



東北大学

**平成 25 年度
共同利用・共同研究拠点
「流体科学研究拠点」
活動報告書**

**Activity Report 2013
Joint Usage / Research Center
"Fluid Science Research Center"**

**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、エアロスペース、エネルギー、ライフサイエンス、ナノ・マイクロ、基盤研究の 5 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。

本報告書は平成 25 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、97 件の公募共同研究成果報告書、主な発表論文の別刷等を収録している。本拠点は、本公募共同研究を通じて、国内外の様々な異分野の英知を結集させ、流動現象の基礎研究とそれを基盤とした先端学術領域との融合ならびに重点科学技術分野への応用によって、世界最高水準の多様な流動現象に関する学理の探求及び研究を推進し、社会に貢献するとともに、次世代の若手研究者及び技術者を育成するよう努めて参る所存である。今後ともご支援ご鞭撻をお願い申し上げますと共に、本報告書について、忌憚のないご意見を頂ければ幸甚である。

平成 26 年 8 月

東北大学流体科学研究所長
大林 茂

目 次

1. 平成 25 年度流体科学研究拠点活動のまとめ

1.1	概要	1
1.2	公募共同研究成果報告会	1
1.3	流体科学データベース	2
1.4	共同利用・共同研究拠点「流体科学研究拠点」活動報告書	3
1.5	公募共同研究実施状況	3
1.6	研究成果の発表件数	5

2. 研究成果報告書

< 一般公募共同研究 >

J13001	ナノ ER 流体の創製とマイクロチャンネル内での ER 効果の評価.....	7
	田中 克史(京都工芸繊維大学)、中野 政身(東北大学)	
J13002	急激な姿勢変化に対するパドミントンシャトルコックの飛翔安定性に関する研究.....	9
	長谷川 裕晃(秋田大学)、大林 茂(東北大学)	
J13003	超高効率太陽電池用量子ドット構造のバンド構造と光学的性質.....	11
	福山 敦彦(宮崎大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J13004	微量磁性流体の磁気界面不安定性.....	13
	須藤 誠一(秋田県立大学)、西山 秀哉(東北大学)	
J13005	境界層能動制御組込み翼による翼の高揚力化.....	15
	長谷川 裕晃(秋田大学)、大林 茂(東北大学)	
J13007	Measurement of Diffusion Coefficient Through Artificial Micro and Nanopores	17
	Gary Rosengarten(RMIT University)、小宮 敦樹(東北大学)	
J13008	ナノディスクアレイ構造を用いた知能情報処理回路.....	19
	森江 隆(九州工業大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J13009	ナノ構造体を用いた量子効果の発現とその応用に関する研究.....	21
	高橋 庸夫(北海道大学大学院)、寒川 誠二(東北大学)	
J13010	精密なビームフラックス制御による高品質量子ドット超格子の作製.....	23
	喜多 隆(神戸大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J13011	Reconstruction of Wall Thinning from Pulsed ECT Signals	25
	陳 振茂(西安交通大学)、高木 敏行(東北大学)	
J13012	中性粒子ビームプロセスの最先端 MOS トランジスタに関する研究	27
	遠藤 和彦(産業技術総合研究所)、寒川 誠二(東北大学)	
J13013	The Continuous Spectrum in the Moore-Saeman-Tsai-Widnall Instability	29
	Stefan G. Llewellyn Smith(University of California, San Diego)、服部 裕司(東北大学)	
J13014	多目的最適化における説明変数空間と目的関数空間の可視化.....	31
	伊藤 貴之(お茶の水女子大学)、大林 茂(東北大学)	
J13015	翼端渦の大規模変形が崩壊過程へ及ぼす影響について.....	33
	高橋 直也(東京電機大学)、服部 裕司(東北大学)	
J13016	ナノ構造化表面・液体間の熱抵抗.....	35
	小原 拓(東北大学)、芝原 正彦(大阪大学)	
J13017	Cavity Formation Mechanism in a Cavitation Process	37
	佐藤 岳彦(東北大学)、Mohamed Farhat(Ecole Polytechnique Federale de Lausanne(EPFL))	

J13018	反応性混相流の活用によるナノデバイスクリーニング.....	39
	石本 淳(東北大学) Jin-Goo Park(韓国漢陽大学校)	
J13019	Development of Frontier Energy Using Reactive Multiphase Flow	41
	石本 淳(東北大学) Jin-Goo Park(韓国漢陽大学校)	
J13020	水平管を流動する沸騰液体窒素の不安定流動に関する研究.....	43
	大平 勝秀(東北大学) 小林 弘明(宇宙航空研究開発機構)	
J13021	コルゲート管を流動する気液二相液体窒素の圧力損失特性.....	45
	大平 勝秀(東北大学) 小林 弘明(宇宙航空研究開発機構)	
J13022	メカノクロミズム金属錯体を用いたスペースデブリ空気漏れ穴の表示システムの検討.....	47
	楢原 幹十朗(東北大学大学院工学研究科) 大谷 清伸(東北大学)	
J13023	Advanced LES of Aircraft Wake Vortices	49
	大林 茂(東北大学) Thomas Gerz(German Aerospace Center(DLR))	
J13024	キャビテーション微細気泡群における熱力学的効果の基礎特性解明.....	51
	新井山 一樹(金沢工業大学) 伊賀 由佳(東北大学)	
J13025	バイオフィーム産生菌に対するプラズマ殺菌に関する研究.....	53
	藤村 茂(東北薬科大学) 佐藤 岳彦(東北大学)	
J13026	中性粒子ビーム酸化膜を用いた超高速歪み Ge チャンネルデバイス開発	55
	澤野 憲太郎(東京都市大学) 寒川 誠二(東北大学)	
J13027	The Mechanism and the Control of the Unsteady Three-Dimensional Wake Structure of Road Vehicle	57
	Chenguang Lai(Chongqing University of Technology) 大林 茂(東北大学)	
J13028	閉空間キャビティ内自然対流の不安定性解析.....	59
	小宮 敦樹(東北大学) Daniel Henry(Ecole Centorale de Lyon)	
J13029	空間発展する乱流の構造に及ぼす外部乱れの影響の解明およびその熱流動制御への応用.....	61
	酒井 康彦(名古屋大学) 早瀬 敏幸(東北大学)	
J13030	先進的医用超音波イメージングに関する実験研究.....	63
	劉 磊(GE ヘルスケア・ジャパン) 船本 健一(東北大学)	
J13031	Investigation of a Novel Magnetorheological Shear Thickening Fluid	65
	Weihua Li(University of Wollongong) 中野 政身(東北大学)	
J13032	Investigation of Subsonic-Supersonic Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc with Inhomogeneous Mixing of Plasma Species	67
	Jiří Jeništa(Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i.) 西山 秀哉(東北大学)	
J13033	センシングに基づく漏洩水素の動的強制ベント制御に関する研究.....	69
	中野 政身(東北大学) 松浦 一雄(愛媛大学)	
J13034	ホールトン現象の低減化制御に関する研究.....	71
	中野 政身(東北大学) 松浦 一雄(愛媛大学)	
J13035	空隙媒体による水中爆発の減衰と軽減効果について.....	73
	北川 一敬(愛知工業大学) 大谷 清伸(東北大学)	
J13036	サステナブル異分野融合型微粒化・界面現象に関する研究.....	75
	石本 淳(東北大学) Kozo Saito(University of Kentucky)	
J13038	プラズマ流による気泡生成機構に関する研究.....	77
	佐藤 岳彦(東北大学) 中谷 達行(トーヨーエイトック株式会社)	
J13039	水中におけるプラズマ熱流動機構.....	79
	佐藤 岳彦(東北大学) 金澤 誠司(大分大学)	
J13040	予混合火炎の固有不安定性に及ぼす中間生成物の影響.....	81
	門脇 敏(長岡技術科学大学) 小林 秀昭(東北大学)	

J13041	心電計と超音波を融合したマウス胎仔心機能評価.....	83
	伊藤 拓哉(東北大学大学院医学系研究科)、船本 健一(東北大学)	
J13042	磁気刺激による生体アクチュエーションに関する研究.....	85
	森 仁(株式会社 IFG)、高木 敏行(東北大学)	
J13043	Low Damage Fabrication of Si Photonic Devices by Neutral Beam Technology	87
	和田 一実(東京大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J13044	爆風と水との干渉による威力軽減効果に関する研究.....	89
	松尾 亜紀子(慶應義塾大学)、大林 茂(東北大学)	
J13045	空間的せん断応力勾配環境下における血管内皮細胞の力学応答.....	91
	吉野 大輔(東北大学)、坂元 尚哉(川崎医療福祉大学)	
J13046	回転円すいの外表面を上昇する液膜流の生成メカニズムと微粒化特性.....	93
	足立 高弘(秋田大学)、岡島 淳之介(東北大学)	
J13047	Blast Wave / 衝撃波による脳損傷機序解明.....	95
	中川 敦寛(東北大学病院)、大谷 清伸(東北大学)	
J13048	Analysis of the Combined Mode Heat Transfer in Complex Materials	97
	圓山 重直(東北大学)、Subhash Chandra Mishra(Indian Institute of Technology Guwahati)	
J13049	Measurement of Radiative Properties Controlled-Film	99
	圓山 重直(東北大学)、Rodolphe Vaillon(INSA de Lyon)	
J13050	大気環境におけるふく射エネルギー評価とその解析.....	101
	圓山 重直(東北大学)、山田 昇(長岡技術科学大学)	
J13051	生体組織内の超音波伝搬の数値解析.....	103
	田邊 将之(熊本大学)、船本 健一(東北大学)	
J13052	流体力学的効果による CG 動画像のリアリティ向上	105
	石原 卓(名古屋大学)、服部 裕司(東北大学)	
J13053	小型航空機の空力性能向上に関する研究.....	107
	佐々木 大輔(金沢工業大学)、下山 幸治(東北大学)	
J13054	Ignition Studies of Gaseous Pre-mixtures in Turbulent Flow	109
	Roman Fursenko(Siberian Branch of Russian Academy of Science)、丸田 薫(東北大学)	
J13055	Kinetic Modeling of Energy Transfer in Nonequilibrium Nanosecond Pulse Discharges in Air and Fuel-Air Mixtures	111
	高奈 秀匡(東北大学)、Igor Adamovich(The Ohio State University)	
J13056	Improvement of Numerical Scheme and Theory for Kinetic Force Method	113
	Vladimir Saveliev(National Center of Space Researches and Technologies)、米村 茂(東北大学)	
J13058	Numerical Studies of Rarefied Chemically Reacting Flows about Space Vehicles.....	115
	Mikhail Ivanov(Siberian Branch of Russian Academy of Science)、米村 茂(東北大学)	
J13059	Investigation of Shock Waves Propagation on Microscales	117
	Mikhail Ivanov(Siberian Branch of Russian Academy of Science)、丸田 薫(東北大学)	
J13060	高機能ハイブリッドプラズマ流動システムを用いた液相微粒子プロセス.....	119
	西山 秀哉(東北大学)、Oleg P. Solonenko(Siberian Branch of Russian Academy of Science)	
J13061	Generation and Transport of Chemical Species in Low-Temperature Atmospheric Plasma for Sanitization Device	121
	Tetsuji Shimizu(Max-Planck Institute for extraterrestrial physics)、佐藤 岳彦(東北大学)	
J13062	Numerical and Experimental Research on Active Control of Self-Sustained Flow Oscillations with Sound Interaction.....	123
	Mikael A. Langthjem(山形大学)、中野 政身(東北大学)	

J13063	柔いフィンの流体励起振動に関する研究.....	125
	李鹿 輝(山形大学) 中野 政身(東北大学)	
J13064	Study of Thin Films and Ribbons of Heusler Alloys for the Use in Energy Saving Magnetic Refrigeration Technology	127
	Vladimir Khovaylo(National University of Science and Technology “MISIS”) 高木 敏行(東北大学)	
J13065	波のエネルギーに基づく軸流を持つ渦の安定性解析とその応用.....	129
	服部 裕司(東北大学) 福本 康秀(九州大学)	
J13066	常温圧縮せん断法を用いた Ti/Al 複合材料の固化成形	131
	中山 昇(信州大学) 高木 敏行(東北大学)	
J13067	プラズマエッチングプロセスにおけるナノスケール表面ダメージ解析.....	133
	浜口 智志(大阪大学) 寒川 誠二(東北大学)	
J13068	Energy Release Dynamics in Porous Media.....	135
	Nickolay Lutsenko(Far Eastern Federal University) 丸田 薫(東北大学)	
J13069	Research of Friction and Drilling on Bio-Composite Model	137
	太田 信(東北大学) Philippe Kapsa(Ecole Centrale de Lyon)	
J13070	Development of a Program for Blood Flow and Cell Behaviors Based on LBM Method	139
	太田 信(東北大学) Bastien Chopard(Geneva University)	
J13071	Behaviors of Nano-Channel of Membrane Protein.....	141
	太田 信(東北大学) Liviu Movileanu(Syracuse University)	
J13073	マイクロ流体デバイスを用いた低酸素状態の細胞応答の観測.....	143
	福島 修一郎(大阪大学) 船本 健一(東北大学)	
J13074	核沸騰限界熱流束を向上する微細くぼみ付伝熱面の開発.....	145
	宮田 一司(東北大学) 森 英夫(九州大学)	
J13075	大気圧プラズマ流によるウィルスの不活化特性.....	147
	佐藤 岳彦(東北大学) 押谷 仁(東北大学大学院医学系研究科)	
J13076	中性粒子ビームエッチングにより作製した高密度規則配列量子ドット系における電子状態の解明...	149
	斎木 敏治(慶應義塾大学) 寒川 誠二(東北大学)	
J13077	Development of a Micro-Motor for MEMS Utilizing Smart Polymer Fabricated by Photolithography ...	151
	中野 政身(東北大学) Mikóls Zrínyi(Semmelweis University)	
J13078	コロイド磁気粘性流体の粒子構造形成と磁気粘性効果.....	153
	阿部 浩也(大阪大学) 中野 政身(東北大学)	
J13079	法科学可視化ライフサイクル管理システムの開発.....	155
	藤代 一成(慶應義塾大学) 竹島 由里子(東北大学)	
J13080	血行力学的解析を主眼とする脳動脈瘤データベースの構築.....	157
	杉山 慎一郎(広南病院) 太田 信(東北大学)	
J13081	MR 計測融合シミュレーションによる脳動脈瘤破裂予測	159
	杉山 慎一郎(広南病院) 船本 健一(東北大学)	
J13082	衝撃波前方の電子が後方の熱化学過程に及ぼす影響.....	161
	川添 博光(鳥取大学) 大林 茂(東北大学)	
J13083	摩擦試験機スライダの接触アライメント機構の研究.....	163
	後藤 実(宇部工業高等専門学校) 高木 敏行(東北大学)	
J13084	Momentum Transport Phenomena in a Liquid Bridge under Shear	165
	徳増 崇(東北大学) Philippe Vergne(INSA de Lyon)	
J13085	Transport Phenomena of Substances in Electrolyte of Solid Oxide Fuel Cell	167
	徳増 崇(東北大学) Jeongmin Ahn(Syracuse University)	

J13086	分子動力学シミュレーションに基づく散逸粒子動力学相互作用モデルの構築.....	169
	徳増 崇(東北大学) 杵淵 郁也(東京大学)	
J13087	次世代高温センサ研究会.....	171
	高木 敏行(東北大学) 宍戸 郁郎(株式会社インテリジェント・コスモス研究機構)	
J13088	分子動力学法を用いた液体水素の熱・輸送物性に対する量子効果の影響解析.....	173
	徳増 崇(東北大学) 坪井 伸幸(九州工業大学)	
J13089	SiC 基板成膜プロセスの量子・分子論的解析	175
	徳増 崇(東北大学) 須藤 理枝子(株さがみはら産業創造センター)	
J13090	力天秤の開発とその静粛性超音速航空機への適用.....	177
	川添 博光(鳥取大学) 大林 茂(東北大学)	
J13094	温熱治療における局所加熱法の理論的・実験的研究.....	179
	圓山 重直(東北大学) Victoria Timchenko(The University of New South Wales)	
J13095	Alloy600 の粒界における Cr 欠乏分布と局所的磁気特性の相関シミュレーション	181
	山口 克彦(福島大学) 高木 敏行(東北大学)	
J13096	次世代高翼航空機のための最適設計.....	183
	大林 茂(東北大学) 鄭 信圭(Kyunghee University)	
J13097	Optimization of Artificial Island Arrangement for Reduction of Tsunami Damage	185
	大林 茂(東北大学) Fumiya Togashi(SAIC)	
J13098	Effects of Temporal and Spatial Oxygen Heterogeneity on Cell Processes	187
	船本 健一(東北大学) Roger D. Kamm(Massachusetts Institute of Technology)	
J13099	バイオテンプレート法による大面積 2 次元高密度および分散型ナノ粒子エッチングマスクの実現...	189
	山下一郎(奈良先端科学技術大学院大学) 寒川 誠二(東北大学)	
J13101	後退翼の三次元境界層遷移の制御.....	191
	高木 正平(室蘭工業大学) 大林 茂(東北大学)	

< 連携公募共同研究プロジェクト >

J13R01	漂流物混入型津波に関するスーパーコンピューティングとスケールモデリング.....	193
	石本 淳(東北大学) 今村 文彦(東北大学災害科学国際研究所) Kozo Saito(University of Kentucky)、 Jean-Yves Cavallé(INSA de Lyon)、筒井 喜平((株)ランスモア) 吉田 正典((株)爆発研究所)	
J13R02	Flammability Limits of Low-Lewis-Number Premixed Flames	203
	Sergey Minaev(Far Eastern Federal University) 丸田 薫(東北大学) Roman Fursenko(Far Eastern Federal University) Sudarshan Kumar(Indian Institute of Technology)	
J13R03	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.....	209
	高木 敏行(東北大学) Jean-Yves Cavaille(INSA de Lyon) Christian Boller(Fraunhofer Institute for Nondestructive Testing) Jinhao Qiu(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics)、 Julien Fontaine(Ecole Centrale de Lyon) Manfred Kohl(Karlsruhe Institute of Technology)	

< 分野横断型公募共同研究プロジェクト >

J13B01	次世代反応流体科学の創成.....	219
	石本 淳(東北大学)	

3. 主な発表論文の別刷	247
--------------------	-----

1. 平成 25 年度流体科学研究拠点活動のまとめ

1.1 概要

流体科学研究拠点では、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) エアロスペース、2) エネルギー、3) ライフサイエンス、4) ナノ・マイクロ、5) 基盤研究の 5 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。

また、平成 25 年度より本研究所所属の研究者と本研究所以外の複数の研究機関の研究者が行う連携公募共同研究プロジェクトが開始された。

平成 25 年度の公募共同研究は、平成 25 年 4 月 1 日から平成 26 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 24 年 11 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 25 年 5 月から 9 月には、24 年度までの 3 年間の拠点活動について文部科学省により中間評価が行われ、評価結果の概要は「拠点としての活動は概ね順調に行われている」であった。

平成 25 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 25 年 11 月 26 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-2013 において仙台国際センターにて開催した。本報告会では 90 件（分野横断プロジェクト 1 件、連携公募共同研究

プロジェクト 3 件を含む) のプレゼンテーションとポスター発表が行われ、106 人の出席者があった (写真 1、2)。

発表は全て英語で行われ、海外からの共同研究者も交えて活発な議論が行われた。



写真 1：ショートプレゼンテーションの様子

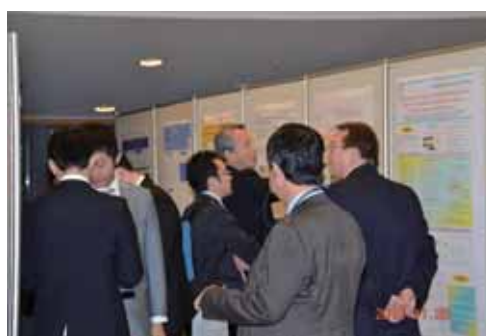


写真 2：ポスターセッションの様子

1.3 流体科学データベース

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

表 1：流体科学データベースへの登録件数とアクセス数

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度
	21	22	23	24	25
公募共同研究成果の登録数	16	32	42	47	54
登録済みデータ総数	458	478	488	493	500
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

1.4 共同利用・共同研究拠点「流体科学研究拠点」活動報告書

平成 25 年 10 月に、平成 24 年度の共同利用・共同研究拠点活動の成果を取りまとめた共同利用・共同研究拠点「流体科学研究拠点」活動報告書を作成し、関係機関、研究者に配布した。報告書の内容（著作権の都合により論文別刷りは除く）は流体科学研究拠点ホームページに掲載されている。

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

1.5 公募共同研究実施状況

1) 申請・採択状況

一般公募共同研究の申請・採択状況等を表 2 に示す。申請時に選択された研究課題分野（エアロスペース、エネルギー、ライフサイエンス、ナノ・マイクロ、基盤）と国内/国際の別を分類した。表 3 と表 4 にはそれぞれ分野横断プロジェクトと連携公募共同研究プロジェクトの申請・採択状況を示す。

表 2：一般公募共同研究の申請・採択状況

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

*取り下げ

表 3：分野横断プロジェクト申請・採択状況

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

表 4：連携公募共同研究プロジェクト申請・採択状況

	平成 25 年度
申請数 (件)	3
採択数 (件)	3
採択率 (%)	100
申請金額 (千円) : a	4,700
採択金額 (千円) : b	2,977
充足率 (金額) (%) : b/a	63
一件あたりの採択金額 (千円)	992

2) 研究者の受け入れ状況

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

表 5：研究者の受け入れ状況

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

3) 研究費

本公募共同研究にて使用した研究費の内訳を表 6 に示す。

表 6：研究費の内訳

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度
物件費 (千円)	8,136	22,343	22,837	18,739	16,796
旅費 (千円)	7,415	11,978	11,484	13,866	15,809
合計 (千円)	15,551	34,321	34,321	32,605	32,605

1.6 研究成果の発表件数

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

表 7：研究成果の発表件数

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 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
国際会議、国内会議、研究会、 口頭発表等	152	198	291	304	457
その他 (特許・受賞・マスコ ミ発表等)	5	19	11	22	28
合計 (件)	208	301	390	414	624

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	J13001
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	2年目

ナノ ER 流体の創製とマイクロチャンネル内での ER 効果の評価
Development and Micro-Channel Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions

田中 克史*†, 小林 治樹*, 中野 政身**††
 *京都工芸繊維大学大学院, **東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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。粒径がマイクロメートルオーダーの固体粒子分散系は、典型的なER流体として知られているが、流体の安定性、微細間隙流路への適用等の問題点が指摘されている。

本研究では、粒径がナノメートルオーダーの酸化チタンナノ粒子を用いた分散系を中心としてER流体を創製し、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 程度の二酸化チタンナノ粒子を用いて分散系を調製した。分散媒は、粘度 $\eta_c = 0.04 \text{ Pa s}$ の化学変成したシリコンオイルを用いた。粒子体積分率 ϕ は 8.8 - 25 vol% とした。調製した ER 流体について、流動特性の評価を行い、流体の微細構造の評価を合わせて行った。具体的には、調製した ER 流体の無電場における流動特性、電場応答性、及び、時間安定性を評価した。流動特性の評価は、電場印加が可能な平行平板型回転粘度計を用い、平板の間隙 h は、 $50 \mu\text{m}$ とした。

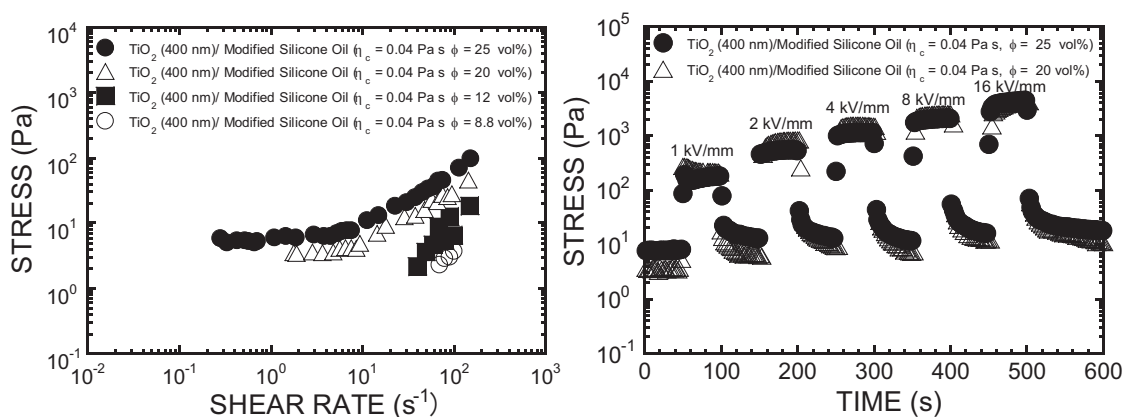


図 1 : 異なる粒子体積分率 ϕ を用いて調製した試料の無電場における流動特性 (左), 及び $\phi = 20, 25 \text{ vol}\%$ 試料の電場応答特性 (右).

図 1 (左) に、調製した試料について、無電場で測定したせん断応力のせん断速度依存性を示す。あるせん断速度で比較すると、高粒子濃度系は高い応力値を示す傾向が見られ、20 vol% 以上の試料では、低せん断速度において応力の平坦部が見られる。また、図中には $\phi = 8.8 \text{ vol}\%$ 及び $25 \text{ vol}\%$ で調製した試料の光学顕微鏡写真を示す。白い部分は粒子に対応している。25 vol% で調製した試料は、8.8 vol% で調製した試料に比べて、2 次粒子によって形成された網目状の微細構造が、視野全体に広がっている。一方、20 vol% 及び 25 vol% で調製した試料の電場応答 (図 1 (右)) は、8.8 vol% 及び 12 vol% の応答に比べて大きい値を示したが、20 vol% と 25 vol% で調製した試料の電場下での応力値はほぼ一致する結果が得られた。

3. 研究目標の達成状況

$\phi = 20, 25 \text{ vol}\%$ として調製した試料は、ER 特性において、低粒子濃度で調製した試料に比べて良好な結果が得られ、無電場におけるせん断応力についても比較的低い値を示した。

4. まとめと今後の課題

上記 3. に示したように、粒子の高充填化により比較的良好な結果が得られたが、粒子の分散安定性、ER 効果の安定性の向上について、適切な粒子径の探索を含めて、さらに検討が進められている。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] K. Tanaka, T. Hira, R. Fukui, H. Kobayashi, R. Akiyama, M. Nakano, S. Enami, and A. Totsuka: Development and Micro-Gap Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Colloid Polym. Sci.*, Vol.291, No. 5, (2013), pp. 1279-1286.
- [2] K. Tanaka, S. Robson, W. Nakano, H. Kobayashi, R. Akiyama, M. Nakano, and A. Totsuka: Electro-Rheological Responses of Nano-Suspensions based on Titanium Dioxide Nano-Particles, *Proc. of the 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*, Nara, (2013), OS5-01-2 (6 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[3] K. Tanaka, S. Robson, W. Nakano, H. Kobayashi, R. Akiyama, M. Nakano and A. Totsuka: Development and Micro-Channel Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proc. of the 13th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 142-143.
- *[4] K. Tanaka, H. Kobayashi, and M. Nakano: Electro-Rheological Behavior of Nano-Suspensions based on Titanium Dioxide Nano-Particles, *Proc. of the 10th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2013), pp. 436-437.
- [5] ロブソン星夜, 中野渉, 田中克史, 小林治樹, 秋山隆一, 中野政身, 戸塚厚: ナノ粒子分散系エレクトロレオロジー流体の微細構造と流動に与える分散媒及び粒子濃度の効果, 日本レオロジー学会第 40 年会講演予稿集, 京都, (2013), pp. 27-28.
- [6] 田中克史, ロブソン星夜, 中野渉, 小林治樹, 秋山隆一, 中野政身, 戸塚厚: ナノ粒子分散系のエレクトロレオロジー効果に与える分散媒及び粒子濃度の効果, 第 61 回レオロジー討論会講演要旨集, 米沢, (2013), 3C02 (2 頁).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13002
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4 ~2014.3
継続年数	1年目(発展)

急激な姿勢変化に対するバドミントンシャトルコックの飛翔安定性に関する研究
Study on Flight Stability of Badminton Shuttlecocks for Impulsive Change of Angle of Attack

長谷川 裕晃*†, 中川 健一*
村上 正秀**, 大林 茂***††,
*秋田大学大学院工学資源学研究所, **筑波大学
***東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

バドミントンシャトルコックの飛翔体としての安定性の解明を行う。これまでの成果で、不明だった高速域 (>50m/s) での空力特性を調べるとともに、シャトルコックが非常に大きな抗力を発生するメカニズムを明らかにした。その際、その減速特性にシャトルの回転は影響を与えないこともわかった。しかし、シャトルは飛翔中にスピン回転し、さらにインパクト後には急激な迎角変化(縦回転)が生じ、非常に短い時間で安定飛翔する。そこで、こうした姿勢変化をとまなう状態を模擬した動的風洞試験で、シャトルに生じる力の変化とその際のシャトル周りの流れ場との関係を調べることで、シャトルが高い飛翔安定性を有する理由を解明する。

2. 研究成果の内容

本研究では、インパクト直後における飛翔特性、空力安定性について、シャトルコックの独特な形状が及ぼす影響を明らかにするために、シャトルを風洞内に設置し実験を行った。実際に飛翔しているシャトルコックを打球した際、その姿勢のまま飛翔するのではなく、向きを変えながら飛んでいく。このシャトルコックのインパクトした直後の急激迎角変化中の飛翔メカニズムを解明する上で、大迎角変化におけるシャトルコックの定常流体力を測定した。またシャトルコックの飛翔安定性解明のアプローチとして、シャトルの隙間部、羽根部に滑らかなテープで加工を行い4つのシャトル(a)Standard, (b)Standard w/o gaps, (c)Conic, (d)Conic w/o gapsを用意し、流体力特性の比較を行った。図1に各迎角での揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D 及びピッチングモーメント係数 C_M を示す。ピッチングモーメント係数において、モーメントの向きはZ軸周りにおいて反時計回りが正である。ピッチングモーメント係数では、いずれのシャトルでもシャトルコルク部が上流側を向く迎角 ($\alpha=0^\circ$) を境に符号が変わ

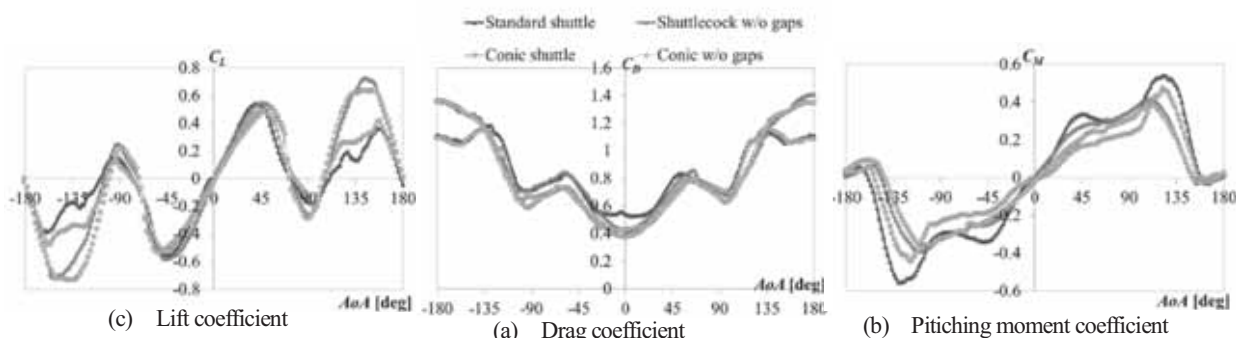


Fig.1 Aerodynamic characteristics for the shuttlecocks versus angle of attack at $Re=1.3 \times 10^5$

ることが確認できた。また、 0° 付近のピッチングモーメントの立ち上がりの傾きは、通常シャトルが一番大きく、隙間なし、円すいシャトルの順になっている。この 0° を境にしたピッチングモーメントの立ち上がりは、シャトルの安定性に関連する。つまり、大きな値になっていけば、シャトルが縦回転し、仮に 0° をオーバーシュートした際にも、 0° への戻り易さにつながる。また、いずれのシャトルでも 180° 付近ではピッチングモーメントの値が小さい。

インパクト直後のシャトルの空力安定性を調べる為に、シャトル固定軸（ Z 軸）周りにおけるシャトル縦回転時の回転速度の測定を行った。結果を表1に示す。ハイスピードカメラを用いて撮影した画像から平均角速度 ω の算出を行った。実験条件は $Re=1.7 \times 10^5$ ($U_0=40$ m/s)、初期角度は $\alpha=150^\circ$ とした。その結果、通常シャトルの回転速度が最も大きい結果となった。シャトルは縦回転時、 0° に安定する前に角度のオーバーシュートが起こる。その後シャトルは、何度かオーバーシュートを繰り返しながら 0° に安定する。このオーバーシュートの角度は、円すいシャトルが最も大きい結果となった。このオーバーシュートが収まり安定になるまでの時間は、通常シャトルが一番短かった。つまり、通常シャトルが縦回転時に最も安定性が高い。さらに、スカート部付け根に隙間があることで、シャトルは素早く回転し、羽根が存在することで、オーバーシュートが抑えられていると言える。

Table 1 Average pitch-rotational velocity and overshoot angles

	Average rotational velocity ω (rad/sec)	Primary over shoot angle α ($^\circ$)
Standard shuttlecock	134	-48.7
Shuttlecock w/o gaps	82	-55.6
Conic shuttlecock	87	-66.7
Conic w/o gaps	69	-70.0

3. 研究目標の達成状況

シャトルコックに生じる縦回転時の空力安定性について、数種類のシャトルを使い回転角速度の測定とオーバーシュート角との関係について調べた。シャトルスカート付け根の隙間部、羽根部がシャトルの姿勢変化に対する復元力に寄与し、高い空力安定を生み出していることがわかった。シャトル縦回転時の非定常計測が不十分で、シャトルの有する高い安定性が生じるメカニズムまでは解明できなかったものの、当初の目標は概ね達成できた。

4. まとめと今後の課題

バドミントンシャトルコックのインパクト後の急激な姿勢変化からの飛翔安定性において、シャトルコックの羽根部、スカート付け根の隙間部が影響していることがわかった。特に、羽根部と隙間を無くしたシャトルでは、顕著に空力安定が悪化する。今後はシャトル表面圧力、流れ場計測を実施し、シャトルの構造と空力安定性の関連を詳細に調べ、シャトルが高い飛翔安定性を示すメカニズムについて解明していくつもりである。

5. 研究成果（*は別刷あり）

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む） なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Kenichi Nakagawa, Hiroaki Hasegawa, Masahide Murakami, Shigeru Obayashi: Study on Flight Stability of Badminton Shuttlecock for Impulsive Change of Angle of Attack, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 2-3.

[2] 中川健一, 長谷川裕晃, 村上 正秀: バドミントンシャトルコックのインパクト直後の空力安定性, *スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス* 2013, 東京, (2013), (CD-ROM)227

- 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等） なし

課題番号	J13003
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

超高効率太陽電池用量子ドット構造のバンド構造と光学的性質
Electronic Band Structure and Optical Properties of Quantum Dot Structures for Extremely High-Efficiency Solar Cells

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

1. 研究目的

エネルギー問題の解決策の一つとして太陽光発電に関する研究が活発化している。太陽光発電が基幹電力となるには変換効率 50%以上が求められるが、一般的な単接合太陽電池の理論限界は 29%である。そのため超高効率な太陽電池を実現させる技術として量子ドットを三次元的に整列させて超格子構造とし、形成されるミニバンドを利用した中間バンド太陽電池が注目されている。量子ドット構造を太陽電池に応用するには、そのバンド構造、特に状態密度やドット間の相互作用を詳細に調べることが不可欠である。しかしながらこれまで良質な量子ドットが得られていなかった。これに対して流体科学研究所で中性子ビームを用いることで従来よりも高密度で規則配列した量子ドット構造の作成に成功した。そこで本研究では、宮崎大学が所有する各種光学的特性評価技術を量子ドット構造に適用し、そのバンド構造を評価することで超高効率太陽電池作成のための知見を得ることを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究で用いたサンプルは以下の手順で準備した。まず Si 基板上に Si を SiC で挟んだサンドイッチ構造をスパッタ法で積層した。その後タンパク質に内包された鉄微粒子のマスクを試料表面に配置し、中性粒子ビームでエッチングすることで Si ナノディスク配列を実現した（以下、Si-NDs）。ナノディスクのサイズは厚さ 4.0 nm、直径 6.4 nm であり、NDs-1 は横方向に 2.3 nm 間隔で Si-NDs を横一列に配置したサンプルで、NDs-2 は NDs-1 のドット間隔を広げたサンプル、NDs-3 は NDs-2 の構造を深さ方向に 4 層積層したものである。今回はマイクロ波光導電減衰法 (μ -PCD) を適用した。測定はキャリア生成のための励起レーザーに Nd:YLF (349nm) を、発生キャリアの検出に周波数 26GHz のマイクロ波を用い、その反射強度減衰曲線からキャリア寿命を算出した。

図 1 に NDs-1 サンプルの反射強度減衰曲線を示す。図から明らかのように対数表示で線形にならなかったことから、複数のキャリア再結合過程が関与することがわかった。そこで複数の再結合過程を想定してフィッティングを行い、キャリア寿命を算出した結果を図 2 に示す。短い成分から順に $\tau_1 \sim \tau_4$ の 4 つのキャリア寿命が得られた。NDs-1 と NDs-2 サンプルに観測された τ_1 と τ_2 は非常に短いことから、サンプル表面あるいは SiC と Si 基板界面での再結合に起因するキャリア寿命であると考えられる。成分 τ_3 はすべてのサンプルで観測されたことから、寄与する再結合機構は同じであると考えられるが、現時点ではその起因は分かっていない。

今回の実験で最も注目すべきは、NDs-3 で観測された非常に長いキャリア寿命 τ_4 である。こ

のサンプルは Si ナノディスクが深さ方向に 2nm 間隔で積層している。つまり深さ方向に対して電子の波動関数の重なりがおこりミニバンドが形成されている可能性が高い。その結果、光吸収で形成された電子がミニバンド内を伝搬することで再結合が起こらずに、結果として長いキャリア寿命を示したと考えられる。この成果は量子ドットをどのように配列すれば適切なミニバンドが形成されるかに対する重要な知見である。

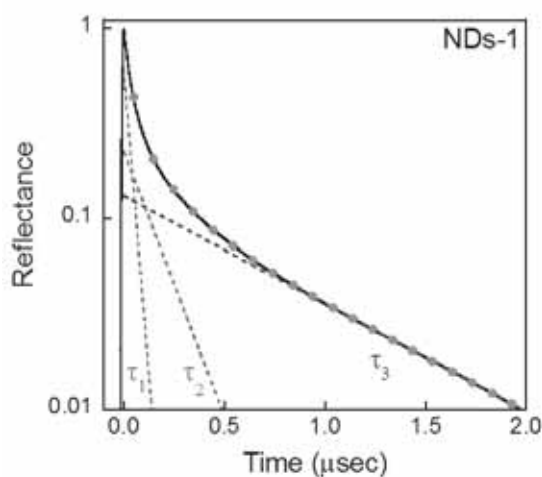


図 1: サンプル NDs1 のキャリア減衰曲線

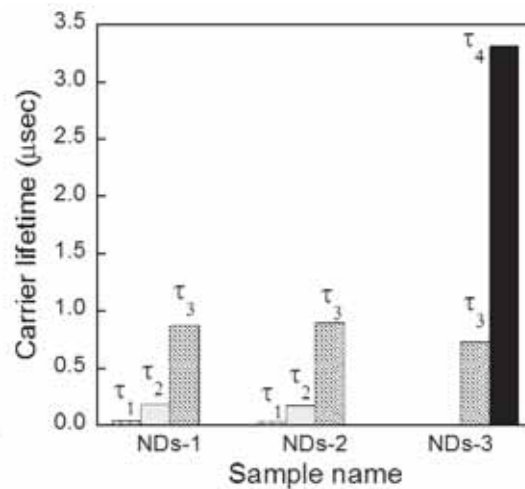


図 2: 各サンプルのキャリア寿命

3. 研究目標の達成状況

今年度の研究では深さ方向に Si ナノディスクを配列することでミニバンド化しキャリア寿命が大幅に増加することを明らかにしており、これは非常に重要な知見である。光熱変換スペクトル解析においても、同一サンプルのみ特異なスペクトルを示すことがわかっており、これがミニバンド化によるバンド構造の変化かどうかを誠意解析中である。よって本年度の研究目標達成度は7割と判断する。

4. まとめと今後の課題

本研究では、流体科学研究所がもつ中性子ビームおよびバイオテンプレートで形成した Si NDs 構造に、宮崎大学がもつ光熱変換法等材料評価技術を組み合わせることで、量子ドットによる中間バンド太陽電池実用化に不可欠なバンド構造およびキャリア振る舞いの解明を目的としたものである。本研究結果より Si NDs の配列によって電氣的・光学的特性が大きく変わることを見だしており、今後は配列条件を変えてサンプルを作成しバンド構造がどのように変化するかをより厳密に解明し、新概念太陽電池実現のための知見を得る。

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)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] D. Ohori, A. Fukuyama, S. Samukawa, and T. Ikari: Photoconductivity decay and carrier lifetime in silicon nanodisk array structure fabricated by using bio-templates and neutral beam etching, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 96-97.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13004
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2013.4 ~ 2014.3
継続年数	1年目

微小量磁性流体の磁気界面不安定性
Magnetic Interfacial Instability of Micro Magnetic Fluid Drop

須藤 誠一*†, 篠崎 成大*

西山 秀哉**††

*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

微小量体積（マイクロリットル）の磁性流体が微小な永久磁石に吸着して、その静磁場および外部の変動磁場を受ける場合に発生する磁性流体の磁氣的界面不安定性について実験的に解明し、さらに磁性流体界面現象を利用し、磁気信号によって制御可能なマイクロデバイス・マイクロマシンへの応用展開をはかる。

2. 研究成果の内容

当該研究では、2 個の針状永久磁石間に微量の磁性流体を磁場によって保持することによってマイクロ磁性流体液橋を形成し、その磁性流体液橋に外部から振幅の小さい交流磁場を作用させることによって、磁性流体液橋に上下方向の振動流動を誘起し、液橋の外部交流磁場に対する界面不安定性の動的周波数応答特性を調べたものである。すなわち、外部交流磁場の強さの振幅や周波数などの条件を変えることによって、マイクロ磁性流体液橋のくびれ部の直径変化・分裂・微小液滴の生成など、液橋応答の詳細に関して高速度ビデオカメラシステムを使用して調べた。その結果、磁性液橋は、外部磁場が永久磁石によって生成される磁場に加算される時、くびれ部が太くなり、減算される時に細くなることがわかった。また、直径の変化は逆ノコギリ波の変化を示していることが明らかとなり、これは磁性流体の流動の流路の変化によるものであることが判明した。

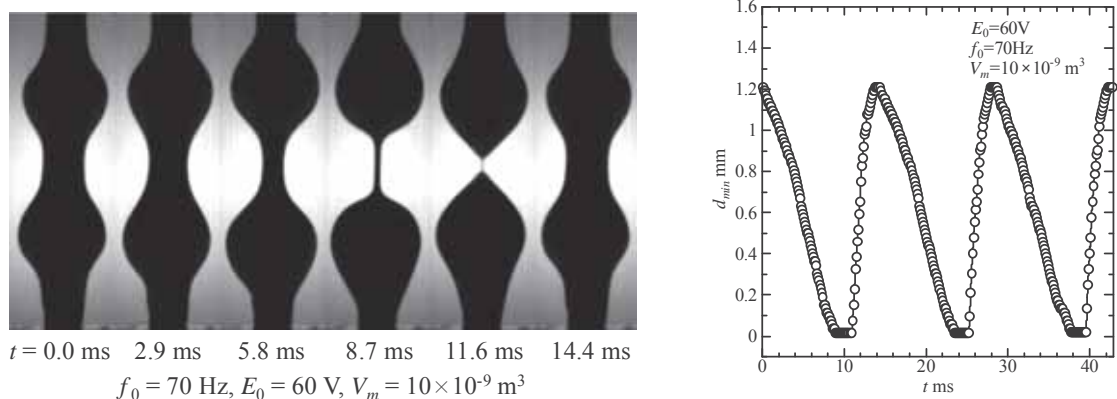


図 1：マイクロ磁性流体液橋の交流磁場による時間変化とくびれ部直径の変動

3. 研究目標の達成状況

磁性流体の量を 10 マイクロリットルとした場合の磁性流体液滴の微小磁場に対する界面不安定性によって誘起される応答を調べた。すなわち、2 本の針状永久磁石によって保持される磁性液橋をヘルムホルツコイル内に設置し、外部変動磁場による界面変形の詳細を調べ、本システムは微小化しても、調和応答を示し、また磁場強さによって液橋分裂や液滴形成が制御可能であることを示した。これらの成果は初年度計画の研究目標をカバーするものであり、本計画による研究遂行はほぼ初期に設定した目標を達成したといえる。

4. まとめと今後の課題

微量の磁性流体を磁気特性の優れた小さな永久磁石によって保持した系に外部から微小な強さの周期的磁場を印加することにより、磁性流体の界面不安定性を制御できることを確認することができた。次なる目標は、このような微量磁性流体—微小永久磁石系と外部交流磁場を用いたマイクロデバイスの設計提案、マイクロデバイスの証明試験のためのモデル機の試作、そしてマイクロデバイスの外部磁場による駆動動作特性などを調べることになる。磁気新素材を用いた新しいデバイスの開発に関しては生物システムの機構・形態・制御系に倣う方法などが革新的技術開発につながるであろう。

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] S. Sudo, M. Shinozaki and H.Nishiyama: The Dynamic Behavior of Magnet-magnetic Fluid Systems in Alternating Magnetic Fields, *Magnetohydrodynamics*, Vol. 49, No. 3-4, (2013), pp. 344-349.
- [2] S. Sudo, M. Shinozaki and H.Nishiyama: A Study on the Optical Diaphragm Using Magnetic Fluid a Permanent Magnet, *Proceedings of 23 International Conference on Adaptive Structures and Technologies*, Nanjing, China, CD-ROM, (2013), pp. 1-8.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[3] M. Ito, S. Sudo and H. Nishiyama: Oscillating Flow of Magnetic Fluid between Two Parallel Plates, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 170-171.
- [4] K. Takahashi, S. Sudo and H. Nishiyama: On the Breakup of Magnetic Fluid Bridge, *Proceedings of the Tenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2013), pp. 446-447.
- [5] S. Sudo, S. Inomata and H. Nishiyama: Interfacial Phenomena of Micro Magnetic Fluid Adsorbed on Magnetized Needlepoint in Alternating Magnetic Field, *Abstracts of Eighth Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nano Materials*, Athens, (2013), pp. 35-36.
- [6] S. Sudo, H. Takamatsu, T. Yano, H. Takana and H. Nishiyama: The Dynamic Behavior of a Micro Liquid Bridge of Magnetic Fluid in Static and Alternating Magnetic Fields, *Abstract Book of the 16th edition of the International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Quebec City, (2013), pp. 125-126.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13005
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	2年目

境界層能動制御組み込み翼による翼の高揚力化
Increment in Lift on an Airfoil Installed Active Boundary Layer
Control System Using Vortex Generator Jets

長谷川 裕晃*†, 宮腰 哲弥*, 伊藤 周行*, 大林 茂**††,
*秋田大学大学院工学資源学研究所, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

流れ場の時間的変化に適合して制御が可能な制御機能を有する翼を開発し、その制御効果と空力特性を明らかにすることを目的とする。VGJs (Vortex Generator Jets) などの制御装置を用いた流れ場の状態を考慮し流れ場変化に適合した制御システムとして、翼に込みこまれた例はない。そこで、VGJs で得られた知見を生かして、シンセティックジェットを用いた実機に応用可能な境界層制御機構を組み込んだ翼を試作し、連続的に迎角変化をつけることで時間的に変動する流れ場を再現し、制御効果を空力特性と流れ場特性から評価する。さらに、これまでの成果を活用し、はく離の前兆を捉えて制御を開始できる制御ロジックを翼の境界層制御への適用を試みる。

2. 研究成果の内容

本研究では流れ場の変化に適合し失速制御を可能にするためにシンセティックジェットによる境界層制御機構を組み込んだ翼型を製作し、制御性能を評価した。失速制御は、翼背面に設けられている静圧孔の2点間の差圧から求めた制御変数で、流れ場の状態変化を捉えることで実施した。シンセティックジェットを吹出すジェット流速 V_{javg} と主流速 U_0 との比である速度比 $VR(=V_{javg}/U_0)$ を $VR=1.2$ とした。図1(a)～(c)に $Re=1.5 \times 10^5$ の場合におけるシンセティックジェットによる制御を開始するタイミングが違う場合の結果を示す。レイノルズ数 Re は翼弦長である 200 mm を代表長さとした。失速直後に制御を開始した場合揚力係数と差圧の増加が得られ失速は抑制されている(図1(b))。さらに、失速の直前に制御を開始すると、揚力係数の低下が一切起こらず、失速角と最大揚力係数の増加が得られる(図1(c))。それに対して、制御開始タイミングが遅れ、揚力係数の低下が生じた後では、効果的な揚力回復は見られな

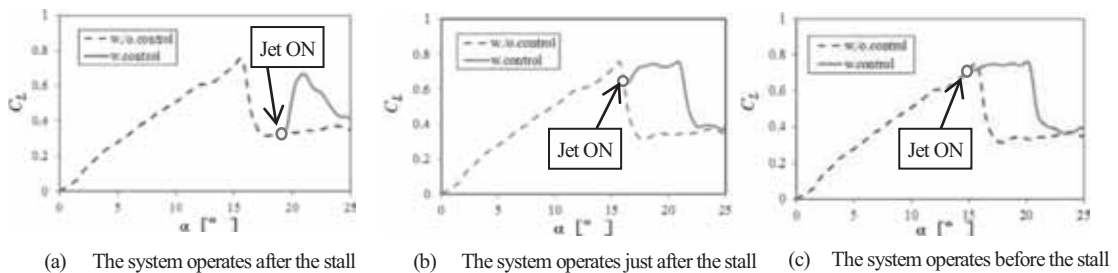


Fig.1 Difference pressure and lift coefficient curve
 $(Re=1.5 \times 10^5, VR=1.2)$

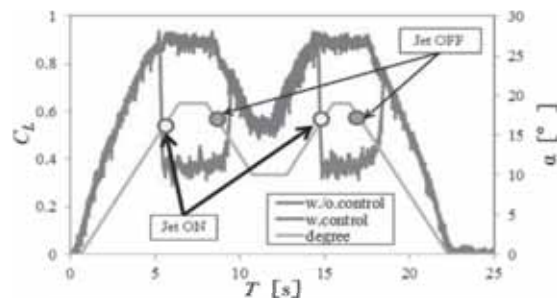


Fig.2 Variation of lift coefficient curve

($Re=1.5 \times 10^5$, $V/R=1.2$)

い。こうして翼の失速制御を行うには、制御開始のタイミングが影響することがわかった。つまり、失速直後までのタイミングで制御を開始する必要がある。図2に、連続的な流れ場変化として、翼の迎角を $0^\circ \rightarrow 19^\circ \rightarrow 10^\circ \rightarrow 19^\circ \rightarrow 0^\circ$ の順に $3.3^\circ/s$ で変化させた際の制御結果を示す。構築したシステムにおいて、連続的に変化する流れ場においても、2点間の差圧のみの制御変数で、失速制御が可能ということを確認した。つまり、失速直後に制御を開始し迎角増加に伴う失速を回避でき、迎角減少時の制御が不要となる場合は、自動的に制御を停止できることを確認した。

3. 研究目標の達成状況

今回、はく離の前兆を捉えたシステムの構築までに至らなかった。しかし、本システムにおいても、制御関数とその閾値を工夫したことで、失速を感知し揚力が低下する前に制御を開始することができたため、目標は概ね達成できた。

4. まとめと今後の課題

今年度は流れ場の状態を2点間の差圧データのみで判断できる制御関数を作成した。迎角変化に関しては、システムが流れ場の変化を感知し、能動的な制御ができた。しかし、主流速が変化した際の流れ場変化に対しては、対応できないケースがあった。これは、流れ場変化の情報を翼面の差圧データから判断しきれないことが原因である。今後は、こうした主流速が変化した際にも、システムが判断できるように制御性能を向上させていくつもりである。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む) なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 伊藤周行, 長谷川裕晃, 大林茂: 境界層能動制御装置による翼の失速制御, 2013年度日本機械学会年次大会, 岡山大学, (2013).

[2] Shuko ITO, Hiroaki HASEGAWA, Shigeru Obayashi: Synthetic Jets for Active Flow Control on a NACA0012, *APISAT-2013*, Takamatsu, (2013).

*[3] Shuko ITO, Hiroaki HASEGAWA, Shigeru Obayashi: Enhancement of the Airfoil Performance Using Active Control of Boundary Layer, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 4-5.

[4] イトゲル ウグームル, 長谷川裕晃: 翼面シンセティックジェットが前縁渦へ及ぼす影響, 2013年度日本機械学会東北支部第44回学生員卒業研究発表講演会, 山形大学, (2014).

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	J13007
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year (progressing)

Measurement of Diffusion Coefficient through Artificial Micro and Nanopores

Gary Rosengarten*†, Atsuki Komiya**††, James Herringer*

*School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, RMIT University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

- To determine the diffusion coefficient through the porous, rigid membrane of a diatom to examine the influence of the pore shape and structure on the transport of matter through the silica membrane.
- The results of the above research could possibly lead the way to apply diatoms (or the principles diatoms use) for more energy efficient synthetic filtration devices (microfluidic devices and water filtration).

2. Details of program implement

This research is being conducted using the interferometry setup developed by Prof. Maruyama and Prof. Komiya from Tohoku University. PhD student James Herringer spent one month carrying out experiments. The phase-shifting interferometer will now be used at RMIT to measure the mass diffusion field through the diatom pores. These experimental results will be used to validate a computational model.

3. Achievements

Late 2013:

- Preliminary experiments measuring the diffusion (4 x magnification) of saline (3.5 wt%) through a hole (80 μm in diameter) in a glass plate were completed at Tohoku University using the phase-shifting interferometry setup. These experiments were incomplete, however did provide encouraging initial results showing the gradual decay in the concentration difference (Figure 1).

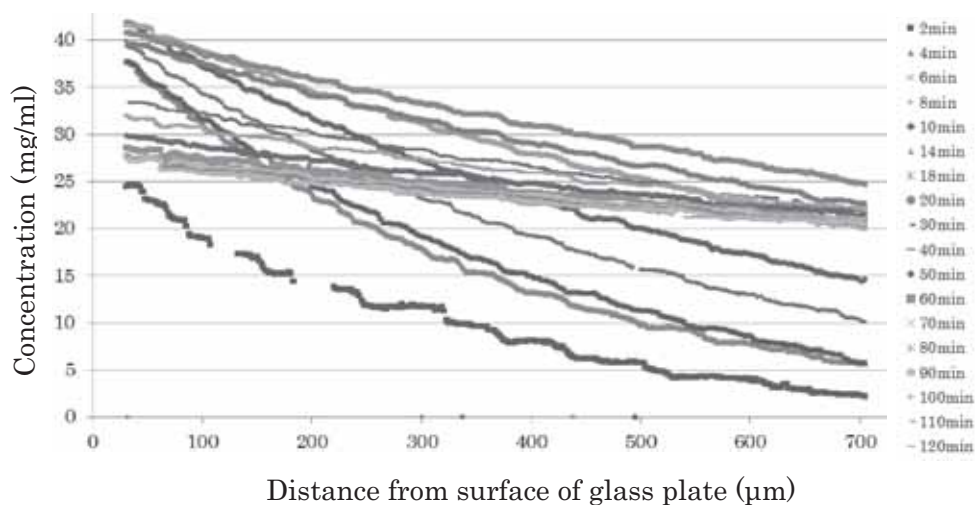


Figure 1: Concentration profile micrometers directly above the hole in the glass plate. The beginning of 2014 has been used to:

- Setup the interferometer equipment in labs at RMIT University, Australia (Figure 2) with the assistance of Prof. Komiya.

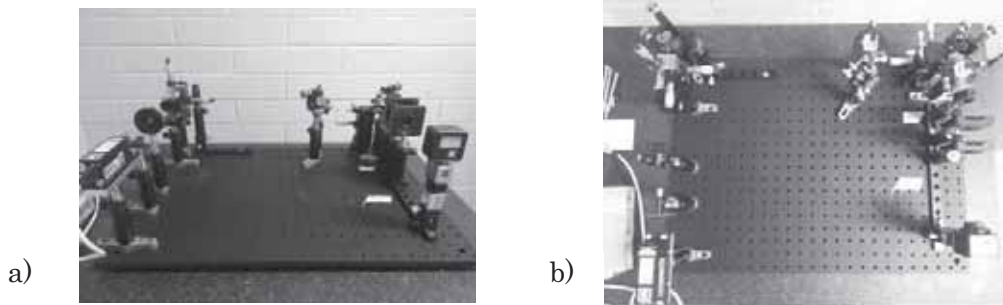


Figure 2: a) Side view and b) Top view of the interferometry setup in RMIT University labs (equipment from IFS collaborators at Tohoku University).

- Obtain approval from the OH&S department at RMIT to allow safe use of the class 3B semi-conducting laser integrated into the interferometer setup.
- Manufacture a polydimethylsiloxane (PDMS) gasket to minimise the amount of secondary diffusion through gaps between the glass plate and the walls of the cuvette apparent from previous experiments (Figure 3).

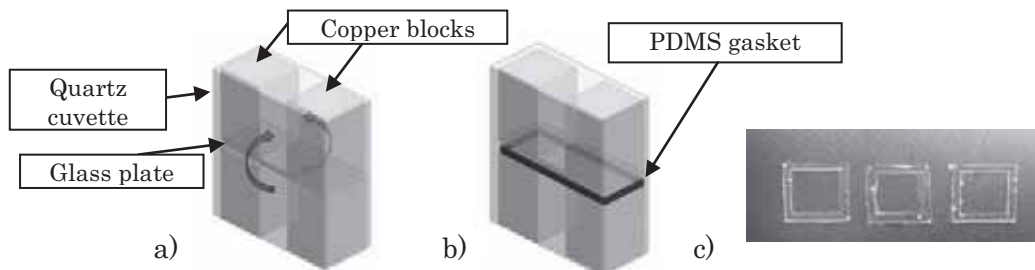


Figure 3: a) and b) Schematic of diffusion cuvette with and without the PDMS gasket, respectively, showing secondary diffusion (arrows) through the gaps between the glass plate and the quartz cuvette. c) Fabricated PDMS gaskets.

- Overcome difficulty in setting up the CCD camera component in the interferometry equipment.

4. Summaries and future plans

Preliminary experiments have been conducted to examine the diffusion through a diatom membrane. With further testing to be completed over the coming months we will begin to obtain complete results.

The interferometer equipment has now been successfully setup in labs at RMIT University (Australia). Once the safety documents are approved experiments to measure the diffusion coefficient can begin over the coming months, scheduled for May, June and July (2014).

The experimental plan is as follows:

- Conduct diatom/interferometry experiments 4x and 1x magnified field of view to determine the pseudo-diffusion coefficient as well as the detailed concentration gradient at smaller scales.
- Conduct measurements examining the effect of particle size and pore shape on the mass diffusion through the diatom membrane.
- Complete computational simulation to be validated by the experimental results.

5. Research results (* reprint included)

Not applicable. Research ongoing.

課題番号	J13008
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	2年目

ナノディスクアレイ構造を用いた知能情報処理回路
Intelligent Information Processing Circuits Using Nanodisk Array Structure

森江 隆*†, 寒川 誠二**††

東原 敬*, 倉光 良明*, 田村 洋典**

*九州工業大学生命体工学研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

九工大が産総研の協力の下で開発する Fin 型トランジスタ (FinFET) と、東北大学の独自技術である中性粒子ビーム加工技術を用いて形成する超微細構造 (ナノディスクアレイ) を組み合わせて、ナノ人工神経回路を構築し、知能情報処理の基本的機能を実験により確認する。

2. 研究成果の内容

脳の情報処理機能を模倣した大規模脳型集積システムを開発するために、スパイクパルスにより駆動される積分発火型 (IF) ニューロンモデルを実現するナノデバイスの開発を目指している。IF ニューロンモデルでは、スパイクパルスの入力に伴って、「シナプス後電位 (PSP)」と呼ばれる、シナプス結合荷重に比例した振幅を有する一時的電位変化をニューロン入力部に生成する必要がある。このために我々は、東北大学流体科学研究所 寒川研究室で開発されたバイオテンプレートと中性ビームエッチング技術により作製される 2 次元ナノディスクアレイ (NDA) 構造を用いて、その中での電子ホッピングを用いた PSP 生成を研究してきた。確率的な電子ホッピングにより、脳での情報処理に重要と言われているノイズ (ゆらぎ) の生成も自然に実現できるという利点があり、ナノディスクアレイ上に付加した制御電極によりゆらぎが制御できることも単電子回路シミュレーションで示してきた。

本共同研究では昨年度に引き続き、ゆらぎを含む微細ニューロンデバイス実現のために、微細化に有効で、かつ低ゲート容量を実現できる FinFET と、NDA を組み合わせたデバイス (NDA-FinFET) 構造作製プロセスを開発・検討すると共に、構造シミュレータでの解析と回路構成の基本検討を行った。

これまでの検討により、NDA-FinFET 構造作製プロセスにおいて最も困難な部分は FinFET 作製後の化学機械研磨 (CMP) による平坦化処理であることが判明した。CMP により FinFET ゲート上部を露出させると共に、NDA 形成のためにはフェリチン・タンパク超分子を含む溶液を均一にスピコートするために平坦化することが必要だが、試作段階では研磨速度が安定しないために、終点判定が難しいという問題があった。FinFET ゲート部は数 100nm であるので、光学顕微鏡での観察も困難である。そこで、試作用の単体デバイス (TEG) では、図 1 のように FinFET 周辺に終点検出用の大きなダミーパターンを含めることとし、これを光学顕微鏡で観察しながら CMP を行うことで、終点判定を行うことができた。FinFET ゲート部の断面 TEM 写真を図 1 に併せて示す。

一方、ゆらぎ特性を顕在化させるために、さまざまな NDA 構造シミュレーションを実施した。ゆらぎ特性は、2次元構造 NDA よりも 1次元構造の方が大きくなることがわかってきたが、1次元 NDA を作製することはリソグラフィの解像度の点から難しい。そこで、部分的に1次元構造になるような砂時計型 NDA パターンを用いることでゆらぎを大きくできることをシミュレーションで確認した (図2)。

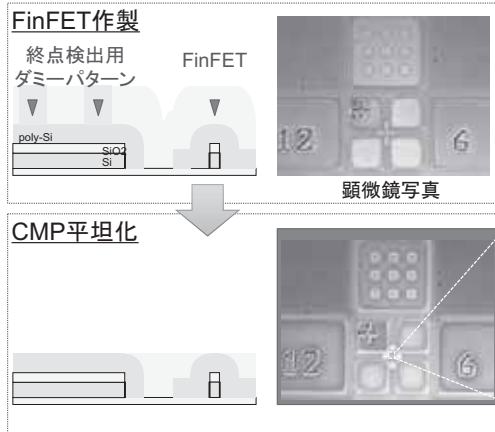


図1 : NDA-FinFET ニューロンデバイス作製プロセス: CMP 平坦化プロセスでの終点検出用ダミーパターン使用。

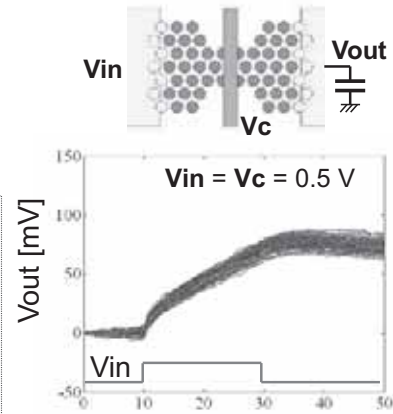


図2 : 砂時計型 NDA パターンでの出力応答のゆらぎシミュレーション (100 試行の繰り返し結果)。

3. 研究目標の達成状況

ナノ構造を利用した超低電力・小型の脳型処理回路の実現に向けて、2年目は FinFET とナノディスクアレイ構造を結合した単体デバイス製作のためのプロセス構成を改良しつつ、試作を進めてきた。来年度は単体デバイスを測定評価することで、問題点を明らかにし、情報処理回路として完成を目指す予定である。

4. まとめと今後の課題

FinFET とナノディスクアレイ構造を結合した単体デバイスの製造プロセス構成およびデバイス構造を改良した。今後、試作を完了し、特性評価を行い、改善を重ねる。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] T. Morie, H. Liang, Y. Sun, T. Tohara, M. Igarashi, and S. Samukawa: A Silicon Nanodisk Array Structure Realizing Synaptic Response of Spiking Neuron Models with Noise (Invited Paper), *The 19th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, Singapore, (2014), pp. 185-190.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] T. Morie, T. Tohara, K. Endo, M. Igarashi, and S. Samukawa: Intelligent Information Processing Circuits Using Nanodisk Array Structure, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 98-99.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13009
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

ナノ構造体を用いた量子効果の発現とその応用に関する研究
Research of Quantum Size Effects Produced in Nanostructures and Their Applications

高橋 庸夫*†, 寒川 誠二**††
 *北海道大学情報科学研究科, **東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

東北大が持つナノディスクアレイ（円盤状シリコンナノ構造が2次元的に規則配置した構造）の作製技術と、北海道大学が持つ量子効果デバイスに関する設計技術を融合し、ナノディスクの特性を生かした従来にない量子デバイスを開発するため、特性評価技術を確立する。

2. 研究成果の内容

消費電力を低く抑えた上で、高集積化と高速動作が可能なデバイスの構築が必要不可欠であり、単電子トランジスタ(SET)は、その候補である。ただし、低消費電力であるということは、配線で接続すると動作速度が遅くなるということを意味するので、連結したドットで高い機能を出す必要がある。本年度は、ドット間の連結の度合いを電子の数を変えることで調整する手法について、実験的な検討を行った。

多数のドット間の連結を評価するのは困難を極めるので、ここでは図1に示す、2個のドットを有する単電子トランジスタ構造(DQD SET)を用いた。この構造では、量子情報デバイスや単電子ポンプなどへの応用が期待されている。その際、2つの量子ドット(QD)間の容量結合(カップリング容量)の制御が重要である。

DQD Si-SETは、EBリソグラフィとドライエッチングとパターン依存酸化法を用いてSOI基板上作成した。この上に微細ゲート電極(GA, GB)を取り付け、さらにこの上に層間絶縁膜を介して、素子全体を覆うように上層ゲート電極G_{top}を取り付けてある。

図2(a), (b)は上層ゲート電圧3V、ドレイン電圧1mVの条件で、微細ゲート電極GA, GBに印加する電圧V_A, V_Bに対してドレイン電流I_dの等高線をプロットしたものである。典型的なDQDの特性が得られており、また2個のQDはそれぞれ微細ゲート電極GAとGBの直下に形成されていることがわかる。図では、I_dの大きさを白(低)～青～赤(高)で示して

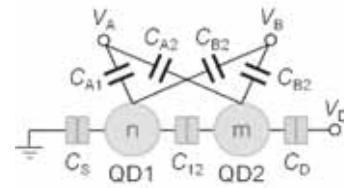
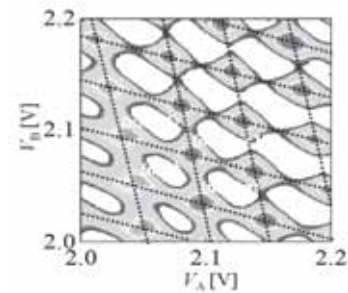
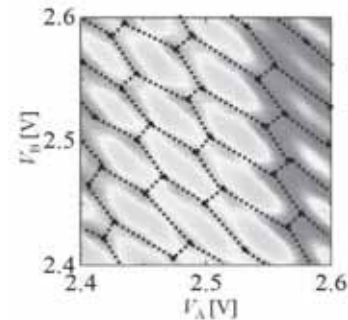


図1: DQD SETの等価回路



(a) 電子数 50 個の領域



(b) 電子数 60 個の領域

図2: DQD SETの特性

いる。(a)と(b)はVA, VBに印加する電圧の範囲を変えて, QD中の電子数がそれぞれおよそ50と60個の状態としたものである。(a)はDQDのカップリング容量(CC)が小さく, 2つのQDがほぼ独立している場合, (b)はCCが大きくなった弱結合電荷状態のハニカム構造になっていることが分かる。つまり, QD中の電子数が増加することでQD間の結合が強くなり, CCが増加したと考えられる。それぞれの結果におけるCCの値を見積もるためMonte Carlo Simulationの結果と比較したところ, (a)はおよそ $CC = 5aF$, (b)は $15aF$ であることが分かった。さらにVA, VBを大きくすることで, CCをさらに増加させ, 強結合状態にすることも可能であることも示している。QD中の電子数増加によるCCの増加の理由は, 電子数が増加すると電子管の反発で電子がドットの外周に配置するため, 実効的なQDが大きくなり, QD間の距離が近づき, CCが増加したと考えられる。これらの結果は, 比較的広いゲート電圧領域で安定な結合状態を実現できた上に, 電子数を増減することでQD間のカップリング容量CCをゆっくりと調整することができるDQDを実現したことを示している。

3. 研究目標の達成状況

単電子効果の省電力性を効果的に発展させ, 将来の低消費電力と高機能を併せ持つ, ナノディスクアレイデバイスの実現を目指して検討してきているが, その高性能化の向上には, 量子情報処理などの量子力学的な重ね合わせや不確定性を積極的に用いた情報処理を取り込むことが考えられる。このためには, ナノディスク(ドット)間の結合が重要となるが, これを電子数により調整可能であることが示された。

4. まとめと今後の課題

単電子デバイスのドット間の結合を調整し, 少数電子領域での量子力学的効果を用いた新たな性能の開拓を目指して, 電子数を変えることでドット間結合が可変であることを示した。この手法では結合の度合いを自由に変えるためには, 必ずしも少数電子領域にならないことが課題であり, ゲート電圧変調などを用いた結合度合い調整法の構築が次の目標となる。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] Y. Takahashi, S. Ueno, and M. Arita: Multi-Functional Logic Gate by Means of Nanodot Array with Different Arrangements, *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2013, Article ID 702094, (2013), 7pages.
- [2] Y. Takahashi, H. Takenaka, T. Uchida, M. Arita, A. Fujiwara, and H. Inokawa: High-speed operation of Si single-electron transistor, "ULSI Process Integration 8", C. Claeys, et. al., Eds, *ECS Transactions*, Vol. 58, No. 79, (2013), pp. 73-80.
- [3] T. Uchida, M. Arita, A. Fujiwara, and Y. Takahashi: Double-quantum-dot Si single-electron transistor with multiple gate electrodes fabricated by PADOX, *Proceedings of the 2013 World Congress on Advances in Nano, Biomechanics, Robotics, and Energy Research (ANBRE13)*, (2013), pp. 498-503.

他 合計 7 件

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] T. Uchida, H. Takenaka, I. Yoshioka, M. Arita, A. Fujiwara, and Y. Takahashi: Double-dot Si single-electron transistor with tunable coupling capacitance by the number of electrons in the dot, *2013 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW-2013), Workshop Abstracts*, Kyoto, (2013), pp. 59-60.

他 合計 36 件

3) その他(特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J13010
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	3年目

精密なビームフラックス制御による高品質量子ドット超格子の作製
Fabrication of Quantum Dot Superlattice Using Precise Beam Flux-Control Technique

喜多 隆*†, 寒川 誠二**††
 *神戸大学工学研究科, **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

InGaAs/GaAs 量子ドットは近赤外域で高感度に光応答するため、レーザー、光中継デバイス、太陽電池に最適な材料として注目されている。本研究ではボトムアップで作製したナノ構造に対して3次元構造化した新しいタイプの高品質な量子ドット作製を実現するとともに、積層成長による超格子構造を作製してデバイス動作に必要なミニバンド電子状態を明らかにすることを目的にした。

2. 研究成果の内容

固体ソース分子線エピタキシー法(MBE)を用いて GaAs (001) 基板の上に InAs を 2.0 モノレイヤー(ML)供給し、初期層としての自己形成量子ドットを作製した。その後 GaAs (14 ML) 中間層と InAs (1.4 ML) 量子ドットを最大 50 回交互に成長し、超格子を作製した。また、積層方向を制御するため、In フラックスの方向を調整して成長した。

図1左に(-110)断面の透過電子顕微鏡写真を示す。量子ドットが積層方向に転移フリーで配列制御されており、高品質の量子ドット超格子を作製することに成功した。またこれら量子ドット超格子からの発光特性は図1右のように、積層数に依存して顕著に変化し、特に積層に伴う、[001]偏光成分の顕在化は、積層方向に電子状態が非局在化していることを示す直接的な結果である。

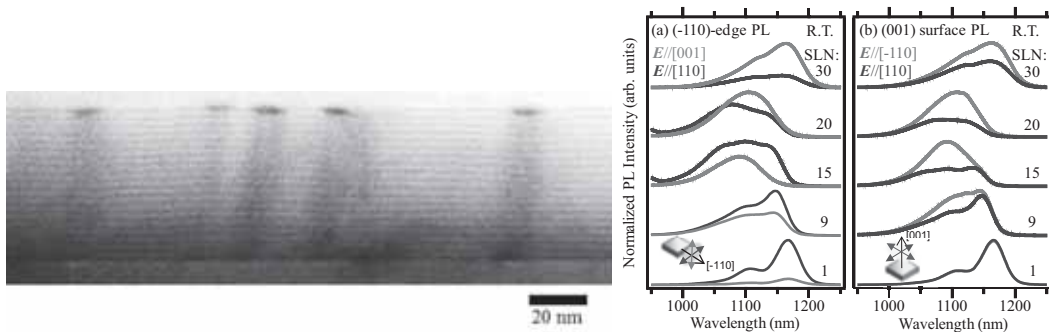


図1：量子ドット超格子の透過電子顕微鏡写真（左）と発光スペクトル（右）。

3. 研究目標の達成状況

精密なビームフラックス制御による高品質な InGaAs/GaAs 量子ドット超格子が作製できるようになれば、量子ドット3次元構造を利用して次世代型高変換効率

太陽電池に最適な光応答制御技術を構築できる。このような特性向上の効果は量子ドットを多層に積層した超格子構造に顕著に表れると予想される。本研究では40層を超える超格子構造の作製に成功し、世界で初めて量子ドット超格子のミニバンド形成を実証した。

4. まとめと今後の課題

本研究では、3次元構造化した高品質な量子ドット超格子を作製するとともに、積層数に依存したミニバンド電子状態を明らかにした。これらの成果は、量子ドット3次元構造を利用した次世代型の高変換効率太陽電池に最適な光応答制御技術の構築に不可欠である。特に、InGaAs/GaAs量子ドットは近赤外域で高感度に光応答するため太陽電池に最適な材料として最適であり、今後は光吸収特性やキャリア励起緩和プロセスを明らかにすることによって、太陽電池の高効率化に結び付く物性を顕在化させ、最適な太陽電池デバイス構造が実現できると考えている。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] 喜多隆: 自己形成過程を原子レベルで制御した量子ドットの作製と高機能光応答の実現, *スマートプロセス学会誌*, Vol. 2, No. 5, (2013), pp. 206-212.
- [2] 喜多隆: 半導体量子ドット配列構造による新規光機能の実現, *Nanotech Japan Bulletin*, Vol. 6, No. 6, (2013), pp. 1-9.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[3] T. Kaizu and T. Kita: Fabrication of InAs Quantum Dots on Nitrided GaAs (001) Surface, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 102-103.
- [4] T. Kita: Carrier Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dots for Intermediate-Band Solar Cells, *High-efficiency materials for photovoltaics*, Imperial College London, (2013), (Invited Talk).
- [5] Y. Harada, T. Maeda, and T. Kita: Intraband Carrier Dynamics in Self-Assembled Quantum Dots for Infrared Optical Devices, *EMN Fall Meeting*, Florida, (2013), (Invited Talk).
- [6] 喜多隆: 量子ドットを利用した光ハーベスト, 電気情報通信学会 次世代ナノ技術に関する時限研究専門委員会 第4回研究会, (株)島津製作所 関西支社 マルチホール, (2014), 招待講演.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J13011
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	3rd year

Reconstruction of Wall thinning from Pulsed ECT Signals

Zhenmao Chen*†, Toshiyuki Takagi**††
 Shejuan Xie**, Tetsuya Uchimoto**, Yong Li*, Li Wang*
 *School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China
 **Institute of Fluid Science, Tohoku University
 †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Based on the researches in the former two years, the aims of the third year project is to investigate the efficiency of PECT for the nondestructive evaluation of plastic deformation in austenitic stainless steel, a typical material in Nuclear Power Plants. Both simulation and experiments are conducted based on the codes and the experimental setups constructed in the last two years.

2. Details of program implement

To clarify the feasibility of PECT for evaluation of plastic deformation, the major works performed in the third year project are as follows: 1) Enhancement of the 3D numerical PECT signal simulator for evaluation of damage in structures of magnetic material; 2) Fabricate test-pieces with plastic deformation, and conduct PECT measurements using the smart PECT prototype systems established last years. 3) Investigate the correlation of the applied plastic deformation and the signals of PECT to clarify the validity of PECT for plastic deformation evaluation. 4) Measure the permeability with B-H analyzer and compare the measured PECT signals with that of simulation obtained with the measured permeability.

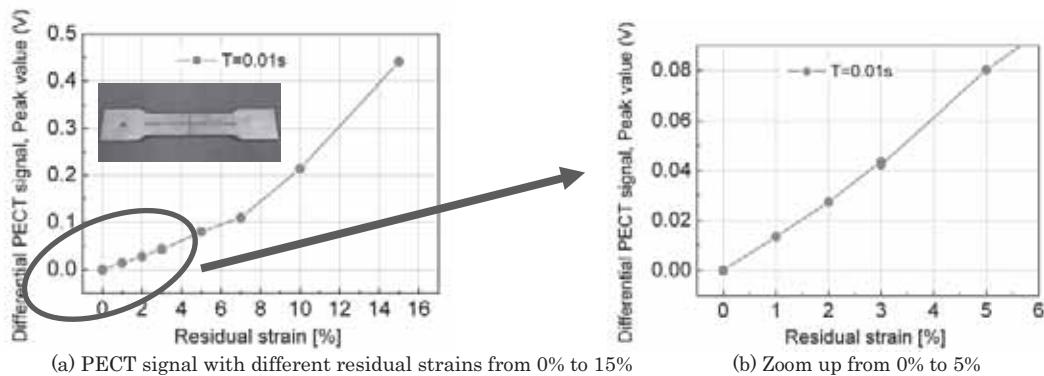


Fig. 1 Dependence of PECT signals on residual strains

In practice, 9 specimen of 304 stainless steel are fabricated and residual strains of various scales are introduced with a material testing machine. The target residual strains are 0%, 1%, 2%, 3%, 3%, 5%, 7%, 10%, 15% respectively. The TR type PECT probe is utilized in PECT experiment. During measurement process, experiments have been repeated 5 times on both sides of each specimen, and the averaged signal is taken as the final measurement results. Figure 1 shows the dependence of the measured peak value of PECT signals on the residual strains where signal of 0%

strain specimen is taken as reference. It can be found that there is promising relationship between PECT signal and residual strain. The PECT signal is monotonically increasing with residual strain even if the plastic deformation is smaller than 5%. In addition, the good repeatability of signals of two 3% strain specimens in Fig.1(b) shows that the variability of PECT signal is quite small.

The thicknesses of all test-pieces are measured after tensile tests. The PECT signal caused by only thickness variety of specimen is predicted by using the numerical solver developed in this project. It is found that the PECT signal changes due to the thickness variety are much smaller than the total signal amplitude. Simulation results also show that there is still a clear relationship between the signal change and the residual strain, and reveals the feasibility of PECT for plastic deformation evaluation.

3. Achievements

The results in this work reveal that the PECT is feasible for evaluation of plastic deformation in 304 austenitic stainless steel even for a residual plastic strain of relative small value. The thickness change of specimens does not give significant influence on the PECT signals. In addition, the dependence of the electromagnetic material properties on the plastic deformation is also significant.

4. Summaries of the three years project

A fast numerical code for efficient simulation of PECT signals has been developed in the first year project, and it was used for the wall thinning reconstruction with neural network method and the conjugate gradient method. In the second year project, reconstructions of defect are conducted by using the genetic algorithm, the simulated annealing and the tabu search method aiming to clarify their validity and efficiency for practical applications. In the last year, the feasibility of PECT for evaluation of the plastic deformation in austenitic stainless steel has been investigated through experiments and numerical simulation.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - *[1] Shejuan Xie, Yunfei Li, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Yasuhiko Yoshida: A Numerical Method for Simulation of Nonlinear Eddy Current Testing Signals based on Transient Ar Formulation, *Materials Transaction*, Vol. 54, No. 6, (2013), pp. 964-968.
 - [2] Li Wang, Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Yong Li, Xiaowei Wang, Toshiyuki Takagi: Reconstruction of Deep Stress Corrosion Cracks Using Signals of the Pulsed Eddy Current Testing, Vol. 28, *NDTE*, (2013), pp. 145-154.
 - [3] Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Xiaowei Wang, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto: Sizing of Wall Thinning Defects Using Pulsed ECT Signals Based on a Hybrid Inverse Analysis Method, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 49, (2013), pp. 1653-1656.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [4] Zhenmao Chen, Shejuan Xie, Xiaojuan Wang, Tetsuya Uchimoto Toshiyuki Takagi: Evaluation of Cavity Defect in Metallic Foam with DCPD Method, *Proc. 1st Int. Symp. Smart Layered Material and Structures for Energy Saving*, OS8-12, (2013), p1-2.
 - [5] Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto: Evaluation of Wall Thinning in Carbon Steel Piping Based on Magnetic Saturation Pulsed Eddy Current Testing Method, *Proc. ENDE'2013*, (2013), pp. 61-63.
 - *[6] Zhenmao Chen, Shejuan Xie, Xiaojuan Wang, Tetsuya Uchimoto Toshiyuki Takagi: Reconstruction of Wall Thinning from Pulsed Eddy Current Testing Signals, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 28-29.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J13012
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	3年目

中性粒子ビームプロセスの最先端 MOS トランジスタに関する研究
Study on the Advanced MOS Transistor of the Neutral Beam Process

遠藤 和彦*†, 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

近年の MOSFET の微細化に伴い、微細加工の際に発生する素子のダメージが、デバイス特性に与える影響が増大している。本研究は、半導体素子のダメージによる特性劣化を防止するために、新規のダメージフリー加工技術である中性粒子ビーム技術をナノデバイス作製に適用し、特性を向上させることを目的とする。特に中性粒子ビーム酸化プロセスを用いた、Ge MOSFET 作製の検討を行う。

2. 研究成果の内容

これまで中性粒子ビームを用いたシリコン立体チャネルデバイス(図 1)加工、立体チャネルデバイス用シリコンゲート絶縁膜の形成技術の開発を行った。その結果、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(図 2)、高品位シリコン酸化膜の形成に成功し、国際電子デバイス会議にも採択されるなど注目を集めてきた。本研究では、対象を次世代チャネル材料のゲルマニウムに発展させ、ゲルマニウムプロセスへの中性粒子ビームの適用について注力して研究を行った。

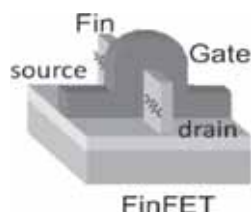


図 1: シリコン立体チャネルデバイス模式図

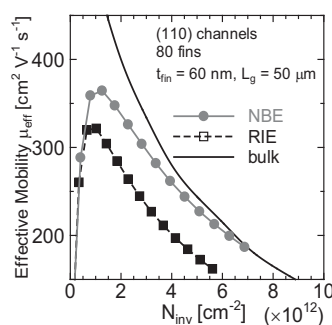


図 2: 中性粒子ビームによる移動度向上

中性粒子ビームを Si および Ge の酸化に適用し、Ge MOSFET 作製に適用することを試みた。基板温度 300°C の低温で、それぞれの基板で酸化を試みたところ、図 3 に示す様に中性粒子ビームのエネルギーを増加していくと、シリコン、ゲルマニウム共に活性化エネルギーが 0.005 eV という低い値に低減できることが明らかになった。続いて、それぞれの酸化膜上に金属電極を堆積し、MOS キャパシタを作製し特性を調べた。結果を図 4 に示す。ビームエネルギーを 5eV 以上に増大させていくと、Ge および Si ともに界面準位が低下し、Ge においても界面準位は $10^{11}/\text{cm}^2$ と良好な値が得られることが分かった。

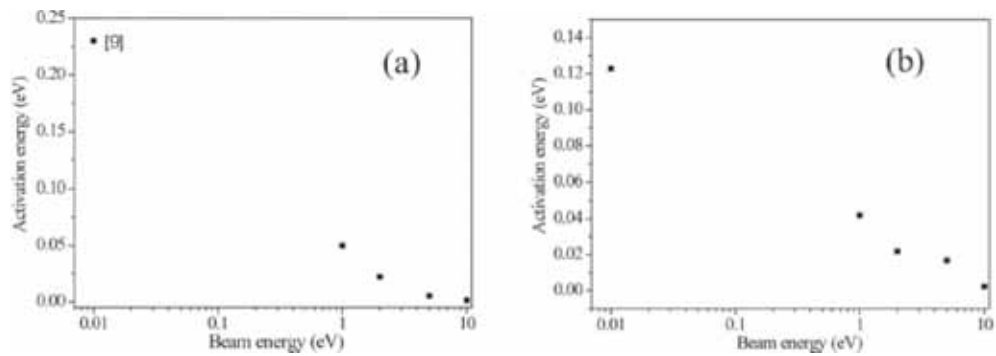


図3：活性化エネルギーのビームエネルギー依存性 (a)Ge, (b) Si

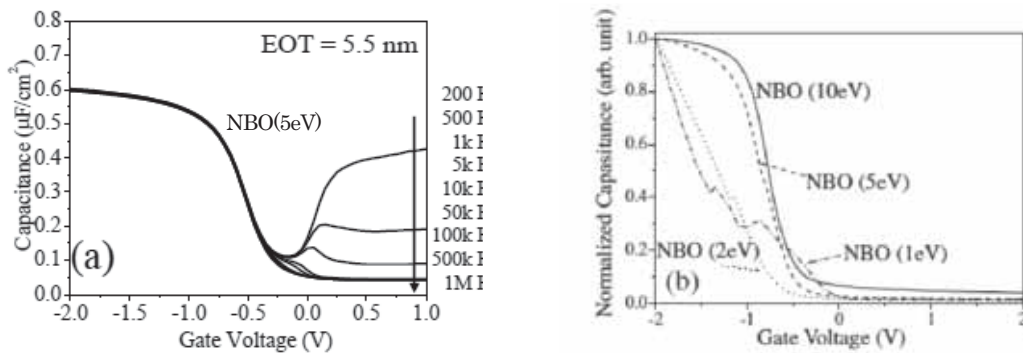


図4：C-V特性 (a) Ge, (b) Si

3. 研究目標の達成状況

ゲルマニウムの中性粒子ビーム酸化により、良質な界面が形成され、低い界面準位密度が得られた。また、ゲルマニウムトランジスタの作製プロセスの構築を終了した。しかしながら、トランジスタの動作には至っていないので、今後トランジスタを試作し動作実証することが課題である。

4. まとめと今後の課題

中性粒子ビームの最先端 MOS トランジスタへの応用に取り組み、ゲルマニウムの中性粒子ビームプロセスの開発と、デバイス試作プロセスの構築をおこなった。今後は MOS トランジスタを実際に試作し、トランジスタ特性を検証することが課題である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Kazuhiko Endo and Seiji Samukawa: Fabrication of advanced CMOS Transistors, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), 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

Project code	J13013
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year

The Continuous Spectrum in the Moore-Saffman-Tsai-Widnall Instability

Stefan G. Llewellyn Smith*†, Yuji Hattori**††, Makoto Hirota**

*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, UCSD

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

High-Reynolds number flows are dominated by vortical structures. The instability of coherent vortex structures is fundamental to the aircraft wake problem, which affects flight operations near airports. Vortex filaments are unstable to a number of instabilities: the long wavelength Crow instability, the short wavelength Moore–Saffman–Tsai–Widnall (MSTW) instability and the ultra-short wavelength elliptical instability. We consider the initial-value problem for the MSTW instability in the case of smooth profiles, for which the continuous spectrum is critical.

2. Details of program implement

Professor Llewellyn Smith visited the Institute of Fluid Science during the period September 12–16, 2013. During this visit, Professors Llewellyn Smith and Hattori discussed stability results related to Professor Hattori’s simulations of Taylor–Green vortex instability and the link with pseudospectra. Professor Llewellyn Smith gave a seminar and discussed stability criteria with Dr. Hirota.

3. Achievements

Professor Hattori’s student Gau studied the MSTW instability of the two-dimensional Taylor-Green vortices. The linear transient growth was studied by non-modal stability analysis, and it was found that its mechanism for small optimization time is the stretching near the hyperbolic stagnation points. For large optimization time, the transient growth is controlled by the strain field around the elliptic stagnation points. The evolution of localized disturbances in the Taylor-Green vortices was then studied by direct numerical simulation: the transition from the linear stage to the weakly nonlinear stage proceeds gradually compared to the case of the elliptical flow. These results give insight into the evolution of vortices in strain (“expected result” in the application form).

Professor Llewellyn Smith computed pseudospectra to compare with these simulations. He has also been working on the initial-value problem for the evolution of disturbance on Rankine vortices. The recent paper of Roy and Subramanian has clarified some of the previous work on the subject, and its relevance to the MSTW instability is under investigation.

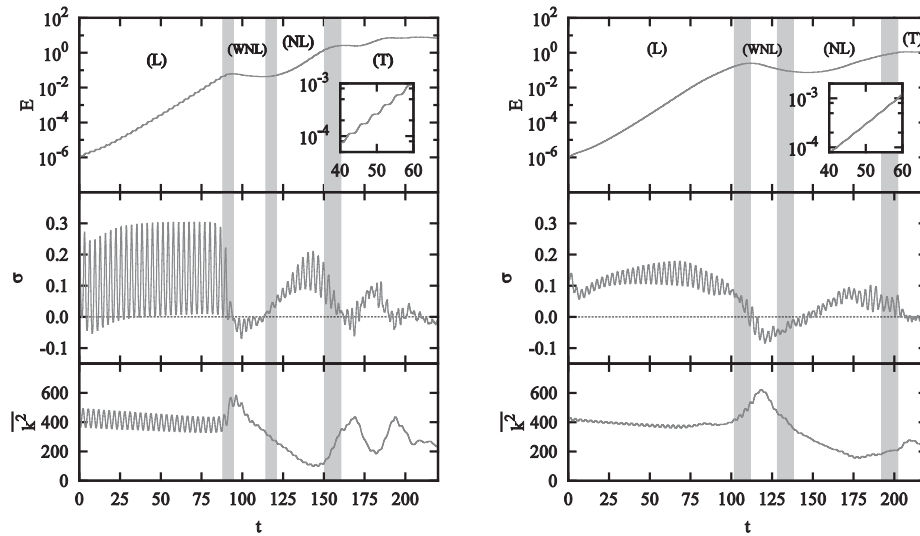


Figure 1 : Time evolution of a localized disturbance in 2D Taylor-Green vortices. (Top) energy of the disturbance; (middle) instantaneous growth rate; (bottom) averaged wavenumber. Left: single wave packet, right: averaged wave packet.

4. Summaries and future plans

One of the problems in vortex stability is the limited number of known exact solutions to Euler's equations that are used as basic states (these are usually limited to circles or ellipses with constant vorticity). A promising family of more general solutions to use as basic states is that obtained in Lagrangian variables by Abrashkin and Yakubovich. The stability of these states has not been extensively investigated previously, although geometrical stability calculations have been carried out. The mapping technique use by Professor Llewellyn Smith to look at hollow vortex stability will allow these exact solutions with non-trivial geometry and vorticity to be considered.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
 - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] Yuji Hattori and Stefan G. Llewellyn Smith: The continuous spectrum in the Moore–Saffman–Tsai–Widnall instability, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 152–153.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J13014
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

多目的最適化における説明変数空間と目的関数空間の可視化
Visualization of Objective and Variable Spaces for Multi-Objective Optimization

伊藤 貴之[†], 久保田 真季*,
大林 茂^{**††}, 竹島 由里子**

*お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

多目的最適化は航空機をはじめとする多くの製造物の設計解析過程に多用されている。一方でコンピュータ可視化の分野では近年、複数の画面の連携操作によって複雑な情報を可視化する技術が多く開発されている。本研究ではその仕組みを利用して、多目的最適化における説明変数空間と目的関数空間を効果的に可視化する。

2. 研究成果の内容

本章では共同研究者の大林らが 2005 年に発表した航空機設計の多目的最適化結果を題材にして、本研究成果である可視化結果を示す。この多目的最適化は、SST 主翼における超音速巡航の抵抗係数、遷音速巡航の抵抗係数、超音速巡航時の翼根にかかる曲げモーメント翼先端部にかかる捻りモーメント、の 4 つの目的関数について最小を試みたものであり、本研究でもこの 4 つの目的関数を可視化の対象とした。設計変数には翼の形状に関する 72 個の変数を用いて、一世代 64 個体として多目的遺伝的アルゴリズムを適用し、近似パレート面が変化しなくなるまで 75 世代の進化計算を実行した。この 72 次元の説明変数を全て一画面に可視化することは困難であるため、以下の 6 個の説明変数

- 内翼および外翼のスパン長 (dv0, dv1 と称する)
- 2 箇所の後進角 (dv2, dv3 と称する)
- 翼根の 2 箇所における翼弦長 (dv4, dv5 と称する)

を可視化の対象とした。

図 1 は本可視化手法の対話操作機能を用いて、目的関数の範囲を「超音速巡航の抵抗係数を小さく」「捻りモーメントを小さく」の 2 点において絞り込み、これに該当する計算結果とその設計変数を赤線で表示した結果である。このような計算結果をもたらす設計変数の特徴として、dv0 が大きく、dv2, dv3, dv4, dv5 がそれぞれ小さい、ということがいえる。このような設計によって、超音速巡航の抵抗係数だけでなく捻りモーメントも小さくなる、という可視化結果が得られたことが当研究において新しい知見につながった成果のひとつといえる。

3. 研究目標の達成状況

多目的最適化結果の観察結果において、従来の可視化手法よりも対話操作性の高い可視化を実現する、という当初の想定は達成できた。しかし具体的な成果は 1 種類のデータでしか示せていない。航空機設計の多目的最適化に関する他のデータでも検証を進めること、また現状以上に汎用性の高い可視化手法を開発すること、以上の 2 点から研究を続行する必要がある。

4. まとめと今後の課題

本研究課題では、説明変数と目的関数の両方を1画面に表示して互いに連携操作させることにより、両者の関係性を視覚的に認識しやすくし、多目的最適化問題の数値分布の理解を支援する手法を提案した。

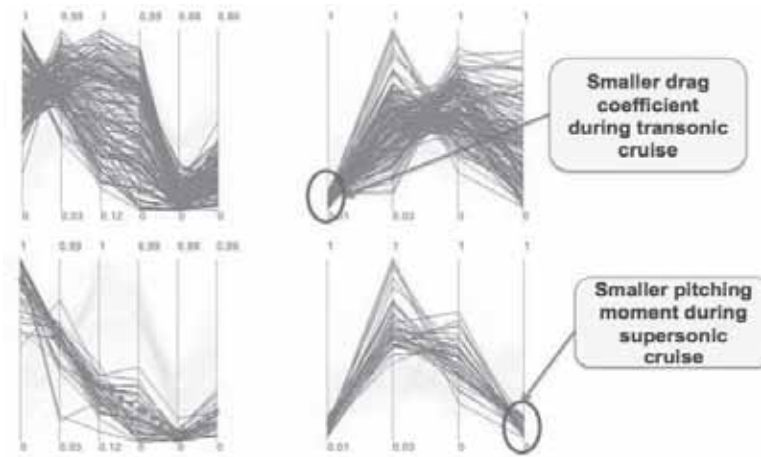


図1：可視化結果の例

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] 久保田, 伊藤, 大林, 竹島: 多目的最適化のための説明変数と目的関数の連携可視化, 可視化情報シンポジウム, 工学院大学, B217, (2013).

[2] M. Kubota, T. Itoh: A Linked Visualization of Explanatory Variable and Objective Function Spaces for Multi-objective Optimization, *NICOGRAPH International 2013*, 九州大学, (2013).

*[3] M. Kubota, T. Itoh, S. Obayashi, Y. Takeshima: EVOLVE: A Linked Visualization Environment for Explanatory Variables and Objective Function of Optimization Problems, *Cyberworlds 2013*, Poster Session, 慶應義塾大学, (2013).

*[4] T. Itoh, M. Kubota, S. Obayashi, Y. Takeshima: EVOLVE: A Linked Visualization Environment for Explanatory Variables and Objective Function of Optimization Problems, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 26-27.

[5] M. Kubota, T. Itoh, S. Obayashi, Y. Takeshima: EVOLVE: Explanatory Variables and Objective function Linked Visualization Environment, *IEEE Pacific Visualization 2014*, Poster Session, 慶應義塾大学, (2014).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(受賞)

[1] Best Poster Award (by image corp.), “EVOLVE: A Linked Visualization Environment for Explanatory Variables and Objective Function of Optimization Problems”, M. Kubota, T. Itoh, S. Obayashi, Y. Takeshima, 2013.10.23, Cyberworlds 2013.

[2] Best Posters Award, “EVOLVE: Explanatory Variables and Objective function Linked Visualization Environment”, M. Kubota, T. Itoh, S. Obayashi, Y. Takeshima, 2014.3.7, IEEE Pacific Visualization 2014.

課題番号	J13015
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	3年目

翼端渦の大規模変形が崩壊過程へ及ぼす影響について

A Numerical Study of the Effect of Large Deformations of a Trailing Vortex on Its Breakdown

高橋 直也*†, 宮寄 武**

畠山 望***, 服部 裕司****††

*東京電機大学工学部, **電気通信大学大学院情報理工学研究科

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

線形不安定性の影響を強く受けた翼端渦と大気乱流場との非線形相互作用過程をスペクトル法による直接数値シミュレーションで再現し、データの統計解析から崩壊過程における渦動力学を解明することを目的とする。

2. 研究成果の内容

翼端渦のモデルであるバチェラー渦を一様等方性乱流場に重ねあわせ、ナビエ・ストークス方程式の直接数値シミュレーションを行なった。計算は離散フーリエ変換に基いたスペクトル法を用いた。軸流の影響を考察するため、任意パラメータである旋回パラメータ q に臨界安定な値($q=-1.5$)および線形不安定な値($q=-0.45$)を加えてシミュレーションを行なった。いずれの場合も、計画開始時より高解像度でのシミュレーションを行った。これにより、渦崩壊過程がより高いレイノルズ数で、より微細なスケールで捉えることができた。

3. 研究目標の達成状況

臨界安定な場合($q=-1.5$)について、従来の解像度(512の3乗)では初期攪乱としてテイラーマイクロスケールレイノルズ数 $R_\lambda=120$ 減衰一様乱流場を用いていた。高解像度(1024の3乗)での実行にあたり、より高い $R_\lambda=190$ の減衰一様等方性乱流場を用意し、数値シミュレーションを行った。シミュレーションの初期段階では、従来の解像度でも発生した、周辺乱流場との相互作用によって秩序渦構造が変形した様子が捉えられた(図 1a)。その後の段階において、巻き取られた渦構造がさらに微細な構造へと分裂する様子が捉えられた(図 1b)。

線形不安定な場合($q=-0.45$)について、線形不安定モードからの崩壊過程を捉えるため、初期攪乱を非常に低く抑えたうえで実行を行なった。図 2(a)にあるように、線形不安定モードが有限振幅を持つまで発達したならば、2本のらせんを持つ構造を取る。その後さらに時間発展すると、図 2(b)にあるように、螺旋の一部が局所的に崩壊し、微細な構造へと分裂し、秩序渦全体が崩壊に至る様子が捉えられた。

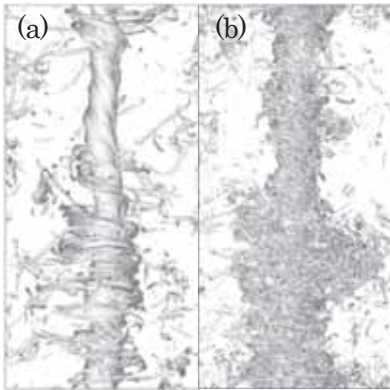


図 1 : エンストロフィーの等値面による渦構造の可視化. 1024 の 3 乗, $q=-1.5$ (臨界安定).

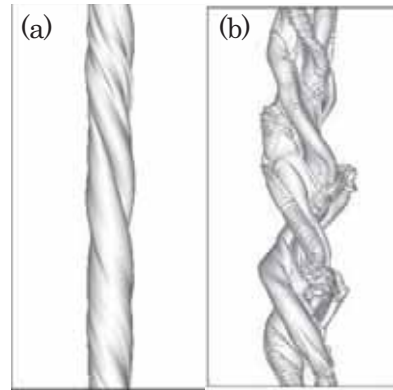


図 2 : エンストロフィーの等値面による渦構造の可視化. 1024 の 3 乗, $q=-0.45$ (線形不安定).

4. まとめと今後の課題

翼端渦モデルと一様等方性乱流場との相互作用を、直接数値シミュレーションによって捉えた。従来よりも高い解像度の実行を行うことにより、微細な構造への変化を捉えることができた。今後の課題として、統計的な観点からの考察が必要である。

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] N. Takahashi, T. Miyazaki, N. Hatakeyama and Y. Hattori: A Numerical Study of the Effect of Large Deformations of a Trailing Vortex on Its Breakdown, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 152-153.

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	J13016
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	2年目

ナノ構造化表面・液体間の熱抵抗

Thermal Resistance Between Nano-Structured Surfaces and Liquids

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。従来の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理解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きた。この場合は、固体-固体界面とは異なり、固体-液体間で何らかの熱輸送メカニズムにミスマッチを生じることが因子となると考えられているが、その分子動力学レベルのメカニズムは未だ詳細な検討が行われていない。本研究においては、ナノスケールの構造をもつ固体壁表面-液体間の熱エネルギー輸送を解析するため、(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にアプローチを試みた。(1)では、ナノ加工による溝構造とその高さが界面近傍の熱抵抗およびエネルギー輸送機構に及ぼす影響を調べるために、非平衡分子動力学シミュレーション(NEMD)を用いて、界面近傍のエネルギー伝搬の機構を調べた。(2)では、分子スケールの輸送現象が応用上重要な系として、SiO₂の各種結晶面がシラノール基(-OH)で末端修飾され親水性を示している表面と直鎖アルカン液体との界面を解析対象に選択し、界面近傍における液体構造を観察すると共に、熱伝導のNEMDにより固液界面における界面熱抵抗を解析した。

2. 研究成果の内容

(1)ナノ構造化界面 液体分子、壁面および構造物の構成原子には、それぞれ水分子、鉄原子の質量を有する 12-6 Lennard-Jones 粒子を仮定し、平行に配置された固体層で液体領域を挟んだ計算モデルを用いた。表面ナノ構造高さ h 、液体バルク部密度 ρ 、固液間相互作用強さ α が固液界面熱抵抗に与える影響を図 1 に示す。ここで、 $h=0$ は原子スケールまで平らな平面を示し、固液間相互作用強さ α は壁面および構造の構成原子と液体分子間ポテンシャルのエネルギーパラメータを無次元化した値である。図

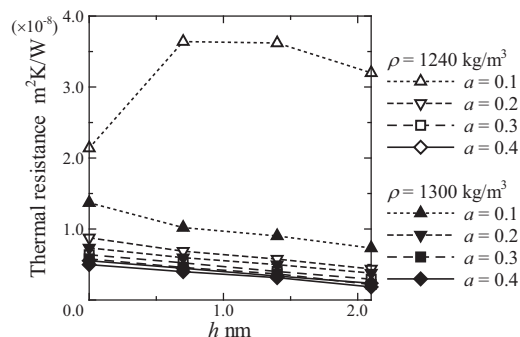


図 1: 表面ナノ構造高さ h と固液界面熱抵抗の関係

1 より、表面ナノ構造高さ h が 2 nm の範囲で変化すると、固液界面熱抵抗が $2 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/W}$ の範囲で変化することが分かる。また、図中に示すほとんどの条件において h が大きくなるにしたがって、固液界面熱抵抗が低下することが分かる。一方、液体バルク部密度 ρ が小さく、固液間相互作用強さ α が比較的小さい場合には、 h が大きくなると固液界面熱抵抗が増加する場合が観察されるが、この原因は構造物間の液体分子密度が低下することにあると考えられる。

(2)結晶格子界面 α -quartz 構造の(001), (011), (100)の各結晶面がシラノール基で末端修飾された表面とメタン及び直鎖デカンの液体との間の固液界面を再現する分子動力学計算系を構築し、界面に垂直な熱流束を印加して熱抵抗を計測した。図2に固液界面近傍の分子スケール構造の例を示す。結晶面により SiO_2 表面の構造は大きく異なり、この表面が作るポテンシャル場に捕捉されて表面近傍に吸着する液体分子の構造にも一定の差が現れる。固液界面熱抵抗を比較すると、(100), (001), (011)面の順番に大きく、また、(001)及び(011)面ではメタンより鎖長の大きなデカンの方が大きな熱抵抗を生じさせているのに対して、(100)面では逆の傾向が見られることなどがわかった。現在、その詳細なメカニズムや、シラン基 (-H) で修飾された疎水面の特性について解析を進めている。

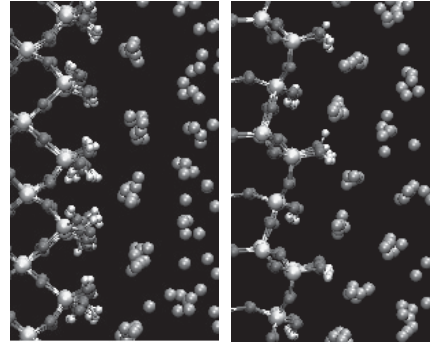


図 2: SiO_2 -メタンの固液界面。
(左) (001)面, (右) (011)面

3. 研究目標の達成状況

固液界面ナノ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支配因子と特性を明らかにした。研究は順調に進行している。

4. まとめと今後の課題

今後は固体表面構造と熱抵抗をつなぐメカニズムについてさらに解析を進めると共に、スケールの変化に伴う支配メカニズムの変移について理解を深めたい。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] Masahiko Shibahara, Sho Murakami and Taku Ohara: Molecular Dynamics Study on the Influences of Nanochannel Geometry on the Energy Transport Mechanism at Liquid-Solid Interfaces, *Proc. 4th International Symposium on Micro and Nano Technology*, (2013), Flash Memory.
- [2] Hari Krishna Chikukoti, Gota Kikugawa and Taku Ohara: A Molecular Dynamics Study on Effect of Temperature on Diffusion in the Vicinity of an Alpha-quartz Surface/Alkane Interfaces, *Proc. 4th International Symposium on Micro and Nano Technology*, (2013), Flash Memory.
- [3] Hari Krishna Chikukoti, Gota Kikugawa and Taku Ohara: Investigation of Thermal Resistance and Heat Conduction at α -quartz-liquid Alkane Interfaces using Nonequilibrium Molecular Dynamics Simulations, *Proc. 15th International Heat Transfer Conference*, (2014).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[4] M. Shibahara, T. Ohara and G. Kikugawa: Thermal resistance between nano-structured surfaces and liquids, *Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 106-107.
- [5] 芝原正彦, 村上翔, 小原拓: ナノメートルスケールの微細構造が固液界面エネルギー輸送機構に及ぼす影響, 第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2013), B222.
- [6] 戸田亮平, 芝原正彦, 小原拓: 微細構造が固液界面エネルギー輸送機構に及ぼす影響に関する分子動力学的研究, 第 27 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2013), E01-4.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

Project code	J13017
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	3rd year

Cavity Formation Mechanism in a Cavitation Process

Takehiko Sato^{*†}, Mohamed Farhat^{**††}
 Marc Tinguely^{**}, Kiyonobu Ohtani^{*}, Daisuke Yoshino^{*}
^{*}Institute of Fluid Science, Tohoku University,
^{**}Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)
[†]Applicant, ^{††}non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Cavitation bubble dynamics is still a major issue for a variety of industrial applications, including hydraulic machines, marine propellers and space rocket inducers among others. We plan to continue our research with a focus on the last stage of the bubble collapse to clarify peculiar phenomena that may occur within sub-microsecond time scale. State-of-the-art instrumentation will be deployed. We strongly believe that the complementary skills developed by the research groups led by Prof. Farhat (EPFL) and Prof. Sato (Tohoku University) will greatly help achieving the project goals.

2. Details of program implement

Effect of non-condensable gases in cavitation bubbles on the collapse process is still unknown and remains a big issue in this field. There are possibilities of existence of non-condensable gases such as oxygen and nitrogen due to their dissolution in water. However, the detection of those dissolved gases is very difficult because the amount of generated gases must be very small compared with the natural dissolved gases. In this year, we focused on the dissolved hydrogen generated by a spark or a pulsed laser.

We previously measured that the laser- or spark-induced cavitation bubble dynamics as shown in Fig. 1 and the dissolved hydrogen in water at bubble initiation. In this year, we have found that the mass of dissolved hydrogen was proportional to the potential energy of the rebound bubble for both laser and spark methods as shown in Fig.2. Nevertheless, hydrogen concentration was found 2.7 times larger with the spark. Our discovery raises questions about the use of point-like plasma for experimental simulation of hydrodynamic cavitation bubbles.

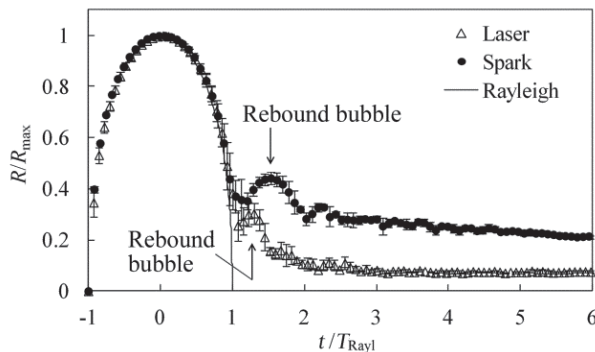


Figure 1 : The time evolution of the reduced radius of bubbles for the both cases, and comparison with Rayleigh theory.

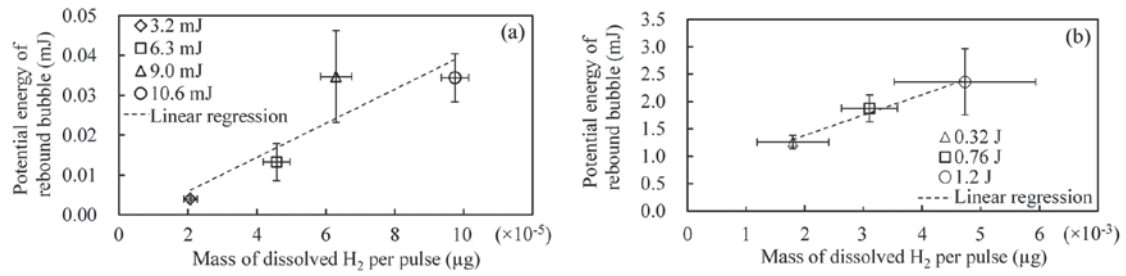


Figure 2: Potential energy of rebound bubble vs. the mass of dissolved H₂ per pulse in the case of the laser (a) and the spark (b). The error bars denote standard error.

3. Achievements

We aimed at understanding the effect of dissolved gas on cavitation bubble dynamics in 2013. The tasks for this aim have been sufficiently achieved because the discussion about the phenomenon led to the conclusion that the hydrogen gas involved in the induced bubble governed the dynamics of the rebound bubbles.

4. Summaries and future plans

In this year, it was found that the potential energy of the rebound bubble increased proportionally with the mass of hydrogen and the rebound bubble potential energy was proportional to the mass of dissolved hydrogen in both the laser and spark cases. These results are evidence of the presence of hydrogen molecules in the bubble and contribute to the widely discussed question regarding the difference between ‘hydrodynamic’ and laser- or spark-induced cavitation bubbles.

We continue to understand the collapse process by microscopic visualization of the collapse process of a laser induced bubble and emission spectrum analysis with the gate time of 100 ns. We also plan to submit the results to a journal.

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] Takehiko Sato, Marc Tinguely, Masanobu Oizumi and Mohamed Farhat: On Hydrogen Generation by the Collapse of Cavitation Bubbles, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 146-147.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J13018
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4 ~2014.3
継続年数	2年目

反応性混相流の活用によるナノデバイスクリーニング
Nano-Device Cleaning by Using Reactive Multiphase Flow

石本 淳*†, 落合 直哉*, Jin-Goo Park**††

*東北大学流体科学研究所, **NEMPL, Hanyang University

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

キャビテーションの物理的, または化学的作用を用いた応用のひとつに, メガソニックキャビテーションによる半導体洗浄がある. 半導体デバイスのダメージレスで効率的な洗浄のために, メガソニックキャビテーションによる洗浄メカニズムを明らかにすることが重要である. そこで本研究では, 数値シミュレーションを用いて, メガソニックキャビテーションによる洗浄メカニズムを解明することを目的とする.

2. 研究成果の内容

メガソニック洗浄における粒子除去メカニズム解明のために, メガソニック場中の単一気泡挙動の数値シミュレーションを行い, メガソニック場による気泡の振動挙動や気泡の初期半径が共振半径となる条件をしきい値として, 時間平均した圧力の空間勾配の力である primary Bjerknes force による並進運動の方向が変わるといふ, 定在波中の気泡運動の特徴を再現可能であることを確認した(図 1). さらに気泡の初期位置が圧力定在波の節や腹に近い位置であると, 気泡の並進運動が小さくなること, 気泡の初期位置が壁面近傍であると, 壁面との干渉のために初期半径に関わらず気泡が壁面方向に並進運動するということがわかった. メガソニック波の進行方向と水平に壁面を設けた場合の壁面近傍の気泡の三次元数値シミュレーションにおいては, 気泡が非球状振動をしながら壁面方向に移動すること, その振動のために壁面に高圧が生じていることがわかった.

液体中の溶解気体の溶解・析出のための振動場中の気泡の成長である, rectified diffusion の影響について調べるために, 気泡力学を用いた解析を行った. これによって, 長時間の rectified diffusion による気泡の成長は気泡の並進運動に大きな影響を及ぼすが, 数周期の気泡振動計算のような短時間の現象の間では, rectified diffusion の影響は小さいことが確認できた.

3. 研究目標の達成状況

メガソニック場中の気泡の三次元数値シミュレーション手法を構築し, rectified diffusion による気泡成長の気泡挙動への影響について検討し, メガソニック洗浄における粒子除去メカニズム解明のための基礎を確立することができた.

4. まとめと今後の課題

本年度の研究では、メガソニック場中の気泡の三次元数値シミュレーション手法を構築し、定在波中の単一気泡挙動の再現可能性を検討できた。今後は、本解析手法を、現実の洗浄場に近しい複数気泡系の計算に拡張し、メガソニック場中の複数気泡挙動を解析するとともに、気泡振動が付着粒子に及ぼす力を詳細に解析していく。

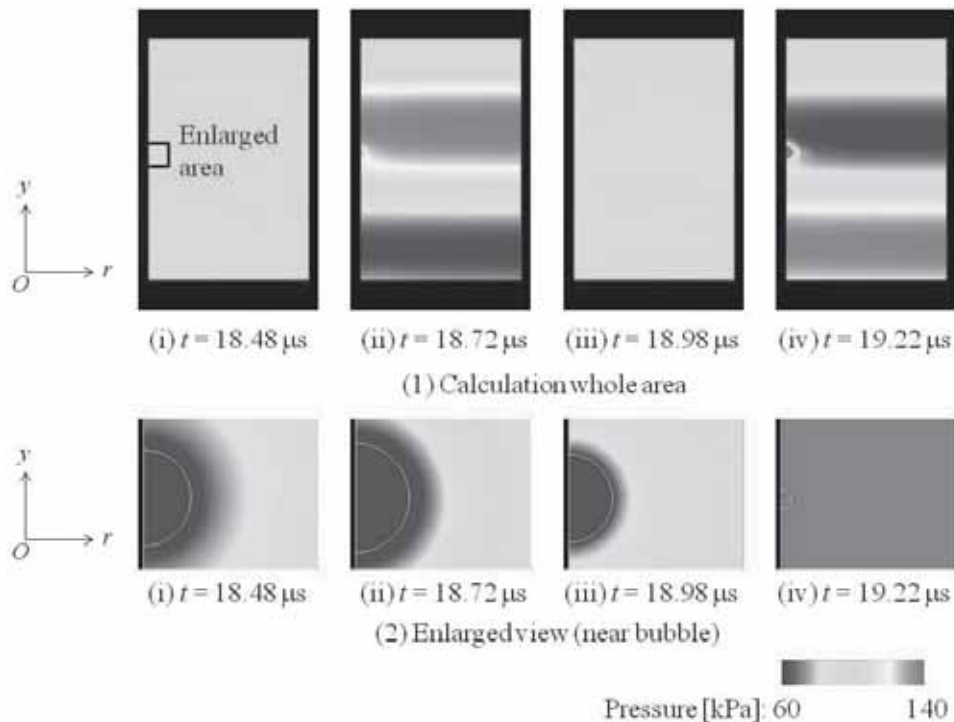


図1: メガソニック場中の気泡計算における圧力分布とボイド率0.5の等値線の経時変化
(上: 全計算領域, 下: 気泡近傍領域)

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] Naoya Ochiai and Jun Ishimoto: Numerical Study of Single Bubble Dynamics in Megasonic Field for New Physical Cleaning Method, *ECS Transactions*, Vol. 58, Issue 6, (2013), pp. 77-85.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Naoya Ochiai, Jun Ishimoto and Jin-Goo Park: Computational Study of Bubble Behavior in Semiconductor Cleaning, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 108-109.

[3] 落合直哉, 石本淳, Jin-Goo Park: メガソニック場における気泡挙動に関する数値解析, 日本混相流学会 混相流シンポジウム 2013, 長野, 8月9-11日, (2013).

[4] 落合直哉, 石本淳: メガソニック場における単一気泡挙動に関する動的可視化シミュレーション, 可視化情報全国講演会 2013, 会津若松, 9月27, 28日, (2013).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J13019
Classification	Confidential collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	2nd year

Development of Frontier Energy Using Reactive Multiphase Flow

Jun Ishimoto*†, Kazuo Matsuura**, Jin-Goo Park***††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

**Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

***NEMPL, Hanyang University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Safety is one of the most important issues facing the promotion of hydrogen use. Accompanying the more extensive usage of hydrogen is the increased possibility of accidental release in various situations. In particular, research on leaking hydrogen is important for preventing accidental ignition and setting safety margins for leakage due to embrittlement, incomplete sealing, system degradation and/or human error. Therefore, to ensure the safe use of hydrogen, the development of risk management strategies for hydrogen leakage and dispersion is necessary.

In terms of theory and numerical simulation, the authors have proposed a novel real-time sensing-based risk-mitigation control of hydrogen dispersion and accumulation in a partially open space with low-height openings by forced ventilation. In this study, we aim at realizing the proposed system, and also developing a risk-mitigation method of higher-fidelity based on the reality-coupled computation combining physical computation and hydrogen dispersion computation.

2. Details of program implement

The annual research meeting of "Sustainable integrated frontier energy using reactive multiphase flow" has been organized, and two topics of special lecture meeting by experts of multiphase field has been held in IFS Tohoku University in May 17th, 2013.

"Mono-Size Alloy Droplets - Production, Characterization and Applications"

Prof. Teiichi Ando

Department of Mechanical, Industrial and Manufacturing Engineering,
Northeastern University, Boston, Massachusetts, 02115 USA.

"The conductivity change with respect to temperature of the filler dispersion polymer"

Prof. Hideo Horibe

Department of Applied Chemistry, Kanazawa Institute of Technology,
Kanazawa, Japan

In order to develop a risk-mitigation method of higher-fidelity based on the reality-coupled computation combining the physical computation and hydrogen dispersion computation, we conducted the present study by diving it into the following three groups of problems and obtained results.

a) Stabilization of the dispersion path of leaking hydrogen.

When outside air is taken in accompanying hydrogen ventilation, the air currents disturb buoyant jets and might promote hydrogen dispersion in the room (Fig. 1).

In this study, we clarified conditions for space shape, such as air-intake areas, necessary for stabilizing the dispersion path of leaking hydrogen using a theoretical model that consists of two stages, i.e., a non-Boussinesq buoyant jet and hydrogen accumulation near the ceiling.

- b) Development of a physical computing platform and validation of numerical simulation regarding hydrogen ventilation

So far, there have been few reports on the experimental results of hydrogen dispersion in case of forced ventilation. In this study, we develop a physical computing platform assuming forced ventilation, and conduct validation of numerical simulation experimentally measuring dispersion and accumulation behaviors of leaking hydrogen. In this year, we made a projection for the future regarding the feasibility of the study mentioned above. In this year, we also clarified the effects of installing a ceiling lattice that holds sensor arrays.

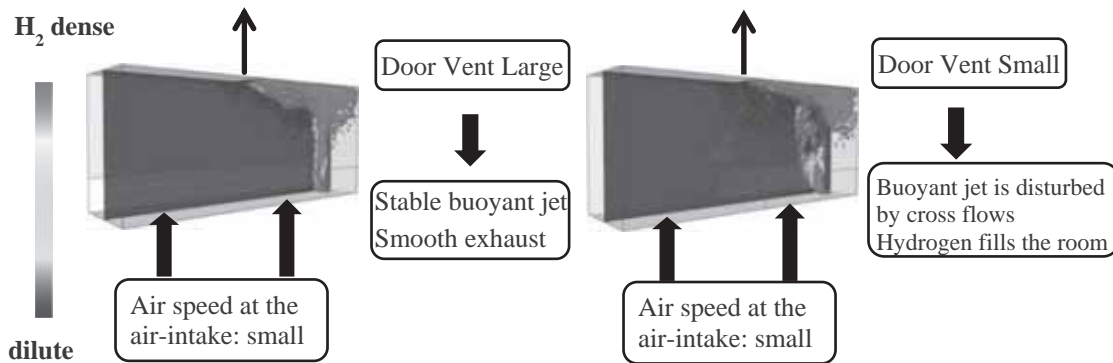


Fig. 1 Effects of the air-intake areas on the dispersion path of leaking hydrogen

- c) Integration of the physical computation and the hydrogen dispersion computation
Arranging information types and data amounts obtained by the physical computation, we made a projection for the future regarding the compatibility and combination with the hydrogen dispersion computation.

3. Achievements

By the simple theoretical analysis, we could partially derive conditions for space shapes, such as air-intake areas, required for high-fidelity risk mitigation related to stabilizing the path of leaking hydrogen. We made a projection for the future regarding the development of the platform necessary for realizing reality-coupled computation uniting the physical computing and the hydrogen dispersion computation, the validation of hydrogen ventilation computations, and the data integration between the physical computation and the hydrogen dispersion computation. Thus, we have obtained results gradually for each group of problems, and the achievement level of the whole study is 70%.

4. Summaries and future plans

We clarified conditions for the space shape required for stabilizing the path of leaking hydrogen. We made a projection for the future regarding the development of the physical computing platform for the hydrogen forced ventilation, the experimental measurement and the validation of hydrogen dispersion computations. We also made a projection for the future regarding the compatibility and the method of unification between the physical computation and the hydrogen dispersion computations. Our future work is to advance the risk-mitigation of leaking hydrogen of much higher-fidelity based on reality-coupled computation.

5. Research results(* reprint included)

1) Journal Not applicable.

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

*[1] Jun Ishimoto, Naoya Ochiai, and Kozo Saito: Ultra-High Heat Flux Cooling Characteristics of Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Particles, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 134-135.

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

課題番号	J13020
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	2年目

水平管を流動する沸騰液体窒素の不安定流動に関する研究
Flow Instabilities of Boiling Nitrogen in a Horizontal Pipe

大平 勝秀*†, 小林 弘明**††

田口 秀之**, 本郷 素之**, 小島 孝之**, 渡部 久俊***, 宮田 一司*, 高橋 幸一*

*東北大学流体科学研究所, **宇宙航空研究開発機構(JAXA)

***東北大学大学院工学研究科博士前期課程

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

JAXA ではエミッションフリー航空機、極超音速旅客機技術の開発を実施中であり、液体水素燃料システムがキー技術となる。エンジン始動時（室温→極低温）、巡航時（高温空気/液体水素）の熱交換器流量制御技術向上のため、極低温気液二相流体特有の流動・伝熱特性を明らかにする必要がある。24年度は伝熱管形状を正方形管、正三角形管として流動・伝熱実験を行い、伝熱管上流のランタンク（圧縮性空間）と質量流束-圧力損失の負性勾配に起因する Ledinegg 型不安定流動を確認した。熱交換器の流路形状として、波状フィンのように正三角形と逆三角形の組合せが想定される。25年度は逆三角形管の不安定流動メカニズム、圧力損失・熱伝達率を明らかにし、これまで実施した円管、正方形管、正三角形管との比較を行い、断面形状および流動様式が変化する際のボイド率、圧力損失、熱伝達率の違いを明らかにする。

2. 研究成果の内容

逆三角形管の定常流において、円管、正方形管、三角形管と同様に、気泡流、プラグ流、スラグ流、環状流、波状流の基本的な沸騰流動パターンが観察され、高熱流束時（10 kW/m²以上）において、Ledinegg 型不安定流動（以下、遷移流）を確認した。ボイド率計算に Butterworth, Woldesemayat 等の 9 式を用いた分離流モデルの圧力損失計算値と実測値を比較した。逆三角形管、円管、正方形管、三角形管の場合は、総合的に Butterworth と図 1 に示す Woldesemayat モデルが実験値と良い一致を示した（±30%程度）。気液二相強制対流熱伝達特性（熱流束 5, 10, 20 kW/m²）については、ボイリング数をパラメータとして組み入れた実験式の開発を試みた結果、Gunger-Winterton 式, Liu-Winterton 式（±30%程度）よりも図 2 に示すように熱伝達率の推定精度が向上する実験式が得られた（±20%程度）。図 3 は遷移流で質量流束の変化と共に圧力損失が 1 周期で描くループ（ABCA）を示す。平均値（☆印）の 4 倍程度の最大圧力損失が周期的に現れる。また、質量流束は 100～1000 kg/m²・s と大きく変動し、熱交換器性能にとって致命的となる。質量流束-圧力損失が負性勾配となる作動領域は回避すべきである（プラグ流、スラグ流が発生起点と考えられる）。図 4 は逆三角形管、円管、正方形管、正三角形管の遷移流における平均質量流束と周期（3 秒～7 秒を観測）の関係である。4 種類の管は同様な特性を示しており、管形状ではなく、流動・伝熱システムによって平均質量流束と周期の関係が決定されている。

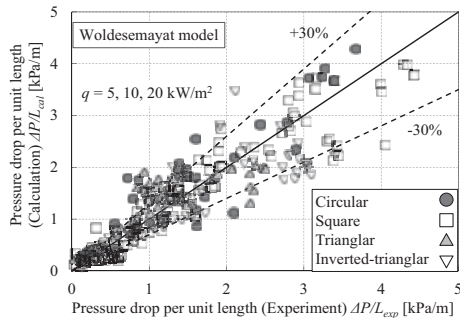


図1：圧力損失の実験値と相関式の関係

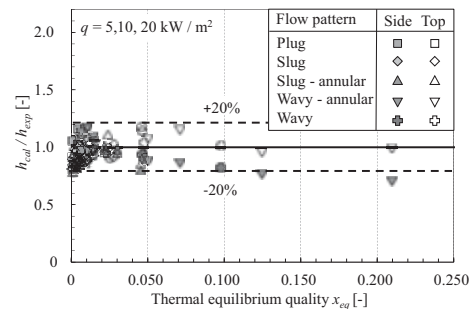


図2：熱伝達率の実験値と新規評価式の関係

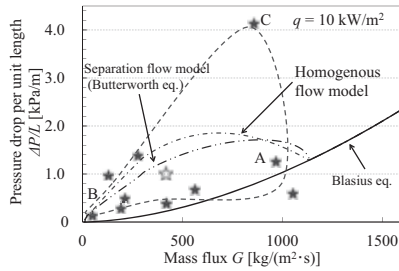


図3：遷移流での質量流束と圧力損失の関係

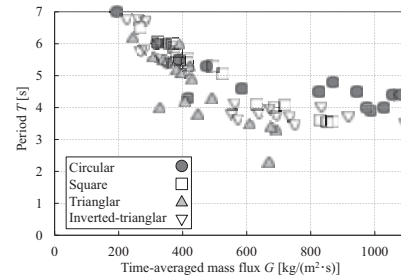


図4：遷移流での平均質量流束と周期の関係

3. 研究目標の達成状況

水平逆三角形伝熱管を流動する沸騰液体窒素気液二相流において、定常流および遷移流におけるボイド率とクオリティの関係、流動パターン（可視化観察）と圧力損失、熱伝達率の関係が明らかになった。円管、正方形管、三角形管の遷移流における圧力損失、熱伝達率と比較した結果、不安定流動時の流動・伝熱特性が系統的に得られ、研究目標は達成された。

4. まとめと今後の課題

得られた成果を、Ledinegg型不安定流動を回避するためのJAXA設計データに反映する。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む） なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] H. Watanabe, K. Ohira, K. Miyata, K. Takahashi, H. Kobayashi, H. Taguchi, M. Hongoh, T. Kojima: Flow Instability of Boiling Nitrogen in a Horizontal Pipe, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 6-7.

*[2] T. Morishita, R. Sakata, K. Ohira, K. Miyata, K. Takahashi, H. Kobayashi, H. Taguchi, M. Hongoh, T. Kojima: Experimental Study on Flow and Heat Transfer of Boiling Liquid Nitrogen in a Triangular Pipe, *Proceedings of the Tenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2013), pp. 674-675.

[3] 大平 勝秀: 極低温気液二相流体、固液二相流体（スラッシュ）の流動・伝熱、低温工学・超電導学会 2013 年度第 2 回冷凍部会（2013）。（招待講演）

[4] 大平 勝秀: 気液二相液体窒素およびスラッシュ窒素（固液二相）の管内流動・伝熱特性、東大-JAXA 社会連携講座 第 3 回研究会（2013）。（招待講演）

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）「気液二相の流量計測方法及び二相流量計測装置」小林弘明，田口秀之，杵淵紀世志（JAXA），佐藤哲也（早稲田大学），大平勝秀（東北大学），特願 2013-111961，2013.5.28 出願

課題番号	J13021
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	1年目

コルゲート管を流動する気液二相液体窒素の圧力損失特性
Pressure Drop of Vapor-Liquid Two-Phase Nitrogen Flow in a Corrugated Pipe

大平 勝秀*†, 小林 弘明**††

田口 秀之**, 本郷 素之**, 小島 孝之**, 渡部 久俊***, 太田 純平***, 宮田 一司*, 高橋 幸一*

*東北大学流体科学研究所, **宇宙航空研究開発機構(JAXA)

***東北大学大学院工学研究科博士前期課程

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

JAXA ではエミッションフリー航空機、極超音速旅客機技術の開発を実施中であり、液体水素燃料システムがキー技術となる。エンジン始動時（室温→極低温）、巡航時（高温空気／液体水素の熱交換）において、液体水素は配管内で極低温気液二相状態となる。一方、配管に使用するステンレス鋼の場合、室温から極低温まで冷却されると長さ 1 m の配管が 3 mm 収縮するため、コルゲート管（バローズ）を多用して吸収することになる。気液二相状態でのコルゲート管の圧力損失は単相流と比較すると数倍～数 10 倍に達し、システム性能に大きく影響する。従来、コルゲート管を流動する単相流体（液体、気体）の圧力損失計算式の報告例があるが、申請者の液体窒素実験結果と比較した場合、この計算式ではかなり大きな値が得られ、単相流においても圧力損失の推定精度は十分ではない。また、気液二相流体のコルゲート管の圧力損失の報告は殆どない状況である。本研究では、これまで殆ど報告されていない、気液二相流体がコルゲート管を流動する際の圧力損失特性について、液体窒素を使用して明らかにし、システム性能向上に資する。

2. 研究成果の内容

実験に使用したアニュラー型ステンレス製コルゲート管の形状は、内径 15 mm、ピッチ 3.0 mm、山の高さ 2.2 mm、圧力損失測定長さ 600 mm である。上流には気液二相流を生成する内径 15 mm の加熱管（熱流束 $q = 0, 20, 30 \text{ kW/m}^2$ ）、下流の可視化部には内径 15 mm のポリカーボネート樹脂製平滑円管を取り付けた。図 1 に非加熱時の液体単相の圧力損失特性を示す。実験値は Prandtl-Karman 式の約 5～10 倍程度大きな値を示し、一般によく知られているコルゲート管単相流の Hawthorne 式では実験値の約 1.5 倍を示した。図 2 はサブクール沸騰流動時の圧力損失で、縦軸は非加熱時の値、横軸は実験値を示す。サブクールの定義は加熱管出口の熱平衡クオリティを負とした。また、図には可視化部でのフローパターンを示す。低圧力損失時（低流速時）に加熱時の圧力損失が大きくなるのは、サブクール沸騰により気泡が生成し、圧力損失が増加するためと考えられる。次に、気液二相流動時に得られた圧力損失測定値を、McAdams らの均質流モデルと Lockhart-Martinelli/Chisholm の分離流モデルで評価した。図 3 は横軸が実験値、縦軸が均質流モデルの計算値である。均質流モデルでは実験値を 30%程度小さく見積もる傾向がある。図 4 は実験値と分離流モデルの計算値の比較である。分離流モデルでは実験値を 30%程度大きく見積もる傾向がある。

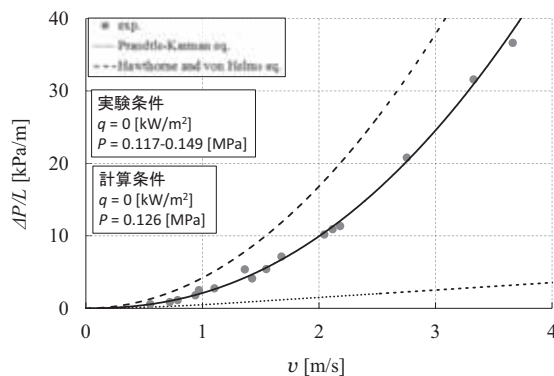


図 1：非加熱時の液体単相の圧力損失

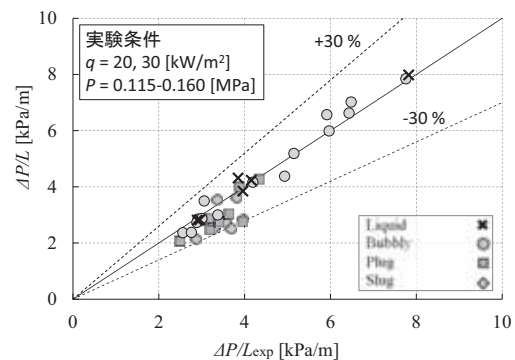


図 2：サブクール沸騰流動時の圧力損失

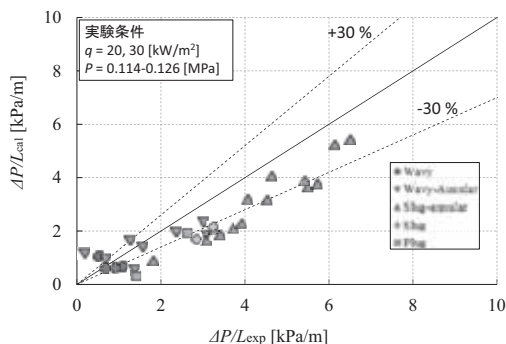


図 3：実験値と均質流モデルの比較

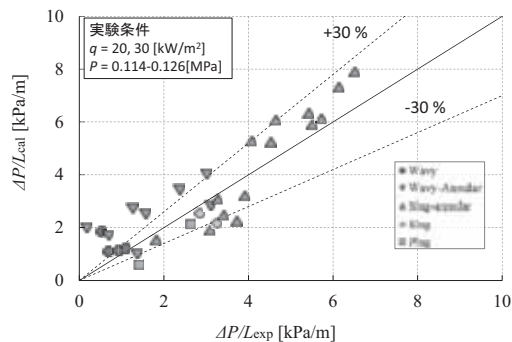


図 4：実験値と分離流モデルの比較

3. 研究目標の達成状況

内径 15 mm のコルゲート管を流動する液体窒素単相流の圧力損失，および気液二相流のボイド率，クオリティ，流動パターンと圧力損失の関係が明らかになった．よく知られているコルゲート管単相流の Hawthorne 式では実験値の約 1.5 倍を示しており，本式の使用には注意を要する．気液二相流の圧力損失測定値を従来提案されている均質流モデルと分離流モデルで評価した．均質流モデルは実験値を 30%程度小さく見積もる傾向がある．また，分離流モデルは実験値を 30%程度大きく見積もる傾向がある．所期の研究目標は達成された．

4. まとめと今後の課題

得られた成果を JAXA にて実施中のエンジン設計データに反映する．内径 15 mm のコルゲート管の実験を継続すると共に，形状（内径 12 mm，ピッチ，山の高さ）の異なるコルゲート管についても，ヒータ容量増加による広範囲なボイド率での圧力損失特性を取得する．

5. 研究成果（*は別刷あり）

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む） なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] H. Watanabe, K. Ohira, K. Miyata, K. Takahashi, H. Kobayashi, H. Taguchi, M. Hongoh, T. Kojima: Pressure Drop of Vapor-Liquid Two-Phase Nitrogen Flow in a Corrugated Pipe, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 8-9.

[2] 大平勝秀: 水素エネルギーシステム開発における液体水素技術の現状, 2013 年度低温工学・超電導学会 東北・北海道支部研究会/第 2 回材料研究会 (2013). (招待講演)

- 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等） なし

課題番号	J13022
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

メカノクロミズム金属錯体を用いたスペースデブリ空気漏れ穴の表示システムの検討
Air-Leakage Detection System for Space-Debris Impact Using Mechanochromism Metal Complex

榎原 幹十朗*†, 大谷 清伸**††
 長谷川 美貴***, 根元 翔*, 櫻井 翔也***, 土屋垣内 絢子***, 佐藤 沙紀***

*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 PC を使った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。これまで、デブリ防護に念頭を置いた研究は多数存在するが、貫通穴が生じることを前提とし、修復に着目した研究は殆ど無い。本研究では、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

- (1) メカノクロミズム金属錯体等の各種光化学物質と接着物質を混ぜ合わせる。宇宙ステーションの Whipple bumper を模擬したアルミ標的板の二枚目に塗る。
- (2) 計測装置を設置した後、実際に超高速衝突実験を行った。本研究では、衝突貫通穴周辺に塗料物質が残っていることを設計目標とし、衝突中心そのものの裏面の塗料物質の剥落・飛散は許容する方針を取った。
- (3) 二枚組アルミ板の、二枚目内側に塗る。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検証した。図1に塗布した試料を示す通り、複数の光化学試料を試した。
- (4) 超高速衝突で剥離しない接着剤の選定を進めた。図2に示す剥離の少ない最適な接着剤を決定できた。この知見は粉末のメカノクロミズム金属錯体をバンパーに保持する為に、非常に有益な情報である。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。メカノクロミズム金属錯体をアルミ板に塗布させることが出来ることを実証した。更に、図3に示すように、接着水分による真空膨張が確認され、実験中の今後の課題とされた。
- (5) バンパー衝突実験を通して、光化学物質の発光・発色実験も行った。衝突前後で発光スペクトルが有意に変化していることが確認された。発光スペクトルの変化は、今回得られた研究の大きな研究結果の一つである。

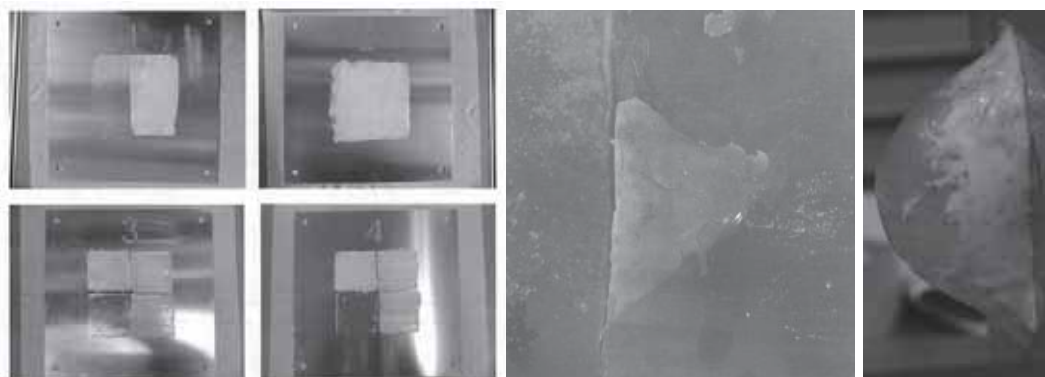


図 1：塗布した各種光化学試料

図 2：衝突衝撃による剥離

図 3：真空膨張

3. 研究目標の達成状況

スペースデブリ衝突を模擬した超高速衝突前後で光化学物質の発光スペクトルが変化していることが確認された。これまでに用いた金属錯体のみならず、各種の光化学物質を創生している。多様な衝突実験を行う準備が出来ている。SPH 法数値シミュレーションを援用して、適切な実験バンパー構成と適切な金属錯体の選定が進んでいる。研究は予定通り進捗しており、目標は達成された。

4. まとめと今後の課題

上記に示すように研究は着実に進んでいると考える。今後は試行錯誤の末に確立されたデブリ衝突実験様式を発展させた衝突実験を行う。視覚に頼る定性的な計測のみならず、定量的計測を伴う衝突実験にも取り組む。具体的には、チャンバー内に光ファイバーを通し、メカノクロミズム金属錯体の発光をリアルタイムで計測する。光ファイバーの1端を2枚目裏面に設置する。光ファイバーの他端はチャンバー外の分光器に繋ぐ。真空を破られない接続工夫が必要となる。光ファイバーに繋いだ分光器を PC に接続し計測データを処理する。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Nemoto, K., Takahashi, R., Ohtani, K., and Makihara, K.: Novel Approach to Survivability of Electro-Dynamic Tether in Collision with Orbital Debris, *Proceedings of 29th International Symposium on Space Technology and Science*, Nagoya, (2013).

*[2] Nemoto, K., Takahashi, R., Ohtani, K., and Makihara, K.: Fundamental Study of Air-Leakage Detection System for Space-Debris Impact using Mechanochromism Metal Complex, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 10-11.

[3] 松本紀彦, 沖義弘, 山口将史, 後藤直人, 土屋佑斗, 榎原幹十朗, 長谷川美貴: メッシュ構造テザーのスペースデブリ衝突に関する実験研究, 平成 25 年度スペースプラズマ研究会, 神奈川, (2014).

[4] 榎原幹十朗: スペースデブリ衝突の空気漏れ貫通穴を暗闇でも位置表示させる試み～光化学物質を用いて～, 日本における超高速衝突実験の現状と将来展望研究会, (2013).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J13023
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year

Advanced LES of Aircraft Wake Vortices

Shigeru Obayashi*†, Thomas Gerz**††
Frank Holzäpfel**, Anton Stephan**, Takashi Misaka***

*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

**Institute of Atmospheric Physics, German Aerospace Center (DLR)

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

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Wake vortices generated by a flying aircraft pose a potential risk for following aircraft, especially at an airport, due to the strong and coherent vortical structure. In this collaboration we investigate the evolution of realistic aircraft wake vortices in ground proximity by means of an integrated approach of Reynolds-averaged Navier-Stokes simulation of the flow around an aircraft and large-eddy simulation of the generated aircraft wake in the ambient atmosphere. Especially, the end of wake vortices which may appear due to the sudden decrease of aerodynamic lift just after aircraft's touch down is studied by the present approach. The effect of the vortex end on wake vortex evolution and decay, i.e., "end effect", has not been considered so far, although the effect might be important to estimate the wake vortex life time in ground proximity.

2. Details of program implement

We defined the following research items based on a meeting held at IFS, that is, the simulation of an entire landing phase until touch down (Fig. 1), and wake vortex roll-up with jet exhausts (Fig. 2). During the research period, Dr. Holzäpfel visited IFS for a meeting and he gave us a seminar entitled "Aircraft Wake Vortex Research at German Aerospace Center (DLR) – Challenges, Activities, and Achievements."

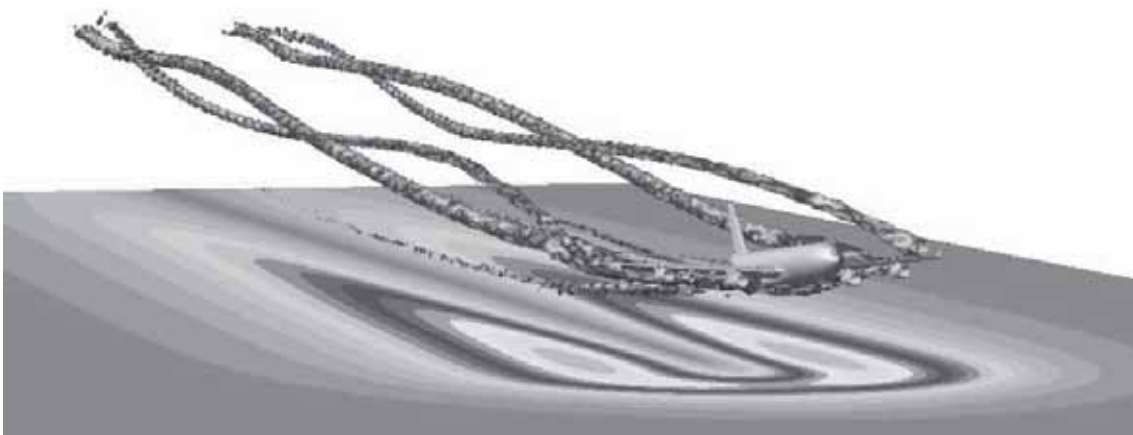


Figure 1 : Aircraft landing with roll-up, approach, touchdown, plate line, and developing end effects. Iso-vorticity surface colored with vorticity in the span-wise direction [5].

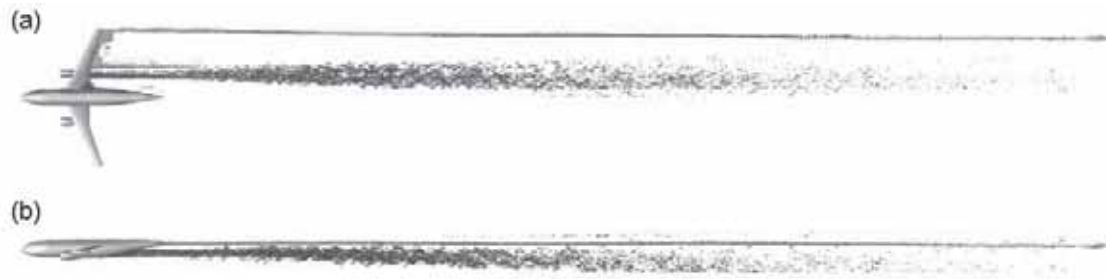


Figure 2 : Iso-surface of vorticity magnitude obtained from the compressible Building-Cube Method (BCM) code, where vortical structures such as wing-tip vortex and exhaust jet are well preserved until downstream [3].

3. Achievements

We have developed numerical codes for simulating entire landing phase until touch down and wake vortex roll-up with jet exhausts. Expected results were obtained during the collaboration period.

4. Summaries and future plans

Future work would be further improvement of the developed numerical codes. As an additional development, the two-way coupling of near-field simulation around an aircraft and far-field LES of wake vortex can be considered, which was planned but not conducted during the current period. The impact of environmental conditions such as atmospheric turbulence on a flying aircraft is a possible application of such simulation.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] A. Stephan, F. Holzäpfel, T. Misaka, R. Geisler, R. Konrath: Enhancement of Aircraft Wake Vortex Decay in Ground Proximity – Experiment versus Simulation, *CEAS Aeronautical Journal*, DOI: 10.1007/s13272-013-0094-8.

[2] A. Stephan, F. Holzäpfel, T. Misaka: Aircraft Wake-Vortex Decay in Ground Proximity – Physical Mechanisms and Artificial Enhancement, *Journal of Aircraft*, Vol. 50, No. 4, (2013), pp. 1250-1260, DOI: 10.2514/1.C032179.

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

[3] T. Misaka, S. Obayashi, A. Stephan, F. Holzäpfel, T. Gerz, K. Nakahashi: Numerical Simulation of Jet-Wake Vortex Interaction, *AIAA 52nd Aerospace Science Meeting, SciTech 2014*, National Harbor, (2014), AIAA Paper 2014-0927.

[4] F. Holzäpfel, A. Stephan, T. Misaka, S. Körner: Wake Vortex Evolution during Approach and Landing With and Without Plate Lines, *AIAA 52nd Aerospace Science Meeting, SciTech 2014*, National Harbor, (2014), AIAA Paper 2014-0926.

[5] A. Stephan, F. Holzäpfel, T. Misaka: Towards Realistic Simulation of Wake Vortex Evolution during Landing with Flat and Complex Terrain, *8th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, TSFP-8, Poitiers, (2013), AER1A.

*[6] T. Misaka, S. Obayashi, A. Stephan, F. Holzäpfel, T. Gerz, K. Nakahashi: Toward Numerical Simulation of Jet-Wake Vortex Interaction, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2013), pp. 12-13.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J13024
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	2年目

キャビテーション微細気泡群における熱力学的効果の基礎特性解明
Mechanism on Thermodynamic Effects in Micro-Bubble Cavitation

新井山 一樹*†, 伊賀 由佳**††

*株式会社 I H I (元 金沢工業大学), **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

ロケットの打上性能を飛躍的に向上するためには、エンジン用ターボポンプに発生するキャビテーションに起因する性能低下や不安定振動を抑制することが重要である。本研究では、気泡径分布や気泡数密度などの気泡群の特性量に着目し、キャビテーション微細気泡群の成長収縮挙動を抑制する熱力学的効果の作用メカニズムを解明し、キャビテーションに起因する不安定現象を抑制する指針を得ることを目的とする。

2. 研究成果の内容

昨年度作成した CFD コードを用い、本モデルの妥当性を検証するとともに、熱力学的効果の作用メカニズムの解明を試みた。解析対象として、申請者が実験データを有する NACA16012 翼型とし、作動流体を熱力学的効果が顕著な液体窒素とした。

図1に翼前縁に発生するキャビテーションの様相を示す。翼前縁の低圧領域にボイド率の高い部分が確認でき、キャビテーションの発生が認められる。キャビテーションの発生しやすさを示すキャビテーション数 σ が等しいにもかかわらず、熱力学的効果によってボイド率が低くなっており、キャビテーションが抑制されている様相が確認できる。



(a) 熱力学的効果 無

(b) 熱力学的効果 有

図1：翼周りのボイド率分布 ($\sigma=0.8$)

図2には、図1と同じ条件での翼周りの温度分布を示す。熱力学的効果を考慮することで、キャビテーション発生領域での温度降下が確認できる。特に、図1のボイド率分布と比較すると、ボイド率が高い領域の上流部で特に温度降下量が大きくなっており、キャビティが発生する領域で温度が下がっていることが分かる。

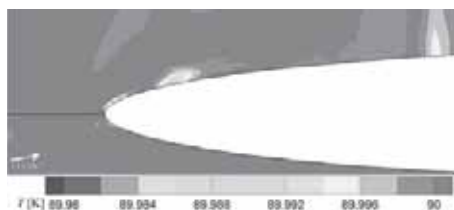


図2：翼周りの温度分布 (熱力学的効果 有, $\sigma=0.8$)

図3には本研究での解析結果と、申請者が過去に行った実験での可視化観察結果を合わせて示す。解析結果、実験結果とも、キャビテーション数が小さくなると翼面上に発生したキャビティが翼後縁方向に進展している様子が確認できる。但し、可視化の様相に対して、解析で発生しているボイド率は遙かに小さな値となっているため、今後更に解析を進め、検証を行う必要がある。

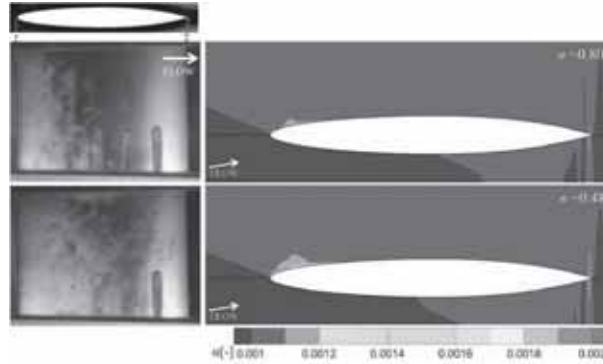


図3：可視化実験と本解析結果の様相比較

3. 研究目標の達成状況

微細気泡群の特徴量に基づくキャビテーションの熱力学的効果の数値解析モデル及び、取り扱いが容易で計算負荷の小さいキャビテーションCFDコードを開発した。また、将来的に、本CFDコードと最適化アルゴリズムと組み合わせることによって、飛躍的な性能向上を実現する全く新しい形態のインデューサあるいはターボポンプの創出・設計を実現するための足がかりを得た。

4. まとめと今後の課題

本共同研究で構築した熱力学的効果モデル及び解析コードを用いて、液体窒素中に発生する極低温キャビテーション流れの数値解析を行い、翼面上に発生するキャビティの様相を本解析コードで定性的に捉えることが出来るようになった。

さらにコードを改良していくことで、より定量的かつ高精度にキャビテーションの熱力学的効果による流体機械性能への影響を明らかにすることが可能となる。現在のコードでは2次元かつ層流を仮定して解析を行っているが、特に本研究で対象としているような極低温流体のキャビテーションでは Reynolds 数が $10^5 \sim 10^6$ と非常に高く乱流であることから、気泡群と乱流との相互作用が熱力学的効果に与える影響を今後明らかにする必要がある。

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)

該当無し

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Kazuki Niiyama and Yuka Iga: Thermal Effects in Bubble Clouds of Cavitation, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 80-81.

[2] 辻田光宏, 中島隆広, 新井山一樹, 伊賀由佳, 杉本康弘, 佐藤恵一: 液体窒素中の対称翼に発生するキャビテーションの数値解析, 日本機械学会北陸信越学生会第43回学生員卒業研究発表講演会, 富山, (2014), 0103.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

該当無し

課題番号	J13025
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	3年目

バイオフィーム産生菌に対するプラズマ殺菌に関する研究
Anti-Bacterial Effect of a Glow Discharge Plasma against
Biofilm-Producing Gram Negative Bacilli

藤村 茂^{*,***†}, 佐藤岳彦^{**††}, 中野禎久^{***}
*東北薬科大学薬学部, **東北大学流体科学研究所
***東北大学加齢医学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

これまで我々は、多剤耐性株を含む緑膿菌に対し、プラズマ殺菌法の条件設定ならびに殺菌効果について検討し、10分で除菌できることを明らかにした。この効果の臨床応用に向けて、眼科領域のコンタクトレンズ関連角膜炎の感染予防に着目した。同角膜炎は緑膿菌が原因菌として高率に分離されることから、コンタクトレンズのプラズマ殺菌装置を開発し、臨床使用の実現に向けて検討する。

2. 研究成果の内容

作成したプラズマ殺菌装置を用い、コンタクトレンズ上の biofilm 産生 *P. aeruginosa* を 10 分間で殺菌した。その殺菌過程として、電子顕微鏡による観察で放電 3 分後に菌数の著しい減少、放電 5 分後に菌体に小さな隆起が確認され、放電 10 分後にその隆起部より生じたと考えられる菌体破裂を確認した (図 1)。プラズマ放電による水質の変化については 10 分間の放電により水温は 45 °C に上昇し、pH は 2.3 に減少した。O₃, H₂O₂, NO₂ の濃度は、O₃ 濃度は放電 5 分間に濃度が最大となり、その後減少した。H₂O₂, NO₂ の濃度は時間と共に上昇した。

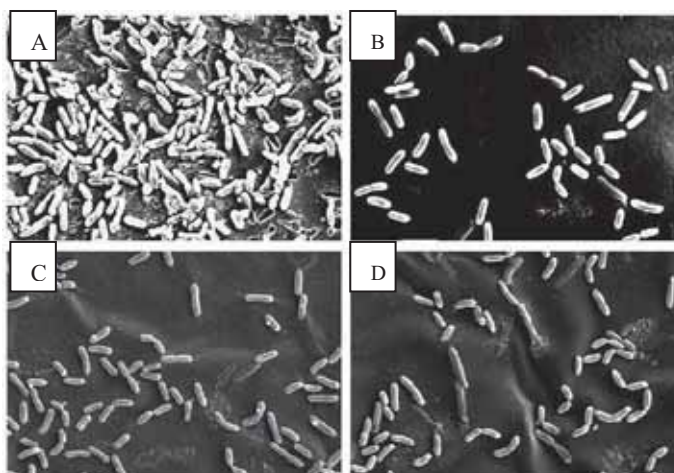


図 1 : A: control, B: プラズマ照射 3 min, C: 同 5 min, D: 同 10 min.
Magnification: x5000

3. 研究目標の達成状況

昨年までの検討では、ステンレス版のような平面構造体を汚染したバイオフィーム産生菌に対し、プラズマ放電法の優れた殺菌能が確認されたが、非常に大がかりな装置であった。当該年度は、この殺菌法をコンタクトレンズに応用することを目的にするため、プラズマ殺菌装置の小型化を検討し、現行のコンタクトレンズ携帯ケースに電極を取り付けた装置（図2）の開発に成功した。さらに、これを用いてもステンレス版のときと同様の殺菌効果が確認された。

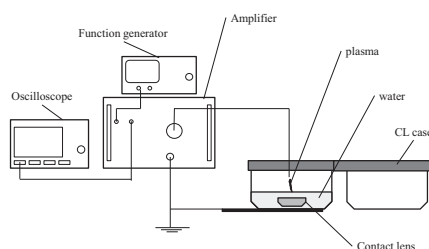


図2：コンタクトレンズ殺菌装置

4. まとめと今後の課題

コンタクトレンズ上の biofilm 産生 *P. aeruginosa* を 10 分間で殺菌可能であった。その殺菌のメカニズムとして、プラズマ放電により産生された O_3 , H_2O_2 , NO_2 , もしくは、それらによる pH の変化が関与していると考えられたが、どの因子が biofilm 産生菌の殺菌に影響を及ぼすのか解明できなかった。今後は、この小型化したプラズマ放電器による殺菌メカニズムについて、解明する予定である。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[1] 中野禎久, 藤村茂, 佐藤岳彦, 吉野大輔, 渡辺彰: Biofilm 産生 *Pseudomonas aeruginosa* によるコンタクトレンズ汚染モデルに対するプラズマ間接殺菌法の効果, 第 47 回緑膿菌感染症研究会記録集, (2013), pp. 119-123.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Y. Nakano, S. Fujimura, T. Sato, D. Yoshino: Bactericidal Effect of Plasma Discharge against Biofilm-producing *Pseudomonas aeruginosa* on Contact Lenses, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 64-65.

[3] 中野禎久, 藤村茂, 佐藤岳彦, 渡辺彰: *Pseudomonas aeruginosa* によるコンタクトレンズ汚染モデルに対するプラズマ殺菌について, 第 87 回日本感染症学会学術講演会, (2013).

[4] 中野禎久, 藤村茂, 佐藤岳彦, 吉野大輔, 渡辺彰: *Pseudomonas aeruginosa* によるコンタクトレンズ汚染モデルに対するプラズマ殺菌法の効果, 第 18 回南東北化学療法シンポジウム, (2013).

[5] 中野禎久, 藤村茂, 佐藤岳彦, 吉野大輔, 渡辺彰: Biofilm 産生緑膿菌に対するプラズマ水面照射の殺菌効果と安全性について. 第 62 回日本感染症学会東日本地方会学術集会, (2013).

[6] 中野禎久, 藤村茂, 佐藤岳彦, 吉野大輔, 渡辺彰: Biofilm 産生 *Pseudomonas aeruginosa* によるコンタクトレンズ汚染モデルに対するプラズマ殺菌法のメカニズムについて, 第 48 回緑膿菌感染症研究会, (2014).

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）なし

課題番号	J13026
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	3年目

中性粒子ビーム酸化膜を用いた超高速歪み Ge チャンネルデバイス開発
Development of High Performance Strained-Ge Channel Device
Utilizing Neutral-Beam Oxidized Film

澤野 憲太郎*†, 寒川 誠二**††

野平 博司*, 和田 章良**

*東京都市大学総合研究所, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年, Si-CMOS はスケーリング限界をむかえつつあり, Si に代わる高移動度チャンネルとしてゲルマニウム(Ge)が注目されている. Ge はもともと Si の数倍のバルク移動度を有するが, 高度結晶成長技術によって Ge に結晶歪みを導入することで, さらなる移動度の増大が実現可能である. 本研究では, 現行の Si-MOS の移動度を飛躍的に超える, 超高速歪み Ge チャンネル MOS デバイス実現を目指した. その中で, 特に高速 MOS デバイス実現に最重要となるゲート絶縁膜の高品質化を進めた. 現在, Ge 上に良質な酸化膜を形成することは非常に困難とされており, また Ge チャンネルの歪みを維持する(歪み緩和を抑制する)ためには低温プロセスが必須となる. そこで本研究では, 低温での酸化が可能である中性粒子ビーム酸化(NBO)法を駆使することにより, 歪み Ge 上への良質な酸化膜形成を試みた. NBO 法により, Ge 上へダメージフリーの酸化膜形成が可能となり, 界面準位密度を大幅に低減させた, 高品質な酸化膜/歪み Ge 界面が期待できる.

2. 研究成果の内容

分子線エピタキシー法(MBE)を駆使し, Si 基板上へ高移動度歪み Ge チャンネル構造の結晶成長を進めた. その上に, 中性粒子ビームによって酸化膜を形成し(NBO), X線光電子分光法(XPS)を用いて, 酸化膜厚について詳細に調べた.

図1に作製した試料構造を示す. Ge 組成 50%の SiGe バッファ層上に歪み Ge チャンネル層を成長した. その後, 歪み Ge 上に, 膜厚 0~4 nm の NBO 膜を形成した. 比較として, Ge 基板上にも同様に NBO 膜を形成し, XPS 測定を同様に行った.

図2に両構造で NBO 膜形成後の XPS スペクトルを示す. 歪み Ge 試料において(図2(a)), 酸化前, 60 秒酸化後, 300 秒酸化後のそれぞれのスペクトルから, 酸化時間増加にともなうピーク増加が見られ, 歪みチャンネル上にも, 制御性高く NBO 膜が形成できることを示している. 一方, Ge 基板を直接酸化した構造における XPS スペクトルを図2(b)に示す. 歪み Ge とほぼ同様なピークの増加が見られ, 歪みによる悪影響はなく, 歪

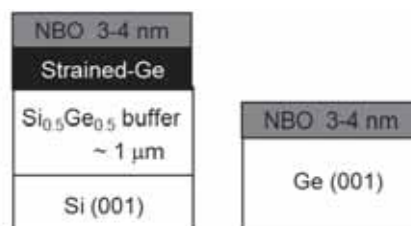


図1: 歪み Ge 試料構造

み Ge においても中性粒子ビームによって良質な酸化膜が形成できることが示された。

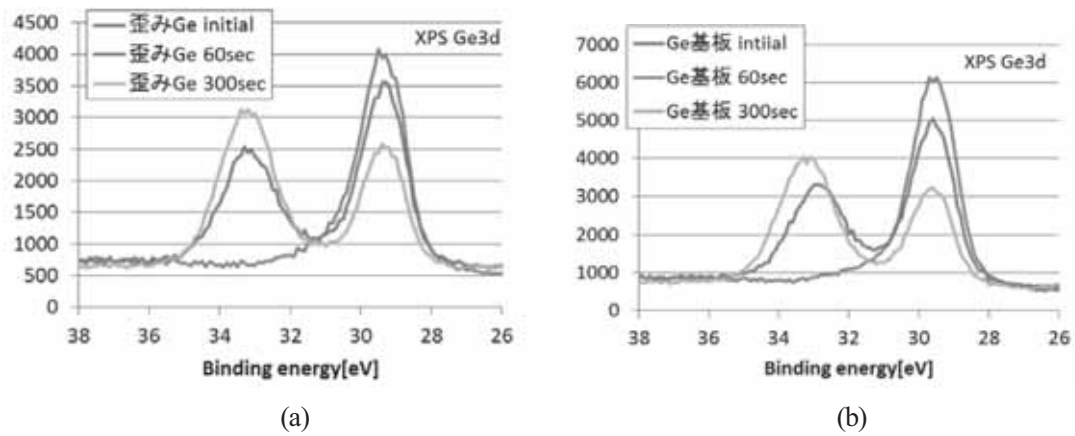


図 2 : (a) 歪み Ge の NBO 後の XPS Ge 3d スペクトル
(b) Ge 基板の NBO 後の XPS Ge 3d スペクトル

3. 研究目標の達成状況

Si 基板上に SiGe バッファ層を形成後、歪み Ge チャンネルを成長させ、その後に NBO による酸化膜形成を試みた結果、低温プロセスにより Ge チャンネル層の歪み(~2%)を完全に維持したまま、3-4nm で平坦な酸化膜の形成に成功している。さらに、角度分解 X 線光電子分光法 (XPS) による酸化膜の結合状態評価により、Si キャップ層のある構造では、良質な SiO₂層が、Ge の直接酸化の構造においても、サブオキサイド形成が抑制された良質な GeO₂が形成され、酸化レートの変化はなく、バルク Ge 基板と同様に扱うことが可能であることが分かった。以上の結果より、今後の高移動度歪み GeMOSFET へ向けたゲート絶縁膜形成技術がほぼ確立されたと言える。

4. まとめと今後の課題

MBE による高品質 Ge チャンネル結晶成長、NBO によるダメージフリーかつ、低温での酸化膜形成を試み、良質な酸化膜/歪み Ge 構造を得た。今後は、界面準位密度、リーク電流の定量評価と低減化を進め、高移動度 MOSFET へとつなげる。特に、原子層堆積法 (ALD) によるゲート絶縁膜積層構造の形成を検討することにより、高誘電率かつ低リーク電流を同時に達成する構造最適化を進める。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

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

Project code	J13027
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	3rd year

The Mechanism and the Control of the Unsteady Three-dimensional Wake Structure of Road Vehicle

Chenguang Lai*†, Shigeru Obayashi**††, Yuting Zhou***, Chao Man*, and Xun Liu*

*Chongqing Institute of Automobile, Chongqing University of Technology

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

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

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective of this project is to construct the theoretical models for the mechanism of the road vehicle wake structure by using numerical and experimental methods. Basing on these theoretical models, the methods of controlling the structures of the wake vortex and restraining the vortex excited vibration will be further studied in the research.

2. Details of program implement

Numerical simulation is carried out to conduct the external flow field of an Ahmed model with 25° back slant angle in the Fluent. Firstly several common turbulence models are used for steady simulation. These results are compared with the existing experimental data to find out the most suitable turbulence model for steady simulation. Then the DES (Detach Eddy Simulation) method is used for transient simulation. And compare the result between it and the steady simulation. Table 1 show the comparisons of the drag and lift coefficients in different simulation methods and wind tunnel test, and Figure1 shows the difference between the steady and transient simulations of the external flow field.

Table 1: Drag and lift comparisons of the simulation and W-T test

	Turbulence mode	simulation	W-T test	Error(%)
Darg comparison	Standard $k-\varepsilon$	0.3724	0.2850	30
	RNG $k-\varepsilon$	0.2980		4.5
	Realizable $k-\varepsilon$	0.2889		1.37
	DES	0.272		4.56
Lift comparison	Standard $k-\varepsilon^{\mathcal{E}}$	0.3056	0.4000	23.6
	RNG $k-\varepsilon$	0.3552		11.20
	Realizable $k-\varepsilon$	0.3750		6.25
	DES	0.312		22

3. Achievements

The unsteady three-dimensional wake structure was constructed based on the transient simulation, and the comparisons between different simulation methods and different turbulence models were carried out, which supplies

important references for the further study of the characteristics of the vehicle external flow field, especially to clarify the wake structure and formation mechanism of the wake vortices of the road vehicle.

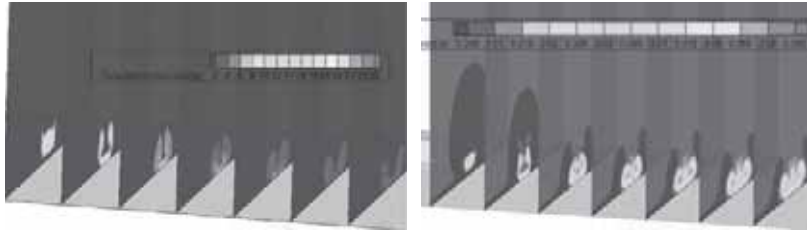


Figure 1: Comparison of distributions of the turbulence kinetic energy in different equidistant (400mm) longitudinal section utilizing RANS method (left) and DES method (right) respectively

4. Summaries and future plans

Summaries: Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model is better to numerically evaluate the aerodynamic drag of a car-like shape; there is less turbulence model can exactly simulate the vehicle aerodynamic lift, but the realizable $k-\varepsilon$ turbulence model is relatively better; there is no large difference between RANS and DES methods to evaluate the time-averaged values of vehicle aerodynamic performance, but DES method can better catch the energy structure and reflect the wake characteristic.

Future plans: Use the numerical and experimental methods 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.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - [1] X. Liu and C. Lai: Numerical Simulation Research of External Flow Field on Ahmed Model, *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, Vol. 27, No. 9, (2013), pp. 3122–127. (in Chinese)
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [2] C. Man, C. Lai and K. Wen: Numerical Study of the Vehicle Aerodynamic Performance During Acceleration and Deceleration, *Proceedings of the Tenth International Conference on Flow Dynamics*, (2013), pp. 142-143.
 - [3] K. Wen, C. Lai and C. Man: The Influence of Airflow Uniformity over the Duct Outlet on Cooling Performance of Vehicle Air-condition, *Proceedings of the Tenth International Conference on Flow Dynamics*, 2013. pp. 640-641.
 - *[4] C. Lai, X. Liu, C. Man and Y. Zhou: Numerical Simulation Research of External Flow Field on Ahmed Model, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 30-31.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J13028
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	2年目

閉空間キャビティ内自然対流の不安定性解析
Instability Analysis of Natural Convection in Closed Cavity Configuration

小宮 敦樹*†, Daniel Henry**††
岡島 淳之介*, トレス フェリペ***
*東北大学流体科学研究所, **Ecole Centrale Lyon
***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

本研究では、立方体形状閉空間内に生じる自然対流不安定化現象に関して、光干渉技術を用いた温度場および流動場の同時計測システムを用いて可視化実験を行い、流動場が不安定となる温度差、重力方向の影響等の諸条件について評価を行う。実験に並行して三次元数値計算を行い、温度場と流れ場の関係性を定量評価するとともに不安定化メカニズムの詳細解析を行う。

2. 研究成果の内容

本研究では、Ecole Centrale Lyon 側で開発された閉空間内三次元数値シミュレーションコードを用いて、 $Pr=7$ における流体での立方体形状閉空間内自然対流現象を計算し、流動場が不安定様相を示す条件について詳細検討した。分岐線図が示すように、安定状態であった流れは、諸種の条件変化によって不安定化に至り、特に重力方向の影響は不安定化遷移に大きな影響を与えることが分かった。図1(a)は閉空間の傾き角度が0度であり(b)は0.01度の傾きを有している場合である。図から明らかのように、わずかな傾きの違いにおいても分岐線図の傾向が変わり、特に $Ra=2800$ 付近に存在する最初の分岐点では速度成分 u が正方向の流れに偏ることが明らかとなった。これらの結果を元に、不安定化メカニズムの解明を行った。なお、本研究内容は、Physical Review Eに掲載された。

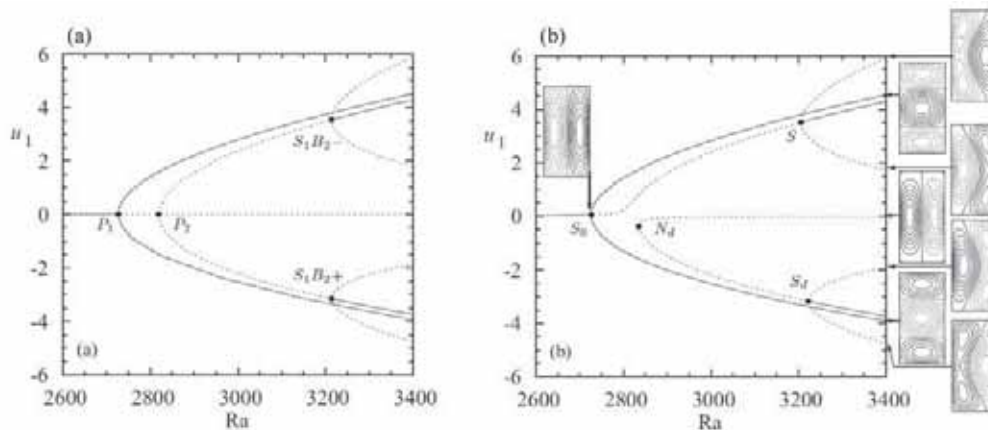


図1：分岐線図 (a)傾き角度 $\theta=0.00^\circ$, (b) 傾き角度 $\theta=0.01^\circ$

3. 研究目標の達成状況

本研究では、今年度の課題として挙げていた数値シミュレーションによる重力加速度方向が不安定化に及ぼす影響評価を定量的に評価できたが、その実験実証をすることができなかつたので、全体としては80%の達成度と評価することができる。この点については次年度実施予定である。

4. まとめと今後の課題

今年度は自然対流の不安定化遷移に関して、数値解析的アプローチにより現象解明を試みた。その結果、わずかな重力加速度方向の違いが遷移過程に大きな影響を及ぼすことが分かった。今後は、温度場・流動場同時計測システムを用いた観察実験を実施し、実験的検証を進める。この同時計測システムは既存の高精度温度場可視化システムと粒子追跡計測システムを融合したもので、温度場・流動場ともに非接触で計測可能であることから、信頼のある諸データを取得できる。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

*[1] J.F. Torres, D. Henry, A. Komiya, S. Maruyama and H.B. Hadid: Three-dimensional continuation study of convection in a tilted rectangular enclosure, *Physical Review E*, 88 (2013), 043015.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] J.F. Torres, D. Henry, A. Komiya and S. Maruyama: Instability of Natural Convective Flows inside Tilted Cubic Cavities, *2013 Annual ELyT Workshop Abstract Book*, Zao To-o-gatta, (2013), pp. 128-129.

[3] J.F. Torres, D. Henry, A. Komiya and S. Maruyama: Bifurcations in Natural Convection Inside a Tilted Cubic Cavity, *Abstract book of the Fifth International Symposium on Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics*, Haifa, (2013), p. 39.

*[4] J.F. Torres, D. Henry, A. Komiya, J. Okajima and S. Maruyama: Numerical Study of Natural Convection in a Tilted Cubical Cavity: Effects of the Prandtl number on the Stability of the Flow, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 36-37.

[5] J.F. Torres, 小宮敦樹, D. Henry, 円山重直: Simultaneous Measurement of Two-Dimensional Temperature and Velocity Fields in Natural Convection inside a Cubic Cavity, *Proceedings of the 50th National Heat Transfer Symposium of Japan*, Sendai, (2013), pp. 570-571.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

該当なし

課題番号	J13029
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	2年目

空間発展する乱流の構造に及ぼす外部乱れの影響の解明およびその熱流動制御への応用
 Effects of External Disturbances on Spatially Developing Turbulence
 and Its Application to Control of Thermo-Fluid Dynamics

酒井 康彦*†, 早瀬 敏幸**††
 長田 孝二*, 寺島 修*, 呉 楠楠*, 夏 爽*, 渡邊 智昭*
 *名古屋大学工学研究科, **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

本共同研究においては、境界層や噴流等の空間発展乱流に及ぼす様々な外部乱れ因子の影響を三次元直接数値計算 (DNS) やラージエディシミュレーション (LES) により明らかにすることを第一の目的とする。さらに、得られた知見に基づき、外部乱れの導入による、乱流境界層における壁面摩擦抵抗低減や壁面熱伝達係数の飛躍的向上や乱流噴流における熱・物質混合促進を実現する熱流動制御手法等の開発を目指す。

2. 研究成果の内容

本年度は、初年度に開発した三次元直接数値計算 (DNS) コードを用いて、壁面からの熱輸送を伴う空間発展境界層に及ぼす外部 (主流) 乱れの影響を調査した。主流乱れとしては、格子乱流を用いた。計算の結果、外部乱れがない場合には層流であるような低いレイノルズ数の境界層であっても外部乱れ (格子乱流) がある場合には乱流化すること (図 1), それに伴い、壁面からの熱輸送も飛躍的に促進されること (図 2), 粘性低層近傍でせん断の強い領域が熱輸送促進に寄与すること等が明らかになった。この他にも、フーリエ変換を用いて一様等方性外部乱れを生成する数値計算コードの開発, およびウェーブレット変換を用いた乱流組織渦構造抽出プログラム等の開発を行った。

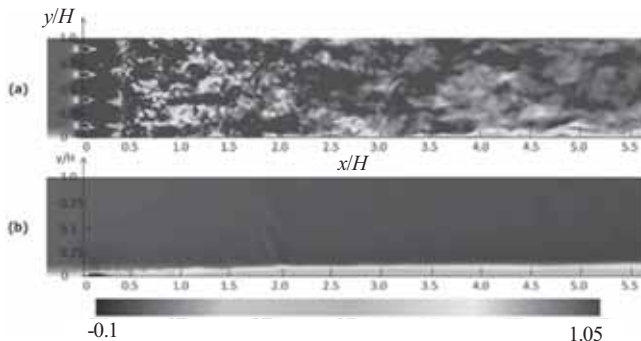


図 1: 主流方向瞬間速度分布. 壁面は $Y=0$, H は流路高さ. (a) 格子乱流 (外部乱れ) あり. 乱流格子を $X=0$ に設置 (b) トリップングのための小突起のみを壁面上流位置 ($X=0$ 付近) に設置

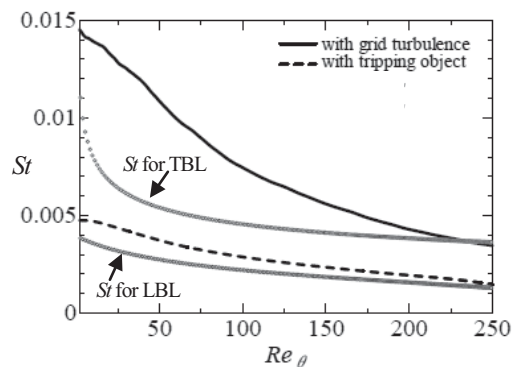


図 2: Stanton 数 St (無次元熱伝達係数) と運動量厚さ基準のレイノルズ数の関係. TBL: 乱流境界層, LBL: 層流境界層

3. 研究目標の達成状況

以下に示すように、共同研究結果を論文や国際会議、国内会議において広く公表した。さらに、国際誌に7報投稿中、2報投稿予定であり、研究目標は達成できていると判断される。

4. まとめと今後の課題

本共同研究では、外部乱れにより境界層や噴流の特性がどのように変化するのかについて調査した。今後は、外部乱れを導入することによる熱流動制御に取り組みたい。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] S. Xia, Y. Ito, K. Nagata, Y. Sakai, H. Suzuki, O. Terashima and T. Hayase: DNS Study on the Development of Boundary Layer with Heat Transfer under the Effects of External and Internal Disturbances, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.9, No.1 (2014), 13-00259.
- [2] 渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 伊藤靖仁, 早瀬敏幸: DNS による反応性物質濃度の乱流シュミット数・乱流拡散係数に関する研究, *日本機械学会論文集(B編)*, 80巻809号 (2014), 13-00533.
- [3] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, H. Suzuki, T. Hayase and Y. Ito: Visualization of Turbulent Reactive Jet by Using Direct Numerical Simulation, *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, Vol.4(2013), 1341001.
- [4] 渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 伊藤靖仁, 早瀬敏幸: 直接数値計算法と確率密度関数法による反応性二次元噴流の数値計算, *日本機械学会論文集(B編)*, 79巻807号 (2013), pp.2434-2445.
- [5] H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, T. Hayase, Y. Hasegawa and T. Ushijima: Direct Numerical Simulation of Fractal-Generated Turbulence, *Fluid Dynamics Research*, Vol.45 (2013), 061409.
- [6] H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, T. Hayase and Y. Hasegawa: An Attempt to Improve Accuracy of Higher-Order Statistics and Spectra in Direct Numerical Simulation of Incompressible Wall Turbulence by Using the Compact Schemes for Viscous Terms, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.73, No.6 (2013), pp.509-522.
- [7] 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 長谷川豊, 牛島達夫: 直接数値計算による格子乱流の解析 (不変量および Rotta モデルについて), *日本機械学会論文集(B編)*, 79巻807号(2013), pp.2363-2374.
- [8] N. Wu, Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, O. Terashima and T. Hayase: Analysis of Flow Characteristics of Turbulent Plane Jets Based on Velocity and Scalar Fields Using DNS, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.8, No.3 (2013), pp.247-261.
- [9] H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, T. Hayase, Y. Hasegawa and T. Ushijima: DNS on Multiscale-Generated Grid Turbulence Using Classical Grid, *Proc. of the 8th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Poitiers, France (2013), Paper no. HOM1E.
- [10] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito, O. Terashima and T. Hayase: DNS-PDF Simulation of Turbulent Mixing in a Reactive Planar Jet, *Proc. of the 13th International Conference on Systems Simulation*, Singapore (2013), pp.445-452.
- [11] H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, T. Hayase, Y. Hasegawa and T. Ushijima: DNS study on Small-Scale Characteristics of Fractal-Generated Turbulence, *Proc. of the 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows*, Nagoya, Japan (2013), paper no. ICJWSF2013-1109.
- [12] Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, H. Suzuki, Y. Ito, O. Terashima and T. Hayase: Direct Numerical Simulation of Single-Square Grid-Generated Turbulence, *Proc. of the 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows*, Nagoya, Japan (2013), paper no. ICJWSF2013-1102.
- [13] S. Xia, Y. Ito, K. Nagata, Y. Sakai, H. Suzuki, O. Terashima and T. Hayase: Study on the Effects of Grid-Generated Turbulence on the Initial Growth of Turbulent Boundary Layer by Direct Numerical Simulation, *Proc. of the 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows*, Nagoya, Japan (2013), paper no. ICJWSF2013-1169.
- [14] N. Wu, Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, O. Terashima and T. Hayase: Effects of Initial Condition on Coherent Structure and Evolution of Turbulent Plane Jets, *Proc. of the 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows*, Nagoya, Japan (2013), paper no. ICJWSF2013-1010.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[15] K. Nagata, Y. Sakai, T. Hayase, O. Terashima, N. Wu, S. Xia, T. Watanabe, Y. Ito, Y. Zhou and A. Sasoh: Effects of External Disturbances on Spatial Development of Turbulence and toward the Control of Thermo-Fluid Dynamics (Cases of Boundary Layer and Jets), *Proc. of the 13th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan (2013), pp.154-155.
- [16] S. Xia, Y. Ito, K. Nagata, Y. Sakai, H. Suzuki, O. Terashima and T. Hayase: DNS Study on Boundary Layer with Heat Transfer affected by Disturbances Created by a Grid and Small Cubes, *Proc. of the 10th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan (2013), pp.126-127.
- [17] N. Wu, Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, O. Terashima and T. Hayase: Reynolds-Number Dependency of Budget of Kinetic Energy and Turbulence Structure in Plane Jet, *Proc. of the 10th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan (2013), pp.76-77.
- [18] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, Y. Ito and T. Hayase: Characteristics of Turbulent/Non-Turbulent Interface in a Turbulent Planar Jet with a Chemical Reaction, *American Physical Society 66th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA (2013). (論文なし)
- [19] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, Y. Ito and T. Hayase: Scalar Transfer Across a Turbulent/Non-Turbulent Interface in a Planar Jet, *American Physical Society 66th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA (2013). (論文なし)
- [20] 渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 伊藤靖仁, 鈴木博貴, 早瀬敏幸: DNS による化学反応を伴う二次元噴流の可視化, 第41回可視化情報シンポジウム, 工学院大学 (2013).
- [21] 渡邊智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 伊藤靖仁, 寺島修, 早瀬敏幸: DNS による二次元噴流中の反応性物質の乱流拡散係数に関する研究, *日本流体力学会 年会 2013*, 東京農工大学 (2013).
- [22] 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 長谷川豊, 牛島達夫: 乱流生成方法により格子乱流の基本特性を変える試み, *日本流体力学会 年会 2013*, 東京農工大学 (2013).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J13030
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4 ~2014.3
継続年数	1年目(発展)

先進的医用超音波イメージングに関する実験研究
Experimental Study on Advanced Medical Ultrasound Imaging Technology

劉 磊*†, 船本 健一**††, 早瀬 敏幸**, 太田 信**,
井上 浩介**, 小笠原 正文*

*GE ヘルスケア・ジャパン株式会社, **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

超音波画像診断装置は医療画像診断装置の中で最も簡便で広く使用されている機器である。超音波を用いた医療検査技術は成熟期にある反面、新たな潜在的可能性（シーズ）がある。本研究では、1) 超音波による軟組織の物理特性の評価、2) 超音波を用いた微細石灰化の検出、3) 超音波とマイクロ・ナノ粒子のインタラクションの解明の3つのシーズについて検討を行う。最新医療超音波診断機器を使用した *in vitro* 実験を中心に、先進的医用超音波イメージングに関する基礎的研究を実行し、臨床応用に向けた知見を得ることを目的とする。また *in vitro* 実験の確認を目的に、実験系と対応した数値モデルを用いた数値シミュレーションを展開する。

2. 研究成果の内容

2013年度においてはGE社研究担当者が計3回流体科学研究所を訪問し、共同研究ミーティング、共同実験および数値シミュレーションの試行を行った。同研究グループは従来研究において、軟組織内の微小粒子が超音波照射に対して特異的なエンハンスメントを示す Twinkling sign (TS)現象の原因究明に取り組んできた。2013年度はTS発生のメカニズムをより詳細に解明することを目的に、前セクションに記載した研究アイテム2)と3)を中心に研究を実施した。具体的には、生体を模擬したファントムを制作し、それを用いた *in vitro* 実験を遂行した。Poly (vinyl alcohol) hydro (PVA-H) ゲルにガラス微粒子と炭酸カルシウム微粒子を混入した生体模擬ファントムを制作し、実験に使用した。そして、超音波照射時の粒子挙動を高速度カメラと顕微鏡を用いて観察(図1 a)し、超音波送信の繰り返し周波数 (PRF) による軟組織内微粒子の振動特性への影響を調べた。図1 (b)に示す結果では、微粒子の PRF (923 Hz) に従う強制振動だけでなく、PRF のハーモニック振動も観察され、TS の発生が超音波による微粒子の振動と深い関連があることを示唆した。これらの研究結果は研究成果[1]-[3]として発表した。また、*in vitro* 実験と並行して、実験系に対応する数値計算モデルを構築し、商用超音波伝搬解析アプリケーション Comwave を使用した数値シミュレーションの環境構築や基礎的検討を行った。

3. 研究目標の達成状況

本年度設定した研究目標を達成した。実験的研究においてはTSの発生原因解明により近づいた。数値シミュレーション環境の構築および試用も完了し、今後の実験結果検証への寄

与が期待できる。

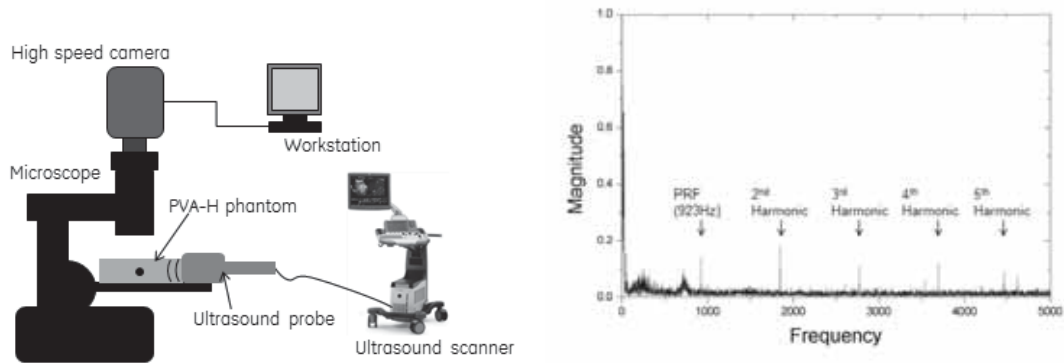


図1 : (a) 本研究で使用した実験システム概略図. PVA-H 製生体模擬ファントムに対して超音波 Pulse Doppler モードで超音波を照射し, ファントム内ガラス微粒子の挙動を高速度カメラと顕微鏡により観察した. (b) 超音波照射繰り返し周波数 PRF = 923 Hz の設定で観察されたガラス粒子の振動特性. PRF に従う強制振動成分と, 強制振動成分のハーモニック成分が観察された.

4. まとめと今後の課題

本研究は次世代医用超音波イメージング技術開発を目的とし, 2013 年度は超音波を用いた微細石灰化の検出法の基礎的研究 (TS 発生メカニズム解明に関する基礎的研究) および超音波とマイクロ・ナノ粒子のインタラクション解明に関して研究を行った. 研究成果に示す通り, 軟組織内の微小粒子と超音波の関係は複雑な音響物理問題であることが確認され, TS 発生は超音波照射音圧による微小粒子の振動が深く関与していることが示唆された. 研究では引き続き実験的手法と数値シミュレーションを用いたアプローチを用いて推進する. また, 研究で得られた知見をベースに, 超音波送信受信アルゴリズムの構築, 臨床検査用超音波画像診断装置への統合, 臨床研究への展開を予定している.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] L. Liu, K. Funamoto, M. Tanabe and T. Hayase: Fundamental Study on Micro Calcification Detection Using Twinkling Sign (TS): The Effect of Stiffness of Surrounding Tissue on the Appearance of TS, *35th Annual International Conference of the IEEE EMBC*, (2013), pp. 1390-1393.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] L. Liu, K. Funamoto, M. Tanabe and T. Hayase: In-depth Investigation of Twinkling Sign: Optical Observation of Ultrasound Radiation Force Driven Oscillation of Glass Particle, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 58-59.

[3] 劉 磊, 船本 健一, 田邊 将之, 早瀬 敏幸: *In vitro* Study on Twinkling Sign of Microcalcification in Soft Tissue: The Effect of Particle Size and Particle Type, 日本超音波医学会 第86回学術集会, (2013), pp. S408.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J13031
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamental
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	2nd year

Investigation of a Novel Magnetorheological Shear Thickening Fluid

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 objective of this project is to fabricate and characterize new magnetorheological (MR) materials, including MR shear thickening fluids and MR shear stiffen elastomers. The properties of these smart materials exhibit dual functions that their properties can be controlled by either magnetic field or speed/frequency. In this study, mechanical or rheological properties of these materials will be investigated and their novel application potential will be explored.

2. Details of program implement

We fabricated new MR shear thickening fluids (MRSTF) and investigated their viscoelastic properties through both experimental and modeling approaches. We also designed and developed a linear damper working with MRSTF. The performance of the MRSTF damper was experimentally evaluated. Representative results are summarized as below.

(a) Viscoelastic properties of MRSTF: First of all, the shear thickening fluid base with a weight fraction of 25% was formed by dispersing silica particles (14 nm) in the Ethylene glycol solvent. Carbonyl iron particles (5 μm) were then mixed with the base to form MR shear thickening fluids. Figure 1 shows the relationships between the storage modulus (G'), the loss modulus (G'') versus driving angular frequency at a constant magnetic field of 220 mT. For a small strain amplitude of 0.05% (Figure 1a), the MRSTF exhibit linear viscoelastic properties. However, for a large strain amplitude of 1% (Figure 1b), it behaves as nonlinear viscoelastic properties where two critical frequencies of were found. In this study, a 4-parameter phenomenological model was proposed to precisely predict MRSTF viscoelastic properties under dynamic loading conditions.

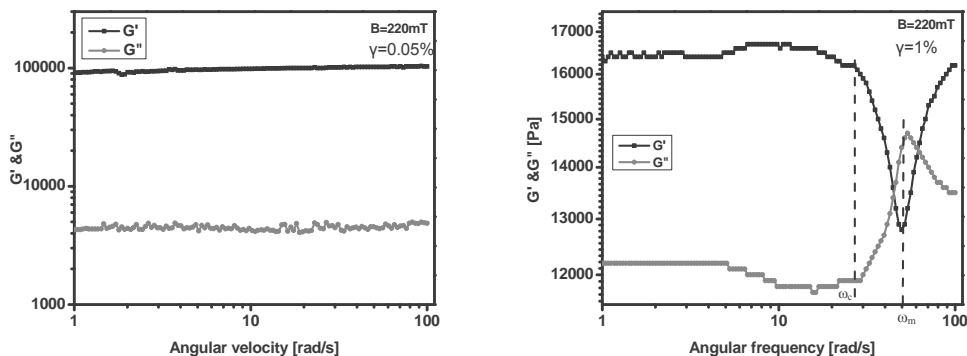


Figure 1 : Viscoelastic Properties of MRSTF under small and large amplitudes.

(b) MRSTF linear damper: A prototype semi-active linear MRSTF damper was designed and manufactured and its dynamic performance was experimentally evaluated. The damping force increased steadily with the increase of the coil current, which exhibit obvious MR effect. It also exhibits a distinct characteristic that the effective stiffness depends on magnetic fields. The application of such various stiffness and damping devices is an exciting research field.

3. Achievements

In the second year, two novel MR shear thickening materials, MRSTF and MRSSE, were fabricated and their mechanical properties were experimentally studied. The developed fabrication technique is much faster than conventional methods for fabrication of MREs. The MRSTF damper was prototyped and its performance was experimentally evaluated. The pioneering research on the development MRSTF devices will generate impact research.

4. Summaries and future plans

Summaries: We conducted excellent research in fabricating and characterizing novel MR shear thickening materials. The rheological and mechanical properties of PDMS based MREs were investigated. The joint-paper was published in the international journal of *Smart Materials and Structures*. Another joint-paper was accepted for publication in *Korea-Australia Rheology Journal*. We recently submitted one more joint-paper to *Rheologica Acta* for review.

Future plan: In the third year of the collaborative research, the following three major tasks will be conducted: (1) Study of dynamic properties of MRSTF under flow mode, which will provide guidance for developing flow mode MRSTF devices; (2) design, optimization, prototyping and evaluation of novel MRSTF dampers; and (3) joint-supervision of research students and junior research staff.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - *[1] W.H. Li, and M. Nakano: Fabrication and characterization of novel PDMS based MR elastomers, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 5, (2013), 055035 (7 pages).
 - [2] W.H. Li, M. Nakano, and G.R. Peng: Viscoelastic properties of MR shear thickening fluids, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization (FLUCOME2013)*, Nara, (2013), OS5-01-3, pp. 1-10.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [3] M. Nakano, W.H. Li, A. Totsuka and C. Sato: Magneto-Rheological Effects of Shear-Thickening MR Fluids, *Proceedings of JSME Fluid Engineering Division Conference*, No.0806, (2013), pp. 1-2.
 - *[4] W.H. Li, and M. Nakano: Viscoelastic properties of MR shear thickening fluids, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 172-173.
 - [5] T.F. Tian, W.H. Li, and M. Nakano: Design and evaluation of a linear damper working with MR shear thickening fluids, *Proceedings of the Tenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2013)*, Sendai, (2013), pp. 440-441.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J13032
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	2nd year

Investigation of Subsonic-Supersonic Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc with Inhomogeneous Mixing of Plasma Species

Jiří Jeništa*†, Hidemasa Takana**, Hideya Nishiyama**††, Milan Hrabovský*

*Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i., Czech Republic

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Numerical simulation of physical processes in the hybrid-stabilized argon-water electric arc for broad range of operational parameters under subsonic-supersonic plasma flow regimes. Investigation of mixing of plasma species within the discharge volume and in the near-outlet region of the arc. A detailed comparison with our former numerical results and with available experiments.

2. Details of program implement

Calculations of turbulent effects have been carried out in the hybrid-stabilized electric arc for currents 300-600 A and for 22.5-40 slm (standard liters per minute) of argon. Turbulence is modelled by Large-eddy simulation (LES) using the Smagorinsky sub-grid scale model ($C_s = 0.1$, $Pr_t = 0.9$). A Van Driest damping function is applied to suppress turbulence near the walls. Three numerical grids were applied to study grid-independence and the appropriate resolution of the LES with 38553 (Grid1), 115018 (Grid2) and 193914 (Grid3) grid points. Results between turbulent and laminar flow assumptions have been compared.

3. Achievements

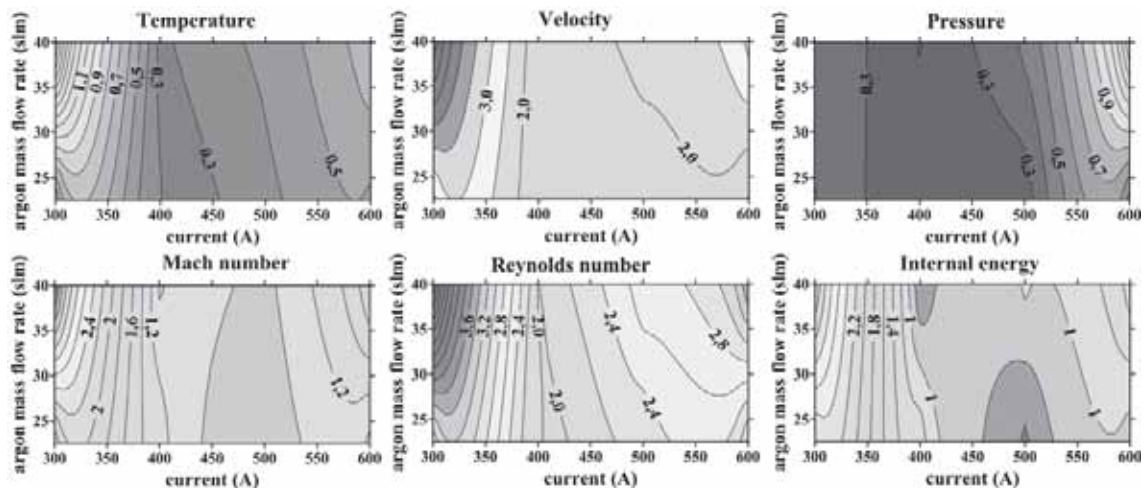


Figure 1. Space average relative difference in per cent (%) between turbulent and laminar models calculated for several physical quantities in the nozzle- and near-outlet regions (Grid3). The space average relative difference for a given physical quantity X is

calculated at each grid point as $\Delta_{av}^X = \text{abs}(X_{turb} - X_{lam}) / [0.5 * |X_{turb}| + |X_{lam}|]$, then all Δ_{av}^X are summed over the grid points and averaged by an arithmetic mean. Here “*turb*” and “*lam*” stand for the turbulent and laminar values of X , respectively.

The principal results of the project can be summarized as follows:

(a) Turbulence is not a significant phenomenon in the discharge and near-outlet regions of the hybrid-stabilized argon-water electric arc:

- Maximum relative difference between the laminar and turbulent simulations of each of the monitored physical quantities calculated within the volume of the discharge and in the near-outlet region, reaches less than 2% for the finest grid.

- Even though the original grid provides nearly grid-independent results at the nozzle outlet, it is still a rare grid for the exact resolution of turbulent effects (the eddy viscosity) calculated by LES.

- The tendency for the convergence of differences to their limiting values is obvious for the two finest grids.

(b) Turbulent effects are stronger in small regions near sharp edges of the outlet nozzle and in the transition region between hot plasma and the surrounding atmosphere with high radial temperature and velocity gradients.

(c) Comparison with available experimental data demonstrates very good agreement for radial temperature profiles near the outlet nozzle.

4. Summaries and future plans

The results of the project demonstrate quasi-laminar flow within the volume of the discharge and in the near-outlet region of the hybrid-stabilized arc.

Our future plans include:

- the study of mixing of hydrogen, argon and oxygen plasma species within the discharge region of the hybrid arc by the combined diffusion coefficients method.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlová, V. Aubrecht and P. Křenek: The Influence of Turbulence on Characteristics of a Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 8, No. 2, (2013), pp. 435-447.

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

*[2] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Hrabovský and T. Kavka: Investigation of Subsonic-Supersonic Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc With Inhomogeneous Mixing of Plasma Species: Parametric Numerical Study of Turbulence. *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 38-39.

[3] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlová, V. Aubrecht and P. Křenek: Parametric Numerical Study of Turbulence in a Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc Under Subsonic-Supersonic Plasma Flow Regimes. *Proceedings of the 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization (FLUCOME2013)*, Nara, (2013), on USB Flash Disc, paper OS13-05-1.

[4] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlová, V. Aubrecht and P. Křenek: Turbulent Effects in a Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc: A Parametric Numerical Study. *Abstracts of 40th IEEE International Conference on Plasma Science*, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6634896>.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J13033
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	1年目

センシングに基づく漏洩水素の動的強制ベント制御に関する研究

Researches on a Sensing-Based Dynamic Forced Ventilation Control of Leaking Hydrogen

中野 政身^{††}, 松浦 一雄^{**††}, 石本 淳^{*}

^{*}東北大学流体科学研究所, ^{**}愛媛大学大学院理工学研究科

[†]申請者, ^{††}所外対応研究者

1. 研究目的

水素エネルギーの広範な利用にあたっては、水素の漏洩・拡散を想定した対応やインフラが必要である。これまで著者らは、密閉度の高い水素利用空間を前提に、漏洩水素の拡散・滞留状況をリアルタイムセンシングし、その情報に基づき迅速かつ確実に動的な強制ベントを行う、オリジナルかつ柔軟なリスク緩和手法を提案してきた。本研究は、漏洩量に応じた排出量の上限値を動的に決定しつつ、排出量が過度に大きくなるのを抑制しながらベント制御する方法を開発することが目的である。

2. 研究成果の内容

次式で定義される天井近傍に集積する瞬時水素量 $Q_{accum}(t)$ を天井からの排出体積流量 $Q_{ex}(t)$ の制御に用いる。

$$Q_{accum}(t) \equiv \int_V Y(t) dV \sim \sum_{i \in \{S_1, \dots, S_N\}} Y_i(t) \Delta V_i.$$

ここで、 Y は天井近傍に設けられたセンサー i における体積濃度であり、 ΔV_i はそのセンサー一点に代表される体積要素である。 $t=0$ s は漏洩開始時刻を表す。 T_p はセンサーのモニタリング時間であり、排出量 $Q_{ex}(t)$ は過去 T_p 秒の情報に基づき T_p 時間毎に更新される。 $I_n \equiv [(n-1)T_p, nT_p)$, $n \in \mathbf{N}$ は単一の T_p 秒時間区間であり、 $Q_{accum}(t)$ は $t=t_1, t_2, \dots, t_m$ で評価される。ここで、 $t_1 \equiv (n-1)T_p$,

$t_m \equiv nT_p$ である。データ群 $(t_i, Q_{accum}(t_i))$ ($i=1, 2, \dots, m$) から、 $S_n \equiv \{Q_{accum}(t_i) - f^n(t_i)\}^2$ で定義さ

れる残差二乗和 S_n を最小とする一次関数 $f^n(t) = a_0^n + a_1^n t$ ($t \in I_n$) を見つける。 \bar{f}^n および $\Delta \bar{f}^n$ を

次のように定義する： $\bar{f}^n \equiv a_0^n + a_1^n (T_p/2)$, $\Delta \bar{f}^n \equiv \bar{f}^n - \bar{f}^{n-1}$, $n \in \mathbf{N}$ 。これより、 $t \in I_{n+1}$ に対する

$Q_{ex}(t)$ を次の 2 段階により与える。



(a) $Q_{leak} = 1.18 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$

(b) $Q_{leak} = 4.72 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$

(c) $Q_{leak} = 9.44 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$

図 1: Spatial distribution of hydrogen at $t=80$ s for various leak flow rates Q_{leak}

$$(a) \quad Q_{ex}(t) = \begin{cases} \max(Q_{ex}(t-T_p) - \alpha S_{roof}, \beta_g) & \Delta \bar{f}^{n-1} \in I^{-\varepsilon} \cap \Delta \bar{f}^n \in I^{-\varepsilon}, \\ Q_{ex}(t-T_p) & \Delta \bar{f}^{n-1} \in I^{-\varepsilon} \cap \Delta \bar{f}^n \in I^0, \\ Q_{ex}(t-T_p) & \Delta \bar{f}^{n-1} \in I^{-\varepsilon} \cap \Delta \bar{f}^n \in I^{\varepsilon}, \\ \max(Q_{ex}(t-T_p) - \alpha S_{roof}, \beta_g) & \Delta \bar{f}^{n-1} \in I^0 \cap \Delta \bar{f}^n \in I^{-\varepsilon}, \\ Q_{ex}(t-T_p) & \Delta \bar{f}^{n-1} \in I^0 \cap \Delta \bar{f}^n \in I^0, \\ \min(Q_{ex}(t-T_p) + \alpha S_{roof}, c_0(t)) & \Delta \bar{f}^{n-1} \in I^0 \cap \Delta \bar{f}^n \in I^{\varepsilon}, \\ Q_{ex}(t-T_p) & \Delta \bar{f}^{n-1} \in I^{\varepsilon} \cap \Delta \bar{f}^n \in I^{-\varepsilon}, \\ Q_{ex}(t-T_p) & \Delta \bar{f}^{n-1} \in I^{\varepsilon} \cap \Delta \bar{f}^n \in I^0, \\ \min(Q_{ex}(t-T_p) + \alpha S_{roof}, c_0(t)) & \Delta \bar{f}^{n-1} \in I^{\varepsilon} \cap \Delta \bar{f}^n \in I^{\varepsilon}, \end{cases} \quad (1)$$

$$(b) \quad Q_{ex}(t) = \min(Q_{ex}(t), \alpha(t)).$$

ここで、 I^{ε} , I^0 , $I^{-\varepsilon}$ は下記のように定義される区間を表す。

$$I^{-\varepsilon} \equiv \{x \in \mathbf{R}; x < -\varepsilon\}, \quad I^0 \equiv \{x \in \mathbf{R}; -\varepsilon \leq x \leq \varepsilon\}, \quad I^{\varepsilon} \equiv \{x \in \mathbf{R}; x > \varepsilon\}.$$

β_g は、漏洩量に依存しない $Q_{ex}(t)$ の大域的な下限値であり、天井近傍に水素が残っている際に $Q_{ex}(t)$ が小さくなりすぎるのを防ぐ。 $\alpha(t)$ は、許容しうる $Q_{ex}(t)$ の上限値であり、漏洩量に対する依存性を有する。従来の制御法ではユーザが設定する定数であったが、本制御法ではセンシング情報に基づき動的に決定され、一定時間区間毎に更新される。式(1)において T_p , α および ε はそれぞれ 2.5 s, 1 m/s そして 1.e-6 である。

3. 研究目標の達成状況

本年度の研究により、これまでユーザ入力として単一の定数を与えていた排出量の上限值を水素センシング情報から動的に決定しながらベント制御する方法を提案出来た。本プロジェクトにおける中心課題が解決されたことになり、プロジェクト全体の達成度としては 70% である。

4. まとめと今後の課題

本研究により、排出量の上限值を水素センシング情報から動的に決定しながらベント制御する方法を提案した。センサー位置の変更が本制御法に与える影響や、漏洩量の時間変化や漏洩位置の変化が有る場合における本制御法の有効性を検証することが今後の課題である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] K. Matsuura, M. Nakano and J. Ishimoto: Researches on a Sensing-Based Dynamic Forced Ventilation Control of Leaking Hydrogen, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 42-43.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) 換気制御システムおよび換気制御方法, 松浦一雄, 中野政身, 石本淳, 出願日: 平成 22 年 4 月 16 日, 登録日: 平成 26 年 3 月 14 日, 取得

課題番号	J13034
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	2年目

ホールトーン現象の低減化制御に関する研究
Researches on the Suppression Control of Hole Tone Phenomena

中野 政身*†, 松浦 一雄**††

*東北大学流体科学研究所, **愛媛大学大学院理工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

円形のノズルあるいは穴から流出した噴流がノズルと同じ直径の穴が開いている下流に置かれた板を通過する際に発生する自励発振音はホールトーンと呼ばれる。この音は、固体燃料ロケットモータ、自動車取入口、排気システム、換気装置、ガス供給システムや笛吹きやかんなど多くの実用的な状況において異音や振動の原因となることが知られている。ホールトーンは長い研究の歴史を有するが、その音の低減手法などに関して必ずしも包括的な理解は得られていない。そこで本研究は、実験と計算による直接音解析を併せて行い、確実性の高いホールトーンの低減化制御法を提案・開発することが目的である。

2. 研究成果の内容

下流板の穴近くにリング状の突起を取り付けることによりホールトーンのフィードバック機構における擾乱伝播ループの構成要因を抑制あるいは消滅するパッシブ制御法を提案した。噴流速度が 6-12 m/s の条件範囲内で計測を実施した。実験においては、リング状突起の内径、突起高さ h およびノズル出口と下流板の距離である衝突距離 L_{im} を可変とし、リング状突起の外径は内径より常に 10 mm 大きいとした。リング状突起の内径は 51-91 mm、突起の高さは 8 mm 以下、そして衝突距離は 50-90 mm の範囲内とした。その結果、突起の消音効果は、 W/L_{im} と h との組み合わせで良く纏められ、 $W/L_{im}-h$ プロットにおいて $(W/L_{im}, h)=(0.2, 2.5 \text{ mm})$ 付近を最下点とする舌形の特定領域で現れることが分かった。ここで、 W はホール外縁から突起内縁までの距離である。レーザー・スモーク法による可視化実験より、提案する突起を用いると、突起内縁からの乱れた逆流がノズル出口下流の噴流せん断層を乱すことによりせん断層に組織的な渦が形成されることを阻害するため、元々のホールトーンで見られたフィードバックループの攪乱が維持され、消音されることが分かった。消音メカニズムの詳細を明らかにするため、6次精度差分-10次精度フィルタリングに基づく直接音解析を実施した。突起内縁からの乱れた逆流が上記噴流せん断層を乱すことがどのように消音に繋がっているか、元々のホールトーンが発生している状態から突起により消音されている状態に至る途中過程およびそれに付随する subharmonic 周波数の出現、Howe の渦音理論に基づく音源の特定、さらに Snapshot Proper Orthogonal Decomposition 解析を用いて、元々のホールトーンにおいて提案された穴を通過する流量-渦衝突-大域的な圧力波伝播の間の三者関係である軸対称ロットリング機構が、突起により消音されている状況下でも成立することなどを明らかにした。

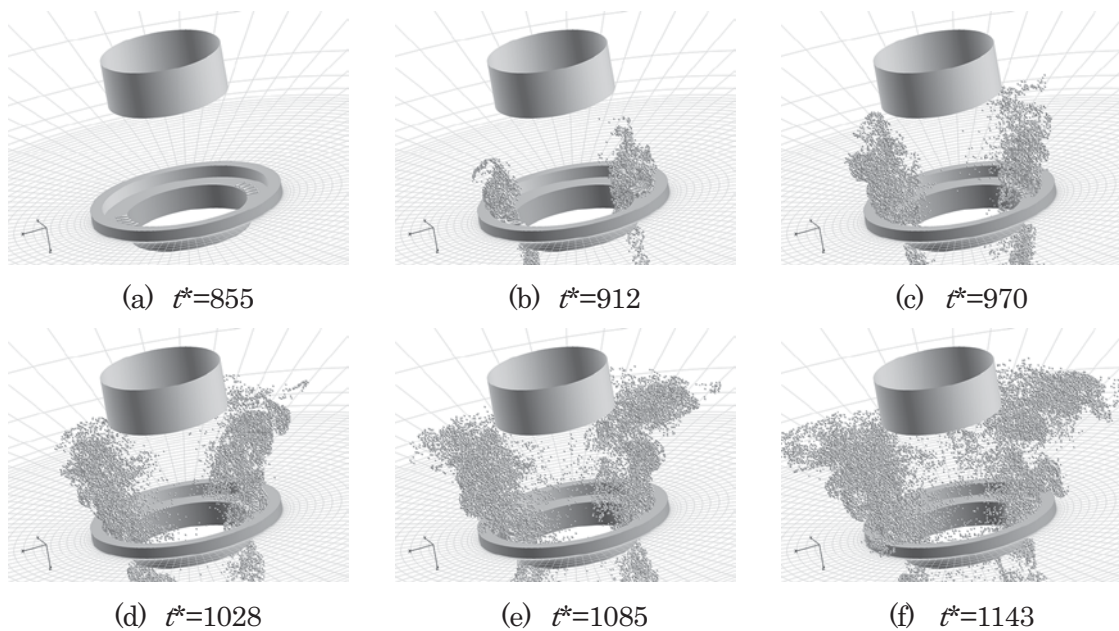


Fig. 1: Behaviors of massless particles seeded from the neighborhood of the end plate hole edge (obstacle: inner diameter: 71 mm, height: 5 mm, L_{im} : 50 mm)

3. 研究目標の達成状況

下流板にリング状の突起を設けるパッシブ制御による、ホールトーン現象の有効な低減化手法を見出し、その低減メカニズムを音と流れ場との関係から明らかにすることが出来た。本研究が目的とする確実性の高いホールトーンの効果的な低減化制御法の提案、開発そして詳細物理機構の解明に関して着実に成果を得ており、これまでの全体達成度は80%である。

4. まとめと今後の課題

下流板にリング状の突起を取り付けることにより、ホールトーンのフィードバック機構における擾乱伝播ループの構成要因を抑制あるいは消滅する新たなパッシブ制御法を提案し、その効果を明らかにすることができた。リング状突起以外のシステム要素を取り付けることによる、ホールトーンの消音効果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] 中野政身, 松浦一雄: 空力自励音とその数値解析, 日本フルードパワーシステム学会誌, 44(5), (2013), pp. 275-277.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] K. Matsuura and M. Nakano: Disorganization of a Hole Tone Feedback Loop by an Axisymmetric Obstacle on a Downstream End Plate, *4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows*, Nagoya, (2013), pp. 1-6.

*[3] K. Matsuura and M. Nakano: Researches on the Suppression Control of Hole-Tone Phenomena, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 156-157.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13035
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4 ~2014.3
継続年数	1年目

空隙媒体による水中爆発の減衰と軽減効果について
Attenuation and Reduction Effect of Underwater Explosion by Porous Materials

北川 一敬*†, 大谷 清伸**††
 *愛知工業大学, **東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

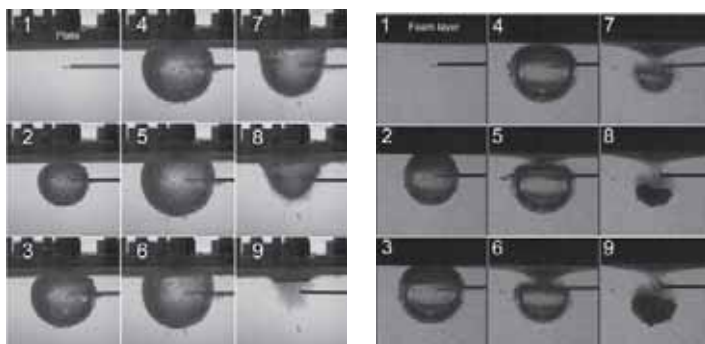
1. 研究目的

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、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による衝撃環境と水流ジェットの軽減とその減衰法を確立することが目的である。

2. 研究成果の内容

図 1a と 1b は、各種材料での水中爆発時の爆発生成ガスの気泡運動の可視化結果を示す。a は剛体面、b は 30mm 厚のフォームを設置した場合である。図 1a は水面から 35mm, 1b は 45mm 下方にアジ化銀を設置した。図 1a の剛体面の場合、爆発によって爆発生成ガスが発生し、膨張していく(No.1 から No.4)。No.5 以降、爆発生成ガスは剛体面方向に移動する。爆発生成ガスが最小の時、バブルパルスが発生し、上方へ水流ジェットが発生する。図 1b のフォームの場合、爆発生成ガスの膨張過程では、フォームの自由端の影響を受け、上部が凹みを生じた形で膨張していく(No.1 から No.3)。収縮過程ではフォーム中の気泡が爆発生成ガスの上部に引き寄せられる。No.5 にてフォーム中の気泡が爆発生成ガスの上部に接触する。No.6 以降、爆発生成ガスの直径は最小となりバブルパルスが発生する。その後、膨張収縮運動をしながら下方へ移動する。その運動から水流ジェットは下方に形成され、水の慣性力は直接物体の方に印可されない。



a 剛体面 b ポリウレタンフォーム

図 1 : 水中爆発の可視化($\Delta t=0.8\text{ms}$)

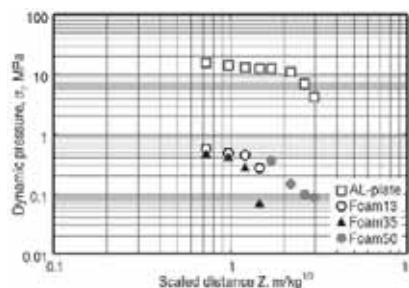


図 2 : 入射衝撃圧と換算距離の関係

図 2 は入射衝撃圧と換算距離の関係を示す。図中の□:剛体面, ○:Foam13, ▲:Foam35, ●:Foam50 の結果を示す。フォームの後の数字は 1 インチ当たりのセル数を示し、値が小さいほどフォーム骨格素材の線径が太く、粗いセル構造を持つことを示す。4 種類のフォームについて、

換算距離が $Z < 1\text{m/kg}^{1/3}$ の時、最大過剰圧力が 92%まで減少した。換算距離が $1 < Z < 3\text{m/kg}^{1/3}$ の時は最大過剰圧力が 98%まで減少する。セル構造が緻密な Foam50 が他フォームに比べて、圧力軽減効果が大きくなる。

3. 研究目標の達成状況

水中爆発時に印可される衝撃圧・動的破壊挙動を、複雑構造媒体の組合せによって、物体損傷軽減の評価を行うことが研究目標である。フォームの設置によって、衝撃圧の減衰と水流ジェットを物体から遠ざける事ができ、本年度の結果からおおむね順調に進展している。水中爆発の減衰と軽減のための手段は、媒体形状、媒体の物性値や分布の変更による方針が固まりつつある。

4. まとめと今後の課題

フォーム様な空隙を有する媒体を用いて、95%以上の衝撃圧の減衰効果とフォームによる水流ジェットの軽減から水中爆発の軽減効果を得る事ができた。緻密なフォームほど、フォーム骨格固体の非定常抵抗により衝撃圧と水流ジェットがフォーム後端では弱くなり減衰する。フォーム骨格固体によって、衝撃波からのキャビテーション発生が多くなり、水流ジェットが減衰し、爆発生成ガスが物体より離れていく事が明らかになった。

今後の課題として、水中爆発の軽減評価には、入射衝撃波とバブルパルスのインパルス、水流ジェットの流速、爆発生成ガスの膨張収縮運動を総合判断して決定する事が必要である。次年度以降、これらの評価方法を考慮し、水中爆発の軽減効果を向上させるように研究を遂行する。

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] K. Kitagawa, A. Abe and K. Ohtani: Interaction between underwater explosion and porous foam layer, *Proceedings of the 29th International Symposium on Shock waves (ISSW29)*, Wisconsin, (2013), 0246-000156.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] K. Kitagawa and K. Ohtani : Attenuation and Reduction Effect of Underwater Explosion by Porous Materials, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 74-75.
- [3] 野村達也, 北川一敬, 大谷清伸 : 水中爆発時の生成ガスと凹凸形状物体の衝突干渉の可視化, 高速度イメージングとフォトリクスに関する総合シンポジウム 2013 (JCHSIP2013), (2013), 17-201.
- [4] 野村達也, 北川一敬, 大谷清伸, 阿部淳 : 水中爆発と凹凸形状物体の衝突干渉, 平成 25 年度衝撃波シンポジウム, (2013), 1B2-1.

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	J13036
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2013.4 ~2014.3
継続年数	2年目

サステナブル異分野融合型微粒化・界面現象に関する研究
Sustainable Integrated Study of Atomization and Interfacial Phenomena

石本 淳*†, 落合 直哉*, Kozo Saito**††
*東北大学流体科学研究所, **IR4TD, University of Kentucky
†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

University of Kentucky, USAとのジョイントラボラトリーを双方向型で利用し、「サステナブル異分野融合型微粒化・界面現象に関する研究」の実施を行う。各種ノズルから噴射される高速微粒化現象に対し、エネルギー輸送考慮型Euler-Lagrangeモデルを用いることにより超高熱流束噴霧熱伝達数値シミュレーションすることが可能な専用ソルバーを開発する。さらに超並列融合計算を行うことによりサステナブル噴霧微粒化機構に及ぼす高速相変化・相間エネルギー輸送等の影響を明らかにする。実施に当たっては、対象とする計算内容が複雑・高難度であるため、専用の「超並列流体融合計算システム」と、流体研スーパーコンピュータを用いる。

2. 研究成果の内容

今年度は、マイクロ固体窒素（Solid Nitrogen, SN₂）噴霧流を利用した新型超高熱流束冷却システム開発のための基礎データを得ることを目的とし、相間エネルギー輸送と相変化を考慮した単一固体窒素粒子衝突による冷却熱伝達特性に関する検討を行った。その結果、加熱平板に衝突後、単一 SN₂ 粒子接触熱伝達による熱輸送が生じ、また、SN₂ 粒子が相変化し、潜熱輸送による冷却が促進されるが、相変化過程が完了すると、冷却熱流束値が次第に減少する事が判明した。さらに、加熱基板の冷却効果が SN₂ 粒子の衝突による接触熱伝達のみではなく、衝突に引き続き粒子蒸気相変化に基づく潜熱輸送による冷却が行われる事により、圧力と限界熱流束のピーク値が単純に一致せず、ある程度の時間遅れを有していることが明らかとなった。

3. 研究目標の達成状況

マイクロソリッド噴霧のMacroscopic 超高熱流束冷却性能に関する検討を行い、噴霧冷却特性に関する検討を行った。その際、固体窒素粒子衝突による接触熱伝達効果が冷却に対し非常に重要であることが判明した。したがって、本年度では相間エネルギー輸送と相変化を考慮した単一固体窒素粒子衝突による冷却熱伝達特性に関する検討を行った。

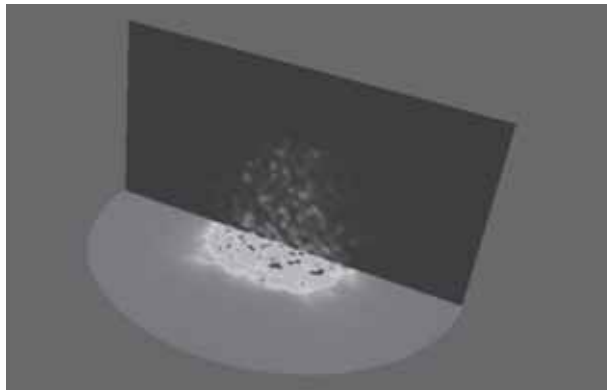


図1：単一固体窒素粒子衝突による超高熱流束効果に関する超並列融合計算

達成度は70%である。これにより、ガソリン用インジェクターのみならず、各種ミスト冷却システム等、噴霧を利用するプロセッサ冷却系、自動車塗装、コーティングのバーチャルプランニングに貢献するものと考えられる。

4. まとめと今後の課題

極低温微細固体窒素噴霧に関し、ミクロ的見地からに解明を目指し、単一固体窒素粒子超高熱流束壁面熱伝達のモデリングとエネルギー式考慮型 LES-VOF 数値スキームの開発を行った。さらに測定結果を計算情報としてCFD 計算過程に導入する融合計算手法の基本方針を確立した。今後は、ベルカップモデルを用いた自動車塗装に関するシミュレーション、スーパーコンと PC クラスタを用いたスワール微粒化モデル数値計算の実施と数値計算手法の最適化に関しては来年度に継続して研究の遂行を行う。

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] Jun Ishimoto, U Oh, Tomoki Koike, and Naoya Ochiai: Cryogenic Single-Component Micro-Nano Solid Nitrogen Particle Production Using Laval Nozzle for Physical Resist Removal-Cleaning Process, *ECS Transactions*, Vol. 58, No. 6, (2013), pp. 231-239, doi:10.1149/05806.0231ecst.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] Jun Ishimoto, U Oh, Zhao Guanghan, Tomoki Koike and Naoya Ochiai: Ultra-High Heat Flux Cooling Characteristics of Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Particles and Its Application to Semiconductor Wafer Cleaning Technology, *Cryogenic Engineering Conference and the International Cryogenic Materials Conference (CEC-ICMC)*, Alaska, (2013).

- *[3] Jun Ishimoto, Guanghao Wu, and Kazuo Matsuura: Numerical Study of High-Speed Condensable Vapor Flow with LDI Erosion, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 132-133.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J13038
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2013.4 ~2014.3
継続年数	2年目

プラズマ流による気泡生成機構に関する研究

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

佐藤 岳彦*†, 中谷 達行**††

宮原 高志***, 大谷 清伸*

*東北大学流体科学研究所, **トーヨーエイトック株式会社

***静岡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。

2. 研究成果の内容

平成25年度は、平成24年度で可視化した微細気泡について、SEMとEDAXを利用して、水中プラズマで生成した気泡以外にも生成物があるかどうかについて検証した。図1に水中

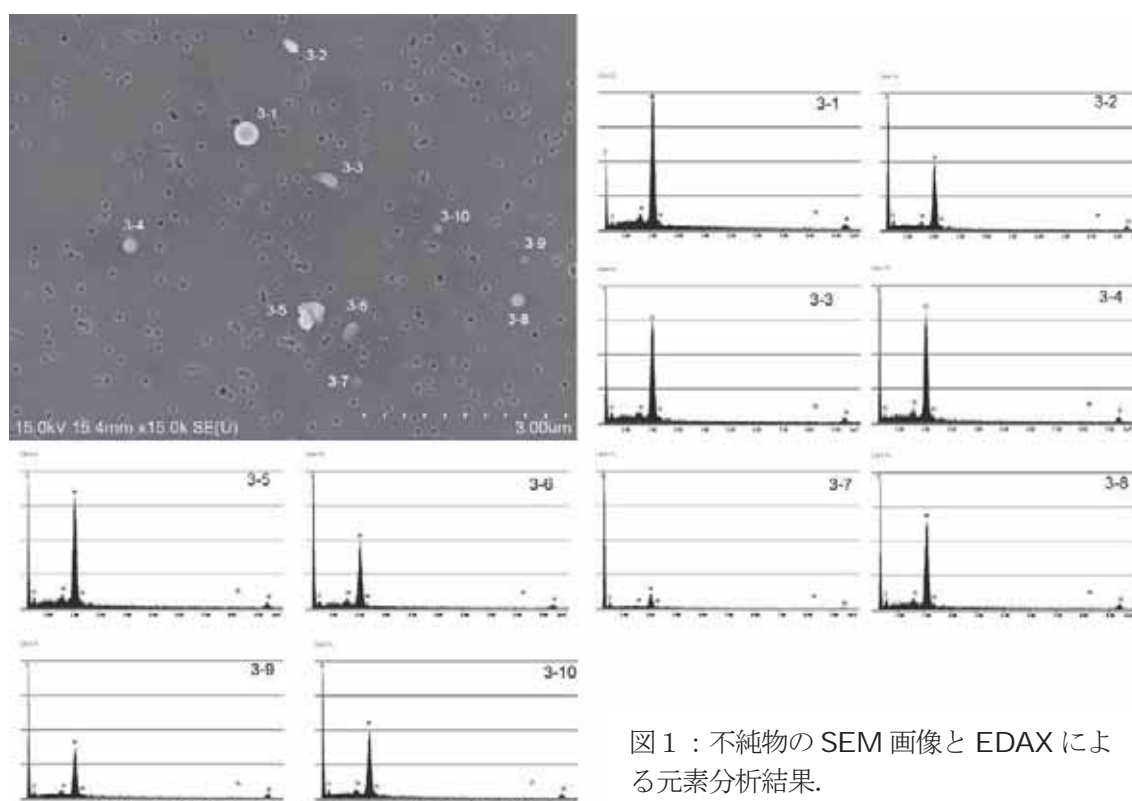


図1：不純物のSEM画像とEDAXによる元素分析結果。

プラズマにより生成された微粒子の SEM 画像と元素分析結果を示す。これより、微細な白金の球状微粒子(図中の 3-1, 3-4, 3-8, 3-10)や非球状微粒子(図中の 3-2, 3-3, 3-5, 3-6, 3-7, 3-9), 凝集体(図中の 3-5)が生成されていることが明らかになった。また、水中プラズマ流による水質変化についても以前得られた結果に新たに考察した。

3. 研究目標の達成状況

本年度は、気泡以外にも電極材などから固体の微粒子も生成されていることが明らかになり、水中に分散している微粒子の固気判別法を開発する必要となった。これは本年度予定していた高負圧負荷による気泡観察法と軌を一にするものであり、結果には示していないが既にスパークならびにレーザーを利用した方法で計測法の開発を進めていることから、目標は概ね達成していると考えている。

4. まとめと今後の課題

本年度は、水中で生成されている気泡の粒径分布に続き、気泡の中に固体の微粒子が存在することを明らかにした。さらに、水中衝撃波による負圧負荷法の開発に着手し、気泡観察法の要素技術を得た。今後は、この手法を水中微粒子の固気判別法の開発に展開する。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

該当なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Takehiko Sato, Takashi Miyahara and Tatsuyuki Nakatani: Analysis of Plasma-generated Bubbles by Electron Microscope, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 148-149.

3) その他(特許, 受賞, マスコミ発表等)

該当なし

課題番号	J13039
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	3年目

水中におけるプラズマ熱流動機構
Mechanism of Plasma Thermo-Fluid Dynamics in Water

佐藤 岳彦*†, 金澤 誠司**††
大谷 清伸*, 小宮 敦樹*, 藤田 英理***
*東北大学流体科学研究所, **大分大学工学部
***東北大学大学院工学研究科
†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

水中プラズマ流における放電現象は、相変化や熱流動場、電場、化学反応場を含む現象が重畳する複雑流動場を形成している。特に、放電形態の一つであるストリーマが、水中をどのように進展するかについては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

水中2次ストリーマの速度は20 km/s程度と、1次ストリーマの進展速度の2 km/s程度と比較すると一桁程度速いのが特徴である。また、フィラメント状に進展していることも知ら

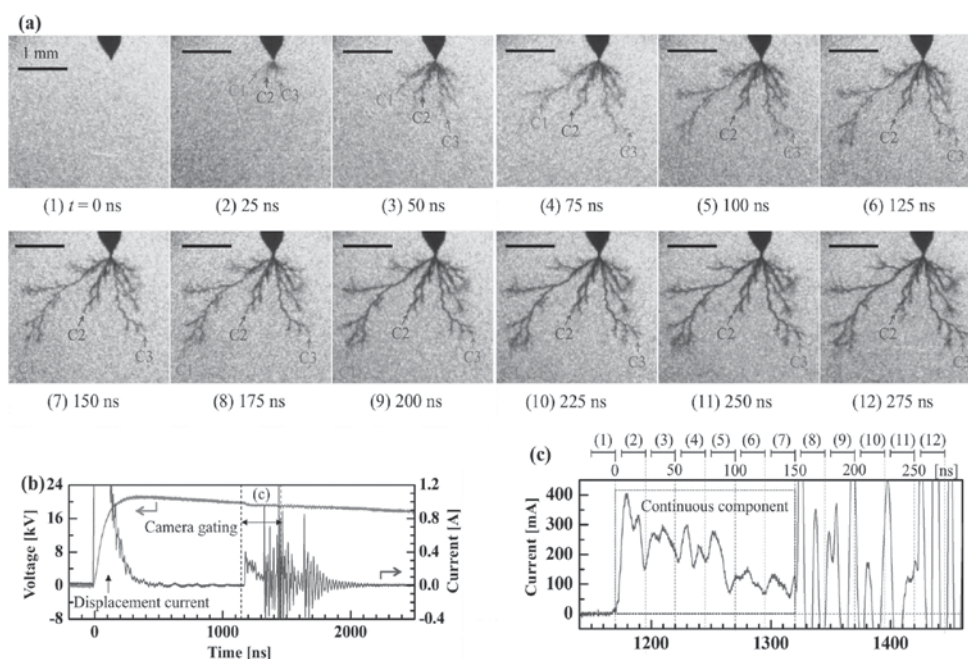


図1: (a)2次ストリーマ進展の様子, (b)放電電流波形, (c)放電電流の連続成分波形.

れており、速度と形状が1次ストリーマと2次ストリーマを分類する条件であった。しかし、本プロジェクトにおいて昨年度1次ストリーマもフィラメント状の形態になることを世界で初めて明らかにした。これにより、形状観察だけでは1次ストリーマと2次ストリーマの区別は困難であることが示された。平成25年度は、図1 (a) 水中2次ストリーマ進展の様子、(b) 放電電流波形、(c) 放電電流の連続成分波形に示すように、2次ストリーマの高速進展時に連続成分を有する電流波形が現れることを世界で初めて明らかにした。これにより、放電電流波形を観察することで水中に生成されるストリーマが1次なのか2次なのかを簡便に特定することに成功すると共に、放電電流に連続成分が発現することが2次ストリーマの定義の一つであることを提案した。本研究内容は、Europhysics Lettersに掲載された。

3. 研究目標の達成状況

本年度は、この特異的な電流の再現性とストリーマ形状や速度との相関を詳細に検討し、水中2次ストリーマの新たな定義を提案することを目標とし、連続成分を有する放電電流の発現が2次ストリーマの高速進展と一致することを世界で初めて発見した。

4. まとめと今後の課題

本年度は、2次ストリーマの高速進展は連続成分を有する放電電流を伴うことを明らかにした。今後は、ストリーマの初生機構について明らかにすることを目的とする。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, Toshiro Kaneko and Takehiko Sato: Fast propagation of an underwater secondary streamer by the appearance of a continuous component in the discharge current, *Europhysics Letters*, Vol. 105, No. 1, (2014), 15003 (5 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya and Takehiko Sato: Role of pulsed repetitive current for positive primary streamers in water, *21st International Symposium on Plasma Chemistry*, Cairns, Australia, (2013), No. 422.

*[3] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya and Takehiko Sato: Visualized Propagation Process of Positive Primary Streamers in Water, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 110-111.

[4] 藤田英理, 佐藤岳彦, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹: 水中放電におけるストリーマチャンネル生成過程の可視化, 第41回可視化情報シンポジウム, (2013), pp. 223-224.

他 合計6件 (内1件招待講演)

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(受賞)

[1] Best Paper Award, Role of pulsed repetitive current for positive primary streamers in water, Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya and Takehiko Sato, 2013.8.9, International Plasma Chemistry Society.

[2] トレック・宍戸 奨励賞, 水中1次ストリーマのナノ秒時間分解観測, 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 金子俊郎, 佐藤岳彦, 2013.9.10, 静電気学会.

[3] エクセレント・プレゼンテーション・アワード, 水中1次ストリーマのナノ秒時間分解観測, 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 金子俊郎, 佐藤岳彦, 2013.9.11, 静電気学会.

課題番号	J13040
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2013.4 ~2014.3
継続年数	1年目

予混合火炎の固有不安定性に及ぼす中間生成物の影響
The Effects of Intermediate Product on the Intrinsic Instability of Premixed Flames

門脇 敏^{**†}, 小林 秀昭^{**††}

*長岡技術科学大学技術経営研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

低環境負荷の観点から、近年、バイオ燃料が注目されている。バイオ燃料を実用燃焼器へ適用するには、燃焼の不安定性に関する知識が不可欠である。中間生成物は不安定性に多大な影響を及ぼしており、この影響を評価することは必要かつ重要である。本研究では、予混合火炎の不安定性に及ぼす中間生成物の影響を調べ、そのメカニズムを解明することを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究では、火炎面に微小擾乱を加え、その増幅率と波数の関係（分散関係）を明らかにし、特性波長（火炎セルサイズ）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中間生成物の影響を明らかにした。

本数値計算は、流体科学研究所のスーパーコンピューターを用いて実行した。本計算では、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、中間生成物のルイス数や反応速度の頻度因子を変化させて計算を遂行した。

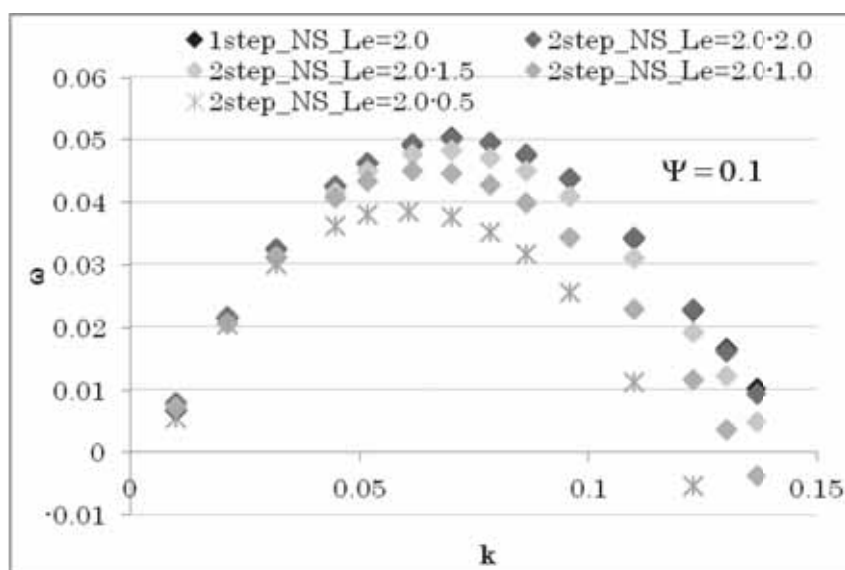


図 1 : 分散関係 ($Le_1 = 2.0$, $Le_2 = 2.0, 1.5, 1.0, 0.5$)

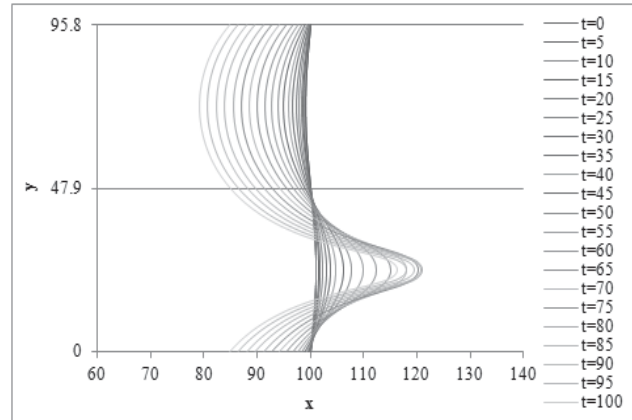


図 2 : セル状火炎の形成 ($Le_1 = 2.0, Le_2 = 1.0, \Psi = 0.1$)

図 1 は、分散関係（増幅率 ω と波数 k の関係）を示したものであり、未燃ガスのルイス数は $Le_1 = 2.0$ 、中間生成物のルイス数は $Le_2 = 2.0, 1.5, 1.0, 0.5$ である。ここで、 Ψ は反応速度の頻度因子の比であり、その値が小さくなると中間生成物の発生量は大きくなる。中間生成物のルイス数が小さくなると、増幅率は小さくなる。これは、中間生成物の拡散が大きくなることに依るものである。また、 Ψ が小さくなると増幅率は小さくなる。つまり、中間生成物の存在は不安定性を抑制する。

図 2 は、セル状火炎の火炎面の時間履歴を示したものである。固有不安定性によりセル状の火炎面が形成される。また、火炎面がセル状になることに依り、燃焼速度が増大するので、火炎は上流側（左側）へ移動する。

3. 研究目標の達成状況

予混合火炎の数値計算を遂行し、不安定挙動における中間生成物とルイス数の影響を精査した。中間生成物のルイス数が小さくなると増幅率が小さくなることを示した。また、中間生成物の発生量が大きくなると不安定性が抑制されることを示した。以上のことから、予混合火炎の不安定挙動における中間生成物に着目した本研究は、十分な成果を得ていると思われる。

4. まとめと今後の課題

予混合火炎の不安定挙動における中間生成物とルイス数の影響を精査することは、バイオ燃料の有効利用の観点から、主要な地位を占めるものである。今後、種々のパラメータを変化させて計算を遂行し、火炎の不安定機構を詳細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] T. Yanagioka, W. Yamazaki, H. Kobayashi and S. Kadowaki: The Effects of the Unburned-Gas Temperature on the Hydrodynamic Instability of Three-Dimensional Premixed Flames, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 44-45.

[2] 内田, 宗吉, 工藤, 早川, 小林, 門脇: 高圧下におけるプロパノール異性体乱流予混合火炎の火炎構造及び不安定性に関する研究, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2013), pp. 432-433.

- 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）なし

課題番号	J13041
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4 ~2014.3
継続年数	1年目 (発展)

心電計と超音波を融合したマウス胎仔心機能評価
Cardiac Evaluation of Fetal Mice by ECG and Ultrasound

伊藤 拓哉*†, 船本 健一**††, 木村 芳孝*, Clarissa Velayo***,
遠藤 美雪*, 船本 聖絵*, 杉林 里佳*, 董 宇鵬*, 早瀬 敏幸**

*東北大学医学系研究科融合医工学分野, **東北大学流体科学研究所,

***東北大学東北メディカルメガバンク機構

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

S/N が非常に小さいため、胎児心電位をノイズから抽出するには R 波を検出することが必要である。しかし、胎児は特定の胎齢（妊娠 30 週前後）で一時的に R 波の波高が減少するとされている。これが胎児心電位の計測を難しくしている原因の一つである。胎仔の一時的な R 波高減少は哺乳動物に共通した現象といわれているが実態は不明である。本研究は全ての胎齢で安定した胎児心電位の計測を可能とする事を目的に R 波高を高める処置（母獣薬剤投与や母獣の血流促進）の有効性や安全性についてマウスを用いて確認する。

2. 研究成果の内容

母獣麻酔下で胎齢 12.5 日目 (E12.5) から 18.5 日目の心機能を超音波画像診断装置にて計測、評価した。計測項目は左室壁の厚さ (LV), 拡張末期径 (LVDd), 収縮末期径 (LVDs) とした。LV は E12.5 から 15.5 まではほとんど変化しなかったが E17.5 では著しく肥厚した (図 1)。LVDd 及び LVDs は技術的問題から E15.5 および E17.5 に於ける計測に留まった (図 2)。

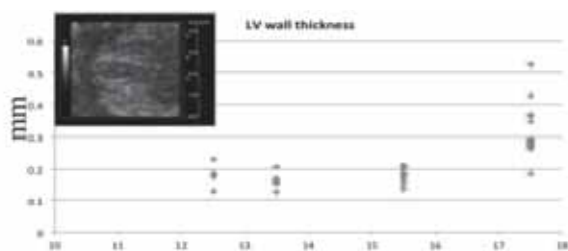


図 1 : 胎齢に伴う左室壁の厚みの変化
写真は E17.5 に於ける左室 B-mode イメージ

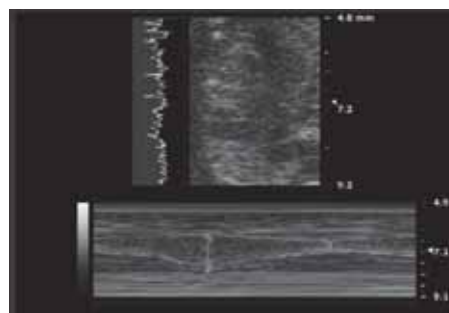


図 2 : LVDd 及び LVDs 計測例
E17.5 に於ける LVDd (#1)、LVDs (#2)

超音波画像診断装置での胎仔心機能計測を行った後、母獣を開腹、子宮を露出した。子宮筋を通して目視した胎仔に電極を接触させ、胎仔心電位の計測を行った (図 3)。直接誘導に

よる計測では R 波高は胎仔の成長に伴い直線的に増大した。

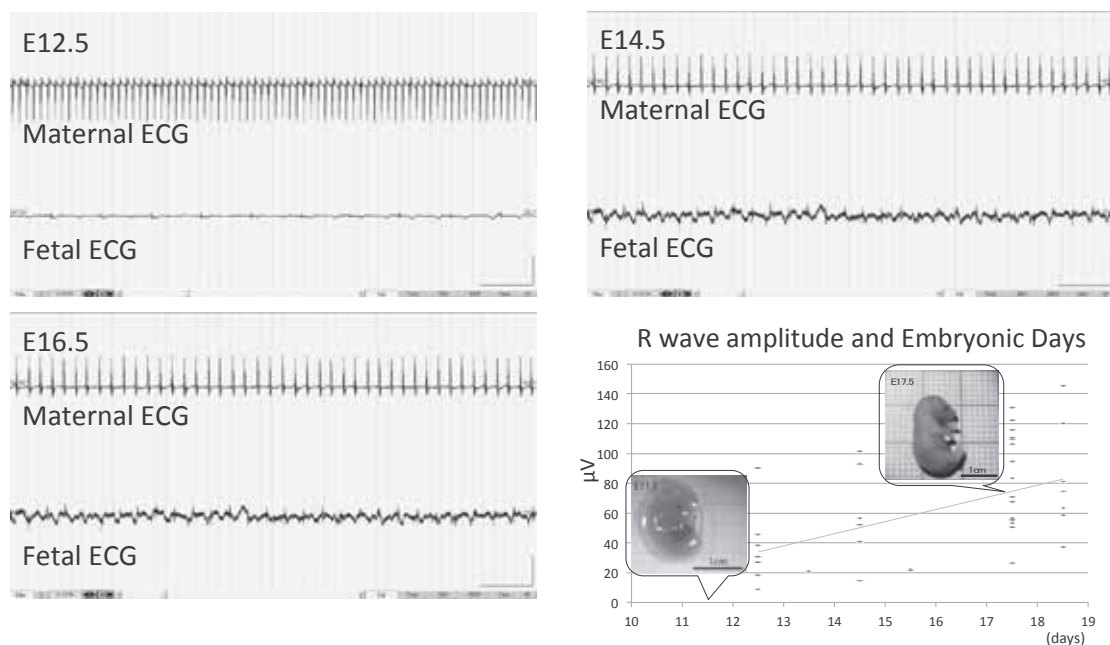


図 3：各胎齢に於ける母仔心電位波形計測例と R 波高の変化

3. 研究目標の達成状況

直接誘導による胎仔の心電位の計測に関する技術的課題はほぼ解決できた。一方、超音波画像診断装置による胎仔新機能評価では LVDd 及び LVDs に関して技術的課題が残った。

4. まとめと今後の課題

ヒトの妊娠 30 週前後で胎児心電位の計測が困難になる原因解明に向け、ヒトと同様な間接誘導技術の開発、超音波画像診断装置による胎仔新機能評価技術など、必要な改善点が明確になった。薬剤投与による胎仔 R 波高の修飾などと併せて次年度以降も研究を継続する。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Takuya Ito, Kenichi Funamoto, Rika Sugibayashi, Kiyoe Funamoto, Clarissa Velayo, Miyuki Endo, Yupeng Dong, Toshiyuki Hayase and Yoshitaka Kimura: Cardiac evaluation of fetal mice by ECG and ultrasound, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 60-61.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(競争的資金獲得) (独) 科学技術振興機構研究成果展開事業「研究成果最適展開支援プログラム」
 フィージビリティスタディ【FS】ステージ探索タイプ, 研究代表者: 董宇鵬・研究分担者:
 伊藤拓哉・木村芳孝・1,800 千円, 「早期胎仔でも計測可能なマウス用胎仔心電計の開発」
 2013.81~2014.3.31

課題番号	J13042
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	2年目

磁気刺激による生体アクチュエーションに関する研究
Biological Actuation with the Magnetic Stimulation

森 仁^{*†}, 高木 敏行^{**††}, 阿部 利彦^{*}, 八島 建樹^{*}, Shejuan Xie^{**}
^{*}株式会社 IFG, ^{**}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、適切に制御されたパルス磁気による生体神経刺激により、筋肉の動きをコントロールして、任意の運動を得ることである。

2. 研究成果の内容

昨年度までの研究で、任意の部位に適切な大きさの磁気刺激を与えることで、独立した任意の運動を誘発できることが明らかになった。また、磁気刺激パルスを連続して与えることで、そのパルス数にほぼ比例した強度の運動を得ることを確認した。そこで本年度は、(株)IFG 社内において、被験者一名に対して目的の部位にパルス磁気刺激を連続的に与え、負荷がある状態(1050gの銅ブロックを握った状態=10.3N)と負荷がない状態の2条件にて、その運動量を評価した。

実験に使用したコイルは、電磁鋼板を挿入したコイルで、開発した電源装置(充電電圧600V)とコイルの併用で図1に示す磁場をコイル中心軸上に発生させることができる。コイルと刺激部位の間隙(以下 Gap と称す)を調節することで刺激部位に作用する磁束密度(B)を変更し、さらにパルス周波数を変更し、その刺激によって誘起される手首先(第二指PIP関節位置)の変位量(上昇量)を測定した。コイルは、手首の屈曲運動が誘起される位置に配置し、5mmマスの方眼をバックにデジタルカメラにて手指の動画を撮影し、撮影された動画より運動の変位量を目測した(図2)。図3に測定した変位量を示す。負荷がない状態では、30Hz未満の周波数域では周波数の増加とともに変位量が増加するが、30Hz以上の周波数域では、変位量が飽和することがわかった。また、負荷がある状態では、負荷がない状態と比較し、いずれの試験条件でも変位量が大きく減少した。負荷がある状態では、最もコイルが離れた状態(Gap=8mm, B=0.48T)では、変位量は測定できない程ごく僅かであり、

刺激部位に最もコイルが密着している状態(Gap=0mm, B=0.94T)では、負荷がない状態の50%程度の変位量となった。

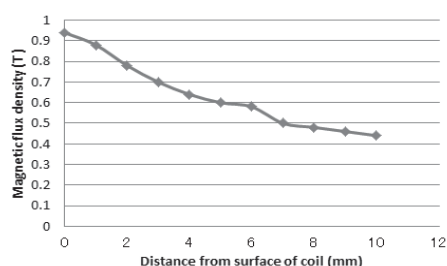


図1：使用したコイルの磁束密度分布



図2：実験の様子

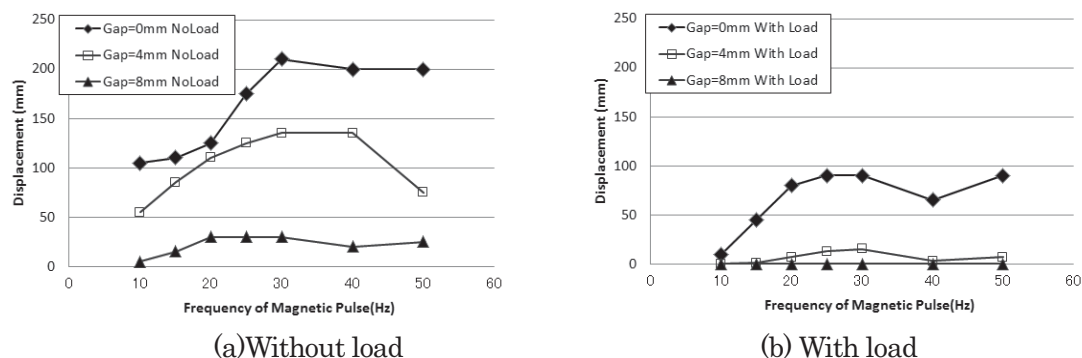


図3：磁気刺激により誘発された手首先の変位量

3. 研究目標の達成状況

今回の研究により、①負荷がない状態では 30Hz 未満の周波数域では、周波数の増加とともに変位量が大きくなった。30Hz 以上の周波数域では、変位量が飽和してしまい、それ以上周波数を上げて変位量の増大は得られなかった。②負荷がある状態では、刺激部位に作用する磁束密度が小さい場合には、運動として認識できる変位は得ることができなかったが、刺激部位に作用する磁束密度が十分に大きければ、負荷がない状態と比較して 1/2 程度に変位量が減るものの、運動を誘発することができた。このことは、磁気刺激により四肢の任意の運動を引き出し、リハビリテーション中の片麻痺患者に対して、より具体的な身体イメージを伴った運動を与えることが十分可能であることを示すものである。

4. まとめと今後の課題

磁気刺激により、負荷がある状態でも運動を誘発できることがわかった。さらに、その運動の変位量は 30Hz までは周波数の増大とともに増加することがわかった。つまり、大きな変位量の運動を得るためには、高い周波数での磁気刺激が必要となる。その際、コイルに短時間 ($\approx 200 \mu s$) ではあるが大電流が流れるため、パルス数に比例してコイルが発熱する。さらに、挿入した電磁鋼板も発熱することから、この電磁鋼板の構造を発熱抑制型に設計し、計測する。なお、本研究に関する試験はヘルシンキ宣言の精神を遵守し行った。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議、解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] H. Mori, T. Takagi, S. Izumi, H. Kanetaka, K. Mori K. Yashima, R. Sasaki and T. Abe: Biological Actuation with the Magnetic Stimulation, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 76-77.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許)

[1] 連続磁気パルス用コイル, 高木敏行, 出江紳一, 金高弘恭, 永富良一, 阿部利彦, 森仁, 八島建樹, 森和美, 2013.8.27, 出願.

[2] 医療用連発磁気パルス発生装置, 阿部利彦, 森仁, 八島建樹, 森和美, 高木敏行, 出江紳一, 金高弘恭, 永富良一, 2013.12.3, 出願.

課題番号	J13043
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	3年目

中性粒子ビームによるシリコンフォトニクス素子の低損傷加工
Low Damage Fabrication of Si Photonic Devices by Neutral Beam Technology

Jingnan Cai*, 岡田 健**, 久保田 智広**, 寒川 誠二**††, 和田 一実*†
*東京大学工学系研究科マテリアル工学専攻, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

Silicon-on-insulator (SOI) is the promising platform that enable highly dense device integration on a chip. One of the critical factors for the optical devices is the precise control of the resonant wavelength. However, wavelength offset from the original design is inevitable, since the errors during the fabrication process are always incurred. Neutral beam technology is a low damage treatment for high performance devices. Here, we report an investigation of silicon waveguide trimming based on microring resonator structure by the approach of Neutral Beam Technology, aiming at the effective trimming of silicon waveguide.

2. 研究成果の内容

In the experiment, we employed the SOI wafer with 250 nm top silicon for the fabrication of silicon microring waveguides. The width of rib waveguides were designed as 500 nm and 600 nm, and the slab thickness was 100 nm, as shown in Fig.1 (a). Before NBO treatment, the sample surface was cleaned by NF₃ gas to remove the surface native oxidation layer. During the NBO process, a vertical oxygen neutral beam with the energy of 1eV was generated and the process of NBO was operated at room temperature. The thickness of around 5 nm NBO layer is achievable using this NBO method and the thickness can be adjusted by the NBO treatment time. To check the trimming effect, the transmission spectra of the silicon microring resonators were measured before and after NBO treatment.

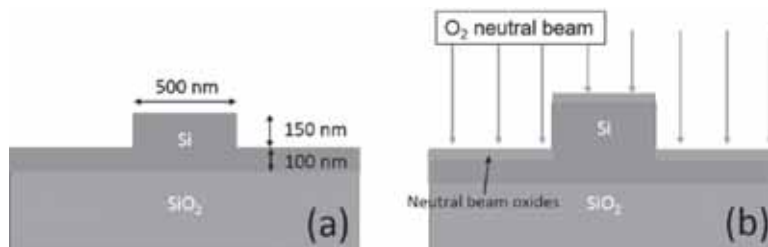


Fig. 1 Schematic of the silicon rib waveguide and the NBO processing.

Generally, for an optical resonator, the resonance shift $\Delta\lambda$ due to the change of refractive index Δn_{eff} can be expressed by,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}}. \quad (1)$$

Based on Equation (1), the resonant peak should shift with the change of NBO thickness

since the effective refractive index of the waveguide varies.

Fig. 2 is the result of NBO trimming effect on the silicon waveguides based on the transmission measurement of the microring resonators. Obviously, with the increase of NBO layer thickness, the shift of resonance peak is enhanced, which matches the indication by Equation (1). According to the data plotted in Fig. 2, one nanometer change of NBO layer leads to about 1 nm shift of resonance peak. This results indicate that by changing the NBO thickness, i.e. changing the NBO treatment time, the control of cavity resonance peak shift can be achievable. Therefore, the rough trimming of silicon waveguide is possible by using the NBO technology. However, it should be noted here that due to the difficulty of controlling the formation of very thin NBO layer, e.g. 0.5 nm NBO, the deviation of NBO trimming on the waveguide increased.

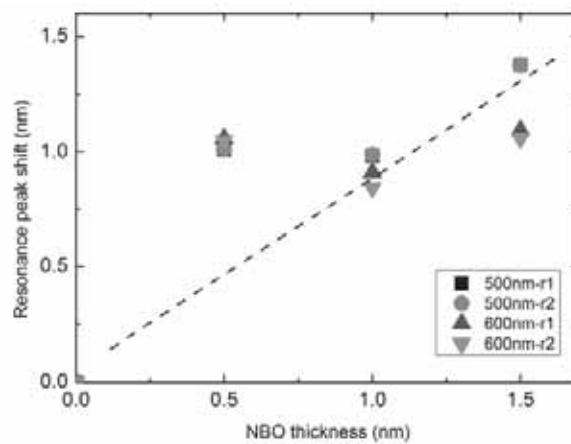


Fig. 2 the correlation between the resonance peak shifts of the silicon microring resonators and the NBO layer thickness

3. 研究目標の達成状況

The NBO technology was successfully used in this work for the investigation silicon waveguide trimming. The results show that the resonance peak of silicon microring resonator can be adjusted by using the NBO treatment.

4. まとめと今後の課題

It has been demonstrated that the neutral beam technology can be introduced to the rough trimming of silicon waveguides. Further improvement of NBO treatment on the silicon waveguide trimming should be implemented when a thin NBO layer is needed for the more precise control of the trimming on waveguides.

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] Jingnan Cai, Tomohiro Kubota, Seiji Samukawa and Kazumi Wada: Trimming of Silicon Optical Waveguide by Neutral Beam Oxidation, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 112-113.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13044
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	1年目

爆風と水との干渉による威力軽減効果に関する研究
Mitigation Effect of Blast Wave by the Interaction with Water

松尾 亜紀子*†, 大林 茂**††

田中 智大***, 大谷 清伸**

*慶應義塾大学理工学部, **東北大学流体科学研究所

***慶應義塾大学大学院理工学研究科

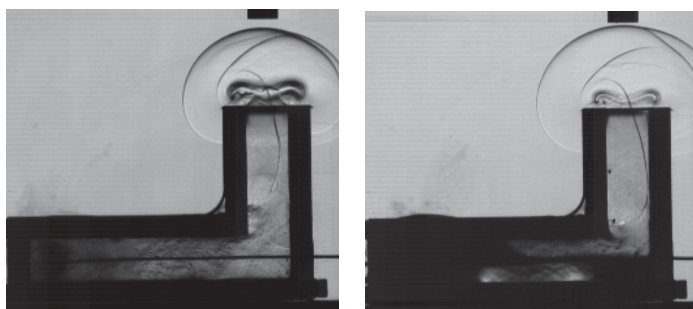
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

爆薬など的高エネルギー物質や水素に代表されるような可燃性気体の保管を行う際には、その安全性に注意を払う必要がある。また、事故が生じた場合の周囲環境への被害については、保管そのものの可否に関係することから重要な情報となる。近年の住環境の拡大から保管施設の設置条件は厳しく、事故による被害そのものの軽減が求められている。本研究では、爆薬で生じた爆風威力の評価について爆発実験を通しておこない、爆源近傍において水と爆風が干渉することによる威力軽減効果とそのメカニズムを解明することを目的とする。

2. 研究成果の内容

爆源近傍における水と爆風の干渉による威力軽減効果を検証するため、上部開口部を持つL字型矩形閉管路モデル内、外を伝播する微小爆起爆衝撃波挙動のシュリーレン光学可視化計測、および管路から放出される衝撃波圧力計測実験を行った。閉管路内、水の有無によって光学可視化計測より、密度変化の度合いを示す衝撃波波形の明暗の違いにより、放出衝撃波は低減されており、圧力測定より衝撃波圧力ピーク過剰圧値が低下することから、両測定結果より低減効果があることがわかった。低減効果の要因としては、水中へ伝播する衝撃波発生エネルギー分による低減が大きいと考えられるが、衝撃波反射、収束する閉空間の形状の変化も関係すると考えられる。



(a) $t=340\mu\text{s}$ 空気のみ (b) $t=370\mu\text{s}$ 水あり

図1：矩形閉管路を伝播する衝撃波挙動画像

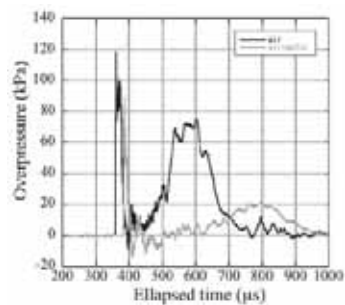


図2：矩形閉管路より発生する衝撃波圧力の時間履歴

3. 研究目標の達成状況

爆風と水との環境による爆風威力低減効果に関して、時間発展する衝撃波と水との干渉の様子を可視化写真で示すことができたことは、これまでに無い新しい成果であると考えている。また、水の有無に応じて衝撃波圧力の時間履歴に明確な違いを示すことができたことは大きい。今回の実験で得られた可視化写真と数値解析による時間発展データの比較を行う事で、数値解析に用いている物理モデルの健全性や効果についても検証することが可能であり、本研究において併せて開発を行っている数値解析プログラムの精度向上のためにも、貴重なデータを取ることができたものと考えている。実験的観察と数値解析による可視化画像により、爆風威力低減効果のメカニズムを解明する準備は整ったと考えている。今後は、実験データを比較対象とする数値解析を行うことで、詳細なメカニズムの解明に取り組む予定である。

4. まとめと今後の課題

今年度の共同研究では、東北大学で水による爆風威力低減効果に関する実験を行い、慶應義塾大学においては数値解析コードを開発することによって、実験と解析の双方から物理現象の解明を目指す取り組みを行った。数値解析の比較検証に用いることが可能な、閉管路内での衝撃波の伝播挙動が可視化され、その詳細な機構が明らかになったことはメカニズムの解明に大きく一歩を踏み出したものとする。今後は、解析コードが含むべき物理モデルの検証を行うために、実験結果との詳細な比較による検討を進め、メカニズムの解明を進めたい。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Tomohiro Tanaka, Akiko Matsuo, Shigeru Obayashi, Kiyonobu Ohtani: Blast Pressure Mitigation by Water around a Subsurface Magazine, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 48-49.

*[2] 大谷清伸, 小川俊広, 大林茂, 田中智大, 松尾亜紀子: 閉空間における衝撃波の収束および減衰現象, 火薬学会 2014 年度春季研究発表会, 横浜, (2014).

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	J13045
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

空間的せん断応力勾配環境下における血管内皮細胞の力学応答
 Mechanical Response of Vascular Endothelial Cells
 Under Fluid Shear Stress with Its Spatial Gradient

吉野 大輔*†, 坂元 尚哉**††

*東北大学流体科学研究所, **川崎医療福祉大学医療技術学部

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

超高齢社会に推移する先進諸国では、脳動脈瘤や腹部大動脈瘤などの血管系疾患の発症例が多く、深刻な問題となっている。近年、動脈瘤に対する研究が数多く行われているが、動脈瘤の発生・発達に関する詳細な機構は未だ解明されていない。そこで本研究では、動脈瘤好発部位の高せん断応力・空間的せん断応力勾配の血流環境を模擬し、この環境における血管内皮細胞の力学応答の検証を行い、動脈瘤の発生機構を力学的観点から明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究では、高せん断応力および空間的せん断応力勾配が血管内皮細胞の形態に及ぼす影響を明らかにするために、一様な空間的せん断応力環境を再現可能なフローチャンバーを用いて頸動脈内皮細胞に対する流れ負荷培養実験（図1）を行った。培養実験後に細胞を4%パラホルムアルデヒド・りん酸緩衝液で架橋固定し、細胞核、細胞骨格、細胞間接着タンパク質の蛍光染色を行った。図2にせん断応力と空間的せん断応力環境下で24時間培養した血管内皮細胞の蛍光染色画像を示す。勾配のない流れ環境では、過去の研究と同様に内皮細胞が流れ方向に配向、伸長した(図2中段)。一方、空間的せん断勾配のある環境下では、せん断応力値30 Paまでは内皮細胞が流れ方向に配向、伸長することなく静置培養に近い形態を示し、40 Pa以上の高いせん断応力環境になると内皮細胞が配向、伸長することがわかった(図2下段)。

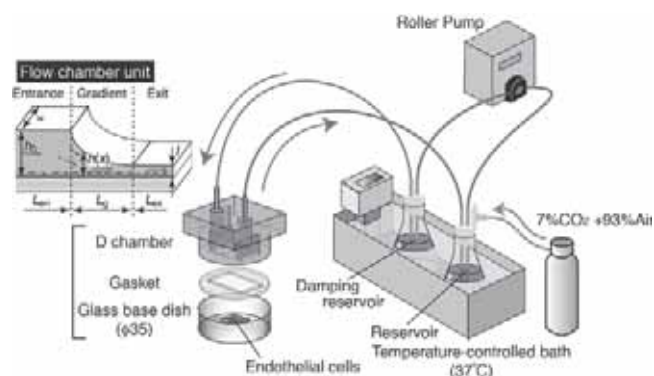


図1: : 血管内皮細胞の流れ負荷培養実験系と空間的せん断応力勾配再現用フローチャンバー

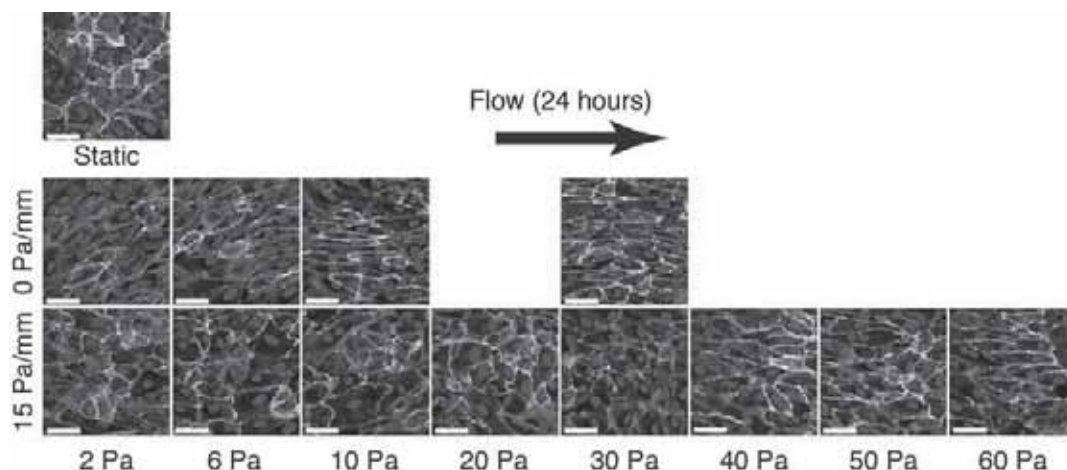


図2：24時間流れ負荷培養後の頸動脈内皮細胞の蛍光染色画像：細胞核（青），細胞骨格（赤），細胞間接着タンパク質 PECAM-1（緑），スケールバー=50 μm

3. 研究目標の達成状況

初年度の平成 25 年度は，一様な空間的せん断応力勾配環境における内皮細胞の形態的応答を解析し，せん断応力と勾配の組合せ条件により，流れ方向に細胞が配向および伸長する，しないといった応答の違いを示すことを明らかにし，これまでに知られていないせん断応力とその空間的勾配の組合せが細胞力学応答へ影響を及ぼすことを初めて明らかにした．内皮細胞の形態的応答を現象論的に明らかにすることができたが，詳しい応答機構は未解明である．今後はタンパク質や遺伝子発現の解析を行うことで，細胞の機能的応答の観点から詳細を明らかにしていく予定である．

4. まとめと今後の課題

本研究では，一様な空間的せん断応力勾配環境を再現可能なフローチャンバーを用いた血管内皮細胞の流れ負荷培養実験を行い，せん断応力と勾配の組合せ条件が，内皮細胞の流れ方向への配向および伸長に与える影響を明らかにした．今後は，得られた形態的応答の結果を基に，せん断応力勾配に対する細胞内タンパク質の活性化を検証し，動脈瘤発症に関わる細胞内シグナル伝達機構を解明する．

5. 研究成果（*は別刷あり）

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）
なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Daisuke Yoshino, Naoya Sakamoto and Masaaki Sato: Endothelial cell orientation under uniform spatial gradient in fluid shear stress, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 68-69.

- 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）
なし

課題番号	J13046
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	2年目

回転円すいの外表面を上昇する液膜流の生成メカニズムと微粒化特性
Generation Mechanism of Rising Film Flow along the Rotating Conical Outer Surface and the Subsequent Atomization Characteristics

足立 高弘*†, 松田 圭祐*

岡島 淳之介**††, 秋永 剛***

*秋田大学, **東北大学流体科学研究所, ***アストン大学

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

円すい体の頂角を下にして水に浸し回転させることで、円すい体の外表面を液が上昇し、液膜を形成する現象を本申請者等が見出した。この現象を利用してコンパクトで消費動力が少なく手軽に噴霧特性(粒径の大きさ、粒径分布、流量など)を調節できる新しい微粒化機構の開発に取り組む。円すい外表面の液膜には、遠心力が流体を表面から引き離し表面から飛散させる向きに作用するように考えられる。このため、遠心力は液膜を円すいの外表面に沿って上昇させ剥離せずに液膜流を形成させる要因とは考え難いなど、上昇液膜流生成のメカニズムについての詳細は明らかではない。本研究では数値解析と実験により回転円すい体の外表面を上昇する液膜流の生成メカニズムと微粒化過程および微粒化した後の液滴の噴霧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

今年度の本研究では、液供給量と水面位置との関係を調べることと本現象に必要な消費動力を計測することで、液膜流の微粒化特性を明らかにする。液膜流を維持するには外部から流量を供給する必要があるが、円すいの回転数と供給流量の程度により水面水位が変化する。液はその水面を基準として円すいの底部に設置された円板まで揚水されるので、必要となる消費動力を明かにするためには、微粒化に必要な動力の他に揚水の動力についても考察する必要が生じる。

今回実験に使用した円すいは、先端角 $\theta=30^\circ$ 、円すい下部の最大半径 $r=40$ [mm]である。材質はアクリロニトリルブタジエンスチレン (ABS) 樹脂であり、表面粗さ $Ra=1.6$ [μm]であり、円すいの表面に特別な処置は与えられていない。水面位置は図1(a)に示される超音波センサーを用いて非接触に計測する。一方、動力に関しては、図1(b)に示されるトルクセンサーを用いて計測を行う。円すいの回転速度は1000 から4000[rpm]で、供給流量は $Q=0.5$ から 2.0 [l/min]で測定を行った。図2は回転速度と水面水位およびトルクとの関係を示したものである。図より、回転速度が上昇するに従って水面位置 h 減少する一方で、トルクの値が増加することがわかる。回転速度が増大し、水面位置が減少すると揚水距離 H が増大することになるので、揚水に必要な動力が余分に必要となるためトルク T が1増大する結果となったと考えられる。

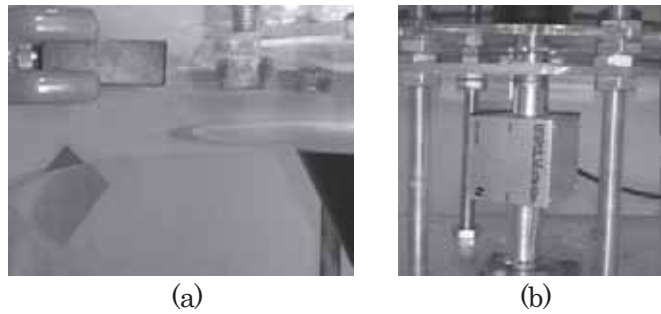


図1：超音波センサーによる水面位置計測とトルクメータによるトルク測定

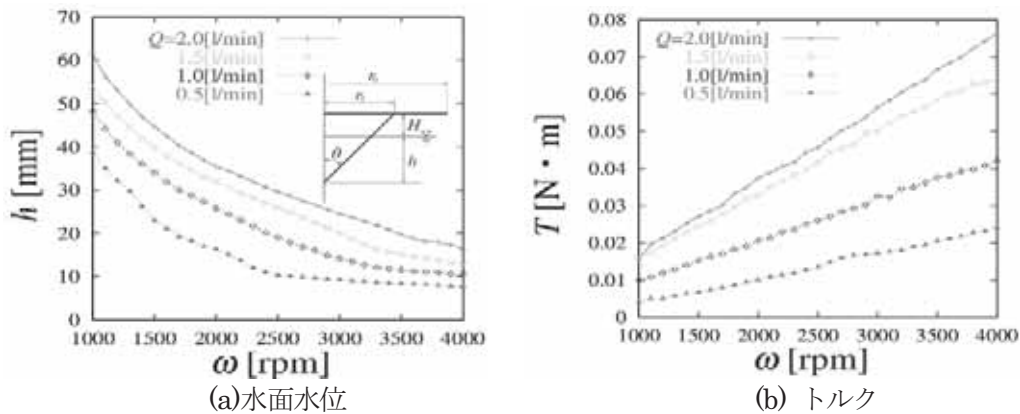


図2：水面水位と円すいの回転に必要なトルクの測定結果

3. 研究目標の達成状況

円すいの回転による水面水位の変化と必要なトルクを調べ、微粒化および液膜流の揚水に必要な消費動力に関する考察を行った。実用的な整理式を導出することを試みたが、結果のデータ数が足りず、回転速度と水面水位および消費動力の関係を得ることができず、上昇液膜流のメカニズムを明らかにするまでには至らなかった。

4. まとめと今後の課題

本研究では、円すいの回転による水面水位とトルクを超音波センサーおよびトルクメータを用いて実験的に調べた。水面水位は回転速度が上昇するに伴い減少することが分かった。一方、トルクの値は回転速度の上昇に伴い増加することがわかった。今後は、円すいの回転による振動を抑え、超音波センサーによる測定精度を向上させることと、様々な実験条件(回転数、円すいの頂角、供給流量など)の下で測定を行うことが課題である。また、それらの間の相関を簡単で実用的な整理式の形で明らかにすることが課題である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Matsuda, K., Adachi, Y., Okajima, J., and Akinaga, T.: Generation Mechanism of Rising Film Flow along the Rotating Conical Outer Surface and the Subsequent Atomization Characteristics, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 158-159.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J13047
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4 ~2014.3
継続年数	3年目

Blast Wave / 衝撃波による脳損傷機序解明
Mechanism of Blast-Induced Traumatic Brain Injury

中川 敦寛*†, 大谷 清伸**††, 早瀬 敏幸**

荒船 龍彦***, 鷺尾 利克****, 合田 圭介*****

*東北大学大学院医学系研究科神経外科学分野, **東北大学流体科学研究所

東京大学大学院工学系研究科, *産業技術総合研究所

*****Photonics Laboratory, Department of Electrical Engineering University of California, Los Angeles

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

爆風による外傷性脳損傷 (blast-induced traumatic brain injury: bTBI) のうち, 衝撃波を主体とする圧波による脳損傷は, 通常の頭部外傷とは全く異なる. われわれは爆風を受けた反対側に脳損傷が発生する機構解明のため, 音響インピーダンスの各媒体差によって反射波が膨張波となる現象に注目し, 脳の衝撃波照射反対側における脳損傷の機構解明を行ってきた. 本年度は, 模擬物質を用いた頭部モデルと微小爆薬起爆衝撃波干渉の室内実験を行い, 衝撃波が頭部モデル内を伝播する挙動を影写真法で可視化し, 高速度ビデオカメラで撮影した光学可視化計測, およびモデル内部の圧力測定を行ったので報告する.

2. 研究成果の内容

本研究では頭部モデルとして, 単純な二次元モデルを用いて, 頭部と衝撃波の干渉模擬実験を行った. 頭蓋骨を模擬した円筒 (アクリル製, 外径 24mm, 厚さ 1.5mm, 長さ 49mm) 内に, 脳部を模擬したゼラチン (20wt%, 和光純薬 (株)) を満たして円柱形状とした. 衝撃波は, 微小爆薬 (アジ化銀ペレット, AgN₃, 質量 10mg) を起爆し発生する球状衝撃波を用いた. アジ化銀ペレットは, 光ファイバ先端に接着し, 頭部モデルより $h=1$ mm 離れた位置に設置し, ファイバ他端よりパルス Nd: YAG レーザ光を照射, 起爆させ発生させた. 光学可視化計測はフラッシュランプを光源とした影写真光学系を用いて衝撃波と頭部モデル干渉現象を可視化し, 高速度ビデオカメラで記録した. また, 本研究では, PVDF ニードルハイドロフォン (以下, ハイドロフォン) を用いて頭部モデル内の圧力変動を測定した.

微小爆薬起爆衝撃波の頭部モデル干渉挙動の連続影写真からは, ゼラチン内へ二重になった衝撃波等の波が伝播し, 微小爆薬アジ化銀ペレット起爆によって発生した衝撃波がまずアクリル部へ伝わり, アクリル-ゼラチン界面で一部はゼラチンへ透過, 一部は反射し, 反射した波はモデル外側のアクリル-空気界面で反射し, 膨張波となり, ゼラチン中へ透過して二重の波になり, その後, 二重の波の背後もアクリル中を往復する波によって複数の波を伴っていた. さらに対向側アクリル壁まで到達, 一部は透過, 反射をはじめ, アクリル内を透過した衝撃波がアクリル-空気界面で反射した膨張波によってゼラチン内対向側アクリル壁近傍で負圧となり細かな気泡が発生している様子, 反射した波がハイドロフォン先端付近に収束

し、リバウンドによる球状の波が発生している点、収束点付近ではマイクロジェットのような尖った形状の気泡が見られることが確認された。

微小爆薬起爆衝撃波干渉時の頭部モデル内圧力の時間履歴は、可視化結果と矛盾しないものであった。

3. 研究目標の達成状況

本研究では、模擬物質を用いた頭部モデルと微小爆薬起爆衝撃波干渉の室内実験を行い、衝撃波が頭部モデル内を伝播する挙動を影写真法で可視化し、高速度ビデオカメラで撮影した光学可視化計測、およびモデル内部の圧力測定結果について報告した。今回行った解析モデルを用いた検討結果は、動物実験結果に relevant なものであり、本研究の課題は概ね達成したものと考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究で得られた知見をさらに掘り下げ、今後は損傷防止に対する知見の開発を進めていく予定である。

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. Ogawa, A. Nakagawa, T. Washio, T. Arafune, and T. Tominaga: Tissue dissection before direct manipulation to the pathology with pulsed laser-induced liquid jet system in skull base surgery - Preservation of fine vessels and maintained optic nerve function, *Acta. Neurochir*, 155(10), (2013), pp. 1879-86.

[2] 中川敦寛, 大谷清伸, 合田圭介, Armonda R, 富永悌二: 爆風による外傷性脳損傷 (blast-induced traumatic brain injury), *Annual Review 神経 2014*, 鈴木則宏・祖父江元・荒木信夫・宇川義一・川原信隆(編), 第Ⅲ章 4「外傷」, 中外医薬社, (2014), pp. 192-198.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[3] A. Nakagawa, K. Ohtani, K. Goda, T. Arafune, T. Washio, T. Hayase, and T. Tominaga: Mechanism of blast-induced traumatic brain injury., *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai*, (2013), pp. 72-73.

[4] 大谷清伸, 中川敦寛, 沼田大樹, 合田圭介, 荒船龍彦, 鷺尾利克: 爆風による外傷性脳損傷機序解明のための模擬物質中の衝撃波伝播挙動. 平成 25 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, (2014), pp. 152-153.

[5] 大谷清伸, 中川敦寛, 沼田大樹, 合田圭介, 荒船龍彦, 鷺尾利克, 古川宗, Mark Richardson, 早瀬敏幸: 模擬モデルを用いた爆風による外傷性脳損傷機序解明研究, 日本機械学会第 26 回バイオエンジニアリング講演会, 仙台, (2014), pp. 33-34.

[6] 大谷清伸, 中川敦寛, 沼田大樹, 合田圭介, 荒船龍彦, 鷺尾利克, 古川宗, Mark Richardson, 早瀬敏幸: 爆風による外傷性脳損傷機序解明のための模擬モデル実験, 高速度イメージングとフォトンクスに関する総合シンポジウム 2013, 北海道, #19-201, (2013), pp. 22.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) 噴流生成装置、および、噴流生成装置の噴流生成方法, 中川敦寛・富永悌二・金田道寛, 出願年月日 2014.2.18, 出願.

Project code	J13048
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	2nd year

Analysis of the Combined Mode Heat Transfer in Complex Materials

Shigenao Maruyama*†, Subhash C. Mishra**††, Kobari Tatsuya***,
Atsuki Komiya**, Junnosuke Okajima*

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Indian Institute of Technology Guwahati

***School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The project is aimed at numerical analysis of combined mode conduction and radiation heat transfer in complex materials. Towards this end, study of temperature field in hyperthermia treatment of lung cancer using laser and inhalable nanoparticles has been studied.

2. Details of program implement

Effect of gold nanoparticles NPs on spatio-temporal temperature distributions has been studied for a hemispherical tumor seated on a hemispherical tissue (Figure 1). The gold-silica nanoshell is provided at the interface of the two hemispheres. The diameter of the nanoshell is 20 nm, and the diameters of the tissue and tumor are 1 μm. Properties of the tissue and the tumor are constant. The tissue surface is subjected to external heat input in form of temperature equivalent that a pulse laser irradiation with Gaussian temporal profile will have. With core body temperature as boundary condition, for the geometry shown in Fig. 1, the governing energy equation is given by

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q + Q_{bio} \quad (1)$$

where T, t, k, ρ, c_p, Q and Q_{bio} are temperature, time, thermal conductivity, density, specific heat of the tissue, distributed volumetric heat source due to spatial heating and metabolic heat generation rate, respectively.

In biomedical applications, short-pulse laser with Gaussian temporal profile in both spatial and temporal domains are used. The Gaussian nature of temperature as a function of time can be expressed as:

$$T(t) = \frac{T_{\max}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{where } T_{\max} \text{ is the}$$

maximum input temperature to the model, σ is half of the pulse width, and μ is the mean. The time of temperature input was taken as 4 ms with a step of 0.25 μs. The maximum temperature T_{\max} was taken as 1100 K.

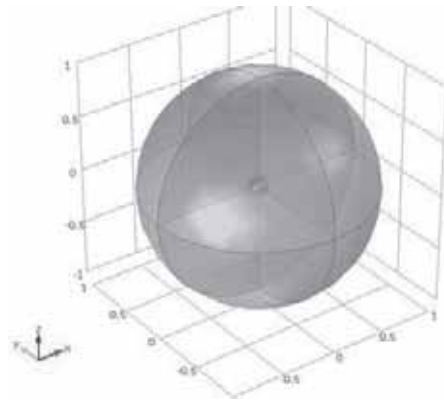


Figure 1. Schematic of the 3-D tissue-tumor geometry with gold-silica nanoshell at the center.

3. Achievements

For the lung tissue and tumor, the temperature distributions at 1.0 ns, 0.25 μ s and 40 ms are shown in Figs. 2a-c, respectively. For these results, the values of parameters for tissue are: $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 3300 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, $k = 0.40 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

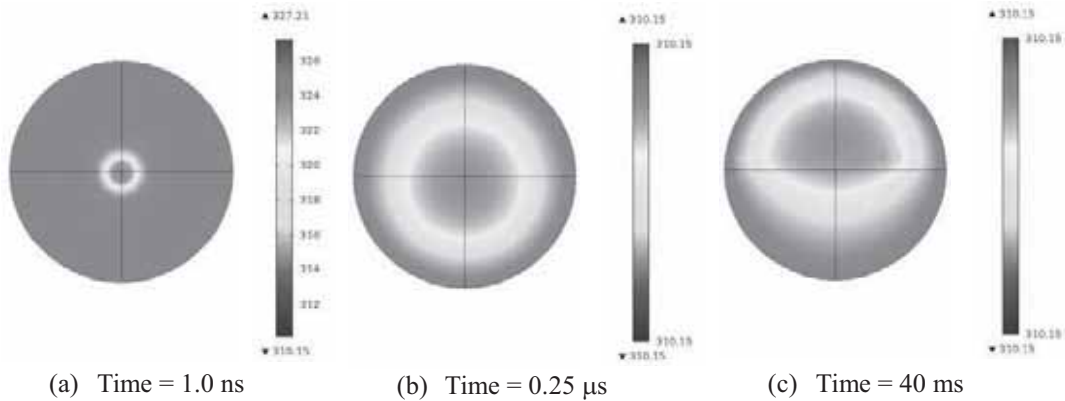


Figure 2. Temperature distributions (x-z plane) in the tissue-tumor at (a) 0.0 s, (b) 0.25 μ s and (c) 40 ms.

For the tumor these are $\rho = 1400 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 3680 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, $k = 0.55 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. It seen from Figs. 2a-c that in the early state ($t = 1.0 \text{ ns}$), the temperature rise is sharp and is confined to a narrow region. As time progresses, temperature comes down and its spread is more. In the tumor region, the temperature rise is more.

4. Summaries and future plans

Temporal temperature distribution in a tissue-tumor assembly with gold-silica nanoshell at the interface was studied. The nanoshell was subjected to a pulse heat input. Initially the temperature rise was high in the narrow region, and with passage of time (in 40 ms), it spread to a wider region in the tumor.

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] R. Singh, J. Okajima, S.C. Mishra, S. Maruyama and U. Barman: Hyperthermia Treatment of Lung Cancer using Laser and Inhalable Nanoparticles, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 94-95.

[2] R. Singh, K. Das, S.C. Mishra, J. Okajima and S. Maruyama: Minimizing Skin Thermal Damage Using Surface Cooling During Laser Induced Thermal Therapy - a Numerical Study, *22nd National and 11th ISHMT - ASME Heat and Mass Transfer Conference*, IIT Kharagpur, (2013).

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

Project code	J13049
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	2nd year

Measurement of Radiative Properties Controlled-Film

Shigenao Maruyama*†, Rodolphe Vaillon**††, Hiroki Gonome***,
Yoichiro Tsurimaki***, Atsuki Komiya*, Junnosuke Okajima*

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Université de Lyon, CNRS, INSA-Lyon, UCBL, CETHIL

***School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Radiative heat flux exchanged between two bodies differs from that estimated by the Planck's theory when the distance between the two bodies comes close to the mean wavelength of thermal radiation given by the Wien's displacement law. This distance regime is called the *near field regime*. The variation from the classical thermal radiation comes from two effects of different origins in opposite ways. The one is an enhancement of radiative heat flux due to evanescent waves and the other is an interference of thermal radiation leading to a decrease of radiative heat flux.

In the transition regime from the far field to the near field regime, these two effects on the radiative heat flux are on the same order of magnitude. In addition, these effects depend on a distance, a material and its temperature. Thus, it is expected that a decrease of radiative heat flux would occur by manipulating the condition.

The aim of the project is to experimentally measure the reduction of radiative heat flux due to interferences of thermal radiation. For that purpose, we begin with numerical simulations of the radiative heat flux between two semi-infinite parallel plates to find optimized conditions.

2. Details of program implement

Numerical simulations of radiative heat flux between two semi-infinite parallel plates are conducted for several combinations of materials. We consider aluminum and gold as metal, silicon carbide and cubic boron nitride as dielectrics. Figure 1 (a) shows the net radiative heat flux between two semi-infinite aluminum plates at 400K and 300K as a function of the distance. In this figure, the radiative heat flux is normalized by the one in the far field. The propagative radiative heat flux starts to become smaller than the one in the far field at the distance below 20 μ m and shows the reduction of 85% at around 2 μ m. However, the enhancement of the radiative heat flux by the evanescent waves overrides the reduction of the propagative radiative heat flux. Thus as the total radiative heat flux a few percent of the reduction is observed. Numerical simulations for other combinations of materials make clear that a highly reflective material is obligatory to obtain a reduction of propagative radiative heat flux.

Figure 1 (b) shows the total radiative heat transfer coefficient normalized by the far-field radiation as a function of the distance for several temperatures in the case of Al-Al. The radiative heat transfer coefficient is defined as the temperature derivative of the radiative heat flux. As seen from the figure, the reduction of the radiative heat flux is not observed for the temperatures higher than 300K because the enhancement of the radiative heat flux by evanescent waves overrides the reduction of the propagative

radiative heat flux. However at lower temperatures, it is shown that the reduction of the radiative heat flux occur just before the increase due to the evanescent waves. It has been considered that the temporal coherence length of thermal radiation and the distance where the evanescent waves appear are the same order of magnitude. However, this is not the case especially at low temperatures where the interferences of thermal radiation become important at longer distances before the evanescent waves appear. This difference of the distances led to the reduction of the radiative heat flux.

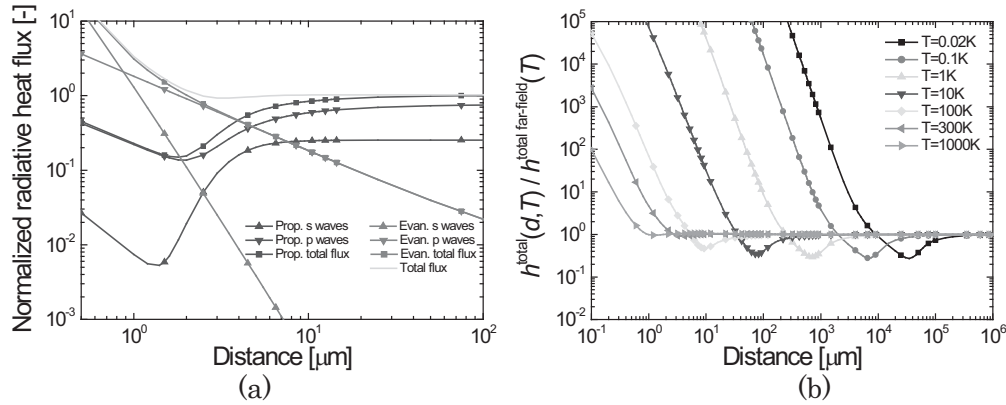


Figure 1: (a) Normalized radiative heat flux as a function of the distance between two semi-infinite parallel plates made of Al at 400K and 300K
 (b) Normalized total radiative heat transfer coefficient as a function of the distance for several temperatures in the case of Al-Al

3. Achievements

The radiative characteristics in the small gap are essential to future thermal engineering applications. Our objectives are achieved very well.

4. Summaries and future plans

It is concluded that a highly reflective material and a low temperature lead to a reduction of radiative heat flux. Thus, it is preferable to conduct an experiment at low temperature employing metals as materials to measure the reduction of radiative heat flux.

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. Tsurimaki, P-O. Chapuis, R. Vaillon, J. Okajima, A. Komiya and S. Maruyama: Reducing thermal radiation with interferences, *Nanoscale Radiative Heat Transfer, Physics School Les Houches*, (2013).
- [2] Y. Tsurimaki, P-O. Chapuis, R. Vaillon, J. Okajima, A. Komiya and S. Maruyama: Reducing thermal radiation with interferences, *Proceedings of 7th International Symposium on Radiative Transfer, RAD13*, Turkey, (2013).
- [3] Y. Tsurimaki, P-O. Chapuis, R. Vaillon, J. Okajima, A. Komiya and S. Maruyama: Reducing thermal radiation heat transfer with interferences, *Conference program of the 4th ASME Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference*, Hong Kong, (2013), pp. 24.
- [4] Y. Tsurimaki, P-O. Chapuis, R. Vaillon, J. Okajima, A. Komiya and S. Maruyama: Interference effects in thermal radiation exchanged between two closely-spaced bodies, *Abstract book of 2014 Annual Elyt Workshop*, France, (2014), pp. 50-51.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J13050
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	2年目

大気環境におけるふく射エネルギー評価とその解析
Evaluation and Analysis of Atmospheric Radiative Energy Transfer

圓山 重直*†, 小宮 敦樹*, 岡島 淳之介*, 山田 昇**††

*東北大学流体科学研究所, **長岡技術科学大学工学部

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本年度は、前年度に構築した観測手法の検証に共同研究の力点を置き、新規ふく射観測ゾンデ技術の確立を目指し、JAXA 大気球実験のピギーバック搭載実験に申請し採択され、ふく射観測ゾンデの測定系に関する信頼性検証に挑んだ。また、これまでの長波長放射の観測に加えて、日射（短波長放射）の測定を可能とするセンサ改良を完成させた。

JAXA 大気球実験の概要

本実験の目的は、ふく射観測ゾンデを早期実用化するために観測値の妥当性を大気球実験で実証することであり、従来手法との比較、高層でのセンサ表面への着氷の有無と測定値への影響等を検証することである。これらは機器類が重くなるため通常の小型気球では実施困難である。図1に実験装置の概要を示す。観測機器ゴンドラの側面にセンサユニットが取り付けられ、ゴンドラ内部の圧力容器に格納されたデータロガーとバッテリーにケーブル接続されている。センサユニットには、開発放射センサと従来型放射センサが下向きに並列に設置され、ゴンドラ側からの放射を遮断するために高反射ミラーが背面に設置されている。また、飛行中のセンサ面の様子を観察するためのデジタルカメラ（インターバル撮影）と温湿度センサも設置してある。

日射および赤外放射の分離計測

これまでのテスト飛揚は日没後に実施してきたが、日射（短波長放射）と赤外放射（長波長放射）を分離して計測ができれば日中でも使用でき、大気放射学の観点から放射メカニズムの解明に大きく貢献できる。そこで波長選択性の透過フィルムを用いて日射用センサを開発した。図2は擬似太陽光源を用いた室内実験により日射用センサの入射角依存を測定した結果である。図に示すように入射角変化に対して従来日射計と同様にほぼ余弦法則に従い、実用可能であることが示された。また、地上における比較実験では、従来日射計と開発センサ出力には良好な相関が確認できた。

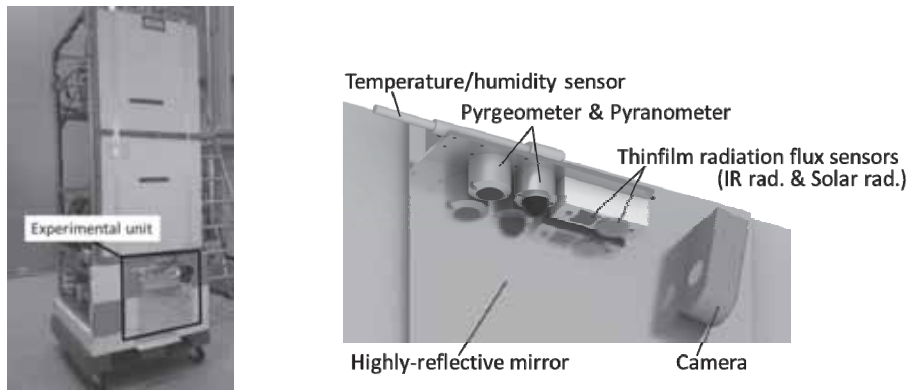


図 1: 観測機器ゴンドラ側面に取り付けたセンサユニット (左)
およびセンサユニット構成図 (右)

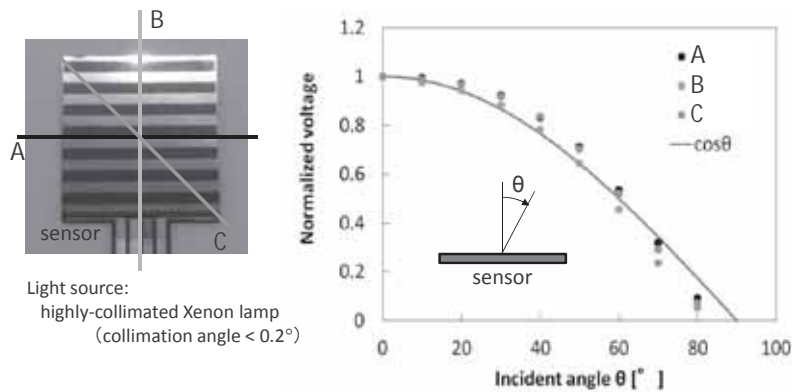


図 2: 放射流束センサ (日射用) の入射角特性の測定結果

3. 研究目標の達成状況

今年度の大気球実験は、気球装置側のトラブルと気象条件のために打上が見送られたが、本研究成果により研究目標の達成に向けて一歩前進したと考えている。

4. まとめと今後の課題

本年度は、信頼性検証のための実験基盤を構築できた。H26 年度も JAXA 大気球実験に採択されており、実験の完遂を期している。さらに、雲粒子をカウントできる他機関の開発ゾンデとの共同観測も計画されており、実用化に向けた取組を加速したい。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] N. Yamada, T. Yoshida, J. Okajima, and Shigenao Maruyama: In-situ Measurement of Upward/Downward Radiative Heat Flux in Earth's Atmosphere, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 50-51.

[2] 山田昇, 吉田貴則, 岡島淳之介, 円山重直, 斎藤義隆: 大気放射フラックスの in-situ 観測および気球工学への活用, JAXA 大気球シンポジウム, (2013), isas13-sbs-029.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J13051
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	1年目

生体組織内の超音波伝播の数値解析
Numerical Simulation of Ultrasound Imaging in Soft Tissue

田邊 将之*†, 船本 健一**††

*熊本大学大学院自然科学研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

1990年代序盤、膵石や腎石などを診断する際に血流計測モードを通して眺めると、キラキラと星のまたたきのように描出される“Twinkling Sign”現象（以下 TS, 図1参照）が報告された。本現象の原理は十分に解明されていないが、初期乳がんにおいて発生する微細石灰化の検出が可能になるなどの有用性が非常に期待できる。

本研究では、軟組織中に微細硬組織（微細石灰化など）が存在する場合について、様々な条件下における超音波伝播特性を数値解析により調べることを目的とした。

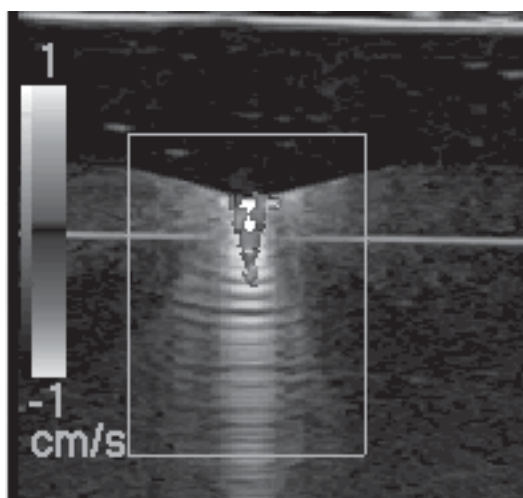


図1 : Twinkling Sign の様子

2. 研究成果の内容

初年度である本年度は、申請書の計画通りスーパーコンピュータ上で有限要素法アプリケーション COMSOL（音響モジュール）を試用し、微細硬組織（石灰化など）を内包した軟組織のモデリングを行った。また、新たに超音波伝播解析に特化したアプリケーションである ComWAVE が導入されたため、COMSOL の試用と並行して ComWAVE を用いた解析を行った。

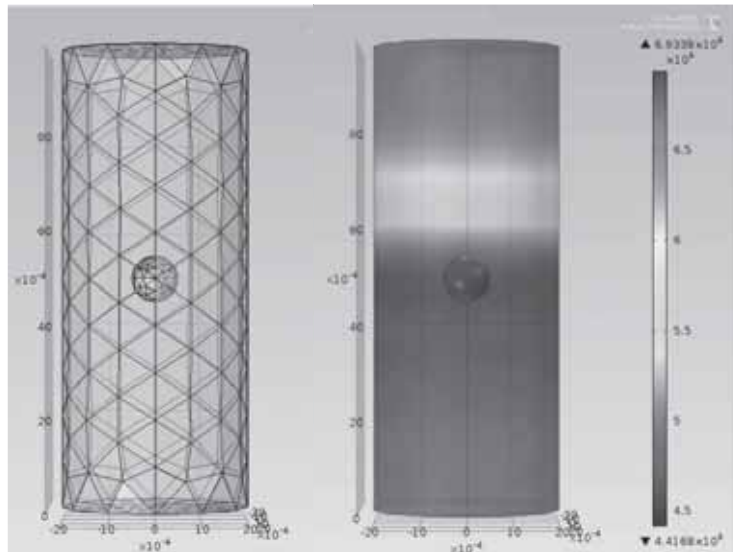


図1：COMSOL を用いたシミュレーションモデル

3. 研究目標の達成状況

モデリングを行い、音波伝搬解析の準備が整いつつある状況であり、微細石灰化のサイズや形状、軟組織の物性、照射音波のフォーカス距離、繰り返し周波数等のパラメータを変化させながら TS の頻出度を計測するまでには至らなかった。

4. まとめと今後の課題

本研究では、COMSOL を用いて軟組織中の微細石灰化に超音波を照射した際の挙動を調べようとしたが、COMSOL の操作性に難があり、また、計算結果の妥当性も曖昧な部分があるため、今後は超音波伝搬解析に特化した ComWAVE を導入して解析を中心に実施するようにし、ガラスビーズ周囲の超音波の伝搬に関して予備的な解析による検討を進めている。

5. 研究成果 (*は別刷りあり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] M. Tanabe, E. Tagomori, L. Liu, K. Funamoto, M. Nishimoto and T. Hayase: Numerical Simulation of Ultrasound Imaging for Detection of Microcalcification in Soft Tissue, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 62-63.

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	J13052
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	3年目

流体力学的効果によるCG動画像のリアリティ向上
Improvement of Reality of CG Motion Pictures by Hydrodynamic Effects

石原 卓*†, 服部 裕司**††

*名古屋大学工学研究科, **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

CG 動画像のリアリティを向上させるために、流体力学的効果を取り入れる方法について研究する。流動現象そのものをよりリアルに見せることに加えて、光が媒質（大気や水）を通過する際に、一般に流動する媒質の物性（密度や温度のゆらぎ）や媒質中の微粒子や分子による散乱・反射等の効果を考慮する。また、これを実用的な簡易計算で行うための手法も開発する。

2. 研究成果の内容

今年度は一様等方性乱流中の高渦度領域の動的解析を行った。乱流中の強い渦度領域（高渦度領域）は主として細い管状の構造として存在することが知られている。高渦度領域は乱流のゆらぎ成分に大きく寄与し、ラーゼ・エディ・シミュレーションにおける SGS 応力のモデリングのほか、本研究の目的である CG 動画像のリアリティ向上についても像のゆらぎに直接的に関係するため、その統計的性質の理解は重要である。先行研究のほとんどは瞬間の場の統計に関するものであるが、われわれはこれを動的に解析した。

動的解析の手法について述べる。対象となるデータは一様等方性乱流の約 1000 スナップショット（時間間隔は時間ステップの 5 倍）である。計算負荷を軽減するため、渦度の大きさがある閾値を超える格子点の集合で、隣接格子点により連結されている領域を高渦度領域と定義する。隣接するスナップショット間で、移流された高渦度領域のオーバーラップの有無を検査し、高渦度領域のイベント（移流、融合、分裂、生成、消滅）を特定する。

動的解析の結果、イベントの数としては融合よりも分裂、生成よりも消滅が多いことが分かった。統計的には平衡状態にあるため、 $(分裂) + (生成) \doteq (融合) + (消滅)$ の関係が成り立つ。次に、高渦度領域のダイナミクスを時空間におけるグラフとして捉えた。移流以外のイベントをノード、移流によって接続されるノードの対をエッジと定義する。図 1 にグラフの例を示す。高渦度領域が生成後分裂や融合を繰り返す様子がわかる。約 75% のエッジは巨大な一つのグラフに含まれることも分かった。図 2 は高渦度領域の平均体積と寿命の結合確率密度分布である。これより高渦度領域の寿命はコルモゴロフ時間の 4～15 倍程度であることが分かった。

3. 研究目標の達成状況

CG 動画像のリアリティを格段に向上させるといった、本研究の最終目標に向け、

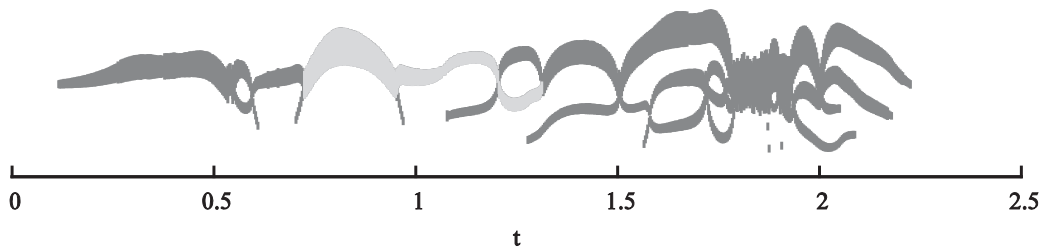


図 1：時空間中の高渦度領域のグラフ．縦軸の座標の値は意味を持たないが，幅は体積を表す．

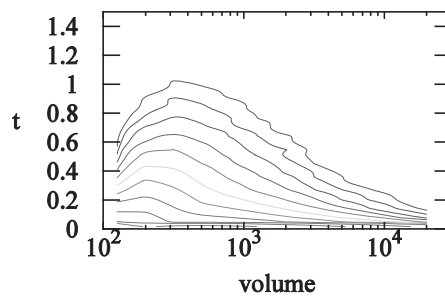


図 2：高渦度領域の平均体積と寿命の結合確率密度分布

一様等方性乱流の動的性質の解明を行った．当初の目標を達成するまであと一歩である．

4. まとめと今後の課題

3年間の研究により，非圧縮一様等方性乱流を通して見た像の変形の定量的評価式を求め，乱流の動的な統計的性質の解明を進めることができた．本年度までに得られた結果に基づき当初の目標を達成すること，さらに乱流中の高渦度領域の動的解析を進めることが今後の課題である．後者については新しい公募共同研究で進めていく予定である．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Yuji Hattori and Takashi Ishihara: Dynamic Geometrical Analysis Of High-entropy Structures In Isotropic Turbulence, *European turbulence conference 14 (ETC14)*, Lyon, (2013).

[2] 服部裕司，石原卓：一様等方性乱流中の高渦度領域の動的形状解析，日本物理学会 2013 年秋季大会，徳島，(2013)．

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J13053
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

小型航空機の空力性能向上に関する研究
Aerodynamic Performance Improvement of Small UAV

佐々木 大輔*†, 下山 幸治**††
岡本 正人*, 赤坂 剛史*, 大林 茂**, 小松 一彦***
*金沢工業大学工学部, **東北大学流体科学研究所
***東北大学サイバーサイエンスセンター
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

橋梁やトンネルの点検等, 人が行うには難しい場所での作業を行うために小型航空機の活用が期待されている. 小型航空機は比較的低いレイノルズ数 ($10^3 \sim 10^5$) の流れ場であり, 翼面上の渦の挙動が空力特性に大きく影響するため, 空力性能の向上は容易ではない. そこで本研究では, 小型航空機のような低レイノルズ数流れにおける空力性能の向上を目的として, 低レイノルズ数流れにおける流体解析手法の構築を目指す.

2. 研究成果の内容

低レイノルズ数流れに対する数値解析手法の有効性を検討するため, 比較検証に用いる低レイノルズ数流れにおける水槽における実験方法の開発とデータの取得, また直交格子法に基づく CFD 解析手法の開発を行った. 数値解析では, 平板翼を対象として層流での空力性能の解析を行い, 妥当性の検証を行った. 水槽実験と CFD により得られた空力係数の比較を図 1 に示す. 図 1 より, 迎角の低い領域においては実験値と CFD の結果がよく一致していることが確認できる.

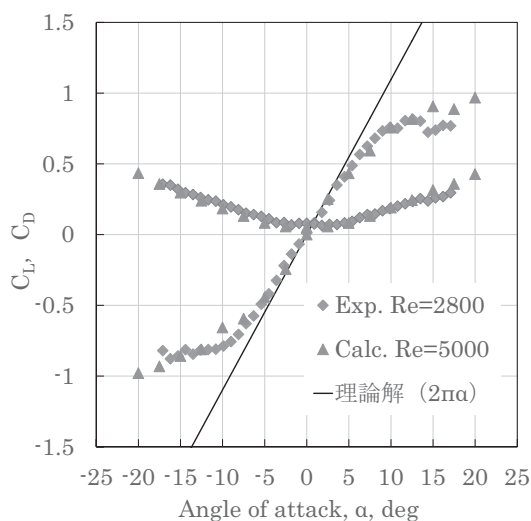


図 1 : 平板翼における水槽実験と CFD の空力係数値の比較

また、図2に迎角20度におけるCFDにて得られた流線を示す。前縁付近に二次剥離渦が確認できることから、直交格子に基づくCFD解析手法が有効であることが分かる。

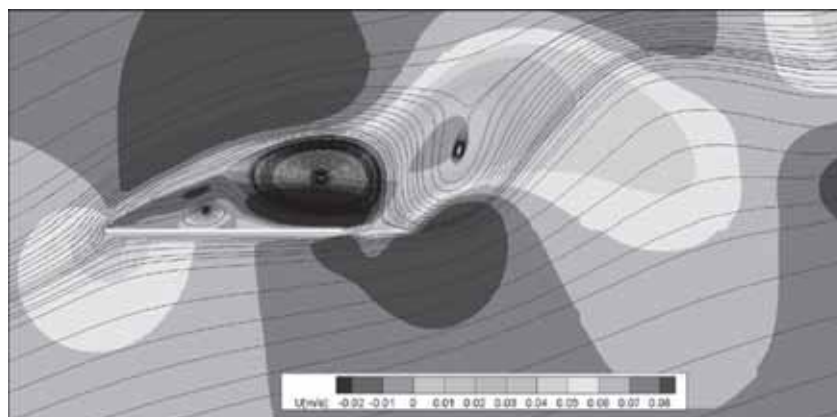


図2：迎角20度での平板翼周りの流線

3. 研究目標の達成状況

剥離を伴う複雑な流れ場である低レイノルズ数での空力解析手法の構築を目的として、低レイノルズ数での水槽実験装置を構築し各種翼型のデータ取得を行った。高次精度CFDの開発を行い、層流での平板翼周りの流体解析を行い、実験値との良い一致を確認できたことから、当初の目標を十分に達成できたと考えられる。ただし、乱流に遷移する高迎角時や翼等での検証を進める必要がある。

4. まとめと今後の課題

今後、空力性能の向上が求められる小型航空機の空力解析を行うために、低いレイノルズ数におけるCFDの開発を行った。その結果、平板翼に対する層流解析の結果、低迎角での実験値との良い一致を確認できた。今後、高迎角における検証をさらに進めると共に、他の翼型形状での妥当性検証を行うことで、低レイノルズ数翼に対する空力解析が可能となる。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] D. Sasaki, Y. Kojima, T. Kuroda, T. Akasaka, M. Okamoto, K. Shimoyama and S. Obayashi: Cartesian-based CFD Solver for Low-Reynolds Number Airfoils, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Flow Dynamics*, Sendai, (2013), pp. 234-235.

*[2] T. Kuroda, M. Okamoto, D. Sasaki, T. Akasaka, K. Shimoyama and S. Obayashi: Unsteady Fluid Dynamic Forces measurements on Airfoils with Heaving and Feathering Oscillations at Very Low Reynolds Number, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 16-17.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J13054
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year

Ignition Studies of Gaseous Pre-Mixtures in Turbulent Flow

Roman Fursenko*†, Kaoru Maruta**††

Evgeniy Sereshchenko*, Dmitrii Mazurok*, Hisashi Nakamura**, Koichi Takase**,
Onishi Takakazu**

*Far-Eastern Federal University, School of Engineering, Vladivostok, Russia

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective of the proposed project is elaboration of tractable reduced models of pre-mixtures ignition in the turbulent flow and understanding of the main physical mechanisms governing turbulent ignition.

2. Details of program implement

Investigations of ignition processes in turbulent flow have fundamental and practical importance. Minimum ignition energy is an important property for safety standards as well as for the fundamental understanding of the ignition process of combustible mixtures. Furthermore, the deep understanding of ignition processes is crucial for optimization of ignition systems especially when ignition of lean premixed mixtures under turbulent combustion is considered.

The ignition process in prescribed flow field modeling turbulent flow was investigated in the frame of 2D thermal-diffusion model. The dependencies of minimum ignition energy on turbulence intensity and eddies size in the flow field consists of time-independent, space-periodic array of large-scale vorticities were obtained (see Fig.1 and Fig.2). The numerical results shows that in large-scale eddies flow the minimum ignition energy (see curves $k = 0.025$, $k = 0.05$ in Fig.1.) is almost constant until the turbulent intensity exceeds some critical value, then the abrupt linear increase of ignition energy is observed. It was found that in the case of fixed value of flow-intensity, there is a critical eddies size corresponding to the maximal ignition energy (see Fig.2). The ignition process in the flow field which is pre-calculated in the frame of the two-dimensional Euler equation for freely decaying turbulence was also studied. It was found that behavior of the minimum ignition energy/turbulent intensity curves strongly depends on the location of the igniting hotspot. At some initial conditions, these curves resemble the dependencies previously obtained within the model with spatially-periodic vortical flow. It may be concluded that the reduced thermal-diffusion model combined with prescribed flow field is reasonable for qualitative investigations of the ignition in the turbulent flow. At the same time the further investigations directed toward the adequate description of the turbulent flow field during the spark ignition is necessary.

In the course of project implementation Russian project members (R. Fursenko and E. Sereshchenko) visited Institute of Fluid Science, Tohoku University. During the visit Japanese and Russian groups had discussions on the results obtained in the frame of the project and formulated plans of the future research. Project members took part in the 13th International AFI conference and presented the results of the project.

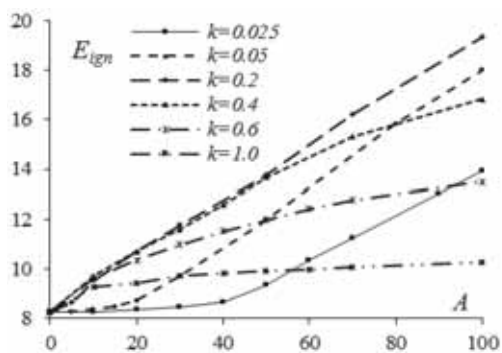


Fig. 1. Dependencies of minimum ignition energy on flow-intensity calculated for different wave numbers.

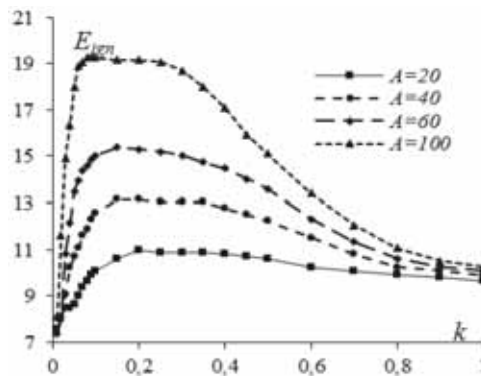


Fig. 2. Dependencies of minimum ignition energy on wave number calculated for different flow-intensities.

3. Achievements

All results which have been expected in the submitted project were achieved. Shown that theoretical results obtained within reduced thermal-diffusion models combined with prescribed flow field allows us to qualitatively explain some experimental results on the ignition in the turbulent flow. It was found that behavior of the minimum ignition energy/turbulent intensity curves strongly depends on the location of the igniting hotspot.

4. Summaries and future plans

The ignition process in prescribed flow field modeling turbulent flow was investigated. Analysis of time-dependency of maximal gas temperature allows us to give qualitative explanation of minimum ignition energy behavior under variation of different parameters. Reduced mathematical model allows us to decouple thermal-diffusive and hydrodynamic processes for better understanding of dynamical behavior of the flame after its initiation by hot spot.

The dependencies of minimum ignition energy on Lewis number, turbulence intensity and stretch rate in the flow field consists of time-independent, space-periodic array of large-scale vorticities and in the normal and tangential stretched flows will be obtained. The effect of igniting hot spot characteristics (size, temperature, spatial location) on minimum ignition temperature will be studied as well. Mathematical models describing distinctive features of ignition process in turbulent flow will be proposed. These investigations will facilitates development of effective non-polluting combustion technologies.

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] Sereshchenko, R. Fursenko, S. Minaev, S. Shy: Numerical simulations of ignition in turbulent flow, *Proceedings of The International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, Taipei, (2013), CD.

*[2] R. Fursenko, S. Minaev, E. Sereshchenko, S. Shy, K. Maruta, H. Nakamura: Ignition Studies of Gaseous Pre-mixtures in Array of Large-scale Vorticities, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 46-47.

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

Project code	J13055
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year

Kinetic Modeling of Energy Transfer in Nonequilibrium Nanosecond Pulse Discharges in Air and Fuel-Air Mixtures

Hidemasa Takana**†, Igor Adamovich**††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

**Department of Mechanical and Aerospace Engineering, The Ohio State University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The proposed research will provide critical insight into mechanisms of molecular dissociation, chemically active radical species formation, and chain processes of fuel oxidation in nanosecond pulse discharges. The model predictions will be validated using measurements by psec Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy (CARS) and Two-Photon Absorption Laser Induced Fluorescence (TALIF).

2. Details of program implement

Details of kinetic model development and experimental validation have been discussed during Prof. Adamovich's visit to Tohoku University in June 2013. The results of the present work have been presented at major international conferences.

3. Achievements

The results of kinetic modelling calculations provide key new insight into the kinetics of vibrational excitation of nitrogen and plasma chemical reactions in a nanosecond pulse, "diffuse filament" discharges in nitrogen and dry air at a moderate energy loading per molecule, ~ 0.1 eV/molecule. The results demonstrate that the apparent transient rise of N_2 "first level" vibrational temperature after the discharge pulse is due to net downward V-V energy transfer in N_2 - N_2 collisions, which increases N_2 ($X^1\Sigma, v=1$) population. Finally, comparison of the model predictions with the experimental data shows that NO formation in the afterglow occurs via reactive quenching of multiple excited electronic levels of nitrogen molecule, N_2^* , by O atoms. The results of the modelling calculations are compared with psec CARS measurements of N_2 vibrational level populations in Fig. 1 (a), and with [NO], [O], and [N] measurements by LIF and TALIF in Fig. 1 (b), showing good agreement.

4. Summaries and future plans

During the performance period, the main focus of kinetic modeling calculations performed at Ohio State was on (i) incorporating key molecular energy transfer processes into the kinetic model, such as reactive quenching of electronically excited N_2 molecules by oxygen atoms resulting in formation of NO, and (ii) model validation using recent measurements of N_2 vibrational levels populations and of absolute species concentrations.

The focus of the current and future work is on (i) modeling nanosecond pulse discharges in H_2 -air and C_2H_4 -mixtures, and (ii) use of the insight obtained from the quasi-one-dimensional model to develop truly predictive two-dimensional model of these discharges.

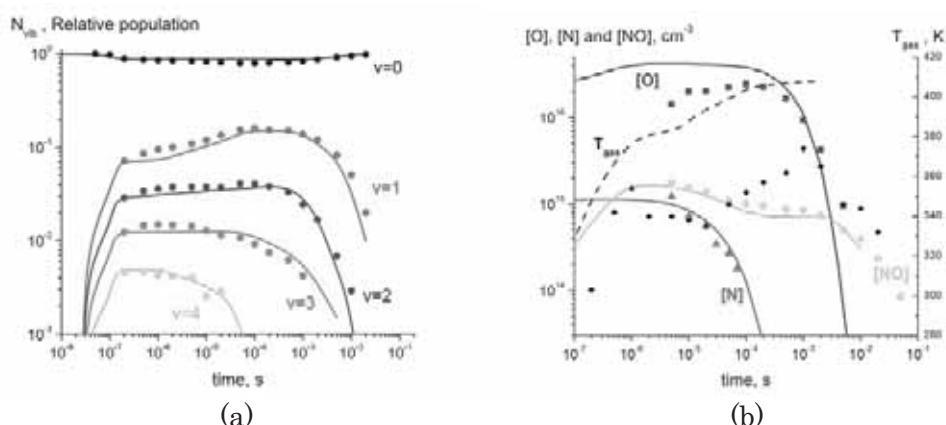


Figure 1 : (a) Experimental (symbols) and predicted (curves) N_2 vibrational level populations during the nanosecond pulse discharge and in the afterglow in air. (b) N, O, and NO number densities, and gas temperature in air at P=100 torr, discharge gap 1 cm, peak voltage 16 kV, discharge pulse duration 200 ns.

5. Research results (* reprint included)

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

- [1] H. Takana and H. Nishiyama: Computational Simulation of Highly Reactive DBD Plasma for Combustion Enhancement, *Proceedings of the 12th International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization (FLUCOME 2013)*, Nara, Japan, (2013), OS13-02-1, USB (5 pages).

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

- [2] I. Shkurenkov, D. Burnette, W.R. Lempert, and I.V. Adamovich,: Excited States and Radicals Formation in Nanosecond Pulse Discharge and Their Evolution in Afterglow, *Bulletin of the American Physical Society, 66th Annual Gaseous Electronics Conference*, Princeton, USA, (2013), FT 7.

- *[3] I. Shkurenkov, D. Burnette, W.R. Lempert, I.V. Adamovich, H. Takana, and H. Nishiyama: Kinetics of Excited States and Radicals in a Nanosecond Pulse Discharge and Afterglow in Nitrogen and Air, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp.40-41.

- [4] H. Takana and H. Nishiyama: Numerical Simulation of High-Energy Nano-Second Pulse DBD for Combustion Enhancement in Internal Engine, *Proceedings of the 31th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG-2013)*, Granada, Spain, (2013), USB.

- [5] H. Takana and H. Nishiyama: Numerical Study on Nano-Second Pulse Dielectric Barrier Discharge for Plasma Assisted Combustion, *Proceedings of the 21st International Symposium on Plasma Chemistry*, Cairns, Australia, (2013), ID585.

- *[6] D.D. Burnette, I. Shkurenkov, I.V. Adamovich, and W.R. Lempert: An Examination of Nitric Oxide Kinetics in a Plasma Afterglow with Significant Vibrational Loading, *Proceedings of the 52st AIAA Aerospace Sciences Meeting (SciTech 2014)*, National Harbor, USA, (2014), AIAA Paper 2014-1034.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J13056
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	2nd year

Improvement of Numerical Scheme and Theory for Kinetic Force Method

Vladimir Saveliev*†, Shigeru Yonimura**††, Svetlana Filko*

*Institute of Ionosphere, NCSRT, Kazakstan,

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Pair collisions are the main interaction process in the Boltzmann gas dynamics. To take account of this interaction one needs to possess a two-particle distribution function. As is well known, Ludwig Boltzmann presented it as the product of two one-particle functions and wrote his famous kinetic equation with the collision integral in its right part. In our earlier papers, the kinetic equation for two-particle distribution function in gas mixtures was written by making use of exactly the same physical assumptions. Instead of the collision integral, there is the linear scattering operator $\hat{\chi}$ in its right part. The Boltzmann equation then follows from this equation without any additional assumptions after a simple integration over the velocity and position of the second particle. The scattering operator is simpler than the Boltzmann collision integral, and it is possible to represent it in a factorized form. This form allows us to simulate the quasiparticle pair dynamics due to collisions by rotating their relative velocity with the angular velocity $\Omega(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = -[f(\mathbf{v}_1)f(\mathbf{v}_2)]^{-1} \hat{\Omega} f(\mathbf{v}_1)f(\mathbf{v}_2)$.

2. Details of program implement

The method of quasi-particles for the two-particle kinetic equation is reduced to the following basic steps: 1) Initial velocities of the N quasiparticles are selected. 2) N^2 pairs of quasiparticles, which include pairs with the same quasi-particles, are constructed. 3) The velocities of a pair are rotated relative to the velocity of the center of mass at the angular velocity Ω on the angle Ωdt , according to the formula:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1(t+dt) &= \mathbf{v}_1 + \left[(1 - \cos(\Omega dt)) \frac{\Omega \times \Omega \times}{\Omega^2} + \sin(\Omega dt) \frac{\Omega \times}{\Omega} \right] \frac{\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2}{2}, \\ \mathbf{v}_2(t+dt) &= \mathbf{v}_2 - \left[(1 - \cos(\Omega dt)) \frac{\Omega \times \Omega \times}{\Omega^2} + \sin(\Omega dt) \frac{\Omega \times}{\Omega} \right] \frac{\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2}{2}, \end{aligned}$$

Angular velocity for the pair with the same quasi-particles is equal to zero, $\Omega(\mathbf{v}, \mathbf{v}) = 0$. Velocities in this pair are not changed. 4) As a result, each quasiparticle is divided into N fragments and transforms to the cloud of fragments with the "weight" N^{-1} . The size of the cloud in the velocity space is proportional to the time step dt . 5) The center of mass of each cloud of fragments is calculated, and a new quasiparticle is placed there. 6) Replacement of cloud of moving fragments by the quasiparticle, moving at a speed of center of mass of the cloud, results in a decrease of energy of the system of quasiparticles. Energy decreasing is proportional to $(dt)^2$. 7) The distribution function is recovered from the velocities \mathbf{v}_i , $1 \leq i \leq N$ of quasiparticles by filtering out small scales. Compensation for loss of energy is provided by the increasing of the filtering parameter κ :

$$f(\mathbf{v}) \sim \sum_{i=1}^N e^{-\frac{|\mathbf{v}-\mathbf{v}_i|^2}{2\kappa}}, \quad \kappa(t+dt) = \kappa(t) + \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^N [\mathbf{v}_i^2(t) - \mathbf{v}_i^2(t+dt)].$$

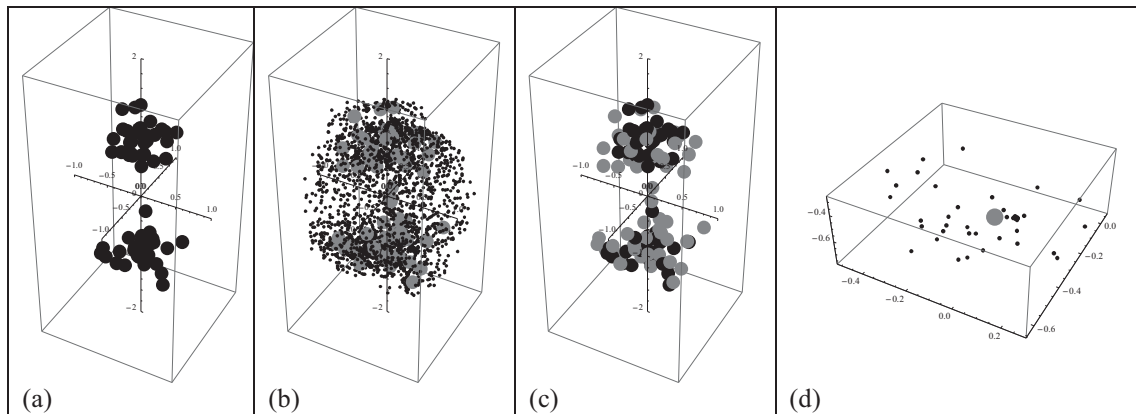


Figure 1 : One step of the algorithm: (a) velocities of N quasiparticles at the initial moment in the velocity space; (b) velocities of clouds of quasiparticle fragments and the new velocities at the centers of mass of the clouds; (c) velocities at the at the initial and final moments of the time step; (d) cloud of fragment velocities for a single quasiparticle from (b); ● initial velocities of quasiparticles ○ final velocities; • velocities of quasiparticle fragments; total number of quasiparticles is $N = 64$.

3. Achievements

Using the method of quasiparticles for the two-particle kinetic equation, we have shown that the energy of quasiparticles in case of the plain Method of Kinetic Force for the Boltzmann equation is always decreased. We have also shown that the compensation of the energy deficit by changing the filter parameter of small scales is physically correct.

4. Summaries and future plans

We made one more step for theoretical substantiation of the Kinetic Force Method for 2D/3D numerical simulations of rarefied gas flows. In the future we try:

1. To improve theory for the Kinetic Force Method.
2. To develop the efficient numerical scheme for calculation the Kinetic Force on each time step.

5. Research results (* reprint included)

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

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

*[1] Vladimir Saveliev, Svetlana Filko and Shigeru Yonemura: A View on Kinetic Force Method from Two-Particle Kinetic Equation, *Proceedings of the Thirteen International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 160-161.

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

Project code	J13058
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	2nd year

Numerical Studies of Rarefied Chemically Reacting Flows
about Space Vehicles

Mikhail Ivanov*†, Shigeru Yonemura**††
Yevgeniy Bondar*, Alexander Shevyrin*, Pavel Vashchenkov*,
*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics,
Siberian Branch of Russian Academy of Science,
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The main goal of the project is developing a new technique of modeling of ionization processes for rarefied chemically reacting flows about space vehicles and radiation heat load estimation using DSMC software tool.

2. Details of program implement

The goal of the project was development of the SMILE++ DSMC software system for studies of high-enthalpy flows about reentry space vehicles with account for the effects of ionization and thermal radiation. Development of molecular models of ionization processes (including associative and by electron impact) as well as kinetic model of spacecraft plasma environment was carried out. Validation of the models was performed against experimental data. An example of such validation presented for the conditions of ionization blackout studies along the reentry trajectory of the RAM C-II capsule in Fig 1. DSMC computations of electron density compared with measurements by reflectometers for a wide range of altitudes.

Software module for computation of thermal radiation of the gas on the spacecraft surface including contribution of different emission processes (neutral gas species spectra as well as Bremsstrahlung in field of charged particles of gas) coupled with the SMILE++ system was developed. It was applied to the case of aerothermodynamic characteristics of ORION space vehicle. The effect of radiation processes on distributed heat flux was analyzed for different angles of attack and Mach number values at the example of parameters of Earth atmosphere reentry at 80 km altitude. The radiative heat flux slightly lower then convective heat flux was obtained, as shown in the table 1.

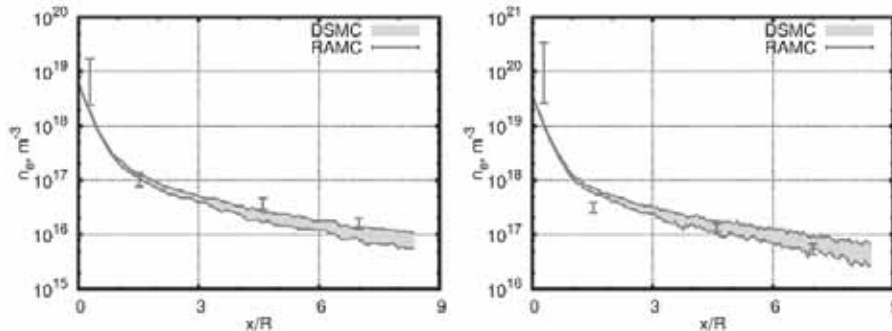


Figure 1 : Electron number density along the capsule surface for 77 (left) and 73 km (right). Comparison of the DSMC results with RAM-C II flight measurements.

Table. 1 : Thermal radiation heat flux for the ORION space vehicle at 80 km.

M	α ,°	Ch(conv)	Qc(conv), kW	Ch(rad)	Qr(rad), kW
10	20	0.0670	218	9E-09	0.03
20	10	0.0650	1690	0.0422	1102
20	20	0.0700	1750	0.0370	965
20	30	0.0622	1625	0.0319	832
30	10	0.0442	3898	0.0345	3043
30	20	0.0413	3642	0.0300	2642
30	30	0.0504	4444	0.0307	2708

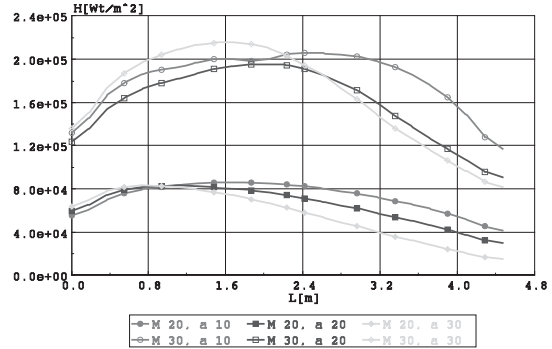


Figure 2 : Radiative heat flux distribution along the symmetry line of the ORION space vehicle.

3. Achievements

All of the expected results were achieved.

4. Summaries and future plans

The results of these comparisons prove good agreement between the DSMC simulations and RAM C-II measurements and high sensitivity of the calculated electron density in the shock layer to taking into account thermal nonequilibrium in models of chemical reactions. It is demonstrated that reactions of dissociative recombination of ions and electrons should be taken into account for RAM capsule flight altitudes lower than 77 km. At the flight altitude of 81 km, these reactions exert a minor effect on the electron density. The radiative heat flux for ORION capsule geometry for different parameters (Mach number and angles of attack) compared with convective heat flux. Large contribution of the thermal radiation phenomena to heat of the capsule surface obtained for M = 20 and 30, while for M = 10 this contribution was very small.

The further development and numerical implementation of collision models and algorithms for the description of these phenomena is planned. Investigations of high enthalpy flows with the use of kinetic description (DSMC method) will be held using developed models of ionization processes. This activity will allow analysis of super orbital space vehicle reentry aspects to be done.

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] Alexander Shevyrin, Mikhail Ivanov, Yevgeniy Bondar, Pavel Vashchenkov, Shigeru Yonemura: Numerical Investigation of Ionization and Radiation Processes in Rarefied Reentry Flows, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 18-19.
- [2] Pavel Vashchenkov, Yevgeniy Bondar, Alexander Shevyrin, Shigeru Yonemura, and Mikhail Ivanov: Numerical Study of High-Altitude Aerothermodynamics of the RAM-C II Hypersonic Flight Experiment, *Proceedings of Tenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD)*, Sendai, (2013), pp. 146-147 (on flash drive).
- [3] Mikhail Ivanov, Alexander Kashkovsky, Pavel Vaschenkov, Anton Shershnev: Parallel Implementation of DSMC Method on Graphic Card for High Altitude Aerothermodynamics of Space Vehicles, *Proceedings of Tenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD)*, Sendai, (2013), pp. 208-209 (on flash drive).
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J13059
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	2nd year

Investigation of Shock Waves Propagation on Microscales

Mikhail Ivanov*†, Kaoru Maruta**††, Yevgeniy Bondar*, Georgy Shoev*

*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics,

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

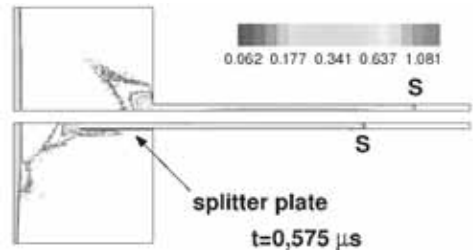
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

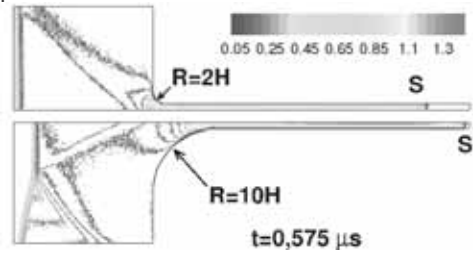
The main challenge of this project is numerical study of the shock wave propagation in microchannels for different Knudsen (Reynolds) numbers. Shock propagation is considered for conditions when CFD methods are still valid as well as kinetic description of the flow is required. Process of the entry of the shock wave (generated in conventional shock tube) into the microchannel is studied in detail.

2. Details of program implement

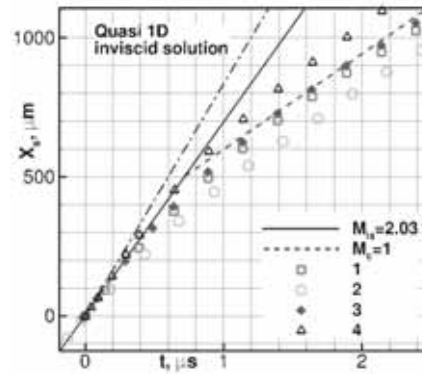
The main goal for this year was to consider the influence of the microchannel entrance shape on subsequent propagation of the shock wave with allowance for viscosity, heat conduction, and rarefaction effects. The numerical simulations of the entry of a shock wave with the Mach number $M_{is}=2.03$ into a microchannel and its further propagation were performed for a diatomic gas ($\gamma=1.4$) at the Knudsen number $Kn=8 \cdot 10^{-2}$. We considered four designs of the microchannel entrance: channel with a cross-sectional discontinuity, junction of two channels with an additional thin separating plate, and rounded junction in the form of a sector with an angle of 90° (quarter of a circumference with the rounding radii $R=2 \cdot H$ and $R=10 \cdot H$, where H is the microchannel half-height). The Mach number contours at the same time moment ($t=0.575 \mu\text{m}$) for different geometries of the microchannel entrance are compared in Fig. 1a, b. The time $t=0$ is the instant when the shock enters the microchannel. "S" points location of the shock propagating over the microchannel. The boundary layer is formed on the microchannel walls, which is usually ignored in inviscid approach. Figure 1c shows the shock wave coordinates inside the microchannel as functions of time for all considered cases. Microchannel entrance corresponds to $x_s=0$. The solid line illustrates the shock wave propagation with a constant velocity equal to the incident wave velocity, and the dashed line shows propagation of the sonic wave. The dash dotted curve corresponds to inviscid solution in accordance with the quasi-one-dimensional model (Salas, 1991). It is clearly seen that the shock wave in the case with geometry 4 propagates faster than in all other viscous cases. In the case 4 small amplification of the shock wave is observed until the time instant $t=0.6 \mu\text{s}$ and intense decay occurs at $t>0.6 \mu\text{s}$. No amplification of the shock wave is observed in cases with geometries 1, 2, and 3. Note that the wave velocity becomes close to the velocity of sound in the quiescent gas at $t>1.2 \mu\text{s}$. As a whole, we can state that inviscid solution predicts amplification of the shock wave, while viscous computations give the shock wave attenuation, because of the influence of heat losses and viscous friction on the walls.



(a) Channel with a cross-sectional discontinuity and junction of two channels with an additional splitter plate



(b) Rounded junction of two channels



(c) Shock wave coordinate versus time for different entrance geometries: channel with a cross-sectional discontinuity (1), junction of two channels with a splitter plate (2), and junctions of two channels with a rounding of radius $R=2\cdot H$ (3) and $R=10\cdot H$ (4)

Figure 1 : Results of DSMC computations.

3. Achievements

The expected results were achieved completely.

4. Summaries and future plans

The results of viscous simulations reveal intense attenuation of the shock wave to a velocity close to the velocity of sound in a quiescent gas. It is demonstrated that the shape of the microchannel entrance can be used to affect further shock wave propagation. At the next stage of the project numerical study of the shock wave propagation in microtube (viscous shock tube problem) based on continuum approach will be performed for conditions corresponding to available experimental data (published by Duff). Numerical and experimental results will be compared. Effects of flow rarefaction and dissipation on shock wave propagation also will be analyzed via comparison with classical (inviscid) gas dynamic solution.

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] G. Shoen, Ye. Bondar, K. Maruta and M. Ivanov: Viscosity Effects on Shock Wave Propagation in Microchannels, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 114-115.

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

課題番号	J13060
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

高機能ハイブリッドプラズマ流動システムを用いた液相微粒子プロセス
Solution Particle Process Using Advanced Hybrid Plasma Flow System

西山 秀哉*†, O. P. Solonenko**††, 高奈 秀匡*, 張 柱鏞*

*東北大学流体科学研究所, **ロシア科学アカデミーシベリア支部・理論および応用力学研究所

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究の目的は二つの高機能ハイブリッドプラズマ流動システムを用いた液相微粒子プロセスより高機能性微粒子の創製と液相有機物質の分解である。一番目、DC-RF ハイブリッドプラズマ流動システムを用いて液相微粒子原料より高機能性微粒子を創製し、メチレンブルーの脱色率を向上させる。二番目、革新的な熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムを新たに構築し、液相有機物質の分解率を向上させる。

2. 研究成果の内容

一番目、高機能性微粒子である炭素を含んだ酸化チタンは純粋な酸化チタンより可視光の吸収率が高いし、可視光だけ照射しても光触媒反応が活発になる特徴がある。この高機能性微粒子は光触媒反応よりラジカルを生成するため、水浄化、太陽電池、バイオ材料などのさまざまな分野に応用される。高機能性微粒子を創製するため、DC-RF ハイブリッドプラズマ流動システムを用いた液相微粒子プロセスの創製方法を提案した。液相微粒子原料をDC-RF ハイブリッドプラズマ流に噴霧させると、マイクロサイズの液相微粒子原料はハイブリッドプラズマ流と反応して酸化、解離、イオン化され、チタン、炭素や酸素に分かれる。しかし、酸素の濃度が低いため、炭素とチタンが結合し、ナノ高機能性微粒子が創製される。図1は液相微粒子プロセスより創製された高機能性微粒子を用いて可視光だけ照射したときのメチレンブルーの脱色率を示している。高機能性微粒子と商用酸化チタンのメチレンブルー

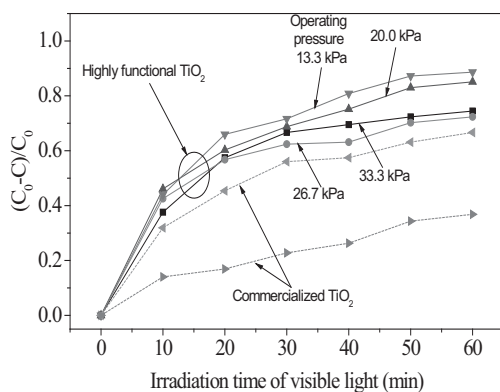


図1：高機能性微粒子のメチレンブルーの脱色率

図2：熱・非熱ハイブリッドプラズマ流

一の脱色率を比較すると、高機能性微粒子の脱色率がより高くなる。一步、違う作動圧力で創製されたとき、メチレンブルーの脱色率が異なり、より低い作動圧力で創製された微粒子がより高いメチレンブルーの脱色率を有する。XRD の分析結果より、作動圧力を下げると、酸化チタンの Anatase/Rutile の含有量の割合が高くなるためであると思われる。二番目、液相有機物質を分解させるため、革新的な熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムを構築した。この革新的なシステムは熱源としての熱プラズマジェットと活性化学種の発生源としての非熱プラズマをハイブリッド化したものである。このハイブリッドプラズマ流の特徴として、図 2 のように熱プラズマジェットと非熱プラズマ反応器の電極の間にプラズマ柱ができる。

3. 研究目標の達成状況

一番目、DC-RF ハイブリッドプラズマ流動システムを用いた液相微粒子プロセスより創製された高機能性微粒子は環境浄化への応用が有効であることを明らかにした。二番目、革新的な熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムの構築に成功した。

4. まとめと今後の課題

DC-RF ハイブリッドプラズマ流動システムを用いた液相微粒子プロセスは低い作動圧力で高機能性微粒子を創製した場合、光触媒反応によるメチレンブルーの分解効率が高くなることをわかった。今後には、熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムを用いて分光特性、電気特性と熱流動特性を調べ、このシステムを最適化する。その後、液相微粒子プロセスより液相有機物質を分解させ、分解率を向上させる。別にミネソタ大学へ訪問し、plasmonic ナノ微粒子の最新創製技術も研究する計画である。

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] J. Jang, H. Takana, Y. Ando, O. P. Solonenko, and H. Nishiyama: Evaluation of Highly Functional TiO₂ Synthesized by Solution Precursor Spraying in a DC-RF Hybrid Plasma Flow System, *J. Phys.: Conference series*, Vol. 441, (2013), 012032 (7 pages).

*[2] J. Jang, H. Takana, Y. Ando, O. P. Solonenko, and H. Nishiyama: Preparation of Carbon-Doped TiO₂ Nanopowder Synthesized by Droplet Injection of Solution Precursor in a DC-RF Hybrid Plasma Flow System, *J. Therm. Spray Technol.*, Vol. 22, No. 6, (2013), pp. 974-982.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[3] O. P. Solonenko, H. Nishiyama, A. Smirnov, H. Takana, and J. Jang: Optimization of Transfer and Non-Transfer Arc Torches at Different Operation Conditions by Flow Patterns Visualization, *Proceedings of the 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*, Nara, (2013), USB.

[4] J. Jang and H. Nishiyama: DC Arc-DBD Coupled Plasma Flow System for Metal Surface Treatment, *Proceedings of the 26th Symposium of Plasma Science for Materials*, Kyusyu, (2013).

*[5] J. Jang, H. Takana, Y. Ando, O. P. Solonenko, and H. Nishiyama: Solution Particle Process using Advanced Hybrid Plasma Flow System, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 116-117.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J13061
Classification	General collaborative research
Subject area	Life Science
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year (progressing)

Generation and Transport of Chemical Species in Low-Temperature Atmospheric Plasma for Sanitization Device

Tetsuji Shimizu*†, Takehiko Sato**††

Gregor Morfill*, Daisuke Yoshino**, Masashi Hara***

*Max-Planck Institute for extraterrestrial physics/ terraplasma GmbH

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Disinfection and sterilization in public spaces are of increasing concern because of the growth of hospital infection as well as the increase of antibiotic-resistant strains. It is necessary and important to develop a new bactericidal system to prevent infections. Recently, it has been shown that cold atmospheric plasmas have a strong bactericidal property. In this project, we aimed at observing cold atmospheric plasma flow in large area as a first step. The key issue is the production and transport of chemical species both in gas and liquid phase since they are responsible for the inactivation of microorganisms. A new set-up has been built up using an insulator-coated wire and the characteristic of the new set-up is discussed.

2. Details of program implement

As reported previously, a plasma discharge was generated between a pin electrode and water surface by applying high voltage. The produced plasma develops flow in both gas and liquid phase. The gas flow was driven via collisions between accelerated ions and neutrals and this induced gas flow generates a liquid flow by the friction between moving gas molecules and the water surface. Using the pin electrode, the plasma application is limited in a small area since the plasma discharge was local. In order to enlarge the plasma application area, an insulator (polyimide) coated wire placed parallel to the water surface was used as a powered electrode and a plasma discharge was produced toward the water surface.

The wire electrode of 0.2 mm in diameter was placed 1 mm above the surface of water in a glass cell whose size was $10 \times 10 \times 8$ mm³. Below the glass cell there was a metal plate. By applying a high voltage of 7.5 kV_{0p} with 5 kHz frequency, a dielectric barrier discharge was produced homogeneously between the wire electrode and water surface. Used water was pure water, so that the electrical conductivity before the plasma discharge was high.

By Schlieren observation, we confirmed that the gas flow was driven also by the wire electrode. Since the gas flow was generated from the wire, the generated flow profile in water was close to simple movement from top to bottom. This is different from the flow pattern by the pin electrode. By the pin electrode, the formed water flow was a circulating flow. In order to evaluate the effect on water property by the plasma discharge, the change in pH was monitored. The dissolved species in water is important for bactericidal effect. To compare with the previous wire electrode, the changes in pH for both the wire and pin electrodes are shown in figure. The reduction of pH is mainly

by the production of nitric acid in gas. The produced nitric acid in gas dissolves in water and pH decreases. This result shows that the productions of chemical species by the both electrodes are similar. This result is supported by the measurement of NO_x and O_3 in water.

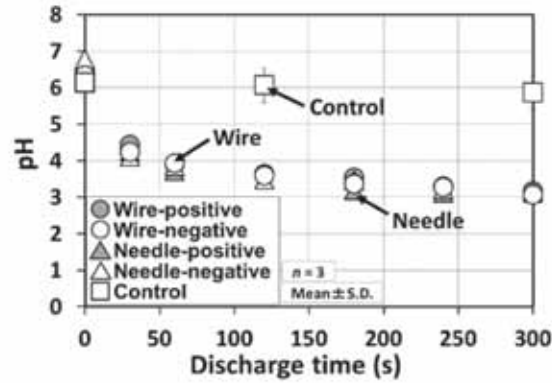


Figure: Change of pH in water by both the wire and pin electrodes.

3. Achievements

We have developed a larger electrode system using the insulated wire and confirmed that a homogeneous plasma discharge was produced. The gas flow as well as water flow was monitored by Schlieren visualization. The dissolved species in water by the plasma discharge were measured and it is shown that the dissolved species were similar to those generated by the previous pin-electrode system.

4. Summaries and future plans

The plasma discharge produced between the insulated wire electrode and water surface develops a gas flow. By this plasma discharge, we can have a plasma application for 10 mm, which is larger than the plasma application by the previous pin electrode. There are several chemical species dissolved in water, e.g. NO_x and ozone. Those species are important to characterize the bactericidal property in water. This result is important because large area plasma treatment could be achieved by this wire electrode system.

For the next step, it is important to optimize the plasma discharge for biomedical applications, for example, disinfection. Through the optimization process, the relation between the plasma property (especially gas flow formation and chemical species production) and bio-application can be revealed clearly.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
 - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] T. Shimizu, G. Morfill, N. Kishimoto, M. Hara, D. Yoshino, T. Sato: Flow Formation in Atmospheric Plasma Discharge between Pin Electrode and Water Surface, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 70-71.
- [2] M. Hara, D. Yoshino, T. Shimizu, T. Sato: Characteristics of Chemical Species Generated by a Gas-Liquid Plasma Flow Using a Wire Electrode, *Proceedings of the Tenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2013), pp. 642-643.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J13062
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year

Numerical and Experimental Research on Active Control of Self-Sustained Flow
Oscillations with Sound Interaction

Mikael A. Langthjem*†, Masami Nakano**††
 *Faculty of Engineering, Yamagata University,
 **Institute of Fluid Science, Tohoku University
 †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The project is concerned with a modified version of the hole-tone problem, also referred to in Lord Rayleigh's *Theory of Sound* as the bird-call. The purpose is to investigate the influence on the sound generation of an expansion chamber enclosing the jet, a tailpipe, and a combination of both. We hope to obtain a thorough understanding of self-sustained flow oscillations and their interaction with (i) acoustic standing waves and (ii) acoustic forced excitation (e.g. via loudspeakers). At the same time, it is a goal to develop a mathematically “elegant” and computationally fast method for aeroacoustic analysis.

2. Details of program implement

We have investigated self-sustained flow oscillations in a hole-tone system with a tailpipe. In particular, we have investigated how the flow oscillations can generate acoustic standing waves in the tailpipe, and interact with them.

The unstable shear layer of the jet is modeled via a discrete vortex method, based on axisymmetric vortex rings. The aeroacoustic model is based on the Powell-Howe theory of vortex sound. Boundary integrals are discretized via the boundary element method. To this end, we have developed a Galerkin-type marching-in-time boundary element method, which represents the hole-tone system. This has been coupled with an analytical solution for the standing-acoustic waves in the tailpipe.

3. Achievements

(a) We have found that the use of a discrete vortex method in combination with the theory of vortex sound and the boundary element method is an efficient and computationally simple approach for simulation of flow-acoustic interaction problems, like the hole-tone/pipe resonance problem considered here.

(b) We have found that the employed time-domain boundary element method can be made numerically stable; but (physical, pipe) resonances within the closed boundary domain trigger instability problems. Use of the analytical solution for the acoustic pipe oscillations cures the numerical stability problem. It also reduces the computational costs considerably.

(c) We have found that the numerical model can display lock-in of the self-sustained flow oscillations to the resonant acoustic oscillations.

4. Summaries and future plans

To sum up, in the fiscal year 2013-2014 we have developed a mathematical/numerical model of a simple axisymmetric silencer-like model, consisting of a hole-tone feedback system equipped with a tailpipe. It is demonstrated through numerical examples that this numerical model can display lock-in of the self-sustained flow oscillations to the resonant acoustic oscillations.

In the fiscal year 2014-2015 we will work towards the main aim of the project, namely the study of active control. In particular, we wish to understand how external acoustic excitation (by loud-speakers) can initiate lock-in of the self-sustained (hole-tone) flow oscillations to the pipe acoustic resonance frequency, to the excitation frequency itself, and to certain fractions of these frequency values. The computations will be verified by experiments.

At the same time, we wish to investigate “smarter”, more analytically based, modeling approaches. In particular, we wish to investigate the following approaches for taking into account the scattering of sound from the end plate: (1) a Born-approximation approach, (2) a compact Green’s function approach, and (3) an approach based on Curle’s equation.

Finally, we wish to study a more efficient formulation of the discrete vortex method for simulating the unsteady sound-generating flow, namely the Brown & Michael formulation.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] M. A. Langthjem and M. Nakano: Application of the time-domain boundary element method to analysis of flow-acoustic interaction in a hole-tone feedback system with a tailpipe, *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 96, No. 4, (2013), pp. 227-241.

[2] M. A. Langthjem and M. Nakano: Application of the time-domain boundary element method to analysis of flow-acoustic interaction in expansion chamber silencer models, *Advances in Boundary Element & Meshless Techniques XIV* (A. Sellier, M.H. Aliabadi, Eds.), EC Ltd., UK, (2013), pp. 280-285.

[3] M. A. Langthjem and M. Nakano: Flow-acoustic interaction in expansion chamber silencer models. *Proceedings of the 4th International Conference on Jets, Wakes, and Separated Flows*, Nagoya, (2013), 6 pages.

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

[4] M. A. Langthjem and M. Nakano: Numerical analysis of flow-acoustic interaction in a hole tone system with a tail pipe, *Proceedings of the Tenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2013), pp. 168-169.

*[5] M. A. Langthjem and M. Nakano: Numerical and experimental research on active control of self-sustained flow oscillations with sound interaction. *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 162-163.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J13063
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

柔いフィンの流体励起振動に関する研究
Study on Flow-induced Vibration of Soft Fins

李鹿 輝[†], 中野 政身^{**††}

*山形大学大学院理工学研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

乱流拡散とは、流れの乱れによって物質が拡散される現象のことである。流れが何らかの攪乱によって不安定になると不規則な速度や圧力の変動を伴う流れ「乱流」になる。自励振動のフィンを用いることで流れに乱れを発生させ、物質を拡散させることが可能になった。空気輸送では管路摩耗の防ぎと省エネルギーのために、可能な限り作動流体である空気の流速を抑えることが課題である。最近、自励振動のフィンを用いて被輸送物の堆積や閉塞を防ぎながら輸送速度を低下させる研究が行っている。本研究は乱流により柔いフィンの励起振動を対象として、効率的に共振を発生するフィン装置の開発を目的とする。その装置は粉粒体空気輸送に応用させ、高効率省エネルギーの輸送を実現する。

2. 研究成果の内容

(1) 実験装置及び方法

本研究で使用したフィンを Fig.1 に示す。材質はポリエチレン(PE)、長さ $L=250\text{mm}$ (代表寸法)、幅 30mm , 50mm の2種類のフィンを使用した。以下にそれぞれは M30, M50 と呼ぶ。

羽のない扇風機が発生した空気流中に Fig.2 のようにフィンを設置する。トレーサー粒子を扇風機の前方に落下させて流す。フィン後方の流れをレーザシート光で照射する。その流れ場は撮影速度 1000FPS , シャッタースピード $1/3000\text{s}$ のハイスピードカメラにより撮影される。撮影した約 1000 枚の連続画像を PIV 解析し、流れ場の乱れ強さを算出する。前方の空気流速は $U=2.1\text{m/s}$, レイノルズ数は $Re=38,800$ である。

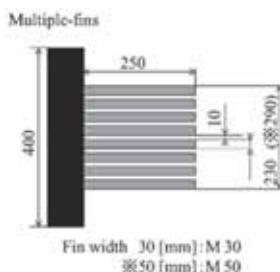


Fig.1 Soft fins

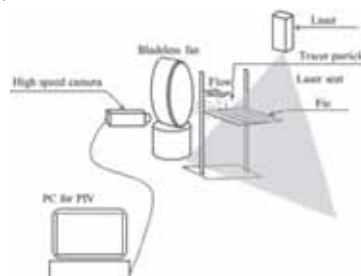


Fig.2 Experimental setup of PIV

(2) 実験結果及び考察

各フィンのストローハル数を Table 1 に示す。ストローハル数は M50 の値が最大である。これは基準面積が M50 (12500mm^2) は M30 (7500mm^2) より大きく、流れの乱れをより

受けるからと考えられる。また、フィンの振動数とフィンの固有振動数を比較すると、共振の効果は無いことがわかる。

Fig.3 は M30 と M50 の後流における無次元化した瞬時渦度の分布を示す。フィン後方に発生した渦の強さ（瞬時渦度）はほぼ同じが、M50 は M30 より多い渦が発生したことがわかった。また、Fig.4 は M30 と M50 の後流における y 方向の乱れ強さの比較を示す。M30, M50 の順で乱れ強さが増大していることがわかる。これは M50 が M30 よりストローハル数が大きく、より頻繁に渦を発生させたことと考えられる。

Table 1 Fins' Strouhal number

Fins	Frequency f [Hz]	St
M30	6.25	0.74
M50	6.67	0.79

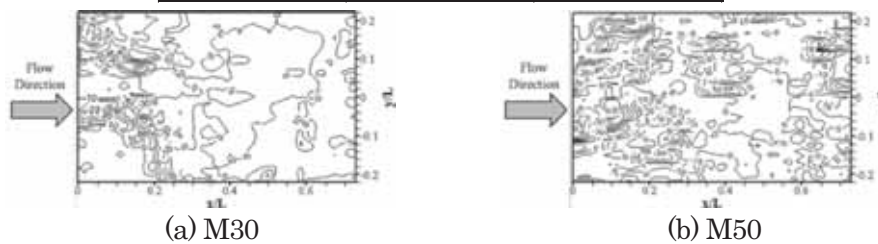


Fig.3 Vorticity contours of fin wake flow measured by high-speed PIV

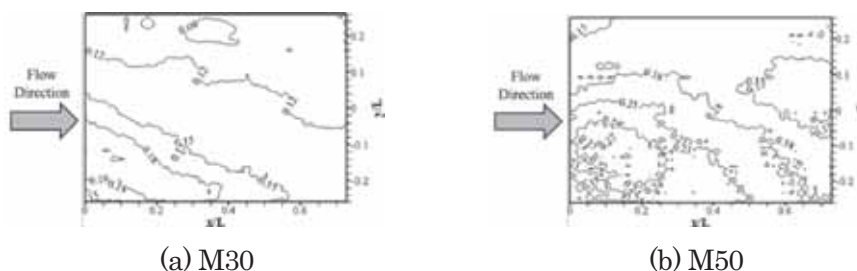


Fig.4 Turbulent intensity contours of fin wake flow measured by high-speed PIV

3. 研究目標の達成状況

乱流により柔いフィンの励起振動のメカニクスを解明し、共振発生の流れの条件を明らかにできる。新たに考案する共振発生のもろかいフィン装置は粉粒体空気輸送に応用させ、高効率省エネルギーの輸送を期待できる。

4. まとめと今後の課題

柔いフィンの励起振動により発生した流れ場を PIV で計測し、フィンの形状と後流乱れ強さとの関係を明らかにした。また、新たに考案したもろかいフィン装置を粉粒体空気輸送に適用して、圧力損失や輸送空気速度の評価から、省エネルギーの空気輸送を実現できる可能性を見出した。

しかし、柔いフィンの周期的振動発生条件はまだ十分には解明されていない。フィンのフラッピング振動挙動と流れの構造との相互関係を実験計測で明らかにすることは今後の課題となる。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む) なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] A. Rinoshika and M. Nakano: Study on Flow-induced Vibration of Soft Fins, *Proceedings of the Thirteen International Symposium on Advanced Flow Information*, Sendai, (2013), pp. 164-165.

*[2] 鈴木駿也, 李鹿輝, 中野政身: もろかいフィンの振動による誘発した流れの可視化, 可視化情報全国講演会, Vol. 33, Suppl. No. 2, 会津, (2013), pp. 225-226.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

Project code	J13064
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year (progressing)

Study of Thin Films and Ribbons of Heusler Alloys for the Use in Energy Saving Magnetic Refrigeration Technology

Vladimir Khovaylo*†, Hiroyuki Miki**, Toshiyuki Takagi***††,
Anna Kosogor*, Maria Lyange*, Makoto Ohtsuka****, Sergey Taskaev*****,
Valeria Rodionova*****

*National University of Science and Technology “MISiS”

**Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University

***Institute of Fluid Science, Tohoku University

****Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University

*****Chelyabinsk State University

*****Physical-Technical Institute, Immanuel Kant Baltic Federal University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The project is aimed at the study of thin films and ribbons of Heusler alloys, specifically stability of their properties and performance under aging, thermo- or magnetic field-cycling, for the potential use in the energy efficient magnetic refrigeration technology.

2. Details of program implement

The heat flow during martensitic transformation (MT) has been studied in both experimental and theoretical ways. The influence of aging on MT temperatures is analyzed; the emphasis was made on the evaluation of the two-phase temperature range. The MT strain ε_{MT} and the volume change v_{MT} accompanying the MT of crystals with defects can be found from the minimum condition for the Gibbs potential of deformable crystal lattice affected by the internal stress

$$G(T, t) = \frac{1}{2}C_1v^2 + \frac{1}{2}C_2(T)\varepsilon^2 + \frac{1}{3}C_3\varepsilon^3 + \frac{1}{4}C_4\varepsilon^4 \quad (1)$$

$$+ C_5v\varepsilon^2 + 3C_5\Omega v\varepsilon^3 + P^{(i)}(t)v - \sigma_{zz}^{(i)}(t)\varepsilon,$$

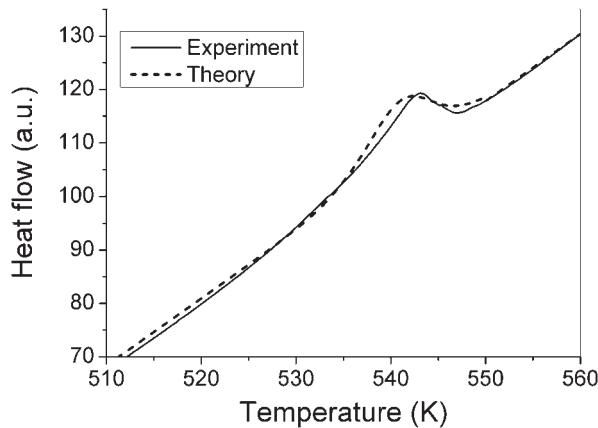


Fig. 1. Experimental (solid line) and theoretical (dashed line) temperature dependencies of the heat flow during reverse MT.

where v is volume change, ε is shear strain, C_{1-5} are the elastic modules and Ω is a dimensionless constant prescribing the value of volume change that accompanies the spontaneous shear strain occurring in the course of MT. The entropy change during MT can be calculated from the partial derivative of the Gibbs potential $S = -\partial G/\partial T$. If the martensitic transformation temperature is higher than the Curie temperature, the elastic

(non-magnetic) part of entropy change can be found from the Eq. (1). As long as the heat evolution is equal to $\delta Q = SdT$, the entropy change can be related to the experimentally measured heat flow during MT. The heat flow measured during the reverse MT of a Ni-Mn-Ga alloy is shown in Fig.1 in comparison with theoretical temperature dependence computed using Eq. (1). Figure 1 is plotted for zero value of internal stress. The heat flow peak is related to the MT and the linear temperature dependence is taken into account according to the experimental conditions. The integration of the heat flow results in the value of entropy change during MT $\Delta S \approx 1.7 \times 10^{-2}$ J/gK. The values of characteristic temperatures of austenite start T_{AS} and austenite finish T_{AF} can be found from Fig. 1. A reasonable agreement between theoretical and experimental results is achieved for the internal pressure $P^{(i)} = 0.7$ GPa and the axial stress $\sigma_{zz}^{(i)} = -7$ MPa .

3. Achievements

The main achievements are as follow

- Both internal pressure and axial stress noticeably contribute to the influence of aging on the width of the two-phase temperature range.
- The combination of two mechanisms of defect reconfiguration with different rate points to a possibility of non-monotonous dependence of characteristics temperatures on the axial stress value.

4. Summaries and future plans

In summary, a model that allows one to link the entropy change during martensitic transformation in the NiMnX alloys with temperature derivative of shear elastic modulus and the internal strains has been developed. Future plans is to evaluate the stability of functional properties and performance of thin films and ribbons of NiMnX under cyclic action of temperature or magnetic field and to study magnetic and transport properties of these materials.

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] V. Khovaylo, B. Hernando, V. Koledov, H. Miki, D. Kuchin, V. Shavrov, and H. Miki: Structural and magnetic properties of Ni(Fe)-Mn-Ga melt-spun ribbons, *Program and Book of Abstracts of 21st Soft Magnetic Materials Conference (SMM-21)*, Budapest, (2013), p. 57.
 - [2] V. Khovaylo, V. Rodionova, K. Chichay, E. Gan'shina, G. Zykov, M. Ohtsuka, R.Y. Umetsu, A. Okubo, and R. Kainuma: Magnetic, magneto-optical and magnetotransport properties of $\text{Co}_2(\text{Fe,Ti})\text{Ga}$ thin films, *Program Book of 58th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM-58)*, Colorado, (2013), p. 230.
- *[3] A. Kosogor, V. Khovaylo, H. Miki, and T. Takagi: Modeling of heat flow and entropy change at martensitic transformations in the framework of Landau theory, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 166-167.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J13065
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2013.4 ~ 2014.3
継続年数	1年目 (発展)

波のエネルギーに基づく軸流を持つ渦の安定性解析とその応用
Stability Analysis of Vortices with Axial Flow based on Energetics and Its Application

服部 裕司*†, 福本 康秀**††

*東北大学流体科学研究所, **九州大学マス・フォア・インダストリ研究所

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

軸流をもつ渦の安定性を波のエネルギーの立場から捉え直すことにより, 任意の渦度分布をもつ渦のパラメタ共鳴不安定性の発現メカニズムを明らかにする. 波のエネルギーの表式を求めることにより, 軸流をもつ渦流れの不安定性の判別を行う. さらに複数の不安定源がある場合の取り扱い方法を確立する. その応用により, ひずみ変形を受けた翼端渦や, 回転翼端渦のモデルであるらせん渦の不安定性を解明する.

2. 研究成果の内容

前年度までの公募共同研究「渦構造の安定性に対する軸流効果の研究」で, 回転翼端渦のモデルであるらせん渦の曲率不安定性について振りの効果と軸流の効果調べたが, このとき分散曲線における孤立モードが軸流の増加とともに特徴的な振る舞いを示し, 不安定成長率に大きく影響することを明らかにした. 本年度はこの結果を波のエネルギーの立場から説明できるかどうかを検証した.

非粘性渦流れにおいて中立安定な波のエネルギーは分散曲線 $D(m, k, \omega) = 0$ 上で

$$(\text{wave energy}) = \omega \frac{\partial D}{\partial \omega} |E|^2$$

により与えられる. したがって, 分散関係の ω に対する依存性がエネルギーの符号を決める. 上式において分散関係は次元を含めて適切に定める必要があるが, 今回は知られている式

$$D(m, k, \omega) = \frac{(-\omega + m)^2}{\Sigma} [\eta \Sigma J'_{|m|}(\eta) + 2m J_{|m|}(\eta)] + (4 - \Sigma^2) \frac{k K'_m(k)}{K_m(k)} J_{|m|}(\eta)$$

を用いた. その結果, 孤立モードの場合, 図1において分散曲線の傾きが無限大になる2点でエネルギーの符号が交代することが分かった.

曲率不安定性は2個の中立安定な波の分散曲線の交点で起こる. ただし, 2個の波のエネルギーが同符号である場合には不安定とはならず, 異符号の場合に不安定となる. 孤立モードのエネルギーの符号の交代に対応し, 安定/不安定も交代することがわかった. 図1にその例を示す. 孤立モードの分散曲線に沿って, 不安定→安定→不安定→安定→不安定のように安定性の交代が見られる.

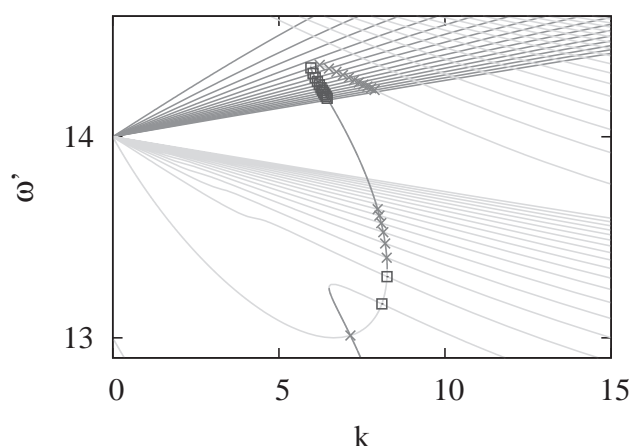


図1：分散曲線と交点の安定性. ×：不安定，□：安定. $\omega' = 14$ から最も負の急こう配で伸びる線が孤立モードである.

3. 研究目標の達成状況

応用上重要な渦流れである翼端渦や回転翼端渦は一般に軸流をもち，その渦度分布は一般に翼を含む系全体の境界条件に依存する．軸流をもつ渦の安定性の一般理論を構築することにより，これらの渦の安定性を解明し，渦度分布を制御することによる流れの安定化および不安定化への道を切り拓くことが本研究の目標である．波のエネルギーによる安定性の判別は，一般には煩雑な安定性解析に対して，簡便な代替手段を与える．本年度はその準備として具体例において検証を行うことができた．初年度としては十分な結果を得たといえる．

4. まとめと今後の課題

軸流をもつ渦の曲率不安定性について，波のエネルギーの立場から安定性の判別を行い，孤立モードの特徴的な振る舞いにより安定/不安定の交代が実際に起きていることを明らかにした．

今後は，次元を含めて正しい分散関係の確認と安定性の判別に対する影響の有無を確認し，一般の渦度分布の場合や，歪み変形を受けた渦（楕円型不安定性）の場合，さらに複合的な不安定性への応用を行う．

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] Yuji Hattori and Yasuhide Fukumoto: Modal stability analysis of a helical vortex tube with axial flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 738, (2014), pp. 222-249.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Yasuhide Fukumoto and Yuji Hattori: Stability Analysis of Vortices with Axial Flow based on Energetics and its Application, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 168-169.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J13066
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	2年目

常温圧縮せん断法を用いた Ti/Al 複合材料の固化成形
Fabrication of Ti/Al Composite Material by Compression Shearing Method at Room Temperature

中山 昇^{*†}, 高木 敏行^{**††}, 武石 洋征^{***}, 堀田 将臣^{*}, 坂上 将太^{*},
 玉井 寛人^{*}, 鈴木 雄太^{*}, 澤本 一樹^{*}, 武田 翔^{****}, 三木 寛之^{*****}
^{*}信州大学工学部, ^{**}東北大学流体科学研究所,
^{***}千葉工業大学工学部, ^{****}東北大学大学院工学研究科,
^{*****}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

チタン材料は比強度、耐食性に優れるため、医療用材料、海洋建造物、および航空宇宙分野と多岐に渡り使用される。特にアルミとの金属間化合物である TiAl は、軽量、耐食性および耐熱性に優れることから、次世代材料として期待される。一般的に TiAl 合金の合成には、プラズマアーク溶解法や、入熱を必要とする粉末冶金法が用いられてきたが、Ti と Al の化合物は Ti₃Al, TiAl, および TiAl₃ 等多岐に渡るため、多数の化合物相が混在する。特に TiAl 金属間化合物相を安定化させるためにバナジウムなどの他元素を入れることが試みられてきた。しかし、バナジウムは毒性を有するため、生体材料として使用する場合には避けたい。また、骨折等の固定用医療材料としての応用を考慮する場合には薄板化が必要であるが、鋳造等により作製した TiAl 合金は 0.75mm 以下の薄板に成形することができないという問題点を有している。このことから TiAl 合金ではなく Ti/Al 複合材料で同等の機械的性質を有する新しい薄板材料を容易に製造することができれば、以上の問題点が解決できると考えられる。一般の粉末冶金法により Ti/Al 複合材料の開発を行う場合には、低融点金属である Al と高融点材料である Ti の融点を考慮しなければならない。特に、HIP 等加圧を行う手法では、Al の融点以下でも合金化が起こるとされる。したがって、合金化せずに薄板成形を行うためには、入熱を必要とせず、常温下で作製を行う必要がある。

本研究では、純 Ti および純 Al 粉末をボールミリングにより混合し、COSME-RT を用いて高強度な Ti/Al 材料の開発を目的とした。本報では、純 Ti および純 Al 粉末の混合割合が成形体の引張強度に及ぼす影響を明らかにした。

2. 研究成果の内容

純 Ti 粉末と純 Al 粉末を一軸のミリング装置にて回転速度 200 r/min, 混合時間 540 min で混合した。Ti 粉末の混合割合を 25~75vol.% まで変化させ、常温圧縮せん断法で固化成形した。固化成形の条件は、垂直応力 1250MPa, せん断ひずみ 20 であり、成形体の形状は 40 × 10 × 0.25mm である。

成形体の長手方向断面の SEM 像を図 1 に示す。白色は Ti, 灰色は Al である。均一に Al や Ti が分散していることがわかる。成形体が合金化しているのか確認するために XRD パタ

ーンを測定した。図 2 に 75vol.%Ti の XRD パターンを示す。成形後も合金化していないことがわかった。図 3 に Ti の混合割合と引張強さの関係を示す。図 3 中には TiAl 合金の引張強さも併記している。複合則に乗っ取り、Ti の混合割合が増えるに従い、引張強さが増加することがわかる。さらに、Ti が 75%混合することで、TiAl 合金の引張強さに近づくことがわかる。図 4 に破断面の SEM 像を示す。破断は Al で延性破壊していることがわかる。

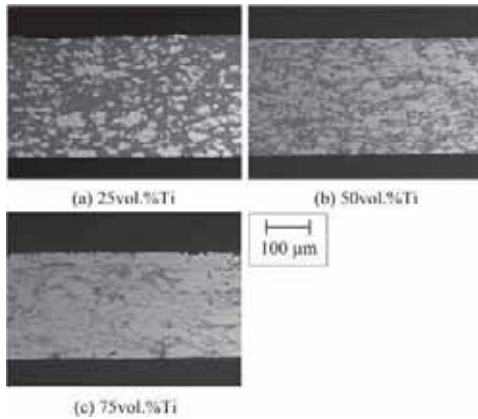


図 1：長手方向断面の SEM 像

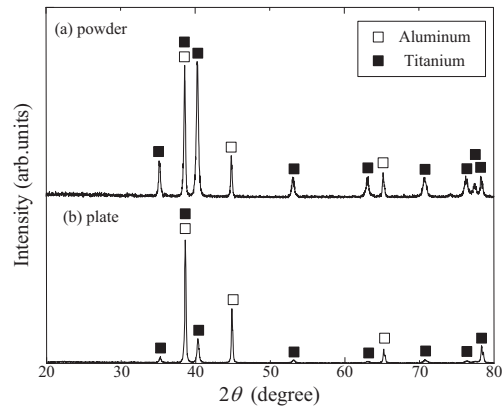


図 2：XRD パターン (75vol.%Ti)

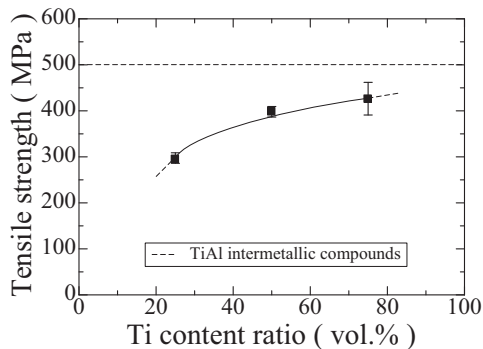


図 3：Ti の混合割合と引張強さの関係

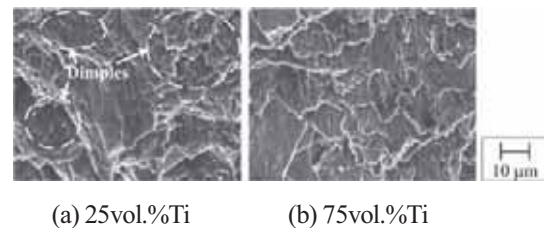


図 4：破断面の SEM 像

3. 研究目標の達成状況

Al と Ti 粉末を混合して複合材料を作製することができたことは十分達成に近づいている。

4. まとめと今後の課題

本研究の結果、Ti の混合割合が増加するにつれて、TiAl 合金の引張強さまで増加することがわかった。今後は、Ti と Al の界面を TEM 等により明らかにする必要がある。

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] Shota Sakagami, Masaomi Horita, Noboru Nakayama, Hiroyuki Miki, and Hiroyuku Takeishi: Effect of Titanium Content Ration on the Mechanical properties of Ti/Al Composite Material Formed by Compression Shearing Method at Room Temperature, *Proceedings of The Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 118-119 .

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13067
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	3年目

プラズマエッチングプロセスにおけるナノスケール表面ダメージ解析
Analyses of Nano-Scale Surface Damages Generated during Plasma Etching Processes

浜口 智志*†, 寒川 誠二**††

唐橋 一浩*, 溝谷 浩平*, 久保田 智広**

*大阪大学大学院工学研究科および大阪大学原子分子イオン制御理工学センター

**東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

半導体デバイスは現在微細化がその限界である原子分子スケールに近づいており、より高性能のデバイスを作製するために、既存のプレーナー型とは異なる新しい構造を持つデバイスの開発が進められている。本研究では、FinFETのような縦型半導体デバイスの超微細加工に必要な新しいプラズマプロセス技術を開発するための表面相互作用に関する基礎的知見を得ることを目的とする。特に、イオンの斜め入射にともなう Si や表面酸化膜のダメージを、各種プラズマパラメータの関数と解明する。

2. 研究成果の内容

半導体デバイスの微細化の進行にとまない、プラズマエッチングプロセスにおいて、プラズマから照射されるイオンや紫外線などによる加工表面から数nmの領域に対するダメージがデバイスの性能に直接的に影響するようになってきている。本研究では、プラズマに基づく新しいプロセス技術を開発するために、中性粒子ビームによるシリコンエッチングプロセスを想定し、エッチング形状シミュレーションを試みた。

まず、プラズマから生成される中性粒子ビームの中性化率を求めた。中性粒子は、グラフィット製の高アスペクト比のアーチャーをプラズマ中のイオンが通過することによって生成する。そこで、正負イオンがグラフィット表面に衝突した際のイオンとグラフィット表面の電荷の授受を、時間依存密度汎関数法を用いてシミュレーションした。プラズマとしては塩素プラズマを想定し、Cl⁺, Cl, Cl₂⁺, Cl₂のグラフィット衝突前後の価電子数を評価し解析することで中性化率を求めた。その結果、負イオンはほぼ100%中性化し、正イオンは60%程度中性化するという結果となった。この結果は実験結果と一致している。

次に、イオンおよび中性粒子が高アスペクト比アーチャーを通過する際の軌道について検討した。まず、アーチャー入口とプラズマが接する部分におけるプラズマのイオンシース電位分布を計算し、イオンの入射軌道を求めた。さらに、イオンおよび中性粒子とアーチャー壁面との衝突を考慮し、アーチャー出口におけるエネルギー・角度分布を求めた。

さらに、その結果を用いて、塩素中性粒子ビームによるシリコンのエッチング形状シミュレーションを行った。表面反応モデルとして、プラズマエッチングでよく知られたイオンアシスト反応に対応する中性粒子アシストエッチング機構を想定し、セルリムーバルモデルを用いた計算を行った。さらに、塩素中性粒子ビームを用いてシリコンのトレンチ形状エッチ

ングを行い、その断面形状を走査型電子顕微鏡により観察した。

実験および計算の結果を図1に示す。左図の上は実験結果、下は計算結果である。実験で得られたエッチング形状を計算はよく再現している。右はマスク開口幅とエッチング深さの関係を示したものである。ここでも、計算結果は実験結果をよく再現していると言える。中性化にアスペクト比 10 のアパーチャを用いた場合、マスク幅が小さくなるとエッチング深さが小さくなる傾向が見られる。これは中性粒子ビームの角度分布によるものだと考えられる。

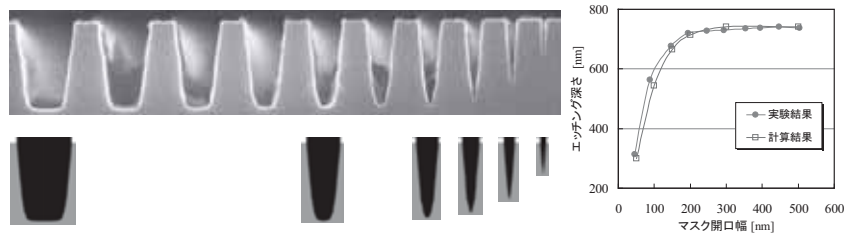


図1：中性粒子ビームエッチングの実験結果と計算結果の比較

3. 研究目標の達成状況

ダメージフリーな FinFET ゲートエッチングに用いることのできる中性粒子ビームについて、計算機シミュレーションを用いたエッチング形状の予測をおこない、実験結果と一致する結果を得た。これは、FinFET 等の次世代デバイス作製プロセスに大いに有用な結果であり、研究目的は十分に達成したと言える。

4. まとめと今後の課題

中性粒子ビームにおけるエッチング形状シミュレーションは完成したが、中性粒子に加えて荷電粒子や放射光が入射するプラズマエッチングにおける表面反応やエッチングシミュレーションは道半ばである。今後はプラズマエッチングにおけるエッチング形状やダメージについて、より深くメカニズムを解明することが必要である。

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)

- *[1] Kazuhiro Karahashi and Satoshi Hamaguchi: Ion beam experiments for the study on plasma-surface interactions, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 47, (2014), 224008(15page).
- [2] Keita Miyake, Tomoko Ito, Michiro Isobe, Kazuhiro Karahashi, Masanaga Fukasawa, Kazunori Nagahata, Tetsuya Tatsumi, Satoshi Hamaguchi: Characterization of polymer layer formation during SiO₂/SiN etching by fluoro/hydrofluorocarbon plasmas, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 53, 03DD02, (2014).
- [3] Tomoko Ito, Kazuhiro Karahashi, Song-Yun Kang, and Satoshi Hamaguchi: Characteristics of silicon etching by silicon chloride ions, *J. Vac. Sci. Technol.*, A 31 (3), (2013), 031301 (5page).

他 合計 14 件

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

合計 63 件

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) 1 件, (受賞) 1 件, (マスコミ発表) なし

Project code	J13068
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year

Energy Release Dynamics in Porous Media

Nickolay Lutsenko*†, Kaoru Maruta**††

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective of the present project is to develop the efficient algorithm for numerical simulations and to investigate the fundamental characteristics of the time-dependent gas flows through porous media with combustion and other energy-release zones.

2. Details of program implement

A lot of catastrophes results in appearance of energy-release zones, such centers of heat often arise in porous media. The obstructions of the ruinous buildings, rocks, soils, peat are porous media in terms of mechanics. The centers of energy release in porous media arise, for example, during the explosions at atomic and industrial facilities, in underground explosions and fires in places of the extraction of natural resources. The example of the exploded unit of the Chernobyl NPP showed that the gas (air) cooling of such energy-release zones may be the only available counteraction method of the disaster.

In the present project the gas flow through the porous objects with energy release zones has been numerically investigated when the object's outlet is partially closed. The gas flows through the solid motionless porous heat-evolutional object, which is bounded of impermeable non-heat-conducting side walls, opened at the bottom and partially opened at the top (Fig. 1). Mathematical model is constructed within the framework of the model of two interactive interpenetrative continua and includes the continuity equations, the momentum conservation equations, the energy equations and the equations of state for each phase (solid and gas). The distinctive feature of the concerned model is that the flow rate and the gas velocity at the porous object inlet and outlet are unknown and must be calculated by solving. The original numerical method have been developed, which is based on a combination of explicit and implicit finite-difference schemes, for investigating unsteady regimes of the gas cooling of the porous objects with heat sources. Modification of this method has been successfully used for modeling the combustion of porous media.



Figure 1: Porous object

Axisymmetric unsteady problems of the gas cooling of porous energy-releasing objects with partial closure of the object's outlet have been solved. It is shown that the cover on the outlet of the porous object significantly reduces the object cooling, the greatest heating occurs in the vicinity of the cover. When the size of the cover increases, the outflow of heat from its vicinity decreases and the temperature significantly increases

in this area. It can lead to local melting and destruction of an object when temperature in the rest of the object isn't high. The gas dynamics within the porous object is shown to be complex. For example, two peaks of vertical gas filtration velocity can arise.

In the course of project implementation Russian project member (Nikolay Lutsenko) visited Institute of Fluid Science, Tohoku University. During the visit Japanese and Russian groups had discussions on the results obtained in the frame of the project and formulated plans of the future research. Project member took part in the 13th International Symposium on Advanced Fluid Information and presented results of the project.

3. Achievements

The results which have been expected in the present project were achieved. The gas flow in the gravity field through the porous objects with energy release zones, which may arise from natural or man-caused disasters, was numerically investigated when the object's outlet is partially closed. The mathematical model and original numerical method, based on the combination of explicit and implicit finite difference schemes, were developed for researching the time-dependent regimes of the gas flow through two-dimensional porous objects with energy release zones.

4. Summaries and future plans

Axisymmetric unsteady problems of gas flow through porous heat-evolutional objects with partial closure of the object's outlet were numerically investigated with various diameters of top cover and diameters and heights of the heat-evolutional zone. It has been shown that the gas flows inside of the porous object are rather complex; the greatest heating occurs in the vicinity of the top cover. When the height of the heat-evolutional zone is equal to the height of the porous object, the closure of the zone of heat evolution by means of the top cover is allowed only when the size of heat-evolutional zone is small. When the process of heat evolution does not occur near the outlet of the porous object, the closure of the heat-evolutional zone by means of the top cover is allowed when the size of the heat-evolutional zone is rather large.

The investigation of some interesting preliminary revealed features of time-dependent processes of heterogeneous combustion in porous media under free convection will be finalized.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] N.A. Lutsenko: Numerical modeling of unsteady gas flow through porous heat-evolutional objects with partial closure of the object's outlet, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 72, (2014), pp. 602-608.

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

*[2] N.A. Lutsenko: On Dynamic Processes in Porous Energy Releasing Objects with Partial Closure of the Object's Outlet, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 52-53.

[3] N.A. Lutsenko: Numerical Modeling of Axisymmetric Unsteady Gas Flow through Porous Heat-Evolutional Objects with Partial Closure of the Object's Outlet, *Proceedings of the 4th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow*, Hong Kong, (2013), 10 pages.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J13069
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	2nd year

Research of Friction and Drilling on Bio-Composite Model

Makoto Ohta*†, Vincent Fridrici**
Philippe Kapsa**††, Hiroyuki Kosukegawa**
Kaihong Yu***,

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Ecole Centrale de Lyon

***Graduate School of Biomedical Science, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

To develop a program for analyzing the relation of blood flow to cell behaviors using LBM method.

2. Details of program implement

In order to investigate the tribological behavior of medical devices in contact with tissue, friction tests for four kinds of medical metallic alloys (316L stainless steel, CoCr, NiTi and TiMoSn) on soft tissue-mimicking poly(vinyl alcohol) hydrogel (PVA-H) biomodel were carried out at low normal load. XPS analysis and wettability tests for them were prepared to understand the difference in friction. According to the surface oxide compositions, these alloys can be divided into two groups: "Fe/Cr-oxide-surface alloys" for 316L and CoCr, and "Ti-oxide-surface alloys" for NiTi and TiMoSn. From the wettability test, Fe/Cr-oxide-surface alloys show lower polar components of surface free energy than Ti-oxide-surface alloys. Fe/Cr-oxide-surface alloys show higher friction coefficients in the elastic friction domain than those of Ti-oxide-surface alloys, while there was no significant difference in the hydrodynamic lubrication. Since elastic friction is governed by the adsorption of hydrogel polymer on counterbody, the surface characteristic of alloys plays an important role in friction. A tentative explanation for this tendency is expressed by linking two different theories describing the adsorption force of hydrogel and wettability of counter material.

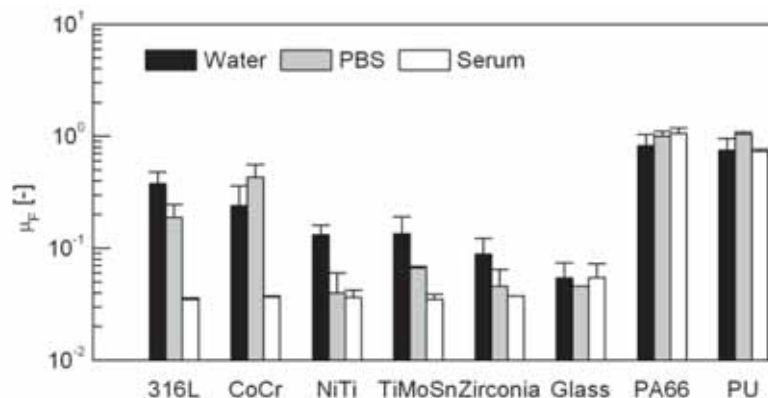


Figure 1 : Maximum friction coefficient (μF) in several lubricants

3. Achievements

Expected result

4. Summaries and future plans

To apply other tissues and bio-materials.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] Hiroyuki Kosukegawa, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Yuji Sutou, Koshi Adachi, Makoto Ohta: Friction Properties of Medical Metallic Alloys on Soft Tissue–Mimicking Poly(Vinyl Alcohol) Hydrogel Biomodel, *Tribo Letter*, (2013), DOI 10.1007/s11249-013-0165-3.

[2] Ding Ma, Travis M.Dumont, Hiroyuki Kosukegawa, Makoto Ohta, Xinjian Yang, Adnan H.Siddiqui, Hui Meng: High Fidelity Virtual Stenting (HiFiVS) for Intracranial Aneurysm Flow Diversion: In Vitro and In Silico, *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 41 No. 10, (2013), pp. 2143-2156.

[3] Yasutomo Shimizu, Ashkan Javadzadegan, Toshiyuki Hayase, Makoto Ohta: Flow observations in elastic stenosis biomodel with comparison to rigid-like model, *Technology and Health Care*, Vol. 21, (2013), pp. 1-10.

[4] Ashkan Javadzadegan, Yasutomo Shimizu, Masud Behnia, Makoto Ohta: Correlation between Reynolds number and eccentricity effect in stenosed artery models, *Technology and Health Care*, Vol. 21, (2013), pp. 357-367.

[5] Kaihong Yu, Tetsui Yamashita, Shigeaki Shingyochi, Kazuo Matsumoto, Makoto Ohta: PIV ANALYSIS FOR FLOW PATTERN AROUND ABLATION CATHETER TO OBSERVE THE FLOW EFFECT ON ELECTRODE, *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, (2013), IMECE2013-62791 (1-8).

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

[6] Ashkan Javadzadegan, Yasutomo Shimizu, Masud Behnia, Makoto Ohta: Correlation between Reynolds number and stenosis morphology in eccentric and concentric artery models, *PIV 2013 Conference*, (2013).

[7] Yasutomo Shimizu, Masanori Kuze, Ashkan Javadzadegan, Masud Behnia, Makoto Ohta: Comparison of flow patterns around stenotic area in elastic PVA-H model and in rigid-like silicone model, *PIV 2013 Conference*, (2013).

[8] Hiroyuki Kosukegawa, Vincent Fridrici, Emmanuelle Laurenceau, Makoto Ohta, Philippe Kapsa: Friction of Medical Materials on PVA Hydrogel in Physiological Lubrication, *World Tribology Congress 2013*, (2013).

[9] Masashi Ohtake, Kei Ozawa, Ken Nakajima, Makoto Ohta: Development of Visualization System for Injection Molding by using PVA, *The 10th ICFD*, (2013).

*[10] Makoto Ohta, Kei Ozawa, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa: Research of Friction and Drilling on Bio-composite Model, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 78-79.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J13070
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year (progressing)

Development of a Program for Blood Flow and Cell Behaviors based on LBM Method

Makoto Ohta*†, Bastien Chopard**††
 Daniel Rufenacht***, Toshio Nakayama****
 K. Srinivas*****, Hitomi Anzai*****
 Guy Courbebaisse*****, Yuuki Yoshida*****, Sho Matsumoto*****
 * Institute of Fluid Science, Tohoku University
 **Geneva University
 ***Hirslanden Hospital
 ****Graduate School of Biomedical Science, Tohoku University
 *****University of Sydney
 *****Graduate School of Engineering, Tohoku University
 *****INSA-Lyon
 †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

To develop a program for analyzing the relation of blood flow to cell behaviors using LBM method.

2. Details of program implement

The conventional flow diverter stents (FD) have a risk to thrombus formation in a parent artery. This may be because the stents have lower porosity in comparison with the conventional stents. Then we introduced and developed an optimization method for stent design with high porosity. The purpose of this year is to evaluate the effect of optimization method on flow reduction.

The program of optimization we developed can construct the design semi-automatically to avoid the hard work of engineers based on Lattice Boltzmann Method (LBM) with a optimization method called as simulated annealing(SA). The porosity of stent was changed from 60-90%. The computational simulation of flow in aneurysm was performed with changing position of struts. The flow reduction in aneurysm using the optimized struts was compared with that using a symmetric strut design.

The flow reduction of optimized struts is always higher than the symmetric strut under the same porosity. The optimized stent has 88-95% flow reduction whereas the symmetric stent has 85-90% flow reduction. This results suggest the optimization has a potential to improve the flow reduction when comparison with the stent with the symmetric struts and the same porosity. In conclusion, we confirm the effect of optimization method to improve the stent design for reducing the flow.

3. Achievements

Expected result

4. Summaries and future plans

Thrombus formation will be included as a objective function.

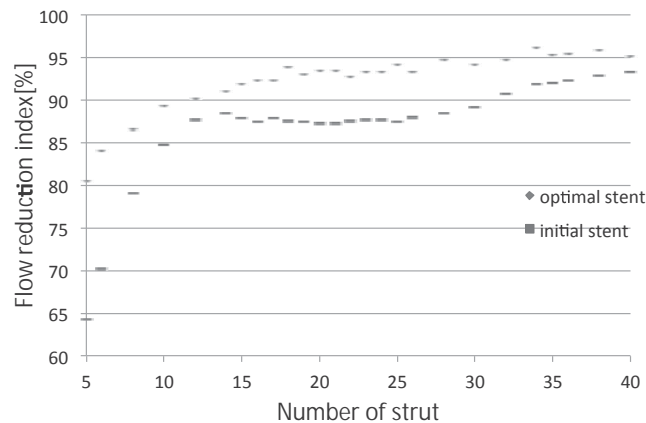


Figure 1: The relationship between the number of strut (related to porosity) and the flow reduction.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - *[1] Hitomi Anzai, Bastien Chopard, Makoto Ohta: Combinational optimization of strut placement for intracranial stent using a realistic aneurysm, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, Vol. 2, No. 2, (2014), pp. 66-76.
 - [2] Yujie Li, Hitomi Anzai, Toshio Nakayama, Yasutomo Shimizu, Yukihisa Miura, Aike Qiao and Makoto Ohta: Simulation of hemodynamics in artery with aneurysm and stenosis with different geometric configuration, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 9, No. 1, (2014), pp. 1-11.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [3] Hitomi Anzai, Jean-Luc Falcone, Bastien Chopard, Makoto Ohta: Application of optimization for design of intracranial stent with blood flow reduction as objective function, *World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, (2013).
 - [4] Yuuki Yoshida, Hitomi Anzai, Makoto Ohta: Optimization of stent design to increase the porosity, *ICS 2013*, (2013).
 - [5] Makoto Ohta, Hitomi Anzai, Han Xiaobo: Optimization of blood flow for intracranial stent, International Workshop on Flow Dynamics related to Energy, *Aerospace and Material Processing KTH*, (2013).
 - [6] Makoto Ohta. Hitomi Anzai, Toshio Nakayama, Xiaobo Han, Noriko Tomita: Optimized Stent, *The 10th ICFD*, (2013).
 - *[7] Makoto Ohta, Bastien Chopard, Hitomi Anzai: Development of a Program for Blood flow and Cell Behaviors Based on LBM Method, *The Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 80-81.
 - [8] M. Zhang, H. Anzai, Y. Li, M.Ohta: A Study on Multiscale Model in the presence of Systemic-to-Pulmonary Shunt utilizing LBM-LPM, *The 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013)*, (2013).
 - [9] Y. Li, H. Anzai, T. Nakayama, Y. Shimizu, Y. Miura, A. K. Qiao, M.Ohta: Hemodynamic Numerical Simulation in Artery Complicated with both Stenosis and Aneurysm in Different Shape and Position, *The 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013)*, (2013).
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J13071
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year (progressing)

Behaviors of Nano-Channel of Membrane Protein

Makoto Ohta*†, Liviu Movileanu**††
Noriko Tomita*

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Syracuse University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

To develop a program for analyzing the relation of blood flow to cell behaviors using LBM method.

2. Details of program implement

Pore-forming proteins on cell membrane will be applicable for developing a channel as an engineering application such as biosensing, sequencer, hygiene, or blood cell model. The properties such as dynamics, robustness, and thermal stability related to the structure are necessary for development of the applications. On this year, the electro-physiological properties of three proteins on lipid bilayers including cell membranes are measured for the characteristics of channel. Our collaborations will show novel characteristics and structures of the proteins for development of mechano and functional channels. We selected Ply, γ -hemolysin, FhuA for this project and behaviors of endothelial cells on biomaterial were observed.

Staphylococcal γ -hemolysin (Hlg) is a two-component cytolysin, which consists of LukF (Hlg1) and Hlg2. The structure contains two-component cytolysins of LukF and Hlg2. Tomita et al. revealed that Hlg2 and Luk form ring-shaped structures with an inner/outer diameter of 3/9 nm on their target membranes and that they act as a transmembrane pore with a functional diameter of ca. 2 nm.

FhuA (Ferric hydroxamate protein uptake component A) is well known as a ligand-gated channel in the outer membrane of *Escherichia coli*, which is formed of monomeric 22-stranded β -barrel protein. Based on the versatile properties of the FhuA channel, including dynamics, robustness, and thermal stability, its application as a stochastic biosensing elements has been focused on and actually several engineered FhuA proteins have been created. However, electrophysiological properties of the FhuA channel in channel gating with conformational change, e.g. voltage-dependency and mechanosensitivity, which is affected by the lipid bilayer environment, have yet to be elucidated. Several studies using lipid bilayers and vesicles consisting of various kinds of lipids as well as molecular dynamics simulations, have revealed that the activities and structures of membrane channels are affected by the structures and properties of the lipid molecules surrounding the proteins.

Pleurotolysin (Ply), a novel sphingomyelin-specific two-component cytolysin from the basidiocarps of *Pleurotus ostreatus*, and demonstrated the pore-forming properties of the cytolysin. Ply consisted of non-associated PlyA (17 kDa) and PlyB (59 kDa) components. The PlyA was purified from the basidiocarps of *P. ostreatus* as described previously. In the case of PlyB, to avoid cleavage between noncovalently associated two fragments, mature form of recombinant PlyB was used by purified as described

previously

Also, to investigate the effect of shape and surface treatment of Ni-Ti wire for stent under flow on endothelialization on implanted stent, we measured the density of endothelial cells on and around the wire which was implanted on cultured EC under shear stress (SS) environment. Cross-section shape of the implanted wire effects on the cell density of the area just before the wire and the positions that EC adheres on the wire.

These activities show the several roles of proteins for the nano-mechano functions.

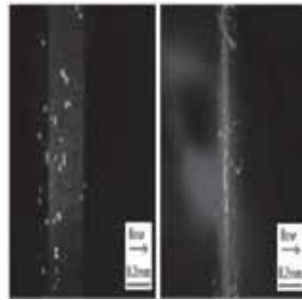


Figure 1 : Endothelial cells on biomaterial

3. Achievements

Expected result

4. Summaries and future plans

To apply the characteristics to design of biomaterial

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] Noriko Tomita, Liviu Movileanu, Stephan Wilkens, and Makoto Ohta: Microbial Pore-Forming Protein Properties Depended on Lipid Environment, *NIH-Tohoku University JSPS Symposium*, (2013).
 - [2] Noriko Tomita, Liviu Movileanu, and Makoto Ohta: Electrophysiological properties of engineered FhuA $\Delta C/\Delta 4L$ protein nanopore affected by lipid bilayer environment, *The EMBO meeting 2013*, (2013).
 - [3] Sho Matsumoto, Han Xiaobo, Makoto Ohta, and Noriko Tomita: Density change of smooth muscle cells in co-culture model under shear stress with spatial gradient related to the development of cerebral aneurysm, *The EMBO meeting 2013*, (2013).
 - *[4] Sho Matsumoto, Han Xiaobo, Hisatoshi Kobayashi, Noriko Tomita, and Makoto Ohta: Influence of Ni-Ti Wire under the Shear Stress Environment on Endothelialization, *The 10th ICFD*, (2013).
 - [5] Noriko Tomita, Liviu Movileanu, and Makoto Ohta: Membrane Channel Dynamics Depended on Lipid Environment, *The 10th ICFD*, Sendai, (2013).
 - *[6] Makoto Ohta, Liviu Movileanu, and Noriko Tomita: Channel properties of membrane proteins on lipid bilayers, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 82-83.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J13073
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	2年目

マイクロ流体デバイスを用いた低酸素状態の細胞応答の観測
Observation of Hypoxia Cellular Response by Using Microfluidic Devices

福島 修一郎*†, 前原 鈴子*
 船本 健一**††
 *大阪大学基礎工学研究科
 **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

低酸素状態に対する細胞応答は、虚血性疾患の発症機序解明や新生組織への血管誘導などに関連している。本研究では、独自に開発したマイクロ流体デバイスと非線形光学顕微鏡を用いて細胞の分化や遊走を観測して培養過程における細胞の動態を明らかにして、再生医療用組織の培養条件の最適化を目指す。

2. 研究成果の内容

本研究では臨床応用段階にある培養軟骨を観測対象とする。再生医療用の軟骨細胞の培養にはアテロコラーゲンが用いられているが、粘度が高いために、これまでに開発したマイクロ流体デバイスのゲルチャネルへの注入が困難であるという問題があった。そこで設計を改良して、図1に示す新たなデバイスを作製した。従来型に比べてゲルチャネルの長さを短くすることで、コラーゲン注入時の培養液チャネルへの流出を防止している。

軟骨細胞をデバイス内に注入してから1時間後と培養4日目に非線形光学顕微鏡を用いて2光子蛍光および第2高調波発生 (SHG) 光のイメージングを行った (図2)。SHG画像 (左列) はコラーゲンの構造を、蛍光画像 (右列) は染色した細胞質をそれぞれ示している。播種1時間後の細胞は球形であり、細胞の縁に沿ってSHG光強度が非常に大きい殻状の基質構造が見られた。また、そのさらに外側は周囲のコラーゲンゲルに比べてSHG光強度が低い領域が広がっていた。これは、コラーゲン基質への接着過程で細胞が

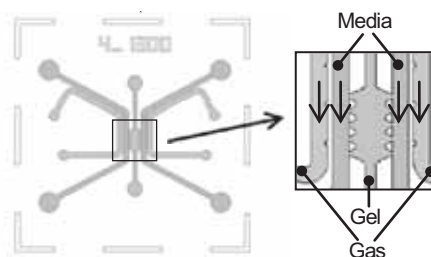


図1：マイクロ流体デバイス

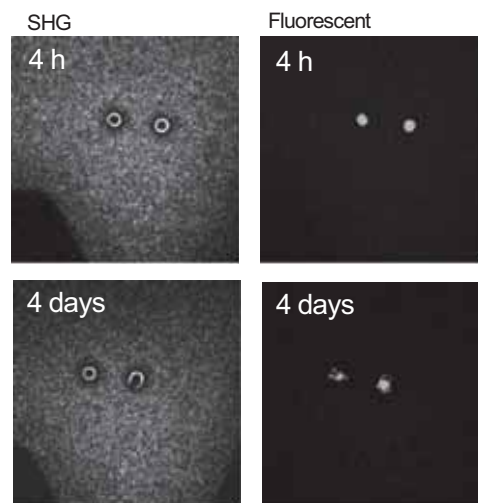


図2：培養軟骨の観測

周囲に仮足を伸ばし、細胞膜に接した基質だけでなく SHG 光強度の低い領域にもともと存在した基質も牽引したためだと考えられる。また、右側の細胞周囲の殻状基質構造は培養4日目に画面下側に開いており、細胞形態はほぼ真円状であった播種1時間後の蛍光画像と比べて下側に歪んでいた。したがって右側の細胞は、分裂や遊走のための空間を確保するために下側の基質を分解していると考えられる。

さらに、低酸素と関連する血管新生の培養モデルを用いて細胞外基質の再構築過程を観測した。試料は、デバイスのゲルチャンネルに作製したコラーゲンゲルの側面に正常ヒト臍帯静脈内皮細胞 (HUVEC) を播種して培養したものを用いた。播種後6時間でHUVECがゲル側面に単層を形成しているのを確認し、血管内皮細胞増殖因子 (10 $\mu\text{g}/\text{mL}$) を培養液に添加してゲル内への侵入を誘発した。同視野で細胞がゲルに侵入する過程 (図3) を比較すると、高強度の SHG 光を発生する比較的太いコラーゲン線維は消失せず、細胞遊走に伴った変形を示した。これは、細胞侵入の際には単純なコラーゲンの分解行われているわけではなく、細胞スケールでの空間的な不均一性を検討することの重要性を示している。

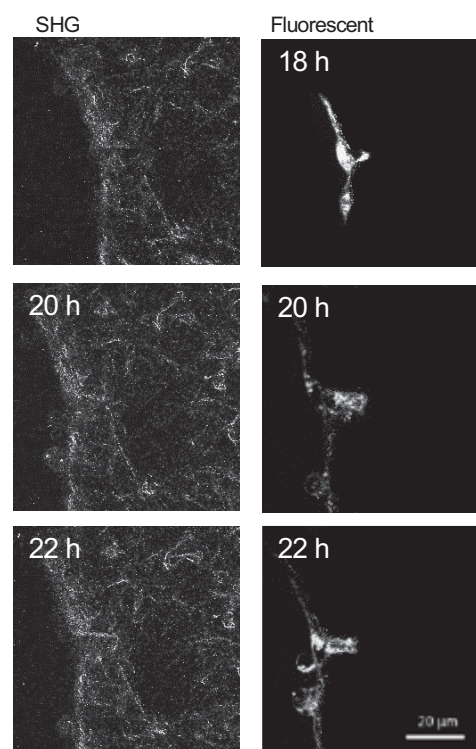


図3：血管新生の観測

3. 研究目標の達成状況

再生組織培養条件の最適化までは達成できなかったが、培養過程を非侵襲・無染色的に評価する手法が確立できた。

4. まとめと今後の課題

本研究で開発したマイクロ流体デバイスを用いて培養した再生組織を非線形光学顕微鏡で観測する手法が、培養過程の非侵襲評価に有用であることが確認できた。今後、デバイス内の酸素濃度を実測して検証する必要がある。

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] S. Fukushima, R. Maehara and K. Funamoto: Observation of Hypoxia Cellular Response by Using Microfluidic Devices, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 90-91.

[2] 永菅大祐, 福島修一郎, 船本健一, 荒木勉: 微小流体デバイス内における血管新生過程の基質再構築, 日本機械学会第26回バイオエンジニアリング講演会, 仙台, (2014), pp. 79-80.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13074
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	2年目

核沸騰限界熱流束を向上する微細くぼみ付伝熱面の開発
Development of the Heat Transfer Surface with Micro-Pits
to Enhance the Critical Heat Flux in Nucleate Boiling

宮田 一司*†, 森 英夫**††, 大平 勝秀*

*東北大学流体科学研究所, **九州大学大学院機械工学部門

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

核沸騰現象を用いた冷却は、高い熱伝達率を実現する方法として、電力を有効利用できる超伝導体や急速に発熱密度が増大している電子素子の冷却に有効である。本研究では、高い核沸騰限界熱流束を達成する伝熱面として、熱伝導率の高い銅製の平滑面上に熱伝導率の低い SUS 製の格子を置いたくぼみ伝熱面を提案し、実験を行っている。この伝熱面は、伝熱面上で発生する蒸気泡の離脱と伝熱面への液体の供給を円滑に行って高い熱流束まで核沸騰を維持することを目的としている。

2. 研究成果の内容

無酸素銅製の円形（直径 25 mm）平滑面を基準伝熱面とし、その上に図 1 に示す SUS 製の格子を置いたくぼみ伝熱面の限界熱流束向上効果について調べた。試験流体には、大気圧下の液体窒素を用いた。昨年度実施したくぼみ伝熱面 A1 と今回実験に用いたくぼみ伝熱面 A2, B2, C2 の仕様と得られた限界熱流束を表 1 に示す。また、それぞれの伝熱面の沸騰曲線を図 2 に、平滑面に対する限界熱流束の向上率と伝熱面積拡大率との関係を図 3 に示す。

表 1 に示すように、すべてのくぼみ伝熱面について、限界熱流束は銅平滑面に対して 20% 以上増加している。また、図 3 に示すように、くぼみ面の限界熱流束向上率は、伝熱面積拡大率より大きく、本研究で提案するくぼみ伝熱面が限界熱流束向上に有効であるといえる。くぼみの断面形状が同じで深さが異なる A1 と A2 を比較すると、くぼみ深さが小さい A2 の方が、限界熱流束が大きい。くぼみが浅い方が SUS 面から銅面への液の移動がスムーズであるためと考えられる。くぼみ断面の大きさが異なる A2 と B2 を比較すると、A2 の方が高い。一方、流体に接する銅面の面積を基準に熱流束を算出すると、B2 の限界熱流束の

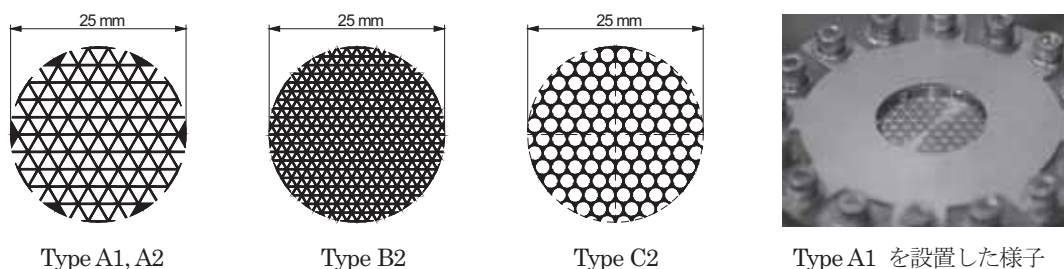


図 1 : 実験に用いた SUS 格子の上面図

表 1：実験に用いたくぼみ伝熱面の仕様と測定された限界熱流束

	A1	A2	B2	C2	Smooth
伝熱面拡大率	1.08	1.16	1.15	1.07	1
くぼみ深さ mm	0.10	0.05	0.05	0.05	-
SUS 格子の開口率	0.80		0.59	0.79	(1)
限界熱流束 kW/m ²	225	209	216	208	174
限界熱流束向上率	1.29	1.21	1.25	1.20	1

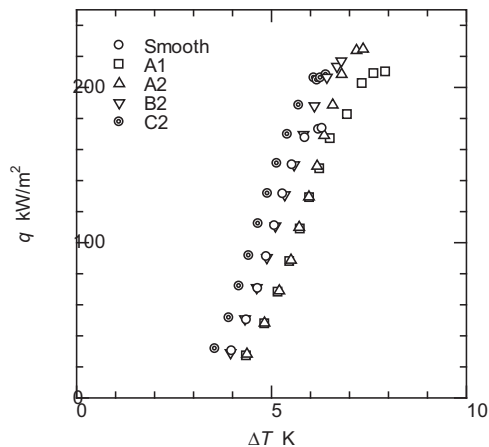


図 2：くぼみ伝熱面の沸騰曲線

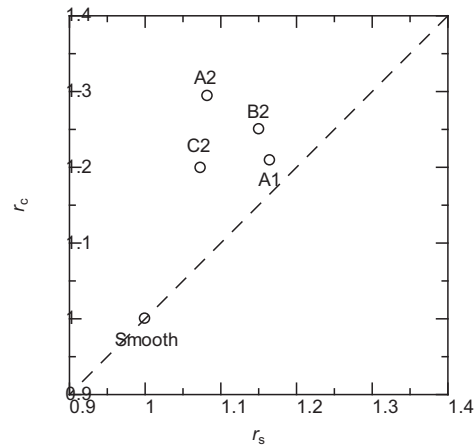


図 3：限界熱流束向上率と伝熱面拡大率の関係

方が高かった。これは、くぼみ断面積を小さくし、さらに開口率を高く保てば向上効果が高くなることを示唆している。開口率とくぼみの断面積が等しく、断面形状が異なる A2 と C2 を比較すると、A2 の向上率が大きいことから、三角形くぼみが有効であることがわかる。くぼみの角部を通して SUS 面から銅面に液がスムーズに移動するためと考えられる。

3. 研究目標の達成状況

平成 24 年度に得られた結果をもとにして、より高い限界熱流束を有する伝熱面を開発した。また、くぼみの形状、大きさ、深さが及ぼす影響が明らかとなり、目標は達成された。

4. まとめと今後の課題

熱伝導率が大きく異なる材料で形成するくぼみ伝熱面が核沸騰限界熱流束の向上に有効であることが明らかとなった。今後は、同様の手法を強制対流冷却に有利な平滑面に適用することを目指す。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] K. Miyata, K. Ohira, H. Mori: Effect of the pits size on nucleate boiling heat transfer and critical heat flux of liquid nitrogen on the surfaces with micro triangular pits, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 54-55.

[2] 宮田一司, 大平勝秀, 森英夫: 微細三角形くぼみ付き伝熱面における液体窒素のプール沸騰熱伝達と限界熱流束, 第 50 回日本伝熱シンポジウム, (2013), Vol.II+III, pp. 554-555.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J13075
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	2年目

大気圧プラズマ流によるウィルスの不活化特性
Inactivation of Virus by a Plasma Flow at Atmospheric Pressure

佐藤 岳彦[†], 押谷 仁^{**††}
鈴木 陽^{**}, 岡本 道子^{**}, 吉野 大輔^{*}, 工藤 雄治^{***}
^{*}東北大学流体科学研究所, ^{**}東北大学大学院医学系研究科
^{***}東北大学大学院工学研究科
[†]申請者, ^{††}所外対応研究者

1. 研究目的

新型インフルエンザを始めとした新興感染症の発生や、医療機関におけるウイルスによる感染事故などは、健康を脅かす大きな社会問題となっている。近年、低温で発生するプラズマを利用した空気清浄機などが製品化されているが、これらの効果は未だ学術的に証明されているとは言えない。そこで、本研究では、低温プラズマ流によるウイルスの不活性化の効果について検証を行い、ウイルスへの感染リスク低減の可能性について明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果の内容

平成 25 年度は、平板電極を利用したプラズマ照射装置の開発とプラズマ流特性について検討した。まず、平板電極下に直径 50 mm のディッシュを設置し液体培地 (α -MEM) で満たした。液面と平板電極間の距離を 8 mm とし、溶存オゾン濃度と溶存過酸化水素濃度について計測した。図 1 (a) に示すように、溶存オゾンと溶存過酸化水素濃度は、放電時間と共に上昇することが示された。これは、気中で生成されたオゾンが液体培地に溶解したこと、溶解したオゾンからヒドロキシラジカルが生成され過酸化水素が生成されたことが要因であると考えられる。ウイルスの不活化において酸化力の大きいヒドロキシラジカルが培地中で生成されれば効果的に不活化ができる可能性がある。一方、pH は緩衝液の影響によりほとんど変化は見られない。

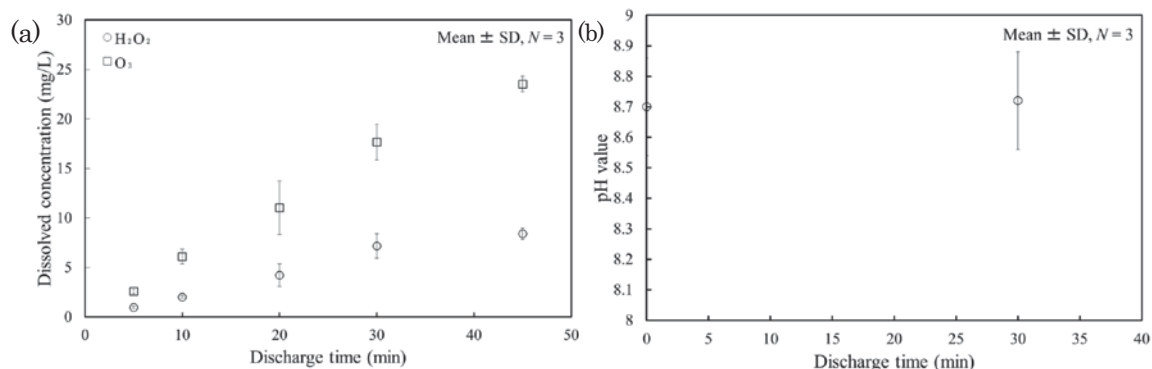


図 1：放電時間に対する (a)溶存オゾンと溶存過酸化水素濃度、(b)pH の変化。

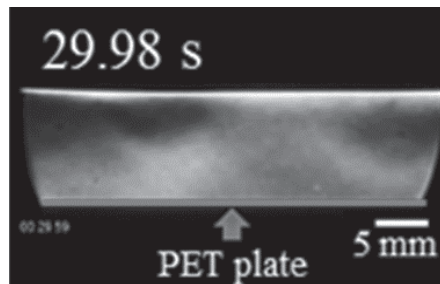


図 2: 上面に設置された平板電極下の気流の様子. 下面金属ステージ上を PET 平板で被覆している.

生成されたオゾンは主として平板電極近傍のプラズマ領域で生成される. そこで, オゾンの輸送について検証するため, 図 2 に示すようにシュリーレン法により平板電極下の気流を可視化した. ディッシュを設置した条件に近くするため, 金属ステージ上に PET 平板を設置した. これより, 平板電極下ではプラズマにより発生した熱による気流の揺らぎは観察できるものの, プラズマによる誘導気流は十分に生成されていないことが示された.

3. 研究目標の達成状況

本年度は, プラズマ間接照射の場合のウイルス不活化効果の検証と直接照射用プラズマ発生源の開発ならびにウイルス照射実験を予定した. 間接的な照射については十分な効果が得られないことが示されたため, 直接照射用プラズマ源の開発とその特性の解明を行い, 進捗は遅れているが予定に沿って研究を進めることができた.

4. まとめと今後の課題

本年度は, ウイルス不活化に向けて直接照射を行うためのプラズマ発生装置の開発とそのプラズマ特性の検証を行った. 平板電極を用いた独立型のプラズマ発生装置により, 培地中にオゾンや過酸化水素が溶存することが明らかになった. 生成した化学種は, 自然対流による流れと拡散により培地中に輸送されると考えられるが, より効率よく培地に輸送するための手法の開発が必要である.

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)

該当なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Yuji Kudo, Michiko Okamoto, Daisuke Yoshino, Takehiko Sato, Akira Suzuki and Hitoshi Oshitani: Characteristics of Non-equilibrium Plasma Flow for Viral Inactivation, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 66-67.

[2] 工藤雄治, 岡本道子, 佐藤岳彦, 吉野大輔, 鈴木陽, 押谷仁: ウイルス不活化に向けた低温プラズマ流の特性, 第 23 回環境工学総合シンポジウム 2013, (2013), pp. 220-221.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

該当なし

課題番号	J13076
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	3年目

中性粒子ビームエッチングにより作製した
高密度規則配列量子ドット系における電子状態の解明
Study on the Electronic States in High-Density and Regularly-Arrayed Quantum Dot Systems
Fabricated by Neutral Beam Etching

齋木 敏治*†, 寒川 誠二**††
*慶應義塾大学理工学部, **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

中性粒子ビームエッチングによって作製した高密度かつ規則配列量子ドットは、高効率な半導体レーザーや太陽電池などへの応用が期待されている。これらのデバイス実現のためには、個々の量子ドットが優れた光学特性を有し、かつ隣接する量子ドット間の電子的な結合が良く制御されている必要がある。本研究は、昨年から継続し、ドット間結合の調整法として、相変化マスクを用いた応力印加による量子準位変調の制御性の向上を目指す。

2. 研究成果の内容

InAs/InP 量子ドット上をカルコゲナイド相変化材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (以下 GST), あるいは GeTe (以下 GT) で覆い、さらにその上に SiO_2 層を成膜する。GST は結晶相とアモルファス相間を光励起加熱により可逆的に変化させることができる。アモルファス化にともなって約 10% の体積膨張が生じることが知られており、この体積膨張によって量子ドットへ局所的に応力を印加する。アモルファス化、結晶化にあたってはサブナノ秒のパルスレーザー (波長 532 nm) を使用し、フルエンスを適切に設定することにより、段階的な双方向の変化が可能である。すなわち、可逆的、かつ任意量の応力印加が可能である。測定には顕微分光システムを用い、対物レンズでレーザー光を集光することにより、300 nm 程度の領域を選択的に相変化させる (アモルファス化領域は光吸収が小さいので、光学的開口としても機能する)。試料はクライオスタット中に保持され、10K 前後の温度で測定をおこなった。

局所的なアモルファス化後に量子ドットからの発光強度 (全ドットからの発光の積分値) をマッピングした結果が図 1 である。明るい箇所が光学的開口として機能しているアモルファス化領域である。続いて、アモルファス化領域の境界部 (A)、中央部 (B)、周辺部 (C) に存在するドットがそれぞれ、アモルファス化にともなってどのようにピークシフトを起こしたかを確認したところ、境界部ではブルーシフト、中央部ではレッドシフトが見られ、周辺部では変化は確認されなかった。また、多数の単一量子ドットに対して、発光強度とピークシフト量の相関を調査した結果が図 2 である。中央部ではアモルファス化量に比例して、レッドシフトが起きていることが明らかとなった。

シフトの方向は量子ドットに印加される静水圧応力と一軸性応力の大きさの比で決まり、上記実験で得られた結果は、アモルファス領域周辺の応力分布の有限要素法シミュレーションの結果と良く一致した。

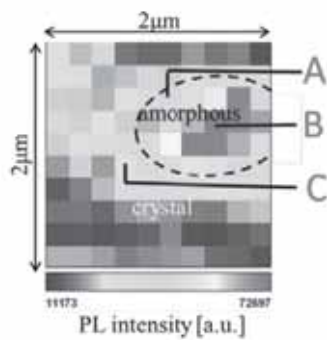


図1：アモルファス化領域近傍の発光強度分布

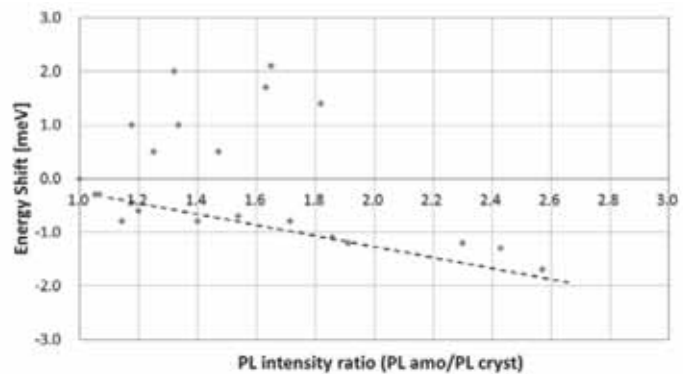


図2：個々のドットの発光強度とピークシフト量の相関

3. 研究目標の達成状況

量子準位のシフト方向と大きさをアモルファス化領域の位置とアモルファス化率により制御できることが確認でき、目標は概ね達成された。

4. まとめと今後の課題

量子ドットのエネルギー準位を単一ドットレベルで精密に調整する手法として、相変化材料の体積変化にともなう応力印加法を開発し、シフト方向と大きさを独立に制御可能であることを実証した。今後は強く結合した量子ドット系に対して同手法を導入し、相互作用の制御の実証が必要である。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] N. Tsumori, M. Takahashi, Nurrul Syafawati Binti Humam, P. Regreny, M. Gendry, and T. Saiki: Near-infrared nano-spectroscopy and emission energy control of semiconductor quantum dots using a phase-change material, *Journal of Physics: Conference Series* 471 (2013), pp. 012007/1-8.
- [2] Nurrul Syafawati Binti Humam, Yu Sato, Motoki Takahashi, Nobuhiro Tsumori and Toshiharu Saiki: Redshifted and Blueshifted PL Emission of InAs/InP Quantum Dots upon Amorphization of Phase Change Material, *Optics Express*, submitted.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] N. Tsumori, M. Takahashi, Nurrul Syafawati Humam, Y. Satoh, and T. Saiki: Spectroscopy and Emission Energy Control of Individual InAs Quantum Dots Using a Phase Change Optical Mask, *Collaborative Conference on 3D & Materials Research (CC3DMR 2013)*, Jeju, Korea, (2013), (Invited).

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J13077
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	2nd year

Development of a Micro-Motor for MEMS Utilizing Smart Polymer Fabricated by Photolithography

Masami Nakano*†, Miklós Zrínyi**††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Laboratory of Nanochemistry, Semmelweis University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

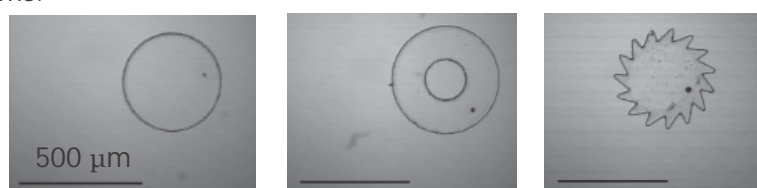
1. Purpose of the project

Electroactive polymers (EAP) exhibit a change in size and shape when stimulated by electric field. Controllable rotation of EA polymer is of relevance for a range of practical applications, for example in micro-motors or in microfluidics. It is therefore an important task to find proper materials with controllable shape and size in order to perform reliable measurements as well as to use them for developing micromotors. The main purpose of this research is to find electroactive polymer as possible candidate of rotor of micro sized electro-motors.

Electrorotation is the circular movement of an electrically polarized micron sized particle or material. In our previous work, development of novel electroactive polymer composites have been reported. As a direct continuation of this research work, our intention was to replace polymer composites to pure polymers that can be fabricated by photolithography instead of polymer composites.

2. Details of program implement

Epoxy based polymer has been developed for novel electric micro-motor construction. The polymer hardens in a pre-defined 3D shape upon illumination with focused laser light. Disks, hollow cylinders and gearwheels as rotors, were prepared with variable diameter and thickness. The diameter was varied between 100 to 500 microns with thickness of 20-40 microns. Figure 1 shows the photo of three main rotor forms.



(a) Disk

(b) Hollow cylinder

(c) Gearwheel

Fig.1 Polymer rotors prepared from epoxy based polymer.

Electrorotation was studied in oil mixture containing substantial amount of triglycerid of oleic-, palmitic-, and linoleic acids, with conductivity of $\sigma_1 = 9.56 \cdot 10^{-10}$ S/m and relative permittivity of $\epsilon_1 = 3.32$, respectively. We have studied the influence of DC electric field intensity on the speed of rotation.

3. Achievements

Figure 2 shows the dependences of rotational speed on the electric field intensity for disk shaped (a) and hollow cylinder (b) polymer rotors. These results indicate that

there is a significant size effect on the speed of rotation. At the same electric field intensity, the smaller disk (100 micron) performs the most intensive rotary motion. It is also seen that the speed of rotation linearly depends on the DC electric field intensity. We have also studied the rotation phenomena of hollow cylinders and gearwheels.

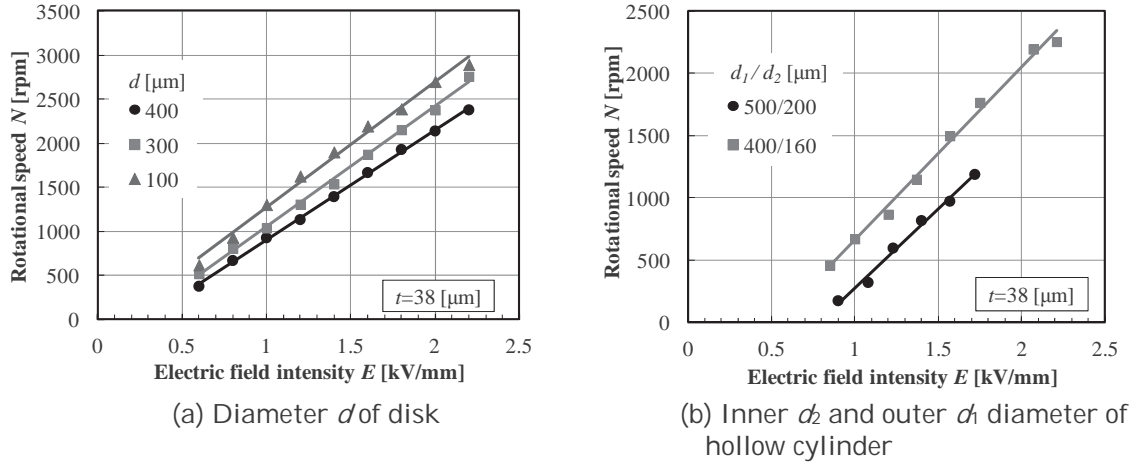


Fig.2 Dependences of rotational speed N on polymer rotor sizes as a function of electric field intensity E .

4. Summaries and future plans

We have presented the first direct observation of DC electric field induced rotation of epoxy based chemically cross-linked polymer rotors. Polymer disks, hollow cylinders as well as gearwheels of different size perform very intensive rotation in uniform DC electric field. It was found that within the experimental accuracy the speed of rotation linearly depends on the DC electric field.

In order to evaluate the motor characteristics of the polymer disks and gearwheels, the rotational torque of the polymer rotors of different size and shape will be measured. A novel method will be worked out in order to determine the torque. The shape (circular cylinder and gearwheel) and size (diameter, thickness) of rotating polymer device on the torque will be systematically investigated. These measurements 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)
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [1] M. Zrínyi, and M. Nakano: From bending deformation to electrorotation, *Training School on Ionic Artificial Muscles*, Cartagena, Spain, (2013), (Invited lecture).
 - [2] M. Zrínyi, R. Bauer, L. Kelemen and Masami Nakano: Novel Electroactive Polymer for Micro-motor Development, *Proceedings of Tenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2013), pp. 432-433, (Invited lecture).
 - *[3] M. Zrínyi, R. Bauer, L. Kelemen and M. Nakano: Development of a Micro-motor for MEMS Utilizing Novel Electroactive Polymer Fabricated by Photolithography, *Proceedings of Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 144-145.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J13078
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	2年目

コロイド磁気粘性流体の粒子構造形成と磁気粘性効果
Particle Structural Formations of Colloidal MR Fluid and Their Influences on Magnetic Rheological Response

阿部 浩也*†, 中野 政身**††
 *大阪大学接合科学研究所, **東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

磁性微粒子をオイル中に分散した懸濁液では、磁場を加えるとレオロジー特性が変化するマグネトロロジー効果 (Magnetorheological effect, MR 効果) が発現する。MR 効果は磁場印加によって形成される異方的な粒子チェーン構造 (鎖状構造) に起因するため、分散粒子の磁気的構造形成と MR 効果の関係を理解するとともに、粒子チェーン構造を効果的に変えることは高性能な MR 流体の開発に必要不可欠となる。

本研究では、ミクロンサイズの鉄粒子のMR流体への鉄ナノ粒子の添加が磁気的に誘起される粒子チェーン構造ならびにMR効果への影響を明らかにするとともに、高性能なナノ・マイクロ粒子混合系MR流体を開発することを目的とする。

2. 研究成果の内容

マイクロ粒子としてカルボニル鉄粒子(CIP CS 6.6 μ m, BASF Japan)を、ナノ粒子として申請者らがアークプラズマ法で合成した鉄ナノ粒子(約100nm)を用い、これらの粒子をシリコンオイル(KF96-50cs, 信越化学)に混合分散することにより、ナノ・マイクロ粒子混合系MR流体を創製した。鉄粒子の固体濃度は10vol%一定とし、鉄ナノ粒子の混合比(重量比)を0, 25%, 50%, 75%, 100%とした5種の試料を作成した。なお、試料作製に界面活性剤などの有機系助剤は使用していない。

供試MR流体の定常的及び動的なMR効果の測定・評価には、直径 ϕ 20mmの2枚の平行円盤間に磁場を垂直に均一に印加できる磁場印加装置 ($B_{max}=1.0$ T at $I=0.5$ A, 14W, 英弘精機: MR-101N) を有する高精度レオメータ[RS-150, HAAKE]を用いた。また、磁気的に誘起された粒子チェーン構造の可視化には、磁場印加装置を備えたデジタルマイクロスコープシステム(Hirox KH7700)を用い、供試MR流体をガラス基板上に約10 μ mの厚さに広げ、この基板に平行に磁場を印加した場合に形成される粒子チェーン構造を透過光像として観察・記録した。

図1に示すように、磁場を印加($B=0.3$ T)した際には混合比によって流動曲線は大きく異なる。Nano25%, 50%では、他のものに比してせん断速度のほぼ全領域でせん断応力が著しく大きくなり、Micro100%, Nano100%のMR流体に比して最大で約2倍程度大きな値を示す。混合比を最適に調整することにより、高せん断速度域まで大きなせん断応力を発揮する混合粒子系MR流体を創製することができることを示唆している。Nano25%, 50%のMR流体が、印加磁束密度 B の全領域で、他のものに比して著しく大きなせん断応力を発揮することがわかる。図2に示すように、ナノ粒子の混合比が25%及び50%の場合にはより太い粒子チェーン構造が形成され、この構造形成によってMR効果が向上したと考えられる。この構造はミクロンサイズの鉄粒子ネットワークを骨格としてその

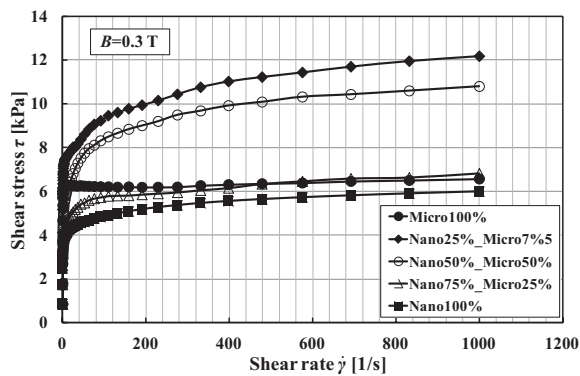


図1：せん断速度に対するせん断応力の変化

周囲をナノ粒子が覆うように配向凝集して形成されたものと推察される。

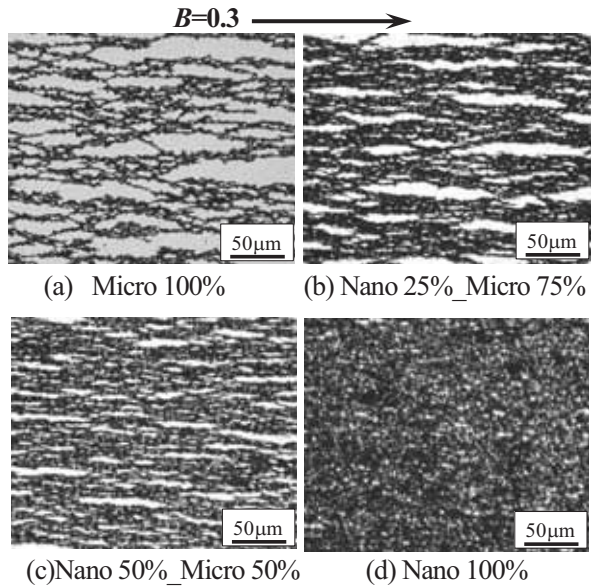


図2：混合比による粒子チェーン構造の違い

3. 研究目標の達成状況

ナノ・マイクロ粒子混合系 MR 流体において、マイクロ鉄粒子に対するナノ鉄粒子の混合比が 25%, 50% の MR 流体の場合に最大で約 2 倍程度の顕著な MR 効果の向上を見出すことができ、ミクロンサイズの MR 流体に約 100nm の鉄ナノ粒子を添加する効果を粒子チェーン構造の違いから明らかにすることができるなど、当初の研究目標を十分に達成できた。

4. まとめと今後の課題

マイクロ鉄粒子に対するナノ鉄粒子の混合比によって著しく MR 効果を向上できることを確認でき、ミクロンサイズの CI 粒子 MR 流体に約 100nm の鉄ナノ粒子を添加する効果を明らかにすることができた。今後、この鉄ナノ粒子添加による効果についてより詳細なアプローチを検討する。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] H. Abe and M. Nakano: Steady and Dynamic Magnetorheological Responses of Iron-Based Hybrid MR Suspensions, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*, Nara, Paper No. OS5-01-4, (2013), pp. 1-10.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] H. Abe and M. Nakano: Synthesis and Magnetorheology of Iron-based Bidisperse Fluids, *Proceedings of Tenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2013), pp. 442-443.

*[3] H. Abe and M. Nakano: Particle Structural Formations of Colloidal MR Fluid and Their Influences on Magnetic Rheological Response, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 174-175.

[4] 阿部浩也, 内藤牧男, 戸塚厚, 佐藤忠一郎, 中野政身: 磁性サスペンションの構造形成と磁気粘性効果, 可視化情報 (全国講演会講演論文集), Vol. 33, Suppl. No. 2, (2013), pp. 241-242.

[5] 中野政身, 阿部浩也: ナノ・マイクロ粒子分散系 MR 流体の構造形成とマグネトロロジー効果, JFPS 平成 25 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, (2013), pp. 115-117.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13079
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4 ~2014.3
継続年数	1年目

法科学可視化ライフサイクル管理システムの開発
Development of a Forensic Visualization Lifecycle Management System

藤代 一成*†, 上田 和英*, 茅 暁陽**, 豊浦 正広**, 杉浦 篤志**,
 竹島 由里子***††, 早瀬 敏幸***

*慶應義塾大学理工学部, **山梨大学医学工学総合研究部, ***東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

法科学可視化は、科学犯罪捜査の効率化と信頼性の向上を図る計算法科学分野（computational forensics）において、裁判の電子化という流れのなかで近年その重要性が注目されてきている。しかし、守秘義務上、法科学技術やメディア処理の専門家のアウトソーシングに頼れないという大きな課題を抱えている。そこで本研究では、出自管理やビジュアルシミュレーション、拡張現実等の先端的情報科学技術を統合し、捜査から裁判に至る法科学ライフサイクルにおいて関係者個々が第一人称的に法科学データを可視化することにより、争点を明確化し、適正な量刑に資することができる法科学可視化ライフサイクル管理システムを開発する。

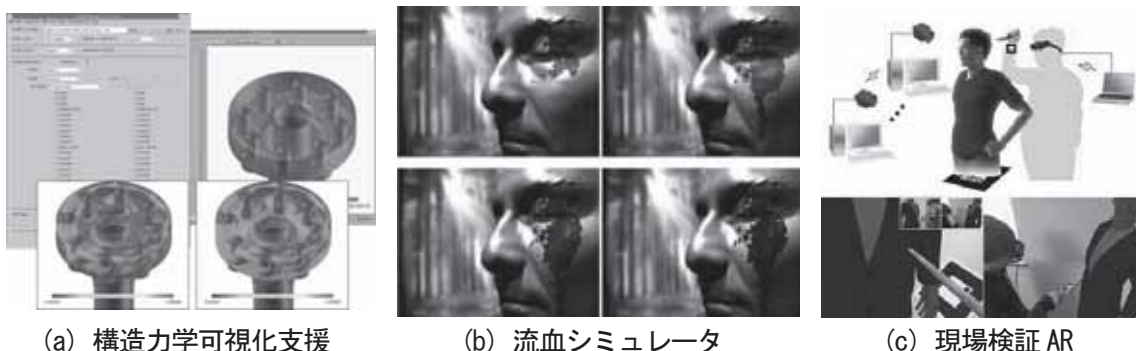
2. 研究成果の内容

提案する法科学可視化ライフサイクル管理システムは、可視化リポジトリ・出自管理、ビジュアルシミュレーション、拡張現実の大きく3つの要素技術から構築される。以下、要素技術ごとにその研究成果の概略を説明する。

可視化リポジトリ・出自管理：殺傷事件を対象とするには、出血等の人体の流動現象に加え、成傷器等の構造物との相互作用を取り扱うことが必要不可欠となる。そこで法科学可視化オントロジー構築の第一歩として、従来の流動可視化オントロジー[2]を、構造力学までカバーするように拡張し、可視化応用設計支援サブシステム VIDELICET の機能を増強した[3]。図1(a)は、パイプジョイントに現れる変位ベクトルを視覚解析する要求（左上）に対して、色付きグリフ表示法が推薦され、対応する可視化が自動的に実行されている様子（右上）を示している。さらに同図下の2枚は、結果の可視化ワークフローを上級ユーザ自身がカスタマイズし、等応力面や断面上の変位ノルムを疑似カラー符号化している様子を示している。

ビジュアルシミュレーション：SPH法を利用して、複数の傷口から流れ出た血液が体表面上を流れていく現象を再現し、血流の厚みによる色変化を考慮して網目状の特徴的なパターンを可視化するビジュアルシミュレータを開発した[4]。その技術的貢献は、物理吸着と、空気層との接触による硬化を考慮した流血現象の再現にある。図1(b)にビジュアルシミュレーションの実行例を示す。

拡張現実：複数のカメラ=マーカ系を連動させた仮想現実を用いて、犯罪や事故の再現シーンを現場映像に頑健かつ実時間で重畳し、複数方向からの現場検証を可能にするパイロットシステムを開発した[1]。図1(c)は、開発システムを用いて、仮想マネキンに対し仮想成傷器を接近させるシーンを、異なる視線で観察できている様子を示している。



(a) 構造力学可視化支援

(b) 流血シミュレータ

(c) 現場検証 AR

図1：法科学可視化ライフサイクル管理のための要素技術開発成果

3. 研究目標の達成状況

本研究の最終的な狙いは、開発する法科学可視化ライフサイクル管理システムの利用により、殺傷事件の証拠分析の高度化および大量の捜査資料の管理・分析手続きの確立に貢献することである。本年度は初年度として各要素技術の開発に着手し、個々には一定の新規性も認められる成果をあげることができたが、各ソフトウェアを連動させ、本格的なシステム統合を図るまでには至っていない。

4. まとめ

本研究では、複雑流動の未踏応用として計算法科学分野の社会的重要性に着目し、その可視化ライフサイクル全体を管理するシステム開発に着手した。初年度の部分的成果をあげた現段階で本公募共同研究としては一旦終了し、次年度からは、参加者全員が参画する科研費基盤研究(A) 26240015 (平成 26-28 年度, 研究代表者: 藤代 一成) に引き継いで、後続の研究を実施していく予定である。

5. 研究成果(*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] A. Sugiura, M. Toyoura, and X. Mao: Forensic CG video generation with augmented reality technology, *The Journal of the Society for Art and Science*, Vol. 12, No. 1, (2013), pp. 57-67.
- [2] Y. Takeshima, I. Fujishiro, and T. Hayase: GADGET/FV: Ontology-supported design of visualization workflows in fluid science, *Scientific Programming*, to appear.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[3] Y. Takeshima and I. Fujishiro: Ontology-based support of visualization workflow design for structural analysis, *Transactions of 22nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-22)*, San Francisco, (2013), No. 816.
- *[4] I. Fujishiro, K. Ueda, X. Mao, M. Toyoura, A. Sugiura, Y. Takeshima, and T. Hayase: Toward development of a forensic visualization lifecycle management system, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 88-89.

3) その他(特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13080
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	3年目

血行力学的解析を主眼とする脳動脈瘤データベースの構築
Database of Intracranial Aneurysms with Hemodynamic Analysis

杉山 慎一郎*†, 太田 信**††, 中山 敏男***,
 清水 宏明*, 富永 悌二****

*広南病院脳神経外科, **東北大学流体科学研究所

***東北大学大学院医工学分野

****東北大学医学部医学系大学院神経外科学分野

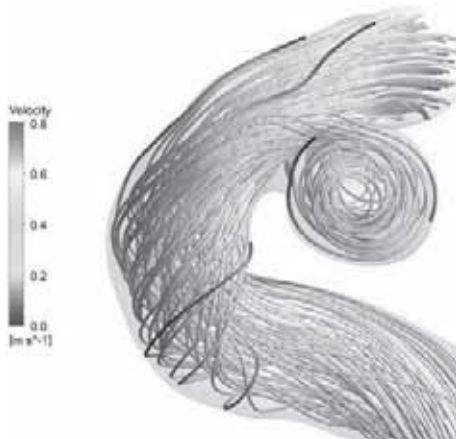
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年、脳動脈瘤の血行動態を数値流体力学的に解析し、病態との関連を明らかにしようとする試みがさかんになされているが、いまだ臨床に役立つような知見は得られていない。本研究は、脳動脈瘤患者から得られる実際の形状および血流量をもとにした血行力学的解析を多数の症例に行い、大規模なデータベースを構築しようとするものである。構築したデータベースは、脳動脈瘤の自然史とその血行動態との関連を調査するための医学的資源となりうるものと考えている。

2. 研究成果の内容

継続3年目となる2014年度は、脳動脈瘤患者152例を対象に、数値流体力学的解析を行い、解析結果を各症例の臨床的特徴とともにデータベースへと蓄積した。また、本年度はとくに、側壁型脳動脈瘤の血行動態について、その特徴を明らかにした。すなわち、代表的な側壁型脳動脈瘤である内頸動脈-下垂体動脈分岐部に発生した脳動脈瘤10例についての血行動態解析結果から、分枝を持たない典型的な側壁型脳動脈瘤においては、血流は脳動脈瘤頸部遠位から流入し、近位部より流出することを確認した(図)。



図：側壁型脳動脈瘤における血行動態（流線で表す）

3. 研究目標の達成状況

300 例のデータベース登録を目標としてきたが、研究途中で解析方法の変更を迫られ、約半数の症例を登録するに留まった。しかし、そのような解析方法の改善自体が、本研究分野の進歩につながるものであり、有意義なものであった。

4. まとめと今後の課題

統計学的解析を行う上でも、代表的な脳動脈瘤の発生部位のそれぞれについて、20-30 例ずつのデータ蓄積が望まれる。本研究で構築したデータベースへの登録を今後も継続し、脳動脈瘤臨床における新たな Evidence-based medicine の端緒となることを目指す。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

*[1] S. Sugiyama, T. Nakayama, M. Ohta, T. Tominaga, et al.: Relative residence time prolongation in intracranial aneurysms: A possible association with atherosclerosis, *Neurosurgery*, (2013), pp. 767-776.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] S. Sugiyama, T. Nakayama, K. Funamoto, D. Suzuki, K. Niizuma, M. Ohta, and T. Tominaga: Stagnant blood flow in intracranial aneurysms: A possible association with atherosclerosis, *Tenth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2013).

*[3] S. Sugiyama, T. Nakayama, M. Ohta and T. Tominaga: Hemodynamic analysis of sidewall type intracranial aneurysms, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 84-85.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J13081
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	3年目

MR計測融合シミュレーションによる脳動脈瘤破裂予測

Evaluation of Intracranial Aneurysm Rupture Using MR-Measurement-Integrated Simulation

杉山 慎一郎*†, 船本 健一**††, 早瀬 敏幸**, 清水 宏明*, 富永 悌二***

*広南病院脳神経外科, **東北大学流体科学研究所

***東北大学医学部医学系大学院神経外科学分野

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

脳ドックの普及により、無症候性の未破裂脳動脈瘤が発見される機会が急増している。そのような未破裂脳動脈瘤について、血行動態を解析することで将来の破裂リスクを評価し、外科的治療の適応ようとする試みが世界的になされている。しかし、従来の数値流体力学的解析において正確な解析結果を得るためには、脳血管撮影という観血的検査を必要とする。本研究は、非観血的で正確な脳動脈瘤の血行動態評価方法としての「Magnetic resonance (MR) 計測融合シミュレーション」の開発を目的とする。

2. 研究成果の内容

継続3年目となる2014年度は、実際の未破裂脳動脈瘤症例において位相差MRを用いて取得したデータを用い、4次元解析を行った(図1)。さらに、同様のデータを用いて、MR計測融合シミュレーションのための計算格子構築方法を検証した(図2)。



図1：脳動脈瘤内の血流（任意断面の速度ベクトル）

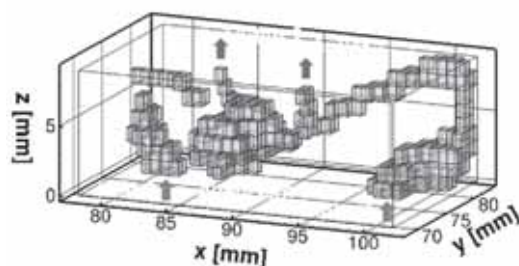


図2：MR計測融合シミュレーション用の計算格子

3. 研究目標の達成状況

MR 計測融合シミュレーションを行う上での基礎的方法論を確立した。現在, MR 計測融合シミュレーションの結果を, 従来の数値流体力学的手法によるシミュレーション結果と比較検討中である。

4. まとめと今後の課題

非侵襲的な血液動態解析手法である MR 計測融合シミュレーションを行うにあたり, その基礎的方法論を確立した。本研究は主に, 脳動脈瘤を対象疾患として行ったが, 同方法論はその他の脳血管障害, 循環器病疾患に応用可能のはずである。シミュレーション結果の妥当性を慎重に評価しつつ, 臨床における有用性を模索する必要がある。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

[1] S. Sugiyama, T. Nakayama, K. Funamoto, M. Ohta, T. Tominaga: Stagnant blood flow in intracranial aneurysms, *Proceedings of the ICBME 2013*, Singapore, (2013).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] S. Sugiyama, K. Funamoto, D. Suzuki, T. Hayase, T. Tominaga: Evaluation of intracranial aneurysm rupture using MR-measurement-integrated simulation, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 86-87.

[3] 杉山慎一郎, 船本健一, 富永悌二: 2D cine phase contrast 法による脳動脈瘤への血流流入部位の同定, 第 41 回日本磁気共鳴医学会大会, 徳島, (2013).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13082
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	3年目

衝撃波前方の電子が後方の熱化学過程に及ぼす影響

Effect of Electron Behavior in front of Shock Wave on Thermo-Chemical Process Behind the Shock Wave

川添 博光^{*†}, 大林 茂^{**††}
山田 剛治^{*}, 吾郷 祥太^{*}, 瀬藤 真実^{*}
^{*}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

宇宙機の耐熱設計を行うためには、大気圏突入飛行時に生成される衝撃波背後の熱化学過程を把握して加熱環境を正確に予測する必要がある。これまでの研究により衝撃波前方における電子の発生が衝撃波背後の熱化学過程に影響を及ぼすことが示唆されている。しかしながら衝撃波前方におけるプリカーサ電子の生成メカニズムが未解明であるために、定量的な知見は得られていない。そこで本研究では、遷移過程が単純な単原子分子アルゴンを対象として、衝撃波前方におけるプリカーサ電子の生成メカニズムを解明することを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究では、トリプルプローブ計測によりプリカーサ電子の電子温度・電子密度を取得した。またプリカーサ電子の生成メカニズムを解明するために、発光分光計測と1次元光電離モデルを用いた理論解析を実施した。図1にトリプルプローブ法の計測系を示す。図に示すように、計測プローブには直径2mmの銅棒の先端を円筒形に加工し、荷電粒子の捕獲表面積に再現性をもたせるために、プローブ側面を絶縁物で被覆した。そしてこのプローブ3本を壁面の影響を受けないように管壁から15mm挿入し、相対的な位置関係は5mm間隔になるように設置した。図2, 3にトリプルプローブ計測より取得したプリカーサ電子の電子温度と電子密度を示す。図3中の $\alpha(=T_i/T_e)$ はイオン温度 T_i と電子温度 T_e の比でありパラメータである。また実験条件は衝撃波速度 $6.12 \pm 0.13 \text{ km/s}$ 、観測部圧力50Paである。図2より電子温度は8000K程度であり、衝撃波面からの位置によらずほぼ一定の値を示している。一方で電子密度は衝撃波面に近づくにつれて指数関数的に増加し、 10^{15} m^{-3} から 10^{17} m^{-3} の範囲にある。この結果、衝撃波前方では多数の電子が存在していることが明らかになった。また図2, 3の破線は1次元光電離モデルを用いた解析結果を示している。本解析においては、プリカーサ電子は衝撃波背後の輻射光による光電離反応($\text{Ar} + h\nu \rightarrow \text{Ar}^+ + e^-$)により生成されると仮定している。解析結果は実験結果と定性的に一致しているのがわかる。図4に発光分光計測より取得した衝撃波前方におけるアルゴンイオン(波長358nm)の発光強度を示す。これより、衝撃波前方100mm程度からアルゴンイオンの発光が確認でき、アルゴンイオンが生成されることがわかる。この結果は上述した光電離反応によりアルゴンイオンとプリカーサ電子が生成されることを示している。以上から、プリカーサ電子の生成過程は、衝撃波背後からの輻射光による光電離反応が有力であると考えられる。

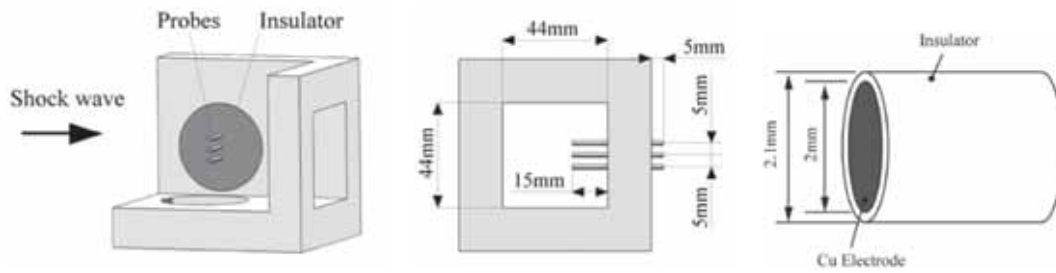


図1：トリプルプローブ計測系

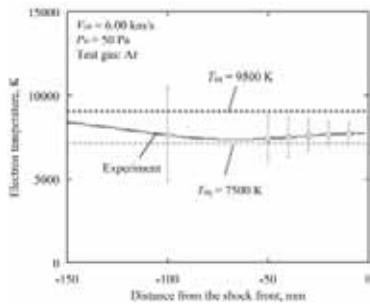


図2：電子温度分布

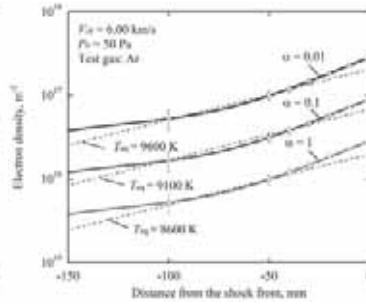


図3：電子密度分布

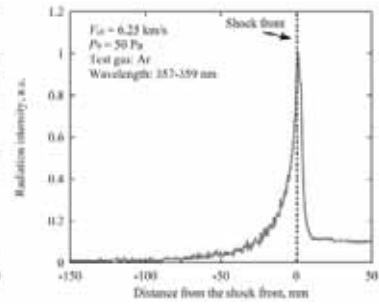


図4：Ar⁺の発光プロファイル

3. 研究目標の達成状況

本年度は、プリカーサ電子の生成メカニズムの解明に着目して研究を実施した。その結果申請書の「予想される成果」に記載したようにプリカーサ電子の電子状態が明らかになり、有力な生成メカニズムは光電離反応であることがわかった。よって本年度の目標は十分に達成できた。

4. まとめと今後の課題

本年度はアルゴンを対象として、プリカーサ電子の生成メカニズムに着目して研究を実施した。この結果、衝撃波前方領域におけるプリカーサ電子の電子状態が取得でき、その生成メカニズムは光電離反応 ($\text{Ar} + h\nu \rightarrow \text{Ar}^+ + e^-$) が有力であることがわかった。今後は衝突輻射モデルによる解析を実施して、衝撃波後方の電離過程について調査する。

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] G. Yamada, S. Ago, H. Kawazoe and S. Obayashi: Generation Mechanism of Precursor Electrons ahead of a Hypersonic Shock Wave in Argon, *Journal of Fluid Science and Technology*, (submitted).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] S. Ago, G. Yamada, M. Setou, H. Kawazoe and S. Obayashi: Shock Tube Measurements of Precursor Radiation ahead of Hypersonic Shock Waves, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 20-21.

[3] 吾郷祥太, 山田剛治, 川添博光: トリプルプローブ法を用いた衝撃波前方における電子状態の計測, 第57回宇宙科学技術連合講演会, 鳥取, (2013).

[4] 吾郷祥太, 山田剛治, 川添博光: アルゴン衝撃波に誘起されたプリカーサ電子の電子状態計測, 日本機械学会中国四国支部第52期総会講演会, 鳥取, (2013).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13083
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	3年目

摩擦試験機スライダーの接触アライメント機構の研究
Study of the Mechanism of Contact Alignment for the Slider Specimen of Tribometer

後藤 実[†], 高木 敏行^{**††}
 伊藤 耕祐^{***}, 竹野 貴法^{****}, 三木 寛之^{*****}
^{*}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, ^{****}東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻
^{*****}東北大学学際科学国際高等研究センター
[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

接触する2面間の動的挙動を明らかにするためには、摩擦試験後の接触表面における諸特性の変化の定量的評価が必要である。しかし、摩擦摩耗現象には現象に寄与する因子(温度、湿度、荷重、摺動速度、材料等)が数多くあり、摩擦試験後の解析は非常に困難である。そこで、接触面と平行な基準面をもつスライダー側試料保持機構と、摩擦試験時の接触アライメント変化を抑制する機構を新たに開発し、東北大学流体研究所既存の往復動式摩擦・摩耗試験機を使用してその効果を明らかにする。継続研究の3年目にあたる本年度は、前年度までに完成させたアライメント安定化機構を用いて、金属含有DLC(高木研究室開発)の摩擦界面に生成するトライボフィルム(TF)のナノインデンテーション測定への適用を試み、トライボフィルムの機械的性質を明らかにする。

2. 研究成果の内容

スライダー側試料保持機構と摩擦試験時の接触アライメント変化抑制補助機構を実装した東北大学流体研究所既存の往復動式摩擦・摩耗試験機を使用して銅含有DLCおよび銀含有DLC(以下、Cu-DLCおよびAg-DLC)とベアリング鋼球および真鍮球の摩擦試験を実施し、異なる摺動相手材表面に生成したTFのナノインデンテーション測定を実施した(図1参照)。その結果、Ag-DLC由来のTFの硬さは、Cu-DLC由来のものに比べて約70%程度であることが明らかになり、TFと摺動相手材の硬さの関係が摩擦特性に与える影響を考察するうえで重要な情報を提供できることが明らかになった。

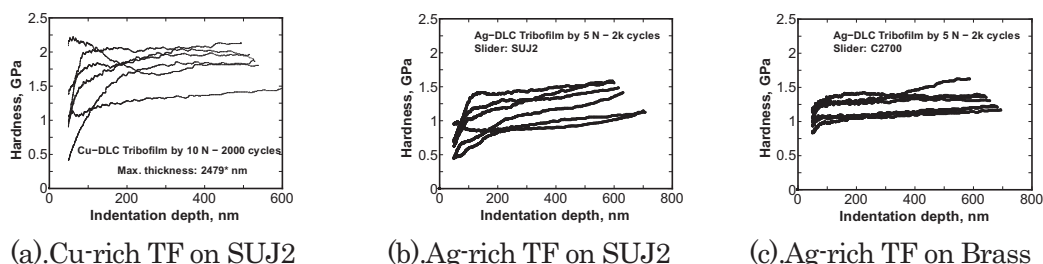


図1: ナノインデンテーションによるTF硬さの深さ方向分布

3. 研究目標の達成状況

平成 23 年度より本年度までの 3 年間継続された本申請課題で、摩擦試験時の接触アライメント変化を抑制する平行二枚バネ構造の補助機構により摩擦力 0.01~2.5 N の範囲におけるスライダ摩擦面のねじれによる接触部移動が抑制され、また、接触面と平行な基準面をもつスライダ側試料保持機構によりスライダ摩擦面に生成したトライボフィルム形態観察および組成分析並びにナノインデンテーションによる微小硬さ測定が可能であることが実験的に証明された。

これらの本申請課題の成果により、知的流動評価研究分野に設置されている摩擦・摩耗試験機を用いた薄膜材料のトライボロジー特性評価の精度を飛躍的に向上させることが可能となった。

4. まとめと今後の課題

今後の課題は、本研究で開発した機構の更なる最適化を図ると共に、その機構を用いて硬質炭素膜の接触境界面におけるナノメカノ流動ダイナミクスの学理構築に寄与していくことである。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Minoru Goto, Kosuke Ito, Hiroyuki Miki, and Takanori Takeno: Study of the Mechanism of Contact Alignment for the Slider Specimen of Tribometer, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 122-123.

[2] M. Goto, K. Ito, J. Fontaine, T. Takeno, and H. Miki: Formation process of metal-rich tribo-film on the counter face during sliding against metal/diamondlike-carbon nanocomposite coatings, *40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology & Tribochemistry Forum 2013*, Lyon, (2013), USB flash memory.

[3] Minoru Goto, Julien Fontaine, Sandrine Bec, Kosuke Ito, Takanori Takeno, and Hiroyuki Miki: Load-dependent friction behavior of metal diamondlike-carbon nano-composite coatings, *Proc. TWC2013*, Torino, (2013), ISBN : 9788890818509.

[4] 後藤 実: 軟質金属を含む固体潤滑膜の研究動向, トライボロジー会議 2013 春 東京, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 201305A12, (2013), USB メモリー, (招待講演).

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	J13084
Classification	General collaborative research
Subject area	Micro/nano technology
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	2nd year

Momentum Transport Phenomena in a Liquid Bridge under Shear

Takashi Tokumasu*†, Philippe Vergne**††
Marie-Helene Meurisse**, Nicolas Fillot**

*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

**LaMCoS, INSA-Lyon

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

In lubricated contacts, when the lubricant supply can be insufficient to fill the gap between the solid surfaces, or when the wettability conditions are poor, the film can fractionate into disjointed liquid bridges. This phenomenon occurs at many places in practical applications. The analysis of the liquid bridge behavior is thus very important. Especially, if its width or the gap between surfaces is of nanometer scale, interfacial effects cannot be neglected and therefore its response cannot be analyzed from a macroscopic basis. Similarly in molecular lubrication problems, lubricants are confined to molecular scale thicknesses. Experiments have shown that in such confinements the structure and dynamics of lubricants are greatly influenced by the nature of the confining surfaces. The well-organized surface structure is reflected, through the interfacial interactions, by a set of potential valleys that lubricant molecules are attracted to occupy. Any surface, no matter how geometrically smooth, manifests a sort of a foot-print over the neighboring lubricant layers. The aim of our research is to investigate the dynamic behavior of liquid bridges and to analyze the effect of surface interaction on the confined thin films by the MD method.

2. Details of program implement

A schematic diagram of the simulation system is shown in Fig. 1. During the simulation, momentum of Q_1 was added to the upper surface every step to keep the velocity of the surface. This momentum was transferred from upper surface to lower surface in a liquid bridge. Finally this momentum was removed to lower surface every step to keep the velocity of the surface. (3)

In steady state, these values have to be converged to the same values. We confirmed that these values are converged to the same value and the system reaches to a steady state.

Using the momentum mentioned above, the shear stress acting on each surface, τ , is obtained by

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{Q}{S\Delta t}. \quad (4)$$

From τ and velocity gradient, dv/dz , the total viscosity coefficient of liquid bridge is obtained.

Firstly the dependence of surface velocity on total viscosity was analyzed. 6 cases of simulations were performed by changing surface velocity to $V=25, 50, 75, 100, 125$ and 150 m/s. These results are compared with the results without surface at the same condition. The results are shown in Fig. 2. As shown in this figure, with surface case, the total viscosity coefficient decrease with the increase in surface

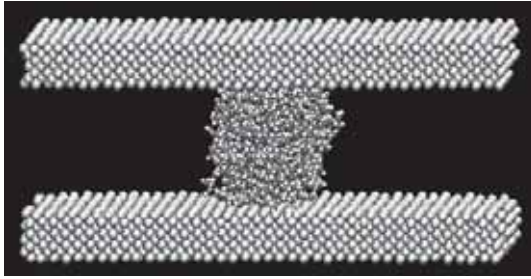


Fig. 1. Schematic diagram of this simulation

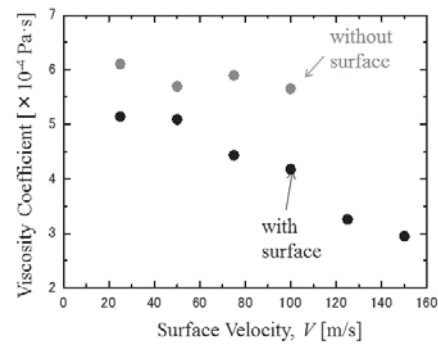


Fig. 2. Total viscosity coefficient of liquid bridge with and without surfaces.

velocity, which means the shear thinning effect. However, the shear thinning does not occur without surface case even in the same condition. For further analysis, the cause of the shear thinning has a strong relation with the velocity slip of the system. We will focus on the relation between velocity slip and shear thinning in the future.

3. Achievements

In this year we analyzed the momentum transport phenomena of liquid bridge with surfaces and the results were compared with those without surfaces. We found out the difference between the two cases and therefore we think the goal of this year was achieved.

4. Summaries and future plans

We continue to analyze the momentum transport phenomena of liquid bridge with surfaces. Next we analyze the momentum transport phenomena under shear whose direction is vertical to the periodic boundary condition.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
 - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] T. Tokumasu, M.-H. Meurisse, N. Fillot and P. Vergne: Momentum Transport Characteristics in a Water Liquid Bridge between Si Surfaces, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 140-141.
- [2] T. Tokumasu, M.-H. Meurisse, N. Fillot and P. Vergne: Molecular Dynamics Study of Lubrication Phenomena of Nanoscale Liquid Bridge between Surfaces, *40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology & Tribochemistry Forum 2013*, Lyon, (2013), pp. 193.
- [3] T. Tokumasu, M.-H. Meurisse, N. Fillot and P. Vergne: A Molecular Dynamics Study for Momentum Transport Phenomena in Nanoscale Liquid Bridge, *World Tribology Congress 2013*, Torino, (2013).
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

Project code	J13085
Classification	General collaborative research
Subject area	Micro/Nano technology
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year

Transport Phenomena of Substances in Electrolyte of Solid Oxide Fuel Cell

Takashi Tokumasu*†, Jeongmin Ahn**††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

**Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

One approach proposed for developing combustion technology is combining the strengths of both Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) and Chemical Looping Combustion (CLC) systems while also avoiding many of their problems. Unique membrane processes show promise in their ability to combine reaction and separation to provide solutions to the previously described problems. In this technique, a hollow fibre membrane fabricated from a single ceramic material, which has high ionic conductivity and good stability, and is able to be impregnated with catalytic materials, is important.

The aim of this research is to analyze the transport phenomena of O_2^- ion in the electrolyte of solid oxide fuel cells by both simulation (quantum calculation and molecular dynamics simulation) and experiment. From these results, we suggest a new concept for an electrolyte which has high ion conductivity and hardness.

2. Details of program implement

2.1. Experimental Analysis

The composite oxide which is prepared by a combined EDTA-citrate complexing method will be synthesized and characterized. The phase structure, the microscopic features of the prepared powders and the specific surface areas are observed through the use of an X-ray diffractometer (XRD), an Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) and N_2 adsorption method separately.

For the proposed membrane materials, the key properties are electronic and oxygen ionic conductivity at various conditions (temperature, oxygen partial pressure, fuel partial pressure). The total electronic conductivity will be measured by using the four-terminal DC technique over bar-shape samples. For ionic conductivity, the electrolyte will be investigated with a symmetrical or complete cell configuration by the AC impedance method using an Electrochemical Impedance (EIS) workstation.

The ceramic hollow fibre membranes will be extruded from the plastic mass which is created by mixing ceramic powder with polymer binder and lubricant. After drying, the tubes will be cut to length and then pre-fired to various temperatures to remove all organics. The pre-fired hollow fibres will then be further sintered at various high temperatures to allow fusion and bonding to occur.

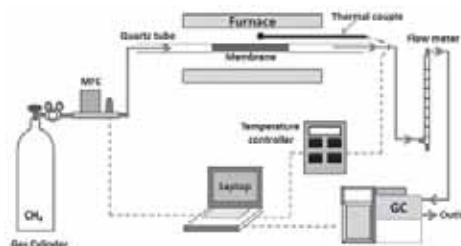


Fig. 1. Schematic of experimental setup

Particular efforts will be made to establish methods for controlling the pore size and structure.

The sintered hollow fibre membrane, then applied as hollow fibre membrane reactor, will be used to study its performance for the reaction of hydrocarbon oxidation using the experimental setup shown in Fig. 1.

2.2. Numerical Analysis

First, the simulator to analyze the transport phenomena of oxygen ion in a ceramic membrane is constructed. As shown in this figure, there are many processes for oxygen ion to transfer to a vacancy. Moreover, there are various kinds of molecules which construct ceramic. We calculate the energy barrier (ΔE) for transport by Density Functional Theory (DFT). The probability for oxygen ion to transfer to a vacancy is obtained by

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (1)$$

where k and T is the Boltzmann constant and temperature of the system, respectively. By using the energy barrier and Eq. (1), large scale simulations of transport phenomena of oxygen ions in a ceramic membrane will be performed. From this technique, we will analyze the effect of the combination of materials which construct ceramic. Moreover, we perform the reaction phenomenon between oxygen molecule and membrane surface by first-principle molecular dynamics simulations. As a result, we can obtain the phenomena that an oxygen molecules changes to an oxygen ion.

3. Achievements

In the first year we made an experimental apparatus and simulation program separately and are ready to make a collaborative research. Therefore we believe the goal of this year was achieved.

4. Summaries and future plans

This year we worked on and completed an experimental apparatus and simulation code separately. Next year we will first simulate the ion transport phenomena in a typical case and start to discuss the material. Finally we will analyze the characteristics of the membrane which has high ionic conductivity.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
*[1] T. Tokumasu and J. Ahn: Transport Phenomena of Substances in Electrolyte of Solid Oxide Fuel Cell, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 138-139.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J13086
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	2年目

分子動力学シミュレーションに基づく散逸粒子動力学相互作用モデルの構築
Construction of Interaction Model for Dissipative Particle Dynamics Method Based on
Molecular Dynamics Simulation

徳増 崇^{**†}, 杵淵 郁也^{**††}

*東北大学流体科学研究所, **東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

粗視化計算法のひとつである散逸粒子動力学 (Dissipative Particle Dynamics: DPD) 法では, 1 個の粗視化粒子で複数の原子・分子を表現することで, MD 法よりも時空間スケールの大きな計算が可能である. ただし, 従来の DPD 法では質量, エネルギー, 長さが無次元化されており, 実現象と対応づけるためには系の等温圧縮率や拡散係数に基づいたスケールリングが必要であるため, 定量的に精緻な議論を展開することは難しい. そこで本研究では, DPD 法をミクロスコピックな観点から再構築し, 物質・運動量輸送を再現可能な粗視化モデルをボトムアップ的に構築する手法を検討した.

2. 研究成果の内容

ある力場の下で運動する微視的粒子で構成される系を考え, 射影演算子法を用いて粒子群 (クラスタ) の重心運動を記述する一般化 Langevin 方程式を導出すると, 各クラスタに作用する力は平均力, 摩擦力, 揺動力の 3 つに分類される. 平均力は現時刻におけるすべての粗視化粒子 (クラスタ重心) の配置によって決まる. 揺動力は時間相関を持つ力である. 摩擦力は, 揺動力の時間相関関数と重心の運動量の畳み込み積分で表わされるため, 粗視化粒子の運動は履歴性を有する. クラスタ重心の運動の時間スケールに比べて揺動力の相関の時間スケールが十分短い場合, 揺動力を時間相関のないランダム力に置き換えることができ, 一般化 Langevin 方程式の摩擦項に Markov 近似を施すことができる. さらに, 粒子に作用する力を二体間相互作用で表現することで, DPD の運動方程式を導出できる. 密度が比較的低い系においては Markov 近似が妥当であるため, DPD モデルによって対応するミクロスコピックな系のダイナミクスを再現することが可能である. しかしながら, 液体等の高密度な系においては, 粗視化粒子の運動の特性時間は希薄な系のそれに比べてかなり短くなる. その結果, 粗視化粒子の運動の時間スケールと揺動力の相関の時間スケールが同程度となり, 時間スケールの分離が困難となる. そのような場合, Markov 近似に基づいた DPD モデルでは系のダイナミクスを正確に再現できない. そこで本研究では, 粗視化粒子の運動の履歴性を考慮した non-Markovian DPD (NMDPD) の運動方程式を導出した. NMDPD 法の妥当性を検証するために, Lennard-Jones 流体に対して本手法を適用し, MD 法による計算結果と比較することで, 提案した粗視化運動方程式の検証を行った (図 1). その結果, 運動の履歴性を考慮に入れることで, 従来の粗視化手法では再現できなかった温度や, 拡散係数, 粘性係数などの系の動的特性を正確に再現できることが明らかになった.

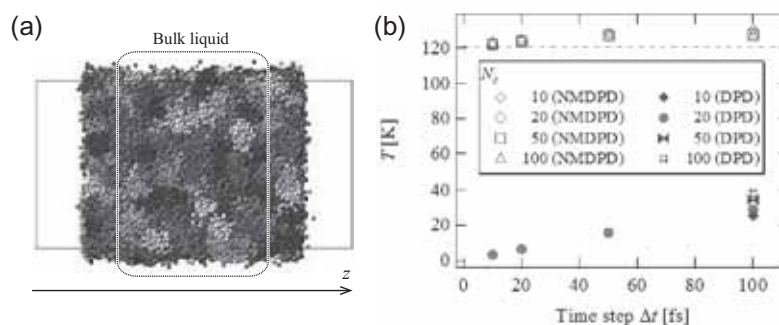


図 1 : Lennard-Jones 流体の粗視化シミュレーション. (a) 粗視化粒子間相互作用モデル作成のために用いた MD 系. (b) 粗視化シミュレーション系の温度 (基になる MD 系の温度は 121 K).

3. 研究目標の達成状況

本研究で提案したメゾスケールのモデリング手法を用いることで、MD 法で取り扱うことが困難な大規模な系における物質輸送をより長時間に渡って追跡することが可能となり、本年度の研究目標は概ね達成された。

4. まとめと今後の課題

複数の原子・分子から構成される粗視化粒子の運動について、履歴効果（非マルコフ性）を考慮に入れた運動方程式を定式化した。その結果、運動の履歴を考慮に入れることで、従来の粗視化手法では再現できなかった温度、拡散係数、粘性係数などの系の動的特性を正確に再現できることが明らかになった。今後は、粗視化粒子を構成する原子・分子の入れ替わりの効果を再現できるように粗視化運動方程式を改良することを検討している。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- *[1] Y. Yoshimoto, I. Kinefuchi, T. Mima, A. Fukushima, T. Tokumasu, and S. Takagi: Bottom-up construction of interaction models of non-Markovian dissipative particle dynamics, *Phys. Rev. E*, Vol. 88, Issue 4, (2013), 043305 (12 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] 吉本勇太, 美馬俊喜, 福島啓悟, 杵淵郁也, 徳増崇, 高木周, 松本洋一郎: 分子動力学シミュレーションの粗視化による散逸粒子動力学相互作用モデルの構築: 非マルコフモデルの評価, 第 50 回日本伝熱シンポジウム, 仙台, (2013), B221.
- [3] 吉本勇太, 美馬俊喜, 福島啓悟, 杵淵郁也, 徳増崇, 高木周, 松本洋一郎: 散逸粒子動力学法の新たな定式化: 非マルコフモデルの検証, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山大学, (2013), J053016.
- [4] Y. Yoshimoto, I. Kinefuchi, T. Mima, A. Fukushima, T. Tokumasu, and S. Takagi: Bottom-up construction of interaction models of non-Markovian dissipative particle dynamics, *3rd International Conference on Molecular Simulation*, Kobe, (2013), 2P42.
- *[5] Y. Yoshimoto, I. Kinefuchi, T. Mima, A. Fukushima, T. Tokumasu, and S. Takagi: Construction of Interaction Model for Dissipative Particle Dynamics Method Based on Molecular Dynamics Simulation, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 126-127.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）なし

課題番号	J13087
区分	共同研究集会
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	3年目

次世代高温環境センサ研究会
Seminar for Next Generation Sensors for Super-High Temperature Environment

高木 敏行*†, 坂本 敏昭**††
三木 寛之***, 内一 哲哉*, 青木 孝行****, 井元 尚充*****
*東北大学流体科学研究所, **株式会社インテリジェント・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
****日本保全学会, *****東北経済産業局
†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。

2. 研究成果の内容

平成25年度は、以下の2回の研究会を開催しシーズ研究を中心に調査を行った。

(1) 第1回研究会

本研究会より、東北大学流体科学研究所 未到エネルギー研究センター、および次世代自動車宮城県エリア（文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム）との共催で研究会を実施した。調査対象として、原子力産業、自動車産業なども視野にいれて、幅広い調査を実施した。

日 時： 平成25年10月30日（木）13時30分 — 17時30分

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：62名

講 演：

「実用エンジンにおける点火プラグ近傍燃料濃度計測システム」

河原 伸幸（岡山大学大学院自然科学研究科）

「シビアアクシデント時の計装システムの開発の概要について」

夏井 健吉（東北電力株式会社）

「炭素繊維複合材の高温環境引張試験」

松嶋 正道（宇宙航空研究開発機構）

「レーザ加工技術を活用した耐熱FBGセンサの開発と利用」

西村昭彦（日本原子力研究開発機構）

「次世代センサの今後の展望について」

井元 尚充（東北経済産業局）

(2) 第2回研究会

日本非破壊検査協会新素材に関する非破壊試験部門主催の「安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム」との共催により行い、非破壊検査に関する新素材研究者の観点からのご意見を頂いた。

日 時： 平成26年3月10日（月）13時10分 - 16時50分

場 所： 宇宙航空研究開発機構 飛行場分室（東京都三鷹市大沢 6-13-1）

参加者数： 72名

講 演：

特別講演 “Application of EMAT to high temperature monitoring”

Hans-Jürgen Salzburger (IZFP, Germany)

「耐熱磁気センサの開発」 高屋茂((独)原子力機構), 荒川尚, 樺田理 (日鉄住金テクノロジー(株))

「電磁超音波法の高度化と熱間計測への応用」 飯塚幸理 (JFE スチール(株))

「ジェットエンジン部品の不具合検査事例」 北条正浩 (JAXA)

「JAXA 複合材技術研究センターの紹介」 松嶋正道 (JAXA)

3. 研究目標の達成状況

本年度は、これまでの2年間の調査活動を踏まえて、シーズおよびニーズの両面から調査を行うべく、2回の研究集会を開催した。ニーズとしては、原子力産業（軽水炉，核融合炉），航空機産業，鉄鋼産業，自動車産業等，幅広い分野の産業におけるニーズを調査した。さらに、シーズについての調査も継続して行い、ニーズとシーズの両者から課題を抽出した。

4. まとめと今後の課題

本研究会では、本年度を含め合計7回の研究会を開催してきた。毎回出席する研究者も多く、自立した研究会に移行できる見通しが得られた。また、日本非破壊検査協会との共催により本研究会を開催することにより、非破壊検査の現場においても高温領域でのセンサのニーズが高いことがわかった。来年度以降も第2フェーズとして、活動を継続し、日本非破壊検査協会新素材に関する非破壊試験部門との連携により本研究会を開催し、自立した研究会の設置に向けた準備を行う。また、日本非破壊検査協会誌の「非破壊検査」の第63巻(2014)の12号において、本研究会の活動を総括する特集号を企画することになった。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] 日本非破壊検査協会誌「非破壊検査」63巻12号(2014)にて特集号を企画中

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

該当なし

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

[2] 次世代高温環境センサ平成25年度第1回研究会 講演概要集，平成25年10月30日

[3] 次世代高温環境センサ平成25年度第2回研究会 講演概要集，平成26年3月10日

課題番号	J13088
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4 ~ 2014.3
継続年数	2年目

分子動力学法を用いた液体水素の熱・輸送物性に対する量子効果の影響解析
 An Analysis of Effect of Quantum Nature on the Thermodynamic/Transport Properties of Liquid Hydrogen Using Molecular Dynamics Method

徳増 崇[†], 坪井 伸幸^{**††}

津田 伸一^{***}, 永島 浩樹^{*}

*東北大学流体科学研究所, **九州工業大学工学研究院

***信州大学工学部

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

実験では水素のナノスケールの熱流動特性を全て把握できないため、分子動力学(Molecular Dynamics : MD)法を用いた解析により得られる知見は、水素の安全かつ効率の良い利用につながると思われる。しかし水素は分子量が小さいため、原子核の不確実性が大きくなり、通常の古典MD法による解析が難しい。そこで本研究では、この水素分子の量子効果を取り込んだMD法を用いて、量子効果とその熱流動特性に与える影響と分子論的メカニズムを解明することを目的としている。平成25年度は、特に低温水素のマクロな熱流動特性に注目し、経路積分セントロイド(CMD)法を用いて液体水素の輸送物性評価を行い、水素分子の量子効果とその輸送物性に与える影響とそのメカニズムを明らかにすることを目的とした。

2. 研究成果の内容

量子効果が水素の輸送物性に与える影響を調べるために、CMD法と従来の古典MD法を用いて液体水素の輸送物性評価を行った。昨年度は特に、水素分子の拡散性に対する量子効果の影響を調べるために、液体水素の拡散係数を導出した。計算は、密度一定のもと幅広い温度領域で行い、水素分子の量子効果とその拡散性に与える温度依存性について解析を行った。拡散係数は、Green-Kuboの方法を用いて導出した。CMD法と古典MD法より得られた拡散係数の比較(図1)より、100K($1/T=0.01$)では両方の手法より得られた拡散係数は良く一致しているが、100K以下の温度領域では、CMD法より得られた拡散係数は、古典MD法より得られた拡散係数より小さいことが分かる。この要因を調べるために、Force matching法を用いて水素分子間ポテンシ

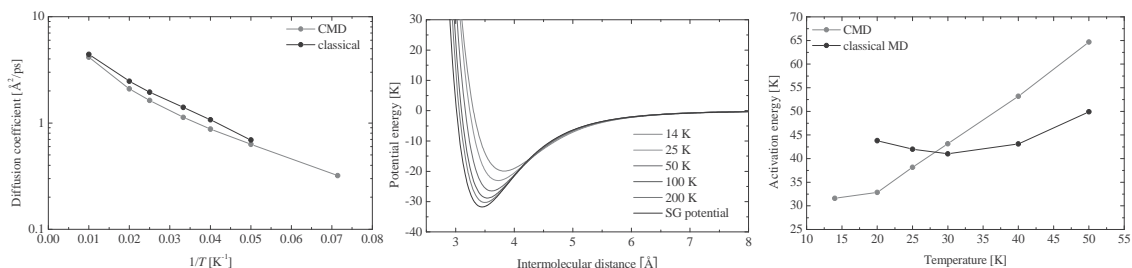


図1：拡散係数の比較 図2：水素分子間ポテンシャルの比較 図3：活性化エネルギーの比較

ャルを作成した(図2)。この結果より、水素分子の量子効果を考慮することで、水素分子間相互が変化し、斥力範囲が広くなり、井戸の深さが浅くなることが分かる。これより、量子効果により水素分子が見かけ上膨張したようになるため、拡散性が低下したと考えられる。しかし、斥力範囲は温度が低くなるにつれて広がっているが、20K($1/T=0.05$)では拡散係数の差は小さくなっていることが分かる。この要因を調べるために、アレニウスの式とフィッティングを行い、活性化エネルギーを導出した(図3)。これより、CMD法の活性化エネルギーは、温度が低下するとともに低下し、30K以下では古典MDよりも活性化エネルギーが小さくなることが分かる。仮に、量子効果により分子が膨張する影響が水素分子の拡散に対して支配的である場合、分子は拡散しにくくなるため、活性化エネルギーは増加すると考えられる。しかし、30K以下の温度領域では古典MDよりも活性化エネルギーが小さいことより、30K以下の温度領域では分子間ポテンシャルの井戸が浅くなるのが水素分子の拡散に対して支配的になると考えられる。

3. 研究目標の達成状況

平成25年度の目標であった、低温水素のマクロな輸送物性に対する量子効果の影響とそのメカニズムは、本研究により十分に明らかにされ、目標は達成されたとと言える。

4. まとめと今後の課題

平成25年度の研究により、量子効果が低温水素の輸送物性に与える影響は大きく、量子効果により水素分子の拡散性が変化することが明らかとなった。今後の課題としては、現在の解析では水素分子の拡散性に対する量子効果の影響のみしか明らかになっていないため、この量子効果がエネルギー輸送に対してどのような影響を与えるかについて解析を行う必要がある。

5. 研究成果

1) 学術雑誌(査読つき国際会議、解説等を含む)

- *[1] 永島浩樹, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 徳増崇: 日本機械学会論文集 B 編, 79 巻, (2013), 1848-1857.
- [2] Hiroki Nagashima, Shin-ichi Tsuda, Nobuyuki Tsuboi, A. Koichi Hayashi, Takashi Tokumasu: *Journal of Physics : Conference Series*, Vol. 490, (2014), 012160.
- [3] Hiroki Nagashima, Shin-ichi Tsuda, Nobuyuki Tsuboi, A. Koichi Hayashi, Takashi Tokumasu: *ICNMM2013*, (2013), ICNMM2013-73161.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[4] Hiroki Nagashima, Shin-ichi Tsuda, Nobuyuki Tsuboi, A. Koichi Hayashi, Takashi Tokumasu, A Molecular Dynamics Study on the Thermodynamic and Transport Properties of Liquid Hydrogen, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 128-129.
- [5] 永島浩樹, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 徳増崇: 低温水素の熱・輸送物性における量子効果発現メカニズムの分子動力的解析, 第50回日本伝熱シンポジウム, 仙台, (2013), B224.
- [6] 永島浩樹, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 徳増崇: 量子効果が低温水素の熱・輸送物性メカニズムに与える影響の分子動力的解析, 日本機械学会2013年度年次大会, 仙台, (2013), J053012.

3) その他(特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J13089
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

SiC基板成膜プロセスの量子・分子論的解析
Quantum Molecular Analysis for the Deposition Process of SiC Substrate

徳増 崇^{*†}, 須藤 理枝子^{**††}

*東北大学流体科学研究所,

**株式会社さがみはら産業創造センターさがみはら表面技術研究所

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

環境対策・省エネ社会の本格到来により、次世代自動車・鉄道等に搭載するパワーデバイスでは更なる高効率・低コスト化が必要である。一般にパワーデバイス用SiC基板は1,500°Cを超え2,000°C近い温度での成膜が必要であり、その高温においても装置としての強度や不純物拡散等を生じない工夫が必要であるために、部材に係る費用は非常に大きい。さらに高温を維持するための熱源としての電力はもとより、長時間の成膜では高温下の真空維持等その他の製造コストが高価となる。そこで本研究では独自手法による成膜試験に加えて、材料ガスの開発と成膜条件の最適化についてより高効率・低エネルギーで行なえるよう、シミュレーションソフトを活用した計算機実験を行なう。

2. 研究成果の内容

○成膜材料ガスの化学構造検討

一般的に用いられ、もっとも単純な構造をしたモノメチルシラン（1MS）について第一原理計算を用いて各結合エネルギーを計算した（図1）。



図1：第一原理計算を用いたメチルシランの結合エネルギー

SiCを形成する上でメチルシランからC-H結合およびSi-H結合が解離し、C-Siラジカルが出来る必要がある。対してCH₃-SiH₃中のC-Si結合が最も結合エネルギーが低く最も低エネルギーで解離することが示唆された。ついでSi-H結合が解離し、最後にメチル基からHの脱離が生じることになる。このことから一般的なアルキルシランの代表格であるメチルシラン化合物は既存のメタン・シランガスによる高温プロセスよりは低温化されるが、

C-Si 間結合が優先的に解離する為、低温における SiC の高速成膜には不適と考えられる。

○成膜時吸着反応のシミュレーションによる検討

モノメチルシランを用い、CH₃-Si のラジカルが生成した場合に、Si 基板表面近傍（表面から数ナノメートル）において、どのように分子が吸着・反応するのか、どの部位にたどり着くのかのミクロな計算を行った。CH₃-Si ラジカルが基板表面に吸着する際、Si 基板最表面の Si 原子のずれが生じ、間隔が不均一になっている。この反応において基板に大きなストレスが生じていることが示唆された（図2）。また吸着する分子においても最適なサイトに吸着する為に基板表面で分子の回転が生じる可能性を示唆しており、基板表面から数オングストロームの領域における分子の分解、回転、吸着、までの一連の反応が結晶化に大きな影響を与える可能性を示唆した。一般的に SiC はマイグレーションのほとんどない素材となっていることから、この基板表面近傍数ナノメートルにおいて C-Si のようなラジカルを優先的に生成する最適な分子設計が重要である。

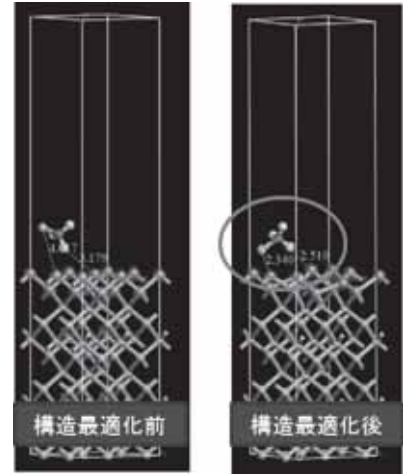


図2：構造最適化の実施

3. 研究目標の達成状況

平成 25 年度の目標であった、SiC 成膜における材料ガスの開発と成膜条件の最適化を行うためにシミュレーションを用いたナノスケールでのメカニズムの把握に対し、手法について見通しを得ることができたので、平成 25 年度の目標は達成できたと考えている。

4. まとめと今後の課題

平成 25 年の研究により、成膜材料ガスの構造検討、成膜時吸着反応のシミュレーション等を行い SiC 成膜メカニズムの把握を試みたところ、それが手法として有効であると考えられた。さらに、次年度以降は今年度の成果を踏まえ、最適なラジカルを生成する条件や化合物の構造について計算を行い、より実験値に近似させることを試みることを検討していく。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] R. Sudo, T. Tokumasu, K. Kenichi: Quantum Molecular Analysis for the deposition process of SiC substrat, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 130-131.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J13090
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	3年目

力天秤の開発とその静粛性超音速航空機への適用

Development of Force Balance and Its Application to a Silent Supersonic Biplane Model in the Low Speed Wind Tunnel

川添 博光**†, 大林 茂**††
山田 剛治*, 今川 真吾*, 井上 勝之*
*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

本研究は、昨年度開発した感度調整可能な3分力力天秤の測定精度と検出感度を向上させるために、新たに六角形状力天秤を開発することを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究で新たに提案する六角形状力天秤の概要図を図1に示す。Cは六角形状力天秤のアスペクト比であり、天秤形状の違いを示すパラメータである。またL, D, Mはそれぞれ揚力、抗力、ピッチングモーメントを計測するためのひずみゲージ貼付位置である。これらの位置はFEM解析により決定した。図2に天秤形状の違いによる検出感度比の変化を示す。これより検定試験とFEM解析より得られた検出感度比は良い一致を示し、Cの値に依存して大幅に変化することがわかる。また開発した六角形状力天秤を適用して、マッハ数M=3.8の条件でくさび模型の空力特性を取得した。得られた結果を図3に示す。これより十分な時間分解能で模型に作用する揚力と抗力を取得できているのがわかる。計測データ中に見られる変動は、模型支持部の振動によるものである。今後、動的な検定試験を行い、計測データ中の変動を除去する必要がある。

3. 研究目標の達成状況

従来よりも測定精度と検出感度比を向上させた六角形状力天秤を開発でき、本年度の目標は十分に達成した。

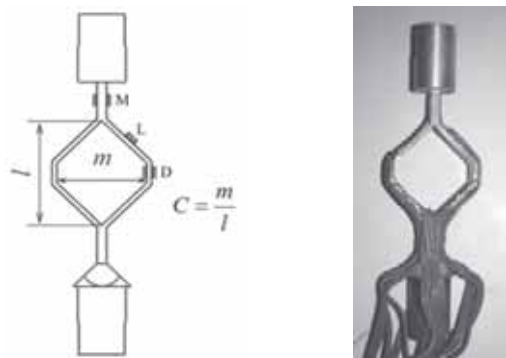


図1：六角形状力天秤の概要図

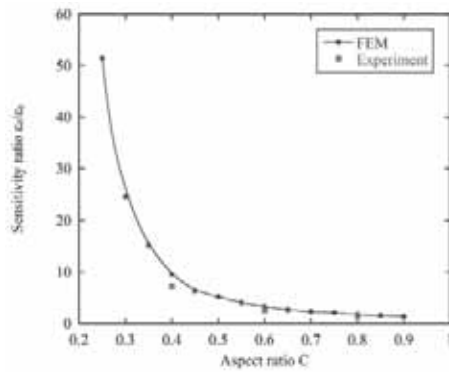


図 2 : 天秤形状の違いによる検出感度比の変化

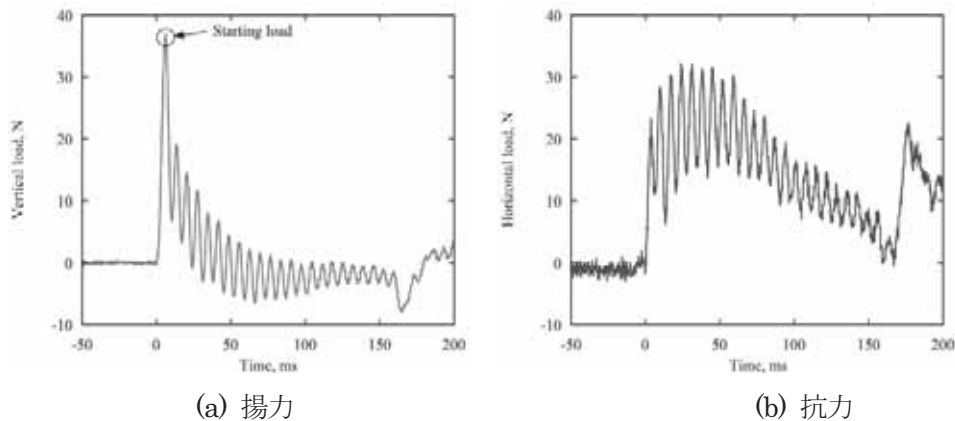


図 3 : 風洞試験結果(M=3.8)

4. まとめと今後の課題

天秤形状を六角形状にすることで測定精度と検出感度比を向上させることができた。また超音速風洞試験に適用した。今後、計測データ中の変動を除去するために、動的な検定試験を行う予定である。

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)

- *[1] G. Yamada, H. Kawazoe, H. Suemura, T. Matsuno and S. Obayashi: Development of a Sensitivity-Adjustable Three-Component Force Balance and Its Application to Wind Tunnel Testing, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 8, No. 2, (2013), pp. 209-218.
- [2] G. Yamada, S. Imagawa, K. Inoue, H. Kawazoe and S. Obayashi: Improvement of a Sensitivity-Adjustable Three Component Force Balance and Its Application to Supersonic Wind Tunnel Testing, *Journal of Fluid Science and Technology*, (submitted).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[3] S. Imagawa, K. Innoue, G. Yamada, H. Kawazoe and S. Obayashi: Application of a Sensitivity-Adjustable Three Component Force Balance to a Silent Supersonic Biplane Model, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 22-23.
- [4] 今川真吾, 山田剛治, 川添博光: 六角形状をした感度調整可能な3分力天秤の開発, 日本機械学会中国四国支部第44回学生員卒業研究発表講演会, 鳥取 (2013).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J13094
区分	一般共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

温熱治療における局所加熱法の理論的・実験的研究

Theoretical and Experimental Studies of Local Heating Method in Hyperthermia Treatment

圓山 重直*†, Victoria Timchenko**††, 小玉 哲也***, 小宮 敦樹*, 岡島 淳之介*

*東北大学流体科学研究所

**School of Mechanical and Manufacturing Engineering, UNSW

***東北大学医工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、ハイパーサーミアを見込むレーザー治療において、生体組織内の局所的な加熱手法を伝熱現象の観点から定量的に評価し、提案する。当研究グループで開発したふく射要素法を用いて、レーザーによる生体加熱機構、および生体表面を任意の手段で冷却した際の生体伝熱機構の双方を評価する。また、提案する生体内の局所加熱手法の効果を評価するために、実際の治療および動物実験を見越した冷却装置を設計する。

2. 研究成果の内容

本研究において、生体内の光伝播では二次元軸対称ふく射要素法を、生体伝熱方程式では有限体積法をそれぞれ適用し、局所加熱手法の解析を行った。図1に計算モデルの概要を示す。このモデルは、レーザー照射と平行して生体表面を水冷されたガラスで冷却する状態を想定し、生体内の光多重散乱、体内の血流・代謝、そして生体表面冷却を複合的に解析できる。また、使用するレーザーはYAGレーザー(1064 nm, 連続発振)とした。図2に数値計算によって得られた生体表面冷却とレーザー加熱を同時に行った際の生体組織内(真皮層)の温度分布を示す。計算条件は、生体組織の予備冷却を300秒間行った後、レーザーパワー10W, ビーム半径1.0mmのレーザーを100秒間照射したものとする。

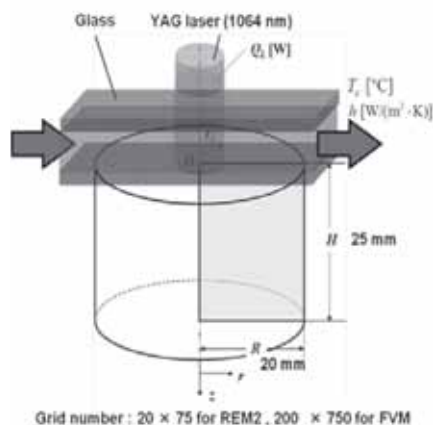


図1：二次元軸対称生体伝熱モデル

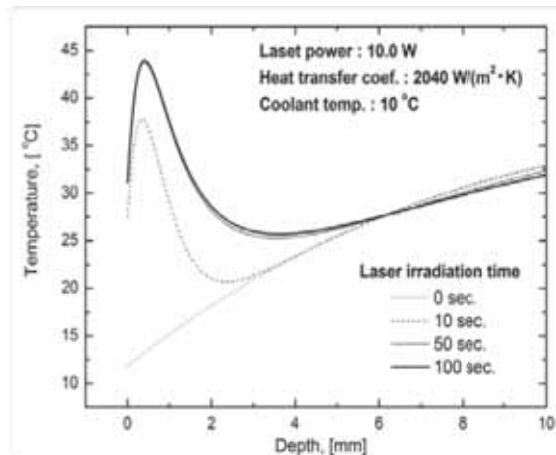


図2：表面冷却を併用した温度予測分布

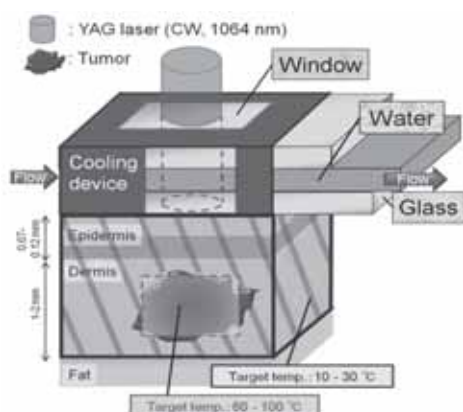


図 3 : 皮ふ冷却装置概念図

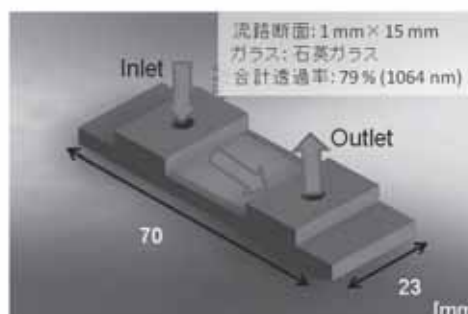


図 4 : 皮ふ冷却装置

図 2 では、生体表面の温度が 33°C 以下(人間の皮膚の平常温)に保たれていることが分かる。加えて、生体組織内の最高温度とその位置はレーザー照射 50 秒後と 100 秒後とで変化が殆どなく、生体組織の局所的な温度を制御できる可能性を示唆している。この予測結果を検証するために、動物実験を見込んだ皮ふ冷却装置を設計した。図 3, 図 4 に表面冷却機構の概念図と設計した冷却装置の詳細をそれぞれ示す。冷却装置の矩形流路内は十分に発達した強制層流対流であることを仮定し、流路内の熱伝達率を $2040 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ として見積もった。また、実験ではレーザー光が冷却装置内を通過する際に反射・吸収に伴うエネルギー減衰が発生し、評価に悪影響を与えると予測される。この外乱を低く抑えるために、レーザーに対して高い透過率を持つ石英ガラスを採用し、装置の合計透過率を 79%として見積もった。

3. 研究目標の達成状況

レーザー照射に伴う生体内の温度制御に関して、定量的な評価をもとに、その条件を見積もることができる。また、生体内の温度制御を行うための手法・装置を提案し、設計した。ハイパーサーミアにおいて、レーザーで病巣のみを局所的に加熱・破壊する治療法は未だ確立されていない。本研究が提案する手法は、治療という観点において現実的であり、実用化に向けて高い期待が持てる。以上を踏まえて、本年度の研究は 100%達成できたといえる。

4. まとめと今後の課題

ハイパーサーミアを見込む生体組織内の局所的な加熱手法を、伝熱現象の定量的な評価により提案した。今後は設計した装置を作成し、動物実験にて生体内温度制御法の評価を行う。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

該当なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] T. Sugiura, J. Okajima, A. Komiya, T. Kodama, S. Maruyama: Study on Temperature Control in Biological Tissue for Minimally Invasive Laser Therapy, *Japan-China Joint Workshop on Bio, Material and Flow Dynamics*, Sendai, (2013).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

該当なし

課題番号	J13095
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2013.4～2014. 3
継続年数	2年目

Alloy600 の粒界における Cr 欠乏分布と局所的磁気特性の相関シミュレーション
Simulation Analysis on Grain Boundaries Thought Relation Between Cr Depletion Distribution and Local Magnetic Properties

山口 克彦*†, 高木 敏行**††

内一 哲哉**, 寺島 颯一***, 鈴木 健司*

*福島大学共生システム理工学類, **東北大学流体科学研究所, ***福島大学理工学研究科

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

鋭敏化した Alloy600 に対して見られる結晶粒界上での Cr 欠乏量の微細分布構造をシミュレートし, Cr 欠乏により生じる局所的な磁気特性を解析する. これにより, これまでマクロにしか検証されていない劣化の進行を, 結晶粒界のどの領域から発生するかを含めてミクロレベルでの検証を可能にする検査手法を確立する.

2. 研究成果の内容

結晶粒界における Cr 欠乏により生じる磁性領域を, ガウス分布に従って磁性サイトが分散しているモデルによりクラスターを構築し, その磁気特性についてモンテカルロ法を用いてシミュレーションを行った. クラスターの構築には, 以下に示すガウス関数

$$Ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{\sigma}} \quad (1)$$

を用い, 鋭敏化の進行に対応する Cr 濃度分布として, $\sigma=2, 3, 4, 6, A=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ の各パラメータを設定した. これらのクラスターに対して行ったマイナーループのシミュレーション例として $\sigma=2, A=0.2$ の結果を図 1(a)に示す. これらの結果について, 各マイナーループにおける保持力 H_c^* とヒステリシス損 W_F^* の磁場の最大値 H_a に対する依存性を示したものがそれぞれ図 1(b), (c)である. これらのシミュレーションによる解析結果は, 対応する実験結果と比較して検証がなされ, 概ね一致するものとなった.

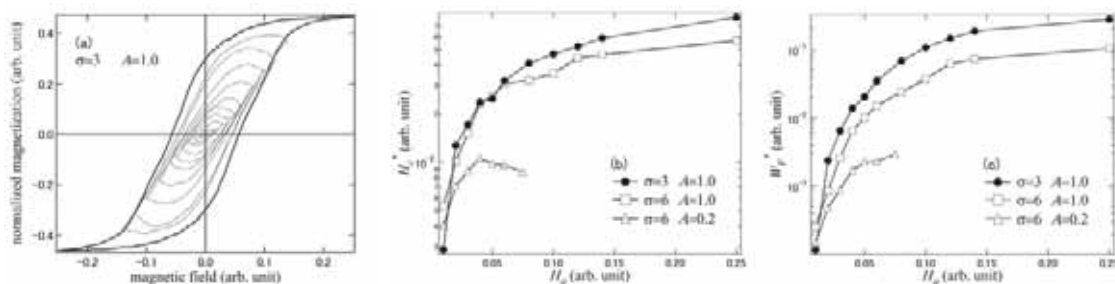


図 1: ガウス分布クラスターによるマイナーループの計算例 (a) と H_c^* (b) と W_F^* (c) の磁場依存性

3. 研究目標の達成状況

Cr 濃度分布をガウス関数で近似し、鋭敏化の各段階に対応する磁性サイト分散クラスターを構築した。それらのクラスターについてマイナーループシミュレーションによる磁気特性の解析を行い、実験結果との比較を行うことでモデルの妥当性が示された。これにより結晶粒界近傍における Cr 欠乏が起きているマイクロな領域での磁気特性をシミュレーションの面から検証することが可能となった。

4. まとめと今後の課題

Cr 濃度分布に従って磁性サイトが分散するモデルによりクラスターを構築し、その磁気特性についてシミュレーションを行い、対応する実験結果と比較し検証を行うことで、鋭敏化の進行に伴い変化する結晶粒界近傍での Cr 欠乏領域の磁気特性を説明するのに、磁性サイトの分散によるモデルが妥当であることが示された。今後の課題としては、鋭敏化した Alloy600 に対する μ Kerr 測定による局所的な磁気特性の実験を進め、それらの結果とシミュレーション結果との比較検証を行うことで Cr 欠乏の定量化に向けたシミュレーション手法の開発を進めることである。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)
なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Kenichi Terashima, Kenji Suzuki, Hidetoshi Ueno, Makoto Ishiwata, Tsugiko Takase, Katsuhiko Yamaguchi: Measurement of magnetization process for magnetic grain region in austenitic stainless steel using μ -MOKE magnetometer, *9th International Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics*, Italy, (2013), WAO-14, p. 10.
- [2] K. Terashima, K. Suzuki, K. Yamaguchi, T. Uchimoto, T. Takagi: Minor Hysteresis Loop Analysis for Magnetic Granular Systems with Local Distribution, *19th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, Hungary, (2013), PB2-10, p. 47.
- [3] Kenichi Terashima, Kenji Suzuki and Katsuhiko Yamaguchi: Minor loop analysis using Mote Carlo simulation for clusters with various magnetic site densities, *The 32th JSST Annual Conference International Conference on Simulation Technology*, Tokyo, (2013), OS17-12, p. 96.
- *[4] Kenichi Terashima, Suzuki Kenji, Yamaguchi Katsuhiko, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi: Simulation Analysis on Grain Boundaries Thought Relation between Cr Depletion Distribution and Local Magnetic Properties, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 32-33.
- [5] 寺島顕一, 鈴木健司, 山口克彦, 内一哲哉, 高木敏行: 鋭敏化した Alloy600 のマイナーループ解析, 第 37 回日本磁気学会学術講演会, 札幌, (2013), 3pA-15, p. 15.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし (マスコミ発表) なし

(受賞) Student Presentation Award, Minor loop analysis using Mote Carlo simulation for clusters with various magnetic site densities, Kenichi Terashima, 2013.9, Japan Society for Simulation Technology.

課題番号	J13096
区分	一般共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

次世代高翼航空機のための最適設計
Design Exploration for the Next Generation High Wing Aircraft

大林 茂*†, 鄭 信圭**††
橋本 成泰*

*東北大学流体科学研究所, **慶工科大学機械工学科
†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

近年, 航空業界では経済性と環境に優れた次世代航空機に関する研究開発が盛んに行われており, その一つの候補として高翼形態の航空機が注目を浴びている. 本研究では, 高翼形態航空機のフェアリングを含む翼の性能最適化を近似曲面と最適設計探索手法を用いて行うことでその有効性を示すことが研究の目的である.

2. 研究成果の内容

本研究では, 近似曲面と最適探索手法を用いて高翼形態航空機の空力最適設計を次のような4段階で行った.

- 1) 主翼・フェアリング形状の空力最適化
- 2) 胴体上面形状の空力最適化
- 3) 胴体上面・機首形状の空力最適化
- 4) 胴体上面・機首・主翼形状の空力最適化

図1と図2には, 胴体上面・機首・主翼形状の空力最適化結果を示している.

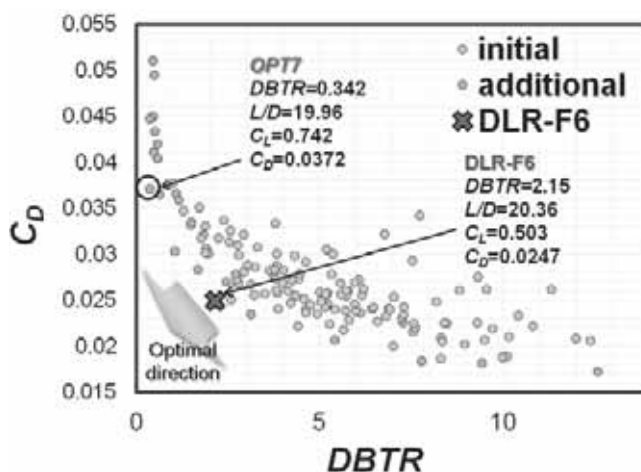


図1 : 最適化結果: 空力性能

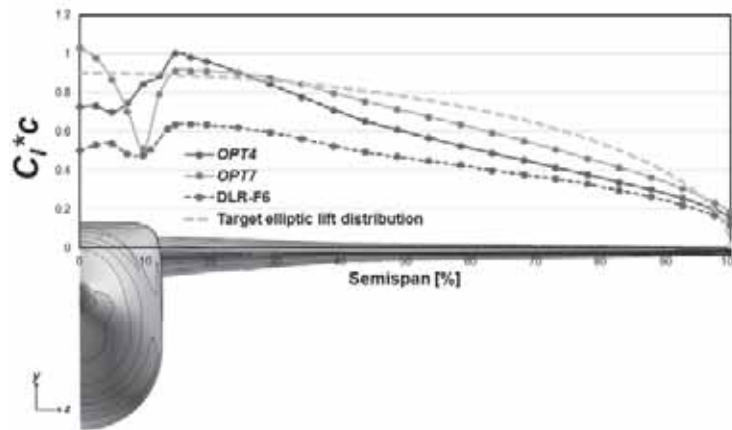


図 2 : 38 DLR-F6, OPT4, OPT7 のスパン方向揚力分布

3. 研究目標の達成状況

本研究で行った高翼形態航空機の設計探査により、優れた空力性能を持つ高翼形態航空機の可能性が示されたので当初の研究目標が 100%達成された。

4. まとめと今後の課題

本研究では、高翼形態航空機に超高バイパス比エンジンを搭載することを想定し、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) を用いた空力最適化を通して、高翼形態に適した主翼・胴体形状の設計探査を実施し、高翼形態の空力的特性および設計知識を得た。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] A. Hashimoto, S. Jeong and S. Obayashi: Design Exploration for the Next Generation High Wing Aircraft, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 80-81.

[2] A. Hashimoto, S. Jeong and S. Obayashi: Aerodynamic Optimization of the Upper Shape of the Fuselage for High-Wing Aircraft, *Proceedings of KSAS 2013 Fall Conference*, (2013), CD-ROM.

*[3] A. Hashimoto, S. Obayashi and S. Jeong: Aerodynamic Optimization of High-Wing Configuration for Near Future Aircraft, *AIAA 2014-0291*, (2014).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J13097
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year

Optimization of Artificial Islands Arrangement for Reduction of Tsunami Damage

Fumiya Togashi*††, Shinkyu Jeong**
 Rainald Lohner***, Shigeru Obayashi****†

*Senior research scientist, Leidos, USA

**Kyung Hee University, Korea

***College of Science, George Mason University, USA

****Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective of this study is to explore the possibility of diminishing the future huge tsunami energy by installing artificial islands on the ocean and to research the optimized island locations using Multi-Objective Genetic Algorithms (MOGA) to maximize the effectiveness of tsunami energy diminishing.

2. Details of program implement

Our in-house general purpose CFD code, FEFLO has a capability of calculating 3D Tsunami flow as shown in Fig.1. We optimized an artificial island arrangement to diminish Tsunami damage by multi-objective genetic algorithm software, which was developed at IFS. The artificial island configuration in this study was shown in Fig. 2.

Twelve sample arrangements were prepared before the optimization. The distance range from the land (=x in Fig. 2) for the sample arrangements were from 2.3 m to 11.4 m. The distances between the islands (=d in Fig. 2) were from 0.6 to 3.27 m. The peak water heights (objective 1) were measured at the center front of each building and impulse (objective 2) values were measured at 1.2 m height of each building. The average values of the sample arrangements were shown in Table.1.

The optimization software gave us the optimized location: x=6, d=0.75. The objective values obtained were also shown in Table 1. All the values were decreased compared with sample averages. It means that Tsunami damage was successfully diminished.

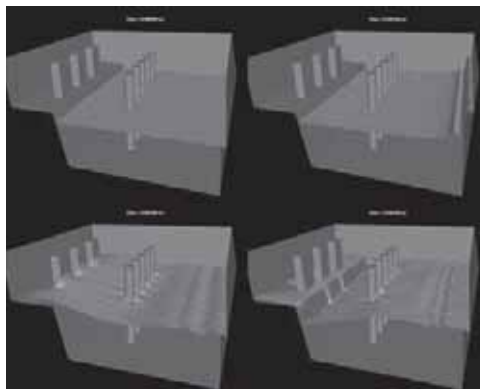


Figure 1 : 3D Computation of Tsunami by FEFLO

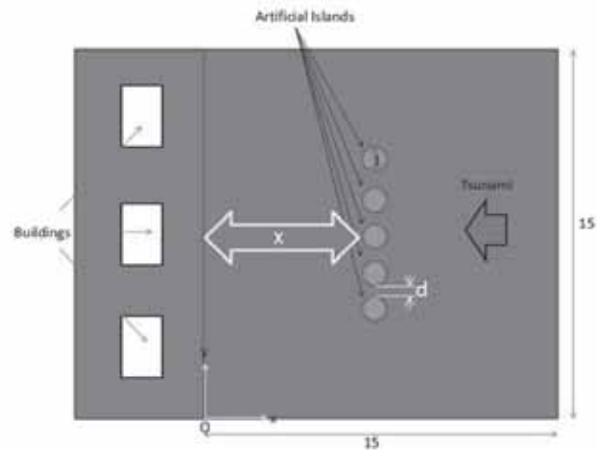


Figure 2 : Configuration for an optimization

Table 1. Average and optimized peak water heights and impulses.

Obj.Func. 1:Water height of building 1(Top), 2:Water height of building 2(Middle), 3:Water height of building 3(Bottom), 4:Impulse of building1, 5:Impulse of building2, 6:Impulse of building3

Obj.Func.	1	2	3	4	5	6
Sample Ave.	2.75	2.76	2.77	15.51	17.94	16.61
Optimization	2.69	2.71	2.73	13.01	16.03	14.81

3. Achievements

We successfully performed an optimization simulation of an artificial island assignment to diminish Tsunami damage by our in-house CFD code, FEFLO and multi-objective design optimization code.

4. Summaries and future plans

An optimization of artificial island locations to diminish the tsunami energy was investigated. The multi-objective design optimization code developed at IFS was applied to this optimization simulation and showed good improvement (15% of damage reduction). Our future plan is to develop this model to more practical and realistic artificial island model. This year model was simple cylindrical shape and 2-D location arrangement. We would like to apply the new code to more practical shape islands and to explore more effective arrangement.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
 - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] F. Togashi, S. Jeong, R. Lohner, and S. Obayashi: Optimization of Artificial Small Islands Arrangement for Tsunami Diminishing using Design Exploration, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 56-57.

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

Project code	J13098
Classification	General collaborative research
Subject area	Life Science
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year

Effects of Temporal and Spatial Oxygen Heterogeneity on Cell Processes

Kenichi Funamoto*†, Ioannis K. Zervantonakis**, Roger D. Kamm***††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Department of Cell Biology, Harvard Medical School

***Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Both *in vivo* and *in vitro* studies have demonstrated that the hypoxic microenvironment with temporal and spatial oxygen gradients regulates many critical cellular processes, including cell proliferation, apoptosis, migration and differentiation. We have developed a microfluidic device, which allows for 3D real-time observation of cellular phenotypes under controlled oxygen tensions. In this project, the effects of oxygen heterogeneity on cell migration, endothelial permeability regulation and angiogenesis are investigated by using the microfluidic device.

2. Details of program implement

I.Z. originally planned to visit Institute of Fluid Science for the collaborative research, but he couldn't come to Japan because of his current work as a postdoc at Harvard Medical School. Instead, K.F. visited Boston for cellular experiments and face-to-face discussion at MIT and Harvard Medical School from Mar. 9, 2014 to Mar. 19, 2014. During the research period, discussions about cellular experiments were done by email or Skype as appropriate.

In this project, the following topics have been investigated by cellular experiments with a microfluidic device:

1. Effects of chronic/acute hypoxia exposure on endothelial permeability
2. Migration of cell in the extracellular matrix under hypoxic conditions
3. Cell-cell interactions between cancer cell/fibroblast and endothelial cell

In this fiscal year, we conducted preliminary cellular experiments about the above-mentioned topics #1 and #3. Collagen type I gel was placed in the gel channel of the microfluidic device, and normal human umbilical vein endothelial cells, HUVECs, were seeded in the right-hand side media channel in the device. Formation of endothelial monolayer on the gel surface was investigated by trial and error (topic #1). As for the co-culture of different cell types (topic #3), fibroblasts of NIH Swiss mouse embryonic fibroblast cell line (NIH/3T3 fibroblasts) and HUVECs were seeded and cultured in the collagen gel and in the media channel, respectively.

3. Achievements

A method to form an endothelial monolayer on the gel surface in the microfluidic device was established. In addition, co-culture of fibroblasts and endothelial cells in the same device was achieved (see Fig. 1). The techniques necessary for cellular experiments were successfully obtained, but cellular experiments under hypoxic conditions have not carried out yet.

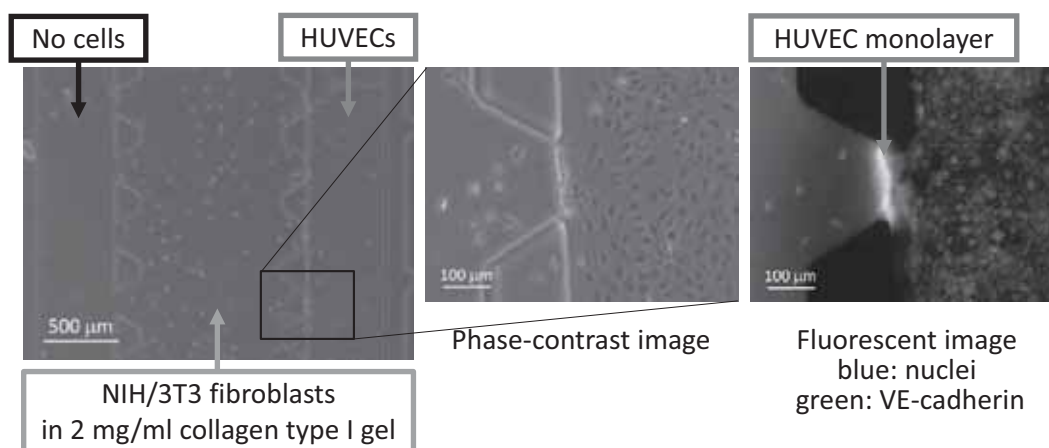


Figure 1 : Microscopic images of co-cultured cells in a microfluidic device: an overview of the channels (left) and a magnification of an interface of the collagen gel in the device (middle and right).

4. Summaries and future plans

We established how to form an endothelial monolayer in our microfluidic device and how to culture fibroblasts and endothelial cells in the same device. As the next step, cell culture under hypoxic conditions will be conducted to quantify permeability change of the endothelial monolayer and cell viability due to hypoxia. In addition, the effects of hypoxic conditions on cell behaviors and cell-cell interactions 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] 船本 健一: マイクロ流体デバイスを用いた細胞の低酸素応答の観察, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, (2013), W271005, No. 13-1, (CD-ROM).

*[2] Kenichi Funamoto, Ioannis K. Zervantonakis, Kiyoe Funamoto, Takuya Ito, Yoshitaka Kimura, Roger D. Kamm: Effects of Temporal and Spatial Oxygen Heterogeneity on Cell Processes, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 92-93.

[3] K. Funamoto, I.K. Zervantonakis, R.D. Kamm: Development of a Microfluidic Device for a Three-Dimensional Cell Culture under a Controlled Hypoxic Environment, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 184-185.

[4] 船本 健一: 低酸素マイクロ流体デバイスの開発, 第 11 回がんとハイポキシア研究会, (2013).

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

課題番号	J13099
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1年目

バイオテンプレート法による大面積 2次元高密度および分散型ナノ粒子エッチングマスクの実現
 Development of Bio-Template Process for Realizing Etching Mask
 of 2D Ordered or Dispersed Array of Nanoparticle

山下 一郎*†, 寒川 誠二**††

*奈良先端科学技術大学院大学, **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

本研究の目的は、フェリチンタンパク質マスクによるシリコンナノディスク量子井戸作製において課題となるフェリチンの制御された2次元大面積配列を、タンパク質の改質と半導体ウエファの改質で実現するものである。これまで申請者は、寒川教授とシリコンナノディスクを用いた量子効果デバイスの開発を進めてきた。すでにシリコンナノディスクの10mm角の基板を用いて直径数mmで小面積アレイの作製に成功している。このアレイは、各ナノディスク電気特性が量子化できることや、アレイ内でのナノディスク間間隔の制御によりナノディスク間の電子の結合現象としてのミニバンド形成を示唆する電気特性測定に成功している。これらの実験結果は、作製されたシリコンナノディスクアレイが量子太陽電池や脳型計算デバイスなどの電子デバイスの実現につながることを示した。しかしながら現実的なデバイス作製を行うためには大面積2次元高密度のナノディスクが必要であり、そのための大面積2次元高密度および分散型ナノ粒子エッチングマスクをバイオテンプレート法で実現する。

2. 研究成果の内容

カーボンナノホーン吸着ペプチド修飾フェリチンはこれまでの研究から、外表面に持つカーボンナノホーン吸着ペプチドが疎水性相互作用を基にした粒子間引力を発生させることが示されている。そのため、この近距離疎水相互作用に基づく性引力により、カーボンナノホーン吸着ペプチド修飾フェリチンはシリコン基板上に小型の2次元結晶ドメインを作ることができる。しかしながら、そのドメインサイズは100nm程度と量子素子としてのシリコンナノディスクを作製するには面積が小さい。これを大型化するために新規改変フェリチンをまず作製した。フェリチンは4回対称部位に不必要な相互作用の基となるフェリチン外表面の疎水性パッチを持つためまず遺伝子操作で除去を試みた。X線構造解析で明らかになった原子レベルでのフェリチンモデルを検討し、大形の疎水性パッチを構成するアミノ酸残基のうちフェリチンサブユニット156番目アミノ酸であるバリリンを選択してこれをセリンに改変することとした。図1は改変位置を示すリボンモデルのフェリチンをと疎水性部位を示したものである。このデザインの基にフェリチンをコードしたベクターで遺伝子改変を実施し、改変フェリチンを電気泳動により確認した。またPEG分子の特徴を見るためPEGフェリチンの作製も取組み、今回の研究の基礎データとした。

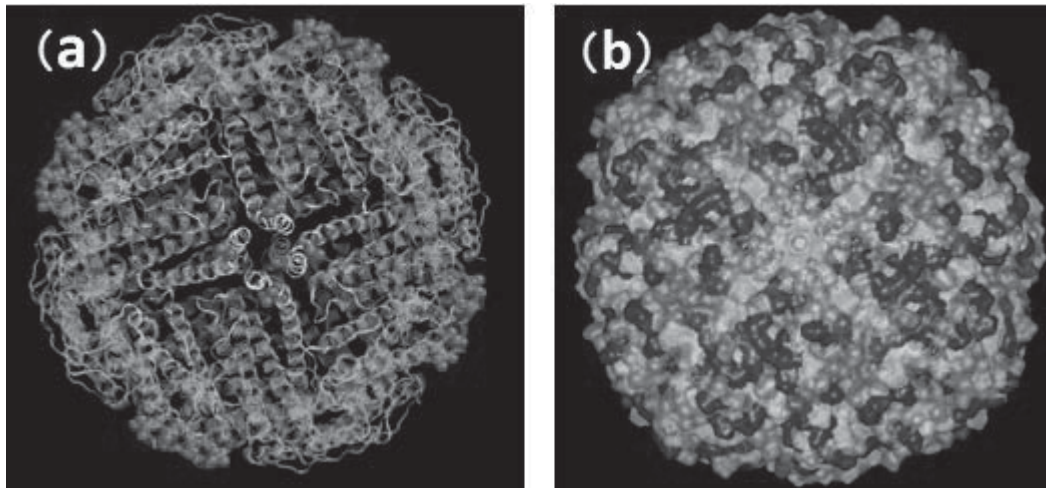


図1 : (a) V156S 改変フェリチンのアミノ酸改変位置. 24 量体フェリチンの主要骨格をリボンで表示し, 改変位置は赤い色で示した. (b)フェリチン表面疎水性部位(灰色)を示した図.

3. 研究目標の達成状況

大面積 2 次元高密度および分散型ナノ粒子を実現するための内部にナノ粒子を内包する改変フェリチンベクターの作製に大量発現に成功した. 計画の第一段階は達成できた.

4. まとめと今後の課題

本プロジェクト用改変フェリチンの作製に成功した. 今後は基板側の改変により, フェリチン粒子と基板間の弱い引力, フェリチン間の長距離斥力, フェリチン間の近距離疎水性引力を制御する基板上フェリチン配置方法を検討して, 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を実現する.

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] R. Tsukamoto, M. Godonoga, R. Matsuyama, M. Igarashi, J. G. Heddle, S. Samukawa, and I. Yamashita: Effect of PEGylation on Controllably Spaced Adsorption of Ferritin Molecules, *Langmuir*, Vol. 29, Issue 41, (2013), pp. 12737-12743.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] I. Yamashita, R. Tsukamoto, N. Okamoto, R. Matsuyama, Y. Tamura, S. Samukawa: Development of Bio-Template Process for Etching Mask of 2D Dispersive Nanoparticle Array, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 124-125.

[3] Mohd Erman Fauzi, Takeru Okada, Mohammad Maksudur Rahman, Yusuke Hoshi, Kentarou Sawano, Ichiro Yamashita, Noritaka Usami and Seiji Samukawa: Fabrication of Defect-Free Sub-20-nm Germanium Nanodisk Structure Using Bio-template and Neutral Beam Etching, *2013 JSAP-MRS Joint Symposia*, Kyoto, (2013).

[4] Cedric Thomas, Yosuke Tamura, Akio Higo, Weiguo Hu, Takeru Okada, Naofumi Okuda, Ichiro Yamashita and Seiji Samukawa: Top-down formation of 2D array of GaAs nano-pillars by using bio-template and neutral beam etching, *2013 JSAP-MRS Joint Symposia*, Kyoto, (2013).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) 該当なし

課題番号	J13101
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2014.1~2014.3
継続年数	1年目

後退翼の三次元境界層遷移の制御
Control of 3-D Boundary-Layer Transition on a Swept Wing

高木 正平*†, 大林 茂**††, 小西 康郁**
伏木田 裕介*, 正木 陽*

*室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

後退翼面上に発達する三次元境界層は、横流れ不安定によって二次元境界層と比較して早期に乱流化することは周知である。翼が後退すると圧力勾配の方向と主流方向が異なることから外部流線と直角方向に横流れ速度成分が誘導され、その分布は変曲点を持つために非粘性型不安定が生じることに起因している。この不安定は横流れ不安定と呼ばれ、この不安定に起因して成長する定在型の縦渦は、翼表面粗さに極めて敏感であることも良く知られている。その不安定性を利用し、本研究では後退翼前縁近傍に微小な粗度列を添付することで縦渦の成長を制御し、乱流遷移の促進、あるいは遅延技術を獲得することを目的とする。すなわち、自然遷移で見られる縦渦の波長に粗度間隔を選べば遷移が促進され、波長の60~75%程度に選べば遅延されることが期待できる。

2. 研究成果の内容

本研究では翼弦長 $c=600[\text{mm}]$ の層流翼 NLF(2)-0415 を用い、翼表面静圧分布計測、ナフタレン昇華法や赤外線カメラを用いた模型表面流れの縦渦及び乱流遷移点の可視化実験、さらには熱線風速計による境界層の速度分布や縦渦の波長計測も行った。

模型設定条件は、迎角 $\alpha=-4[\text{deg}]$ 、後退角 $\Lambda=45[\text{deg}]$ とし、主流速度 $U=28[\text{m/s}]$ において計測した静圧分布を Fig.1 に示す。Fig.1 より 70% 翼弦長までは順圧力勾配であり、翼の前縁近傍は特に圧力勾配が大きいことから、この領域では強い横流れ速度成分が誘導される。従って境界層遷移を制御するための粗度の貼付には効果的な位置と考えられる。Fig.2 には粗度のない滑面状態、すなわち自然遷移状態において、ナフタレン昇華法による翼表面の可視化結果を示す。縦渦の挙動に伴って生じる筋状の痕跡から、縦渦の平均波長は $\lambda=7[\text{mm}]$ であった。その結果より、縦渦を成長促進させるには粗度間隔を $\lambda=7[\text{mm}]$ 、逆に成長を抑制するには $\lambda=4.7\sim 5.2[\text{mm}]$ 程度に決定すればいいことが分かった。そこで厚さ $t=50[\mu\text{m}]$ 、幅 1.2mm 、長さ 10mm の粗度を水平線に対して角度 15 度で粗度の上流先端が $x/c=0.023C$ の位置に貼り付け、粗度間隔を $\lambda=7[\text{mm}]$ と $\lambda=5.2[\text{mm}]$ 、また貼付しないケースを同一模型内で、主流速度 $U=35[\text{m/s}]$ で実施した。その結果を Fig.3 に示す。ナフタレンの昇華が早いほど乱流遷移が早いと診断されることから、粗度間隔が $\lambda=5.2[\text{mm}]$ 、粗度なし、粗度間隔 $\lambda=7[\text{mm}]$ の順に乱流遷移が進行することが分かった。この結果より、粗度の間隔を自然遷移で観察される波長の 75% にすれば乱流遷移を人工的に遅延できることが実証できた。

Fig.4 は、赤外線カメラによる模型表面の温度分布画像を示す。模型表面に断熱フィルム ($50\mu\text{m}$) を貼付し、通風前の予熱した温度分布と通風後の温度分布との温度差をマッピングした画像であるが、模型表面を断熱フィルムで覆ったけれども、模型が熱伝導性の良いアルミ製であるため模型表面温度の均一化が予想以上に早く、縦渦の存在を示す筋状の痕跡は確認することができなかった。

主流速度を $U=28[\text{m/s}]$ として Fig.5 には $c=50\%$ において前縁に平行なスパン方向に熱線をトラバ

ースして計測した平均速度分布を示す。粗度を貼付すると縦渦の存在を表す正弦波構造の振幅をはっきりと捉えており、ナフタレン昇華法の結果と整合している。ただ、滑面の自然遷移過程では、振幅は非常に小さい。c=60%、70%位置でも同様の計測を行ったところ、下流方向に振幅の減衰傾向を示した。

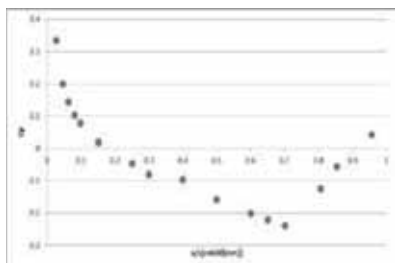
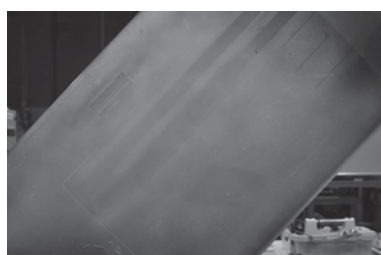


Fig.1 Static pressure distribution of NLF(2)-0415



Fig.2 Visualized surface flow by means of naphthalene sublimation



(a) The photograph before wind-on.



(b) The photograph at the end of flow

Fig.3 Flow visualization

$\lambda = 7[\text{mm}]$
 $\lambda = 5.2[\text{mm}]$
 no roughness



Fig.4 Surface temperature visualization by using infrared camera

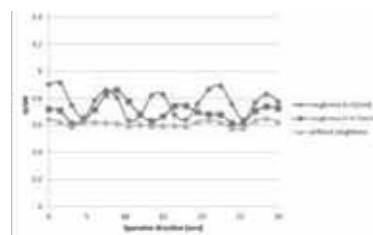


Fig.5 Mean velocity u/U ($U=28[\text{m/s}]$)

3. 研究目標の達成状況

横流れ不安定が遷移過程を支配している三次元境界層において、横流れ不安定の強い模型前縁近傍に粗度間隔を選択することで、遷移を遅延、ないしは促進できることを実証できた。また、熱線計測により縦渦の存在を示す平均速度の分布を取得でき、可視化実験から得られた結果と整合していることを確認した。

4. まとめと今後の課題

自然遷移で観察される縦渦間隔に粗度を添付すると遷移が促進され、75%程度の間隔で粗度を貼付すると遷移が遅延された。今後はより鮮明な可視化写真を得るためにナフタレン昇華法の習熟が求められる。また、粗度の形状、厚み等パラメータの影響も詳しく調査する必要があり、さらに明確な確認試験(熱線計測等)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 なし
- 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

< 連携公募共同研究プロジェクト >

連携公募共同研究プロジェクト	
課題番号	J13R01
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2013.4～2014.3
継続年数	1年目

漂流物混入型津波に関するスーパーコンピューティングとスケールモデリング
Supercomputing and Scale Modeling of Flotsam Mixed Tsunami

石本 淳*†, 今村 文彦**††, Kozo Saito***††, Jean-Yves Cavaille****††

筒井 喜平*****††, 吉田 正典*****††

*東北大学流体科学研究所, **東北大学災害科学国際研究所

***IR4TD, University of Kentucky, USA

****MATEIS, INSA-Lyon, France

***** (株) ランスモア

***** (株) 爆発研究所

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

現在、海洋学者等により行われている津波シミュレーションは数 100 km に渡る広領域を対象とするものが主であり、解析に用いられる方程式も長波近似等の何らかの近似を施した方程式を用いるのが慣例となっている。このような従来型シミュレーション手法によっては津波高さや浸水域の広域予測に対してある程度の成果を得られてはいるものの、長波近似（鉛直方向流速分布は一様と仮定）を用いているため津波が構造物体に及ぼす力の影響に関しては正確な予測が行われているとは言えず、工業プラント等の比較的狭い領域における土地や建造物のダメージ予測に対しては適用が不可能であるのが現状である。さらに今回の震災で非常に大きな問題となった、第二波・第三波の津波すなわち震災がれき・漂流物が引き波によって混入した場合の津波は破壊力が通常の津波に比較して非常に増大すると考えられるが、従来型の海水単相のみの津波シミュレーション手法のみはダメージ予測が困難であると言える。

そこで本研究では、漂流物・震災がれきが混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い、スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価を行う。本シミュレーションによる津波衝撃力評価に関する定量予測精度高度化のため、沿岸海域のモデル化と津波スケールモデリングの概念を用いた基礎実験を行い、シミュレーション結果との比較検討を行う。

また、陸上構造物の津波衝撃緩和を可能にする配置最適化・形状最適化シミュレーション、沖合に建造する津波緩衝用構造物の形状や配置に関するシミュレーション予測を行う。

2. 研究成果の内容

漂流物・震災がれきが混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い、スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価を行った。本シミュレーションによる津波衝撃力評価に関する定量予測精度高度化のため、沿岸海域のモデル化と津波スケールモデリングの概念を用いた基礎実験を行い、シミュレーション結果との比較検討を行った。

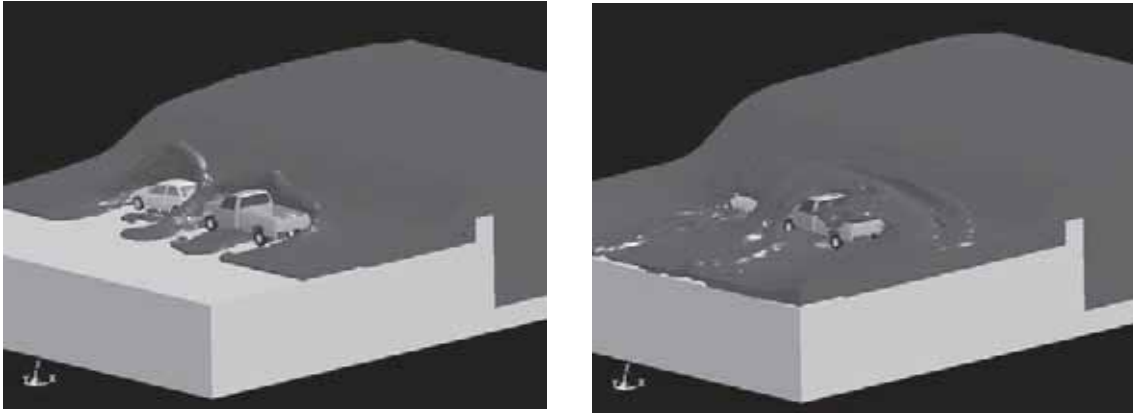


図1：津波による自動車漂流に関する融合数値計算結果

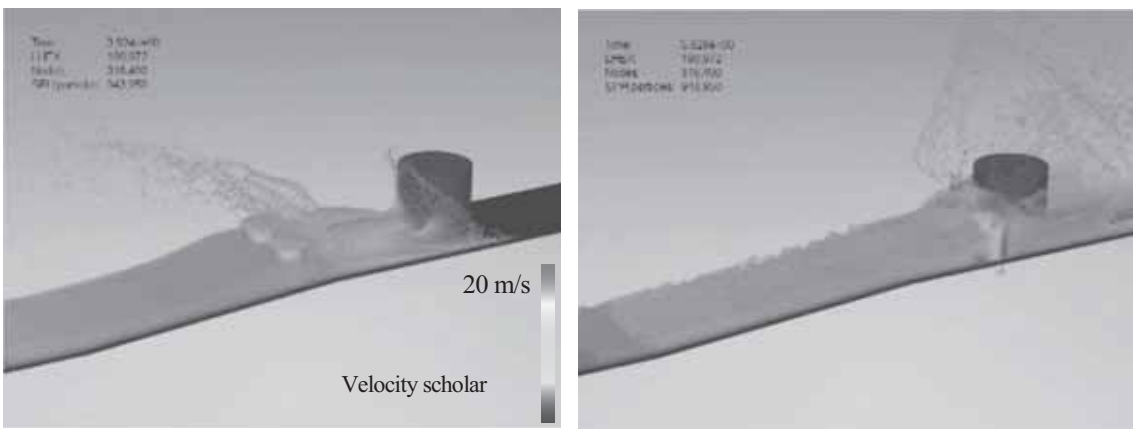
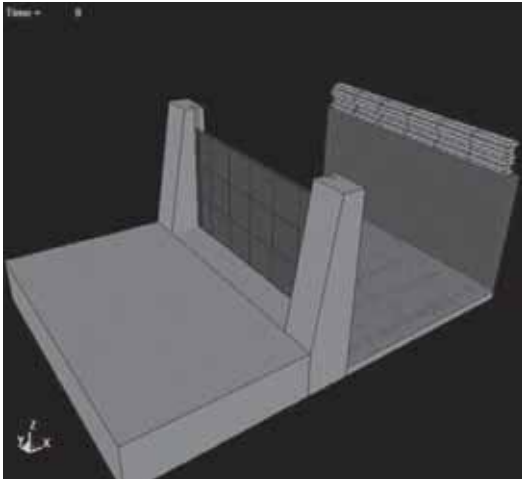


図2：津波による小型タンク漂流と陸上構造物への衝突現象に関する融合数値計算結果

混相津波シミュレーションのベースとなる専用コードを開発しており、1) 自動車の漂流、2) 漂流木が混入した津波が水門に衝突する場合、3) 漂流小タンクが固定された大タンクに衝突する場合のシミュレーションを行った。その結果、流木が混入した津波の場合は水門に対し衝撃力が2倍以上に増加することが判明した。



Specifications for numerical model

- Tsunami: Euler element (260,288 elements)
- Water gate and prop : Lagrange element (22,728 elements) [Concrete section : Rigid body, Water gate : Elastic-plastic body]
- Flotsam: Lagrange elements (Rigid body, Specific weight: 0.9, Total mass 1.1 ton) (1,260 el elements)
- Initial velocity of tsunami: 3.0 m/s
- Size of water gate: width: 5.0 m, height: 2.5 m

Fig. 3. Computational geometry for lumber mixed tsunami impacting a water gate.

The lumber mixed tsunami's hydrodynamic impact behavior for a water gate

Next, the effect of flotsam mixing on the impact force of the tsunami was numerically predicted. In the present computation, the lumber mixed tsunami's hydrodynamic impact behavior for a water gate was performed. Figure 3 shows the computational geometry for lumber mixed tsunami impacting a water gate, and the specifications of computational model items including the initial numerical conditions. For the dynamic material characteristics, it was assumed that the concrete section had a rigid body and the water gate had an elastic-plastic body.

Figure 4 shows the numerical results of the lumber mixed tsunami's hydrodynamic impact behavior on the water gate. The computation was performed with lumber and without lumber to study differences of tsunami impact behaviors. In Figure 4, the color contours in the water gate represent different magnitudes of stress. Interestingly, the change in flexibility and impact stress of the water gate by the impact of lumber mixed tsunami was numerically reproduced. Figure 5 shows the effect of flotsam (lumber) in the tsunami on the impact force to the water gate. It was found that the impact force of lumber mixed with a tsunami was two times greater than that of single phase tsunami (without flotsam case).

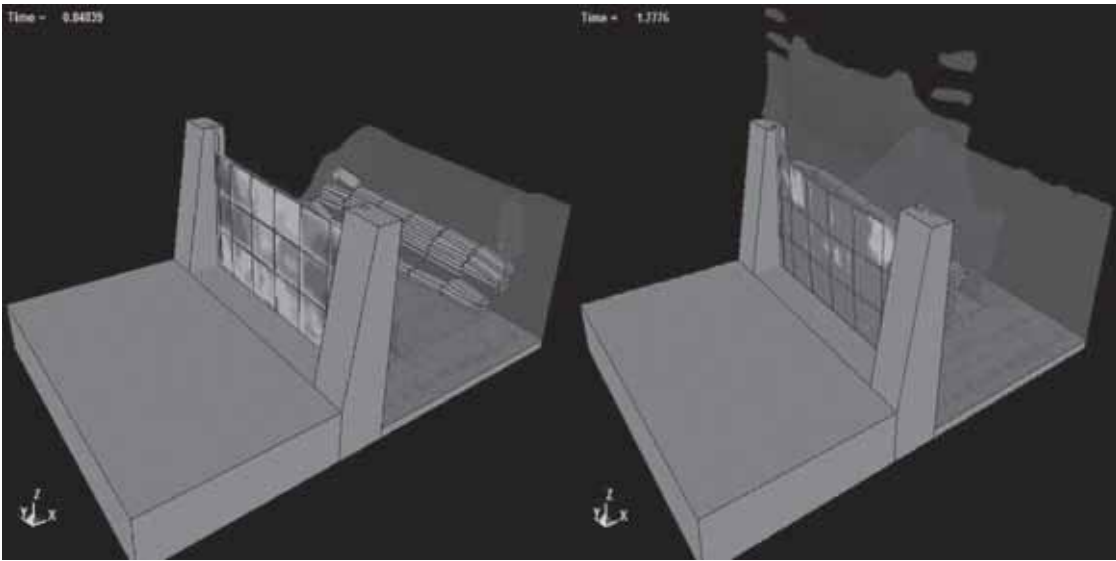


Fig. 4. Lumber mixed tsunami's hydrodynamic impact behavior on the water gate.

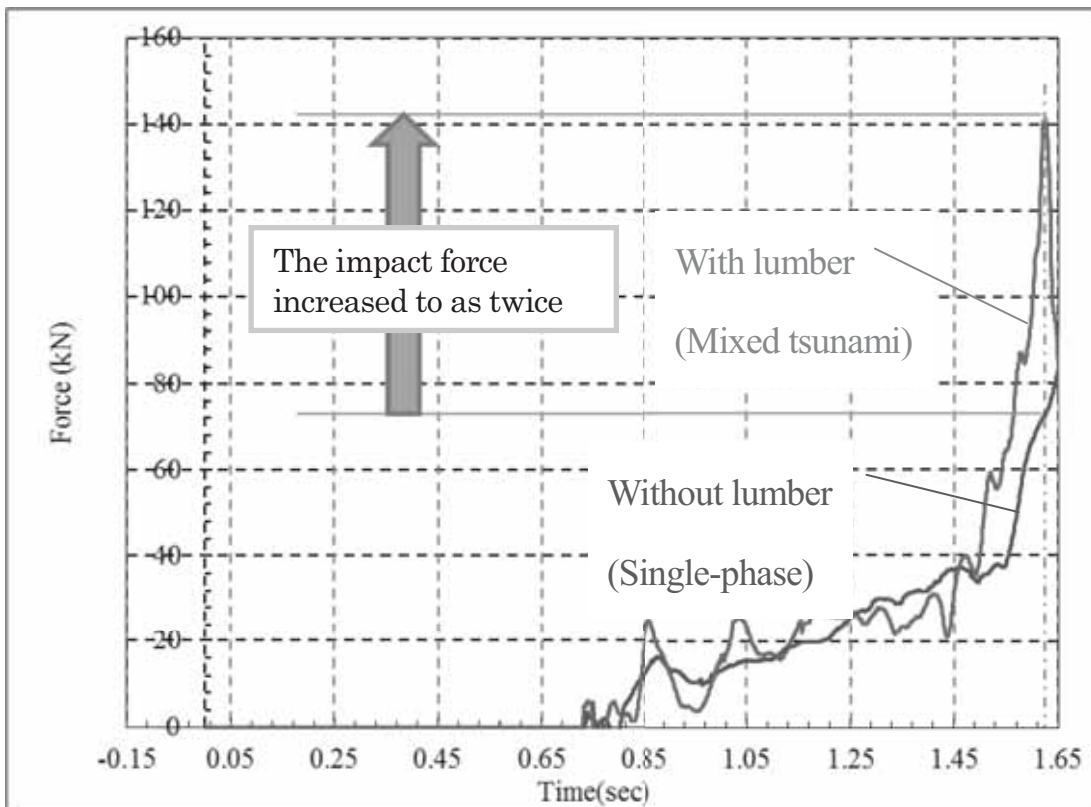


Fig. 5. Effect of flotsam (lumber) mixing with tsunami on impact force for the

Computation of a flotsam mixed tsunami behavior by SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) method

In the final computation, we constructed the SPH method to investigate the interaction between a tsunami and structures, and also to investigate the damage of a flotsam mixed tsunami on land structures. For the numerical modeling, we assumed the following mixed tsunami flow conditions.

- A flotsam or obstacle was carried away by the backwash of the first wave of the tsunami, and then pushed by a second wave of the tsunami.
- The flotsam went onto the shore and collided with the land structure.

To analyze these phenomena, we used the computational geometry which demonstrates two small tanks impacting a large tank, as shown in Fig. 6. The tsunami wave was assumed to break down within collapsing rectangular water column as it collided with the small tank and began to move the small tank because of the impact force of the tsunami. These small tanks in the tsunami wave then collide with the large tank which is fixed to the ground. The small cylindrical tanks were assumed to be filled with oil, and were regarded as obstacles or flotsam within the tsunami with a slip boundary condition relative to the ground. The large cylindrical tank was fixed to the ground, and was assumed to be hollow (empty) with a shell thickness of 20 mm.

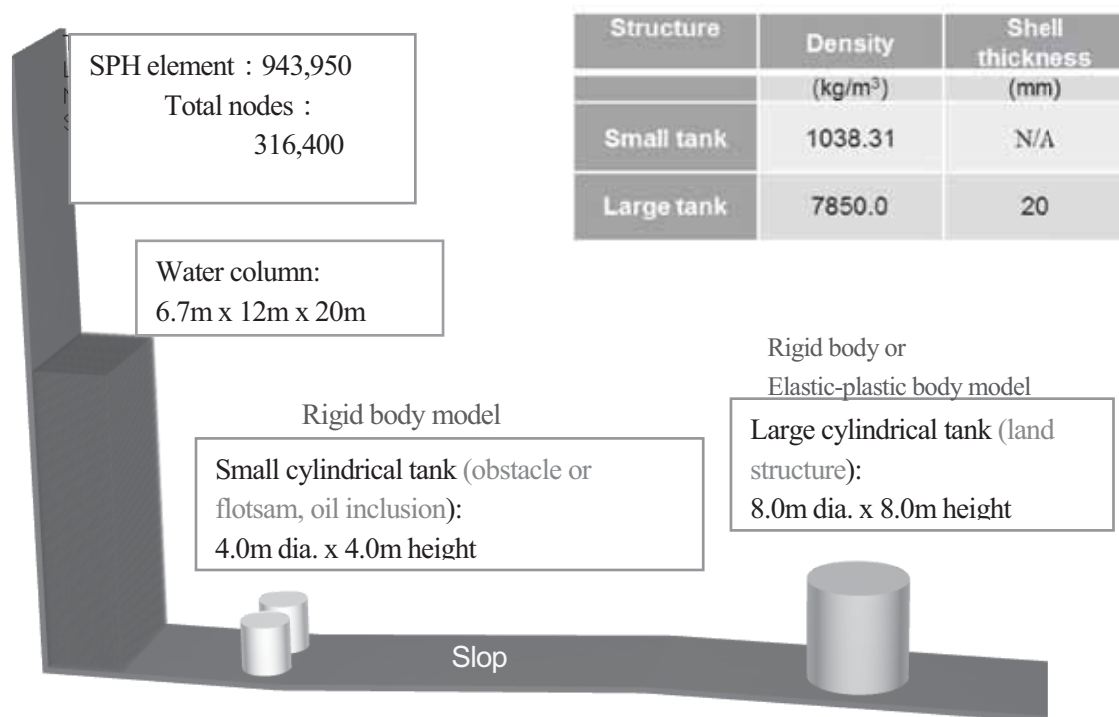
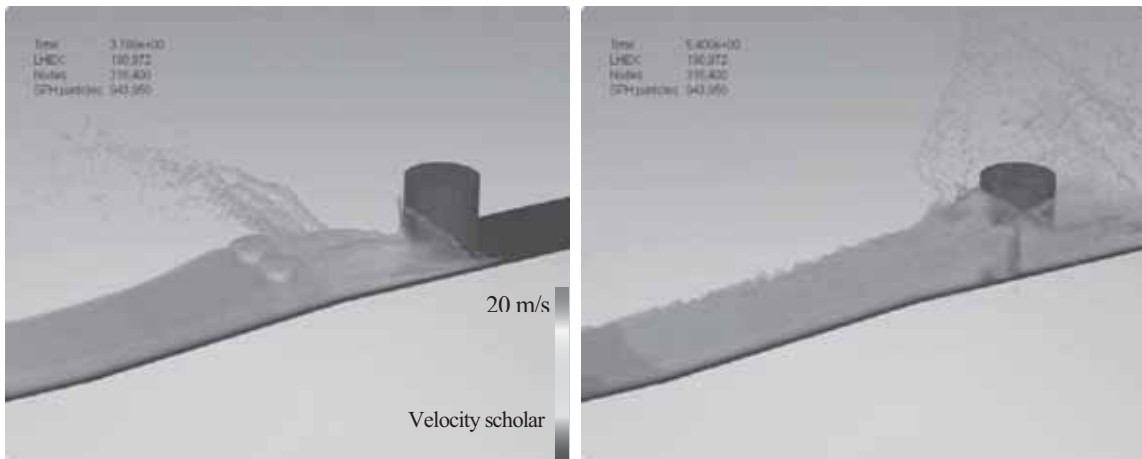
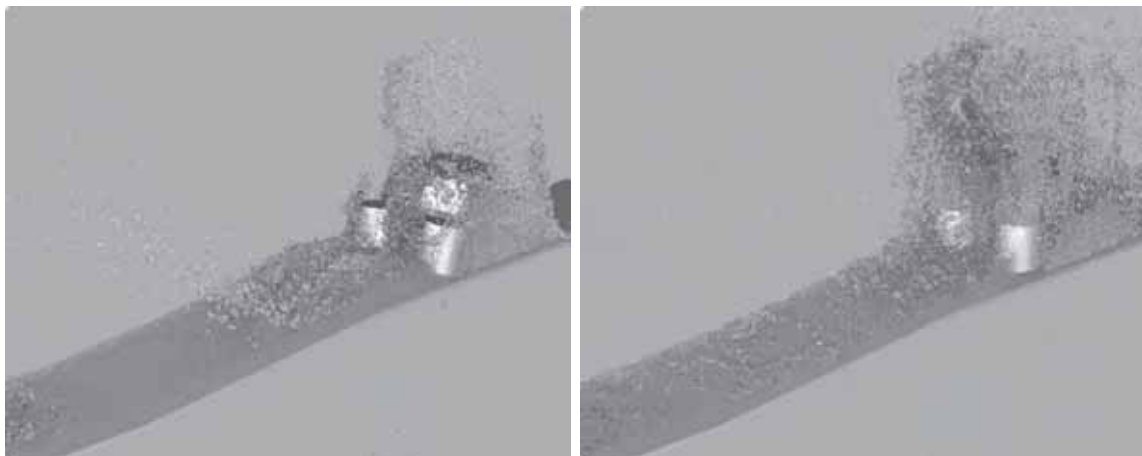


Fig. 6. Computational geometry for small tank mixed tsunami impacting a land structure.

Figure 7 shows the SPH numerical results of the flotsam mixed tsunami. The flow characteristics and behavior of its interface deformation and collision with the land structures were clearly simulated.



(a) Small tank mixed tsunami flow characteristics and its impact behavior on a land



(b) Pov-RAY rendering result

Fig. 7. Flotsam mixed tsunami flow characteristics and behavior of its interface deformation and collision with a land structure by SPH method.

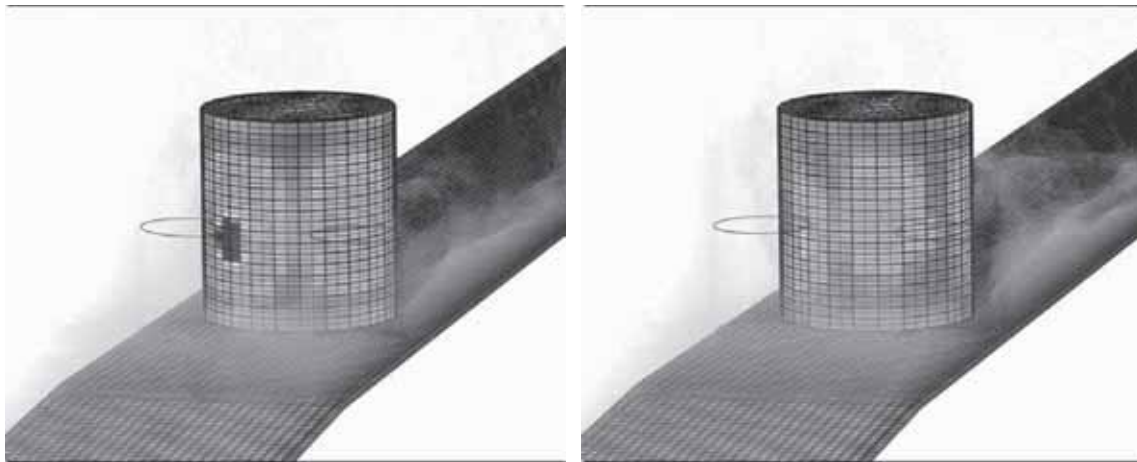


Fig. 8. Impact stress profile of land structure while flotsam mixed tsunami impingement by SPH method (Color contour denotes the scalar magnitude of stress in land structure).

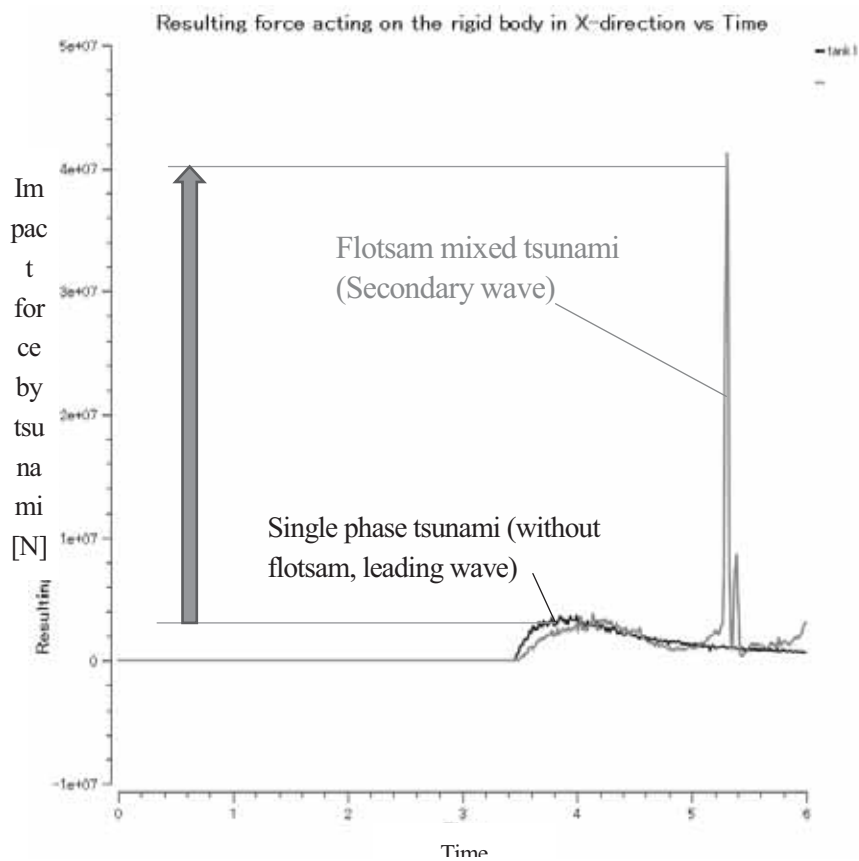


Fig. 9. Effect of flotsam mixing with tsunami on the impact force with a land structure.

Figure 8 shows the impact stress profile of the land structure with flotsam mixed tsunami impingement; an elastic-plastic body assumption was applied for the land structure. When the two small tanks impinge the larger tank land structure the maximum impact stress was 100MPa, and a corresponding maximum plastic strain of 0.0015 was numerically obtained.

Figure 9 shows the effect of flotsam mixing with the tsunami on the impact force to the land structure. In the case of a single phase tsunami (without flotsam, regarded as a leading wave), the maximum impact force was 3.5MN. In the case of a flotsam mixed tsunami (regarded as secondary wave), the maximum impact force reached 42MN. In other words, it was found that the impact force magnitude of flotsam (small tank) mixed with the tsunami was over 10 times than that of single phase (without flotsam case) tsunami.

Scale modeling the effect of flotsam mixing on tsunami damage

The flotsam is accelerated by the water flow caused by the tsunami, with its motion and hydrodynamic force dominated by the inertia of the water and flotsam and by the force of gravity acting on the water and flotsam. The dominant physical law and similarity law for this computational system are introduced by following formula.

Dominant physical law:

Buoyancy: $F_b = \Delta\rho gl^3$

Inertia: $F_i = \rho_m l^3 \frac{l}{t^2}$

$$v = \frac{l}{t}$$

$$\xrightarrow{\quad \downarrow \quad} \rho_m l^2 v^2$$

Similarity law:

$$\pi_1 = \frac{F_i}{F_b} \rightarrow \frac{\rho_m v^2}{\Delta\rho gl} \quad (\text{Froude number of flotsam mixed tsunami})$$

$$\pi_2 = \frac{v^2}{gl} \rightarrow (\text{Froude number of single-phase tsunami})$$

$$\frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{\rho_m}{\Delta\rho} \rightarrow (\text{Effect of flotsam mixing on tsunami damage})$$

where $\Delta\rho$ is the density difference between flotsam and seawater, ρ_m is the mixture density of tsunami, g is the gravitational acceleration, v is the velocity, l is the characteristic length, and t is the time. According to the above analysis, it was found that Froude number was suitable to evaluate the effect of mixing of flotsam on the tsunami impact damage. As the mixture density increased, namely, the amount of flotsam became larger and the density difference between flotsam and seawater became smaller, the damage of the mixed tsunami to the land structure increased. The scale effect of the mixture density and the density difference between flotsam and seawater became the dominant factors for tsunami impact force and damage prediction.

Therefore, quite reasonable results have been obtained by the present computations in which

the land structure received much greater damage by the impingement of a small tank mixed tsunami as compared to that of the lumber mixing case.

Experimental approach for tsunami scale modeling

To validate the numerical results on the height and traveling velocity of a tsunami wave, University of Kentucky students conducted the 1/1000th and 1/2000th scale model during the ME 565 course for the Great East Coast Earthquake generated tsunami in March 2011. A commercially available detergent was added to water to reduce the surface tension force for the scale model to approximately satisfy the Weber number, a ratio of the inertia and the surface tension forces. A series of color photographs including Figure 10 were taken during the experiments, which showed the scale model tsunami shape and behavior surprisingly similar to the full scale tsunami reported by a Japanese TV news. The moving speed of



Fig. 10. A color photo taken from side for the 1/1000th scale model generated tsunami.

tsunami was roughly correlated by the Fr number scaling although the source term was not scaled, since the full scale data was not available at that time. This is another surprise for validity of this simple scale model experiment.

3. 研究目標の達成状況

漂流物混入型津波に関する混相流体力学的扱いを考慮した数値計算モデルを開発した。ALE法 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method) と衝突解析用 FEM のカップリングによる混相津波シミュレーション法を開発した。

達成度は 70% である。これにより、がれき・漂流物が混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い、スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価が可能となる。

4. まとめと今後の課題

ALE 法による漂流物・震災がれきが混入した津波ダメージや衝撃力を評価するコンピューターシミュレーション (模擬実験) 技術を開発した。さらにスケールモデリングに基づくモデル実験結果を計算情報として CFD 計算過程に導入する融合計算手法の基本方針を確立した。

今後の方針として、SPH method (Smoothed Particle Hydrodynamics Method) 等の粒子法を用いた混相津波と陸上構造物の衝撃相互作用が解析可能となるシミュレーション法を開発する。

広域に渡る津波挙動と衝撃力評価が実験室レベルで解明可能となるスケールモデリング手法の開発と模型実験を行う。構造物に漂流物混入型津波が衝突した際の弾塑性変形を考慮したシミュレーション法を開発し、沿岸部構造物のダメージ予測を行う。

また、漂流物・震災がれきが混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い、スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価を行う。本シミュレーションによる津波衝撃力評価に関する定量予測精度高度化のため、沿岸海域のモデル化と津波スケールモデリングの概念を用いた基礎実験を行い、シミュレーション結果との比較検討を行う。また、陸上構造物の津波衝撃緩和を可能にする配置最適化・形状最適化シミュレーション、沖合に建造する津波緩衝用構造物の形状や配置に関するシミュレーション予測を行う。

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] Jun Ishimoto and Kozo Saito: Supercomputing and Scale Modeling the Effect of Flotsam mixed Tsunami: Implication to Tsunami generated by The 2011 Great East Coast Earthquake, *Proceedings of the Sixth International Symposium on Scale Modeling (ISSM-6)*, Hiroasaki, (2013).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Jun Ishimoto: The Supercomputing of Fluid and Structure Interaction Caused by Natural Disasters, *International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, (2013).

*[3] Jun Ishimoto and Kozo Saito: Supercomputing and Scale Modeling of Flotsam Mixed Tsunami, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 176-177.

[4] Jun Ishimoto: Multiscale Coupled Supercomputing of Multiphase Fluid-Material Interaction, *ELyT Workshop 2014 in Frejus*, France, (2014).

[5] 石本淳：漂流物混入型津波と流体・構造物相互作用に関するスーパーコンピューティング，日本原子力学会秋の大会 計算科学技術部会全体会議 特別講演，八戸，(2013)．**[Invited]**．

[6] 石本淳, Kozo SAITO: 漂流物混入型津波の流体-構造物相互作用に関するスーパーコンピューティング，可視化情報全国講演会(会津 2013) OS7「複雑流体のマルチスケール可視化 II」，会津，(2013)．

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Multiple Collaborative Research Project	
Project code	J13R02
Subject area	Energy
Research period	April 2013 ~ March 2014
Project status	1st year

Flammability Limits of Low-Lewis-Number Premixed Flames

Minaev Sergey*†, Maruta Kaoru**††,
 Fursenko Roman*††, Kumar Sudarshan***††,
 Miroshnichenko Taisiia*, Sereshchenko Evgeniy*,
 Odintsov Egor*, Nakamura Hisashi**,
 Takase Koichi**, Kobayashi Tomoya**

*Engineering School, Far Eastern Federal University, Russia,

**Institute of Fluid Science, Tohoku University,

***Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology, India

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

It is known that near-limit low-Lewis-number flames sometimes taking form of spatially localized combustion spots that is result of flame self-fragmentation near flammability limits. In spite of recent years significant progress in modeling of gas combustion the problems of premixed combustion near the flammability limits are still not well investigated. The main problems are associated with lack of knowledge on the joint influence of diffusion processes, radiative heat losses and chain reactions on the structure of the spatially non-uniform combustion waves. The main objective of the project is development and generalization of fundamental theory of non-stationary behavior of self-fragmented (sporadic) premixed flames near the flammability limits caused by heat losses, transport processes and flow non uniformity.

2. Details of program implement

Although there exist extensive literatures on flammability limits of stretched premixed flames, comprehensive picture of the near-limit behavior of low-Lewis-number flames are not fully elucidated. The results of microgravity experiments and theoretical investigations of stretched premixed flames with general Lewis numbers are widely presented in literature [1]. At the same time there is a lack of fundamental knowledge on dynamical behavior of low-Lewis-number stretched premixed flames. In the recent work of the authors [2] the characteristic combustion regimes of lean counterflow flames were investigated experimentally and numerically. It was found that 3D thermal-diffusion model with single-step Arrhenius kinetic is capable to describe the main features of near-limit low-Lewis-number stretched flames observed in microgravity experiments. Since the 3D numerical simulations of the reactive flows with detailed chemistry demands extremely large computation time the use of reduced model seems to be reasonable for qualitative investigation of the complex flame behavior in the wide range of parameters.

The 3D configuration considered in the present study is back-to-back counterflow premixed flames. In this configuration the air-fuel mixtures are issued from two opposed burners placed in positions $y=\pm L_y$ forming two flames near the stagnation plane $y=0$. A conventional reaction-diffusion model [3,] is employed

$$T_t + \bar{V}\nabla T = \nabla^2 T - h(T^4 - \sigma^4) + (1 - \sigma)W(T, C) \quad (1)$$

$$C_t + \bar{V}\nabla C = Le^{-1}\nabla^2 T - W(T, C) \quad (2)$$

Here T is the scaled temperature in units of T_b , the adiabatic temperature of combustion products; C is the scaled concentration of the deficient reactant in units of C_0 , its value in the fresh mixture; $(a/2x, -ay, a/2z)$ is the dimensionless velocity vector in rectangular coordinates normalized by adiabatic flame speed U_b ; a is the non-dimensional stretch rate; $\sigma = T_0/T_b$ where T_0 is the fresh mixture temperature; $W(T, C)$ is the chemical reaction rate.

The following inlet boundary conditions are applied

$$\text{Inlet } (y=\pm L_y): T=\sigma; C=1 \quad (3)$$

The boundary conditions on the other sides of computation domain are given as

$$x=\pm L_x, z=\pm L_z: T=\sigma; C=0.$$

The set of governing equations (1)-(2) was solved numerically by explicit finite-difference scheme. Five sets of the orthogonal grids of 256x192x256, 320x240x320,

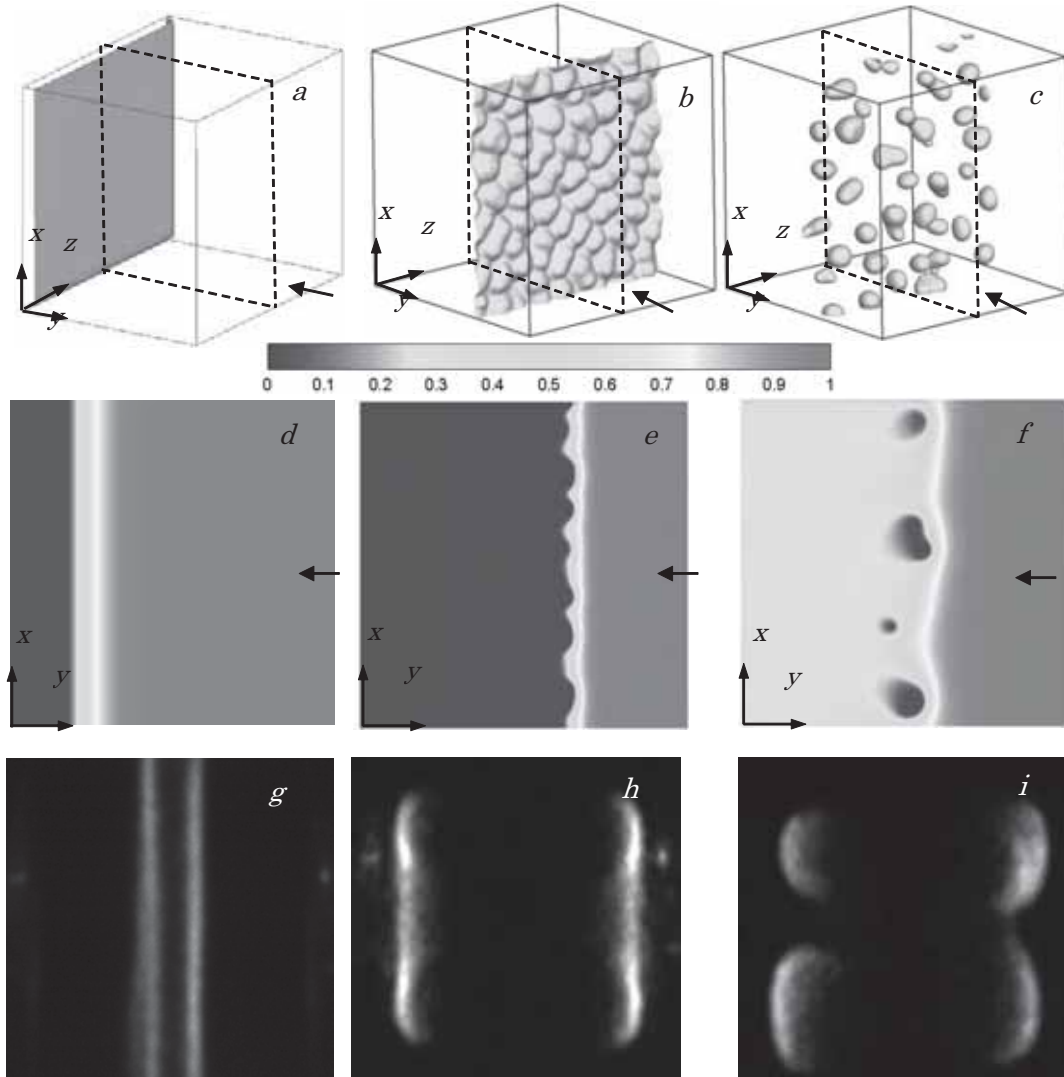


Fig.1. Equiscalar surfaces $C=0.15$ (a-c) and the slices of concentration distributions (d-f) in $z=0$ plane, corresponding to planar, cellular and sporadic counterflow flames, respectively. Figures 1 (g-i) are experimental photos of counterflow flames for $a=4.2$, $\phi = 0.4$ (g), $a=1.038$, $\phi = 0.47$ (h), $a=1.038$, $\phi = 0.4$ (i).

384x288x384, 400x304x400 and 416x320x416 were employed. Convergence tests showed that the results of calculations for the three last-named finer grids are qualitatively the same and quantitative difference in flame speed $V_f = a y_f$ of adiabatic flame ($h=0$) was less than 0.2%. The solutions presented below correspond to the 384x288x384 grid and they were evaluated for $Le=0.5$, $\sigma=0.2$, $N=10.5$. The parallel computations of 3D problem on the base of GPU were realized that allows significantly decrease computation time.

In the present study the characteristics of lean counterflow premixed flames with radiative heat losses are studied numerically. The big variety of flame patterns were revealed in simulations of lean low-Lewis-number stretched premixed flames. The planar and cellular continuous flames, sporadic combustion wave and worm-like flames exist in the certain ranges of problem parameters. Equiscalar surfaces for concentration ($C=0.15$) typical for planar, cellular and sporadic combustion waves are shown in Fig. 1. The slices of concentration distributions in $z=0$ plane are shown in Fig. 1 as well (see Fig.1 d-f). Flow direction is shown by arrows, the stagnation plane is $y=0$ plane and the $z=0$ plane is shown by dashed lines in figures (a-c). Figures 1 (g-i) are experimental photos of counterflow flames for $a=4.2$, $\phi=0.4$ (g), $a=1.038$, $\phi=0.47$ (h), $a=1.038$, $\phi=0.4$ (i).

The locations of the different combustion regimes at the equivalence ratio/stretch rate plane were determined. Numerically obtained regime diagram is compared with available experimental data obtained during the parabolic flight experiments providing microgravity conditions.

It was found that the planar counterflow flame was observed for the respectively high stretch rates and equivalence ratios (see Fig. 2a). Decreasing of the stretch rate leads to the flame front cellularization. In this case, the flame represents by continuous surface separating unburned gas and combustion products and it is possible to determine the mean flame front position [2]. As one would expect, continuous flame consumes the deficient reactant completely. Interestingly that the border between these two combustion regimes represents in non-dimensional variables by the line

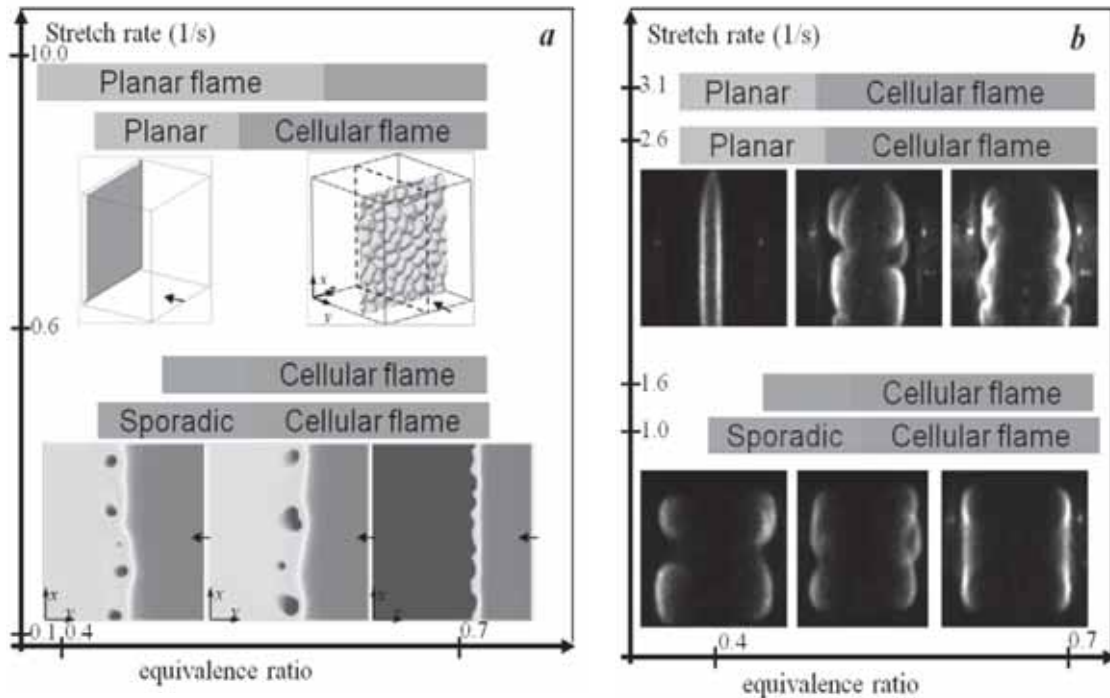


Fig. 2. Numerical (a) and experimental (b) regime diagrams in equivalence ratio / stretch rate plane

corresponding to the constant stretch rate $a = \text{const}$. It may be assumed that the effect of the flame strain suppress the influence of thermal-diffusive instability.

In the range of respectively small equivalence ratios and stretch rates, the flame front structure gradually changed. With decreasing of equivalence ratio, the cell size increases at first, after that the cellular flame suffers local extinction at some of its cusps accompanied by a noticeable escape of the unconsumed reactant through the emerging gaps. For sufficiently lean mixtures, the cellular flame disintegrates into a group of nearly identical cells resembling flame balls. Their mutual arrangement however is not frozen but involves fluctuations, sporadic detachments of the leading cell from the others, followed by its disintegration and formation of the secondary cells that are nearly identical to the primary one. As a rule after the splitting, one of the ball-like flames is moved downstream with the flow and eventually disappears due to gradual depletion of the mixture. However, the time averaged y-coordinate of the flame balls remains almost constant. This fact allows determining the mean flame position (y_f) even the continuous flame front does not exist.

Sporadic flame regime described above is observed at low values of equivalence ratios and stretch rates lies beyond the flammability limits of 1D planar stretched flame (see Fig. 2a). This fact may be explained by reduction of the total radiative heat losses from the combustion products and the flame curvature effects being peculiar to the flame ball-like structures. The significant fuel leakage is observed during sporadic regime of combustion. It may be concluded that thermal-diffusion instability of low-Lewis-numbers flame leads to formation of sporadic combustion regime and extension of flammability limits. Numerical and experimental results reveal that with decreasing of equivalence ratio, the flame cell size decreases, whereas the gap between the cells increases. In order to compare characteristic size of the cells forming sporadic combustion wave, the average cells size was estimated from 2D flame representation. The characteristic size of ball-like flames observed in numerical simulations is estimated as 1-2.5 cm that roughly corresponds to the experimental observations.

Figure 2b shows the regime diagram plotted on the base of available experimental results. As it is seen experimental observations of lean low-Lewis-number counterflow flames demonstrate the same tendency of the flame structure variations. Namely, for respectively high stretch rates and equivalence ratios, the planar flames stabilized near the stagnation plane, are observed. Decreasing of the stretch rate and equivalence ratio leads to the flame front cellularization and further to the disintegration of continuous flame front on the separate cup-like fragments.

In order to investigate quenching limits of sporadic combustion wave, the change of the counterflow flames' structure with reducing equivalence ratio was examined at fixed value of the stretch rate. The value of equivalence ratio initially placed in sporadic combustion regime region is linearly decreases with time. The simulations with variable mixture content reproduce experimental procedure. Numerical simulations show that qualitative behavior of the counterflow flames is independent on the slope of $\phi = \phi(t)$ line. The typical evolution obtained for $Le = 0.5$ and $a = 0.2 \text{ s}^{-1}$ is presented in Fig. 3. At first, two flames located near the stagnation plane move closer together with decreasing of equivalence ratio (Fig. 3 a-c). At this stage, the flames are asymmetrical. Further, at some equivalence ratio the flames merge, forming one or more prolate worm-like flames, each of which is located almost symmetrically around stagnation plane as depicted in Fig. 3 d-f. These flames have been moving near stagnation plane during relatively long time (up to 2-7 sec) and then they have blown out from the computation domain along the stagnation plane. The diameter of each worm-like flame is almost constant during the whole period of evolution while the length and form may significantly change.

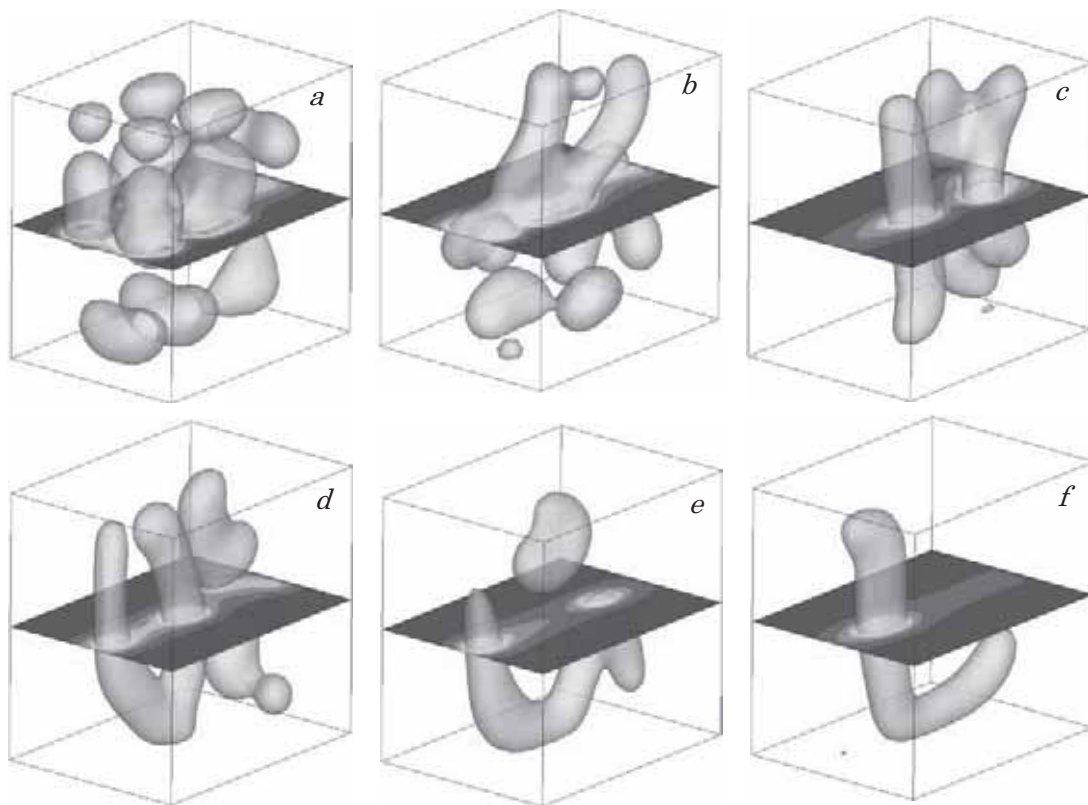


Fig.3. Typical evolution of the flame structure (equiscalar surfaces $T=0.43$ are depicted) in the course of the decreasing of equivalence ratio under the fixed stretch rate condition.

In the course of project implementation Indian (S. Kumar) and Russian (R. Fursenko, E. Sereshchenko and S.Minaev) project members visited Institute of Fluid Science, Tohoku University. During the visit Japanese, Indian and Russian groups had discussions on the results obtained in the frame of the project and formulated plans of the future research. Project members took part in the 13th International AFI conference and presented the results of the project.

- [1] K. Maruta, et al., 26th Symp. (Int.) Combust. (1996), 1283.
- [2] R. Fursenko, et al., Proc. Combust. Inst. 34 (2013), 981.
- [3] L. Kagan, G.. Sivashinsky, Combust. Flame. 108 (1997), 220.

3. Achievements

All results which have been expected in the submitted project were achieved. The fulfillment of the project allows to investigate characteristics of the self-fragmented flames propagating in the counterflow configuration. The dependencies of flame propagation velocity, average flame cells size and their density on the heat losses intensity and Lewis number have been obtained. The effects of transport and flow properties, radiative heat losses and others on the self-fragmented combustion wave structure was investigated numerically.

4. Summaries and future plans

Numerical simulations and experimental observations of low-Lewis-number stretched premixed flames under the microgravity conditions reveal the essential variety of combustion regimes. The planar and cellular continuous flames, sporadic combustion wave and worm-like flames exist in the certain ranges of problem parameters. A new

combustion regime with relatively long but finite lifetime was determined. One or several moving worm-like flames characterize this regime numerically and experimentally. The regions of existence of different combustion regimes in equivalence ratio/stretch rate plane were determined. The extension of flammability limits associated with existence of sporadic combustion regimes has been detected. The numerical results qualitatively coincide with experimental observations that justify the use of reduced model and allow us to distinguish the main physical processes governing flame behavior. We assume that the diffusive-thermal instability could have a profound impact on dynamic behavior of low-Lewis-number counterflow premixed flames.

The future research will be directed towards the development and generalization of fundamental theory of non-stationary behavior of self-fragmented (sporadic) premixed flames near the flammability limits caused by heat losses, transport processes and flow non uniformity.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] R. Fursenko, S. Minaev, H. Nakamura, T. Tezuka, S. Hasegawa, K. Takase, X. Li, M. Katsuta, M. Kikuchi, K. Maruta: Cellular and sporadic flame regimes of low-Lewis-number stretched premixed flames, *Proceedings of Combustion Institute*, Vol. 34, Issue 1, (2013), pp. 981–988.

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

*[2] S. Minaev, K. Maruta, R. Fursenko, S. Kumar, B. Mazurok: Flammability limits of low-Lewis-number premixed flames, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 178-179.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

連携公募共同研究プロジェクト	
課題番号	J13R03
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2013.4~2014.3
継続年数	1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 Cavaille**††
Christian Boller***††, Jinhao Qiu ****††,
Julien Fontaine*****††, Manfred Kohl*****††
*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
†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. 研究目的

本研究は、東北大学とリヨンとの大学との過去10年以上にわたる研究交流を通して開拓された「知的構造材料」に関する研究分野の発展形として位置づけられ、近年進展が目覚ましいマルチマテリアル多機能性材料とセンシング技術との融合により、新たな知的構造体の創成を目指す。特に、知的構造体と流体との相互作用に着目した新しい省エネルギー機能を実現するための学理基盤を構築する。このために、東北大学科学研究所を中心とする日本とリヨン、グルノーブルを中心とするフランスの研究チームに加え、センシング技術の産業応用について実績のあるドイツ・フラウンホーファ研究機構、中国における知的材料構造研究の重点拠点である中国・南京航空航天大学が加わり、研究を加速させる。

上記の研究分野を構築するための研究として、主に以下のテーマについて取り組む。

- 1) センシング機能と境界層の制御機能を有するスマート構造炭素繊維複合材料
- 2) スマート伝熱、制振、潤滑機能を有する知的層構造材料の開発
- 3) 耐食性を有する受動傾斜フィルムによる新しいエネルギープラント材料システム

これらの共同研究について、情報を共有するとともに学理を抽出するために、交流期間中に毎年セミナーを開催する。また、若手研究者の発掘と育成のために、サマースクールの開催、国際大学院の連携、を積極的に推進するとともに、若手研究者の回遊研究を通じた研究者交流を図る。本研究の全体の構想図を図1に示す。

2. 研究成果の内容

研究協力体制については、先進的輸送機械のための知的層材料・層構造研究及びエネルギープラント保全のための知的層材料・層構造に関する共同研究テーマのそれぞれに対して研究協力体制を構築し、それぞれのテーマに関連について、関係研究者が応用研究を見据えたうえで、要素研究の研究計画の立案を行い、一部共同研究を開始した。また、航空機、自動車等の輸送機械やエネルギープラ

(1) Electrostriction of filled EAP

The main idea at the origin of filling EAP comes from the critical increase of the dielectric constant when reaching the percolation threshold of electrically conducting fillers [1].

Such a behavior has been observed in various systems, and an example is given in Fig.2. It exhibits the complex conductivity modulus $|\sigma^*|$ as a function of frequency. For comparison, the straight curve with the lower $|\sigma^*|$ corresponds to pure polyethylene (PE) which is known to be almost non polar.

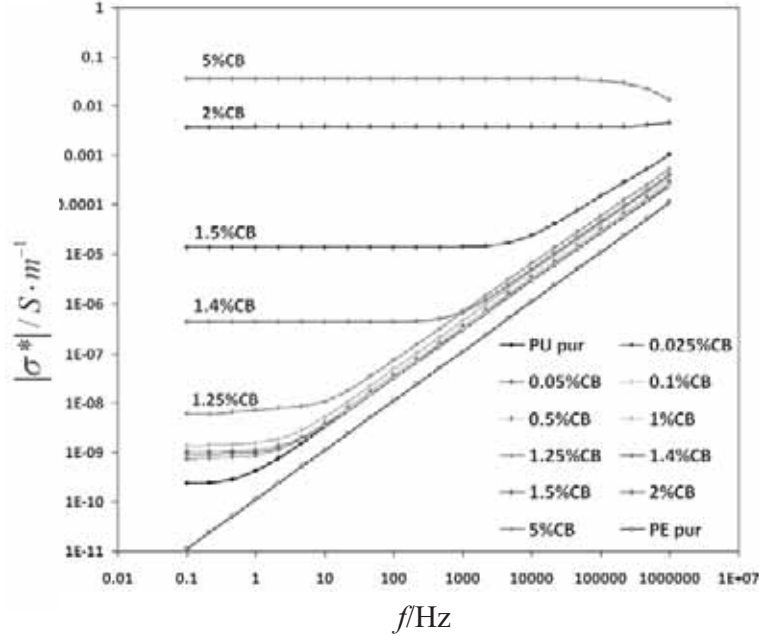


Fig.2: Complex conductivity modulus versus frequency for pure PU and PU filled with increasing volume fraction of carbon black (CB). The lowest curve corresponds to pure PE (see text for details)

It appears that pure PU exhibits a constant conductivity at low frequency, which may correspond to ionic conductivity. At increasing carbon black content $|\sigma^*|$ increases first slightly and above 1%, much more rapidly. By plotting $|\sigma^*|$ versus the carbon black volume content, v_{CB} , and comparing the experimental data with the curve of the universal percolation equation, it is possible to determine the percolation threshold (here around 1.25%) and the exponent close to 3 (Fig.3). This rather good accordance indicates that CB particles are randomly dispersed in the matrix. However, it must be pointed out that this unusually low threshold for spherical particles is classical for CB. It corresponds to the fact that CB elementary particles (of few nm in diameter) form aggregates with a lot of included matrix inside with average diameter of few μm . The percolation threshold of these aggregates is around 20vol%, as expected.

At this point, it is of interest to test the electrostrictive behavior as performed above on pure PU. Fig.4 clearly shows a regular increase of the slope M of $-S_z$ versus E^2 at increasing CB content up to 1.25vol%. Above this value, electrostriction starts to behave in a different way (following not anymore a linear behavior) and moreover decreases with CB vol%. Fig.4(right) exhibits the variation of the electrostriction coefficient M as a function of the CB content below and above the percolation threshold. Two different behaviors are displayed. At first, below the percolation threshold v_c , where the direct current (DC) conductivity remains small, the behavior can be understood through eqn.3 where CB aggregates play the role of high dielectric constant

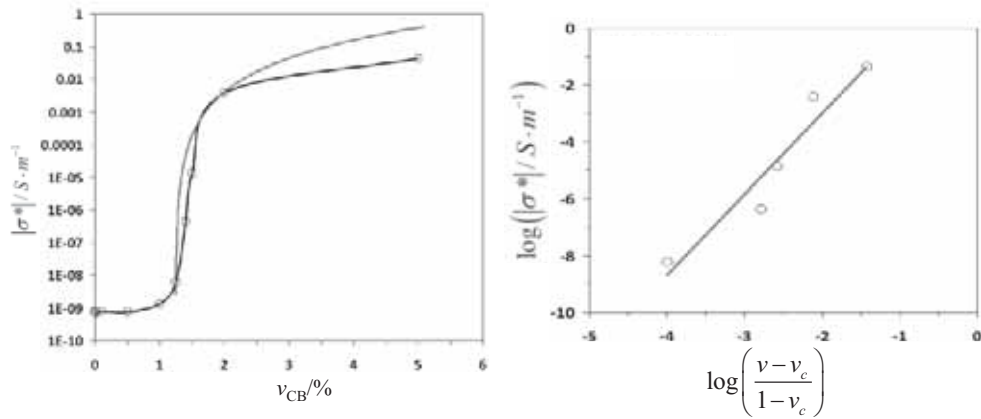


Fig.3. Left: $|\sigma^*|$ versus the CB content. Right: comparison with the universal percolation behavior.

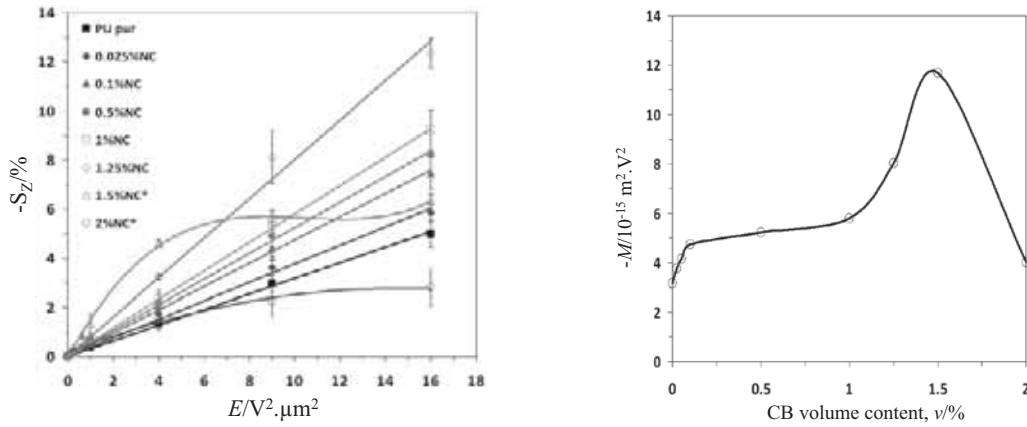


Fig.4: Left: Electrostriction strain versus E^2 for various CB content below and above the percolation threshold. Right: Electrostriction coefficient M versus CB content.

domains with high stiffness and the matrix appears to be much softer with a lower average dielectric constant. On the other hand, at CB content above v_c , the DC conductivity becomes dominant and most of the electrical energy is lost by Joule effect. Thus electrostriction is less and less efficient.

To conclude this part, it appears that electrostriction is much more efficient in heterogeneous EAP, whatever the origin of heterogeneities. They may result from phase separation like in segmented polyurethanes or from addition of particles like in filled elastomers.

(2) Energy harvesting

Among the domain where lightening is of crucial importance, aerospace is probably the best example. For sake of security, the use of non-destructive control or evaluation is strongly challenging. It is based on the use of sensors and requires signals treatments and analysis. One hard to overcome barrier is to transmit the data from the sensors to a computer dedicated of these treatments: the use of wires would be prohibited because of the weight increase it should lead to. Thus the use of radio transmission is the only way, but it requires local power supply, as light as possible. The solutions actually investigated are based on local energy harvesting. Such energy should be used at 2 different steps, (i) the active or passive sensors circuitry power supply and (ii) the data

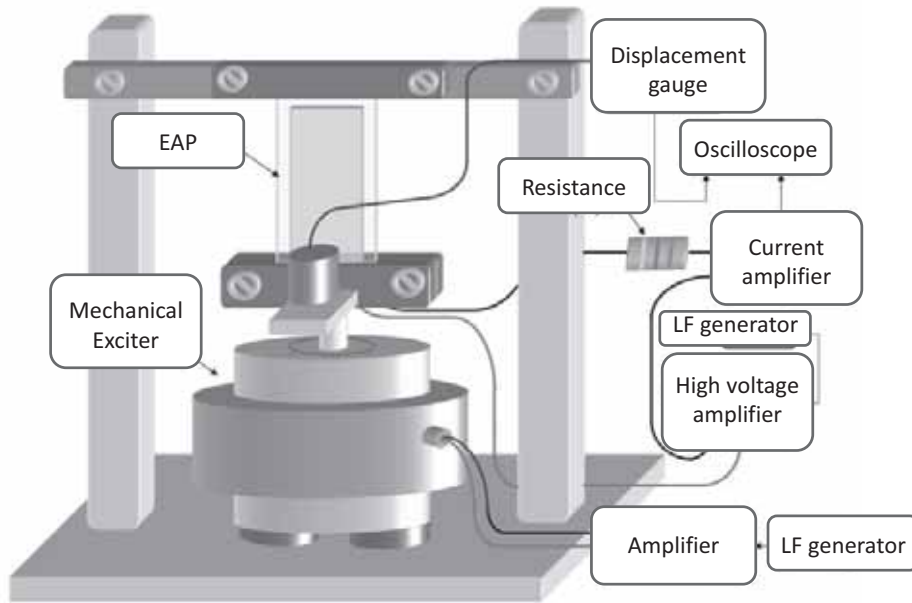


Fig.5: setup for energy harvesting evaluation of EAP

transmission.

Piezoelectric materials are classically used to convert mechanical vibration into electric power [4], but more recently the use of EAP is under investigation. The largest difference between both system is the need of a polarization potential (with a relatively high voltage \sim few V/ μ m for films of about 10 to 100 μ m), which asks the question of starting the energy conversion process. The group headed by Guyomar at INSA-Lyon focused a large part of its activity on this subject since several years.

Fig.5 shows a general setup to evaluate the capability of EAP subjected to vibrations (produced by an electromechanical exciter) which simulates the mechanical vibrations available in the area where energy harvesting is desired.

It is interesting, as summarized in Table 1, to notice that a large increase of the power harvested was reached by dispersing fillers and clearly, the optimization of the choice of both the matrix and the fillers requires further theoretical works, and the above described approach should be a good starting point in this view.

Table 1: example of energy harvested with different EAP with or without conducting fillers (from [1]).

Type of EAP	ϵ_r	Y (MPa)	Power harvested (μ W/cm ³)
PU pur	4.8	21	0.4
PU 0.5%SiC	6.2	39	0.8
PU 1%CB	8.2	24	1.3
P(VDF-TrFE-CFE)	41	242	9.3
P(VDF-TrFE-CFE)1%CB	72	261	16

Moreover, Guyomar et al. [3,4] demonstrated that not only the active elements (EAP in this case) should be optimized, but also the electrical circuit which is connected to it. They developed a technic so-called "synchronized switch harvesting on inductor" (SSHI) and designed various types of circuits. They showed that by choosing the right time of connection and disconnection of a self, they could improve a lot the harvested energy. This is schematically reported in Fig.6, where the efficiency of their system is given by the area under the different curves.

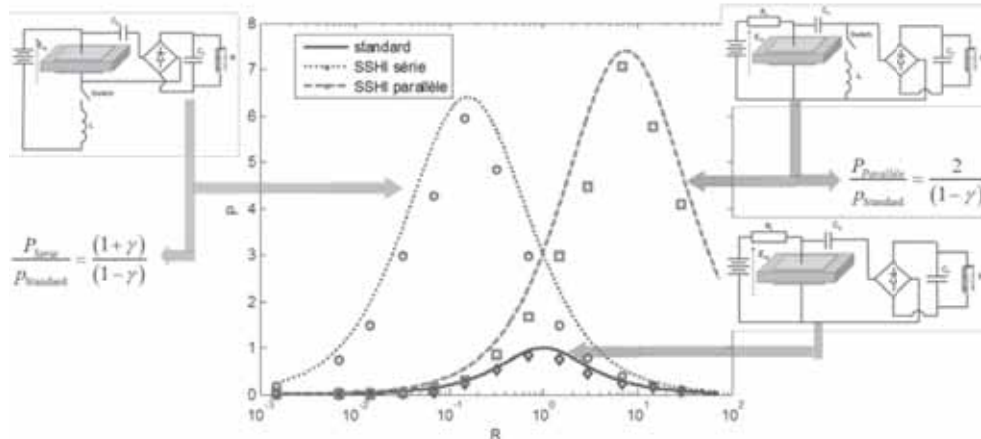


Fig.6: Normalized power for SSHI methods (circle and squares) compared to the conventional case (without switching, diamond). Lines corresponds to theoretical calculations, while dots are experimental data

Though these results are very promising, still now, the energy available is too small to allow measurements and data transfer by radio transmission. However, the power required for these two tasks decreases with the increase of circuit efficiency. Thus EAP appear to become attractive materials for such applications.

(3) 炭素膜疲労モニタリングセンサ

ダイヤモンドライクカーボン (DLC) のような非晶質炭素膜は、高硬度、低摩擦係数、高耐摩耗性、腐食条件下の化学的安定性など、優れた機械的、摩擦的、化学的特性があり工業分野で広く利用されている[5]。また、非晶質炭素膜への金属の取り込みは、飛躍的に膜の電気伝導率を高めるだけでなく、その機械特性や摩擦挙動を向上させる。この金属含有ダイヤモンドライクカーボン (Me-DLC) 膜はその優れた機械的および電気的特性からスマートセンサの候補材料となっている。Me-DLC ではひずみセンサへの基礎から応用にいたる体系的な研究が行われている[6-8]。

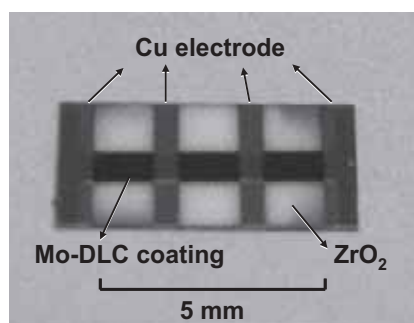
Schultes らはニッケル含有ダイヤモンドライクカーボン (Ni-DLC) 膜のひずみ感度と抵抗温度係数 (TCR) を報告している[7]。Ni-DLC 膜は、ゲージ率 20 程度を示すものがあり、市販のひずみゲージより 10 倍高い。また、100 K から 400 K の広い温度範囲で TCR が ± 50 ppm / K の温度安定性を示した。そのため、Ni-DLC 膜はひずみセンサの有力な候補材料となっている。

Petersen らは様々な金属濃度からなる W-DLC, Ti-DLC, Ag-DLC, および Ni-DLC などの Me-DLC 膜のひずみ感度と TCR を調査し[9]、最適な Ni-DLC 膜は、ゼロに近い TCR と 15 より高いゲージ率となることを示した。Takeno らは W-DLC [8,10], Mo-DLC[11], および Cu-DLC[12]などの Me-DLC 膜の電気的特性を評価し、様々な W 濃度を持つ W-DLC 膜のひずみ感度に関する系統的調査を四点曲げ試験を用いて行っている[10,11]。その結果、W-DLC 膜のゲージ率は膜中の W 濃度に強く依存し、W 濃度の低下に伴って増加した。また、TCR は W 濃度の増加とともに負から正の値へ変化することが示され、ある W 濃度ではほとんど温度依存性のない試料が得られることが分かった。Ohno らは、グラニューラ構

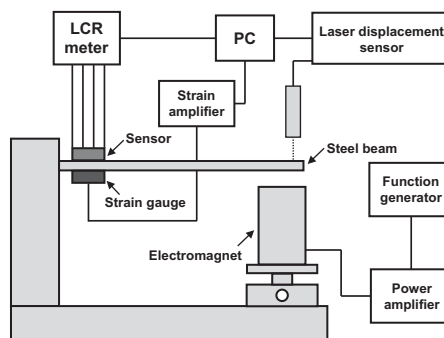
造をモデル化することによって W-DLC 膜の電気伝導機構を考察し [10], Me-DLC の金属種と膜構造を最適化することで理想的な歪みゲージが実現できることを示した。

Takahashi らは, Ohno らの検討をもとに Mo-DLC 膜[13]の電気抵抗に着目して, 疲労損傷検出センサとして Mo 含有 DLC (Mo-DLC) 膜の適用の可能性について検討した. 図 7 (a) に示すように, 厚さ $1 \mu\text{m}$ の Mo-DLC 膜を化学蒸着法及び物理蒸着からなるハイブリッド成膜装置を用いて, $7.0 \times 4.0 \times 0.1 \text{ mm}^3$ のジルコニア基板の上に作製し, 図 7 (b) に示す -500μ から $+500 \mu$ の範囲の動的ひずみを付与する振動試験を実施した. Mo-DLC 膜の電気抵抗の変化と疲労サイクル数を図 7 (c) に示す. Mo-DLC 膜の電気抵抗は, 疲労サイクル 103 まで一定の値を保持し, 疲労サイクルの増加とともに徐々に増加した. 電気抵抗値の変化は振動試験中の Mo-DLC 膜の構造変化に起因することが示されたが, さらに電気的特性 (例えば, 電気抵抗, ゲージ率, TCR) と疲労サイクルの間の明確な相関の議論が必要である.

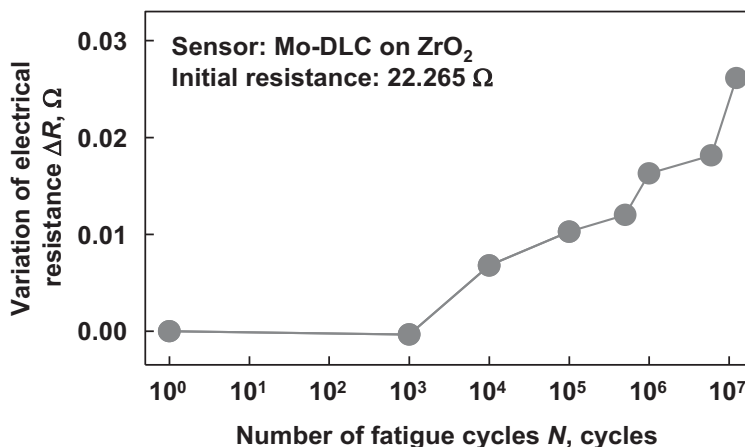
また, 著者らによって Me-DLC 疲労損傷検出センサを発展させた DLC / Me-DLC 二層構造の多機能センサの概念が提案されている [14]. 上層の DLC 層は機械的な機能を, 下層の Me-DLC 層はセンサ機能を発現する. DLC / W-DLC の二層膜では良好な電气的及び耐摩耗性能を有することが報告されている[15]. DLC / Me-DLC の二層構造は低摩擦係数を有する歪センサであり, 疲労センサとしての機能も確認されればスマートセンサとしての応用分野が広がるものと期待される.



(a) Photo of Mo-DLC sensor



(b) Experimental setup



(c) Variation of electrical resistance

Fig. 7. (a) Photo of Mo-DLC sensor, (b) experimental setup for cyclic bending test and (c) variation of electrical resistance with number of fatigue cycles [13].

参考文献

[1] CAMERON CG, UNDERHILL RS, RAWJI M, SZABO JP. Conductive filler – elastomer

- composites for Maxwell stress actuator applications. Proceedings of SPIE, 5385 (2004) 51–9.
- [2] LALLART M., COTTINET P.-J., GUYOMAR D., LEBRUN L., J. Polym. Sci. Part B, 50 (2012) 523-535
 - [3] BADEL A., GUYOMAR D., LEFEVRE E., Richard C., J. Intelligent Material Systems and Structures, 16 (2005) 889–901.
 - [4] COTTINET P.J., GUYOMAR D., LALLART M., Sensors and Actuators, A172 (2011) 497–503
 - [5] J. Robertson, Diamond-like amorphous carbon, Materials Science and Engineering R-Reports 37 (2002) 129–281.
 - [6] E. Peiner, A. Tibrewala, R. Bandorf, S. Biehl, H. Lüthje, L. Doering, Micro force sensor with piezoresistive amorphous carbon strain gauge, Sensors and Actuators A 130–131 (2006) 75–82.
 - [7] G. Schultes, P. Frey, D. Goettel, O. Freitag-Weber, Strain sensitivity of nickel-containing amorphous hydrogenated carbon (Ni:a-C:H) thin films prepared by r.f. sputtering using substrate bias conditions, Diamond and Related Materials 15 (2006) 80–89.
 - [8] T. Takeno, H. Miki, T. Takagi, Strain sensitivity in Tungsten-containing diamond-like carbon films for strain sensor applications, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 28 (2008) 211–217.
 - [9] M. Petersen, U. Heckmann, R. Bandorf, V. Gwozdz, S. Schnabel, G. Bräuer, C. Klages, Me-DLC films as material for highly sensitive temperature compensated strain gauges, Diamond and Related Materials 20 (2011) 814–818.
 - [10] T. Ohno, T. Takeno, H. Miki, T. Takagi, Evaluation of electrical properties of metal-containing amorphous carbon coatings for strain sensor application, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 33 (2010) 665–671.
 - [11] T. Takeno, T. Ohno, H. Miki, T. Takagi, Strain sensor utilizing amorphous carbon coating containing nanocluster metal, Proceedings of the 25th Diamond Symposium, Tsukuba, Japan, (2011), pp. 190–191 (in Japanese).
 - [12] T. Takeno, T. Ohno, H. Miki, T. Takagi, Fabrication of copper-nanoparticle embedded in amorphous carbon films and their electrical conductive properties, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 33 (2010) 935–940.
 - [13] M. Takahashi, H. Miki, T. Takeno, T. Takagi, Evaluation of electrical properties of Mo-DLC coatings for fatigue sensor application, Proceedings of the 26th Diamond Symposium, Tokyo, Japan, (2012), pp. 222–223 (in Japanese).
 - [14] T. Takagi, T. Takeno, H. Miki, Y. Luo, Metal-containing DLC: toward a smart coating on smart materials, Material Science Forum 706–709 (2012) 2014–2019.
 - [15] H. Miki, T. Takeno, T. Takagi, Tribological properties of multilayer DLC/W-DLC films on Si, Thin Solid Films 516 (2008) 5414–5418.

3. 研究目標の達成状況

共同研究は、着実に進行しており、日本学術振興会研究拠点形成事業「第 1 回省エネルギーのための知的層材料・層構造国際シンポジウム」(平成 25 年 11 月 26 日 ~ 平成 25 年 11 月 27 日, 仙台国際センター) などを通じて、情報交換や成果の発信を行っている。

4. まとめと今後の課題

輸送システムへの応用のための、マルチマテリアルの設計・最適化研究と流動との相互作用による機能発現のモデル化を行うことにより、航空機、自動車、鉄道などの輸送システムの超低摩擦を実現するための知的基盤の構築に向けた取り組みがなされた。また、保全の高度化につながる、検査・モニタリングのためのセンサ材料研究、耐食性を有し、かつモニタリングの用意な材料システムを、マルチマテリアルの概念、知的層構造の概念を適用することにより研究を行った。本研究交流では将来、輸送システムの省エネルギー技術や保全の高度化につなげることを想定しており、そのための知的基盤を構築するものと期待される。

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)

- [1] Pengfei Wang, Takanori Takeno, Julien Fontaine, Masami Aono, Koshi Adachi, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, "Effects of substrate bias voltage and target sputtering power on the structural and tribological properties of carbon nitride coatings", *Materials Chemistry and Physics*, 145, (2014), pp. 434-440.
- [2] Takanori Takeno, Hayato Saito, Minoru Goto, Julien Fontaine, Hiroyuki Miki, Michel Belin, Toshiyuki Takagi, Koshi Adachi, "Deposition, structure and tribological behavior of silver-carbon nanocomposite coatings", *Diamond and Related Materials*, 39, (2013), pp. 20-26.
- [3] Jun Cheng, Hongli Ji, Jinhao Qiu, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto and Ning Hu, "Novel electromagnetic modeling approach of carbon fiber-reinforced polymer laminate for calculation of eddy currents and eddy current testing signals", *Journal of Composite Materials*, published February, 2014 (online), DOI: 10.1177/0021998314521475.
- [4] Tetsuya Uchimoto, Philippe Guy, Toshiyuki Takagi, Joël Courbon, "Evaluation of an EMAT-EC dual probe in sizing extent of wall thinning", *NDT&E International*, 62, (2014), pp. 160-166.
- [5] Pengfei Wang, Toshiyuki Takagi, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, "Early fatigue damage detecting sensors—A review and prospects", *Sensors and Actuators A*, 198, (2013), pp. 46-60.
- [6] 高木敏行, 汪朋飛, 三木寛之, 竹野貴法, "疲労損傷検出センサの現状と展望", 非破壊検査, 第 62 卷, 7 号, (2013), pp. 311-315.
- [7] Takanori Takeno, Satoshi Yoshida, Kazuyoshi Nishigaki, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, Koshi Adachi, "MoS₂-DLC Nanocomposite Solid Lubricant Coated by a PECVD-PVD Hybrid Deposition Method", *Proceedings of the fifth World Tribology Congress*, (2013).
- [8] S. Bec, J. Fontaine, M. Belin, T. Takeno, H. Miki, "Propriétés mécaniques de tribofilms formés dans un contact frottant CuDLC / acier", *Materiaux et Techniques*, 101(3), (2013), 304 (7 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [9] Manfred Kohl, Marcel Gueltig, Makoto Ohtsuka, Hiroyuki Miki and Ruizhi Yin, "Smart Microdevices Based on Ferromagnetic Shape Memory Alloys", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-1, (2013).
- [10] Gerd Dobmann, Christian Boller and Dietmar Eifler, "Fatigue Monitoring Of CFRP In The VHCF Regime", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-2, (2013).
- [11] Tomonaga Okabe, Shigeki Yashiro, "Quantitative Detection of Fatigue Damage in Holed Composite Laminates using an Embedded FBG Sensor", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-3, (2013).
- [12] Alain Combescure, Carine Barbier and Dominique Baillis, "Generic Elastic and Elasto Plastic Macroscopic Properties of a Closed Cell Polymer Foam", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-4, (2013).
- [13] Jinhao Qiu, Chao Zhang, Jun Cheng and Hongli Ji, "Structural Health Monitoring and Non-Destructive Evaluation", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-5, (2013).
- [14] Yuta Yamamoto, Kanjuro Makihara, "Smart Energy Harvester using Digitally

- Autonomous Device", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-7, (2013).
- [15] Eric Maire, Loic Courtois, Jérôme Adrien, Michel Perez, Damien Fabrègue and Sandrine Cottrino, "Fabrication, 3D Characterization and Simulation of Porous Metals for Energy Saving", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-8, (2013).
- [16] Yoshitake Nishi, Takumi Okada, "High Strength of Prestressed CFRP Inspired by Reinforced Concrete Innovated by Great French Engineer", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-9, (2013).
- [17] Fumio Kojima, Jyunko Hioki, Hiroyuki Nakamoto and Hideo Nishino, "Reliability Assessment for Pipe Elbows with Local Wall Pinning using Guided Wave Testing", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-10, (2013).
- [18] Mitsuharu Shiwa, Dongfeng He, Yoshinori Ono, Masao Hayakawa, Hideo Sunakawa, Naoki Nagao, Sinich Moriya Eiichi Sato, Tetsuya Uchimoto and Toshiyuki Takagi, "Non-destructive Materials Reliability Evaluation for Cu-alloy of Combustion Chamber", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-11, (2013).
- [19] Zhenmao Chen, Shejuan Xie, Xiaojuan Wang, Tetsuya Uchimoto and Toshiyuki Takagi, "Evaluation of Cavity Defect in Metallic Foam with DCPD Method", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-12, (2013).
- [20] Yu Fukunishi, Seiichiro Izawa, "Flow Control Attempts Using Smart Materials", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-13, (2013).
- [21] Jun Ishimoto, "The Supercomputing of Fluid and Structure Interaction Caused by Natural Disasters", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-14, (2013).
- [22] Jinling Zhao, Jinhao Qiu and Hongli Ji, "Reconstruction of Stiffness Coefficients in Orthotropic Plates Based on Lamb Waves Phase Velocities using Genetic Algorithm", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-15, (2013).
- [23] Hiroyuki Miki, Takanori Takeno, Hiroyuki Kosukegawa and Toshiyuki Takagi, "Development of the Functional Hard Carbon Coating for Machine and Structural Materials", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-16, (2013).
- [24] Julien Fontaine, Hiroyuki Miki, Takanori Takeno, Thierry Le Mogne, Sandrin Bec, Michel Belin, Koshi Adachi and Toshiyuki Takagi, "Promoting Energy-saving with Diamond-Like Carbon Coatings: Solid Lubrication Processes", *First International Symposium on Smart Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS8-17, (2013).
- *[25] Jun Cheng, Jinhao Qiu, Hongli Ji, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, and Ning Hu: Electrical Conductivity and Defect Evaluation of Multilayer CFRP Laminates by EddyCurrent Testing, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 180-181.

他 合計 82 件

- 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

< 分野横断型公募共同研究プロジェクト >

分野横断プロジェクト	
課題番号	J13B01
課題分野	次世代反応流体科学
研究期間	2013.4 ~2014.3
継続年数	4年目 (最終)

[全体概要]

次世代反応流体科学の創成
Frontier Science of Next Generation Reactive Fluid

研究代表者 石本 淳
サブリーダー1 佐藤 岳彦
サブリーダー2 丸田 薫
サブリーダー3 石本 淳

1. 研究目的

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推進し、生物・化学・高応答流体の各種反応性流動に関する異分野融合型の学理創成を行う。近い将来、反応を伴う流動科学領域は次世代流体科学の主要学問領域として重要な地位を占めることは確実視されていると考えられるが、物理化学的プロセスや熱流動の素過程に多くの未解明な部分を残しているのが現状であり、工学的に十分な検討が行われているとは言いがたい。本プロジェクトにおいて次世代反応性流体科学の学理構築を推進するためには、既存の単一領域の発展型研究から脱却し異分野融合型の新しい発想からなる研究を推進する必要がある。そこで本研究においては、現在の先進流体科学をベースとした上記3研究領域の異分野融合の発想から成る先進的アプローチを行い、次世代反応性流体科学の創成を目指すものである。

2. 研究成果の内容

本年度は最終年度に当たり、4年間の共同研究プロジェクトを通して各研究分野間の融合研究成果が形成され、流体科学に関する独自の研究領域の創成に成功したと言える。次世代反応性流動に関わる3研究プロジェクトの融合研究の指針と各研究グループによる最終融合研究成果の確認を行った。

4年間実施された本研究プロジェクトの総括として、グループ間の融合研究が成功した例が複数例存在する。まず、高応答性流体プロジェクトの石本研究グループと寒川研究グループの融合研究により新型のナノデバイス洗浄方式の開発に進展が見られたので、この研究成果に関して最終年度の実施概要を紹介する。混相流体工学とナノデバイス工学という異分野を専門とするグループが相互連携を行うことにより、新型の反応性混相流体工学応用機器の創成が進展し、異分野融合による新発想の研究成果が得られた。なお、本研究成果に関しては、日経産業新聞にその内容が掲載され産業界からの注目を集めている(2011年10月7日掲載済)。

前年度までの共同研究により、断熱二流体ノズルを用いてサブミクロン・ナノオーダー粒子径を有する微細固体窒素粒子流を生成し(極低温微細固体粒子固気二相噴霧流)、新たな超高熱流束効果に基づく高速熱収縮等の高機能性を付加することにより、半導体洗浄・レジスト

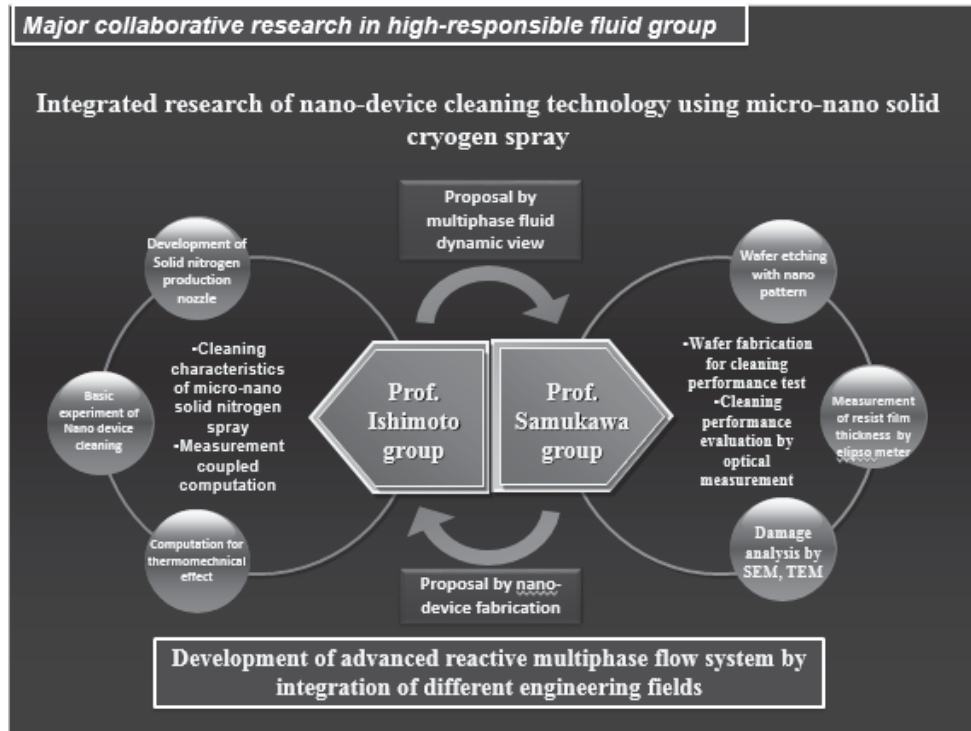
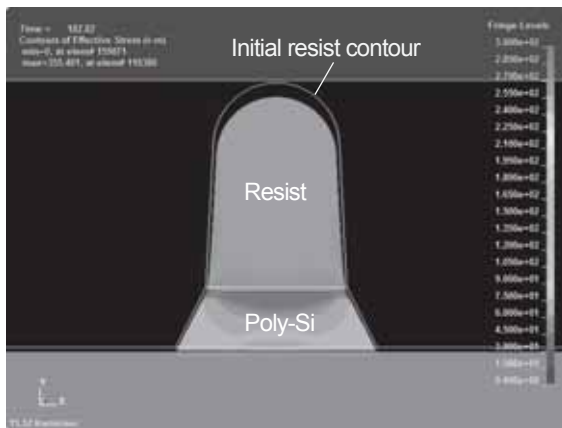


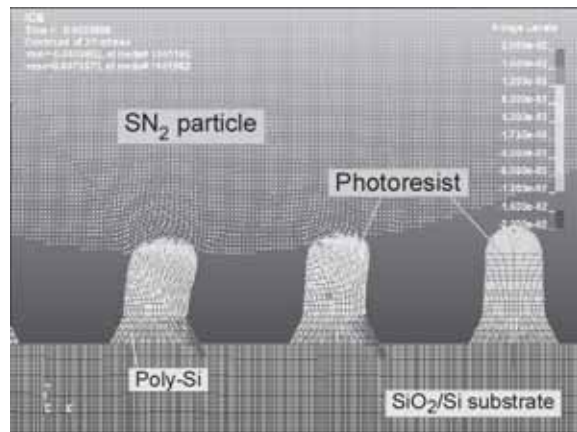
図1：高応答混相流体力学とナノデバイス工学の融合研究展開

はく離技術，次世代プロセッサ冷却に代表される異分野産業への応用が新たに期待されるようになってきた。しかしながら，寒剤として希少資源であるヘリウムを使用せざるを得ないというデメリットを有しているため，実用化にはヘリウムレスの固体粒子生成技術開発が必須である。本共同研究プロジェクトは，このようなサブミクロン・ナノオーダー極低温微細粒子の有する高機能性に着目し，ヘリウムを使用しない新型の一成分ラバルノズル方式によって生成される超音速極低温微細粒子噴霧の活用による環境調和型半導体ウエハ洗浄技術の開発を目的としている。しかしながら，ナノ洗浄特性の解明に必須となるノズル内における微細固体窒素粒子の生成機構，固体窒素粒子の加熱ウエハ表面衝突に伴う超高速熱伝達特性に関しては未解明なのが現状である。

そこで最終年度の研究においては，固相変化を伴うラバルノズル内一成分液体窒素混相流に関し LES-VOF モデルに基づく基礎方程式系を展開し，計測融合型スーパーコンピューティングを用いた固体窒素粒子生成と超音速混相熱流動特性に関する検討を行った。さらに，固体窒素粒子によるミクロ的見地から熱伝達特性の解明を行うため，加熱ウエハ表面に衝突する単一固体窒素粒子に対し同様の数値モデルを適用し，粒子蒸気相変化による潜熱輸送を考慮した超高温熱流束冷却特性に関する数値解析的検討を行った。その結果，固体窒素粒子が衝突してレジストをはく離するまでの詳細な数値解析に成功し，粒子がレジストをはく離効果に及ぼす自己せん断変形とレジストせん断変形挙動を詳細にシミュレートすることに成功した。1) 粒子入射速度は増大するほど，レジスト内部に生じる最大平均せん断応力は増大することが判明した。また，入射速度が増大するほど，レジスト-Poly-Si 界面のせん断応力も増大することが明らかとなり，洗浄効果が最高となる噴霧流速の最適値が存在することが判明した。しかしながら粒子加速に伴い配線ダメージが増大することが判明し，パターンダメージ予測に関するシミュレーションが必要であることが新たに判明した。2) 固体窒素粒子径がレジスト-Poly-Si 界面の最大平均せん断応力に及ぼす影響を解析し，実験により



(a) Effective thermal stress



(b) Internal stress profiles of impinging SN_2 particle and deformed resist

図2：固体窒素粒子衝突時におけるフォトレジストの熱収縮効果ならびに変形挙動・内部応力変化

得られたレジストはく離メカニズムをミクロ的見地から解明することに成功した。

以上より、極低温微細固体窒素噴霧の衝突による物理力、超高温熱流束急冷による熱収縮、超音波振動子設置による氷核生成促進固体窒素粒子微粒化促進の効果を併用することにより、フォトレジストの90%以上をく離・洗浄することに成功したが、比較的配線パターンが小さい領域に限定されている。これは超音波振動子設置により固体窒素粒子の微粒化が促進され微小パターン領域への衝突断面積が増大し、よりクリティカルに衝突粒子の有する物理力がレジスト内部に伝播可能となったためと考えられる。

引き続き本共同研究プロジェクトにおいて得られた主要な研究成果として、高応答性流体プロジェクトと燃焼研究グループの融合研究により得られた主要な成果を以下に紹介する。特に、最終年度行われた「高圧下における微粒化現象と噴霧燃焼挙動の解明」に関する初期成果概要を簡単に紹介する。混相流体工学と燃焼工学という異分野を専門とするグループが相互連携を行うことにより、高圧微粒化噴霧燃焼特性の解明と輸送機用新型直噴応用機器の創成が進展し、異分野融合による新発想の研究成果が得られた。

近年、自動車用ガソリンエンジン用インジェクタにおいて従来型のポート噴射から直噴化が進んできており、燃料噴霧により直接、高圧シリンダ内の混合器形成と高圧燃焼特性を制御する必要性が生じてきた。そこで本年度においては、まず高圧下における微粒化現象を計算流体力学の立場から解明することを目的とし、スーパーコンピューティングによる高圧噴霧微粒化特性の解明を行った。

従来型の数値解析法をそのまま高圧噴霧流動に適用すると、微粒化液滴に作用する抗力が正確に評価されず、特に噴射方向が斜め方向の場合、噴霧先端部に実現象とは異なる巻き上がりが生じペネトレーションが正確に評価できない問題があった。また、相変化モデルが高圧条件に対応していないため、本来蒸発しているはずの微細粒子がそのまま停留し続ける等の不具合が散見された。以上の状況を打破するため、今回は高圧条件に対応した噴霧微粒化特性解析用の基盤ソフトウェアを開発し試し計算を行った。その結果、容器内圧50気圧の条件下、斜め方向の噴射条件においても安定した計算が進行し、微粒化液滴粒子群の位置情報、ペネトレーション、流速分布、温度分布に関する数値予測が可能であることを示した。本計算手法をさらに高精度化することにより高圧微粒化噴霧燃焼特性の定量予測と輸送機用新型直噴応用機器の創成が進展するものと考えられる。

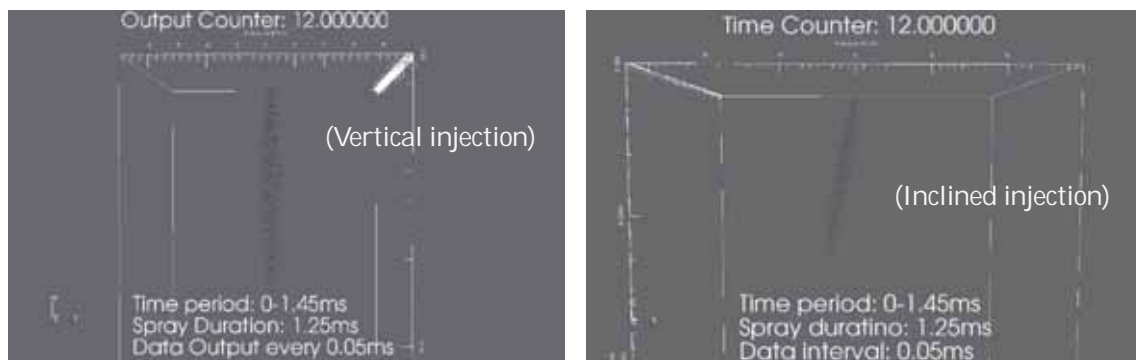


図 3：高圧条件下における噴霧微粒化液滴群の挙動（容器内圧 5.0MPa）

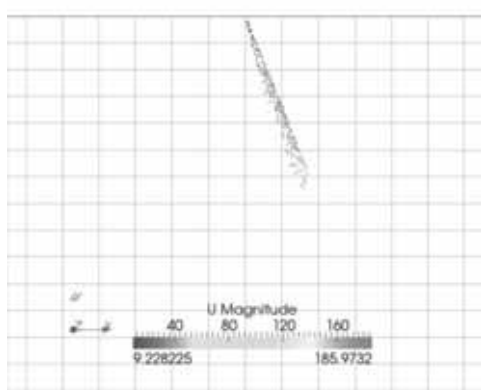


図 4：高圧条件下における噴霧微粒化液滴群の流速分布



図 5：高圧条件下における噴霧微粒化液滴群の濃度分布

3. 研究目標の達成状況

震災のため研究の実施が一時的に中断されたが、復旧が完了し共同研究の進展が見られる。ライフサイエンスグループにおいては、細胞・生体組織にかかわる反応・輸送現象をマルチスケールで明らかにし、細胞と流動場の相互作用に関する研究、燃焼グループにおいては利用技術が高度化する燃焼・反応現象の解明・モデル化・制御を通じて、持続可能な社会構築に貢献する環境負荷の低い次世代反応流体科学技術の創出に関する研究、高応答性流体グループにおいては、外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体・熱流動を対象とし、燃焼グループとの異分野融合型研究開発を開始するための基盤構築を行った。詳しい内容に関しては次ページ以降の各研究プロジェクト（研究小グループ）の報告内容を参照のこと。

4. まとめと今後の課題

4年間の共同研究を終了し、各研究分野間の融合研究成果が形成され、次世代反応性流動に関連する先進的成果を得るに必要な研究体制が整ったと言える。現在の研究体制に付加して3プロジェクト間の相互連携を行うことが分野横断型研究としての有効性を外部発信することにつながると考えられる。そこで本プロジェクト終了後も、プロジェクト間の相互連

携研究テーマとして、高応答性流体プロジェクトを基幹とした、1. ナノ固体窒素粒子噴霧を用いたヒト iPS 細胞の超高熱流束ガラス凍結（ライフグループと連携）、2. 高圧条件下における微粒化噴霧現象ならびにバイオ燃料の微粒化と噴霧燃焼特性（燃焼グループと連携）に関する融合研究を推進することが望まれる。

[サブテーマ 1]

細胞・生体組織における反応・輸送現象に関する研究
Research on Reaction and Transport Phenomena with Cell/Living Tissue

佐藤 岳彦¹⁾, 小原 拓¹⁾, 太田 信¹⁾,
白井 敦¹⁾, 小宮 敦樹¹⁾, 富田 典子¹⁾
¹⁾東北大学流体科学研究所
†サブリーダー

1. 研究目的

細胞・生体組織にかかわる反応・輸送現象をマルチスケールで明らかにし、細胞と流動場の相互作用に関する基礎学理を構築する。本目的を達成するために、①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応（佐藤）、②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究（小原）、③生体適合材料と細胞の相互作用（太田、富田）、④ガラス平板上における HL60 の挙動に対する細胞分化の影響（白井）、⑤物質・熱の細胞膜内輸送現象の実験的研究（小宮）の各研究課題について取り組む。

2. 研究成果の内容

ライフサイエンスグループでは、本プロジェクトにおいて、細胞・生体組織における反応・輸送現象に関する研究を進めてきた。これにより、細胞応答機構や細胞内輸送、細胞外環境における物質輸送や材料との相互作用について包括的に検討してきた。また、ライフサイエンスグループの横断的なつながりを深めるため、本グループに参画しているメンバーを含めた研究会を、日本機械学会部門協議会直属「高度物理刺激と生体応答に関する研究分科会(P-SCC12)」として設置し、研究課題解決のための研究討論や情報発信を行った。

これらの取り組みにより本年度は、下記研究成果を得た。

①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応（佐藤）

本年度は、プラズマを照射した培地を細胞に暴露した時の遺伝子発現について DNA マイクロアレイを用いて網羅的に解析した。図 1 に Gene Ontology 解析の結果を示した。Biological process のカテゴリーに関して、遺伝子発現量がコントロールに対して 1.5 倍に増加した遺伝子は、プラズマ照射培地では 457 Gene probe 中 270 Gene probe が該当し、過酸化水素のみを添加した培地の場合と比較して多様な遺伝子が変動していることが明らかになった。プラズマ照射培地のみにおいて変動が認められた Gene Ontology は、Growth, immune system process, metabolic process である。一方、過酸化水素添加培地と比較し、両者共に上位 5 つの biological regulation, cellular process, response to stimulus, developmental process, multicellular organismal process の Gene Ontology が共通していた。両者に該当した response to stimulus の下層項目では、response to reactive oxygen species, response to stress, response to chemical stimulus が該当しており、これらは両者が化学種や酸化ストレスに対して応答した事を示している。

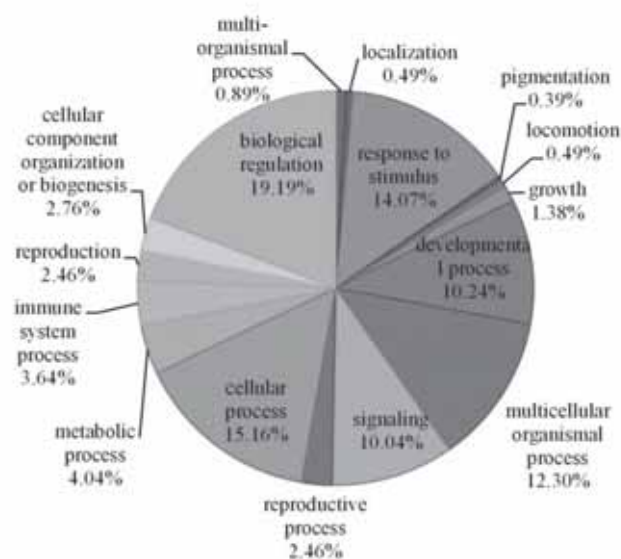


図 1 : プラズマ照射培地に暴露した HeLa 細胞の遺伝子発現量が 1.5 倍以上に増加した遺伝子の Gene Ontology. このグラフは, GO の Biological process の一段下層項目. 下層を含め (A) 276 の Gene Ontology が検出された.

②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究 (小原)

脂質分子の自己組織化により水中で形成される二重膜構造の熱輸送特性を解析している. 典型的な脂質分子種として DPPC (dipalmitoyl-phosphatidyl-choline), DLPC (dilauroyl-phosphatidyl-choline), SMPC (stearoyl-myristoyl-phosphatidyl-choline) を選択し, 水中におけるこれらの二重膜に対して膜面垂直方向・平行方向に熱流束を与え, 膜内・膜間の熱抵抗や膜面内の非等方的熱伝導率, さらにこれらの熱輸送を構成している分子間・分子内の力学的エネルギー伝搬の特性を計測した. 図 2 は膜面平行方向の熱流束を形成する分子間・分子内エネルギー伝搬の寄与を示したものであるが, 分子種間における尾部のわずかな違いが熱輸送特性に大きな影響を与えることがわかる.

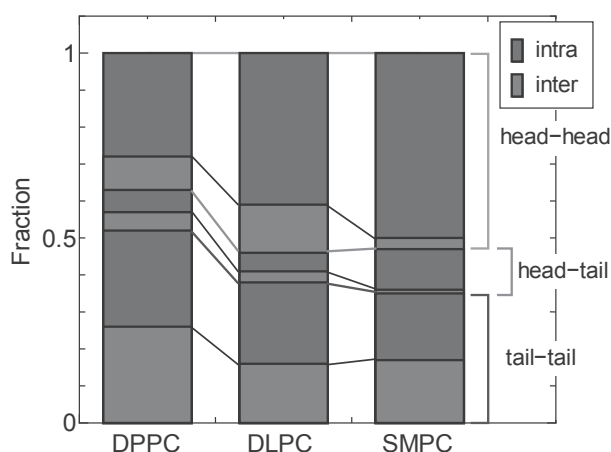


図 2 : 脂質二重膜の膜面平行方向熱伝導において熱流束を構成する脂質分子頭部 (head) ・尾部 (tail) 間あるいはこれらの内部での分子間 (赤) ・分子内 (緑) エネルギー伝搬が全体に占める割合.

③体適合材料と細胞の相互作用（太田）

内皮化の進行において、流れが存在する環境下での内皮細胞の増殖、移動、接着が重要な要素であると考えられる。先行研究では、コラーゲンを固定化することで、材料表面の細胞接着性を向上させる手法が示されており、このことによって内皮化促進が可能ではないかと考えた。そこで本研究では、形状が異なるワイヤを内皮細胞培養面上に留置して流れを負荷し、その後のワイヤ上及び周辺の内皮細胞密度を観察することで、せん断応力下においてワイヤ形状と表面加工が内皮化に与える影響を調べた。

流れ負荷装置にワイヤを挿入した状態での数値流体力学解析を行うと、ワイヤ形状によって周辺より高いせん断応力勾配を示す領域の位置が異なり、角棒ワイヤでは負の高せん断応力勾配を持つ領域が存在している。

本装置を用いて、24時間流れ負荷実験を行ったところ、ワイヤ後方で高い細胞密度が見られた。この領域は周囲に比べて高いせん断応力勾配を示した領域と一致していた。このことから、ワイヤ形状の違いによってワイヤ留置部周辺のせん断応力環境が変化することで、内皮細胞密度の分布に変化を生じる可能性が示唆された。

本研究では流れ負荷実験によってせん断応力下で NiTi ワイヤの形状及び表面加工が内皮化に与える影響を調べた。留置されるワイヤ形状によってワイヤ留置部周辺のせん断応力分布が異なる変化を生じ、それに伴いワイヤ留置部周辺の細胞密度分布が変化することが示唆された。

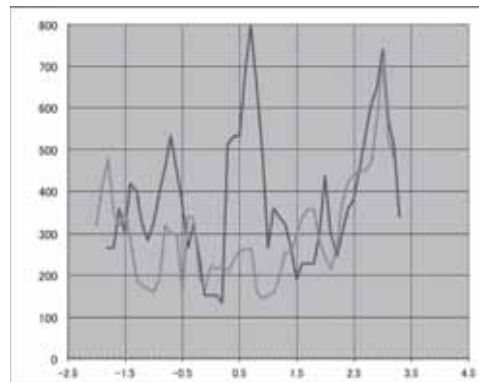


図3：ステントワイヤの断面形状の違いによる細胞分布の違い(青：角棒，緑：丸棒)

④HL60のローリング特性に与える細胞分化の影響（白井）

傾斜遠心顕微鏡を用いて HL60 のローリング特性に与える分化の影響を解析するにあたり、まず、未処理のガラス平板と、細胞の接着を阻害する MPC ポリマーをコーティングしたガラス平板を用い、基板への付着率および平均移動速度を計測した。その結果、HL60 の分化は主に付着率に影響し、移動速度には大きな影響を与えないことが明らかになった。また、未処理のガラス平板上では所謂 stick-slip 運動(図4)が確認され、分化した HL-60 の方が stick 状態の頻度が高いことから、免疫反応における血管内皮細胞上での HL60 の減速は stick 状態の頻度上昇に起因すると推察された。

次に、HUVEC を静置培養したガラス平板と、培養した HUVEC に 24 時間 2Pa の剪断応力負荷を与えて配向させたガラス平板を用いて計測した結果、未分化の HL60 では配向によって平均移動速度が有意に増加するのに対し、分化した細胞では配向による差は見られなかった。HL60 は HUVEC 間の谷間を移動するため(図5)、配向に伴う HUVEC 表面形状に起因する抵抗の減少と、HL60 の分化に伴う HUVEC との接着能の増加に起因する抵抗の増加がほぼ同程度であるといえる。ただし、付着率が 90%以上と著しく高く、接着能の変化を定量的に評価するには至らなかった。

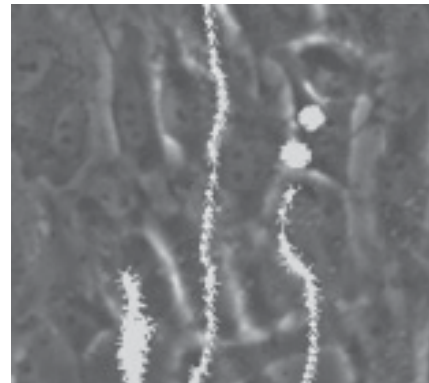
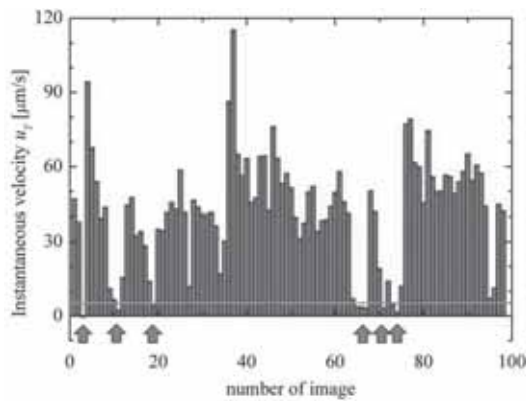


図4：Stick-slip 運動をする HL60 の速度推移 図5：HUVEC 上における HL60 の軌跡

⑤物質・熱の細胞膜内輸送現象の実験的研究（小宮）

高精度位相シフト干渉計および精密温度制御拡散セルを用いて、サブミリスケールのタンパク質物質・熱輸送現象の可視化を行った。物質・熱移動の相互作用としては、Soret 効果が代表的であるが、タンパク質についての Soret 係数導出については、現象が非常に緩やかであり、かつ複雑であるため測定が困難とされ、データの欠乏を招いていた。そこで、本研究では微小領域の高精度計測技術を生かし、短時間での Soret 係数測定を行った。その結果、タンパク質の Soret 係数は種類によって正負の値をとり、負の値をとるタンパク質（ここではアプロチニン）においては、図6に示すように通常の物質移動とは逆方向の物質移動が生じた。これは温度勾配の存在により相対的に強い駆動力が生じ、物質移動が逆方向に促進されたためである。図7は正の Soret 係数をとるタンパク質の非定常濃度場を示している。これらの結果から、温度勾配を用いることでタンパク質の移動方向を制御できる可能性を見出した。今後はこれらの知見を基に、多孔質体によって模擬する擬似細胞膜内においてタンパク質物質移動が制御できるかについての可能性を追求する。

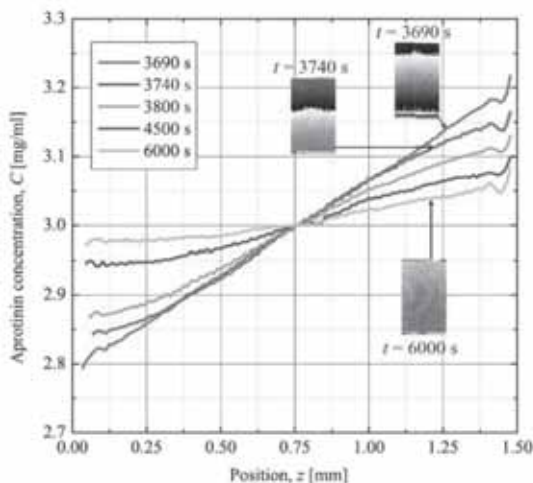


図6：アプロチニンの非定常拡散場

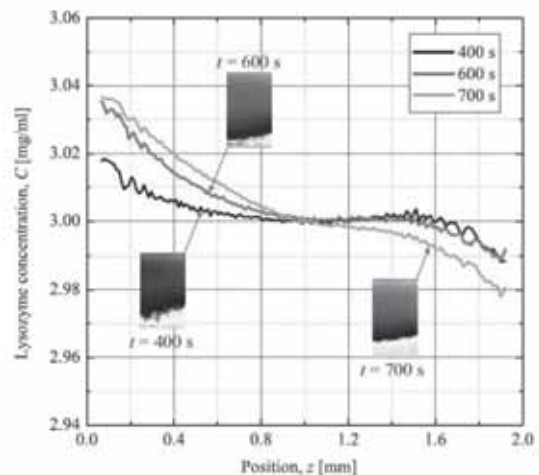


図7：リゾチームの非定常拡散場

3. 研究目標の達成状況

本年度の研究目標は概ね達成し、順調に研究を遂行した。各研究課題に対する個別の達成状況は下記の通りである。

①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応（佐藤）

本年度は、プラズマ流の弱い刺激に対する細胞応答の網羅的遺伝子解析を進め、弱い刺激においては、プラズマ特有の遺伝子発現が発生することを明らかにした。これより、強い刺激では過酸化水素が主たる不活化因子となるのに対し、刺激の強さで細胞の応答が異なる事を明らかにされ、所定の目標を達成した。

②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究（小原）

脂質二重膜の熱輸送に対する分子動力学シミュレーションを用いた解析により、その特性やメカニズムを明らかにして、所定の目的を達成した。

③生体適合材料と細胞の相互作用（太田、富田）

研究計画に沿って、順調に進行中である。生体材料と細胞の相互作用がタンパク質レベルから知見が蓄積され、流れが負荷した場合の相互作用の変化が検知できた。

④HL60のローリング特性に与える細胞分化の影響（白井）

当初の目標通り、HL60のローリング特性に対する接着分子による生化学的要因と表面性状等の物理的要因を分離し、血管内皮表面の幾何形状がHL60の挙動に与える影響を明らかにした。

⑤物質・熱の細胞膜内輸送現象の実験的研究（小宮）

本年度は、タンパク質における物質・熱移動の相互作用に特化した実験的研究を遂行し、諸種のタンパク質におけるSoret係数の計測を行った。これにより、物質流束の定量的制御という観点から、温度勾配を利用することも手法の一つに挙げられることを示した。

4. まとめと今後の課題

本年度までに、当グループでは細胞の応答・輸送現象に関して包括的に研究を進め、細胞に与える刺激が化学的な場合と力学的な場合におけるそれぞれの細胞応答、細胞膜の熱輸送機構、細胞と材料の相互作用やタンパク質輸送について、遺伝子発現、タンパク質発現の視点から刺激に対し特徴的な遺伝子発現があることやタンパク質レベルで流れ負荷に対する応答を明らかにした。また、日本機械学会部門協議会直属「高度物理刺激と生体応答に関する研究分科会(P-SCC12)」として設置し、本グループに参画しているメンバーを交え研究課題解決のための研究討論や情報発信を行った。今年度のまとめと今後の課題については、下記の通りである。

①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応（佐藤）

本プロジェクトでは、プラズマ流を照射した培地に対する細胞応答について明らかにしたが、プラズマ流を直接照射した場合の細胞応答について明らかにする必要がある。そのため、液中プラズマ発生法の開発やそのプラズマ特性の把握も必要である。

②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究（小原）

脂質二重膜の熱伝導率を分子動力学シミュレーションにより初めて計測すると共に、その分子動力学レベルのメカニズムを明らかにすることができた。今後は、熱輸送における分子内各基の役割などさらに基礎的な知見を蓄積すると共に、バイオマテリアルと液体からなる系に対する応用に研究を進める必要がある。

③体適合材料と細胞の相互作用（太田、富田）

生体材料の存在下における、血管内皮細胞と平滑筋細胞との相互関係を明らかにしていく。

④HL60のローリング特性に与える細胞分化の影響（白井）

実際の免疫反応に即し、接着分子の発現が好中球の挙動に与える影響を解析するため、セ

レクチン等をコーティングした基板を用いた HL60 の挙動解析を行う。

⑤物質・熱の細胞膜内輸送現象の実験的研究（小宮）

高精度位相シフト干渉計および精密温度制御拡散セルを用いて、サブミリスケールのタンパク質物質・熱輸送現象の可視化を行った。諸種タンパク質の Soret 係数を計測し、物質の種類によって正負の値をとることがわかった。今後は多孔質体によって模擬する擬似細胞膜内において、温度勾配を用いることでタンパク質物質移動が制御できるかについての可能性を追求する。

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] Takashi Miyahara, Masanobu Oizumi, Tatsuyuki Nakatani and Takehiko Sato: Effect of voltage polarity on oxidation-reduction potential by plasma in water, *AIP Advances*, Vol.4, Issue 4, (April 2014), article no. 047115 (10 pages).
- [2] T. Nakano, G. Kikugawa and T. Ohara: Molecular Heat Transfer in Lipid Bilayers with Symmetric and Asymmetric Tail Chains, *ASME J. Heat Transfer*, 135 (2013), 061301.
- [3] Sugiyama, Y., Shirai, A., Influence of differentiation of HL-60 cells on their motion on a flat glass plate, *Proc. ICBME 2013*, Singapore (2013/12/4-7), ID: 358.
- [4] 杉山, 白井, HL-60 の分化がガラス基板への付着性に与える影響, *機構論* No. 13-69, 仙台 (2014/1/11-12), pp. 447-448.
- [5] Shirai, A., Sugiyama, Y., Fundamental characteristics of motion of neutrophil-like HL-60 cells on glass plate, *2014 Annual ELYT Workshop Abstract Book*, Frejus (2014/2/19-21), USB-Memory.
- [6] J.F. Torres, A. Komiya, D. Henry and S. Maruyama: Measurement of Soret and Fickian diffusion coefficients by orthogonal phase-shifting interferometry and its application to protein aqueous solutions, *J Chem. Phys.*, 139 (2013), 074203.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [7] 佐藤岳彦：大気圧プラズマ流への暴露による細胞応答，第1回日本機械学会部門協議会「高度物理刺激と生体応答に関する研究分科会（P-SCC12）」特別講演会（2013）。（招待講演）
- [8] 佐藤岳彦：大気圧プラズマによる病原性微生物殺滅法と医療応用，静電気学会 - エアロゾル学会合同シンポジウム 大気汚染物質の除去に関する特別講演会，（2013）。（招待講演）
- [9] Takehiko Sato, Mayo Yokoyama and Kohei Johkura: Gene ontology analysis for HeLa cells exposed to a plasma- or H₂O₂-treated culture medium, *21st International Symposium on Plasma Chemistry*, Cairns, (2013).
- [10] Xiaobo Han, 坂元 尚哉, 富田 典子, Meng Hui, 佐藤 正明, 太田 信：せん断応力を負荷した共存培養モデル内の血管平滑筋細胞の形質変化，第25回バイオエンジニアリング講演会，（2013）。
- [11] Noriko Tomita, Liviu Movileanu, Stephan Wilkens and Makoto Ohta: Microbial Pore-Forming Protein Properties Depended on Lipid Environment, *NIH Tohoku University JSPS Symposium Program and Abstracts*, (2013), P-84.
- [12] Sho Matsumoto, Han Xiaobo, Makoto Ohta, Noriko Tomita: Density change of smooth muscle cells in co-culture model under shear stress with spatial gradient related to the development of cerebral aneurysm, *The 5th EMBO meeting advancing the life science 2013 AMSTERDAM abstracts*, (2013).

- [13] Noriko Tomita, Liviu Movileanu, Makoto Ohta: Electrophysiological properties of engineered FhuA $\Delta C/\Delta L$ protein nanopore affected by lipid bilayer environment, *The 5th EMBO meeting advancing the life science 2013 AMSTERDAM abstracts*, (2013).
- [14] Sho Matsumoto, Han Xiaobo, Hisatoshi Kobayashi, Noriko Tomita, Makoto Ohta: Influence of Ni-Ti Wire under the Shear Stress Environment on Endothelialization, *Proceedings of Tenth International Conference on Flow Dynamics*, (2013), pp. 602-603.
- [15] Noriko Tomita, Liviu Movileanu, Makoto Ohta: Membrane Channel Dynamics Depended on Lipid Environment, *Proceedings of Tenth International Conference on Flow Dynamics*, (2013), pp. 614-615.
- [16] Noriko Tomita, Stephan Wilkens, Liviu Movileanu, Makoto Ohta: Analysis of Relationship between Lipid Environment and Protein Nanopore Properties- Toward Creation of Red Blood Cell Model with Various Membrane Strength-, *Proceedings of Tenth International Conference on Flow Dynamics*, (2013).
- [17] 白井：微小血管における好中球の挙動, 機構論 No. 13-1, 岡山 (2013/9/8-11), W053002.
- [18] 白井：傾斜遠心顕微鏡を用いた血球と固体壁との力学的相互作用の計測, 第 98 回岡山県医用工学研究会, 岡山, (2014 年 2 月).
- [19] Atsuki Komiya, J. Chevalier, S. Pruvost and S. Livi: Evaluation of Protein Mass Flux in Hindered Diffusion Field, *2013 Annual ELYT Workshop Abstract Book*, Zao, (2013), pp. 62-63.
- [20] Atsuki Komiya, J. Chevalier, S. Pruvost and S. Livi, Quantitative Evaluation of Protein Mass Flux in the Vicinity of Thin Plate Surface, *Proceedings of the 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics (ExHFT8)*, Lisbon, (2013), USB-447.
- [21] Atsuki Komiya, J. Chevalier, S. Pruvost and S. Live: Membrane and Hindered Diffusion of Protein –Quantitative Evaluation -, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2013), pp. 190-191.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

（特許）該当なし

（受賞）該当なし

（マスコミ発表）該当なし

[サブテーマ 2]

燃焼・反応現象の解明と制御に関する研究
Research on Combustion and Chemical Kinetics

丸田 薫^{1)†}, 小林 秀昭¹⁾, 中村 寿¹⁾, 店橋 護²⁾, Sergey Minaev³⁾, Yiguang Ju⁴⁾
¹⁾東北大学流体科学研究所, ²⁾東京工業大学, ³⁾FEFU, ITAM, ⁴⁾Princeton University, MAE,
†サブリーダー

1. 研究目的

バイオ燃料, 水素, 石炭改質燃料など低環境負荷およびエネルギーセキュリティに優れた多様な燃料の極限環境における燃焼機構解明と先端的数値解析を可能にする反応機構, 計算技術を確立する. また, 新規高圧燃料改質炉や廃棄物処理炉内の基礎特性を明らかにする. さらに各種燃料の詳細化学反応機構の高度化に向けて, 独自手法である温度分布制御型マイクロフローリアクタへの燃料適合範囲を発展するとともに, 燃焼排出物であるすす生成過程の評価へと展開する.

2. 研究成果の内容

平成 25 年度の主たる研究成果の内容は以下の通りである.

① 燃焼・反応現象の理解 (乱流燃焼特性)

- 石炭改質ガス乱流燃焼からのフューエル NO 生成の圧力依存性を実験により求め, 反応経路解析によりそのメカニズムを明らかにした (図 1).
- 高強度乱流予混合燃焼の要素火炎であるエッジフレームの火炎温度を OH-PLIF によって計測する技術開発を行った.
- 高圧環境における純酸素噴流拡散火炎の安定限界ならびに乱流火炎への遷移特性を明らかにした.
- 航空用ガスタービンの燃焼環境における液体燃焼微粒化過程を観測し微粒化現象の圧力依存性を明らかにした (図 2).
- カーボンフリー燃料であるアンモニアにおける NO_x 生成特性とそのメカニズムを明らかにした.

② 燃焼・反応現象の理解 (燃料の着火特性・すす生成過程)

- 燃料の着火特性を計測するためのマイクロリアクタについて, 天然ガス成分のメタン, エタン, プロパン, ブタンについて反応性評価を行い, エタンの特異な振る舞いと, わずかなブタンの添加によって反応性が大きく変化することを示した (図 3).
- 酸化反応過程の研究に使用してきたマイクロリアクタをすす生成過程の研究に応用し, 当量比と滞在時間に依存するすす限界計測とすす前駆体である PAH の定量測定へと研究を展開した (図 4).

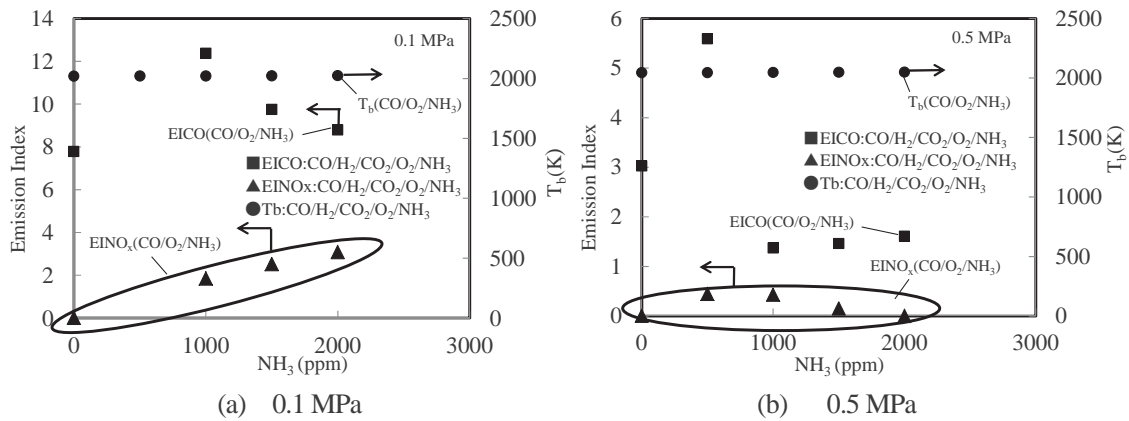


図 1 : CO, NO_x に対する Emission Index と燃料に含まれる窒素成分を模擬した NH₃ の関係

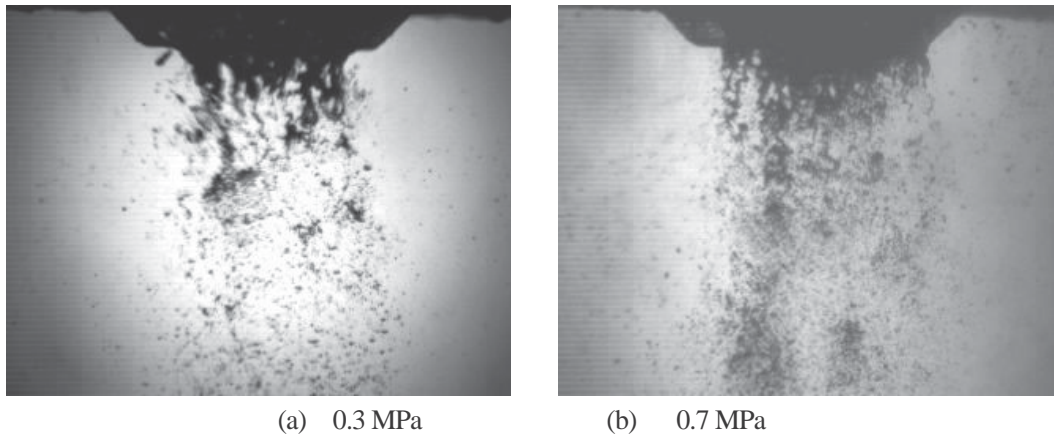


図 2 : 模擬気流噴射弁による液体微粒化過程の雰囲気圧力依存性

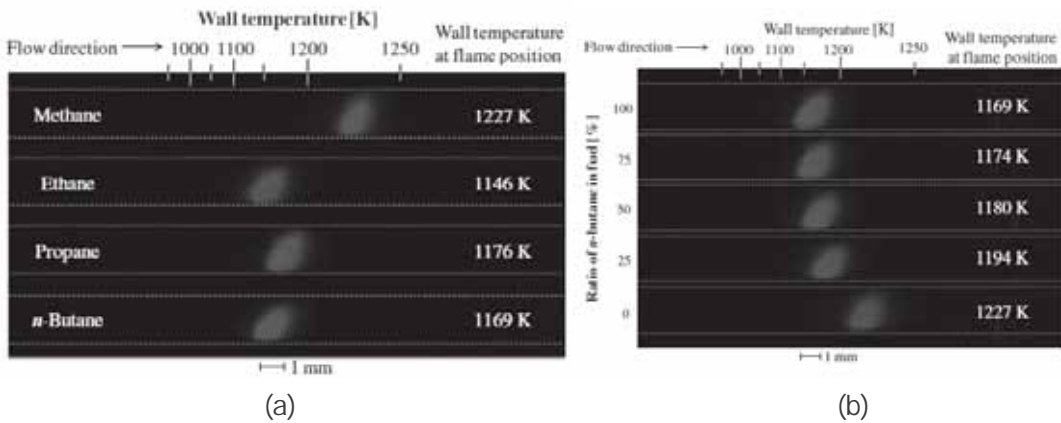


図 3 : 温度分布制御マイクロフローリアクタによる天然ガス成分の反応性評価
(a)単体成分評価 (b)混合比率の影響評価

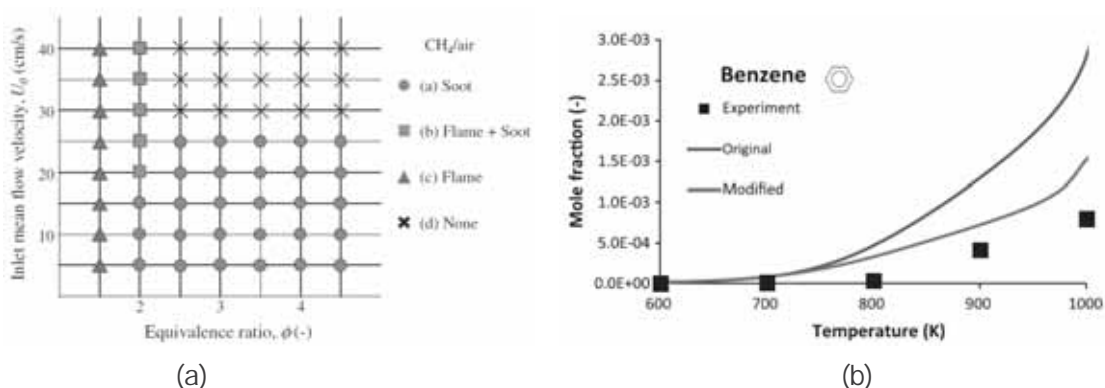


図4：温度分布制御マイクロフローリアクタによる(a)すす限界計測結果と(b)PAH計測結果

3. 研究目標の達成状況

計画に基づき、平成25年度も順調に推移した結果、目的を達成した。

4. まとめと今後の課題

各サブトピックの基盤技術の高度化、計測手段を展開することによって、燃焼・反応現象の解明、制御については一定の目的を達した。また本分野横断研究をベースに、実験から素反応計算に至る協力関係が構築でき、結果として多くのより進んだ段階の共同研究が展開された。例としては、さきがけプロジェクトの開始、戦略的イノベーション研究への展開、また日露の大型共同研究プロジェクトの開始等である。

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] M. Zhang, J. Wang, Y. Xie, W. Jin, Z. Wei, Z. Huang, H. Kobayashi: Flame Front Structure and Burning Velocity of Turbulent Premixed $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$ Flames, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, (2013), pp. 11421-11428.
- *[2] J. Wang, M. Zhang, Z. Huang, T. Kudo, H. Kobayashi: Measurement of the Instantaneous Flame Front Structure of Syngas Turbulent Premixed Flames at High Pressure, *Combustion and Flame*, Vol. 160, (2013), pp. 2434-2441.
- [3] J. Wang, M. Zhang, Y. Xie, Z. Huang, T. Kudo, H. Kobayashi: Correlation of turbulent burning velocity for syngas/air mixtures at high pressure up to 1.0 MPa., *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 50, (2013), pp. 90-96.
- [4] S. Kadowaki, T. Oshima, H. Kobayashi: Numerical Study on the Intrinsic Instability of High-Temperature Premixed Flames under the Conditions of Constant Density and Constant Pressure in the Unburned Gas, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 8, No. 3, (2013), pp. 233-246.
- [5] M. Zhang, J. Wang, Y. Xie, Z. Wei, W. Jin, Z. Huang, H. Kobayashi: Measurement on Instantaneous Flame Front Structure of Turbulent Premixed $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{air}$ Flames, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 52, (2014), pp. 288-296.
- [6] 江口浩一, 小林秀昭: アンモニアのエネルギーキャリアとしての利用技術, 水素エネルギーシステム, Vol. 38, No. 4, (2013), pp. 264-271.
- [7] 熊上学, 加藤裕之, 白川駿, 奥山昌紀, 鈴木拓朗, 大上泰寛, 小林秀昭: 乱流強化が高圧環境同軸酸素噴流拡散火炎の安定性に及ぼす影響, 日本燃焼学会誌第 55 巻 172 号, (2013), pp. 190-201.

- [8] Koichi Takase, Xing Li, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Masato Katsuta, Masao Kikuchi, Kaoru Maruta: Extinction characteristics of CH₄/O₂/Xe radiative counterflow planar premixed flames and their transition to ball-like flames, *Combustion and Flame*, Vol. 160, No.7, (2013), pp. 1235-1241.
- [9] Fan, A., Wan, J., Liu, Y., Pi, B., Yao, H., Maruta, K., Liu, W.: The effect of the blockage ratio on the blow-off limit of a hydrogen/air flame in a planar micro-combustor with a bluff body, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.38, No.26, (2013), pp.11438-11445.
- [10] 中村 寿, 手塚 卓也, 長谷川 進, 丸田 薫 : マイクロ燃焼の新応用 : 燃料の着火特性計測と燃焼化学反応の研究ツール, 日本燃焼学会誌, Vol. 55, No. 173, (2013), pp. 264-271.
- [11] Fan, A., Wan, J., Maruta, K., Yao, H., Liu, W.: Interactions between heat transfer, flow field and flame stabilization in a micro-combustor with a bluff body, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, (2013), pp. 72-79.
- [12] Hisashi Nakamura, Ryu Tanimoto, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Characteristics of Soot and PAH Formation in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *Proceedings of 9th Asia-Pacific Conference on Combustion*, Gyeongju, Korea, (2013), pp. 176.
- [13] Fursenko R., Minaev S., Maruta K., Nakamura H.: Combustion Regimes of Low-Lewis-Number Counterflow Premixed Flames, *ICDERS 2013 24th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, Taipei, (2013), pp. 69.
- [14] Yuta Kizaki, Kenichiro Saruwatari, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: The effect of surface reactions on gas-phase reactions of CH₄/Air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *ICDERS 2013 24th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, Taipei, (2013), pp. 106.
- *[15] Taiki Kamada, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Study on combustion and ignition characteristics of natural gas components in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Combustion and Flame*, Vol. 161, No. 1, (2014), pp. 37-48.
- [16] D. Darcy, H. Nakamura, C.J. Tobin, M. Mehl, W.K. Metcalfe, W.J. Pitz, C.K. Westbrook and H.J. Curran: A high-pressure rapid compression machine study of n-propylbenzene ignition, *Combustion and Flame*, Vol. 161, No. 1, (2014), pp. 65-74.
- [17] H. Nakamura, D. Darcy, M. Mehl, C.J. Tobin, W.K. Metcalfe, W.J. Pitz, C.K. Westbrook and H.J. Curran: An experimental and modeling study of shock tube and rapid compression machine ignition of n-butylbenzene/air mixtures, *Combustion and Flame*, Vol. 161, No. 1, (2014), pp. 49-64.
- [18] Hisashi Nakamura, Ryu Tanimoto, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Soot formation characteristics and PAH formation process in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Combustion and Flame*, Vol. 161, No. 2, (2014), pp. 582-591.
- [19] Xing Li, Li Jia, Takakazu Onishi, Philipp Grajetzki, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Study on stretch extinction limits of CH₄/CO₂ versus high temperature O₂/CO₂ counterflow non-premixed flames, *Combustion and Flame*, Vol. 161, No. 3, (2014), doi:10.1016/j.combustflame.2013.12.004.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

(招待講演)

- [20] Kaoru Maruta: From microcombustion to micro flow reactor for chemical kinetics study, The Clean Combustion Research Center “Clean Combustion Workshop”, King Abdullah University of Science and Technology, Saudi Arabia, (2014).

(国際会議)

- [21] Hisahi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Possibility of Kinetics Study in Tubes, *14th International Conference on Numerical Combustion NC13*, Texas, USA, (2013), MS5.
- [22] Tomoya Kobayashi, Hisashi Nakamura, Hawegawa Susumu, Koichi Takase, Masato Katsuta, Masao Kikuchi, Kaoru Maruta: Combustion Limits on Lean Premixed Low-Lewis-Number Counterflow Flames for CH₄/O₂/CO₂ and CH₄/O₂/Xe mixtures, *ISPS5 29th American Society for Gravitational and Space Research Conference and 5th International Symposium on Physical Sciences in Space*, Florida, USA, (2013).
- [23] Jun Ishimoto, Kaoru Maruta and Takehiko Sato: Frontier Science of Next Generation Reactive Fluid, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 136-137.
- [24] Shogo Kikui, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: Pressure Dependence of n-Butane/Air Weak Flames in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *Tenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2013)*, Sendai, (2013), pp. 670-671.
- [25] Hiroki Takahashi, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Hisashi Nakamura and Kaoru Maruta: Study on Ignition Characteristics of Syngas in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *Tenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2013)*, Sendai, (2013), pp. 684-685.
- [26] Takakazu Onishi, Li Xing, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta, Tadahiro Araake, Susumu Mochida: Study on Jet Flame Characteristics in High-temperature Oxy-fuel Condition, *Tenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2013)*, Sendai, (2013), pp. 676-677.
- [27] Yuta Kizaki, Kenichiro Saruwatari, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: The Effect of Surface Reactions on Gas-phase Reactions of CH₄/Air Mixture in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *Tenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2013)*, Sendai, (2013), pp. 668-669.
- [28] Takakazu Onishi, Li Xing, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta, Susumu Mochida: Fundamental Investigation of CH₄ Jet Flame with High Temperature Air, O₂/N₂/CO₂ and O₂/CO₂ Oxidizers, *ISETS'13 International Symposium on EcoTopia Science'13*, Nagoya, (2013).
- [29] Kaoru Maruta: Microcombustion for chemical kinetics study, 小形分散エネルギーシステムに関する技術動向, ~ヨーロッパ拠点機関と東大機械系との研究交流~, 東京, (2014).
- (国内学会)
- [30] 加藤昂大, 石川伸一郎, 工藤琢, 加藤壮一郎, 伊藤光紀, 小林秀昭: 高圧環境における気流噴射の噴霧形成過程に関する研究, 第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2013), pp. 336-337.

- [31] 内田朋洋, 宗吉俊吾, 工藤琢, 早川晃弘, 小林秀昭, 門脇敏: 高圧環境におけるプロパノール異性体乱流予混合火炎の構造に関する研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2013 講演論文集, (2013), pp. 311-312.
- [32] 加藤昂大, 鈴木聡一郎, 工藤琢, 加藤壮一郎, 伊藤光紀, 早川晃弘, 小林秀昭: 気流噴射弁の噴霧形成過程に及ぼす雰囲気圧力の影響, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2013), pp. 152-153.
- [33] 門脇敏, 柳岡拓渡, 山崎渉, 小林秀昭, 三次元予混合火炎の流体力学的不安定性: セル状火炎の特性に及ぼす未燃ガス温度の影響, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2013), pp. 266-267.
- [34] 岩村佳茂, 山口達也, 工藤琢, 早川晃弘, 小林秀昭: 超音速流におけるランプインジェクター下流燃焼領域の衝撃波干渉に関する研究, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2013), pp. 288-289.
- [35] 後藤貴司, 早川晃弘, 工藤琢, 小林秀昭: アンモニア予混合火炎の層流燃焼速度および NO_x 生成特性, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2013), pp. 288-289.
- [36] 内田朋洋, 宗吉俊吾, 工藤琢, 早川晃弘, 小林秀昭, 門脇敏: 高圧下におけるプロパノール異性体乱流予混合火炎の火炎構造及び不安定性に関する研究, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2013), pp. 432-433.
- [37] 佐藤亮太, 松野太, J. Wang, 工藤琢, 早川晃弘, 小林秀昭, 門脇敏: 高圧環境における $\text{CO}/\text{H}_2/\text{CO}_2/\text{O}_2$ 乱流予混合火炎構造に及ぼす燃料組成の影響, 第 51 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2013), pp. 434-435.
- [38] 加藤昂大, 鈴木聡一郎, 工藤琢, 加藤壮一郎, 伊藤光起, 早川晃弘, 小林秀昭: 高圧環境における気流噴射弁の噴霧粒径および噴霧形成過程に関する研究, 第 16 回微粒化アジア会議および第 22 回微粒化シンポジウム講演論文集, (2013), pp. 435-440.
- [39] 高橋裕基, 手塚卓也, 長谷川進, 中村寿, 丸田薫: 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた合成ガスの Weak flame 特性に関する研究, 第 50 回日本伝熱シンポジウム, (2013), pp. 248-249.
- [40] 李星, 賈力, 大西孝和, Graetzki Philipp, 中村寿, 手塚卓也, 長谷川進, 丸田薫: Investigation on stretch extinction limits of CH_4/CO_2 versus high temperature O_2/CO_2 counterflow non-premixed, 第 50 回日本伝熱シンポジウム, (2013), pp. 526-527.
- [41] 大西孝和, 星李, 手塚卓也, 長谷川進, 中村寿, 丸田薫, 持田晋, 高温酸素燃焼に関する基礎的研究(噴流火炎の燃焼特性), 第 50 回日本伝熱シンポジウム, (2013), pp. 522-523.
- [42] 中村寿, 小林友哉, 高瀬光一, 手塚卓也, 長谷川進, 丸田薫, Roman Fursenko, Sergey Minaev, 勝田真登, 菊池政雄: 燃焼限界の統一理論構築のための極低速対向流火炎実験, 日本マイクログラビティ応用学会第 27 回学術講演会 JASMAC-27, (2013), 28A03.
- [43] 勝田真登, 伊藤裕一, 中村裕広, 村上敬司, 深澤智晴, 岡利春, 中村寿, 丸田薫: 極低速対向流火炎実験装置の開発状況, 日本マイクログラビティ応用学会第 27 回学術講演会 JASMAC-27, (2013), 29A04.
- [44] 高橋裕基, 手塚卓也, 長谷川進, 中村寿, 丸田薫: 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた合成ガス組成に対する Weak flame 応答に関する研究, 第 51 回燃焼シンポジウム, (2013), pp. 16-17.
- [45] 大西孝和, Li Xing, 手塚卓也, 長谷川進, 中村寿, 丸田薫, 荒明忠宏, 持田晋: 高温酸素燃焼条件における同軸噴流火炎の基礎的研究, 第 51 回燃焼シンポジウム, (2013), pp. 14-15.
- [46] 木崎裕太, 中村寿, 手塚卓也, 長谷川進, 丸田薫: 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた石英表面におけるラジカル失活の影響に関する研究, 第 51 回燃焼シンポジウム, (2013), pp. 258-259..

[47] 菊井渉悟, 中村寿, 手塚卓也, 長谷川進, 丸田薫: 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いた n-ブタンの高圧下における多段酸化反応, 第 51 回燃焼シンポジウム, (2013), pp. 454-455.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許)

燃焼実験装置, 丸田薫, 中村寿, 加藤壮一郎, 及川尚樹, 特許第 5453221 号, 2014.1.10.

(受賞)

第 45 回市村学術賞 貢献賞, 多様な燃料の詳細化学反応機構解明のための火炎クロマトグラフ法の開発, 丸田薫, 中村寿, 手塚卓也, 2013.4.25, 財団法人新技術開発財団.

平成 25 年度粉生熱技術振興賞, マイクロ燃焼技術による密閉型燃焼加熱器および火炎クロマトグラフ法の研究開発で成果をあげ, 熱技術の推進に貢献, 丸田薫, 2013.11.6, 公益財団法人谷川熱技術振興基金.

(マスコミ発表)

新聞記事・専門誌記事

平成 25 年度粉生熱技術振興賞 (谷川熱技術振興基金) 受賞関連記事

鉄鋼新聞 平成 25 年 9 月 5 日

日刊工業新聞 平成 25 年 9 月 11 日

熱産業経済新聞 平成 25 年 9 月 15 日

msn 産経ニュース 平成 25 年 10 月 23 日

http://sankei.jp.msn.com/west/west_economy/news/131023/wec13102319550005-n1.htm

(その他)

平成 25 年 6 月 30 日 東北大学広報誌「まなびの杜」第 64 号「特集・高温酸素燃焼技術の紹介」(丸田教授)

平成 25 年 7 月 3-5 日 アジア最大規模の工業炉・熱技術及び関連機器の展示会「サーモテック 2013 第 6 回国際工業炉・関連機器展 (一般社団法人日本工業炉協会主催)」に出展および「高温酸素燃焼とマイクロコンバスタの基礎燃焼特性」に関して発表.

平成 25 年 10 月 1 日 中村助教が科学技術振興機構の「再生可能エネルギーからのエネルギーキャリアの製造とその利用のための革新的基盤技術の創出」領域におけるさきがけ研究「低エクセルギー損失・CO₂ 無排出燃焼の実現に向けたアンモニア燃焼化学反応機構の解明」に採択される.

平成 25 年 12 月 31 日 丸田教授が「ロシア政府メガプロジェクト」の研究拠点リーダーに選出される. 大型研究拠点をロシア国内に形成する目的で, 2014~16 年にわたり年間百万ドル規模 (約 1 億円/年, 総計 3 億円) を交付される事業. 研究題目は「熱物質再生を伴う新概念燃焼技術の基礎学理」, 拠点はロシア極東連邦大学 (ウラジオストク) であり, 宇宙等における微小重力場実験, 詳細な化学反応の解明や理論解析により, エネルギーの最終的な利用形態を踏まえた高効率燃焼科学技術の確立を目指す.

平成 26 年 1 月 16 日 丸田教授が平成 25 年度 第 8 回 宇宙政策セミナー「今後の宇宙利用～東北からの挑戦～」in 仙台にパネリストとして参加、「燃焼限界の統一理論構築に向けた対向流火炎の宇宙実験」に関する発表を行う.

高応答性流体の異分野融合展開

Development of the Different Academic Field Integration of High Responsible Fluid

石本 淳^{1)†}, 西山 秀哉¹⁾, 高奈 秀匡¹⁾, 徳増 崇¹⁾, 寒川 誠二¹⁾, 久保田 智広¹⁾
Kozo Saito²⁾, 姫野 武洋³⁾, 新城 淳史⁴⁾, 岡村 崇弘⁵⁾, 松浦 一雄⁶⁾, 井上 元⁷⁾

¹⁾東北大流体研, ²⁾IR4TD, University of Kentucky, USA, ³⁾東京大学大学院,

⁴⁾JAXA 研究開発本部, ⁵⁾KEK 素核研低温, ⁶⁾愛媛大学大学院,

⁷⁾ 京都大学工学研究科化学工学専攻

†サブリーダー

1. 研究目的

外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体・熱流動を対象とし、その異分野融合型研究開発手法を通して、ナノ機能性創出、反応性界面物理、環境調和型エネルギー、低炭素社会構築、リサイクル科学、流体-固体材料連成科学への学術的貢献と先端応用展開を目指す。各小研究グループにおける研究目標は以下となる。

① サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する研究 (石本 G)

外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体の微粒化・界面現象に関して、その異分野融合型研究開発手法を通して、新エネルギー循環科学への学術的貢献と先端応用展開を目指す。

② 高導電性液体を用いた同軸二重円筒型発電装置の開発と性能評価(高奈 G)

低炭素社会実現に向け再生可能エネルギーが注目されている今日において、特に風力エネルギーが着目されており、その導入量が今後大幅に増加することが期待されている。本研究では風力エネルギーの更なる高度利用化を目指し、高導電性液体を用いた同軸二重円筒型発電装置を新規に開発し、本装置の発電特性およびトルク特性を明らかにすることを目的とする。

③ PEFC 触媒層の酸素、プロトン輸送性能の評価シミュレータの構築 (徳増 G)

固体高分子形燃料電池(PEFC)は化石燃料に代わる次世代電源として期待が大いに高まっているが、その利用効率を増加させるには触媒層で十分な反応を生じさせる必要がある。現在、分極が大きいのはカソード側の触媒層であり、この分極を低下させるにはカソード側触媒層で触媒表面に十分な量のプロトン、酸素を供給する必要がある。触媒層内では触媒表面や担持カーボンがアイオノマーと呼ばれる厚さ数 nm の高分子超薄膜で覆われており、プロトンはこのアイオノマー内を移動して触媒表面に到達し、酸素分子はこのアイオノマーを透過して触媒表面に到達する。このアイオノマーは厚すぎると酸素透過を阻害し、薄すぎるとプロトン輸送を阻害するため、触媒層で効率よく反応を起こすためには、このアイオノマー内部におけるプロトンおよび酸素のナノスケール輸送現象を解明し、その知見を元に触媒層の最適設計を行う必要がある。このような理由から、本研究では東北大学側が分子動力学法を用いてアイオノマー内のプロトン輸送現象、酸素透過現象を解明する。また九州大学側では触媒層の多孔体構造を数値的に再現してその内部の輸送現象をマクロ方程式により解析するシミュレータを開発し、最終的にはこのマクロシミュレータに分子動力学法より得られたプロトン輸送、酸素透過モデルを組み込むことにより PEFC 触媒層の包括的な性能を予測できるマルチスケールシミュレ

ータを確立することを目的とする。

- ④ 計算と実験の融合によるプラズマとナノ構造表面界面相互作用に関する研究 (寒川 G)
ワイヤレス測定システムを実証し、測定適用可能範囲を明らかにする。さらに、ダメージ・エッチング形状予測のためのデータベースを拡充する。これらを測定システムへと統合する。これらのことから、実用的なシステムへと完成度を高める。一方で、開発したセンサを用いてプラズマ-固体表面相互作用の解明を進める。

2. 研究成果の内容

外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体・熱流動を対象とし、その異分野融合研究を推進する。具体的には、1) サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する研究 (石本グループ)、2) 環境浄化・エネルギー促進用反応性混相プラズマ流動システムの構築 (西山・高奈グループ)、3) プラズマ固体相互作用の解明とナノ界面制御(寒川・Huangグループ)、4) 燃料電池内部の反応流動現象のマルチスケール解析 (徳増グループ) の4グループにより研究を実施した。本年度は、上記研究課題に対して以下の研究成果を得た。

- ① サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する研究(石本 G)
研究成果に関しては、全体の研究概要を参考のこと。

- ② PEFC 触媒層の酸素、プロトン輸送性能の評価シミュレータの構築 (徳増 G)

今年度は、昨年度に構築したシミュレータを用いて、アイオノマーの酸素透過性能の支配因子の特定を実施した。フッ素系膜と炭化水素系膜を対象として、アイオノマー内部の各物質(高分子、水分子)の分布と酸素透過性能の解析を行った。その結果、アイオノマーはその密度分布から図 1 に示すように ①アイオノマー-白金界面 ②バルク領域 ③アイオノマー-気体界面の3つの領域に分割できることが明らかとなった。また、酸素透過性や各物質の分布の含水率依存性を解析したところ、フッ素系膜、炭化水素系膜両方とも含水率増加と共に酸素透過性能は減少するが、アイオノマー内の水分子は、フッ素系膜では①の領域に存在する酸素透過経路に入り込んでいるのに対し、炭化水素系膜では①の領域の上部に多数分布していることが明らかとなった。この結果より、フッ素系膜では水分子が①の領域に存在する酸素透過経路を埋め尽くすことによって酸素透過を阻害しているが、炭化水素系膜では①の領域の上部に水分子が高密度に分布することによって酸素分子が酸素透過経路へ侵入することを阻害していることが明らかとなった。

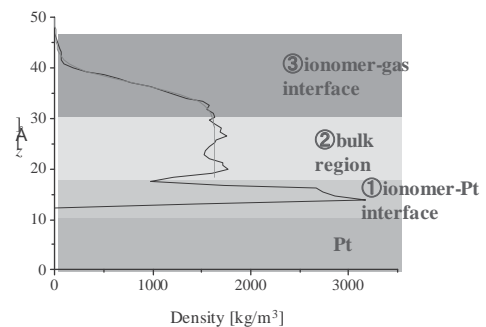


図 1：アイオノマーの構造。密度分布により①アイオノマー-白金界面、②バルク領域、③アイオノマー-気体界面に分割できる。

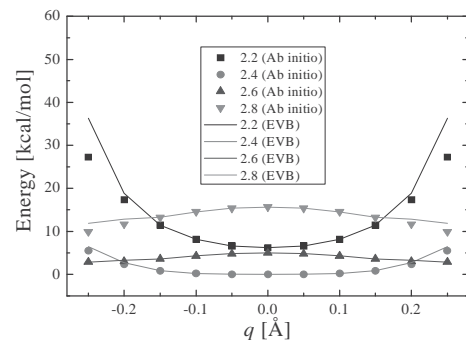


図 2：プロトンホッピング時のポテンシャル形状。EVB ポテンシャルは非常によく DFT の計算結果を表している。

今後は、アイオノマーの分子構造を変化させて同様の解析を行い、高酸素透過特性を有するアイオノマーの分子構造に対する知見を得る予定である。

また、今年度はプロトン輸送シミュレータの構築も行った。まず高分子電解質膜内部のプロトン輸送シミュレータに EVB モデルを導入し、第一原理計算と良い一致を示すポテンシャルを構築することで、Grotthuss mechanism を考慮した輸送解析を可能とした。プロトンホッピング時のポテンシャル障壁について、DFT の計算結果と EVB ポテンシャルにより得られた結果を示す。この図より、EVB ポテンシャルはきわめて精度よく DFT の計算結果を再現していることがわかる。このモデルにより高分子電解質膜内部のプロトンおよび水分子の拡散係数を求めたところ、実験結果とよい一致を示すことが確認された。このシミュレータを用いて平坦カーボンの上にアイオノマーを作成し、その中をプロトンが輸送するシミュレータの構築を行った。現在のところ、エネルギーなどがよく保存され、いくつかの変数を変化させた計算が可能となっている。今後はこのシミュレータを用いて様々な条件の計算を行い、その結果を京都大学で昨年度までに構築されたメゾスケールのシミュレータに実装して大規模かつマルチスケールの触媒層内プロトン・酸素輸送現象を解析する予定である。

③ 高導電性液体を用いた同軸二重円筒型発電装置の開発と性能評価(高奈 G)

風力エネルギーの高度利用を目的とし、風力エネルギーを電気エネルギーに変換することにより、風車軸回転トルクの最適制御を実現する同軸型二重円筒型発電装置を新規に設計・開発した(図3)。本装置内には液体金属である U-alloy が充填されており、液体金属は、回転軸に 90°ごとに設けられた絶縁性プロペラにより円周方向に駆動される。装置の円周方向に均等に配置された円柱状ネオジウム磁石により、液体金属の流動に対して垂直(軸)方向に磁場が印加される。本装置では、磁場と液体金属との相互作用により生じる誘導起電力を出力として取り出すとともに、ローレンツ力により回転トルクを制御する。図3に示す実験システムを構築し、各軸回転数における外部負荷抵抗値に対する発電出力特性およびトルク特性を明らかにした(図4, 図5)。

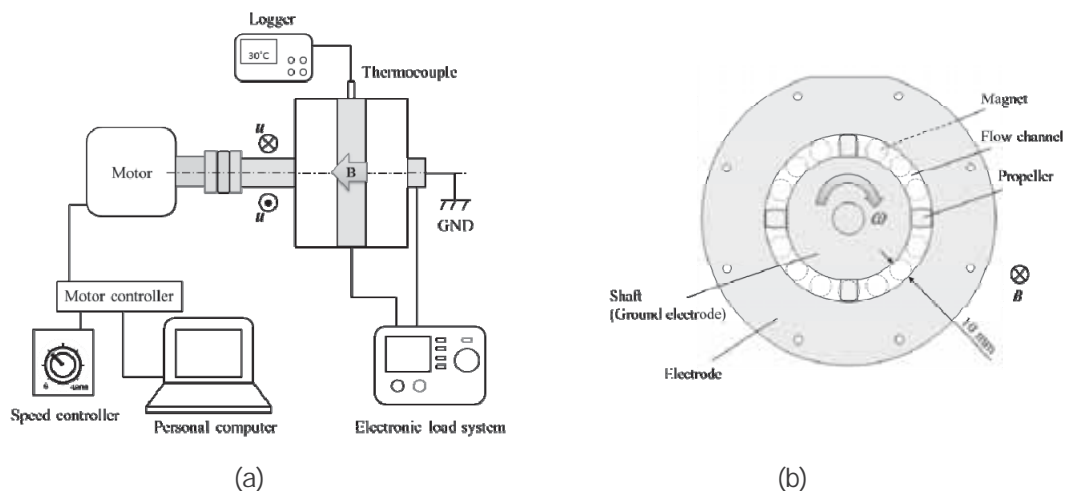


図3 : (a) 実験システムの概略図, (b) 流路の断面図

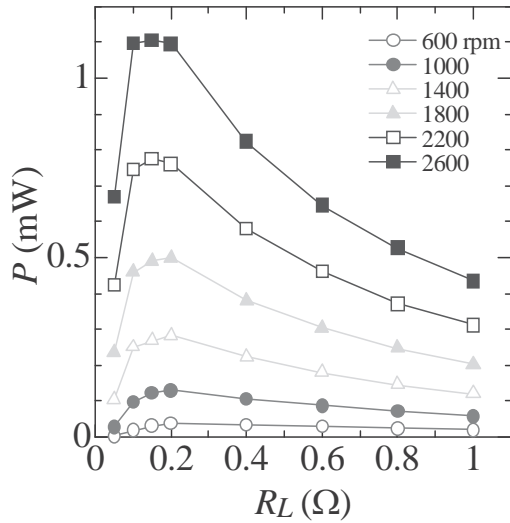


図4：外部負荷抵抗値に対する発電出力

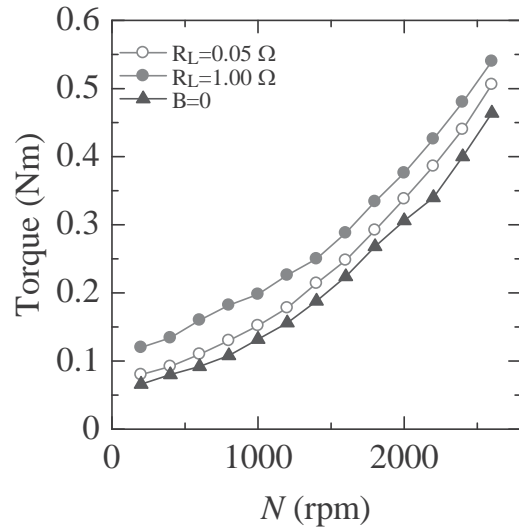


図5：軸回転数に対するモータトルク

- ④ 計算と実験の融合によるプラズマとナノ構造表面界面相互作用に関する研究（寒川 G）
 これまで進めてきたオンウェハモニタリングによるプラズマ測定システムについて、ワイヤレス化を推進した（図6）。

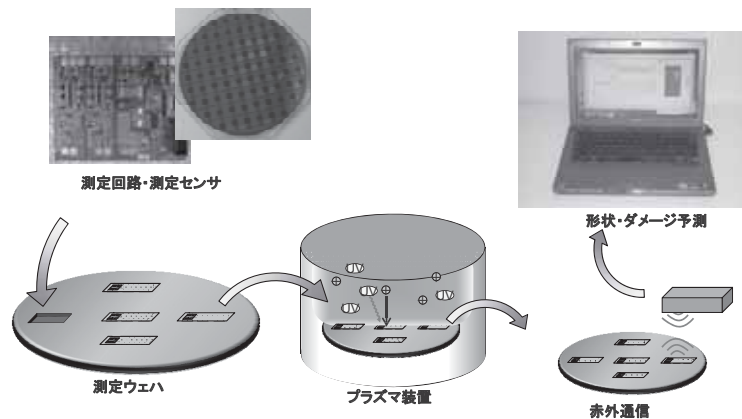


図6：ワイヤレス・オンウェハモニタリング測定システム

昨年度までに達成したワイヤレス測定に加えて、今年度は製造装置へと可能な 300mm 径で薄型・軽量の測定システムの試作を行った。製造装置では、プラズマ生成室を大気開放せずロードロック室を経由してロボットアームを用いてウエハをプラズマ生成室に導入する機構が用いられる。ワイヤレス・オンウェハモニタリング測定システムを有用なものとするには、この機構を用いてシステムをプラズマ生成室に導入可能であることが望ましい。そのためには薄型化と軽量化が必要である。本検討では、薄型化のため、測定回路の構成部品の見直し、薄型ボタン電池を使用可能とするための測定回路の電源電圧の見直し、測定システム全体の組み立ての見直しを行った。その結果、全体を約 5mm 以内に収めることができた。さらに、軽量化のために、測定システムを構成するケースをシリコン製とした。このようにして試作したワイヤレス測定システムを図7に示す。また、このシステムが動作することを実証した。

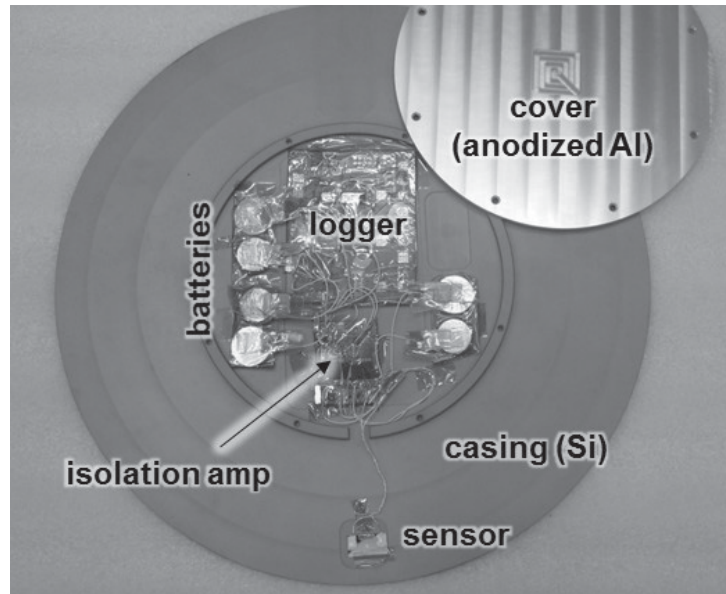


図 7 : 薄型・軽量ワイヤレス測定システム

さらに、これまで検討してきたオンウェハモニタリング手法を組み合わせる検討を行った。シース形状センサを用いることで、巨視的な凹凸を持つデバイスのエッチングの際におけるマクロなイオン軌道の曲がり予測できる。また、チャージアップセンサを用いることで、微視的な高アスペクト比ホール形状のエッチングの際におけるマイクロなイオン軌道の曲がり予測できる。これら2つの予測を組み合わせることで、マクロなイオン軌道の曲がりとマイクロなイオン軌道の曲がりの両方を考慮できるイオン軌道予測システムを開発した。予測例を図8に示す。この予測では、傾いた高アスペクト比ホールにおけるマイクロなイオン軌道の曲がり予測した。さらに、巨視的な凹凸を持ちマクロなイオン軌道の曲がり起こる場合(図9)について、マクロなイオン軌道の曲がりだけの効果、およびマイクロなイオン起動の曲がりも考慮した場合について、エッチング形状異常を予測した(図10)。

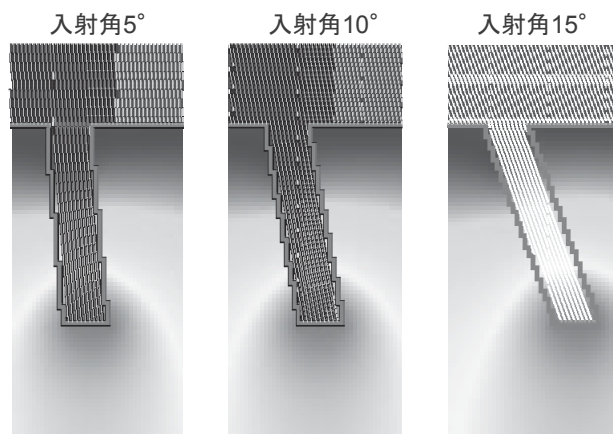


図 8 : 斜め入射時の高アスペクト比ホール内でのイオン軌道の予測

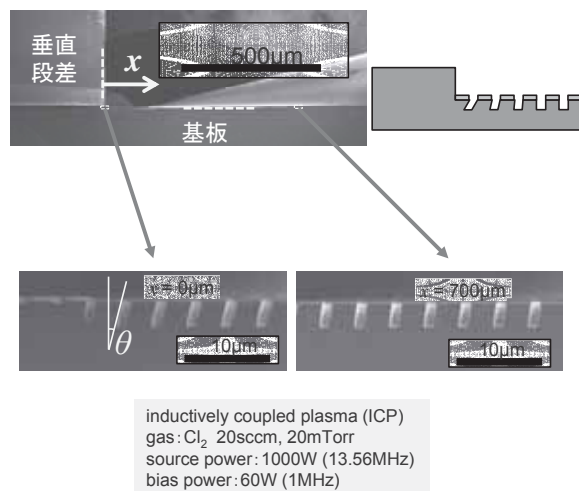


図 9：巨視的な凹凸を持つサンプルにおけるエッチング形状異常の例

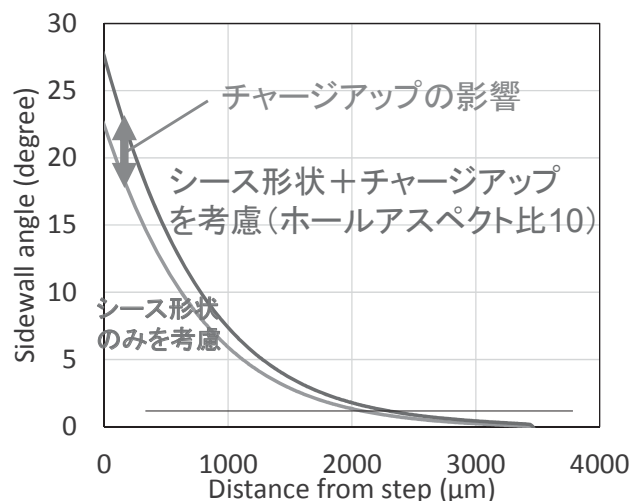


図 10：マクロなイオン軌道の曲がりとマイクロなイオン軌道の曲がりを両方考慮した場合のエッチング形状異常の予測

3. 研究目標の達成状況

① サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する研究(石本 G)

高圧条件に対応した噴霧微粒化特性解析用の基盤ソフトウェアを開発し試し計算を行った。その結果、容器内圧 50 気圧の条件下、斜め方向の噴射条件においても安定した計算が進行し、微粒化液滴粒子群の位置情報、ペネトレーション、流速分布、温度分布に関する数値予測が可能であることを示した。

② 高導電性液体を用いた同軸二重円筒型発電装置の開発と性能評価(高奈 G)

風力エネルギー高度利用のための同軸二重円筒型発電装置を新規に開発し、実験により本装置における回転数および外部負荷抵抗値に対する発電特性およびトルク特性を明らかとすることに成功したことから、本研究目的は概ね達成されたと考える。

- ③ PEFC 触媒層の酸素，プロトン輸送性能の評価シミュレータの構築 (徳増 G)
今年度は主にミクロスケール解析の領域で研究を発展させ，より詳細な現象の理解を行うことができた．また，メゾスケールの計算との融合を測る上で必要な課題の抽出ができたため，十分に目標は達成されたと考えている．
- ④ 計算と実験の融合によるプラズマとナノ構造表面界面相互作用に関する研究 (寒川 G)
オンウェハモニタリング・ワイヤレス測定システムの実証を行った．また，オンウェハモニタリングを用いたエッチング形状予測についても，進めることができた．

4. まとめと今後の課題

- ① サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する研究(石本 G)
高圧微粒化噴霧燃焼に関する計算手法をさらに高精度化することにより高圧微粒化噴霧燃焼特性の定量予測と輸送機用新型直噴応用機器の創成が進展するものと考えられる．また，ウルトラクリーンナノデバイス洗浄システムの実用化には，マイクロ固体窒素粒子の有するレジストはく離メカニズムに関するシミュレーション科学的検討を行う必要があることが判明した．すなわち固体窒素粒子界面の有する高機能性に対し流体力学的アプローチと熱力学的アプローチの両面から成る検討を行い，粒子界面と洗浄対象物間の相互作用を解明する必要がある．
- ② 高導電性液体を用いた同軸二重円筒型発電装置の開発と性能評価(高奈 G)
電磁相互作用によるローレンツ力を活用した軸回転トルク制御機構を有する同軸二重円筒型発電装置を開発し，実験により軸回転数および外部負荷抵抗値に対する発電特性，トルク特性等の基礎特性を明らかにした．今後は本装置を風力発電装置に接続し，風車の回転数制御特性を明らかにすることにより，本装置の実用化に向けた更なる研究展開を目指す．
- ③ PEFC 触媒層の酸素，プロトン輸送性能の評価シミュレータの構築 (徳増 G)
今後はこのミクロスケールの解析で得られた知見をモデル化し，メゾスケールのシミュレータに組み込む予定である．そのシミュレータを用いて，大規模かつマルチスケールの触媒層内プロトン・酸素輸送現象を解析する予定である．
- ④ 計算と実験の融合によるプラズマとナノ構造表面界面相互作用に関する研究 (寒川 G)
オンウェハモニタリングを用いたプラズマの測定実験と計算とを融合し，プラズマエッチング形状・ダメージ分布予測システムを構築することができた．今後は，本システムの実用化を推進することが課題である．

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)

- *[1] Jun Ishimoto, U Oh, Tomoki Koike, and Naoya Ochiai: Cryogenic Single-Component Micro-Nano Solid Nitrogen Particle Production Using Laval Nozzle for Physical Resist Removal-Cleaning Process, *ECS Transactions*, Vol. 58, No. 6, (2013), pp. 231-239, doi:10.1149/05806.0231ecst.
- [2] Naoya Ochiai and Jun Ishimoto: Numerical Study of Single Bubble Dynamics in Megasonic Field for New Physical Cleaning Method, *ECS Transactions*, Vol. 58, Issue 6, (2013), pp. 77-85, doi: 10.1149/05806.0077ecst.
- [3] Jun Ishimoto, U. Oh, Tomoki Koike and Naoya Ochiai: Photoresist Removal-Cleaning Technology Using Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Spray, *ECS Journal of Solid State Science and Technology (JSS Focus Issue on Semiconductor Surface Cleaning and Conditioning)*, Vol. 3, No. 1, (2014), pp. N3046-N3053, doi:10.1149/2.009401jss.

- [4] Naoya Ochiai and Jun Ishimoto: Numerical Analysis of Single Bubble Behavior in a Megasonic Field by Non-Spherical Eulerian Simulation, *ECS Journal of Solid State Science and Technology (JSS Focus Issue on Semiconductor Surface Cleaning and Conditioning)*, Vol. 3, No. 1, (2014), pp. N3112-N3117, doi: 10.1149/2.020401jss.
- [5] Jun Ishimoto, U Oh, Zhao Guanghan, Tomoki Koike and Naoya Ochiai: Ultra-High Heat Flux Cooling Characteristics of Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Particles and Its Application to Semiconductor Wafer Cleaning Technology, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 59, (2014), pp. 1099-1106, doi: 10.1063/1.4860828.
- [6] 山本洋佑, 石本淳, 落合直哉: 粒子法を用いた雪の特性モデリングと挙動シミュレーション, 混相流研究の進展, (2014), in press.
- *[7] 日本機械学会流体工学部門 ニュースレター「流れ」, 2014年1月号, 風力エネルギー高度利用のための同軸型電磁エネルギー変換装置の開発と性能評価, (2014).
- [8] 馬淵拓哉, 徳増崇, 高分子電解質膜ナノ構造内におけるプロトン・水分子輸送特性の分子論的解析, 日本機械学会論文集(B編), (2013), 79(807): 2446-2455 (10 page).
- [9] T. Mabuchi and T. Tokumasu: A Revised EVB Model for Proton Transport in Hydrated Nafion Membrane, *ECS Transactions*, (2013), Vol. 58, No. 1, pp. 261-269.
- [10] Y. Sugaya and T. Tokumasu: Molecular Dynamics Study of Oxygen Permeation of Ionomer of Hydrocarbon, *ECS Transactions*, (2013), Vol. 58, No. 1, pp. 1165-1174.
- *[11] Tomohiro Kubota, Hiroto Ohtake, Ryosuke Araki, Yuuki Yanagisawa, Takuya Iwasaki, Kohei Ono, Kazuhiro Miwa, and Seiji Samukawa: Prediction of etching-shape anomaly due to distortion of ion sheath around a large-scale three-dimensional structure by means of on-wafer monitoring technique and computer simulation, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 46, (2013), pp. 415203 (7 page).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [12] U Oh, Jun Ishimoto and Jin-Goo Park: Physical Nano-Device Cleaning Technology Using Thermomechanical Effect of Cryogenic Solid Nitrogen, *2013 ELyT Laboratory Workshop in Zao To-o-gatta, Zao To-o-gatta*, (2013).
- [13] Jun Ishimoto, U Oh, Zhao Guanghan, Tomoki Koike and Naoya Ochiai, Ultra-High Heat Flux Cooling Characteristics of Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Particles and Its Application to Semiconductor Wafer Cleaning Technology, *Cryogenic Engineering Conference and the International Cryogenic Materials Conference (CEC-ICMC)*, Alaska, (2013).
- [14] Jun Ishimoto: Multiphase High Density Hydrogen Energy and its Risk Assessment, *International Symposium on Innovative Energy Research*, Sendai, (2013). (Invited).
- [15] Jun Ishimoto: Multiphase high density hydrogen energy and its risk mitigation, safety problems, *KTH International Workshop on Flow Dynamics related to Energy, Aerospace and Material Processing*, KTH, Stockholm, (2013).
- [16] Jun Ishimoto, U Oh, Tomoki Koike, and Naoya Ochiai: Cryogenic Single-Component Micro-Nano Solid Nitrogen Particle Production Using Laval Nozzle for Physical Resist Removal-Cleaning Process, *224th ECS Meeting*, San Francisco, (2013).
- [17] Jun Ishimoto, Guanghao Wu, and Kazuo Matsuura: Numerical Study of High-Speed Condensable Vapor Flow with LDI Erosion, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 132-133.

- *[18] Jun Ishimoto, Kaoru Maruta and Takehiko Sato: Frontier Science of Next Generation Reactive Fluid, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 136-137.
- [19] Jun Ishimoto, Naoya Ochiai, and Kozo Saito: Ultra-High Heat Flux Cooling Characteristics of Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Particles, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 134-135.
- [20] Kazuo Matsuura, Masami Nakano and Jun Ishimoto: Researches on a Sensing-Based Dynamic Forced Ventilation Control of Leaking Hydrogen, *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2013), pp. 42-43.
- [21] 山本洋佑, 石本 淳, 落合直哉: 粒子法を用いた雪の特性モデリングと挙動シミュレーション, 混相流学会年会講演会 2013, オーガナイズドセッション (OS-6 サステナブル異分野融合型混相流), 長野, (2013).
- *[22] 谷田 彬, 高奈秀匡: 風力エネルギー高度利用のための同軸型エネルギー変換装置の開発と性能評価, 日本機械学会第 91 期流体工学部門講演会, (2013), (2 page) .
- [23] Tomohiro Kubota and Seiji Samukawa: On-wafer monitoring technique for highly efficient fabrication process of nano energy devices, *10th International Conference on Flow Dynamics*, OS9-9, Sendai, (2013), p. 538, (invited).
- [24] Tomohiro Kubota and Seiji Samukawa: Feature Profile Evolution in Plasma Processing using On-wafer Monitoring System, *8th International Conference on Reactive Plasmas and 31st Symposium on Plasma Processing*, 5B-PM-I1, Fukuoka, (2014), (invited).
- [25] Tomohiro Kubota, Michio Sato, Takuya Iwasaki, Kohei Ono, and Seiji Samukawa: Feature profile evolution in plasma processing using on-wafer monitoring system, *AVS 60th International Symposium & Exhibition*, PS-ThM12, Long Beach, (2013), p. 213.
- [26] 久保田智広, 佐藤充男, 岩崎拓也, 小野耕平, 寒川誠二: オンウェハモニタリングによるプラズマエッチング形状予測, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-C2-2, 京田辺, (2013).
- [27] 久保田智広, 佐藤充男, 岩崎拓也, 小野耕平, 寒川誠二: オンウェハモニタリングによるプラズマエッチング形状異常予測, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 19p-F6-13, 相模原, (2014).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許)

モニタリング方法, プラズマモニタリング方法, モニタリングシステム及びプラズマモニタリングシステム, 辰巳 知彦・寒川 誠二, 2013.9.12, 出願.

(受賞)

優秀講演表彰, 風力エネルギー高度利用のための同軸型エネルギー変換装置の開発と性能評価, 谷田 彬, 2013 年 11 月 9 日, 日本機械学会流体工学部門

(マスコミ発表)

なし

