空気予混合火炎の不安定挙 動に及ぼすスケール効果 -フラクタル解析による不安定性の評価-, 第55回燃焼シンポジウ ム, P205, (2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17L024
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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*†, 上原 聡司**, 中嶋 智樹** 西山 秀哉**††, Oleg P. Solonenko*** *足利工業大学(現:足利大学)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

H.28 年度の研究(課題番号 J16030)では、1kW 級大気プラズマ溶射装置により発生させた Ar/N2旋回流プラズマジェットを用いた、大気液相前駆体プラズマ溶射(ASPPS)による酸 化チタン微粒子皮膜の形成を行った.その結果、ITO 被覆ガラス基材上への光触媒特性を有 する酸化チタン微粒子皮膜形成が可能となり、色素増感太陽電池用陽極製造プロセスとして 実用化を図る上で有益な知見が得られた.H.29 年度は、更なる原料物質の高活性化を図るた め、旋回流形成ノズルスロート部内壁にイットリア安定化ジルコニア(YSZ)熱遮へい皮膜 を形成することにより、旋回流形成ノズル内でのプラズマジェットの熱損失を軽減した高熱 効率プラズマトーチの開発を行った.

2. 研究成果の内容

本研究で用いた旋回流 ASPPS 装置の模式図を図1に示す.本装置の構成は、昨年まで使用 した装置と同じであるが、プラズマジェットの熱損失を低減できるよう旋回流形成ノズルス ロート部内壁に YSZ 皮膜が形成されている.酸化チタン微粒子皮膜形成条件は表1に示す とおりであり、酸化チタン形成中のプラズマトーチ冷却系出入口に取り付けた水温計により、 それぞれの水温を 30sec.間隔で測定した.プラズマトーチ冷却系は、プラズマトーチ陽極ノ ズル及び旋回流形成ノズル両方を冷却できる構造になっており、冷却水入口はプラズマトー チ陽極ノズル側に、出口は旋回流形成ノズル側に設置した.



3. 研究目標の達成状況

図2に、本研究で使用した旋回流形成ノズル(旋回流形成ノズルスロート部に YSZ 皮膜を 形成したノズル)、昨年までの旋回流形成ノズル(YSZ 皮膜形成なし)それぞれの場合の酸 化チタン皮膜形成時における冷却系出入口の温度差(プラズマトーチ冷却系通過の際の水温 上昇)の時間変化を示す.この結果からもわかるとおり、Ar 作動ガスの場合の水温上昇が最 大5.5℃であったのに対し、Ar/N2作動ガスの場合は8℃程度の水温上昇があり、Ar 作動ガへのN2添加によりプラズマジェットのエンタルピーが増大するのに伴い、冷却水のプラズマジェット冷却による熱損失も大きくなることが確認された.但し、旋回流形成ノズルスロート部へのYSZ皮膜形成により、Ar 作動ガスの場合の水温上昇を1℃、Ar/N2作動ガスの場合の水温上昇を0.7℃低減させる事ができ、YSZ皮膜形成によりプラズマジェットの熱損失を抑え高効率化が可能であることを示唆する結果が得られた.予想される成果「熱遮へい皮膜によるプラズマジェットの熱損失の低減」及び「プラズマジェットの熱損失の低減に伴う皮膜の高強度化」に対する達成度は、前者については上記の結果より定性的には確認することに成功し、後者についてもわずかであるが、鉛筆引っかき試験結果より皮膜強度の向上を確認することができたことから、70%と評価している.



図2 冷却系出入口温度差の時間変化

4. まとめと今後の課題

本研究により、プラズマジェットと接触するノズル内壁に熱遮へい皮膜を形成することに より、プラズマジェットの熱損失を低減させることが可能であることを示唆する結果が得ら れた. 今後は、原料物質の活性化により高強度皮膜の形成を図る予定である. 皮膜の高強度 化に関しては、その他に飛行中に形成した微粒子の再加熱(溶融)による方法、形成した皮 膜の再加熱(溶融)による方法があり、後者については Prof. Solonenko 主導でアーク照射 による皮膜の再加熱(溶融)を行い皮膜の高強度化に成功しており(下記学術雑誌[2]で報告 済み)、これらの方法による皮膜の高強度化も併せて試みる予定である.

- 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] D. Kindole, I. Anyadiegwu, Y. Ando, Y. Noda, H. Nishiyama, S. Uehara, T. Nakajima, <u>O. P. Solonenko</u>, A.V. Smirnov and A. A. Golovin: Rapid Deposition of Photocatalytically Enhanced TiO₂ Film by Atmospheric SPPS Using Ar/N₂-Vortex Plasma Jet, *Materials Transactions*, Vol. 59, No. 3, (2018), pp. 462 to 468.
- *[2] <u>O. P. Solonenko, Y. Ando</u>, H. Nishiyama, <u>D. Kindole</u>, <u>A.V. Smirnov</u>, <u>A.A. Golovin</u>, S. Uehara, T. Nakajima: Synthesis of thick photocatalytic titania surface layers by solution plasma spraying and subsequent treatment by pulsed laminar plasma jet, *Surface & Coatings Technology*, Vol.333, (2017), pp. 39-51.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- [3] Y. Ando, I. Anyadiegwu, A. K. Oluwafunmilade, H. Nishiyama, T. Nakajima, S. Uehara, O. P. Solonenko: Implementation of Software Library for Flow Analysis, Proceedings of the Fourteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2017), pp. 614-615.
- [4] <u>I. Anyadiegwu, A. K. Oluwafunmilade, Y. Ando</u>, H. Nishiyama, T. Nakajima, S. Uehara, <u>O. P. Solonenko</u>: Effects of YSZ film on Inner Wall of Vortex Flow Creation Nozzle on Thermal Efficiency Improvement in Vortex Plasma Spray Gun, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 44-45.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17L027
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

飛翔体周りの非定常流れ場に対する定量的密度計測 The Quantitative Density Measurement of Unsteady Flow around a Projectile

太田 匡則*†, 永井 大樹**†† 栗原 健*, 稲毛 達朗*** *千葉大学大学院, **東北大学流体科学研究所 ***湘南工科大学工学部 †申請者, ††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

実験モデルを自由飛行させることができる弾道飛行装置(バリスティックレンジ)ではス ティングなどの支持部の影響を排除した実験を行うことができ、衝突試験や空力試験など 様々な目的で使用されている.自由飛行試験ではこれまでにシュリーレン法による可視化計 測や圧力センサによる計測などが行われているが、飛翔体まわりの3次元的な密度計測は殆 ど報告例がない.弾道飛行装置では一般的な風洞のように模型を支持する必要がないため、 飛翔体の後流領域における現象を計測することも可能である.そこで本研究では背景設置型 シュリーレン(Background Oriented Schlieren)法を利用して、後流領域を含む飛翔体ま わりの非定常密度場を3次元的に計測することを目的として計測実験を試みた.

2. 研究成果の内容

本実験では図1に示すように、12台のデジタルカメラ(Canon EOS Kiss Digital X3,有 効画素数4752×3168 pixels)を試験部内に設置した.撮影のためのレンズは通常の望遠ズ ームレンズ(SIGUMA 70-300mm F4-5.6 DG MACRO)を利用した.背景画像は縦方向に 青色,横方向に赤色の格子を配したグリッドパターンとし、背景画像は背景画像の後方から 白色 LED によって照射される.図2に、図1中のカメラ #07 で撮影された CGBOS 画像



図1:多方向同時撮影系の概要



図2:撮影された CGBOS 画像の例

を示す. 飛翔体は直径 15mm の球であり, 飛行マッハ数は約 1.5 である. 図3に示すように, CGBOS 画像から背景画像の移動量を算出し, 12 方向からの移動量データから ART (Algebraic Reconstruction Technique)によって再構成された密度分布を図4に示す. 同図は 球中心断面における密度比の分布である.



図3:背景画像の縦方向移動量

Bow shock



Recirculation region 図4:球中心断面における密度分布

3. 研究目標の達成状況

本研究では、従来のシュリーレン法による定性的な計測から BOS 法を利用した定量的な 密度計測へ発展させること、非定常流れ場の3次元密度場の取得を実現し、飛翔体まわりの 密度場を3次元的に捉えることを目標として取り組み、前節の図4に示す通り、これを達成 することができた.

4. まとめと今後の課題

本研究により,飛翔体まわりの非定常流れ場に対する3次元密度計測を実現することがで きた. 今後は実験模型の形状,サイズ,実験装置の改良などの検討を進めて,より高精度な 定量密度計測の実現を目指す.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [1] <u>太田匡則</u>, <u>栗原健</u>, <u>志田輝一</u>, <u>吉田和馬</u>, <u>石川和樹</u>, <u>石本祥之</u>, <u>稲毛達朗</u>, 永井大樹: バリ スティックレンジにおける3次元密度計測, 平成29年度航空宇宙空力シンポジウム, 山形県, (2018), No. 1L5, pp. 1-2.
- *[2] <u>栗原健</u>, 志田輝一, 石川和樹, 石本祥之, 永島拓己, 稲毛達朗, 太田匡則, 永井大樹: 弾道 飛行装置における3次元密度計測の試み, 平成29年度衝撃波シンポジウム, 流体科学研究所, (2018), No. 1A2-2, pp. 1-2.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
 - (特許) なし
 - (受賞) なし
 - (マスコミ発表) なし

Project code	J17L028
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

Shock-Fabric Interaction

Loic Ehrhardt*†, Mingyu Sun**†† *French-German Research Institute of Saint-Louis, France **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The goal of this project was to investigate the structural effects of fibres and thread in either viscous or inviscid medium and analyse the pressure at the back wall and near the barrier. The scope of investigation is limited to fixed thread and fibres, therefore, there is no pressure contribution due to piston-like motion. The problem is modelled in its simplest form: a 2-D model, a set of barriers (thread or fibres) and a rigid back wall.

2. Details of program implement

The textile was modelled as two layers of threads. The threads were modelled as two big adjacent cylinders, while the fibres were modelled as finer structure inside the thread (Fig.1). Due to the symmetric nature of the textile model, the domain of the model was reduced to half of the original domain. The geometry of threads and fibres were symmetric around the cylinder's centre (Fig.2). Physical quantities such as the pressure, temperature and velocity are recorded at the back wall, along with the six-sensor positions near the porous barrier.



Figure 1 Enlarged schematic diagram of (a) thread (b) fibre (units in mm)

In viscous medium, the boundary layer developed over the thread barriers, when compared to the throat distance i.e. the distance between the thread barrier and the symmetric boundary, is of negligible thickness. The viscous forces are confined near to the thread barriers and hardly affect the flow near the sensor and back wall locations. Therefore, outside the boundary layer, the viscous flow behaves in a similar manner to inviscid flow. This in-turn can be attributed for the similarity in the pressure at various



Figure 2 Schematic diagram of computation domain with sensor placements

locations in the viscous and inviscid medium. Unlike the case of thread barrier where the viscous and inviscid flow are similar, in fibre domain they differ. At low Reynolds number, the retardation by viscous shearing in the fluid caused by solid boundary extends for a great distance away from the surface of the fibre. The boundary layer thickness of the fibre is comparable to the distance among the finer fibre barriers. The formation of boundary layer is responsible for the deviation of pressures in viscous fibre model when compared to the inviscid fibre model.

3. Achievements

The viscous effects have been investigated as proposed for two dimensional configurations. Three dimensional analysis is however not yet performed.

4. Summaries and future plans

Viscous and inviscid shock wave simulation in thread and fibre domains were analysed. It was observed that, in case of thread barrier, the viscous and inviscid flow behave in a similar manner due to relatively less thickness of the boundary layer when compared to the throat distance. This is also verified by the pressure plots for thread, where the boundary layer effects are negligible even at the thread barriers. However, in case of viscous and inviscid fibre simulations, there is a marked difference in in pressure-time plots at various locations. The boundary layer developed at fibres, have a comparable thickness to the distance among the fibres which results in change of flow physics. Thus, it can be said with certainty that the finer the textile, the subsequent boundary layer generated plays a crucial role in changing the flow physics and deviation from inviscid model.

- 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)
- Batra, N., <u>Ehrhardt, L.</u>, Sun M., Hrhardt, L.: Effects of Fine Structure of Textile on Shock Wave Propagation, *Proceedings of Japanese Shock Wave Symposium, March*, Sendai, (2018).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J17L041
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
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

マッハ数 1.9 と 3.2 の気流中において,同条件のエネルギー付加した場合の抗力低減効果 について実験的に検証し(研究成果[1]),実験では大きく条件の変えることのできない気流マ ッハ数依存性については,数値解析を用いて効果を検証した.実験と数値解析で得られた結 果は,マッハ数の増加とともに抗力低減効果が大きくなるという同様の傾向を示しており, 数値解析から得られた結果を用いて抗力低減モデルの構築に取り組んでいる.

エネルギー付加によって形成される高温低密度バブルの温度・密度を数値解析から評価し、 バブルと衝撃波の干渉を Riemann 問題として解くことにより、図1のような波動線図が得 られる.この波動線図から得られる衝撃波の軌跡と、実験・数値解析から得られた単パルス エネルギー付加の場合の衝撃波の軌跡を重ねると、図2に示すようによく一致する傾向が得 られた.この解析から100 µs 程度の時間、衝撃波背後の圧力が5%緩和されることにより、 抗力が低減すると見積もることができ、繰返しエネルギー付加の効果は衝撃波が緩和される 時間と繰返しエネルギー付加の間隔によって見積もることができる.一方、繰返しエネルギ ー付加の間隔が短くなると、衝撃波が弱められている間に次の高温バブルが衝撃波と干渉し、 さらに衝撃波が弱められるという現象が起こる.このような現象についても前の高温バブル によって弱められた衝撃波と高温バブルの干渉として Riemann 問題を繰返し解くことによ って抗力低減量を見積もり、モデル化を検討している.

3. 研究目標の達成状況

2に示すように、単一パルスでの衝撃波ー高温バブル干渉を Riemann 問題として解析する





図1:衝撃波-高温バブル干渉の波動線図

図2:衝撃波ー高温バブル干渉による衝撃波の 軌跡(Analysisは図1の先頭衝撃波と同一)

ことで、衝撃波が弱くなる現象は再現することが可能であり、弱められた衝撃波背後の流れ 場の条件から抗力低減量を見積もることが可能となった.一方、同様の解析を繰返しエネル ギー付加の場合に適用する際には衝撃波の挙動が一致しておらず、非線形な効果を考慮する 必要があり、抗力低減モデルを確立するには至っていない.

4. まとめと今後の課題

本研究では、実験から得られた抗力や流れ場の様相を数値解析で再現し、数値解析から実 験では得ることはできない流れの状態量や、実験することのできない気流条件での数値解析 を検証、さらに実験と数値解析から得られた結果を用いてエネルギー付加による抗力低減方 法のモデル化に取り組んだ.これまでに単一パルスのエネルギー付加の場合は解析から得ら れた衝撃波の挙動と実験・数値解析から得られた衝撃波の挙動がよく一致する結果が得られ た.一方、繰返しエネルギー付加の場合は、衝撃波の挙動が一致しておらず、今後は繰返し エネルギー付加の非線形効果も考慮したモデル化が課題である.

5. 研究成果(*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- A. Iwakawa, T. Shoda, R. Majima, H. S. Pham, <u>A. Sasoh</u>: Mach Number Effect on Supersonic Drag Reduction using Repetitive Laser Energy Depositions over a Blunt Body, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 60, No. 5, (2017), pp. 303-311.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
 - なし
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許) なし(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

課題番号	J17L042
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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 で自由飛行する球周りの衝撃波離脱距離が有限の値を持つ実験結果が報告されている.マッ ハ1.0近傍は非定常性の高い速度領域であると予測され、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っ たと考えられる.本研究では、この仮説の実証を目的とし、流れの非定常性が衝撃波離脱距 離に与える影響を評価する.

2. 研究成果の内容

定常流れでの衝撃波離脱距離は物体の密度に依存しないため、同一形状で密度の異なる物 体周りの衝撃波離脱距離の差は、物体の減速すなわち流れの非定常性の影響のみ受ける.こ の着眼から、アルミニウム製とポリアセタール製の密度の異なる球状飛行体を弾道飛行装置 で射出し,減速を伴う飛行体の非定常衝撃波離脱距離物体を可視化計測した.現在まで十分 な計測データの蓄積に成功した. 自由飛行する物体の運動方程式と可視化写真をフィッティ ングさせることで,式(1)示す飛行体の減速に関する係数αを取得した.ここで,ρ, Cp, S, mはそれぞれ雰囲気密度,飛行体抗力係数,飛行体断面積,飛行体質量である.図1に各実 験の係数 αの結果を示す.飛行体速度範囲での抗力係数は一定とみなせるため、各実験のフ ィッティング時の誤差が最も少なくなる αの値が, 各材質の αの真値とみなした. 図2に各 実験の係数 α の誤差を示す.表1に得られた α の真値を示す.昨年度報告した非定常衝撃波 離脱距離モデルの予測値と実験値の比較を図3に示す. モデルの予測値は実験値とよく一致 しており、実験で衝撃波離脱距離が有限の値をもつ原因は、流れの非定常性であるという仮 説の実証に成功した.また、過去の報告から得られた定常流れの衝撃波離脱距離と、本研究 で得られた非定常衝撃波離脱距離の比較を図4に示す. 定常と非定常の衝撃波離脱距離の値 は、M=1.05 を閾値に差が出ており、流れの非定常性が無視できなくなる臨界マッハ数は M =1.05 である.

$$\alpha = \frac{\rho C_D S}{2m} \tag{1}$$







図2:各実験での係数αとフィッティング時の誤差

表 1: 各材質の係数 α の真値 material [1/m] Aluminum 0.060 Polyacetal 0.082



(a) Aluminum(b) Polyacetal図3:非定常衝撃波離脱距離のモデル予測値と実験値

図4:定常と非定常の衝撃波離脱距 離の比較(差が出始めるマッハ数)

3. 研究目標の達成状況

衝撃波発生物体の減速による流れの非定常性を考慮した衝撃波離脱距離モデルを作成し、弾道 飛行装置実験によってモデルの妥当性を実証した.これにより本研究目標は達成された.流れの 非定常性が無視できなくなる臨界マッハ数が M=1.05 であることが示唆され、音速近傍で飛行す る航空機の不安定速度領域が判明した.

4. まとめと今後の課題

流れの非定常性が衝撃波離脱距離へ与える影響を定量的に予測するモデルを作成し、実験で実 証した.衝撃波離脱距離は物体の大きさにも依存するため、本研究で得られたモデルに物体の大 きさの影響を追加することで、より一般化されたモデルへ発展させることが今後の課題である.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] 菊池崇将, 國分智晴, 大谷清伸: 自由飛行する球の衝撃波離脱距離計測(第3報), 平成29年 度衝撃波シンポジウム, (2018), 3C3-3.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J17L046
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year (progressing)

Physicochemical Modelling in Computations of High-Enthalpy Hypersonic Flows with Strong Shock Waves

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

1. Purpose of the project

The principal goal of this project is a validation of mathematical models describing processes in high-enthalpy non-equilibrium flows around a re-entry capsule. Appropriate choice of these models plays the key role for the prediction of surface characteristics of re-entry capsules, which are especially important at the first stage of the re-entry capsule design and prediction of blackout.

2. Details of program implement

The flow around the capsule (W. Grantham, NASA TN D-6062, 1970) is considered. This capsule is a cone of length 1.295 m, apex angle 9 degree, and spherical bluntness of the nose part with a radius of 15.25 cm. Figure 1a shows the computational domain and the electron density around the capsule for the flight altitude h=77 km. In the flight experiment, the capsule surface was equipped with reflectometers (y_1 - y_4 in Fig. 1) whose measurements were used to determine the maximum of electron density around the capsule.

We consider air mixture, which is considered as a five-component (N₂, O₂, NO, N, O) air mixture extended by three ions (N₂⁺, O₂⁺, NO⁺), where reactions of dissociation, exchange, associative ionization and dissociative recombination take place. The Navier—Stokes computations were performed for conditions corresponding to different flight altitudes *h*. This report contains two cases: h=71 km ($p_{\infty}=1.477$ Pa) and h=77 km ($p_{\infty}=3.974$ Pa). In all cases, the free-stream velocity was set to $u_{\infty}=7650$ m/s. The free-stream consisted of molecular nitrogen and oxygen with molar fractions $x_{N2}=78.3$ and $x_{O2}=21.7$, respectively. The free-stream parameters were imposed at inflow boundary; all variables were extrapolated from the computational domain at outflow boundary. No-slip conditions were imposed on the surface ($T_w=1000$ K); neutralization was also used. A structured hexahedral grid condensed toward the capsule to resolve the boundary layer was used. Grid convergence study was performed in order to ensure that the numerical solution was grid independent.

The gas near the vehicle is weakly ionized and can be considered as quasi-neutral plasma hence the concentration of electrons is calculated as the sum of all type of ions. Electron-vibrational energy exchange between the electrons and vibrational mode of molecular nitrogen goes very fast in air plasma, therefore in dissociative recombination reactions the vibrational temperature of molecular nitrogen is used instead of electron temperature. The translational-vibrational energy exchange is simulated by Landau—Teller model, where relaxation time is computed with the Millikan—White formula coupled with Park's high-temperature correction. Dissociation rate constant is calculated with one of θ -model, Kuznetsov or Treanor—Marrone (TM) two-temperature models. The other chemical reactions are calculated with Arrhenius law. In order to calculate vibrational energy loss we assumed harmonic oscillator model and Boltzmann distribution of vibrational levels, whose number was limited to the level of dissociation energy. Dissociation rate on each vibrational level was computed with Treanor—Marrone model modified for state-to-state kinetic. Summation over all vibrational levels gives total vibrational energy loss.

Results of numerical simulation are compared to flight data in Fig. 1. Electron density distributions along the y_1 axis computed with different models for h=77 km are rather different, as shown in Fig. 1b. The reason of this can be explained as follows: Different models of dissociation result in different mixture composition and in particular in atomic nitrogen N and oxygen O. Thus, the reaction of ionization with lower activation energy (N+O→NO++e) goes differently for different models of dissociation. At the same time, electron density peaks are very close to each other for all models, allowing one to predict the blackout. Electron density distributions computed with Treanor—Marrone are given in Fig. 1c for all reflectometers for h=71 km. Computed electron density peaks are close to the flight data.



Figure 1 : Results of numerical simulation compared to flight data

3. Achievements

The expected results were achieved completely.

4. Summaries and future plans

Numerical simulation allows providing a good agreement of the electron density maximums around body entering in Earth atmosphere at the speed close to the orbital velocity. All of the considered models can be used to predict blackout phenomenon accurately, however, other flight data should be found to validate models of vibration-dissociation coupling accurately.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] <u>G. Shoev, Ye. Bondar, P. Vashchenkov</u>, S. Yonemura: Computation of Weakly Ionized Flows around Re-entry Bodies at Orbital Velocity, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 162-163.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J17L050
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2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*†, 西川 遼祐*, 澤原 雅隆*, 大林 茂**†† *電気通信大学大学院情報理工学研究科, **東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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を提案する.本研究では、プラットフォームとして用いる LTA (Lighter-Than-Air)機体形状の空力設計を行う.本年度は3種に大別される断面形状に対して空力評価を実施する.また、本枠組みで後流を始めた実験グループとのデータを比較することも併せて実施する.これにより、Rockoonシステムに替わる高頻度低コスト宇宙輸送射場を構築し、再使用型・使い捨て型と異なる新たな宇宙輸送システムの実現を図る.

2. 研究成果の内容

考案した係留式高層 LTA プラットフォームシステムに用いる LTA 機体形状候補 3 形態(軸対称,非軸対称,ハイブリッド)に対して 3 次元 CFD 解析を行い,空力性能を比較した. その結果,以下の知見を得た.

- 軸対称・非軸対称・ハイブリッド3形態の比較(図1は各形態後方での剥離の様子)
 - ▶ 軸対称より他2形態ではCL増加が可能
 - ハイブリッドは C_Lが非軸対称より大きいが、C_Dも大きく L/D では非軸対称が 勝る.
 - ▶ ハイブリッドは、後方形状変更により C_D抑制の可能性がある.
- 非軸対称3形状の比較
 - ▶ 断面を三角形に近づけることで、側面で剥離渦を発生させ C_Lを増加可能
 - ▶ 渦発生には、断面角部の曲率と迎角に閾値が存在する可能性
- ハイブリッド3形状の比較
 - ▶ 中央エンベロープ高さが最低の形状が最大 C_Lを達成する.



図1: 迎角 15 deg での機体後方の剥離の様子.

3. 研究目標の達成状況

Rockoon 方式に替わる宇宙輸送機の射場実現に向け、空力形状の概念設計を実施し指針となる知見を得た.ゴールに辿り着いた訳ではないため、達成度は50%の道半ばであるが、実施すべき課題が明確になった.

4. まとめと今後の課題

本研究では、高層プラットフォームの実現を最終目標とし、考案した係留式高層 LTA プラットフォームシステムに用いる LTA 機体形状候補 3 形態(軸対称,非軸対称,ハイブリッド) に対して CFD 解析を行い、空力性能比較を行った.本研究で用いた形状は、前後対称かつ コックピットや固定翼を省略した簡易モデルである.しかし、今回の結果から、ハイブリッドでは簡易化した後部形状によって C_Dの増加が示された.今後は、より実際の運用を考慮した形状で解析を行い、機体形状本来に近い空力特性を把握し、比較を行う必要がある.

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)

- <u>Chiba, K., Nishikawa, R.</u>, Onda, M., Satori, S., and Akiba, R.: Aerodynamic Influences on a Tethered High-Altitude Lighter-Than-Air Platform System to Its Behavior, *Aerospace Science and Technology*, vol.70, (2017), pp.405-411.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] 柳田大輝,池田悠登,<u>千葉一永</u>,三橋龍一,佐鳥新:画像解析による係留式高層プラットフ オームの飛行安定性の評価,日本航空宇宙学会第48期年会講演会,(2017).
- [3] Que, T. T., Yanagida, H., Ikeda, Y., Satori, S., Mitsuhasshi, R., <u>Chiba, K.</u>, Ito, T., Small Satellite Launch System by Aerial Launch Platform. 31st International Symposium on Space Technology and Science, (2017).
- [4] 柳田大輝, 池田悠登, Que Ting Ting, 佐鳥新, 三橋龍一, <u>千葉一永</u>: 動画像解析を用いた 係留式飛行船の飛行安定性の評価方法について, 2017年電子情報通信学会ソサイエティ大 会, (2017).
- [5] 柳田大輝, 池田悠登, Que Ting Ting, 佐鳥新, 三橋龍一, <u>千葉一永</u>: 画像解析による係留 式飛行船の運動解析, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, (2017).
- [6] <u>Nishikawa, R., Sawahara, M., Chiba, K.</u>, Yanagida, H., Satori, S., and Obayashi, S.: Comparison of Aerodynamic Performance of Lighter-Than-Air Vehicles for a Tethered High-Altitude Platform System, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.40-41.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許)

なし

(受賞)

電気通信大学学生表彰(西川遼祐), 2018年3月23日, 電気通信大学.

(マスコミ発表)

なし

Project code	J17L054
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

Combustion Characteristics of Biogas at Various Pressures

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

1. Purpose of the project

The availability of fossil fuels becomes the world attention as limited and non-renewable energy sources. Biogas is the solution to this problem. Biogas does not contribute to the increase in atmospheric carbon dioxide due to the origin of the raw material which originates from organic sources with a short carbon cycle. Laminar burning velocity, Markstein length and flammability characteristics are important parameters of fundamental laminar combustion characteristics. The purpose of this collaborative research is to explore the characteristics of biogas at various pressure and equivalence ratios using a constant volume high pressure combustion chamber at IFS.

2. Details of program implement

In this collaborative research, spherically propagating laminar flames under various pressures were observed. Experiments were conducted using the high pressure constant volume combustion chamber at the Institute of Fluid Science, Tohoku University. The biogas supposed in this study is the mixture of methane, carbon dioxide and nitrogen. However, the nitrogen concentration in the biogas is relatively small. So, in this study, the biogas is assumed to be the mixture of methane and carbon dioxide. In this study, CO_2 (purity: 99.995%) diluted CH_4 (purity: 99.9%)/air mixtures were investigated.

The mixtures (fuel, dry air and diluent (CO₂)) were ignited by two spark electrodes at the center of the chamber and the spherically flames propagates. The chamber has two optical windows made of quartz glass oppositely and the propagating flames can be observed via the optical windows. The Schlieren technique with a continuous light source and a high-speed camera (Photron, FASTCAM Mini AX) was employed in order to observe the spherical flame inside the chamber. Since the observation range (up to 60 mm in diameter) was small enough compared to the volume of the chamber, it is assumed no pressure rise within the flame observation range. The equivalence ratio and initial mixture temperature was set to 1.0 and 298 K, respectively. The CO2 ratio, Z_{CO2} (=[CO₂]/([CO₂]+[CH₄]), here [x] is the mole concentration of species x) was varied from 0.3 to 0.7. Initial mixture pressure, P_i , was set to 0.1, 0.3 and 0.5 MPa.

The flame propagation speed, S_N (=d r_{sch} /dt), and the flame stretch rate, ε (=2 S_N/r_{sch}), were evaluated from the temporal change of flame radius, r_{sch} , was evaluated from the acquired Schlieren images. The unstretched flame speed, S_S , were evaluated using liner or non-liner relationship between S_N and the flame stretch rate. The

burnt gas Markstein length, L_b , was also evaluated from the relationship of S_N and ε . Unstretched laminar burning velocity, S_L , was obtained from S_S and the density ratio of burnt mixture and unburnt gas.

3. Achievements

Figure 1 shows the variations of unstretched laminar burning velocity, S_L , with the CO₂ ratio under various initial mixture pressure. The unstretched laminar burning velocity decreased with an increase in the initial mixture pressure and the CO₂ ratio. The burnt gas Markstein length increases with an increase in the CO₂ ratio but decreases with an initial mixture pressure. In fundamental aspects of fuel, influence of CO₂ and initial mixture pressure on the combustion characteristics have been discovered as well. These results are important for the understanding of combustion characteristics of low calorie fuel.



Figure 1: (Left) Variations of unstretched laminar burning velocity, S_{L} , under various CO₂ dilution ratio, Z_{CO2} . (Right) Variations of burnt gas Markstein length, L_{b} , under various CO₂ dilution ratio, Z_{CO2} . The lines in the left figure also shows the unstretched laminar burning velocity evaluated from numerical simulation with the detailed reaction mechanism (GRI-Mech 3.0).

4. Summaries and future plans

The laminar burning velocity and the burnt gas Markstein length of an artificial biogas were experimentally clarified evaluated. For future plans, the lean and rich mixtures combustion characteristics of the biogas will be experimentally examined at various pressure conditions using a high pressure constant volume combustion chamber at IFS. In addition, the effects of carbon dioxide as the biggest inhibitor components on the combustion characteristics of the biogas 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] A. Hayakawa, E.C. Okafor, <u>W. Anggono</u>: Effects of CO₂ Concentration on Flame Propagation Chracteristics of CH₄/CO₂/Air Laminar Premixed Flames under Various Pressures, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 12-13.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17L058
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	3rd year

Investigation of Nozzle Flows at Low Reynolds Numbers

Yevgeniy Bondar*†, Kaoru Maruta**†† Alexey Kudryavtsev*, Anton Shershnev* *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, SB RAS **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The main goal of the present projects is to investigate numerically the unsteady starting process in the plane and axisymmetric micronozzles and to evaluate the influence of the rarefaction on the flow structure.

2. Details of program implement

The unsteady starting process in plane wedge-like and axisymmetric conical supersonic micronozzles with a throat 200 μ m width was simulated numerically using continuum and kinetic approaches. Continuum simulations were be performed using the Navier-Stokes equations with velocity slip and temperature jump conditions on the nozzle walls. Kinetic simulations were be based on the direct deterministic solving of the equation for the velocity distribution functions with different models of the collisional term.

In the computations the shock wave was generated by the discontinuity breakdown in the stagnation chamber. The pressure drop corresponds to shock wave Mach number $M_s = 1.5$. The computations on the basis of NS equations and model kinetic equations were performed for the conditions corresponding to the Knudsen number $Kn_R = 0.0214$ based on gasdynamic parameters in low-pressure section. Simulation using the Boltzmann equation were carried out for the Knudsen number $Kn_R = 0.1$. The nozzle wall temperature in all cases was equal to the stagnation temperature.

In continuum solver convective terms were calculated using a MUSCL (monotonic upstream-centered scheme for conservation laws) TVD (total variation diminishing) shock-capturing scheme, while kinetic solver used a high-order WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) shock capturing method. Time integration in both methods was performed using explicit Runge-Kutta TVD scheme of 2nd order. The collision integral of the Boltzmann equation was calculated using conservative numerical scheme with interpolation procedure proposed by Varghese, which ensures the conservation of mass, momentum and energy.

In NS and ES model simulations the computational grid in coordinate space consisted of 608×48 points, and grid in velocity space consisted of 65×65 points. The Boltzmann equation is solved on the grid 336×32 points in coordinate space, and $16 \times 16 \times 16$ points in the velocity space.

Figure 1 shows typical result of numerical simulation. The local Mach number isolines obtained in continuum and kinetic simulations at Knudsen number $Kn_R = 0.0214$ at the time instant when primary shock wave exits the nozzle. It is

evident that both approaches are in good agreement in terms of overall flow pattern. Minor discrepancies can be seen closer to nozzle exit where flow becomes rarefied. The boundary layer developing behind the propagating primary shock wave separates at some distance from the nozzle throat. It shows that secondary shock is strong enough to cause separation in viscous low-Reynolds number flow.



Figure 1: Comparison of local Mach number isolines in continuum and kinetic computations.

The viscosity drastically changes the character of flow and kinetic approach predicts slightly smaller increase of the pressure in the secondary shockwave, which remains smaller up to the primary shock wave. Nevertheless the results of continuum and kinetic simulations are in fair qualitative and quantitative agreement.

3. Achievements

All expected results were fully achieved during the course of the project.

4. Summaries and future plans

Unsteady starting process of micronozzle was studied numerically on the basis of continuum and kinetic approaches. Numerical simulations were performed using Euler equations, Navier-Stokes equations with velocity slip and temperature jump boundary conditions, relaxation-type kinetic equation with ellipsoid statistical model of the collisional term, and the Boltzmann equation.

Results show that even at low Reynolds numbers moderately intense shock wave with Mach number Ms = 1.5 leads to the boundary layer separation. The separation occurs after the interaction of the strong secondary shock wave, which in a viscous rarefied flow degenerates into a relatively smooth pressure increase.

- 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, <u>Yevgeniy Bondar</u>, <u>Alexey Kudryavtsev</u>, <u>Anton Shershnev</u>: Investigation of nozzle flows at low Reynolds numbers, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 182-183.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17L061
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	2nd year

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

Adrian Sescu*†, Xiao Wang**, Shanti Bhushan***, David Thompson* Bukhari Manshoor ****, Yuji Hatori****†† *Department of Aerospace Engineering, Mississippi State University **Center for Advanced Vehicular Systems, Mississippi State University ***Department of Mechanical Engineering, Mississippi State University ***Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The progress on the application of a coupling between hybrid RANS/LES method and stochastic modeling to aeroacoustics calculations is reported here. Within this approach, the low frequency content of the acoustic source is predicted via hybrid RANS/LES approach, while the high frequency content, representing contributions from unresolved flow scales, will be modeled using stochastic modeling. The research was focused on two sets of simulations: the sound generation by a cylinder at low Reynolds number, and the prediction of noise from an axisymmetric jet. The numerical results from the former test case were compared to results obtained from direct numerical simulations at different Reynolds numbers.

2. Details of program implement

The postdoc at IFS performed direct numerical simulations of the sound radiation around a cylinder, while a research faculty performed the same simulations using DHRL and other hybrid RANS/LES approaches for comparison. An exchange of data was made throughout the year. A PhD student from the non-IFS institution worked on the noise radiation from an axisymmetric jet; he implemented a linearized Euler equation algorithm and the stochastic model into an existing LES solver. The PhD student also presented the research at two international conferences (Acoustical Society of America Meeting and AIAA Scitech Forum).

3. Achievements

Some results from the collaborative project are included in this section. In figure 1, we show contour plots of acoustic pressure from DNS (left) and DHRL (middle), as well as sound pressure level spectra (right) from a probe located at 80 diameters from the center of the cylinder, in the normal direction to the free-stream flow.



Figure 1: Comparison of distributions of wall shear stress on the central cross-section of a curved pipe at four time steps.

Figure 2 shows the results from the noise generation form an axisymmetric jet, where the small scales of turbulence were provided from the stochastic model. The left part of the figure shows contour plots of acoustic pressure in gray for pure LES, while the middle part shows the LES enhanced by stochastic velocity fluctuations. For a quantitative measure of the additional higher-frequency content, SPL spectra taken from a certain observation point are shown on the left part of figure 2. It shows that the stochastic model enhances the high frequency content of the radiated noise, which is expected. The results are also compared to the spectrum calculated from another LES performed on a more refined mesh – contour plots for this case are not shown here for brevity – to reveal that the added stochastic fluctuations matches the high-frequency in the spectra.



Figure 2: Comparison of distributions of wall shear stress on the central cross-section of a curved pipe at four time steps.

4. Summaries and future plans

In the third year, the effort will be focused on improving the stochastic model since it was observed that the convection of the synthetic flow structures are not captured appropriately. A AIAA paper about the comparison between the DNS results and various hybrid RANS/LES approaches will be presented at AIAA Aviation forum in Atlanta, GA. Two journal articles are expected to be submitted, one on the sound generation by a cylinder and the other one on the noise generation from a axisymmetric cylinder. The method will be also tested on a free shear layer, which is a less demanding test case with respect to DNS. The non-IFS responsible member will attend the ICFD in Sendai to present the results, and discuss about the research with the IFS responsible member.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] J. Blake, A. Sescu, D. Thompson and Y. Hattori: Coupled LES/Stochastic Modeling Approach to Jet Noise Prediction, *Proceedings of AIAA Scitech Forum 2018*, Kissimmee, FL (2018), AIAA Paper 2018-1248.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [2] J. Blake, Wang, X., B. Manshoor, S. Bhushan, D. Thompson, A. Sescu, and Y. Hattori: Aeroacoustics of Low Reynolds Number Flows Via Dynamic Hybrid RANS/LES and Stochastic Modeling, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan (2017), pp.190-191.
- [3] J. Blake, V. Sassanis, D. Thompson, A. Sescu and Y. Hattori: Jet noise prediction via coupling large eddy simulation and stochastic modeling, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 42, (2017), pp. 2491-2492.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J17L062
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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*†,秋永 剛*,高橋 雄太郎* 岡島 淳之介**††,小宮 敦樹** *秋田大学大学院工学資源学研究科,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

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.本研究では、フリーで汎用性の高い熱流体解析ソフトである OpenFOAM を用いた解析を 行うと伴に、実験により回転する円すい外表面を上昇する液膜流の熱流動特性を調べた.

2. 研究成果の内容

29年度は、上昇液膜の膜厚を境界層近似を用いて理論的に求めた.その結果と他の研究者の 実験結果との比較を図1に示す.液膜流の特性を表わす特徴的なパラメータを導出し、横軸に 取ることで、結果がよくまとまっていることがわかる.さらに、粘度の変化に対して液膜流の 揚水が生じる揚水開始回転数を調べた.図2にその結果を示す.粘度が水に近い場合には液は 膜状に揚水され、粘度が大きくなると揚水開始回転数の値が大きくなる.さらに粘度が大きく なると糸状に揚水される現象が観察された.図2では、赤点で示された線が膜状揚水の開始点 であり、青点で示された線が糸状揚水の開始点を表わしている.



図1:回転円すい外表面の上昇液膜流の膜厚



図2: 揚水開始回転数と粘度との関係

3. 研究目標の達成状況

本研究では、フリーのソフトである OpenFOAM を用いた数値解析により、回転円すいの外表 面を上昇する液膜流れの計算を行っている. 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について、実験で得られた結果をある程度再現することが可 能であった. さらに、境界層近似を用いた理論的な取り扱いにより、上昇液膜流の膜厚の理論値 を求めた. この結果と実験結果との比較も良好な一致を示した. また、揚水開始回転数を実験的 に求めることも行い、概ね研究目標の達成は良好であったといえる.

4. まとめと今後の課題

実験結果では、粘度が比較的大きな場合に糸状揚水現象が出現した. この糸状揚水現象を OpenFOAM を用いて再現を行うことが今後の課題である. 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の複雑な現象をある程度再現することができるた め、本研究では非常に強力な研究ツールとなり得る.

5. 研究成果(*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] <u>T. Adachi, Y. Takahashi</u>, J. Okajima: Film flow thickness along the outer surface of rotating cones, *European Journal of Mechanics*, B/Fluids 68 (2018), pp. 39-44.
- [2] <u>T. Adachi, Y. Takahashi, T. Akinaga</u>, J Okajima: Effect of Viscosity on Pumping-Up of Newtonian Fluid Driven by a Rotating Cone, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, Vol.06 No.02 (2018), Article ID:83717, 9 pages.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] <u>Y. Takahashi, T. Adachi</u> and J. Okajima: Power consumption of liquid atomization device by using rising film flow along a rotating cone and disk, *2nd International Conference on Fluid Dynamics & Aerodynamics*, Rome, Italy, (2017), p.64.
- [4] Y. Takahashi, T. Adachi, T. Akinaga and J. Okajima: Effect of Viscosity on Pumping-up of Newtonian Fluid Driven by Rotating Cone, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2017), pp.170-171.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許)

なし

(受賞)

日本機械学会三浦賞,高橋雄太郎,2018年3月,日本機械学会.

(マスコミ発表)

なし

課題番号	J17L063
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2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*†, 川口 美沙* 船本 健一***, 早瀬 敏幸**†† *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

サスペンションのレオロジーを知ることは、粉体工学(スラリー)、塗装工学(ペンキ)、生体 工学(血液)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、同式は適用範囲が狭く限定的で あり、高濃度サスペンションに対して画一的な解釈を与えることが困難である.また生体工学に おいては、赤血球の流下に伴う血管壁面せん断応力の時間・空間的な変化を調べることが、微小 循環系を考察する上で重要であるが、同式からは実効粘度の空間分布を知ることも不可能である. 本研究では、微細流路内におけるミクロな剛体粒子の挙動がマクロな流体のレオロジーに与える 影響を考察し、粒子の流路幅に対する相対的な大きさ(コンファインメント)がサスペンション の非ニュートン性に与える影響を調べた.

2. 研究成果の内容

図1に、面積分率 ϕ = 25%、レイノルズ数 Re = 1における、軸方向速度分布図(上)ならびに 速度プロファイル(下)を示す.粒子の半径 r と流路幅 21 との比をコンファインメント C(=r/21) と定義し、流路幅に対して小さい粒子(E: C=0.02)と大きい粒子(f: C=0.04)の結果を示 す.このとき、面積分率が共に25%となるように、粒子の個数を調整した.また、粒子の初期位 置は均一とし、レイノルズ数の代表長さは流路幅とした.粒子は規則正しく流下しており、粒子 濃度プロファイルは一様であった. これは, 粒子レイノルズ数が十分に低いため粒子に働く揚力 が小さく,マイグレーションが起こらなかったためである.粒子の運動から推定した速度プロフ ァイルをべき乗則流体のそれと比較し、最小絶対値法により得られたべき乗則指標 n を図中に示 す.nが1未満であることから、共にずり流動化(チクソトロピー)の性質を示していることが 分かる.これは,血液などに見られるようなサスペンション特有の性質である.また,べき乗則 指標 n から判断すると、相対的に大きい粒子を含むサスペンションの方が強い非ニュートン性を 示していることが分かる. 微小循環系のレオロジーにおいて, ファーレウス・リンドクヴィスト 効果が有名であるが、これは、血球成分が軸集中を起こすことにより見かけ上の粘度が下がる現 象である.すなわち,血球成分の空間分布(濃度分布)の非一様性が相対粘度の減少を誘発させ る現象であるが、本研究により、粒子が均一に分布している場合においても、粒子の相対的な大 きさが増すと、ずり流動化の性質が促進される(=相対粘度が下がる)可能性が示唆された.


コンファインメント C=0.02

コンファインメント C=0.04

図1: 微細流路内における軸方向速度分布図(上)ならびに速度プロファイル(下). 面積分率 *φ* = 25%, レイノルズ数 *Re* = 1.

3. 研究目標の達成状況

1年目は粒子の流下に伴う壁面せん断応力の時間・空間分布の変化を評価し、2年目は粒子の 流路幅に対する相対的な大きさの影響を考察した.今年度はこれに加えて、半径方向の粘度分布 評価を実験研究と組み合わせて行う予定であったが、残念ながら来年度以降の課題となった.

4. まとめと今後の課題

微細流路内におけるミクロな粒子の挙動が、マクロな流体のレオロジーに与える機構は複雑で ある. 今後は、粒子の弾性や粒子内外の粘度比等の影響を含めた解析が期待される.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] <u>M. Kawaguchi, T. Fukui, K. Funamoto</u>, and T. Hayase: Estimation of Viscosity Profiles of Semidilute Suspensions by Computational and Experimental Studies, *Proceedings of* the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp. 78-79.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17L067
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	2年目

殺菌用大気圧低温プラズマ照射による水中の電荷輸送機構

Mechanism of Charge Transfer in Water by Exposure to a Cold Atmospheric Plasma for Sanitization Device

> 佐藤 岳彦*†, 清水 鉄司**†† 張 家興*** *東北大学流体科学研究所, **産業技術総合研究所 ***東北大学大学院工学研究科 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

院内感染がますます大きな問題となり,抗生物質耐性菌が増加しているため,新しい殺菌 方法が望まれている.低温大気圧プラズマ(CAP)は,抗生物質耐性菌を含めた様々な細菌 を不活化させる能力を持っている.CAPの使用を最適化するためには,プラズマ生成,化 学,および反応種の輸送を適切に制御することが不可欠である.プラズマ医療,特に生体内 の治療は,表面が液体で覆われている.そのような表面へCAPを適用させると,生成され た荷電粒子により表面が充電される.この充電はプラズマの生成に影響を与えるが,この時 電荷がどのように移動するかその過程を知ることが,生体応答やプラズマ生成の制御におい て重要となる.さらに、プラズマ自体が,存在する電界によって運ばれた気体流を生成する ため,反応種の輸送にも影響を与える.この研究では,CAPにより処理された水面に発達 させた一時的な電荷分布を解析し輸送機構を明らかにすること,および CAPを用いた滅菌 装置を最適化することを目標とする.

2. 研究成果の内容

昨年度に作製した装置の大きさが直径 21 cm のガラス容器の結果より,電荷輸送遅れ時間に 壁から距離の影響があることが示されたため, 一辺 50 cm の正方形底面を有するアクリル容器 を新たに作製した.この装置を利用し,壁の影 響が小さい容器中心領域である,放電電極位置 L=15 cm,放電電極とプローブの距離 d=20 cm に おける電荷輸送遅れ時間の測定を行った.図 1 に水の深さに対するプローブ電位が最大となる までの時間の変化を示す.水の深さが深くなる ほど電位が最大になるまでの時間が短くなること が示されている.これは,電極位置とプローブ位



置の間の電流が流れる断面積が増大し、抵抗が小さくなるため時定数 RC が小さくなり、時間 が短くなると考えられる.

3. 研究目標の達成状況

放電部からの電位が最大になるまでの時間についてパラメータを変化させ計測を行い,水 深が深いほど遅れ時間が短くなることを明らかにした.また,電気回路的な視点からの考察 からある程度説明が可能であることを示すことができた.これより,本研究課題の目標に概 ね達していると考えている.

4. まとめと今後の課題

電気回路的な視点による現象の説明では、電位の遅れ時間が壁からの距離により影響を受けることなどが説明できない. 今後は、電位計測法も含め数値解析との比較も行い、現象をより詳細に解析し、電荷輸送機構の解明を進める.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] T. Okumura, C. Zhou, E. Kubo, <u>T. Shimizu</u>, T. Nakajima, and T. Sato: Electric potential developed by single pulse needle-water discharge, *Applied Physics Express*, Vol. 11 (2018), Article ID: 016201 (4 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] T. Okumura, C. Zhou, E. Kubo, <u>T. Shimizu</u>, T. Nakajima, and T. Sato: Potential formation in water by plasma discharge between needle and water, 4th Japan-Taiwan Workshop on Plasma Life Science and Technology (2017 JTPL), Morioka, Iwate (2017).
- [3] T. Okumura, C. Zhou, E. Kubo, T. Nakajima, T. Sato, and <u>T. Shimizu</u>: Potential Formation in Water by Cold Atmospheric Plasma, *Proceedings of the 14th International* Conference on Flow Dynamics (ICFD-2017), Sendai (2017), pp.326-327.
- [4] T. Sato, N. Kishimoto, Y. Iwafuchi, <u>G. E. Morfill</u>, and <u>T. Shimizu</u>: Reactive Flow Dynamics of Atmosperic Pressure Plasma, *Plasma Conference 2017 (PLASMA2017)*, Himeji, Hyogo (2017).
- [5] T. Sato, N. Kishimoto, Y. Iwafuchi, <u>G. E. Morfill</u>, and <u>T. Shimizu</u>: Formation of Electric Potential in Liquid by Needle-Water Discharge, 10th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT 2017), Taoyuan, Taiwan (2017).
- [6] 奥村賢直,周超一,<u>清水鉄司</u>,中嶋智樹,佐藤岳彦: 針-水面単一パルス放電による水中電 位形成,第19回静電気学会春期講演会,Tokyo (2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
- (特許) なし
- (受賞) なし
- (マスコミ発表) なし

課題番号	J17L068
区分	一般共同研究
課題分野	健康・福祉・医療分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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* *東北大学流体科学研究所,**東北大学大学院医学系研究科 †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.本年度は、不活化効果を高めるための電極形状の最適化を行う.

2. 研究成果の内容

平成 29 年度は, 平成 28 年度まで に開発した小型密閉型プラズマ殺菌 装置の電極形状の最適化について取 り組んだ. 平成28年度では、電極形 状を直線状および鋸歯状とし, 印加 電圧を±1.4 kV_{pp}, 40 kHz でプラズ マを発生させたが、さらなる小型化 やオゾン生成量の増加を目指し、図 1 に示すように電極形状を円形に変 更した. 電極径はΦ10, Φ7, Φ4の 3 種類とした. 図 2 に各電極径に対 する生成ガス濃度の時間変化を示す. 電極径が 10 mm の場合,オゾン濃度 は、最初の 0.5 分で 2500 ppm 以上に 達するが、その後減少し、3 分以降 は検出限度以下となる. NO+NO2は, 最初の1分間は検出限度以下である



Fig. 1 Details of electrode configurations. (a) Glass plate of 1.0 mm in thickness. (b) Alumina plate of 0.2 mm in thickness. (c) Discharge region.

が、2分後に増加を始め、5分後には5500 ppm に達する. 直径7 mm の場合、オゾン濃度は、1分後には3000 ppm 以上になり、2分後に最大値を取ると、その後減少を始め5分後には2500 ppm 程度となる. NO+NO₂は、2分後に増加を始め、5分後には4000 ppm を越える. 直径4 mm の場合、オゾン濃度は、直径7 mm の場合と同様に1分後には3000 ppm 以上になり、2分後



Fig. 2 Concentrations of the ozone and nitrogen monoxide + nitrogen dioxide on the glass plate for the different diameter of the electrodes, 10, 7 and 4 mm, against the discharge time.

に最大値を取ると、その後減少を始め5分後には2500 ppm 程度となる.一方、N0+N0₂は、5 分後においても検出限度以下と大きく低減した.また、直径4 mm の場合の滅菌性能は、気中 で2分、水中で30分と高い性能を示した.これより、電極径4 mm の形状を採用することと した[佐藤,他、静電気学会誌、42 (2018)、pp.27-33].

3. 研究目標の達成状況

本年度は、電極形状の最適化により電極を直径 4 mm の円形にすることで、オゾン濃度の 生成増加や窒素酸化物発生の抑制,高い滅菌性能を達成することに成功した.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、新たに開発した電極によるウイルス不活化効果の評価を実施する.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] T. Sato, K. Okazaki, T. Nakajima, <u>H. Oshitani, M. Okamoto, T. Nagasawa, T. Nakatani, and S. Fujimura</u>: Development of portable plasma disinfection device for contact lens, 5th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatics Technologies for Environmental Application (EAPETEA-5) Abstract Book, Dalian, China, (2017), p.22.
- [2] 岡崎和貴, 佐藤岳彦, 中嶋智樹, <u>押谷仁</u>, <u>岡本道子</u>, <u>中谷達行</u>, <u>藤村茂</u>: 大気圧プラズマ誘 起流によるコンタクトレンズ滅菌装置の開発, 日本機械学会 2017 年度年次大会, Saitama, (2017), Presentation No. S0530101.
- 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	J17L073
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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*,谷口 壮馬*,小宮 敦樹***,岡島 淳之介***† *新潟大学工学部,**八戸工業高等専門学校,***東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

本研究では、金ナノロッド(GNR)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3次元光伝播を解析する.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 GNR 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3次元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温度分布および熱損傷度の変化について評価した.図1および図2に はレーザー治療において GNRs の有無による計算結果の比較を行った.その結果、GNRs の注入は短い照射時間で局所加熱が可能であることがわかった.



図1:GNRの有無による温度上昇特性. y=0mm は皮膚表面を示しており, x=0mm は 軸対称面を示す. レーザースポット半径1.5mm で下側から加熱されている.



図2:GNRの有無による熱損傷度の比較. GNR 有の場合,皮膚表面下1mm に局所的に 熱損傷度3を超え,腫瘍破壊に効果的であることがわかる.

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3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.

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3次元生体伝熱モデルを応用し、血管や腫瘍の形状などさらに現実的な生体モデルについて解析を行う.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

- S. Taniguchi, Y. Nakamura, T. Kogawa, J. Okajima, A. Komiya, S. Maruyama, A. Sakurai: Three-Dimensional Coupled Photon and Bioheat Transport Simulation for Laser Induced Photothermal Therapy, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2017)*, Sendai, (2017), CRF-83, pp.172-173.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17L074
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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*, 馬渕 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

固体高分子形燃料電池触媒層は細孔径が数十~数百 nm のカーボン微細多孔体構造となってお り、その表面をアイオノマーと呼ばれる溶媒分子を含んだ高分子薄膜が覆っている.この触媒層 内部を酸素が透過し白金触媒へと供給されることで発電が行われているため、触媒層における酸 素輸送抵抗が燃料電池発電効率を低下させている.触媒層内部の酸素輸送抵抗低減に向けて輸送 メカニズムの解明が求められているが、触媒層構造の微細化、複雑化のため詳細なメカニズムは 明らかになっていない.そこで本研究では触媒層内部の酸素輸送メカニズムを解明するために、 内部の輸送現象の支配要因であるアイオノマー膜表面における酸素分子の散乱・表面拡散現象を 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.散乱・表面拡散現象解 析から得られた知見より分子散乱モデルを構築し、触媒層における DSMC 解析により酸素輸送抵 抗に対する表面散乱の寄与を明らかにしていく.

2. 研究成果の内容

今年度はアイオノマー表面での酸素散乱現象について、表面散乱現象とアイオノマー膜構造の 相関について明らかにした.酸素分子はアイオノマー膜表面に衝突時にあまりエネルギー適応し ていない場合でも入射方向に関係なく等方的に反射している.反射エネルギーの散乱方向依存性 を解析すると、適応が進んでいない場合も進んだ場合も反射時のエネルギーは反射方向に対して 依存性がないことが明らかとなった(図 1).この結果から、アイオノマー表面の原子・分子レベ ルの凹凸により等方的に反射となっていると考えられる.また.酸素分子が表面に衝突した際に アイオノマー膜中の分子種によってエネルギー適応具合が異なり、その結果散乱過程が変化して いる結果となった.

3. 研究目標の達成状況

今年度はアイオノマー表面における酸素分子散乱現象について、アイオノマー膜構造の酸素分子 散乱現象への影響について明らかにすることが出来た.これまでの知見と合わせ、酸素分子の表 面入射情報とアイオノマー膜構造を考慮することでアイオノマー膜表面における酸素分子散乱モ デル構築が構築できると考えており、本研究は当初の目的を達成しつつあると認識している.



図1:反射並進エネルギーの散乱角依存性(左:直接散乱過程,右:表面吸着・離脱過程)

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.この解析により、含水率によって決定されるアイオノ マー膜構造と酸素分子の入射条件によって酸素分子の散乱過程、エネルギー適応および反射方向 が決定されることを明らかにした.この知見からアイオノマー膜表面における酸素分子散乱モデ ルを構築し、今後は実際の触媒層構造において散乱・表面拡散現象の寄与を定量的に評価してい く.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- *[1] M. Nakauchi, T. Mabuchi, <u>T. Hori</u>, <u>Y. Yoshimoto</u>, <u>I. Kinefuchi</u>, <u>H. Takeuchi</u> and T. Tokumasu: *ECS Trans.*, 80 (2017), pp. 197-203.
- [2] M. Nakauchi, T. Mabuchi, <u>T. Hori</u>, <u>Y. Yoshimoto</u>, <u>I. Kinefuchi</u>, <u>H. Takeuchi</u> and T. Tokumasu: *Proc. of 6th EFCF*, 4 (2017), pp. 50-56.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
- [3] M. Nakauchi, T. Mabuchi, <u>T. Hori</u>, <u>Y. Yoshimoto</u>, <u>I. Kinefuchi</u>, <u>H. Takeuchi</u> and T. Tokumasu: Molecular Simulations of Oxygen Scattering and Surface Diffusion on Ionomer Surface, 6th European PEFC and Electrolyser Forum, Lucerne, Switzerland, (2017).
- [4] M. Nakauchi, T. Mabuchi, <u>T. Hori</u>, <u>Y. Yoshimoto</u>, <u>I. Kinefuchi</u>, <u>H. Takeuchi</u> and T. Tokumasu: Gas-Surface Study of Oxygen Molecule on Ionomer Surface in Catalyst Layer, 232nd ECS meeting</u>, MD, U.S., (2017).
- [5] M. Nakauchi, T. Mabuchi, <u>T. Hori</u>, <u>Y. Yoshimoto</u>, <u>I. Kinefuchi</u>, <u>H. Takeuchi</u> and T. Tokumasu: Numerical Analysis of Scattering Behavior and Surface Diffusion of Oxygen Molecules on Ionomer Surface, *Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.104-105.
- 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	J17L075
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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*** 金澤 知恵***, 河村 彩***, 安原 重雄**** *東北大学流体科学研究所, **神奈川県立産業技術総合研究所 ***さがみはら表面技術研究所, ****(株)ジャパン・アドバンスド・ケミカルズ †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

シリコンの 100 倍の移動度や鉄鋼の 200 倍の強度を示すグラフェンは様々な応用が期待されているが、その薄膜化には触媒が必要であり、高い成膜温度も必要である.本研究では、シリコン基板や酸化物基板などを始めとして、ペットや紙などのフレキシブルな材料を含む 各種基板上での機能性薄膜の成長過程を理論的に考察することで、グラフェンを含む各種薄膜の成長を目的とする.

2. 研究成果の内容

はじめにシンプルな系として、面心立法格子をもつ酸化マグネシウム(MgO)のシリコン基板 上での安定性について評価した.シリコン基板上に成長した MgO は X 線回折 θ-2 θ 法による 基板垂直方向と面内評価により、図1に示すように単結晶成長していることが分かった.し かし、通常のバルクと比較して、MgO のピークが高角度側にシフトしている.これは、シリ コン基板上に成長した MgO の格子定数が縮んでいることを示している.

Mg0の面内での成長、シリコン格子に対して45度回転する報告が多い.しかし、今回の果からは、Mg0は回転しておらず、cubic on cubic 成長していることも分かった.



図1:X線回折評価(左)通常のθ-2θで表面垂直方向, (右)インプレーンθ-2θで面内での結晶配向性をしめしている. 点線がバルク材のピークの位置を示す

そこで、シリコン基板上での Mg0 の安定性を評価するために、密度汎関数法を用いてシリコン基板上での Mg0 の吸着エネルギーを見積もってみた.その結果を図2 に示した.cubic on cubic 成長の方が安定している結果となり、実験結果と一致することが分かった.



図2:シリコン基板上でのMg0の吸着エネルギー.シリコン基板に対して45度回転するより も、cubic on cubic 成長の方が安定であることを示している.

3. 研究目標の達成状況

酸化物基板上でのカーボン系薄膜の成長についてのシミュレーションも試みたが、振る舞いが安定していないため周期条件を超えて分子が移動してしまった.

4. まとめと今後の課題

シンプルな系であるシリコン基板上での MgO 成長については、実験結果と一致したシミュ レーション結果を得ることができた.しかし、カーボン系膜のシミュレーションでは、カー ボンの安定性が低く、更に周期条件や初期条件などの考察を進めて行く必要がある.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [1] <u>S. Kaneko</u>, K. Satoh, <u>M. Kurouchi</u>, T. Rachi, <u>M. Yasui</u>, C. Kato, S. Tanaka, S. Shawuti, M. Can, P. Mele, T. Tokumasu, <u>R. Sudo</u>, T. Endo: Graphitic spheric ball growth in oxygen atmosphere, *The 25th Annual International Conference on Composites/Nano Engineering (ICCE-25)*, Rome, Italy, July 16 (2017).
- [2] S. Kaneko, R. Sudo, S. Yasuhara, M. Yasui, M. Kurouchi, T. Tokumasu: Theoretical Optimization of Epitaxial Magnesium Oxide Film on Silicon Substrate, *Proc. of the 17th Int. Symp. on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp.102-103.
- [3] Y. Motoizumi, <u>R. Sudo</u>, S. Yasuhara, T. Tokumasu, <u>S. Kaneko</u>: Effect of laser annealing on pencil drown paper, *International Conference on Flow Dynamics (ICFD2017)*, Nov. 1 (2017).
- [4] <u>S. Kaneko</u>, T. Tokumasu, <u>R. Sudo</u>, S. Yasuhara: Constriction of lattice constant in epitaxial magnesium oxide film, *MRS Boston*, Nov. 26 (2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J17L077
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	3rd year

Development of Conservative Kinetic Force Method

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

1. Purpose of the project

Theoretical basis of the Kinetic Force Method is founded on the representation of the collision integral in the Boltzmann equation in a divergence form. Due to this, the opportunity of using quasiparticles for simulations in rarefied gas dynamics was appeared. The distribution function of quasiparticles coincides with the distribution function of real molecules, but their dynamics is qualitatively different. Quasiparticles move along smooth trajectories in the phase space and do not make jumps, as molecules do in collisions. Later by applicants, the kinetic equation for two-particle distribution function was proposed:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{r}_{1}} \cdot \boldsymbol{v}_{1} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{r}_{2}} \cdot \boldsymbol{v}_{2} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{v}_{1}} \cdot \boldsymbol{a}_{1} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{v}_{2}} \cdot \boldsymbol{a}_{2}\right) F = N \,\delta\left(\boldsymbol{r}_{1} - \boldsymbol{r}_{2}\right) \int \frac{d\hat{R}}{2\pi} b\left(\boldsymbol{\mu}, \mathbf{v}\right) \left[f_{1}'f_{2}' - f_{1}f_{2}\right] \tag{1}$$

where

$$f(\mathbf{v}_{1},\mathbf{r}_{1},t) = \frac{1}{N} \int d\mathbf{r}_{2} d\mathbf{v}_{2} F(\mathbf{v}_{1},\mathbf{r}_{1},\mathbf{v}_{2},\mathbf{r}_{2}), \quad f(\mathbf{v}_{2},\mathbf{r}_{2},t) = \frac{1}{N} \int d\mathbf{r}_{1} d\mathbf{v}_{1} F(\mathbf{v}_{1},\mathbf{r}_{1},\mathbf{v}_{2},\mathbf{r}_{2})$$

Instead of Boltzmann collision integral, the equation contains the scattering operator $\hat{\chi}$ in its RHS. This equation after renormalization of the scattering operator, 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. On the bases of this equation, an algorithm was proposed to provide explicit energy and momentum conservation. We present a new form of two-particle kinetic equation in differential approximation to solve relaxation problems under the spherical symmetry. 2. Details of program implement

Under conditions close to equilibrium, for the scattering operator $\hat{\chi}$ one can use the differential approximation:

$$\hat{\chi} = \frac{1}{4} \left\langle 1 - \mu^2 \right\rangle \hat{\sigma}^2, \quad \left\langle 1 - \mu^2 \right\rangle = 2\pi \int_{-1}^{1} \left(1 - \mu^2 \right) b(\mathbf{v}, \mu) d\mu$$
 (2)

We will normalize the distribution functions to the spatial density n. For the case of homogeneous relaxation (the density of particles in space is constant), equation (1) takes the following form:

$$\frac{\partial}{\partial t}F(\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2,t) = \frac{n}{4}\left\langle 1-\mu^2 \right\rangle \hat{\boldsymbol{\sigma}}^2 f(\boldsymbol{v}_1)f(\boldsymbol{v}_2), \quad f(\boldsymbol{v}) = \frac{1}{n}\int d\boldsymbol{v}_2 F(\boldsymbol{v},\boldsymbol{v}_2), \quad F(\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2) = F(\boldsymbol{v}_2,\boldsymbol{v}_1). \tag{3}$$

In the collision variables (v – the relative velocity, w – the velocity of the center of mass), the generator of the group of rotations $\hat{\sigma}$ has the form:

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} \times \mathbf{v}, \quad \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{u}, \quad \mathbf{w} = \frac{\mathbf{v} + \mathbf{u}}{2}$$
 (4)

In order to further reduce the expenditure of calculation time, we consider the case of isotropic relaxation, when the distribution function depends only on the velocity modulus. The one-particle distribution function averaged over all directions of velocity $\langle f \rangle$ can be expressed in terms of the two-particle distribution function averaged over all directions of velocities $\langle F \rangle$, $\langle ... \rangle = \int (...) / d\Omega_v d\Omega_u / 16\pi^2$. Therefore, we can obtain a simplified equation for solving problems of homogeneous isotropic relaxation by averaging the two-particle equation (3) over the directions of the velocity vectors:

$$\frac{\partial}{\partial t}F(\boldsymbol{v}^2,\boldsymbol{u}^2,t) = \frac{n}{4}\left\langle 1-\mu^2 \right\rangle \left\langle \hat{\boldsymbol{\sigma}}^2 \right\rangle f\left(\boldsymbol{v}^2\right) f\left(\boldsymbol{u}^2\right), \ f\left(\boldsymbol{v}^2\right) = \frac{1}{n}\int_0^\infty 4\pi u^2 F\left(\boldsymbol{v}^2,\boldsymbol{u}^2\right) du$$
(5)

After rather cumbersome transformations, the averaged Casimir operator $\langle \hat{\sigma}^2 \rangle$ can be reduced to the form we need:

$$\left\langle \hat{\boldsymbol{\sigma}}^{2} \right\rangle = \frac{1}{6v^{2}u^{2}} \left(v \frac{\partial}{\partial u} - u \frac{\partial}{\partial v} \right) v^{2} u^{2} \left(v \frac{\partial}{\partial u} - u \frac{\partial}{\partial v} \right)$$
(6)

Introducing the notation $F(v,u) = (4\pi vu)^2 F(v^2, u^2)$, $f(v) = 4\pi v^2 f(v^2)$, we obtain an equation for homogeneous isotropic relaxation in an explicitly conservative form:

$$\frac{\partial}{\partial t}F = \left(v\frac{\partial}{\partial u} - u\frac{\partial}{\partial v}\right)\omega(v,u)f(v)f(u), \quad \omega(v,u) = \frac{n}{24}\left\langle1 - \mu^2\right\rangle \left[\frac{v}{f(u)}\frac{\partial f(u)}{\partial u} - \frac{u}{f(v)}\frac{\partial f(v)}{\partial v} + 2\frac{u^2 - v^2}{vu}\right]$$
(7)

The energy of the system of quasiparticles is exactly conserved.



Fig. 1 a) Relaxation of the distribution function represented by 1000 quasiparticles to the equilibrium distribution ($t = 0, 30, 60, 120, \infty$). We used the system of units where collision frequency and mean-square speed are equal to unity b) Comparison of numerical solution (points) with exact one (line) for forth velocity moment.

3. Achievements

A new representation of the two-particle kinetic equation in the differential approximation for solving isotropic relaxation problems is obtained. The equation makes it possible to substantially increase the efficiency of the quasiparticle method.

4. Summaries and future plans

We will consider further improvement of the algorithm of quasiparticles pairs in the framework of Landau approximation for scattering operator in the case of cylindrical symmetry that also 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 Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- *[1] <u>Vladimir Saveliev</u>, <u>Shigeru Yonemura</u>, and <u>Yoshiaki Kawagoe</u>: Pairs of Quasiparticles in the Kinetic Theory Problems with Spherical Symmetry, *Proc. of the 17th Int. Symp. on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), pp. 80-81.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J17L079
Classification	General collaborative research
Subject area	Environment and energy
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	3nd 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 present research focuses on the tip leakage vortex flow using a two-dimensional (2D) hydrofoil with a tip clearance. The same fluids (i.e., ordinary water and hot water) were used to examine the thermodynamic effect. Similar to the present research, experimental studies on the thermodynamic effect of the sheet cavitation in hydrofoils and an analytical study on the thermodynamic effect of the tip leakage vortex cavitation were conducted. However, the thermodynamic effect of the tip leakage vortex cavitation in hydrofoils has not yet been experimentally clarified. The temperature depression inside cavitation, the cavitation-pattern map, cavity aspect, and unsteady characteristics are investigated herein to examine the thermodynamic effect of the tip leakage vortex.

2. Details of program implement

Figure 1 shows the schematic of a closed-type cavitation tunnel. The water temperatures inside the pipes and tanks were controlled using electric heaters. The mainstream velocity was controlled using a booster pump. The pressure inside the tank was controlled using a compressor and a vacuum pump.



Figure 1 : Schematic of the experimental apparatus

3. Achievements

C.C.: Cloud cavitation T.L.V.C.: Tip leakage vortex cavitation c.c. (a) t = 0.000 s(c) t = 0.002s (d) t = 0.003s (e) t = 0.004s (b) t = 0.001s C.C. C.C. C.C. (g) t = 0.006s(f) t = 0.005s (h) t = 0.007 s(i) t = 0.008s (j) t = 0.009s

(k) t = 0.010s (l) t = 0.012s (m) t = 0.014s (n) t = 0.016s (o) t = 0.020sFigure 2: Unsteady cavity behavior at $U_{\infty} = 10$ m/s, $\alpha = 12^{\circ}$, $T_{\infty} = 90$ °C, and $\sigma = 1.75$

Figure 2 show the representative images of the unsteady cavitation during one cycle at $\sigma = 1.75$ for $T_{\sigma} = 90$ °C. The unsteady cavity behavior for hot water is similar to that for ordinary water. However, the cloud cavitation collapse for hot water is different from that for ordinary water. Compared to the cloud cavitation collapse for ordinary water, the cloud cavitation collapse for hot water is sudden (Figs. 2(d)–(e)). The large amplitude for hot water is caused by the sudden collapse of the cloud cavitation. This tendency also was confirmed under the conditions of other angles of attack and mainstream velocities.

4. Summaries and future plans

No influence of the mainstream temperature on the cavity pattern and the cavity aspect is found for 90 °C water. However, the influence appears in the unsteady characteristics, where the collapse of the cloud cavitation is abrupt, and the amplitude of the power spectrum of the downstream pressure is large.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] <u>D. Kang</u>, D. Nakai and Y. Iga, A Thermodynamic effect in a tip leakage vortex cavitation around a hydrofoil in hot water, *Proceedings of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, (2017), pp.1-6.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [2] D. Kang and Y. Iga: Thermodynamic Effect on Tip Leakage Vortex Cavitation, Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), pp.118-119.
- 3) Patent, award, press release etc.
 (Patent) Not applicable.
 (Award) Not applicable.
 (Press release) Not applicable.

課題番号	J17L081
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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 Transcritical/Supercritical State

徳増 崇*†,津田 伸一**††,坪井 伸幸***,髙橋 竜二***
 *東北大学流体科学研究所,**九州大学大学院工学研究院,***九州工業大学大学院工学研究院
 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

H-IIA 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的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、特に、 ロケット推進剤を対象とした混合系の熱物性データ(実験値)が皆無に等しく、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点がしばしば問題視されている。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、経験的なポ テンシャルを用いた分子動力学(MD)シミュレーションにより十分な精度で推算する.すなわ ち、MDを実験の代替的手段として用いて、現行のEOSの精度を検証することを目的としている.

2. 研究成果の内容

今年度は、本 MD 手法が有している誤差を再評価したうえで、現行の EOS の精度検証を行った.まず、本研究で模擬している酸水素混合系に最も近い混合系(クリプトン・ネオンの混合系)の実験データとの比較から、統計誤差を無視した場合の本 MD の精度は、約3%であることがわかった.また、有限時間の MD シミュレーションが本質的に有する統計誤差についても、本研究の計算条件では1%以内と考えてよいことがわかった.以上を踏まえたうえで、*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、現行の EOS と本 MD の比較を行った結果、双方がよい一致を示すことがわかった.図1は、圧力10MPa、温度200K の超臨界条件における定圧比熱の比較結果を示したものであるが、上述の誤差を考慮したとしても非常によい一致を示していることが確認できる.ここで、MD については4 種類のプロットがあるが、これは本 MD で最も大きな誤差因子となる酸素 - 水素の異種分子間相互作用を、妥当な範囲で仮想的に変化させたものである.統計誤差が1%以内であることを踏まえると、概ね MD のプロットのばらつきの中に EOS の結果が収まっていれば、EOS は妥当な精度を有していると判断できる.

3. 研究目標の達成状況

これまでの研究により, *P-V-T* 関係(圧力-体積-温度の3つの関係)と定圧比熱については, 現行の CFD に求められている計算精度に比して,既往の EOS が概ね十分な精度を有しているこ とがわかった.これより,冒頭に示した研究目標は概ね達成できたと考えている.

なお、平成 29 年 11 月 1 日~3 日にかけて行われた ICFD2017 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.



Fig. 1 定圧比熱の EOS (実線) と MD の比較結果 (圧力 10MPa, 温度 200K)

4. まとめと今後の課題

本研究では、経験的な分子間ポテンシャルモデルにより酸素と水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を用いて、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行った.その結果、現行の状態方程式は、*P-V-T*関係および 定圧比熱の予測において、十分な精度を有していることがわかった.今後の課題は、より精度の 高い評価が期待できる非経験的ポテンシャルを採用した MD シミュレーションを用いることで、 状態方程式の精度検証をより曖昧さを排除したうえで行うことである.

- 研究成果(*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等
 - *[1] <u>R. Takahashi, N. Tsuboi,</u> T. Tokumasu and <u>S. Tsuda</u>: Validation of classical mixing rule in van der Waals type equation of state applied to a non-ideal binary mixture fluid, *Proceedings of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, November, (2017), pp.100-101.
 - [2] <u>R. Takahashi, N. Tsuboi</u>, T. Tokumasu and <u>S. Tsuda</u>: Validation of classical mixing rule coupled with a cubic equation of state for the thermodynamic properties in oxygen-hydrogen mixture system, *Proceedings of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, Okinawa, Japan, (2017), TFEC9-1422.
 - [3] <u>R. Takahashi, N. Tsuboi</u>, T. Tokumasu and <u>S. Tsuda</u>: Validation of applicability of classical mixing rule in a van der Waals type equation of state for oxygen-hydrogen mixture system, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows*, Okinawa, Japan, (2017), ISAIF13-S-0074.
 - [4] <u>高橋竜二</u>, <u>坪井伸幸</u>, 徳増崇, <u>津田伸一</u>: 二成分 Lennard Jones 流体における対応状態原 理の成立性, 日本機械学会九州支部第 71 期総会・講演会論文集, 福岡, (2018), F12.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

課題番号	J17L089
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3年目

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 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* *筑波大学システム情報系, **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、図1のようなプラズマ溶射用外部磁界印加型直流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次元数値解析から、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 外部磁場印加型(コイル磁場方式)直流プラズマトーチの概念図

2. 研究成果の内容

今年度は、まず、外部磁界印加型直流プラズマ溶射装置の運転条件である電極間印加電流 および印加磁束密度をパラメトリックに変化させた電磁流体解析を実施し、それらの運転条 件がアークジェットの挙動や電極間電圧の特性に与える影響を調べた. 解析結果から、外部 磁界の利用は電極間電圧を上昇させプラズマジェットのエンタルピーを高めることに寄与す るが、印加磁束密度の増加に対して電極間電圧の時間平均値および振幅幅は単調には増加せ ず、それらを最大にする印加磁束密度が存在することが示唆された(図2-(a)).また、運転 電流を増加させると電極間電圧の変動周波数が高くなる傾向が示唆された(図2-(b)).次に、 電磁流体解析と併せて投入溶射粒子の飛行・熱履歴解析を実施し、トーチ各種運転条件の溶 射粒子へ及ぼす影響を調べた.その結果、運転電流を大きくするとプラズマジェットの旋回 流が強まり、それによってプラズマジェット中心の高温部に到達できない投入粒子が多くな るということが示唆された.ただし、前年度提案した鉛直方向上側から角度を付けて溶射粒 子を投入することでこの問題を緩和できることを確認している.



図2:3次元電磁流体解析から得た外部磁界印加型直流プラズマ溶射装置の電極間電圧 の経時変化((a):印加磁束密度との関係,(b)運転電流との関係)

3. 研究目標の達成状況

今年度は、外部磁界印加型直流プラズマ溶射装置直流プラズマ溶射装置において、電極間 電圧変動に与える電極間電流条件および印加磁束密度条件の影響について3次元電磁流体シ ミュレーションの結果から理解を深めることができた.

4. まとめと今後の課題

本一般公募共同研究(2015-2017 年度)により,外部磁界印加型直流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/熱力学特性の数値モデルの基礎を確立 することができた.また,その数値モデルを用いた3次元シミュレーションから,外部磁場 印加型直流プラズマ溶射装置のプラズマジェット特性に関する理解を深めることができた. さらに,そのプラズマジェットの特性に見合った溶射粒子の投入法の提案も行えた.その一 方で,他研究者が実験から示した外部磁界印加の効果に関して完全には再現できておらず, 数値モデルの妥当性の検証はもちろんのこと,過去に報告されている実験結果の妥当性を再 検証するため,独自に実験環境を整備する予定である.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
 - H. Saito, T. Fujino, H. Takana, and J. Mostaghimi: Interaction between Rotary Arc and Injected Particles in a Non-transferred DC Plasma Spray with Externally Applied Magnetic Field, *International Thermal Spray Conference 2017*, Düsseldorf, Germany, June 7 to 9, 2017, June 8, (2017), No. 5473, pp. 285-290.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17L090
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目

飛翔動物から着想・進化させた高 L/D 翼の探索とその空力特性 Search for High L/D Wing Based on Flying Animal and Its Aerodynamic Characteristics

> 川添 博光**, 大林 茂***** 森澤 征一郎*, 坂本 憲一*, 安田 章宏*, 西村 宗* *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

独自に研究を進めてきた飛翔動物の翼にアサギマダラ蝶の羽根がある. 本研究ではこのア サギマダラの平面形状を内・中外翼から成る各テーパー翼形状で近似した多段テーパーのバ イオ翼を対象とした.そして、この翼の形状を変形させ、高LD 翼形状を探索する.検討手 順は低レイノルズ数 Re が 103~104から出発し、その後、航空機を考慮した飛行マッハ数(高 Re数)での翼形状について行う.

研究成果の内容

低レイノルズ数域(Re = 1.2×104)において図1(a)-(c)に示す3種類のバイオ翼モデルの数 値シミュレーションを実施した.その結果、後退角のついた翼が最も良いL/D 特性を示した (図2).また,LDが最も良い後退バイオ翼について,翼厚が異なる0.5mmのバイオ翼(後 退バイオ翼 0.5) と 2.0mm のバイオ翼(後退バイオ翼 2.0)の比較を行った(図3). その結果, バイオ翼 0.5 の C_D値が大きく減少し、大きな L/D 値を示した. そして. 流れ場は図 3 より 両者で大きく異なり、後退バイオ翼 2.0 では前縁剥離渦が翼面上で形成され、後退バイオ翼 0.5 では前縁に沿う前縁剥離渦が形成された.

次に、高レイノルズ数域(Re=4.52×10⁶/9.04×10⁶)において図4に示す2種類のバイオ翼 (オリジナルモデルとアスペクト比を大きくした修正モデル)の数値シミュレーションを実 施した. その結果,図5(a)より高アスペクト比を有する修正モデルは、低迎角においてオリ ジナルモデルより小さなL/D 値を示した.これは図 5(b)より修正モデルの抗力係数が迎角に 対して単調増加していないためである.この理由は図5(b)で示す流れ場において、修正モデ ルの翼根上面付近で高圧領域が存在し、圧力抵抗が増加したためと考えられる.



(b) 前進バイオ翼 図1 バイオ翼の形状

(c) 後退バイオ翼



3. 研究目標の達成状況

アサギマダラ蝶をベースに飛翔動物から着想を得た翼形状について、当初の目的である低 Re 数,及び高 Re 数域での空力特性の検討を行った.

4. まとめと今後の課題

アサギマダラ蝶を多段テーパー近似した翼形状について低 Re 数,及び高 Re 数域での空力 特性の検討を行った.その結果,低 Re 数での翼形状は後退角を有する方が良い空力特性を 示し,高 Re 数では低迎角において高アスペクト比を有する翼形状の空力特性が悪化するこ とが分かった.今後は,現在検討を高 Re 数域での翼形状の最適化を実施し,一般的な航空 機設計との比較・検討を実施する必要がある.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [1] 西村宗,安田章宏,森澤征一郎,野村聡幸,川添博光:バイオミメティクスを考慮した低レイノルズ数翼の空力特性向上に関する研究,2A13,第49回流体力学講演会/第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム,東京,2017年6月29日,30日,(2017).
- [2] S. Morizawa, S. Nishimura, A. Yasuda, K. Sakamoto, H. Kawazoe and S. Obayashi: Search for High L/D Wing Based on Flying Animals, *Proc. of the 17th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2017), CRF-89, pp.184-185.
- [3] <u>安田章宏</u>, 野村聡幸, <u>森澤征一郎</u>, 川添博光: ハヤブサ翼に由来する将来旅客機のための翼 探索, 2D13, 第55回飛行機シンポジウム, 島根, 2017 年 11 月 20 日~22 日, (2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17L092
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目(発展)

中性粒子ビームプロセスによる新材料ナノデバイスの特性向上に関する研究 Study on Improvements of New Material Nano Devices by the Neutral Beam Process

遠藤 和彦*†, 水林 亘* 野田 周一**, 尾崎 卓也**, 寒川 誠二**†† *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

これまで、ダメージレスの加工が可能な中性粒子ビーム加工を用いたシリコンやゲルマニ ウム立体チャネルデバイス、および立体チャネルデバイス用ゲート絶縁膜形成技術の開発を 行ってきた.その結果、フィン型FETにおいて、中性粒子ビーム加工による立体チャネル のラフネス低減による移動度向上、および高品位シリコン酸化膜の形成に成功し注目を集め てきた.本研究では、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や遷移金属ダ イカルコゲナイド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、新材 料ナノデバイスの試作とその省エネルギー性能向上を目標として研究を継続している.

2. 研究成果の内容

これまでに、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、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を形成し、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、 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.

本年度は、次世代チャネル材料として期待されている遷移金属ダイカルコゲナイド材料で あり、その代表的は新材料である MoS₂結晶を用いて、中性粒子ビーム照射による改質効果 についての検証を行った.

まずは図1に示すボトムゲート型のトランジスタを作製した. 単層の MoS₂ をシリコン基 板に転写後,ソースドレイン領域に金属配線でコンタクトを形成し、ボトムゲート型のトラ ンジスタを作成した.

試作したトランジスタ構造を用いて、窒素中性ビーム照射効果を調査した。その結果、図 2に示す様に MoS₂結晶への照射前後において、トランジスタ特性が大きく変動することが 分かった.現在、表面修飾や改質の物理解析と電気特性との相関を更に調査しているところ である.



14 (A)	106.05 106.06 106.07 106.07 106.07 106.01 106.01 106.01 106.01 106.01 106.01 106.01 106.01 106.01 106.03	10065 10065 1007 1007 1007 1007 1008 第1後 1001 1001 1001 1001 1001
	1.0E-15 -10 -5 0 5 10 15 vg(v)	1.0E-15 -15 -10 -5 0 5 10 15 Vg(V)

図 1. MoS₂トランジスタ外観

図2.MoS2トランジスタの IV 特性

3. 研究目標の達成状況

ゲルマニウムトランジスタに関しては、シリコントランジスタを凌駕する省エネルギー素 子が実現できている.一方遷移金属ダイカルコゲナイドに関しては、照射後の電気特性の取 得のみの進捗となっており、膜の物理解析を現在行っているところである.

4. まとめと今後の課題

ゲルマニウムトランジスタに関しては、信頼性向上に向けた検討を継続する. 遷移金属ダ イカルコゲナイド材料に関しては、中性粒子ビーム照射効果の更なる検証を行う予定である.

- 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] Wataru Mizubayashi, Shuichi Noda, Yuki Ishikawa, Takashi Nishi, Akiou Kikuchi, Hiroyuki Ota, Ping-Hsun Su, Yiming Li, Seiji Samukawa, and Kazuhiko Endo: Ge Atomic Layer Etching for High Performance FinFET, AVS 64th International Symposium and Exhibition, Tampa, (2017).
- [2] 野田周一,谷本陽佑,尾崎卓哉,栗原秀行,星野恭之,遠藤和彦,寒川誠二:中性粒子ビームエッチングによる Ge エッチングメカニズムの検討,第65回応用物理学会春季学術講演会,19p-C204-1,(2018).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17L094
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目(発展)

中性粒子ビームプロセスを利用した高効率ゲルマニウム発光素子開発 Developments of Germanium Light Emitting Devices by Neutral Beam Process

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

チップ内光集積回路(OEIC)の実現に向けてゲルマニウム(Ge)が注目されている.特に,引 っ張り歪みによる直接遷移化と Germanium-On-Insulator (GOI)構造による光閉じ込め効果 によって,高い発光効率が得られている.さらに発光効率を向上させるために,GOI 基板上 に,Geを浮遊させるマイクロブリッジ構造を形成することで,引っ張り歪みを増大させるこ とが期待される.本研究では,GOI 上に円形マイクロブリッジ構造を作製し,歪みと発光特 性の評価を行った.

2. 研究成果の内容

Si 基板上へのGeのエピタキシャル成長と貼り合わせ法により作製したGOI構造をCMP により500 nm まで薄膜化した.その後,電子線描画,ドライエッチング,フッ酸エッチン グにより円形マイクロブリッジ構造を作製した.Fig.1にSEM 像を示す.中心部分の直径 (内側直径)を10 µmとし,外側直径を60~210 µmで変化させた.室温にて中心部分の ラマン測定,PL 測定を行い,歪みと発光特性の評価を行った.ラマン測定により得られた 歪み率の外側直径依存性から,外側直径が大きくなるほど歪み率の増加が確認され,外側直 径 210 µm おいて最大 0.69%の歪み率が得られた.Fig.2 に各外側直径でのPL スペクトル を示す.外側直径が大きくなるほど発光ピークがレッドシフトすることが分かった.







Fig. 2 PL spectra from the microbridges with different outer diameters R_{out} .

3. 研究目標の達成状況

以上の結果より、GOI をマイクロブリッジに加工することで、歪みの増加による伝導帯 Γ バレーの低下に対応した発光スペクトルが得られ、ブリッジ構造のサイズ制御によって、歪 み率、発光エネルギーが制御可能であることが示された.また、別に一軸方向のマイクロブ リッジも作製し、同様の発光スペクトルが得られ、ブリッジ幅に対応した共振モードが観測 された. 歪みの効果と共振器による光閉じ込め効果が得られており、現状目標は 60%程度 達成されている.

4. まとめと今後の課題

GOI 基板をエピ成長と貼り合わせ法によって作製し、その上に、Ge を浮遊させるマイクロ ブリッジ構造を形成することで、引っ張り歪みを増大させ、それによる発光エネルギーシフ トを観測した.この構造においてより高い発光効率を実現するために、さらに歪みを増加さ せることで、直接遷移確率を高めることが重要となる.さらにエッチング表面での非発光再 結合を抑制するために、中性ビームでのエッチング条件を最適化することで、大幅な発光効 率向上を目指す.

5. 研究成果(*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] <u>K. Sawano</u>, T. Nakama, K. Mizutani, N. Harada, X. Xu, T. Maruizumi: Light emission enhancement from Ge quantum dots with phosphorous δ-doped neighboring confinement structures, *Journal of Crystal Growth*, 477, (2017), 131–134.
- [2] M. Kato, K. Arimoto, J. Yamanaka, K. Nakagawa, <u>K. Sawano</u>: Fabrication of high-quality strain relaxed SiGe(1 1 0) films by controlling defects via ion implantation, *Journal of Crystal Growth*, 477, (2017), 197–200.
- [3] Peiji Zhou, Xuejun Xu, Sho Matsushita, <u>Kentarou Sawano</u> and Takuya Maruizumi: Resonant light emission from uniaxially tensile-strained Ge microbridges, *Japanese Journal of Applied Physics*, 57, (2018), 04FH10.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [4] <u>Kentarou Sawano</u>: Controlled doping for Ge based optoelectronic devices, 2017 EMN/CC Meeting, Barcelona, Spain, Sep. 11-15 (2017).
- [5] Peiji Zhou, Xuejun Xu, Yuta Kanda, Sho Matsushita, <u>Kentarou Sawano</u>, and Takuya Maruizumi: The Resonant Phenomenon in the PL Spectra Measured in the Tensile-Strained Ge Microbridges, 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), Sendai, Japan, September 19-23, (2017).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J17L098
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	3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,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.対象データとして,航空機翼後方にできる後方乱気流の数値計算データを利用する.

可視化や力覚化では数値データを色や形,力にどのように変換するかという伝達関数によ り、呈示される情報量が大きく変化する.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.データの特徴には、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を利用する.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、対象データの特徴に基づいて伝達関数を設計するため、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、臨界点の簡単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 個に制限する.

次に、抽出した位相構造に基づき、可視化を行う.今回は、ボリュームレンダリングを利 用し、圧力場を色で表現し、渦度を不透明度で表現した.これにより、2つのスカラ場を同 時に表現することができる.具体的には、渦度の絶対値が大きい領域の不透明度を高く、渦 度の絶対値が小さい領域の不透明度を低く設定することで、渦が強い領域を強調して表示す ることができる.また、微分位相構造に基づいて色や不透明度を決定しているため、急激に 値が変化する領域や、他の領域と構造が変化する領域なども見逃さずに可視化することができる.

一方,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.これにより, ベクトル場も同時に呈示することが可能である.3次元空間内にベクトル場の情報を描画す る場合,奥行き方向に遮蔽が生じてしまい,正確に情報を判断することが困難であるが,理 規格を用いることで直感的にベクトル場を理解することが可能になる.今回は、時刻固定の 場合は、スタイラスは流線に沿って移動させ、時間変化を伴った表示を行う場合には、その 時刻ごとのベクトル場に沿ってスタイラスを移動させる.これにより、時間変化を伴うデー タでは、スタイラスの軌跡が擬似的に流跡線と一致する.

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、複雑な情報を知覚することは困難である.そのため、 対象データの解析において高精度な情報が必要となるような要素を力覚にマッピングする ことは適切ではない.今回は、スタイラスを移動させることでベクトル場を表現したが、ス タイラスへの反力も利用すれば、もう1つスカラ場の表現も可能である.さらに、6自由度 の力覚装置を用いれば、回転なども表現することができる.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

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.特に、計 算格子の形状に合わせて、微分位相構造抽出プログラムを拡張する必要がある.微分位相解 析に関しては、前処理として位相構造を抽出しておくことが可能であるため、あらかじめ可 視化および力覚化の伝達関数を設計しておくことで、解析時に要する時間を短縮することが 可能である.また、現在、可視化に関する伝達関数の自動設計法に関する研究を進めており、 これを利用することにより、ユーザが伝達関数を調整する負荷を軽減することができると考 えられる.また、複雑なデータにおいて、力覚化でどの程度情報を把握できるかについても 調査する必要がある.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等 なし
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許) なし(受賞) なし(マスコミ発表) なし

課題番号	J17L099
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	$2017.4 \sim 2018.3$
継続年数	1年目(発展)

次世代高温環境センサ研究会(フェーズ3)

Seminar for Next Generation Sensors for Super-High Temperature Environment (Phase III)

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****** 金澤 兼治*******, 森永 雅彦******* 高木 敏行*, 小助川 博之* *東北大学流体科学研究所, **(㈱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, ******(㈱IHI 検査計測 ******(国研)句本原子力研究開発機構 *******(㈱福電, *******電力中央研究所 †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.また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29年度は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」,「超音波による非接触材料 評価研究」,「非線形現象を利用した非破壊計測技術に関する研究会」との共催による 「先進的非破壊評価合同シンポジウム」の形で研究会を行った.特別講演については, 長岡技術科学大学の井原郁夫先生より高温物体に適用可能な超音波法として,レーザ 一超音波法,電磁超音波法,空気超音波法,高温超音波法,バッファーロッド法につ いて,それぞれの手法の長所と短所に着目して概要を講演頂いた.さらに,バッファ ーロッド法について,具体的な高温計測の実例をご紹介頂き,適用における課題や信 号処理法について説明がなされた.また,高温環境における測定データの解釈や定量 性に不確実さが残る課題に関連して,複数の測定法の融合の必要性が強調された.続 いて、東北大学の小川和洋先生より、ガスタービンや航空機エンジンにおいて使用される遮熱コーティングと耐環境コーティングについてご講演頂いた.現在、耐熱性と耐環境性の観点からセラミクス材料を用いたコーティング技術が適用されている.しかし、高温・長時間で使用されるために経年劣化が危惧されている.講演ではこれらのコーティングの現状と課題について概要が説明された.さらに、コーティングの信頼性の確保の観点から非破壊検査法の必要性とその課題について説明がなされ、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、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7月13日(木),14日(金) 15:00~18:20 場 所: 東北大学 片平キャンパス 流体科学研究所2号館5階大講義室 参加者数:90名

特別講演

- 特別講演1 「高温場の超音波センシングとその応用」 長岡技術科学大学 井原郁夫
- 特別講演2 「遮熱コーティングおよび耐環境コーティングの現状と課題」 東北大学 小川和洋

一般講演 18件

高温環境における計測に関連する、レーザ・空中超音波センサを用いた計測、ガイド 波を用いた非破壊計測、ロケット燃焼室銅合金の非破壊計測、高温環境における疲労 亀裂のモデリング、電力設備に対する状態監視に向けた無線センサネットワークの開 発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,第2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った.

4. まとめと今後の課題

本研究会では、本年度を含め合計13回の研究会を開催してきた. 今後、非破壊検 査協会など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)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・ロ頭発表等 なし
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) 先進的非破壊評価合同シンポジウム論文集,日本非破壊検査協会ほか,2017年7月,(2017).

Project code	J17L101
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2017 ~ March 2018
Project status	1st year

Surface Pressure Measurement over Free Flight Object in Ballistic Range Facility

Hirotaka Sakaue *†, Hiroki Nagai **†† * Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame **Institute of Fluid Science, Tohoku University † Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

Within the project term, we were successful to achieve #1 and #2: a free flight object was successfully projected to the test section, and the model motion was successfully captured. The main challenge for the next step was extracted, which will be to enhance the signal level of acquired images. The results obtained from the present study was valuable to continue to the next steps to achieve challenges #3 and #4.

2. Details of program implement

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

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

4. To extract a pressure distribution from the luminescent image

The ballistic range facility at Institute of Fluid Science, Tohoku University, was used. The projectile is consisted of a sphere with 30-mm in diameter covered by a sabot. The test chamber was evacuated to 10 kPa, and the projectile was shot at Mach 1.4.

From an optical window of the test chamber, a model trajectory and its luminescent image were captured by a high-speed color camera. For the model trajectory, a flash xenon pulse was given to illuminate the model trajectory. The camera acquired the trajectory at the frame rate of 30,000 FPS with the camera exposure time of 1 μ s. For the luminescent image, two LED sources of 460 nm in peak wavelength was used. These gave pulses at the same time with 60 μ s in the pulse width. To exclude a blue

illumination to the camera, a 470-nm high pass filter was placed in front of the camera lens.

3. Achievements

Fig. 1 shows a luminescent image of the free flight model. The model flew from the left to right at 500 m/s. We can see that the image was blurred. It was because of a low luminescent output. With 60 μ s in the LED pulse width, the model traveled for 30 mm. The camera opened its exposure for 98 μ s that acquired a blurred image of 60 mm in trajectory direction. The image was shown as a ratio of pressure-independent image over pressure-dependent one, which corresponds to the vertical axis in the pressure calibration obtained in the present project. Because the image was blurred, we could not convert the luminescent image to the pressure distribution.



Figure 1 : Luminescent image of free flight model.

4. Summaries and future plans

Within the project term, we could achieve to shoot a free flight object to the test section, and the object motion was successfully captured. The main challenge for the next step was extracted, which will be to enhance the signal level of acquired images. There are three potential factors to improve the luminescent output. The first one is a PSP. A thickness of the PSP model can be increased to enhance the luminescent output. A selection of luminescent dyes would be an alternative. The second factor is an illumination source. At present, we used two LED sources. Each illumination could be carefully focused to concentrate the illumination power over the free flight model. Alternative illumination, such as a high-power laser or a xenon lamp, can be used. The third factor is a camera. A selection of camera lens as well as a camera with higher ISO would improve the luminescent output.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [1] D. Kurihara, A. G. Duarte, S. L. Claucherty, H. Sakaue, M. Nomura, and H. Nagai: Surface Pressure Measurement over Free Flight Object in Ballistic Range Facility, Proceedings of the Seventeenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2017), CRF-75, pp.156-157.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

索引

足立 高弘	229	清水 鉄司	233
安藤 康高	209	下山 幸治	21, 61, 135, 147
飯島 高志	197	鈴木 杏奈	185
伊賀 由佳	245	孫 明宇	105, 213
石出 忠輝	147, 149	高木 敏行	31, 45, 95, 117, 121, 165, 203
石本 淳	37	高奈 秀匡	57, 59, 249
伊藤 浩志	31	高橋 公也	17
今村 太郎	85	高橋 俊	27, 43
岩川 輝	215	高橋 庸夫	33
岩本 悠宏	59	高山 哲生	29
内田 諭	19	竹島 由里子	257
内一 哲哉	97, 101, 259	田中 克史	15
江上 泰広	9	千葉一永	221
遠藤 和彦	253	塚田 隆夫	107
太田 信	83, 93, 131, 133, 137	津田 伸一	247
大谷 清伸	11, 13, 41, 67, 69, 155, 217	徳増 崇	99, 123, 239, 241, 247
岡島 淳之介	229, 237	永井 大樹	9, 23, 27, 49, 73, 89, 119, 201, 211, 261
大上 泰寛	151	中川 敦寛	41
押谷 仁	235	中嶋 伸太郎	83
太田 匡則	211	中谷 達行	79
大林 茂	43, 55, 85, 87, 91, 103, 139, 143, 149, 205, 215, 221, 251, 257	中野 政身	15, 51, 75, 77, 111, 153
小原 拓	25, 197	中村 寿	151
門脇 敏	207	中山 昇	203
金崎 雅博	73	西山 秀哉	177, 209
金澤 誠司	113	沼田 大樹	67
金子 智	241	橋本 望	199
川添 博光	251	橋本 光男	197
姜 東赫	245	長谷川 裕晃	55, 201
菊池 崇将	217	服部 裕司	17, 179, 227
北川一敬	13	早川 晃弘	47, 223
杵淵 郁也	239	早瀬 敏幸	35, 127, 231
小板 丈敏	105	半田 太郎	69
小助川 博之	29	平田 勝哉	153
後藤 実	121	福井 智宏	231
小林 秀昭	53, 199, 207	福本 康秀	179
小宮 敦樹	39, 107, 141	福山 敦彦	65
酒井 康彦	35	藤野 貴康	249
坂上 博隆	261	槙原 幹十朗	11, 23
櫻井 篤	237	丸田 薫	125, 189, 225
佐々木 大輔	61	水書 稔治	103
佐藤 岳彦	19, 79, 81, 113, 233, 235	森江 隆	63
寒川 誠二	33, 63, 65, 71, 109, 129, 145, 253, 255	矢口 仁	259
澤野 憲太郎	255	山口 隆平	93
芝原 正彦	25	山崎 渉	21

山下 一郎	71
山田 剛治	205
山田 昇	39
山本 敏弘	95
米村 茂	115, 219, 243
依田 大輔	49
和田 浩史	197
渡邉 豊	199
渡邉 力夫	53

Adrian Sescu	227
Aike Qiao	137
Alain Combescure	37
Alexander Kirdyashkin	189
Anthony B. Murphy	177
Bastien Chopard	131
Chenguang Lai	87
Chih-Yung Huang	119
Christian Boller	101
Christian Boller	165
Dukhyun Choi	145
Evgeny Timofeev	155
Fumiya Togashi	91
Gael Sebald	75, 97
Georgy Shoev	155, 219
Henrik Alfredsson	165
Hideaki Ogawa	155
Igor Adamovich	57
Jean-Yves Cavaiile	165
Jeongmin Ahn	123, 125
Jinhao Qiu	165
Jiri Jenista	177
Julien Fontaine	165
Lavi Rizki Zuhal	135
Loïc Ehrhardt	213
Luca Brandt	127
Manfred Kohl	165
Michael Fehler	185
Mikael A. Langthjem	51
Miklos Zrinyi	111
Mohamed Farhat	81
Nicholas Williamson	141
Peng Zhang	89
Philippe Vergne	99
Roland N. Horne	185
Roman Fursenko	189
Romie Oktovianus Bura	139
Sannu Mölder	155
Sergey Minaev	189
Shinkyu Jeong	143
Simone Hochgreb	47
Stefan G. Llewellyn Smith	179
Stephane Le Dizès	179
Stepina Natalia	109

Vincent Fridrici	133
Vladimir Gubernov	189
Vladimir Khovaylo	45
Vladimir Saveliev	243
Weihua Li	77
Willyanto Anggono	223
Yevgeniy Bondar	115, 225
Yiming Li	129
Zhenmao Chen	117

東北大学流体科学研究所 平成 29 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

平成 31 年 2 月発行

編集·発行: 東北大学流体科学研究所 所長 大林 茂

〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目1番1号 電話:022-217-5302(総務係) FAX:022-217-5311

E-mail : shomu_kb@fmail.ifs.tohoku.ac.jp URL : http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/koubo/index.html

印刷: 株式会社 仙台共同印刷