



東北大学

**平成 24 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 2012  
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 24 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、86 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 25 年 10 月

東北大学流体科学研究所長  
早瀬 敏幸



# 目 次

1. 平成 24 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	2
1.5 公募共同研究実施状況	3
1.6 研究成果の発表件数	4
1.7 外部評価の実施	5
2. 研究成果報告書	
＜一般公募共同研究＞	
J12001 高温予混合火炎の不安定性 門脇 敏 (長岡技術科学大学)、小林 秀昭 (東北大学)	7
J12002 境界層能動制御組込み翼による翼の高揚力化 長谷川 裕晃 (秋田大学)、大林 茂 (東北大学)	9
J12003 シャトルコックの空力特性とインパクト時の動的挙動 長谷川 裕晃 (秋田大学)、大林 茂 (東北大学)	11
J12004 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 斎木 敏治 (慶應義塾大学)、寒川 誠二 (東北大学)	13
J12005 磁石-磁性流体系における複雑界面流動の交流磁場特性 須藤 誠一 (秋田県立大学)、西山 秀哉 (東北大学)	15
J12006 Investigation of a Novel Magnetorheological Shear Thickening Fluid Weihua Li (University of Wollongong)、中野 政身 (東北大学)	17
J12007 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 和田 一実 (東京大学)、寒川 誠二 (東北大学)	19
J12008 The Mechanism and the Control of the Unsteady Three-Dimensional Wake Structure of Road Vehicle Chenguang Lai (Chongqing University of Technology)、大林 茂 (東北大学)	21
J12009 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 田中 克史 (京都工芸繊維大学)、中野 政身 (東北大学)	23
J12010 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 遠藤 和彦 (産業技術総合研究所)、寒川 誠二 (東北大学)	25
J12011 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 喜多 隆 (神戸大学)、寒川 誠二 (東北大学)	27
J12012 トップダウンとボトムアップの融合による量子ナノ構造作製プロセスのブレークスルーと 新たなデバイスへの展開 喜多 隆 (神戸大学)、寒川 誠二 (東北大学)	29
J12013 サイレント超音速機の超音速飛行特性に関する研究 大林 茂 (東北大学)、佐宗 章弘 (名古屋大学)	31
J12014 生体軟組織内の石灰化検出に関する研究 小笠原 正文 (GE ヘルスケア・ジャパン)、船本 健一 (東北大学)	33
J12015 翼端渦の大規模変形が崩壊過程へ及ぼす影響について 高橋 直也 (東京電機大学)、服部 裕司 (東北大学)	35
J12016 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 酒井 康彦 (名古屋大学)、早瀬 敏幸 (東北大学)	37
J12017 ナノディスクアレイ構造を用いた知能情報処理回路 森江 隆 (九州工業大学)、寒川 誠二 (東北大学)	39

J12018	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……………	41
	石本 淳 (東北大学)、Kozo Saito (University of Kentucky)	
J12019	反応性混相流の活用によるナノデバイスクリーニング……………	43
	石本 淳 (東北大学)、Jin-Goo Park (Hanyang University)	
J12020	反応性混相流の活用による新エネルギー創成……………	45
	石本 淳 (東北大学)、Jin-Goo Park (Hanyang University)	
J12021	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……………	47
	足立 高弘 (秋田大学)、岡島 淳之介 (東北大学)	
J12022	災害地探査のための高機動性垂直離着陸機の開発……………	49
	大林 茂 (東北大学)、高橋 俊 (東京農工大学)	
J12023	流体力学的効果によるCG動画像のリアリティ向上……………	51
	石原 卓 (名古屋大学)、服部 裕司 (東北大学)	
J12024	ナノドットを用いた単電子トンネルデバイスの高周波応答特性……………	53
	高橋 庸夫 (北海道大学大学院)、寒川 誠二 (東北大学)	
J12025	Designing of Microfluidic Device to Temporally and Spatially Control Oxygen Tension for Cellular Experiment ……………	55
	船本 健一 (東北大学)、Roger D. Kamm (Massachusetts Institute of Technology)	
J12026	胎仔脳出血メカニズムの流体力学的解析……………	57
	船本 健一 (東北大学)、伊藤 拓哉 (東北大学)	
J12027	コロイド磁気粘性流体の粒子構造形成と磁気粘性効果……………	59
	阿部 浩也 (大阪大学)、中野 政身 (東北大学)	
J12028	Non-Destructive Detection of Cracks Using Electromagnetic Phenomena ……………	61
	Jinhao Qiu (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics)、高木 敏行 (東北大学)	
J12029	ニュートラルビーム改質チャネル層電界効果型トランジスタへの新規開発アプタマーによるバイオ分子選択固定高感度バイオセンサー……………	63
	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)	
J12030	中性粒子ビーム酸化膜を用いた超高速歪み Ge チャネルデバイス開発 ……………	65
	澤野 憲太郎 (東京都市大学)、寒川 誠二 (東北大学)	
J12031	Parallel Computations on the Base of GPU for Modeling of Gas Combustion Processes ……………	67
	Roman Fursenko (Siberian Branch of Russian Academy of Sciences)、丸田 薫 (東北大学)	
J12032	Investigations of Sporadic Regimes of Gas Combustion ……………	69
	Sergey Minaev (Siberian Branch of Russian Academy of Sciences)、丸田 薫 (東北大学)	
J12033	Visualization, “Real Time” Algorithms and Parallel Computations of Reacting Flows ……………	71
	Boris Mazurok (Siberian Branch of Russian Academy of Sciences)、丸田 薫 (東北大学)	
J12034	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……………	73
	宮田 一司 (東北大学)、森 英夫 (九州大学)	
J12035	Investigation of Shock Waves Propagation on Microscales……………	75
	Mikhail Ivanov (Siberian Branch of Russian Academy of Sciences)、丸田 薫 (東北大学)	
J12036	実用的な船舶設計技術の開発……………	77
	鄭 信圭 (東北大学)、Hyunyu Kim (George Mason University)	
J12037	Development of High Reliability Numerical Simulation Code for Next Generation Low Noise Rotor Design ……………	79
	鄭 信圭 (東北大学)、Kwanjung Yee (Pusan University)	
J12038	プラズマ流による気泡生成機構に関する研究……………	81
	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)	
J12039	New Exact Solutions for Vortex Rings with Swirl and Magnetic Field ……………	83
	Stefan G. Llewellyn Smith (University of California, San Diego)、服部 裕司 (東北大学)	
J12040	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……………	85
	大平 勝秀 (東北大学)、小林 弘明 (宇宙航空研究開発機構)	

J12041	大気環境におけるふく射エネルギー評価とその解析……………	87
	圓山 重直 (東北大学)、山田 昇 (長岡技術科学大学)	
J12042	ふく射特性制御膜の計測に関する研究……………	89
	圓山 重直 (東北大学)、Rodolphe Vaillon (INSA de Lyon)	
J12043	複雑媒体における複合伝熱解析……………	91
	圓山 重直 (東北大学)、Mishra Subhash Chandra (Indian Institute of Technology)	
J12044	ふく射要素法を用いた生体内光伝播と伝熱現象に関する研究……………	93
	圓山 重直 (東北大学)、櫻井 篤 (新潟大学)	
J12045	2次元円形チャンネル内に形成される火炎面不安定の非線形ダイナミクス……………	95
	後藤田 浩 (立命館大学)、丸田 薫 (東北大学)	
J12046	Background-Oriented Schlieren 法を用いた超音速飛しょう体の大視野可視化法の研究……………	97
	水書 稔治 (東海大学)、大林 茂 (東北大学)	
J12047	レーザ誘起熱音響波を利用した超音速非定常気流の温度計測法の開発……………	99
	水書 稔治 (東海大学)、大林 茂 (東北大学)	
J12048	ホールトーン現象の低減化制御に関する研究……………	101
	中野 政身 (東北大学)、松浦 一雄 (愛媛大学)	
J12049	磁気刺激による生体アクチュエーションに関する研究……………	103
	森 仁 (株式会社 I F G)、高木 敏行 (東北大学)	
J12050	Numerical Studies of Rarefied Chemically Reacting Flows about Space Vehicles……………	105
	Mikhail Ivanov (Siberian Branch of Russian Academy of Sciences)、米村 茂 (東北大学)	
J12051	MR 計測融合シミュレーションによる脳動脈瘤破裂予測……………	107
	杉山 慎一郎 (広南病院)、船本 健一 (東北大学)	
J12052	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……………	109
	杉山 慎一郎 (広南病院)、太田 信 (東北大学)	
J12053	Development of a Micro-Motor for MEMS Utilizing Smart Polymer Fabricated by Photolithography……………	111
	中野 政身 (東北大学)、Miklós Zrínyi (Semmelweis University)	
J12054	Metal-Containing DLC: Toward a Smart Coating……………	113
	Julien Fontaine (Ecole Centrale de Lyon)、高木 敏行 (東北大学)	
J12055	大気圧プラズマ流によるウイルスの不活化特性……………	115
	佐藤 岳彦 (東北大学)、押谷 仁 (東北大学)	
J12056	ナノ構造化表面・液体間の熱抵抗……………	117
	小原 拓 (東北大学)、芝原 正彦 (大阪大学)	
J12057	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……………	119
	福島 修一郎 (大阪大学)、船本 健一 (東北大学)	
J12058	常温圧縮せん断法を用いた Ti/Al 複合材料の固化成形……………	121
	中山 昇 (信州大学)、高木 敏行 (東北大学)	
J12059	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……………	123
	新井山 一樹 (金沢工業大学)、伊賀 由佳 (東北大学)	
J12060	渦構造の安定性に対する軸流効果の研究……………	125
	服部 裕司 (東北大学)、福本 康秀 (九州大学)	
J12061	摩擦試験機スライダの接触アライメント機構の研究……………	127
	後藤 実 (宇部工業高等専門学校)、高木 敏行 (東北大学)	
J12062	Entropy Flow in Magnetically Ordered Heusler Alloys under Influence of Temperature or Magnetic Field……………	129
	Vladimir Khovaylo (National University of Science and Technology "MISiS")、高木 敏行 (東北大学)	
J12063	Investigation of Subsonic-Supersonic Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc with Inhomogeneous Mixing of Plasma Species……………	131
	Jiří Jeništa (Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i.)、西山 秀哉 (東北大学)	

J12064	閉空間キャビティ内自然対流の不安定性解析……………	133
	小宮 敦樹 (東北大学)、Daniel Henry (Ecole Centorale de Lyon)	
J12065	珪藻の二酸化炭素吸収過程におけるマイクロチャンネル内物質輸送……………	135
	小宮 敦樹 (東北大学)、Gary Rosengarten (RMIT University)	
J12066	Blast wave / 衝撃波による脳損傷機序解明 ……………	137
	中川 敦寛 (東北大学病院)、早瀬 敏幸 (東北大学)	
J12067	Integrated Analysis by Kinetic Model and Fluid Model for Innovative Plasma Applications ……	139
	He-Ping Li (Tsinghua University)、高奈 秀匡 (東北大学)	
J12068	次世代高温センサ研究会……………	141
	高木 敏行 (東北大学)、宍戸 郁郎 ((株) インテリジェント・コスモス研究機構)	
J12069	力天秤の開発とその静粛性超音速航空機への適用……………	143
	川添 博光 (鳥取大学)、大林 茂 (東北大学)	
J12070	衝撃波前方の電子が後方の熱化学過程に及ぼす影響……………	145
	川添 博光 (鳥取大学)、大林 茂 (東北大学)	
J12071	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……………	147
	浜口 智志 (大阪大学)、寒川 誠二 (東北大学)	
J12072	バイオフィルム産生菌に対するプラズマ殺菌に関する研究……………	149
	藤村 茂 (東北大学)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J12073	Analysis of Plasma Flow at Gas-Liquid Interface for Biological Interaction ……………	151
	佐藤 岳彦 (東北大学)、Gregor E. Morfill (Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics)	
J12074	Cavity Formation Mechanism in a Cavitation Process ……………	153
	佐藤 岳彦 (東北大学)、Mohamed Farhat (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL))	
J12075	水中におけるプラズマ熱流動機構……………	155
	佐藤 岳彦 (東北大学)、金澤 誠司 (大分大学)	
J12076	Development of New Energetic Materials Using Design Exploration ……………	157
	鄭 信圭 (東北大学)、Fumiya Togashi (SAIC)	
J12077	Improvement of Numerical Scheme and Theory for Kinetic Force Method ……………	159
	Vladimir Saveliev (National Center of Space Researches and Technologies)、米村 茂 (東北大学)	
J12078	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……………	161
	徳増 崇 (東北大学)、坪井 伸幸 (九州工業大学)	
J12079	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……………	163
	徳増 崇 (東北大学)、杵淵 郁也 (東京大学)	
J12080	Momentum Transport Phenomena in a Liquid Bridge under Shear……………	165
	徳増 崇 (東北大学)、Philippe Vergne (INSA de Lyon)	
J12081	Optimization of Stent Design Based on Blood Flow Analysis Using LBM Method ……………	167
	太田 信 (東北大学)、Bastien Chopard (Geneva University)	
J12082	Development of Biomodel for Blood Cell……………	169
	太田 信 (東北大学)、Liviu Movileanu (Syracuse University)	
J12083	Research of Friction and Drilling on Bio-Composite Model……………	171
	太田 信 (東北大学)、Philippe Kapsa (Ecole Centorale de Lyon)	
J12084	Reconstruction of Wall Thinning from Pulsed ECT Signals ……………	173
	Zhenmao Chen (Xi'an Jiaotong University)、高木 敏行 (東北大学)	
J12085	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 ……	175
	山口 克彦 (福島大学)、高木 敏行 (東北大学)	
＜分野横断型公募共同研究プロジェクト＞		
J12B01	次世代反応流体科学の創成……………	177
	石本 淳 (東北大学)	
3. 主な発表論文の別刷	……………	201



## 1. 平成 24 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いる。

平成 24 年度の公募共同研究は、平成 24 年 4 月 1 日から平成 25 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 23 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 24 年 9 月に公募共同研究成果報告会、11 月に、運営委員会、共同研究委員会、が開催された。また、平成 24 年 12 月には流体科学研究所第 4 回外部評価が実施され、拠点活動について評価と助言を受けた。

### 1.2 公募共同研究成果報告会

平成 24 年 9 月 20 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/TFI-2012 においてホテルメトロポリタン仙台にて開催した。本報告会では 80 件（分野横断プロジェクト 1 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、91 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

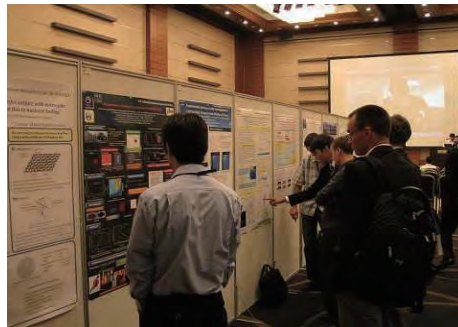


写真 2：ポスターセッションの様子

### 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
公募共同研究成果の登録数	16	32	42	47
登録済みデータ総数	458	478	488	493
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

### 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 24 年 10 月に、平成 23 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 には分野横断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
申請数 (件)		52	64	77	85
採択数 (件)		52	63*	77	85
国内・国際	国内	32	35	47	51
	国際	20	28	30	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)
	エネルギー	16 (8/8)	14 (5/9)	18 (6/12)	20 (7/13)
	ライフ サイエンス	7 (5/2)	13 (8/5)	13 (9/4)	14 (8/6)
	ナノ・ マイクロ	17 (10/7)	17 (10/7)	23 (17/6)	24 (17/7)
	基盤	5 (4/1)	12 (7/5)	13 (8/5)	15 (10/5)
採択率 (%)		100	98	100	100
採択率 (金額) (%)		26~100	77~95	59~97	49~83
申請金額 (千円) : a		20,177	29,303	35,405	38,895
採択金額 (千円) : b		16,639	24,637	25,657	25,550
平均採択率 (金額) (%) : b/a		82	84	72	66
平均採択金額 (千円)		320	391	333	301

\*所内対応教員転出のため取り下げ

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
申請数 (件)	1	1	1
採択数 (件)	1	1	1
採択率 (%)	100	100	100
申請金額 (千円) : a	7,000	5,000	5,000
採択金額 (千円) : b	7,000	4,650	3,445
採択率 (金額) (%) : b/a	100	93	69
一件あたりの採択金額 (千円)	7,000	4,650	3,445

## 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4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4：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
国内	165	210	262	350
国外	254	384	285	340
合計 (延べ人日)	419	594	547	690

## 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5に示す。

表5：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
物件費（千円）	8,136	22,343	22,837	18,739
旅費（千円）	7,415	11,978	11,484	13,866
合計（千円）	15,551	34,321	34,321	32,605

## 1.6 研究成果の発表件数

研究成果の発表件数を表6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6：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
学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）	51	84	88	88
国際会議、国内会議、研究会、口頭発表等	152	198	291	304
その他（特許・受賞・マスコミ発表等）	5	19	11	22
合計（件）	208	301	390	414

## 1.7 外部評価の実施

平成 24 年 12 月 3 日に流体科学研究所第 4 回外部評価委員会（以下、「委員会」と記す。）が開催され、この一環として、拠点活動についても評価を実施した。

委員会は小林敏雄自動車研究所長を委員長とし、国内委員 4 名、海外委員 3 名からなる。外部評価は、共同研究の形態、公募情報の通知・採択方法、採択件数等の推移、研究成果の発表件数、成果報告会の開催・データベース・ホームページによる情報発信、アンケート調査結果、今後の展開について行われ、拠点の国内および国際的な活動、研究成果、運営等が高く評価されると共に、拠点としての今後の役割に期待が寄せられた。

委員会のコメントをまとめると次の通りである。

### これまでの活動について

- ・流体科学研究拠点としての国内および国際的な活動が、積極的に行われ、多くの成果があがるとともに、それらの情報発信が組織的に計画され行われていることは極めて高く評価できる。
- ・国内および国際共同研究を公募形式で行い、それを通して流体科学に関する分野を広めていく手法は適切である。
- ・公募共同研究は共同研究の呼び水として少額ではあるが、新分野開拓の端緒および本格的共同研究の端緒を開くという点での役割に焦点を当てた運営は適当と思われ、また、基盤的な経費を提供することは有効であると思われる。
- ・分野横断型公募共同研究の試みも異分野融合型次世代反応流体科学の学理創成の試みとして評価される。

### 今後の活動への期待

- ・枠組みを超えて、流体科学の推進という大きな視点で拠点事業を考えることを期待したい。
- ・「拠点」は日本全体の分野の中核となる意識が必要であろう。予算の制限があるのが現状であるが、新たな国の施策を生み出す位の意気込みで、そのために何を推進すべきかを今一度議論して欲しい。
- ・このような低額な研究経費では旅費の捻出や予備実験も難しいと思われるので、適切な研究費の措置について議論して欲しい。
- ・(分野横断プロジェクトに関して) 平成 22 年度から実施されており、まだ、展開が始まったばかりであるが、新たな分野の構築、新たな学理の創成に結び付くことを支援する方策を立てる必要がある。

なお、評価結果をまとめた流体科学研究所第 4 回外部評価報告書は流体科学研究所ホームページに公開されている。<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/gaibuhyoka.html>



## 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	J12001
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4 ~2013.3
継続年数	3年目

**高温予混合火炎の不安定性**  
**Instability of High-Temperature 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**

省エネルギーや低環境負荷の観点から、高温予混合火炎が注目されている。高温予混合火炎の挙動を制御するためには、不安定性に関する知識が不可欠である。しかし、これまでの数値解析では、高温予混合火炎の不安定性のメカニズムは解明されていない。本研究では、高温予混合火炎の不安定性に及ぼす未燃ガス温度の影響を調べ、その基本的な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**

昨年度までの二次元流れの計算結果を踏まえ、今年度は三次元流れを取り扱っている。図1は、二次元流れ2Dと三次元流れ3Dにおける分散関係（レイス数  $Le = 1.0$ , 未燃ガス温度  $T_u = 1.0, 2.0, 3.0$ ）を示したものである。未燃ガス温度が高くなると、増幅率 $\omega$ は増大する。これは、平面火炎の燃焼速度が増加するからである。また、二次元流れと三次元流れにおける分散関係は一致している。図2は標準化した分散関係を示したものである。未燃ガス温度が高くなると、標準化した増幅率 $\omega^*$ は減少する。これは、火炎温度一定条件下で未燃ガス温度が高くなり、熱膨張の効果が弱くなるからである。

図3は、セル状火炎の燃焼速度  $S_{cf}$  の未燃ガス温度依存性を示したものである。未燃ガス温度が高くなると共に、セル状火炎の燃焼速度は増加する。そして、三次元流れの方が大きくなっている。図4は、標準化したセル状火炎の燃焼速度  $S_{cf}/S_u$  である。未燃ガス温度が高くなると共に単調に小さくなる。これは、火炎の不安定性における熱膨張の効果が弱くなるからである。

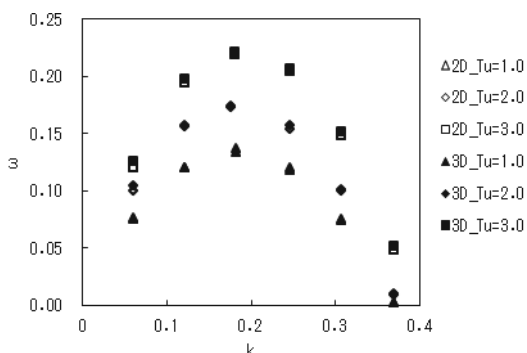


図1：分散関係 ( $Le = 1.0$ )

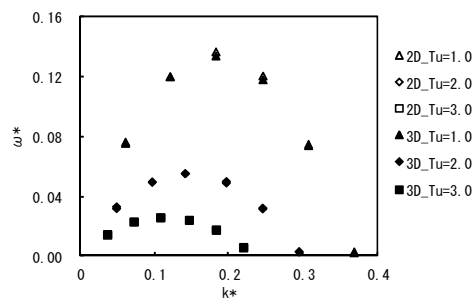


図2：標準化した分散関係

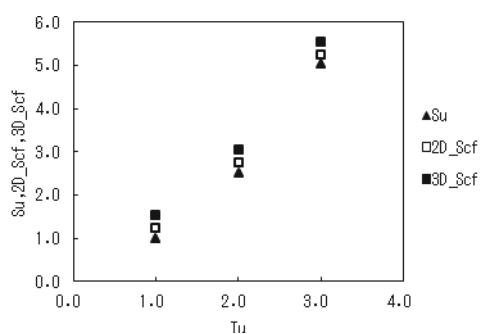


図3：セル状火炎の燃焼速度

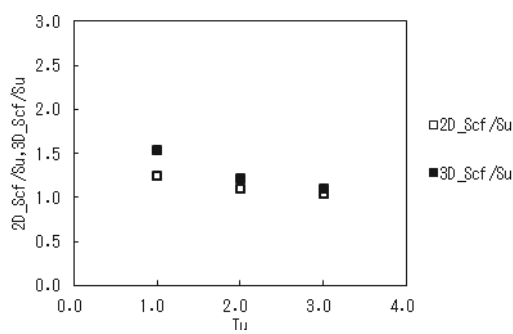


図4：標準化したセル状火炎の燃焼速度

### 3. 研究目標の達成状況

今年度は三次元流れを取扱い、前年度までの二次元流れの結果と比較し、その差異について検討した。そして、三次元の高温予混合火炎の特性を精査した。昨年度、一昨年度の研究成果を含め、本研究により、高温予混合火炎の不安定性に及ぼす未燃ガス温度の影響、並びにその基本的なメカニズムが明らかになった。これらのことから、高温予混合火炎の不安定性に着目した本研究は、十分な成果を得ていると考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

高温予混合火炎の不安定性に及ぼす未燃ガス温度の影響は、予混合燃焼研究において大きなインパクトがある。特に三次元反応流れの計算結果は、重要な知見を含んでいる。今後は、本研究で得られた結果をベースとして、予混合燃焼のモデリングに資することができるか否かを検討する予定である。

### 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] Kadowaki, S., Aoki, Y., Yamazaki, W., and Kobayashi, H.: Instability of high-temperature premixed flames, *Proceedings of the 9th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2013), accepted.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[2] Kadowaki, S. and Kobayashi, H.: Formation of cellular fronts in high-temperature premixed flames, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 46-47.
- [3] 青木佑丞, 山崎渉, 小林秀昭, 門脇敏: 「高温予混合火炎の数値解析: 固有不安定性による三次元セル状火炎の形成」, 第50回燃焼シンポジウム講演論文集, (2012), pp. 146-147.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

- (特許) なし  
 (受賞) なし  
 (マスコミ発表) なし

課題番号	J12002
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	2012.4~2013.3
継続年数	1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)は、生成した縦渦により主流を境界層の強制混合を行いはく離の防止に効果がある。しかし、流れ場の状態を考慮し、時間的に変動する流れ場に適合した制御システムとして、翼に組み込まれた例はない。そこで、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、本研究室で以前に実施していた研究の成果を活用し、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構築し、翼の境界層制御への適用を試みる。

**2. 研究成果の内容**

本研究では制御機能の翼における制御効果を調べるために、境界層制御機構を組み込んだ翼型を風洞内に設置し、空力特性の測定を行った。制御の際の重要なパラメータとして、主流速  $U_0$  と吹出すジェット流速  $V_j$  との速度比  $VR(=V_j/U_0)$  を定義する。図 1(a), (b) に  $Re=1.5 \times 10^5$  の場合における各迎角での VGJs による制御時( $VR=2.0$ )と非制御時での揚力係数  $C_L$  と抗力係数  $C_D$  の結果を示す。レイノルズ数  $Re$  は翼弦長である 200 mm を代表長さとして定義し

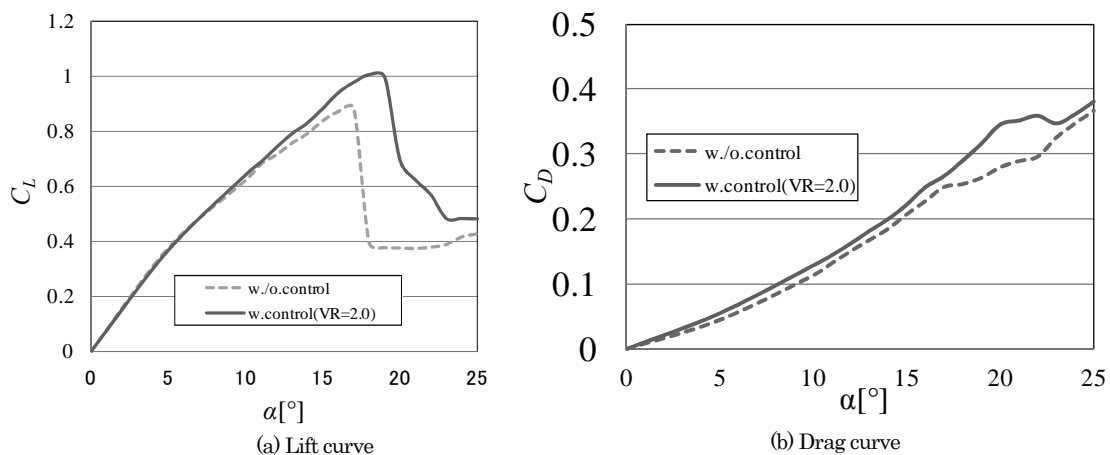


Fig.1 Aerodynamic performance of the NACA0012 airfoil with VGJs at  $Re=1.5 \times 10^5$

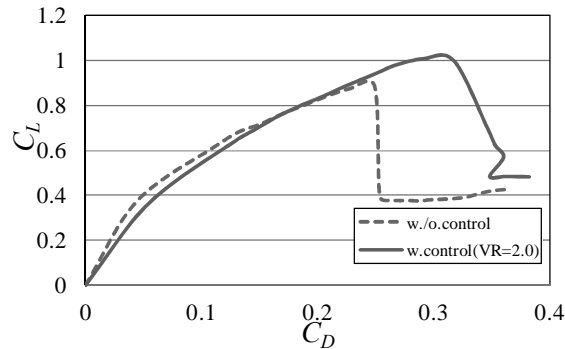


Fig.2 Lift/drag ratio curve of the NACA0012 airfoil with VGJs at  $Re=1.5 \times 10^5$

た. 制御がない場合では  $\alpha=18^\circ$  で  $C_L$  の急激な低下との増加が生じた. また, タフトによる可視化を併用したところ  $\alpha=18^\circ$  で翼面に沿ったタフトのなびきが確認できなくなった. そのため,  $\alpha=17^\circ$  を失速角とした.  $VR=2.0$  で制御を行った場合では, 失速角は  $\alpha=18^\circ$  まで後退した. また制御なしでの最大揚力係数  $C_{Lmax}$  は 0.88 に対し,  $VR=2.0$  の場合では 1.00 となった. これより, 制御を行うことで失速角の後退と最大揚力係数の増大が確認できた. そこで各迎角の抗力と揚力の値をプロットした極曲線を図 2 に示す. 失速角付近で非制御時に比べ制御時は抗力に対する揚力の割合が増加していることから翼性能が向上していることがわかった.

### 3. 研究目標の達成状況

今回, 制御装置を組込んだ翼型を製作し, VGJs を用いて制御を実施することで, レイノルズ数  $Re = 1.5 \times 10^5$  (10 m/s) から  $7.5 \times 10^5$  (50 m/s) の範囲で失速角の後退と最大揚力係数の増加, 失速を抑制できることがわかった. こうして, 制御装置を組込んだ失速制御が可能な翼型の製作に成功した. また, 流れ場の状態をフィードバックする前段階として, オープンループで制御に有効なパラメータの確認を実施した.

### 4. まとめと今後の課題

製作した翼型に VGJs を用いて制御を行うことで, はく離を抑制できることがわかった. また, はく離を抑制することで失速角の後退, 最大揚力係数が増加することがわかった. 今年度は流れ場の情報をフィードバックして, 制御装置を作動させるまでのシステムの構築ができなかったため, まず流れ場の状態を 2 点間の差圧データのみで判断できる制御関数を見つける.

### 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] Tetsuya Miyakoshi, Hiroaki Hasegawa, Syuko Ito, Shigeru Obayashi: Aerodynamic Performance of an Airfoil with VGJs for Lift Augmentation, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 22-23.

\*[2] 伊藤周行, 長谷川裕晃, 瀬尾和哉: 縦渦発生ジェットの翼剥離制御への応用, 2012 年度日本機械学会年次大会, 金沢大学, (2012).

[3] 木村孝文, 長谷川裕晃: シンセティックジェットによる NACA0012 翼の空力性能改善, 2012 年度日本機械学会東北支部第 43 回学生員卒業研究発表講演会, 一関工業高等専門学校, (2013).

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J12003
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	2012.4~2013.3
継続年数	3年目

**シャトルコックの空力特性とインパクト時の動的挙動**  
**Shuttlecock Aerodynamics and Dynamic Behavior at the Instant of Impact**

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科, \*\*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飛行時におけるシャトルコックの飛行メカニズムの解明を目的とする。シャトルコックはラケットに当たる瞬間に空力モーメントが働き、クルリと回転し方向転換する。特に興味深い点として、高速飛行時は羽根の開きが狭まり抵抗が小さくなり、飛行中に羽根が開いていくと共に急速に抵抗も増加するという特性を有している。シャトルコックの回転後の姿勢安定性や羽根の開き方の違いによる空力性能は不明なため、シャトルコックのダイナミクスを考慮した状態で飛行の空力的研究を実施する。

**2. 研究成果の内容**

本研究では、シャトルのスピンの回転、ピッチング回転が空力特性に及ぼす影響を明らかにするために、シャトルを風洞内に設置し実験を行った。図1に回転ありとなしのシャトルコックでの各迎角における揚力係数、抗力係数及びピッチングモーメント係数を示す。図1(a)(b)より、揚力、抗力曲線はスピンの回転の有無による大きな違いは見られない。しかし、図1(c)よりモーメント係数は回転あり、なしの差が生じている。この差は、迎角が大きくなるにつれ増加している。正のピッチングモーメントは、迎角を0°に戻す方向に働くことから、シャトルを水平にする力が働いている。この力は、回転しているシャトルの方が大きい。つまり、スピンの回転はシャトルの安定性に影響している。

実際に飛行しているシャトルコックを打球した際に、そのまま飛行しているのではなく、向きを変えながら飛んでいく。このようなシャトルコックのインパクトした直後の急激な迎角変化中の飛行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行安定性解明のアプローチとして、シャトル羽根部先端を切り落とした(tip cut type)シャトルを用意し、流体力特性の比較を行った。

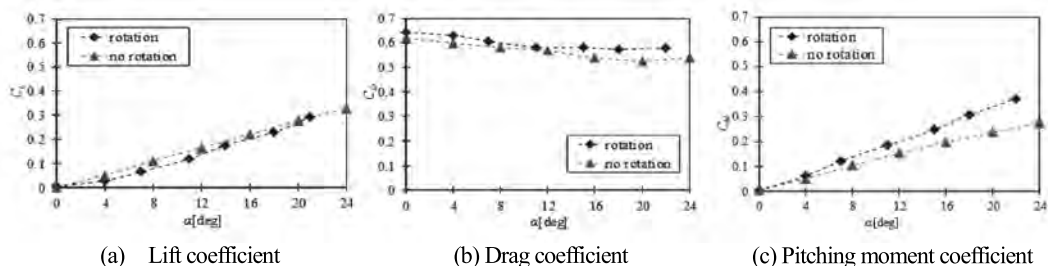


Fig. 1: Aerodynamic characteristics versus an angle of attack for the standard shuttlecock at  $Re=1.3 \times 10^5$

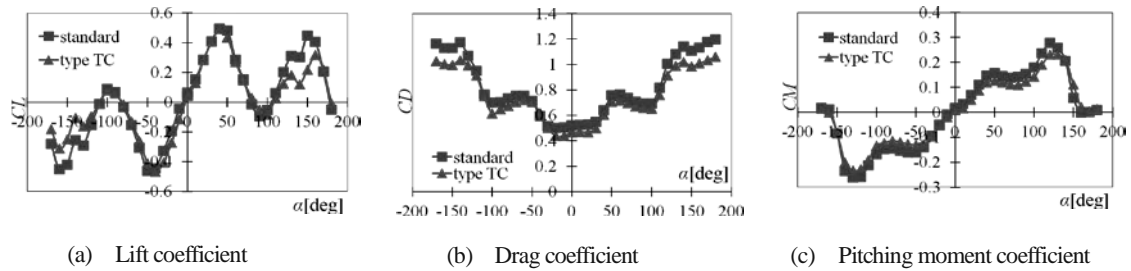


Fig.2: Aerodynamic characteristics versus an angle of attack for the synthetic shuttlecock.

図2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。揚力係数では、迎角が  $140^\circ$  付近で2種類のシャトルコックの値に差が見られ、同様に抗力係数も、迎角  $140^\circ$  付近で値に差が見られた。

### 3. 研究目標の達成状況

バドミントンの競技中においてシャトルコックに生じるユニークな動きとして、打撃直後にクルリと回転した後、安定飛翔し相手コートに飛び去っていく。これまではシャトルコックの飛翔特性におけるスピン回転の影響について調べた。また打撃直後に起こる動的なピッチング回転中の飛翔メカニズムを解明する為に迎え角が  $180^\circ$  から  $0^\circ$  までの定常流体力特性の測定を行った。以上の成果とこれまでの研究成果を鑑みると定常状態における飛翔メカニズムはほぼ解明できたといえる。しかし動的挙動中のシャトル周りの流れ場および作用する流体力特性は未だ解明されていない為、来年度は動的な挙動中の流体力流れ場に注目する必要性がある。

### 4. まとめと今後の課題

バドミントンの競技中に繰り出されるシャトルのスピン回転と向きの違いより流体力が変化することがわかった。定常流体力評価としての差は決して大きな違いではないがその差がゲーム中の多様性を生み出している。今後はPSP(Pressure Sensitive Paint)測定により、内部圧力の測定を行い、シャトルが有する独特な形状のどの構成要素が流体力に大きく影響しているのかを調べる。またクルリと回転し方向転換する動的挙動中のシャトルのダイナミクスについて解明していく。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

\*[1] K. Nakagawa, H. Hasegawa, M. Murakami, S. Obayashi: ISEA, *Conference of Procedia of The Engineering of Sport 9*, (2012), pp. 104-109.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[2] Kenichi Nakagawa, Hiroaki Hasegawa, Masahide Murakami, Shigeru Obayashi: High Aerodynamic Drag and Flow Behavior of a Badminton Shuttlecock with Spin at High Reynolds Numbers, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 24-25.

[3] 中川健一, 長谷川裕晃: バドミントンシャトルコックの羽付け根部隙間が減速特性に及ぼす影響, 日本流体力学会年会講演会, (2012), No. 241.

[4] 菊池緑生, 長谷川 裕晃, 村上正秀, 大林茂: シャトルコックのスピン回転が空力特性に及ぼす影響, 日本機械学会 スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J12004
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	2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された高密度規則配列量子ドット系は、レーザや太陽電池などへの応用が期待されている。このようなデバイス実現のためには、個々の量子ドットが3次元閉じ込めに固有の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、量子ドット間結合を調整するための新しい手法として、相変化マスクを用いた応力印加による量子準位制御法を実現することを目的とする。

## 2. 研究成果の内容

本研究で提案する方法の概念図を図1に示す。InAs/InP量子ドット上をカルコゲナイド相変化材料Ge<sub>10</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>13</sub>（以下GST）で覆い、さらにその上にSiO<sub>2</sub>層を成膜する。GSTは光ディスクや不揮発性メモリに使用される材料で、結晶相（c-gst）とアモルファス相（a-gst）間を可逆的に変化させることができる。アモルファス化時に約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（応力が下方に効果的に印加できるようSiO<sub>2</sub>層を成膜している）。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（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光を集光することにより、200-300 nmの領域を選択的に相変化させる。また、アモルファス相の吸収率は結晶相のそれよりもはるかに小さいので、局所的にアモルファス化された領域は光学的開口としても機能し（アモルファス領域のみ量子ドット試料に光が照射される）、高分解能分光が可能である。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う。

サブナノ秒のパルスレーザによる相変化にともなう量子ドットのPLスペクトル変化をまとめたものが図2である。左側には相変化材料の状態を模式的に描いている。アモルファス相→結晶相→アモルファス相という順番で段階的に相変化を行い、可逆的、段階的な変化が実現可能であることを確認した。

また、異なる量子ドットの量子準位の相対的なエネルギー関係を調整するためには、個々のドットを独立に制御することが必要である。図3ではアモルファス領域の異なる箇所をランダムに結晶化している。空間的に不均一な応力の発生が生じ、異なるドットを個別に制御できていることが確認された。

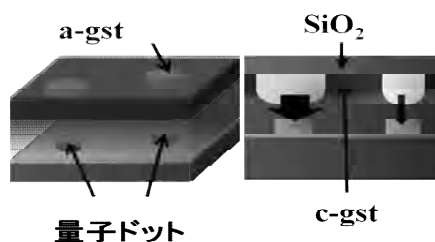


図1：相変化マスクによる量子ドット発光制御法の概念図

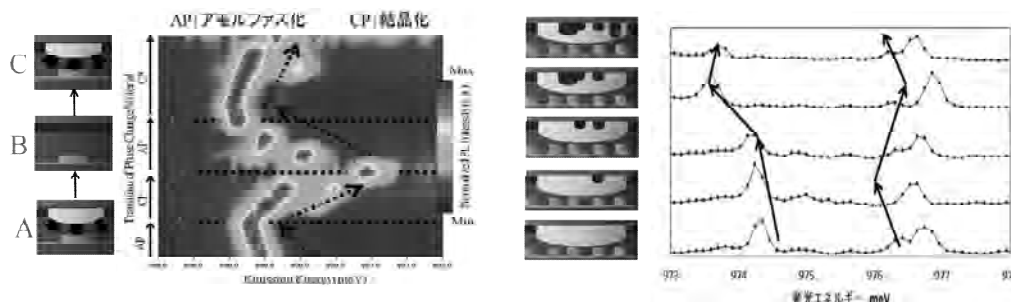


図2：相変化にともなうPLピークシフト 図3：不均一結晶化による個別ドット制御

### 3. 研究目標の達成状況

可逆的、段階的な発光エネルギーシフト、さらに個々のドットの個別発光制御まで実現でき、目標は概ね達成された。

### 4. まとめと今後の課題

量子ドット間の量子準位を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、可逆的、段階的な個別ドット発光制御を実証した。今後はさらに高密度な量子ドット試料へ適用し、個別制御性能の向上が必要である。また、対象とする材料の拡張も目指す。

### 5. 研究成果

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] M. Takahashi, Nurrul Syafawati Humam, N. Tsumori, T. Saiki, P. Regreny, and M. Gendry: Local control of emission energy of semiconductor quantum dots using volume expansion of a phase-change material, *Appl. Phys. Lett.*, 102, (2013), pp. 093120/1-3.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[2] Nurrul Syafawati Binti Humam, N. Tsumori, M. Takahashi, T. Saiki, and S. Samukawa: Possibility of Emission Energy Control of Individual Quantum Dots using Volume Expansion of Phase Change Material, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 104-105.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし



課題番号	J12005
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	3年目

**磁石—磁性流体系における複雑界面流動の交流磁場特性**  
**Alternating Field Characteristics of Complex Flow in Magnet-Ferrofluid System**

須藤 誠一\*†, 猪股 聡太\*, 篠崎 成大\*

高奈 秀匡\*\*, 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**

磁気特性の優れた永久磁石に磁性流体を吸着させた磁石—磁性流体系を創製し、その系に外部からわずかな強さの交流磁界を印加することによって発生する複雑な界面流動現象を、外部交流磁場の強さの振幅および周波数を変えて、制御するシステムを構築する。

**2. 研究成果の内容**

当該研究で提案する微小な磁石と磁性流体を用いる外部磁場による非接触エネルギー供給システム全体のサイズを、小さなコイルを作成してマイクロ化した。そのシステムの寸法を図1に示す。一定太さ部分が、直径0.5mmの針を小さな永久磁石で磁化し、針先端に微量（マイクロリットル）の磁性流体を吸着させた。この微小な磁性液滴に外部から小さなコイルによって、交流磁場を印加し、その応答を外部磁場の周波数を変えることによって詳細に調べた。その結果は、大きなヘルムホルツコイルを使用した場合とほぼ同じとなることを確認できた。本年度は最終年度でもあることから、マイクロ磁性流体液滴の形状変化と液滴まわりの磁場の分布を計測し、外部磁場の変動と液滴流動の関連性を明らかにした。磁場の計測は、液滴の変化が3次元であることから、3次元的に磁場を計測できる装置を工夫し、磁場の方向および磁束密度を詳細に計測し、3次元磁場ベクトルの分布として表記し、その結果を液滴形状と重ねて可視化した。その1例を図2に示す。

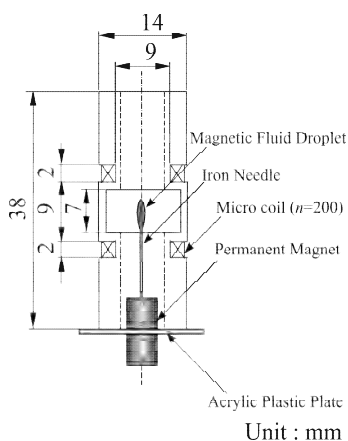


図1：磁性流体液滴駆動系の寸法

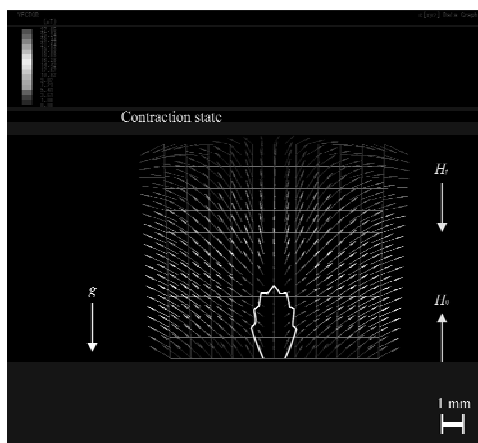


図2：磁場ベクトルの分布と磁性流体の液滴形状

### 3. 研究目標の達成状況

コイルによって外部から印加する磁場強さは数 mT の比較的弱い磁場であるが、磁性流体液滴の界面流動現象を制御できることが、明らかにされ、さらに磁石—磁性流体液滴系を非常に小さなサイズにまで縮小しても、本システムの応答は高周波数まで優れた特性を示すことが判明した。以上のことから、流体と電磁場の連成系における技術的な問題は克服され、研究目標の達成状況は極めて高いといえる。

### 4. まとめと今後の課題

針状磁性体を小さな磁気特性の優れた永久磁石に接触させることによって磁性体を磁化し、その先端部に微量の磁性流体を吸着させた磁石-磁性流体液滴系を構築し、コイルによる外部交流磁場によってマイクロ磁性流体液滴の自由界面の振動および流動現象を非接触で制御するシステムを構築し、そのシステムを小型化し、駆動特性を調べた。次なる目標は、様々なマイクロデバイスへの応用展開と製品化であろう。

### 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, T.Goto, T.Yano, M.Futamura, H.Takana and H.Nishiyama: Micro Reciprocating Actuator Using Magnetic Fluid and Two Permanent Magnets, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 6, No. 6, (2012), pp. 555-564.
- [2] S.Sudo, D.Asano, H.Takana and H.Nishiyama: Alternating Magnetic Field Responses of Magnetic Fluid Drop Adsorbed to a Small Permanent Magnet, *Materials Science Forum*, Vol. 721, (2012), pp. 102-107.
- [3] S.Inomata, S.Sudo, H.Takana, and H.Nishiyama: Vibration Characteristics of Magnetic Fluid Droplet Adsorbed to Magnetized Needlepoint in Alternating Magnetic Field, *Materials Science Forum*, Vol. 721, (2012), pp. 108-113.
- [4] 須藤誠一, 浅野大作, 高奈秀匡, 西山秀哉: 小さい円柱状永久磁石に吸着した磁性流体の界面振動の周波数特性, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20, No. 1, (2012), pp. 90-96.
- [5] 猪股聡太, 須藤誠一, 高奈秀匡, 西山秀哉: 磁化された針端に吸着した磁性流体液滴の交流磁場応答, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20, No. 1, (2012), pp. 174-180.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[6] M.Shinozaki, S.Sudo, H.Takana and H.Nishiyama: Dynamics of Micro Magnetic Fluid Hole in a Alternating Field, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 150-151.
- [7] S.Inomata, S.Sudo, H.Takana, and H.Nishiyama: Micro System of Vibration Generator of Magnetic Fluid Droplet Driven by Alternating Magnetic Field, *Proceedings of Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 362-363.
- [8] M.Shinozaki, S.Sudo, H.Takana, and H.Nishiyama: Optical Characteristics of Magnetic Fluid Hole in Alternating Fields, *Proceedings of Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 368-369.

#### 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

Project code	J12006
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamental
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st 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 a novel magnetorheological shear thickening fluid (MRSTF) which has a dual function that its performance can be controlled by both magnetic field and speed. Both steady-state and dynamic rheology of the new MRSTF will be investigated and its novel application potential will be explored.

### 2. Details of program implement

We have fabricated two new MR shear thickening materials, PDMS based MR elastomers and MR shear thickening fluids, and have characterized their mechanical properties under both steady-state and dynamic loading conditions. Representative results for the two new MR materials are summarized as below.

(a) PDMS based MR elastomers: In this study, we fabricated 4 PDMS based MR elastomers with the iron weight fraction of 60%, 70%, 80%, and 90%. Their mechanical performances under different magnetic fields are show in Figure 1.

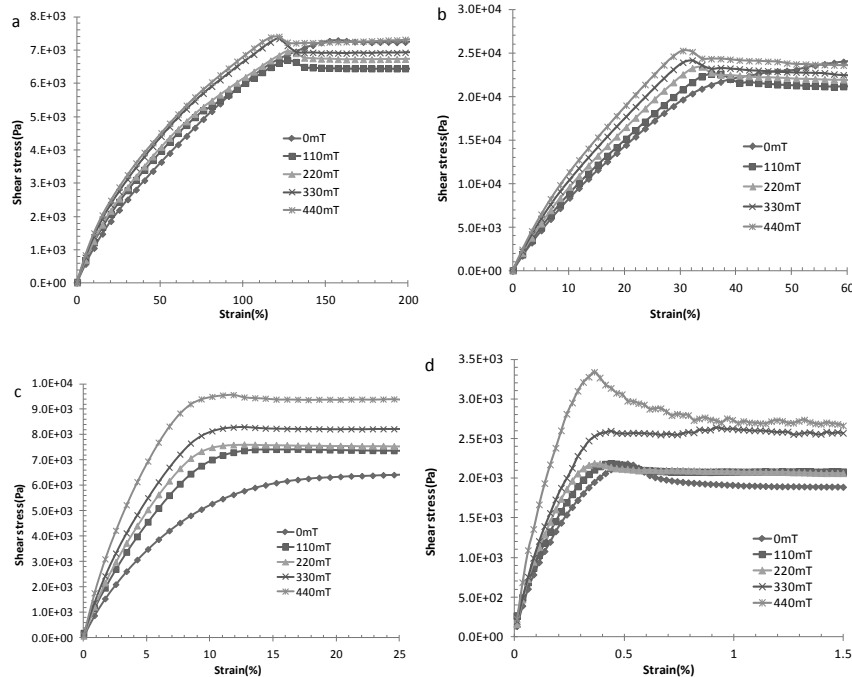


Figure 1 : Strain-stress relationship of PDMS MREs under different magnetic fields for four samples: (a) iron 60%, (b) iron 70%, (c) iron 80%, and (d) iron 90%

(b) MR shear thickening fluids: 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. Iron particles (3  $\mu\text{m}$ ) were then mixed with the base to form MR shear thickening fluids. Figure 2 shows the steady state responses of the MR shear thickening fluids under difference magnetic fields. The shear thickening effect decreases with the increase of magnetic field.

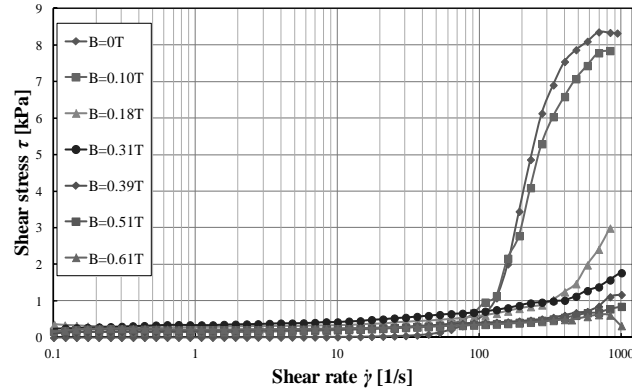


Figure 2 : Rheology of MR shear thickening fluids under different magnetic fields.

### 3. Achievements

In the first year, two novel MR shear thickening materials were fabricated and their mechanical properties were experimentally studied. The developed fabrication technique is much faster than conventional methods for fabrication of MREs. The new MR shear thickening materials exhibit dual functions, which will be used to develop novel smart devices, like adaptive shock absorbers.

### 4. Summaries and future plans

Summaries: We did pioneering work in fabricating and characterizing novel MR shear thickening materials. The rheological and mechanical properties of PDMS MREs were completed. The joint-paper was provisionally accepted to be published in the international journal of Smart Materials and Structures. The research results are expected to generate more than two journal papers soon.

Future plan: In the second year of the collaborative research, the following three major tasks will be conducted: (1) analysis of experimental data of MR shear thickening fluids and submission of our work to international journals and presentation of the results in international conferences; (2) development of adaptive shock absorbers using the developed MR shear thickening materials; 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)  
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

\*[1] W.H. Li, and M. Nakano: Rheology of Magnetorheological Shear Thickening Fluids, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 152-153.

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

課題番号	J12007
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	2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\*, 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

Optical waveguiding medium, especially silicon waveguide plays an important role in photonic applications. However, due to the damage generated during device fabrication, the performance of silicon waveguide-based devices, e.g. microring resonators, is significantly downgraded. The Neutral Beam Technology provides the possible low damage approach for high performance silicon photonic devices. In this project, we have applied the neutral beam etching (NBE) method for fabricating low damage silicon photonic devices, aiming at the high performance of silicon photonic/optoelectronic devices.

## 2. 研究成果の内容

### (1) Optimization of neutral beam etching condition for silicon waveguide fabrication

In practice, vertical sidewall of waveguide is preferred for the fabrication of photonic devices. In this work, the NBE condition of silicon waveguide etching was investigated.  $\text{Cl}_2$  is used for the etching of silicon in this NBE process. Figure 1 shows typical SEM images of the cross-sectional silicon waveguides fabricated under various NBE conditions. In the worse case, the sidewall is about 80 degrees from the horizon, i.e., 10 degrees off from the right angle. The optimized NBE condition realizes nearly vertical sidewalls. The SEM image in Fig. 1(b) indicates that our optimized NBE condition creates ~90-degree sidewall of silicon waveguide, which is an ideal shape of a channel/rib silicon waveguide for optical devices.

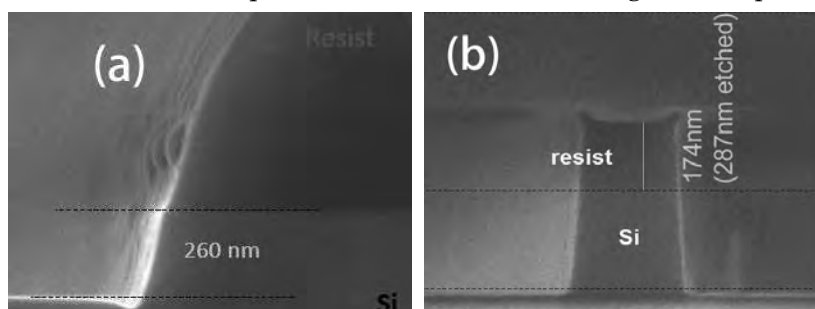


Fig. 1 Cross-section SEM photos of fabricated Si waveguides under different etching conditions. (a): unoptimized; (b): optimized.

### (2) Photoluminescence (PL) spectra of silicon ring resonators fabricated by reactive ion etching (RIE) and Neutral Beam Etching (NBE) methods

In order to check the low etching damage effect of the NBE method, we performed the PL

measurement to examine the resonances of the silicon microrings. The radius of the microring resonators was  $0.5\mu\text{m}$  and the microrings were fabricated using our typical RIE and the optimized NBE methods to study the difference in resonance peaks. Figure 2 shows the typical PL spectra of the silicon microring resonators. The PL result shows an enhancement of broad PL peak of the NBE-proceed sample, which provides a hint of defects suppression by the NBE process. This result demonstrates that the NBE technology is an effective way for low damage fabrication. However, the peak enhancements are slightly lower than the one of RIE made microrings. This should be induced by attenuation by sidewall roughness of the microrings. Further optimization of the NBE condition should be required to get a higher enhancement of resonance peaks.

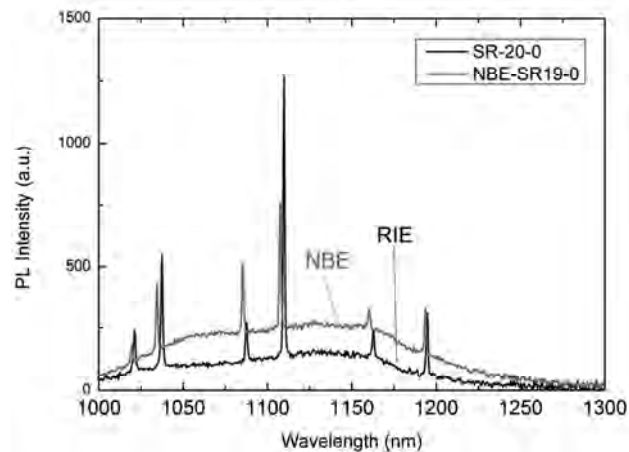


Fig. 2 Photoluminescence spectra of the silicon microring resonators fabricated by RIE (black line) and NBE (red line) methods

### 3. 研究目標の達成状況

The neutral beam etching condition for silicon waveguide fabrication was optimized. The SEM observation shows an ideal vertical sidewall of waveguide. The PL result indicates that the sample etched by NBE shows stronger luminescence intensity, which could be attributed to the low damage fabrication process by NBE.

### 4. まとめと今後の課題

It has been demonstrated that the neutral beam technology can be introduced to the fabrication of silicon photonic structures. Since this technology is a low damage process and the process is possible to be well controlled, the neutral beam technology could also be applied for the post-process such as silicon waveguide trimming.

### 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, Seiji Samukawa and Kazumi Wada: Management of Light by Si/SiO<sub>2</sub> Stack Photonic Band Gap Structure for Neutral Beam Technology based Tandem Solar Cell, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 106-107.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J12008
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	2nd year

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

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

\* 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

As an important device influencing the wake structure, the rear spoiler modifies the rear shape of the vehicle and disrupts, or spoiling, air movement across the vehicle while in motion. To better understand the wake structure of road vehicle, the rear spoiler was installed in a notchback model (model 1) with different attack angles on the rear end of the trunk (Fig. 1), and the numerical simulations were carried out on these models.

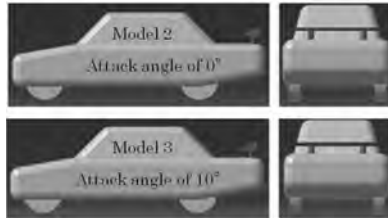


Fig.1 The rear spoiler was installed with different attack angles

As can be seen from Table 1, the rear spoiler can effectively improve the traveling stability of the road vehicle but may deteriorate the fuel economy, and the attack angle of the spoiler should be considered to obtain a favorable drag and lift.

Table 1: Results of the drags and lifts for different models

	Drag (N)	$C_d$	Lift (N)	$C_l$
Model 1	209.16	0.329	78.06	0.123
Model 2	248.69	0.391	-131.98	-0.207
Model 3	252.69	0.397	-155.27	-0.244

Fig. 2 and 3 show that after installing the rear spoiler, the energy of the trailing vortices in the wake increases largely, and the “separation bubbles” becomes more perceptible. They are the main reasons for the increase of the drag. On the other hand, the rear spoiler with an inverted airfoil shape disrupts the air movement across the rear part of the vehicle, which general

a large down force in the spoiler surface, and also raises the position of the trailing vortices in the wake. This position change is in favor of the inrush of the underflow to the wake region, and may largely reduce the induced lift.



Fig. 2 The dynamic pressure in the wake

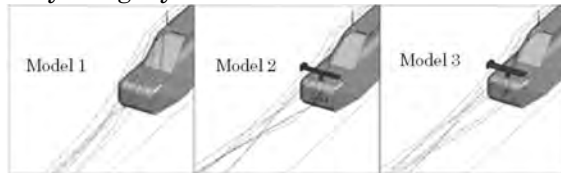


Fig. 3 The stream traces in the wake region section of 0.1L

### 3. Achievements

This project is scheduled for completion in 3 years. The stage goal of the second year is achieved by observing the influence of detailed rear shapes of the road vehicle, including the rear diffuser angle and the rear spoiler, on the wake structure. The time-averaged wake structure was constructed based on the numerical and experimental research of a sedan and motorcycle models. And some unsteady simulations were also carried out to better understand the wake structure of the road vehicle.

### 4. Summaries and future plans

Summaries: The rear spoiler can effectively improve the traveling stability of the road vehicle but may deteriorate the fuel economy; the attack angle of the spoiler should be considered to obtain a favorable drag and lift; the rear spoiler increases the energy of the trailing vortices and also raises the position of them in the wake.

Future plans: The experimental research of the influence of the rear spoiler of road vehicle on the wake structure is planned to carry out in the wind tunnel. And on the basis of the former results, some typical cases with Ahmed model will be selected for the unsteady Large Eddy Simulation (LES) to investigate the unsteady characteristics of the wake structures.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - \*[1] C. Lai, Y. Kohama, S. Obayashi and S. Jeong: Influence of cooling exit flow on aerodynamic performance with different outlet layouts, *Int. J. Vehicle Design*, Vol. 59, No. 4, (2012), pp. 331-349.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [2] C. Lai, Y. Zhou, H. Xing and L. Fu: The Influence of Air Inlet of Indoor Substation on Cooling and Ventilation Effect, *Proceedings of Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 148-149.
  - \*[3] C. Lai, Y. Zhou, L. Fu, and S. Obayashi: Numerical Investigations on the Influence of Rear Spoiler of Road Vehicle on Wake Structure, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 48-49.
- 3) Patent, award, press release etc.
  - Not applicable.



課題番号	J12009
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1年目(発展)

**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、シリコンオイル、化学変成したシリコンオイル等を用いて比較検討した。粒子体積分率 $\phi$ は 8.8 - 20 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。

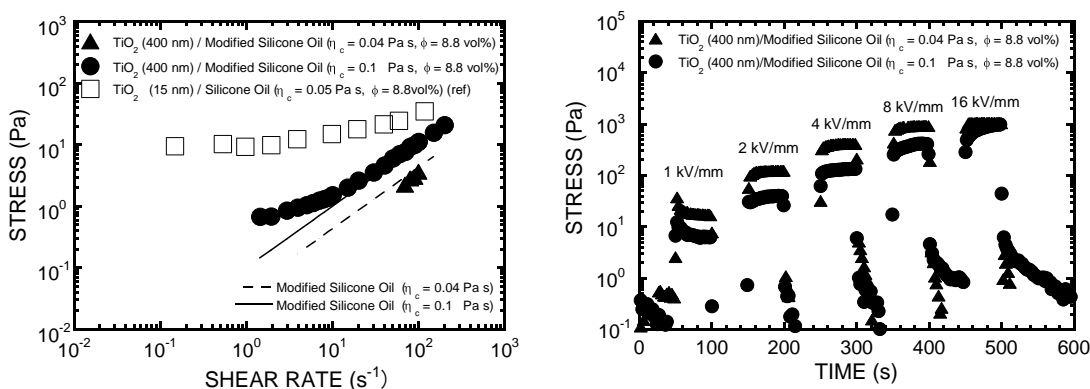


図1：異なる分散媒を用いて調製した試料の無電場における流動特性（左），及び電場応答特性（右）。粒子体積分率 $\phi = 8.8 \text{ vol}\%$ 。

図 1 (左) に, 400 nm の粒子を,  $\eta_c = 0.04 \text{ Pa s}$  および  $0.1 \text{ Pa s}$  の変性シリコンオイルに分散させた試料について, 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.  $\phi$  は  $8.8 \text{ vol\%}$  とした. 参照値として,  $15 \text{ nm}$  の粒子を  $\eta_c = 0.05 \text{ Pa s}$  のシリコンオイルに,  $\phi = 8.8 \text{ vol\%}$  で分散させた試料の結果を, □印で示している. 変性シリコンオイル系では, 参照値と比べ低い値を示し,  $\eta_c = 0.04 \text{ Pa s}$  の試料では, 低せん断速度における応力は検出限界以下であった. また, 粒子の分散性は良好であった. 図 1 (右) に, 粒子径  $400 \text{ nm}$  の試料における電場応答の結果を示す. 図中において, 低電場強度における応力値を比較すると,  $\eta_c = 0.04 \text{ Pa s}$  の試料では,  $0.1 \text{ Pa s}$  の試料の値より高い結果が得られた. また, 試料調製後の時間経過に対しては, ER 効果はやや安定性を欠く傾向が見られた.

### 3. 研究目標の達成状況

$\eta_c = 0.04 \text{ Pa s}$  として調製した試料では, 分散安定性, 無電場におけるせん断応力, ER 特性において,  $\eta_c = 0.1 \text{ Pa s}$  として調製した試料より良好な結果が得られた.

### 4. まとめと今後の課題

上記 3. に示したように, 分散剤を用いることなしに, 比較的良好な結果が得られたが, 粒子の高充填化, ER 効果の安定性の向上について, 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.*, published on-line, (2012), DOI:10.1007/s00396-012-2849-x, pp. 1-8.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[2] K. Tanaka, T. Hira, R. Fukui, H. Kobayashi, R. Akiyama, M. Nakano, S. Enami: Development and Micro-Channel Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proc. of the 12th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 108-109.
- \*[3] K. Tanaka, H. Kobayashi, R. Akiyama, and M. Nakano: Electro-Rheological Properties of Nano-Suspensions based on Titanium Dioxide Nano-Particles, *Proc. of the 9th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 360-361.
- [4] 比良臣伸, 福井隆一, 田中克史, 小林治樹, 秋山隆一, 中野政身, 榎並祥太: 酸化チタンナノ粒子分散系エレクトロレオロジー流体における微細構造と流動評価, 日本レオロジー学会第 39 年会講演予稿集, 東京, (2012), pp. 53-54.
- [5] 田中克史, 比良臣伸, 福井隆一, 小林治樹, 秋山隆一, 中野政身, 戸塚厚: 酸化チタンナノ粒子分散系エレクトロレオロジー流体における微細構造と流動評価, 第 60 回レオロジー討論会講演要旨集, 名古屋, (2012), pp. 81-82.
- [6] 田中克史, 比良臣伸, 福井隆一, 小林治樹, 秋山隆一, 中野政身, 戸塚厚: 酸化チタンナノ粒子分散系エレクトロレオロジー流体における微細構造と電場下・無電場下での流動挙動, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 京都, (2012), pp. 99-100.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J12010
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	2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\*†, 和田章良\*\*, 寒川誠二\*\*††

\*産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

### 1. 研究目的

新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。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、立体チャネルデバイス用ゲート絶縁膜の形成技術の開発を行った。昨年度は特に酸化膜の形成研究を進展させ、Ge 基板の中性粒子ビーム酸化の有用性を実証した。続いて本年度は、Ge MOSFET の作製を目的に、酸化膜を薄層化する検討を試みた。

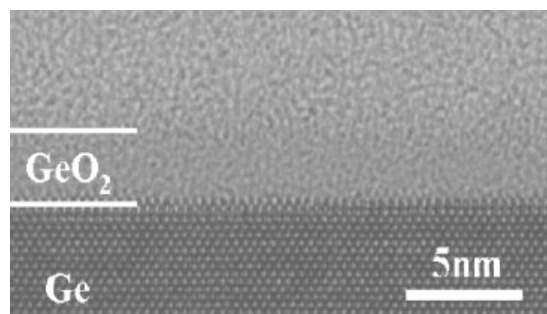


図 1 : GeO<sub>2</sub>/Ge 界面の断面 TEM 写真

Ge (100) 基板を用いて、中性粒子ビームを用いて酸化を行った。基板温度は300℃とし、まずはH<sub>2</sub>ラジカルによる自然酸化膜除去を行った。H<sub>2</sub>ラジカルの照射により、自然酸化膜は有効に除去され、良好なゲルマニウム表面を得ることが出来た。図1に、中性粒子ビームによるH<sub>2</sub>ラジカル処理とO<sub>2</sub>酸化を行ったGeO<sub>2</sub>/Ge界面を示す。アトムレベルでフラットな表面が得られることが明らかになった。

続いて、GeO<sub>2</sub>表面に、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜を更に堆積し、得られた絶縁膜の換算膜厚(EOT)と膜の欠陥密度の関係を調べた。結果比較を図2に示す。EOT=1.7nmという極薄の絶縁膜を持つゲートスタックの形成に成功し、極薄絶縁膜においても、Geとの界面準位は10<sup>11</sup>/cm<sup>2</sup>と良好な値が得られることが分かった。

### 3. 研究目標の達成状況

まずは、デバイス適用のために薄い絶縁膜ゲートスタック構造の作製技術を確立し、良好な界

面特性を得た。当初の計画より若干遅れているが、引き続き、Ge トランジスタ作製に向けて研究を進展させる予定である。

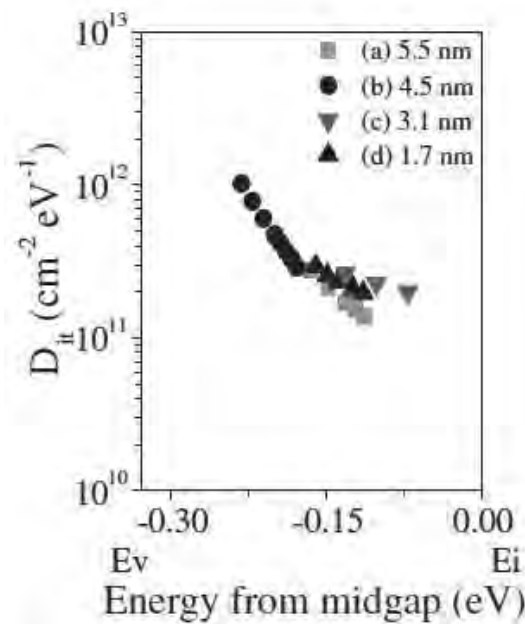


図2：DITと準位エネルギーの関係

#### 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、Ge MOSFET の作製に向けて、薄い絶縁膜構造を持つゲートスタック構造を試作した。今後は MOS トランジスタを実際に試作し、トランジスタ特性の向上を実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).

[1] Akira Wada, Rui Zhang, Shinichi Takagi, and Seiji Samukawa: Formation of Thin Germanium Dioxide Film with a High-Quality Interface Using a Direct Neutral Beam Oxidation Process, *Japanese Journal of Applied Physics*, 51, (2012), 125603.

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Akira Wada, Rui Zhang, Shinichi Takagi, and Seiji Samukawa: High Quality Germanium Dioxide Formation Using Damage-Free and Low-Temperature Neutral Beam Oxidation Process, *Extended Abstracts of Solid State Devices and Materials*, Kyoto, (2012), pp. 16.

\*[3] Kazuhiko Endo, Akira Wada, Seiji Samukawa: A Study of the Next Generation CMOS by the Neutral Beam Process, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 110-111.

##### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J12011
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	2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。高品質な量子ドット結晶を作製するには、従来からのボトムアップ手法をトップダウンプロセスと融合した新しいアプローチによって結晶欠陥を抑制した3次元構造化した量子構造の作製が不可欠である。本研究ではボトムアップで3次元量子ドット構造が作る基礎物性を明らかにするために量子ドット超格子構造を作製してデバイス動作に必要な基礎物性を明らかにした。

**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 (22 ML) 中間層と InAs (2.0 ML) 量子ドットを 8 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 左の (-110) 断面では、量子ドットの配列が矢印で示した In フラックスによって見事に制御できており、超格子形成による偏光異方性も図 1 右のように明らかにすることに成功した。

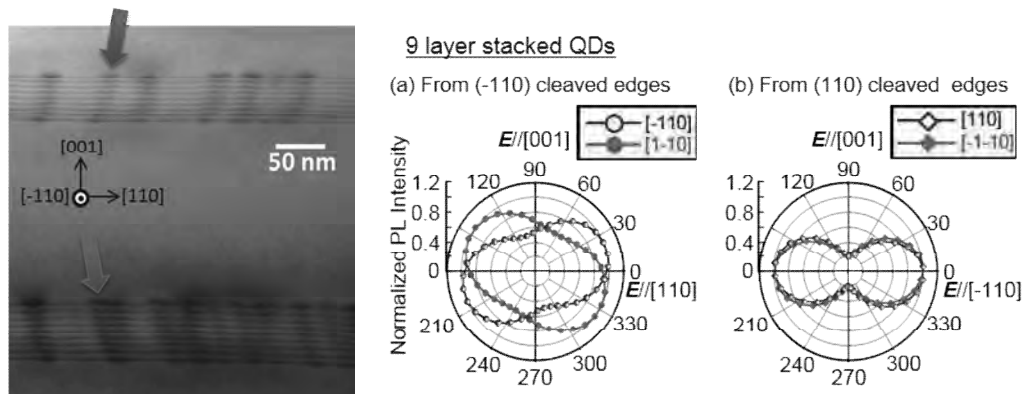


図 1：配列制御した量子ドット超格子の電子顕微鏡写真と偏光解析による超格子光物性の実証

### 3. 研究目標の達成状況

中性粒子ビームプロセスを活用したトップダウンプロセスで不純物ドーピング条件の最適化によってドットあたり数個程度の不純物を制御できるようになると、無輻射再結合中心が不活性化されて発光特性が劇的に改善できると同時に、太陽電池デバイスなどに利用した場合には再結合ロスを抑制することができる。このような特性向上の効果は超格子のように量子ドットを多層に積層した場合に顕著に表れると予想された。本研究では超格子特性を実証するとともに、3次元構造制御（積層方向制御）による形状に依存した新しい光吸収選択則の実験的実証を達成できた。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では高変換効率を実現する太陽電池デバイスに必要な量子ドット3次元配列構造の光学応答特性向上の効果を顕在化させる超格子特性を実証するとともに、3次元構造制御（積層方向制御）による形状に依存した新しい光吸収選択側を偏光発光特性の精密な解析によって世界で初めて実証することに成功した。今後、これらの結果をベースにして、トップダウンプロセスによる3次元量子ドット構造作製技術を確立する必要がある。

### 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）

該当なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] A. Tahahashi, Y. Ikeuchi, T. Ueda, Y. Harada, and T. Kita: Miniband Formation in Closely-Stacked InAs/GaAs Quantum Dots, *The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy*, Nara, (2012).
- [2] Y. Bessho, Y. Harada, T. Kita, E. Taguchi, H. Yasuda: Control of Stacking Direction of InAs/GaAs Quantum Dots, *The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy*, Nara, (2012).
- [3] T. Kita: Carrier Dynamics of Electrons in Intermediate States of InAs/GaAs Quantum Dots, *High-Efficiency Materials for Photovoltaics 2012*, London, (2012). (招待講演)
- [4] T. Kita, T. Maeda, and Y. Harada: Carrier Dynamics in Intermediate States of InAs/GaAs Quantum Dots Embedded in Photonic Cavity Structure, *38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, Austin, (2012). (特別口頭講演)

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

該当なし

課題番号	J12012
区分	共同研究集会
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	1年目

トップダウンとボトムアップの融合による量子ナノ構造作製プロセスのブレークスルーと  
新たなデバイスへの展開

Breakthrough in Quantum Nanostructure Fabrication by Combining Top-Down and Bottom-Up  
Technologies and Novel Device Innovation

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

量子ドットや量子細線などの量子ナノ構造は、情報通信デバイスのみならずグリーンイノベーションを支える超高効率太陽電池等の機能部位として極めて重要であり、主にボトムアップ手法である結晶成長による構造形成法が追究されてきた。しかし、サイズや配列状態の制御、ウェットिंगレイヤーや界面準位の存在など、理想的な構造を形成するには依然として多くの課題を抱えている。一方、近年飛躍的な発展を遂げた中性粒子ビームエッチング等のトップダウン技術、両者の融合技術である選択成長など、我々は理想的な量子構造形成に向けた新たなプロセスの自由度を手にしつつある。

本共同研究集会では、ボトムアップからトップダウンに至る広範な量子構造形成技術のブレークスルーを概観し、量子構造形成のための新たなプロセス体系の構築に向けた展開に関する議論を目指した。

## 2. 研究成果の内容

下記の2つの研究集会を実施した。

(1) インテリジェント・ナノプロセス研究会「トップダウンとボトムアップの融合による量子ナノ構造作製プロセスのブレークスルーと新たなデバイスへの展開」～量子ドットの物理とデバイスの新展開～

日 時：2012年12月20日(木) 13:00～

会 場：トラスシティカンファレンス仙台 Room5

研究会概要：

IT革命時代の21世紀に展開するデジタル情報家電、ネットワーク情報家電を支えるのは超LSI, TFT, 太陽電池等に代表される超機能半導体デバイス技術である。これらのデバイスは、電子、原子・分子、イオン、フォトンなどのマイクロ粒子を用いた薄膜材料堆積・加工技術により製造されている。また、更なる先端デバイスではバイオテクノロジーの利用も検討されている。本研究会は、これら荷電粒子および中性粒子の生成方法や加速技術(ビーム技術も含む)、あるいは粒子の流れに関する研究および最先端バイオナノプロセスを議論することで、世界に先駆けた原子・分子レベルの超高精度微細加工技術、高機能薄膜材料形成技術、あるいは各種表面処理技術の実現を目指し、また実験と計算を融合した「インテリジェント・ナノプロセス」構築を目的として活発に議論を行った。

プログラム：

13:00-13:45 遠藤（産総研）「ナノデバイスの将来動向」

13:45-14:30 高橋（北大）「Si 量子ドットデバイスへの期待」

14:30-15:15 寒川（東北大）「超低損傷加工による量子ドット3次元構造作製とデバイス展開」

15:30-16:15 喜多（神戸大）「量子ドット3次元構造のボトムアップ成長と物性制御」

16:15-17:00 齋木（慶応大）「相変化マスクを用いた量子ドットの発光エネルギー制御」

17:00-17:45 総合討論「量子ナノ構造の物性評価・制御」

（2）半導体ミニバンド研究会

日 時：2013年3月18日（月）13:00～

会 場：宮崎大学付属図書館3階視聴覚室

研究会概要：

量子ドットを規則正しく高密度に並べることにより、その電子準位がオーバーラップし「ミニバンド」を形成することは、以前から予想されており高効率太陽電池などへの応用が期待されている。最近ようやく東北大学の新しい技術により量子ドット2次元・3次元超構造を作製し「ミニバンド」を実現することが可能となってきた。

本研究会では、このような背景の中で、ミニバンド形成で実現される新しい物理現象、その測定法、応用などについて議論した。

プログラム：

14:00～14:40 寒川誠二（東北大学流体科学研究所）

「超低損傷加工による量子ドット3次元構造作製とデバイス展開」

14:40～15:20 宇佐美徳隆（東北大学金属材料研究所）

「次世代太陽電池創製に向けたマルチスケールシリコン系結晶に関する研究」

15:20～16:00 富岡克広（北海道大学, JST さきがけ）

「III-V 族化合物半導体ナノワイヤ選択成長と太陽電池応用」

16:20～17:00 杉山正和（東京大学）

「量子井戸超格子による太陽電池の高効率化」

17:00～17:40 福山敦彦（宮崎大学）

「超格子構造太陽電池の非発光再結合信号スペクトル解析」

### 3. 研究目標の達成状況

超高効率太陽電池等などグリーンイノベーションはスマートエネルギー環境を構築してゆくには不可欠であり、本研究集会では超高効率太陽電池等などグリーンイノベーションを目指して、トップダウンとボトムアップの融合による量子ナノ構造作製プロセスのブレークスルーと新たなデバイスへの展開とその技術の上に制御しなければならないミニバンド物性制御に関する研究成果について広く議論することができた。

### 4. まとめと今後の課題

本研究集会ではトップダウンとボトムアップの融合による量子ナノ構造作製プロセスのブレークスルーと新たなデバイスへの展開とその技術の上に制御しなければならないミニバンド物性制御に関する研究成果について広く議論することができた。これら学术交流によって今後の半導体プロセス技術に方向性を明らかにすることができたとともに、今後の一層の研究推進によってわれわれが提案する量子ナノ構造作製プロセスが我が国の次世代半導体産業の糧となってゆくと確信する。

### 5. 研究成果

該当なし



課題番号	J12013
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	2012.4～2013.3
継続年数	3年目

### サイレント超音速機の超音速飛行特性に関する研究

#### Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of a Silent Supersonic Aircraft in Supersonic Flight

大林 茂\*†, 佐宗 章弘\*\*††

鵜飼 孝博\*, 小川 俊広\*, 内田 貴也\*, 今泉 貴博\*\*, 竹矢 憲司\*\*, 豊田 篤\*\*,  
酒井 武治\*\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*名古屋大学工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

#### 1. 研究目的

輸送量増加と飛行時間の短縮を目的として超音速旅客機の研究開発が行われており、バリスティックレンジを利用したフリーフライト実験技術の高度化が課題となっている。本研究では、模型設計・サボ製作・光学計測・圧力波計測などの基礎実験技術の開発・検証を行い、我が国発の超音速複葉翼理論の構築に資する。

#### 2. 研究成果の内容

東北大学のバリスティックレンジでは、デルタ翼型の翼胴模型の近傍場圧力計測および飛行姿勢計測を同時に計測した。模型が自由飛行するバリスティックレンジでは飛行姿勢制御が困難であるため、近傍場圧力を計測する際の飛行姿勢を同時に計測する必要がある。本研究ではX線装置を用いたステレオ撮影により飛行姿勢を計測した。本X線装置は高解像度の画像を得ることができるため、計測誤差が低い利点を持つ。またステレオで撮影したことで3次元空間での模型の位置を特定することができ、高精度な飛行姿勢計測方法を確立した。

名古屋大学のバリスティックレンジでは、高アスペクト比の翼胴模型の実験に向けてのハイブリッドサボ分離法の確立に取り組んでいる。模型からのサボ分離が超音速飛行模型の飛行姿勢制御に大きく影響を及ぼすことが過去の研究によって明らかになっている。名古屋大学バリスティックレンジでは空力サボ分離と衝突による物理サボ分離を組み合わせたハイブリッドサボ分離手法を採用し、飛行姿勢の制御に取り組んでいる。

#### 3. 研究目標の達成状況

東北大学では高精度な飛行姿勢と近傍場圧力計測を同時に行い、より複雑な3次元超音速模型の近傍場圧力計測実験を行う準備段階である。一方、名古屋大学では3次元超音速機模型の飛行実験を行うのに必要な、バリスティックレンジの改修および任意の姿勢で模型を射出するため基礎研究を行い、3次元超音速機模型を用いた射出実験の準備が整いつつある。

#### 4. まとめと今後の課題

東北大学のバリスティックレンジでは、X線装置を用いたステレオ撮影により翼胴模型の飛行姿勢および近傍場圧力計測の同時計測手法を確立した。名古屋大学ではバリスティック

レンジの改修を行い、3次元超音速機模型の射出に向けて基礎実験を行った。今後は、より複雑な3次元超音速機模型の射出法の確立、およびその近傍場圧力計測と飛行姿勢の同時計測を行う予定である。

## 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] 大林茂, 山下博, 大谷清伸, 菊池崇将, 鶴飼孝博: 超音速複葉翼理論の地上実証研究, 日本航空宇宙学会誌特集号, (2013).

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] T. Ukai, K. Ohtani and S. Obayashi: Effect of shock wave reflection and diffraction for near-field pressure measurement of supersonic projectile using ballistic range, *20th International Shock Interaction Symposium*, Sweden, (2012), pp. 203-206.

[3] T. Ukai, T. Kikuchi, K. Ohtani, T. Uchida, Y. Saito, S. Obayashi: Near-Field Pressure Measurement of a Projectile Flying up to Mach Number 2.0, *9th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 314-315.

[4] T. Kikuchi, T. Ukai, S. Obayashi: One Experimental Technique of Detecting the Trajectory of a Free-Flight Projectile Launched by a Ballistic Range, *9th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 312-313.

[5] T. Uchida, T. Ukai, K. Ohtani, S. Obayashi: Attitude Measurement of a Projectile by Flash X-ray Stereography, *9th International Conference on Flow Dynamics*, Japan, Sendai, (2012), pp. 316-317.

[6] Yuta Saito, Kakuei Suzuki, Takahiro Ukai, Takahiro Imaizumi, Atsushi Toyoda, Takaya Uchida, Akihiro Sasoh, Shigeru Obayashi: Assessment of Supersonic Free-flight Experiment using a Plate Shaped Sabot Aimed at the Biplane Model, *9th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), Poster.

\*[7] Kakuei Suzuki, Takahiro Imaizumi, Atsushi Toyoda, Akihiro Sasoh: Stepped Pressure Rise of Tail Boom with Staged Aft-Body, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 26-27.

[8] 鶴飼孝博, 大谷清伸, 大林茂: 弾道飛行装置を用いた超音速飛行体の近傍場圧力計測精度の検証, 第44回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, (2012), 1A09.

[9] 宮腰康, 内田貴也, 斎藤雄太, 大谷清伸, 小川俊広, 大林茂: 弾道飛行装置を用いた低ソニックブーム実証実験のための計測技術に関する研究, 平成24年度衝撃波シンポジウム, 北九州国際会議場, (2013), 2C1-3.

[10] 今泉貴博, 豊田篤, 佐宗章弘, 中右介, 牧野好和, 村上哲: バリステックレンジを用いた超音速自由飛行試験模型回りの近傍場実験計測, 第50回飛行機シンポジウム, 新潟県朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター, (2012), JSASS-2012-5130.

[11] 今泉貴博, 豊田篤, 佐宗章弘: 三次元モデル超音速自由飛行実験システムの開発, 平成24年度衝撃波シンポジウム, 北九州国際会議場, (2013), 2C1-3.

### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) 優秀発表賞, 弾道飛行装置を用いた超音速飛行体の近傍場圧力計測精度の検証, 鶴飼孝博, 2012.9.14, 日本航空宇宙学会.

(マスコミ発表) なし

課題番号	J12014
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	2012.4~2013.3
継続年数	3年目

### 生体軟組織内の石灰化検出に関する研究

#### Research on Detection Method of Calcification in Soft Tissue

劉 磊\*, 船本 健一\*\*††, 早瀬 敏幸\*\*, 太田 信\*\*, 井上 浩介\*\*,  
小澤 桂\*\*, 清水 康智\*\*, 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

初期乳がんは軟組織内微細石灰化（直径 500  $\mu\text{m}$  以下）の存在と深い関係を持つことが知られている。微細石灰化の早期発見は、乳がんの早い段階からの観察と治療を可能とする。医療現場からは超音波を用いた効率的な微細石灰化の検出法が期待されている。

本研究では新しい超音波送受信アルゴリズムの最適化を実験と数値シミュレーションの両観点から取り組むことによって、従来の超音波と比較して高空間分解能、高視認性の微細石灰化検出法開発を最終目的とする。従来研究において、生体軟組織内の微細石灰化が超音波計測に対して特異的に反応する **Twinkling sign** 現象が報告され、その臨床的有用性が示唆されてきた。本年度では実験的研究を中心 **Twinkling sign** 現象の発生メカニズム解明を目的として遂行された。

#### 2. 研究成果の内容

2012 年度においては GE 社研究担当者が計 4 回流体科学研究所を訪問し、共同研究集会および共同実験を行った。2012 年度は申請書の計画通り、生体を模擬したファントムの制作およびファントムを用いた *in vitro* 実験を中心に遂行した。Poly (vinyl alcohol) hydro (PVA-H) ゲルにガラス微粒子（平均粒径 200  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , 1000  $\mu\text{m}$ ）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た（図 1a 参照）。制作したファントムに対してレーザーシートを展開し、超音波照射条件下での粒子からの散乱光観察実験を行ってきた。これらの研究結果は **Twinkling sign** 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、研究成果[1]-[3]として発表した。

同様に PVA-H ゲルファントムを用いて、ガラスビーズの粒径や粒子の種類が **Twinkling sign** 強度に与える影響を定量的に評価した（図 1b 参照）。本研究結果は 2013 年に国際、国内学会にて発表する予定である。

また、超音波照射有/無それぞれの条件下で顕微鏡と高速度カメラを用いたガラスビーズの挙動観察実験も遂行した。本実験では **Twinkling sign** 発生条件下においてガラスビーズの動きを高速度カメラで記録し、その時間的変動を解析した。実験結果は超音波照射の繰り返し周波数とガラスビーズの振動周波数が一致することを示した。本結果は、本研究グループが研究成果[1]にて報告した超音波照射音圧によるガラス微粒子の振動が **Twinkling sign** の起因である仮説を支持した。

**Twinkling sign** に関する数値シミュレーションに関しても熊本大学研究グループと共同して展開し、USE2012にてその成果を発表した（研究成果[4]）。

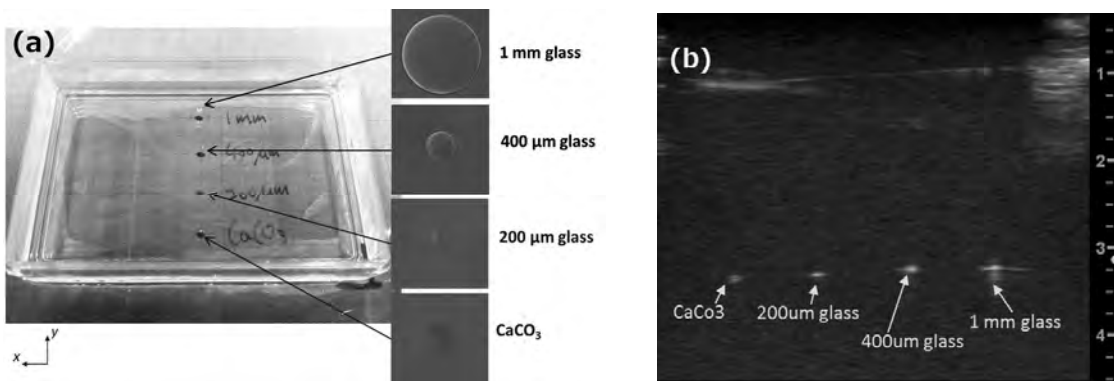


図 1 : (a) ガラスおよび炭酸カルシウム微粒子を含む PVA-H ゲルファントム. (b) PVA-H ゲルファントムで確認された B-Flow スキャンモード Twinkling sign

### 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. 実験的研究とシミュレーション両面において Twinkling sign の発生原因を解明しつつある. また実際の超音波診断機器搭載に対する新しいアイデアの蓄積を行ってきた. 論文投稿や学会口演等の学術的貢献を行った.

### 4. まとめと今後の課題

本研究は乳がんの早期発見のための検査法開発を目的とし, 2010-2012 年度にわたり Twinkling sign 発生メカニズム解明に関する基礎的研究を遂行した. 研究成果に示す通り, Twinkling sign 発生には超音波照射音圧による微細石灰化の振動が深く関与することが本研究によって示唆された. 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. 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] Liu Lei, Kenichi Funamoto, Kei Ozawa, Makoto Ohta, Toshiyuki Hayase and Masafumi Ogasawara: In vitro Study of Ultrasound Radiation Force-Driven Twinkling Sign Using PVA-H Gel and Glass Beads Tissue-Mimicking Phantom, *Journal of Medical Ultrasonics*, (2013), 10.1007/s10396-012-0429-9.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[2] Liu Lei, Kenichi Funamoto, Kei Ozawa, Makoto Ohta, Toshiyuki Hayase and Masafumi Ogasawara: Ultrasound Radiation Force Driven B-Flow Twinkling Sign for Microcalcification Detection, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 86-87.

[3] 劉 磊, 小澤 桂, 船本 健一, 太田 信, 早瀬 敏幸, 小笠原 正文: 軟組織内微細石灰化の B-Flow “Twinkling Sign” 発生メカニズムに関する in vitro 研究, 日本超音波医学会 第 85 回学術集会, Supplement, (2012), S357.

[4] Masayuki Tanabe, Hodaka Tamura, Masahiko Nishimoto, Liu Lei, and Masafumi Ogasawara: Basic Study for Detection of Microcalcification in Soft Tissue Employing “Twinkling Sign”, *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics*, Vol. 33, (2012), pp. 129-130.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J12015
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	2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  $q$  に様々な値を与えてシミュレーションを行なった。

臨界安定となる  $q=-1.5$  でこれまでわかったこととして、速度と渦度の軸流成分から見積った実効旋回強度 ( $q_{\text{eff}}$ ) が相互作用によって安定化することであった。その傾向が  $q$  の値がわずかに異なる  $q=-1.4, -1.6$  の場合についても同様に現れることを示した(図 1)。

また線形不安定な  $q=-0.45$  の場合、突発的な崩壊過程を捉えるため、1024 の 3 乗の解像度でシミュレーションできるよう並列化の見直しを行なった。その結果、予備実験では捉えきれなかった渦構造の特徴的な変化を捉えることができた(図 2)。

#### 3. 研究目標の達成状況

臨界安定な旋回パラメータ  $q$  に対する解析は、初期値に様々な  $q$  の値を与えて流れ場を作成し、可視化および統計解析を行なうことができた。またいずれの  $q$  の値でも、実効旋回強度  $q_{\text{eff}}$  は相互作用によって安定化することが明らかになった。

線形不安定な場合、予備実験では 512 の 3 乗の数値シミュレーションでは突発的な崩壊過程を改造できなかったため、より高解像度である 1024 の 3 乗に対応すべく並列化の見直しを行なった。その結果、図 2 にあるように、渦構造の複雑な変化をとまなう流れ場を捉えることができた。

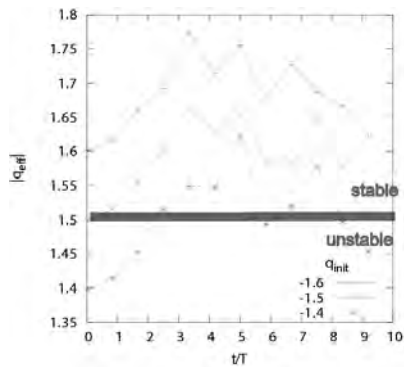


図 1 : 実効スワールパラメータ  $q_{\text{eff}}$  の時間変化。

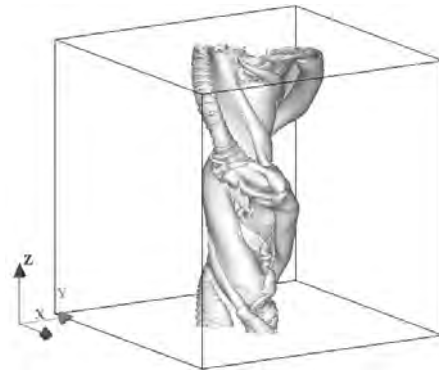


図 2 : エンストロフィーの等値面による渦構造の可視化.  $1024^3$  の 3 乗,  $q = -0.45$  (線形不安定)(部分).

#### 4. まとめと今後の課題

様々な旋回パラメータを持つバッチャー渦と乱流場との相互作用を、数値シミュレーションに対応した。臨界安定および線形不安定な場合について、それぞれ特徴的な振舞いを捉えた。

今後の課題として、臨界安定なバッチャー渦に対しては様々な強度を持つ背景乱流場、特にこれまでの減衰一様等方性乱流場だけでなく、強制乱流として作成されたものとの相互作用について解析を進めたい。また線形不安定なバッチャー渦について、高解像度の数値シミュレーションおよびその可視化解析で捉えられた突発的な変化を、統計解析を行い、崩壊過程を明らかにしたい。

#### 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. 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 Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 154-155.

##### 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	J12016
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1年目(発展)

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、まず、乱流境界層や乱流噴流等の空間発展乱流に及ぼす様々な外部乱れ因子（物体後流や衝撃波など）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目的とする。衝撃波は例えば航空機翼面上の乱流境界層制御等に応用することを実用的な目的としている。これらの知見に基づき、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

初年度である本年度は三次元直接数値計算（DNS）コードの開発を主に行った。具体的には、主流乱れを伴う乱流境界層、乱流噴流、格子乱流と平面衝撃波の干渉に関する DNS コードを開発し、計算を行った。その結果、乱流境界層に関しては主流乱れにより排除厚さや運動量厚さの空間発展が異なること、乱流噴流に関しては主流に初期乱れを入れると噴流出口近傍におけるコヒーレント構造が弱くなる（図 1）ことがわかった。また、衝撃波との干渉により乱流強度が増大し、乱流の特性長である積分スケールが減少することがわかった。

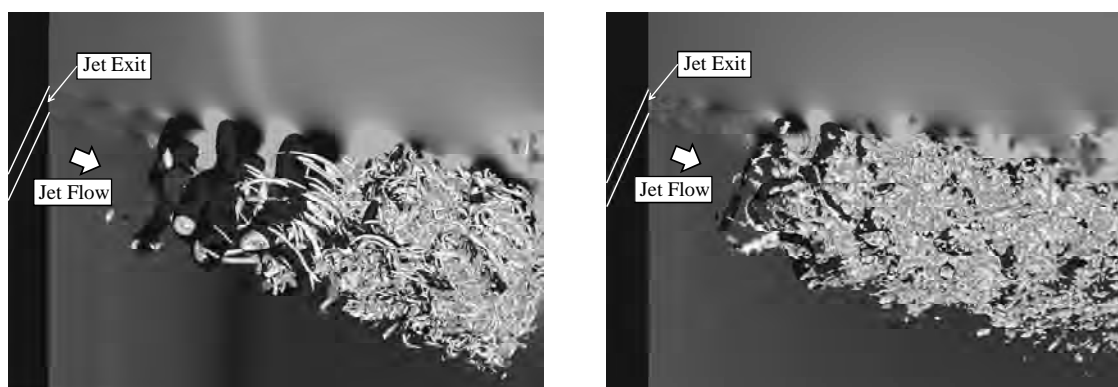


図 1: 主流乱れが小さい場合（出口速度の 0.1~0.8% : 左図）と大きい場合（出口速度の 2~16% : 右図）の噴流出口近傍におけるコヒーレント構造の変化（黒: 圧力  $P$  の等値面  $P/U_j^2 = -0.1$ , 白: 速度勾配の第二不変量  $Q$  の等値面  $Qd^2/U_j^2 = 3$ ,  $U_j$  は噴流出口速度,  $d$  は出口スリット幅）

### 3. 研究目標の達成状況

当初の研究目的は、乱流境界層や乱流噴流に代表される空間発展乱流の構造が外部乱れによってどのように変化するかを明らかにすることであるが、DNS コードを独自に開発し、計算を実行することでこれらの研究目標がほぼ達成できた。これらの結果を速報として 5 件の国際会議と 2 件の国内会議において発表した。さらに、結果を国際誌に 2 報、国際会議に 4 件投稿中であり、共同研究結果を国内外に広く公表している。

### 4. まとめと今後の課題

本共同研究では、主流乱れにより乱流境界層や乱流噴流の特性がどのように変化する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)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, Y. Ito, O. Terashima and T. Hayase: Direct Numerical Simulation of Eddy Diffusivity in a Plane Jet with a Second-Order Reaction, *Proceedings of the International Conference on Simulation Technology 2012*, Kobe, (2012), paper no. JSST2012\_OS5-11 (4pages).

\*[2] Y. Sakai, K. Nagata, T. Hayase, O. Terashima, N. Wu, S. Xia, T. Watanabe, T. Kitamura, K. Hiruta, H. Saito, T. Sakai, A. Sasoh and Y. Ito: Effects of External Disturbances on Spatially Developing Turbulence and Its Application to Control of Thermo-Fluid Dynamics, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp.156-157.

[3] 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, *Proceedings of the ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp.98-99.

[4] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, Y. Ito and T. Hayase: Numerical Simulation of a Reactive Liquid Jet by Combination of DNS and PDF Method, *Proceedings of the ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp.102-103.

[5] S. Xia, K. Hiruta, K. Nagata, Y. Sakai, H. Suzuki, O. Terashima and T. Hayase: Direct Numerical Simulation on the Effects of Free-stream Turbulence on the Turbulent Boundary Layer, *Proceedings of the ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp.162-163.

[6] 渡辺智昭, 酒井康彦, 長田孝二, 寺島修, 伊藤靖仁, 早瀬敏幸: DNSとPDF法による反応性二次元噴流の数値計算, 日本機械学会東海支部 第 62 期総会・講演会, (2013), pp.123-124.

[7] 齋藤大輝, 酒井武治, 佐宗章弘, 長田孝二, 酒井康彦, 北村拓也, 早瀬敏幸: 等方性乱流場と平面衝撃波の相互干渉に関する直接数値シミュレーション, 日本機械学会東海支部 第 62 期総会・講演会, (2013), pp.127-128.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし



課題番号	J12017
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1年目(発展)

**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\*, 梁 海超\*, 五十嵐 誠\*\*

\*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, 微細ニューロンデバイス実現のために, 微細化に有効な FinFET と NDA を組み合わせたデバイス (NDA-FinFET) 構造を提案し, 構造シミュレータでの解析と, 製造プロセスの基本検討を行った.

図 1(a) に示すように, FinFET のゲート上部に 2 次元 NDA 構造を接続し, NDA の他端に入力電極を接続すると共に, NDA 上部に制御電極を設ける構造を考案した. シナプス部に NDA を用いたニューロンデバイスでは, ホッピング電子を収集して大きな出力電圧を得るために, できるだけ小さな出力 (ゲート) 容量が望ましい. FinFET はプレーナ構造 FET に比べて, 小さなゲート容量が得やすく, また, NDA が接続されるゲート上部の電極幅は, ゲート電極膜厚の 2 倍と Fin 幅で決まるので, ゲート容量と無関係に大きな NDA 接続部面積が得られるという利点があり, NDA を接続する FET 構造として適している. 図 1(b) に示すサイズで, ゲート長 80nm を仮定して構造シミュレーションをすると, ゲート容量は約 300aF, 入力・制御電極とゲート間の容量はそれぞれ 5~8aF であった.

FinFET の作製技術を有している産総研の協力により, SOI 基板上に FinFET を作製し,

層間膜を CMP により平坦化した後に、NDA を形成した。NDA 形成には、鉄コアを内包するフェリチン・タンパク超分子を含む溶液をスピコートすることで、自己組織化的に鉄コアが配列するテンプレートを利用する。図 1(c) に示すように、完全に平坦化された FinFET ゲート上部に均一なフェリチン配列が実現できていることがわかる。これにより、NDA-FinFET を形成できることを示した。

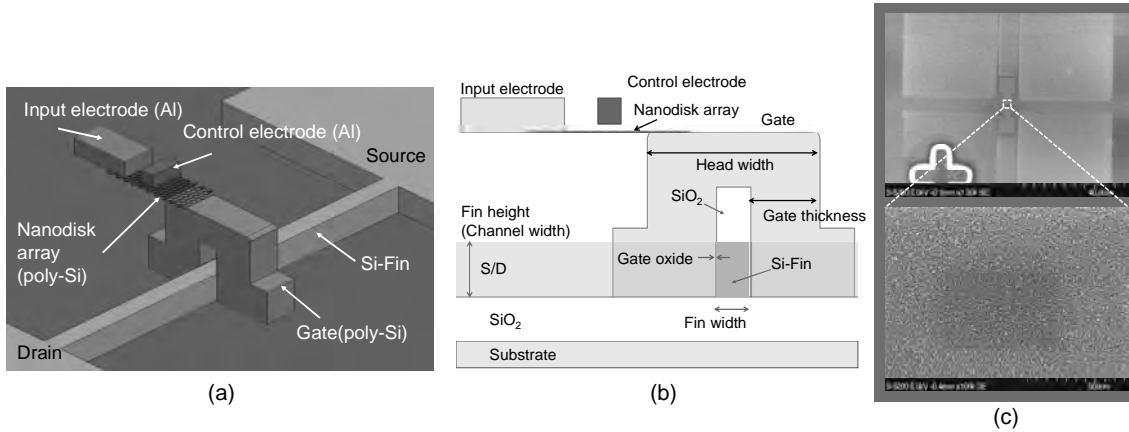


図 1: NDA-FinFET ニューロンデバイス: (a) 構造シミュレータで作製したデバイス俯瞰図, (b) デバイス断面図と仮定したサイズ, (c) FinFET 上の NDA 作製のためのフェリチン超分子の自己組織化配列の観測。

### 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、初年度の今年度は 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検討しつつ、試作を進めてきた。ほぼ試作が終了しつつあり、来年度当初に単体デバイスが完成する予定である。そのデバイスを測定評価することで、特性を得ると共に、問題点を明らかにし、さらに試作を進めていく予定である。

### 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構造を提案し、その製造プロセス構成を確立してきた。今後、試作を完了し、特性評価を行い、さらに改善を重ねていく。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)  
なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] T. Morie, H. Liang, T. Tohara, K. Endo, M. Igarashi, and S. Samukawa: Intelligent Information Processing Circuits Using Nanodisk Array Structure, *Proc. of the Twelfth Int. Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 112-113.

- [2] 東原 敬, 梁 海超, 遠藤 和彦, 五十嵐 誠, 寒川 誠二, 昌原明植, 森江 隆: FinFET とナノディスクアレイ構造を結合したニューロンデバイス, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, (2012), p. 09-075.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)  
なし

課題番号	J12018
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1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、SN2噴霧流の熱流束冷却特性に関して融合計算と基礎実験による総合的検討を行った。その結果、SN2粒子が加熱平板に衝突すると同時に急激な温度降下が生じ、マイクロ固体粒子噴霧による超高熱流束冷却特性が得られ、特に、基板表面の粒子数密度が大きい領域においては噴霧冷却が効果的に行われていることを明らかにした。さらに、良好な壁面平均冷却熱流束を得るためには、初期SN2粒子径・初期SN2流入流速条件に最適値が存在することが判明し、この条件下においてマイクロSN2噴霧の半導体洗浄適用する際のレジストの熱収縮効果が期待できることが明らかとなった。

### 3. 研究目標の達成状況

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した。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とともに、固体窒素噴霧の有する超高熱流束冷却熱伝達特性の詳細を融合解析により明らかにした。

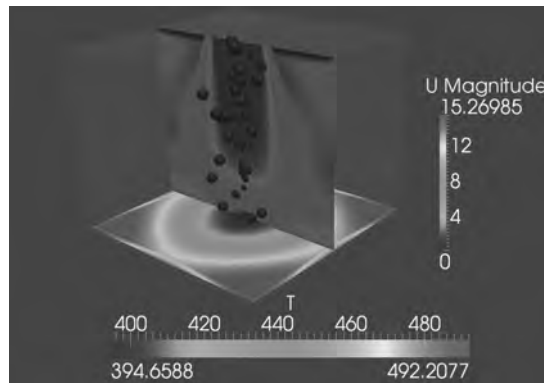


図1 極低温噴霧流による超高熱流束効果に関する超並列融合計算

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

極低温二流体ノズル噴霧解析用ソルバーに関し、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, Daisuke Tan: Integrated Computational Study of Ultra-High Heat Flux Cooling Using Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Spray, *Cryogenics*, Volume 52, Issue 10, October, (2012), pp. 505-517. **(Top 25 Hottest Articles in Cryogenics, July to September 2012, 15th).**
- [2] Jun Ishimoto, Daisuke Tan, Hiroto Otake and Seiji Samukawa: Thermomechanical Resist Removal-Cleaning System Using Cryogenic Micro-Slush Jet, *Solid State Phenomena*, Vol. 187, (2012), pp. 145-148.

他 合計 3 件

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[3] Naoya Ochiai, Yuka Iga, Motohiko Nohmi, Toshiaki Ikohagi, Jun Ishimoto and Kozo Saito: Numerical Prediction of Cavitation Erosion Using a Coupled Analysis of Cavitating Flow Field and Bubbles, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 50-51.

##### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J12019
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1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

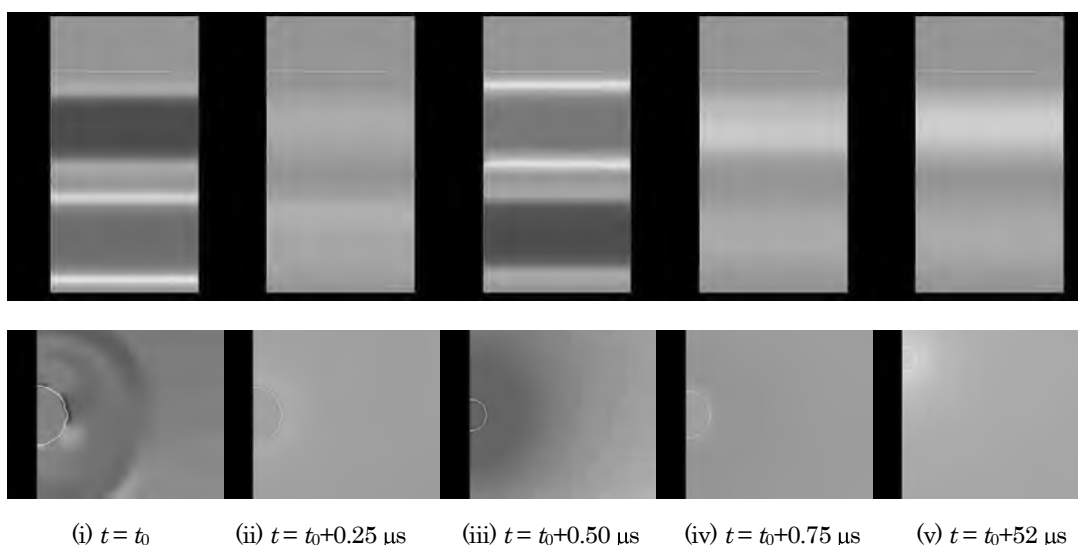
†申請者, ††所外対応研究者

**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**

圧力振動を誘起する振動壁の境界条件を適用して、MHz 帯の音波による定在波中の気泡挙動解析を行った。図 1 は、メガソニック振動場中の圧力分布と気液界面 (ボイド率 0.5 の等値線) の経時変化を示している。図 1 より、本計算条件によって計算領域内にある程度安定して定在波を再現できること、定在波中での周囲圧力変動のための気泡の半径変動や並進運動を捕らえられることがわかる。また、初期気泡位置(図 1(i))と最終時刻の気泡位置(図 1(v))を比較すると、気泡が並進運動しており、Primary Bjerknes 力による並進運動が本計算手法によって再現できることがわかった。



(i)  $t = t_0$       (ii)  $t = t_0 + 0.25 \mu\text{s}$       (iii)  $t = t_0 + 0.50 \mu\text{s}$       (iv)  $t = t_0 + 0.75 \mu\text{s}$       (v)  $t = t_0 + 52 \mu\text{s}$   
 図1: メガソニック振動場中の圧力分布と気液界面 (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)

### 3. 研究目標の達成状況

振動壁境界条件によってメガソニック圧力場を模擬し、メガソニック場で振動する気泡挙動の数値解析手法の基礎を構築した。また、本手法によって従来の研究で知られている Primary Bjerknes 力による気泡の並進運動などを再現し、本数値解析手法がある程度の妥当性を有していることが確認できた。

### 4. まとめと今後の課題

メガソニック場での気泡挙動数値解析手法の基礎を構築し、これによってメガソニック場での気泡挙動をある程度妥当に解析できることを確認できた。今後は、溶解気体の溶解・析出、化学反応のモデル化などを行い、メガソニック場での気泡挙動数値解析手法の高度化することが課題ある。さらに、構築した数値解析手法による単一気泡挙動、特に気泡径と Primary Bjerknes 力による並進運動特性の詳細な解析やメガソニック場での複数気泡挙動解析を行い洗浄メカニズム解明につなげていく必要がある。

### 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] Jun Ishimoto: Innovative Nano-Device Cleaning Technology Using Cryogenic Spray Flow of Micro-Solid Nitrogen, *Painting Technology Workshop (PTW2012)*, Lexington, Kentucky, USA, (2012). **(Invited)**.

[2] Jun Ishimoto: Thermomechanical Resist Removal-Cleaning Technology Using Cryogenic Micro-Nano Solid Nitrogen Spray, *Center for High-rate Nanomanufacturing Fall Seminar Series*, College of Engineering, Northeastern University, Boston, USA, (2012). **(Invited)**.

[3] U Oh, Naoki Harada and Jun Ishimoto: Innovative Wafer Resist Removal-Cleaning Technology by Using Smart Cryogenic Spray Flow of Solid Nitrogen, *Technical Congress of Progress and Innovation for Smart Materials and Related Technology (PI-SMART)*, Hirosaki, April 24, (2012). [in CD-ROM].

\*[4] U Oh, Jun Ishimoto and Jin-Goo Park: Thermomechanical Nano Device Resist Removal-Cleaning Technology by Using Cryogenic Spray Flow of Solid Nitrogen, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 114-115.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J12020
区分	共同研究集会
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	1年目

**反応性混相流の活用による新エネルギー創成**  
**Development of Frontier Energy Using Reactive Multiphase Flow**

石本 淳\*†, 松浦 一雄\*\*, Jin-Goo Park\*\*\*††

\*東北大学流体科学研究所, \*\*愛媛大学大学院理工学研究科, \*\*\*NEMPL, Hanyang University

†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、様々な状況で水素漏洩が生じると考えられる。そのため漏洩に対する安全対策が重要であり、常に水素の漏洩・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、他に例を見ないオリジナルかつ柔軟なリスク緩和手法を理論・シミュレーションに基づき提案してきた。本研究は、この手法に基づくシステムを実現すると同時に、フィジカルコンピューティングと水素拡散シミュレーションとを融合した実融合計算に基づく、より現実性の高いリスク緩和手法の開発を行うことが目的である。

## 2. 研究成果の内容

フィジカルコンピューティングと水素拡散シミュレーションとを融合する実融合計算に基づく、より現実性の高いリスク緩和手法の開発にあたり、次の①～③の問題群に分割して研究を実施し成果を得た。

### ① 漏洩水素拡散経路の安定化に関する研究

水素ガス漏洩時には水素の浮力噴流が形成されるが、ベントに伴って外部空気が室内に取り込まれる際、この気流が浮力噴流を乱し、室内における水素拡散を助長する恐れがある(図 1)。本研究では、非ブジネ近似浮力噴流と漏洩空間の天井における水素滞留の2段階から構成される理論解析モデルを用いて、漏洩水素拡散経路を安定化させるために必要な空気取込口の面積などの空間幾何条件を明らかにした。

### ② フィジカルコンピューティング基盤の構築および水素強制ベントに関するシミュレーション精度の検証

これまで強制ベント時の水素拡散挙動の実験データについてはほとんど報告されていない。本研究では、強制ベントを前提とするフィジカルコンピューティング基盤の構築と同時に、漏洩水素拡散・滞留挙動を実験計測し、シミュレーション精度の検証を行っている。本年度は上記研究の実現可能性に関して見通しを得た。

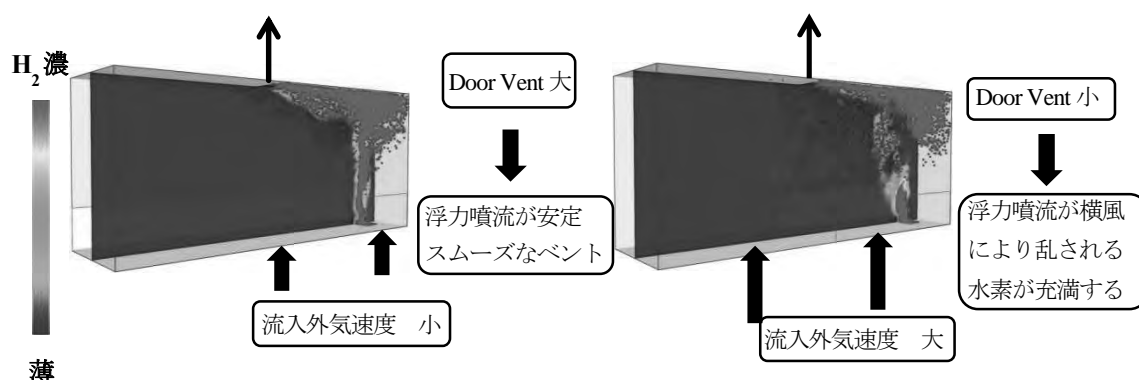


図1. 空気取込口の面積が漏洩水素拡散経路に対して与える影響

### ③ フィジカルコンピューティングと水素拡散シミュレーションとの統合

フィジカルコンピューティングにより得られる情報形態やデータ量などを整理し、水素拡散シミュレーションとの適合性や融合方法に関して見通しを得た。

## 3. 研究目標の達成状況

水素拡散経路の安定化に関して、簡易な理論解析モデルにより必要な空気取込口の面積など、確実性の高いリスク緩和に求められる空間幾何条件を部分的に導出できた。また、フィジカルコンピューティングと水素拡散シミュレーションとを融合した実融合計算を実現する上で必須な基盤の構築、水素強制ベントに関するシミュレーション精度の検証、フィジカルコンピューティングと水素拡散シミュレーションとのデータ統合に関して実現の見通しを得ることができた。このように個々の問題群に関して、着実に成果を得ており、全体的な達成度は30%である。

## 4. まとめと今後の課題

漏洩水素拡散経路を安定化させるために必要な空間幾何条件を明らかにした。また、水素強制ベントに関するフィジカルコンピューティング基盤の構築および水素拡散・滞留挙動に関する実験計測・シミュレーション精度検証の見通しを得た。さらにフィジカルコンピューティングと水素拡散シミュレーションとの融合に関する適合性と融合方法に関して見通しを得た。今後、実融合計算に基づくより確実性の高い漏洩水素リスク緩和手法の開発を進展させることが課題である。

## 5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む) なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 松浦 一雄: 漏洩水素のリスク緩和制御に関する研究, 日本混相流学会第16回オーガナイズド混相流フォーラム講演会, 松山, (2012).

\*[2] Jun Ishimoto, Guanghao Wu and Kazuo Matsuura: Super Computational Study of High-Speed Droplet-Vapor Flow and LDI Erosion, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 52-53.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

[3] 松浦 一雄, 漏洩水素ガス拡散の数値シミュレーション, 日本機械学会流体工学部門ニューズレター2012年4月号.



課題番号	J12021
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	1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\*, 竜 優介\*

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い出した。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、膜厚を測定することにより、回転速度、浸水位置と液膜厚との関係を調べ、液膜流の微粒化特性を明らかにする。すなわち、液膜流の流量は水位によって判明しているため、特定の位置での平均速度は、膜厚が既知であれば流量で割ることによって得ることが出来る。その平均流速から、圧力勾配等を算出することを目指す。

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  $Ra = 1.6$  [ $\mu\text{m}$ ] であり、円すいの表面に特別な処置は与えられていない。液膜は高速回転している円すいの外表面に沿って上昇する。そのため、膜圧を測定するためには非接触式のセンサーを使用する必要がある。そこで我々は、超音波センサを用いて図1のように膜厚の測定を行った。

センサーの分解は 0.003[mm]である。円すいの回転速度は 1100 から 2400[rpm]で、供給流量は  $Q=1$  [l/min] で測定を行った。図 2 は回転速度と膜厚の関係を示したものである。これより、回転速度が上昇するに従って膜厚が減少することがわかる。このことから、本実験では供給流量が一定なので、平均流速が増加したことがわかる。これは、回転速度の増加により液膜に作用する遠心力が大きくなり、円すいの稜線に沿った力が増大したことにより、液膜上昇の効果が増大したためと考えられる。

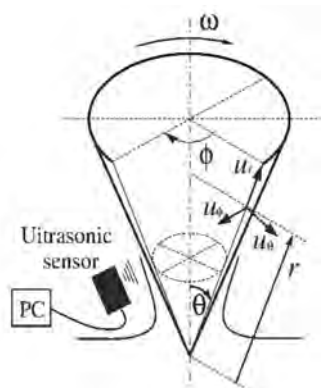


図 1 超音波センサーによる非接触計測

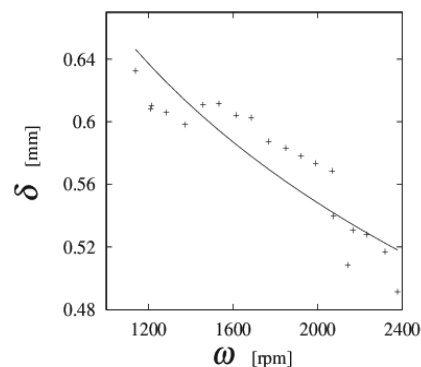


図 2 回転速度と平均膜厚との関係

### 3. 研究目標の達成状況

円すい外表面の速度分布を調べ、その流速の変化率からコリオリ力、遠心力および圧力勾配を求めるために、今回は PIV 計測ではなく超音波センサーによる膜厚測定と流量とによる平均流速を求める方法に取り組んだ。膜厚と回転速度との定性的な関係が得られたが、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、回転円すいの外表面を上昇する液膜流の膜厚を超音波センサーを用いて実験的に調べた。膜厚は回転速度が上昇に伴って減少することが分かった。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。

### 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, T., Ryu, 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 Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 158-159.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J12022
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	2012.4～2013.3
継続年数	1年目

### 災害地探査のための高機動性垂直離着陸機の開発

### Development of Vertical Take-Off and Landing Vehicle for Exploration of Disaster Area

大林 茂<sup>†</sup>, 高橋 俊<sup>\*\*††</sup>

新井 紀夫<sup>\*\*</sup>

\*東北大学流体科学研究所, \*\*東京農工大学工学部機械システム工学科

†申請者, ††所内対応教員

#### 1. 研究目的

災害地や極地探査に使用する無人航空機的设计開発が世界中でなされているが、それらの多くは前進飛行や定常飛行を対象としており、離着陸に関する研究は多くない。そこで本研究では垂直離着陸性能に着目した無人航空機的设计開発を実施する。

#### 2. 研究成果の内容

三次元非定常運動翼について非圧縮性 Navier-Stokes 解析を実施した。翼断面は最大翼厚が 10%翼弦長の楕円形として、翼弦長を 0.30m、翼スパン長を 0.50m と仮定した。流体は流速の無い、静止した標準大気を仮定し、粘性係数を  $1.82 \times 10^{-5} \text{Pa}\cdot\text{s}$ 、密度を  $1.2 \text{kg/m}^3$  とした。翼の運動は、三角関数で表される並進移動と回転移動が調和振動的に繰り返される強制運動を与えた。並進運動の振幅は 0.50m とし、回転運動の振幅は  $45^\circ$  とし、これらの三角関数の角速度は  $25 \text{rad/s}$  ( $=4.0 \text{Hz}$ ) とした。最大並進運動速度と翼弦長、そして大気条件から求められる最大の Re 数は  $2.5 \times 10^5$  程度である。本研究では、乱流モデルを用いずにシミュレーションを実施し、格子解像度の影響は吟味した上で解析を実施している。

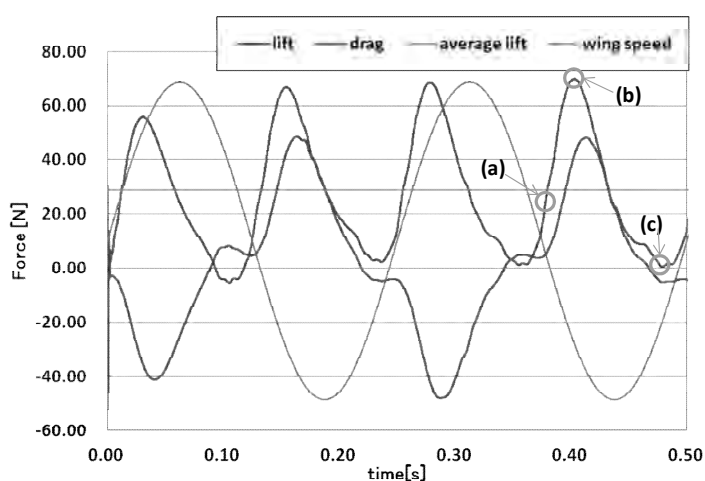


図1：翼の並進速度と揚力、抗力の応答

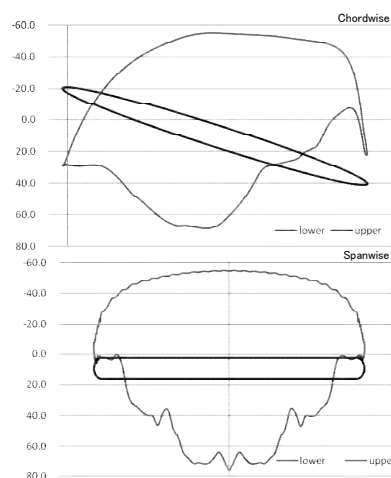


図2：最大揚力時(b)の翼弦・翼幅方向圧力分布

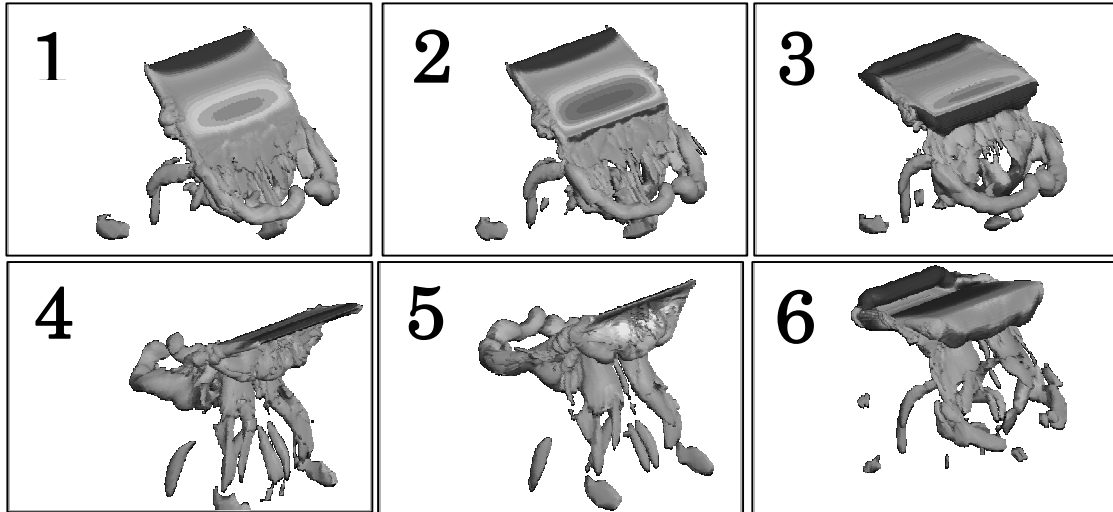


図3：渦度の等値面による翼の運動による渦の生成と剥離の様子

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、流体・運動・構造の連成シミュレーション法を確立することを最終目標としており、現在は流体・運動の連成シミュレーションを実施した段階である。その手法を用いて、運動翼の空力特性について広範囲に調査を行い、翼形状、運動についての知見を得た。今後は、この知見を活かした設計変数の選定と、翼の運動方程式と流体解析の連成シミュレーションを目指す。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、運動翼周りの非圧縮性 Navier-Stokes 解析を用いて、往復運動を行うテーパー翼とアスペクト比を変化させた翼の渦構造と空力特性を調査した。それにより揚力生成メカニズムと、前縁渦、後縁渦、翼端渦の関連性が確認できた。今後は、各設計変数に対する感度をさらに調査し、さらに実際の飛行におけるトリムを考えるべく、運動方程式を導入した連成シミュレーション手法の開発にも取り組む。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 山手瑞貴, 田近喜宏, 高橋俊, 新井紀夫: 垂直離着陸型羽ばたき航空機開発に向けた設計空間探索, 第 50 回飛行機シンポジウム, 2012 年 11 月.

\*[2] Shun Takahashi, Mizuki Yamate, Takeshi Sumita, Yoshihiro Tajika, Norio Arai: Study for Development of Flapping Wing Vehicle based on Multidisciplinary Analysis, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp.28-29.

[3] 角田壮志, 山手瑞貴, 高橋俊, 新井紀夫: ストローク翼を用いた垂直離着陸航空機のための羽ばたき翼周りの解析, 第 44 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2012, 2012 年 7 月.

[4] Takeshi Sumita, Shun Takahashi, Norio Arai, Koji Shimoyama, Shinkyu Jeong, Shigeru Obayashi: Development of Vertical Takeoff and Landing Vehicle with Flapping Wings, *30th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, (2012), AIAA Paper 2012-3336.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J12023
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	2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<sup>\*†</sup>, 服部裕司<sup>\*\*††</sup>

\*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**

前年度は、流動する媒質の物性（密度や温度のゆらぎ）による光の屈折率の変動と媒質を通して見た像の空間的変形の関係式を導き、本研究で用いる乱流データの整備を実施した。本年度は、上述の関係式において、実際の大气における屈折率の温度と圧力依存性を考慮し、非圧縮乱流の直接数値計算で得られる圧力揺らぎのデータを用いて、非圧縮乱流の圧力変動場を通して見た像の揺らぎを評価した。

大気の屈折率は以下の式で与えられる。

$$(n-1)_p = (n-1)_s \frac{p[\text{Pa}]}{96095.43} \frac{1+10^{-8}(0.601-0.00972T[^\circ\text{C}])p[\text{Pa}]}{1+0.00366197T[^\circ\text{C}]}$$

我々の日常における大気圧および気温を考慮した場合の屈折率の変動をグラフに示したものが図1である。温度変化に比べ圧力変化に対する屈折率の変動が小さいことが分かる。

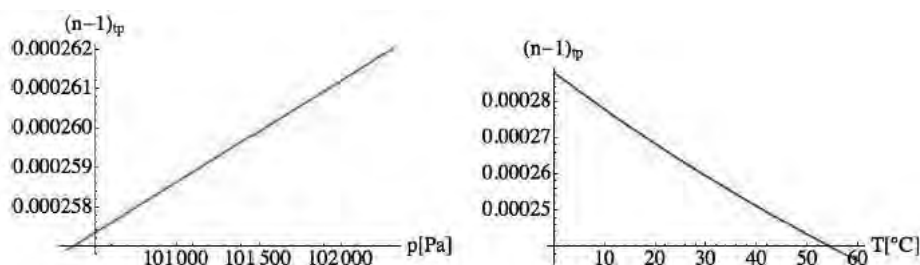


図1：屈折率の圧力および温度依存性

熱せられ温度揺らぎの幅が 30°Cにおよぶ大気を通して、翼長 100m の飛行機を 400m 離れた地点から見た場合、日常の経験では 0.1~1m の像の揺らぎを観察する。これは光線の角

度変動の大きさが  $2.5 \times 10^{-4} \sim 10^{-3}$  であることに相当する。前年度導出した関係式に基づき、簡単なランダムウォークモデルで光線の角度の触れの大きさを評価したところ、上記の日常における経験値とオーダーが一致した。

また、格子点数  $2048^3$  の非圧縮一様等方性乱流の直接数値計算で得られた乱流（テイラー長に基づくレイノルズ数 429）の圧力場のデータを実際の大气に照らし合せて、圧力の変動に起因する屈折率の変動および媒質を通した像の変形の大きさを評価した。その結果、乱流のレイノルズ数が十分大きくないこと、および圧力変動に起因する屈折率の変動そのものが小さいことにより、見て識別できる程度の像の変動は生じないことが分かった。一方、像の変動の大きさの空間的な揺らぎの特徴的な長さは積分長程度であることが分かった（図 2）。このことは、非圧縮性乱流を通して見た像の顕著な揺らぎには、積分長程度の圧力の揺らぎが重要であることを意味する。

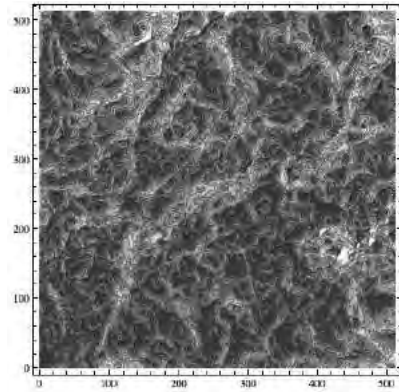


図 2：非圧縮一様等方性乱流場を通して見た像の揺らぎの大きさのコンタープロット。表示領域は  $1.55L \times 1.55L$ 。

### 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むけ、本年度は、乱流の直接数値計算データを用いて、乱流を通して見た像の変形を定量的に評価することができた。達成度は 80% である。

### 4. まとめと今後の課題

温度と圧力に依存する光線の屈折率の関係式、および、媒質を通して見た像の変形と屈折率の関係式を用いて、非圧縮一様等方性乱流を通して見た像の変形を定量的に評価することができた。しかし、その結果は、像の変形は肉眼で確認できるほど大きいものではないことを示唆した。温度変化を伴う乱流における像の変形を評価するの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] Takashi Ishihara, Yuji Hattori: Improvement of Reality of CG Motion Pictures by Hydrodynamic Effects: Effects of Turbulence, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 160-161.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J12024
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1年目(発展)

**ナノドットを用いた単電子トンネルデバイスの高周波応答特性**  
**High Frequency Operation of Single-Electron Tunneling Devices Consisting of Nanodots**

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。しかし、電子のトンネル効果を利用するデバイスであるため、その高速動作性が問題視されてきている。本研究では、SET がどこまで速く動作するかについて、実験的な検討を行った。

SETは、大きな電圧を印加するとクーロンブロッケイドが破れ動作しなくなるため、通常的手法では高周波特性を評価できない。あまり知られていないが、SETの特殊な性質としてドレイン電極から交流電圧を印加すると、クーロンダイヤモンドの非対称性から整流作用を示す。ここでは、高速動作性を評価するために、この整流作用により出力された微小ドレイン電流の周波数依存性を評価する手法を提案し評価した。図1は、用いたSi-SETの模式図である。将来の応用を考慮して、パターン依存酸化法と言うSi CMOS 互換プロセスで作成してある。SET島の両端には寄生MOSFETが形成される構成となっている。

図2はSETの整流特性を使った測定により評価した、寄生MOSFETの遮断周波数特性である。ゲート電圧 $V_g$ が増加するに

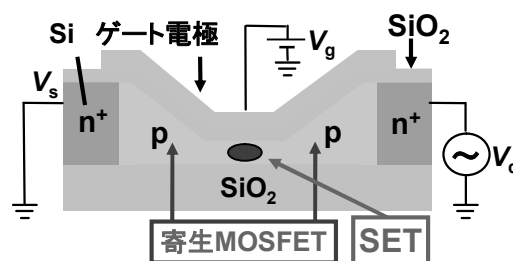


図1 Si-SETの模式図

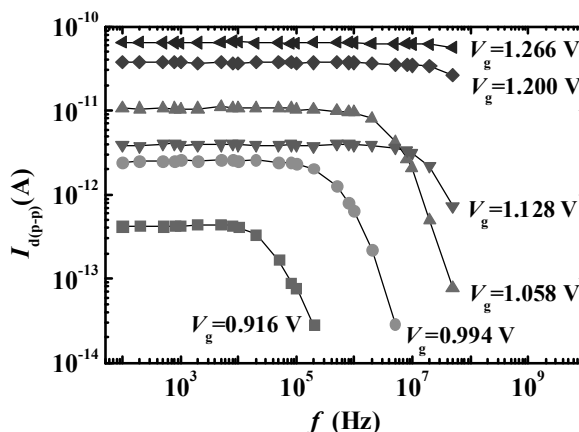


図2 SETで評価した寄生MOSFETの遮断周波数

つれて、遮断周波数が増加している様子が見え、周波数特性が評価できていることがわかる。同時に、寄生 MOSFET の影響を除去して、SET の特性を評価するためには、1.3V 以上の  $V_g$  を印加して評価すれば良いことがわかる。

図3は、ゲート電圧 4.3V で評価した SET の整流特性の周波数特性であるが、遮断周波数は見えない。SET のトンネル抵抗とゲート容量などで決まると考えられる遮断周波数は、5MHz 以下であるが、遮断されていないことがわかった。この事実は、SET のドレイン端から入射した高周波は、その周波数に関わらず整流されることを意味する。トランジスタなどの透過特性は、ゲート容量と抵抗で決まる遮断周波数をもつので、SET の場合も同様な遮断周波数が存在すると考えてしまっていたが、SET のクーロンブロッケイド現象には、遮断周波数は無いと言う結論となる。

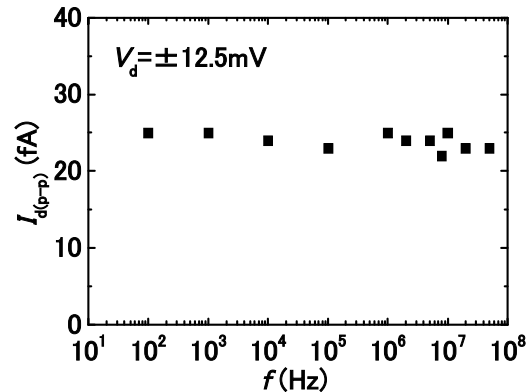


図3 SET の整流特性の周波数特性

### 3. 研究目標の達成状況

SET を発展させた、将来の低消費電力と高機能を併せ持つ、フレキシブルな機能デバイスである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、その高性能化について考察する際には、どこまで速く動作可能か問題となる。これを明らかにするために、重要な高周波特性について実験的な評価ができた。その結果、SET のクーロンブロッケイド現象には、遮断周波数は無く、THz 級の高周波の検出も可能になると言う結論を得た。

### 4. まとめと今後の課題

SET は高インピーダンスデバイスとして高速動作や高周波動作はしないと信じられてきたが、今回の検討で、周波数の制限なく整流特性を示し、たとえ THz の高周波でも整流できることが判明した。これらの特性を活かして、さらなる高性能化を目指して、SET の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が課題となる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- \*[1] M. Jo, Y. Kato, M. Arita, Y. Ono, A. Fujiwara, H. Inokawa, Y. Takahashi, and J. B. Choi: Effect of arrangement of input gates on logic switching characteristics of nanodot array device, *IEICE Transactions on Electronics*, E95-C, (2012), pp. 865-870.
- [2] S. J. Kim, J. J. Lee, H. J. Kang, J. B. Choi, Y.-S. Yu, Y. Takahashi, and D. G. Hasko: One electron-based smallest flexible logic cell, *Applied Physics Letters*, 101, (2012), 183101.
- [3] H. Takenaka, M. Shinohara, T. Uchida, A. Fujiwara, Y. Ono, K. Nishiguchi, H. Inokawa and Y. Takahashi: High-frequency properties of Si single-electron transistor, *2012 Silicon Nanoelectronics Workshop*, Hawaii, (2012), pp. 61-62.

他 合計 7 件

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] M. Kudo, M. Arita, K. Hamada, and Y. Takahashi: Preparation of ReRAM samples for in-situ TEM experiment, *EMRS 2012 Spring Meeting (EMRS-12)*, Ref-Number L8P-27, Strasbourg, (2012).

他 合計 22 件



Project code	J12025
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st year

## Designing of Microfluidic Device to Temporally and Spatially Control Oxygen Tension for Cellular Experiment

Kenichi Funamoto\*†, Roger D. Kamm\*\*††, Ioannis K. Zervantonakis\*\*,  
Yuchun Liu\*\*\*, Christopher J. Ochs\*\*\*\*

\* Institute of Fluid Science, Tohoku University,

\*\* Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology

\*\*\* Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore

\*\*\*\* Singapore-MIT Alliance for Research and Technology

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Both *in vivo* and *in vitro* studies have demonstrated that the hypoxic tumor microenvironment with temporal and spatial oxygen gradients regulate cancer metastasis. Although a conventional multi-gas incubator can create hypoxia condition for cell culture, it requires time to achieve stable low oxygen tension due to equilibrium and it's difficult to create a spatial oxygen tension gradient. In this project, we design a microfluidic device which can temporally and spatially control oxygen tension for 3D cell culture. Then, effects of oxygen heterogeneity on cancer/endothelial cell processes (migration, endothelial permeability) are investigated.

### 2. Details of program implement

The improvement of temporal and spatial controllability of oxygen tension in the microfluidic device was investigated by performing numerical simulations. As the result, the optimal combination of gas and media flow rates to control the oxygen tension was obtained (see Fig. 1). A series of experiments was performed to optimize experimental conditions (cell seeding density, extracellular matrix properties) by coculturing fibroblast and endothelial cells in the device. Dr. I.K. Zervantonakis stayed the Institute of Fluid Science from Jan. 7, 2013 to Jan. 21, 2013 for the cellular experiments, and he gave a one-hour lecture in the IFS life science cluster seminar.

### 3. Achievements

The original target of this project was almost achieved. The developed microfluidic device enabled us to conduct 3D cellular experiments to investigate cellular responses, such as cellular morphology, gene expression and cell-cell interactions, under controlled oxygen conditions. Preliminary experiments showed that the device would be a powerful tool for investigations of metastasis of cancer cell and for those of endothelial cell damage due to ischemia/reperfusion. Some of the results obtained through the project were published in a journal paper.

### 4. Summaries and future plans

We developed a microfluidic device to control oxygen tension under 3D cell culture conditions, and have investigated the controllability of oxygen tension. Also, we conducted preliminary experiments to culture different cell types inside the device to demonstrate the ability of investigating cell-cell interaction.

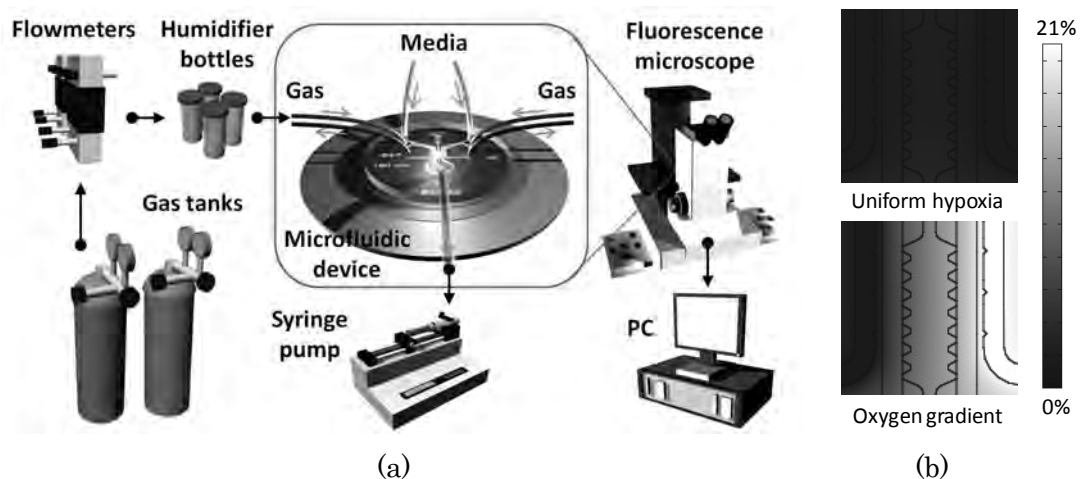


Figure 1 : (a) The experimental setup for hypoxia studies with cell culture by using the microfluidic device, and (b) the controlled oxygen tension in the device.

Our future study reveals the effects of hypoxic conditions on cellular behaviors and cell-cell interactions. The following topics are investigated by cellular experiment 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.

5. Research results (\* reprint included)

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

\*[1] K. Funamoto, I.K. Zervantonakis, Y. Liu, C.J. Ochs, C. Kim, R.D. Kamm: A Novel Microfluidic Platform for High-Resolution Imaging of a Three-Dimensional Cell Culture under a Controlled Hypoxic Environment, *Lab on a Chip*, 12(2012), pp. 4855-4863.

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

[2] K. Funamoto, I.K. Zervantonakis, Y. Liu, R.D. Kamm: Oxygen Tension Control in a Microfluidic Device for Cell Culture, *Proceedings of the Ninth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2012)*, (2012), pp. 724-725.

\*[3] K. Funamoto, I.K. Zervantonakis, Y. Liu, C.J. Ochs, R.D. Kamm: Computational Simulation to Create Low Oxygen Tension in a Microfluidic Device for Cell Culture, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 88-89.

[4] 船本 健一, I.K. Zervantonakis, Y. Liu, R.D. Kamm: 低酸素下細胞実験のためのマイクロ流体デバイスの開発, 日本機械学会第4回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, No. 12-55, (2012), pp. 77-78.

[5] 船本 健一, I.K. Zervantonakis, Y. Liu, R.D. Kamm: 酸素濃度制御下の細胞実験のためのマイクロ流体デバイスの設計, *COMSOL Conference Tokyo 2012*, (2012).

[6] 船本 健一, I.K. Zervantonakis, Y. Liu, R.D. Kamm: マイクロ流体デバイスを用いた低酸素下におけるがん細胞の挙動の観察, 日本機械学会第25回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No. 12-48, (2013), pp. 563-564.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J12026
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	2012.4～2013.3
継続年数	3年目

**胎仔脳出血メカニズムの流体力学的解析**  
**Rheological Analysis of the Mechanism of Fetal Brain Hemorrhage**

船本 健一\*†, 伊藤 拓哉\*\*††, 木村 芳孝\*\*

船本 聖絵\*\*, 早瀬 敏幸\*\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*東北大学医学系研究科融合医工学分野,

†申請者, ††所外対応研究者

**1. 研究目的**

小児麻痺は全出産の0.3%を占め、その60%が脳出血によるものである。満期で出生した脳障害児の90%が周産期における低酸素・虚血などの急性ダメージに起因すると報告されている。しかし、発症の機構に関しては不明な点が多い。この研究は妊娠末期のマウス胎仔に対し低酸素負荷を行い、胎仔脳出血の発症過程において血流変化を解析することにより、脳出血の発症に至るメカニズムを流体力学的に解明することを目的とした。

**2. 研究成果の内容**

母体栄養制限を行った胎仔脳出血モデルマウスを使用して実験を実施した。母マウスの子宮および卵巣動脈の5分間圧迫し、その後5分間開放する一連の操作を計3回繰り返す方法により胎仔に虚血再灌流を負荷し、胎仔脳出血を誘発させた。その過程において、虚血再灌流負荷を与えた胎仔の脳の超音波Bモード画像を小動物用超音波高解像度イメージングシステムにて取得した。

昨年度までの研究により、高輝度部位と脳出血の発症部位が一致と2回目の解放時に側脳室近傍(R-LV, L-LV)で超音波Bモード画像中の輝度変化のバラツキが大きくなることを見いだした。本園度は、例数を増やし、輝度の変化から脳出血発症のタイミングを統計的に検出することを試みた。

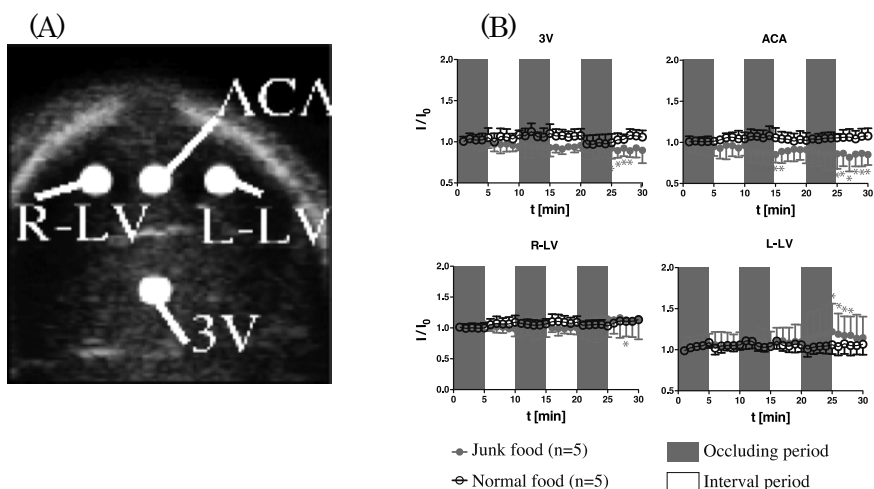


図1：胎仔脳の超音波Bモード画像中の各関心領域(A)における輝度値の変化(B)

図1に各関心領域における輝度値の変化を示す。母体栄養制限群の胎仔の脳の超音波Bモード画像において、母体栄養制限群の側脳室近傍において輝度が2回目の血管圧迫時および3回目の解放時に有意に増加した。一方、対照と想定していた第三脳室領域(3V)および前大脳動脈領域(ACA)では2回目圧迫以降輝度が有意に減少し、脳全体の血流量が2回目の圧迫以降継続して減少していることを示唆する。この血流量の減少の意味することが出血発症による漏出なのか、血流の再分配機能の破綻なのかは不明であり、今後の課題である。

### 3. 研究目標の達成状況

小動物用超音波高解像度イメージングシステムを用いた脳断面の超音波Bモード計測による脳出血のタイミングの検出には、関心領域の設定や解析手法における改善課題が明らかになった。

### 4. まとめと今後の課題

子宮動脈圧迫解放による胎児脳血流量の変化を小動物用超音波高解像度イメージングシステムの超音波Bモードで検出することに成功した。しかし、脳出血発症のタイミングの検出には関心領域の面積の設定や解析手法など解決すべき課題が残された。今後も継続して研究を実施し、これらの課題の解決を目指す。

### 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] Takuya Ito, Kenichi Funamoto, Kiyoe Funamoto, Toshiyuki Hayase and Yoshitaka Kimura: Rheological Analysis of the Mechanism of Fetal Brain Hemorrhage, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 116-117.
- [2] Kenichi Funamoto, Takuya Ito, Clarissa Velayo, Kiyoe Funamoto, Kaori Tanabe, Ai Nakamura, Yupeng Dong, Yukari Onuma, Asami Katsumata, Yaegashi Nobuo, Kunihiro Okamura, Yoshitaka Kimura: A novel approach to understanding perinatal hypoxic-ischemia, *11th World Congress in Fetal Medicine*, Kos, (2012).
- [3] Takuya Ito, Kiyoe Funamoto, Naoaki Sato, Ai Nakamura, Kaori Tanabe, Tetsuro Hoshiai, Kaori Suenaga, Junich Sugawara, Satoru Nagase, Kunihiro Okamura, Nobuo Yaegashi, and Yoshitaka Kimura: Maternal undernutrition induces the expression of hypoxia-related genes in the fetal brain, *11th World Congress in Fetal Medicine*, Kos, (2012).
- [4] 伊藤拓哉, 木村芳孝, 佐藤尚明, 星合哲郎, 八重樫伸生: 胎児脳出血は p53 シグナル不活性化で抑制される, 第64回日本産婦人科学会学術集会, 神戸, (2012).

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(受賞) 高得点演題, 胎児脳出血は p53 シグナル不活性化で抑制される, 伊藤拓哉, 木村芳孝, 佐藤尚明, 星合哲郎, 八重樫伸生, 2012. 4. 14, 日本産婦人科学会, 第64回日本産婦人科学会学術集会.

課題番号	J12027
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1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**

磁性粒子をオイル中に分散した固液分散系では、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 効果は磁場によって流体中の粒子分散構造が変化することによって生じる。そのため、分散粒子の磁氣的構造形成と MR 効果の関係を理解することは MR 流体の開発に重要となる。

本研究では、申請者らが合成したナノ Fe 粒子分散コロイドの磁氣的構造形成と MR 効果との関係を明らかにするとともに、MR 流体のための粒子分散制御法の確立を目的とする。

**2. 研究成果の内容**

流体科学研究所・中野政身教授が開発した磁気レオロジー測定装置と磁氣的に誘起された粒子構造の可視化技術を用いて、申請者らが合成したナノ Fe 粒子コロイド分散系の磁性粒子の磁氣的構造形成と MR 効果との関係について調べた。比較例として、ミクロンサイズの Fe 粒子の分散系についても同様の実験を実施した。

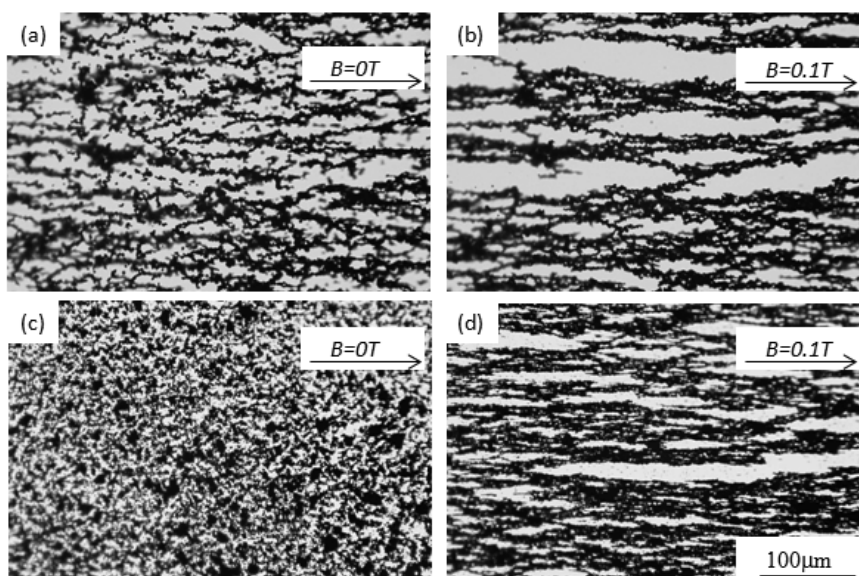


図 1: Fe 微粒子の分散状態 (5vol%), (a)(b)ミクロンサイズ (約 7 $\mu$ m), (c)(d)ナノサイズ (約 100nm)

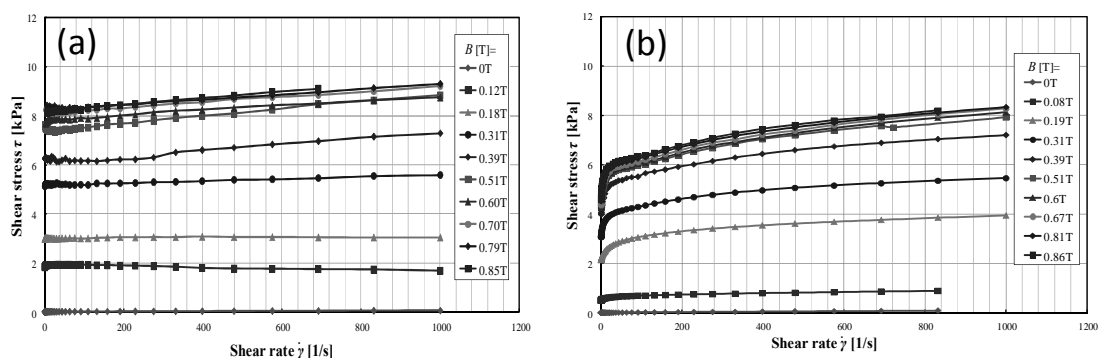


図 2：粒子サイズと MR 効果：(a)ミクロンサイズの Fe 粒子分散系，(b)ナノサイズの Fe 粒子分散系（粒子濃度：10vol%，分散媒：シリコンオイル）

ナノ粒子およびミクロン粒子ともにオイル中で凝集構造を形成し（図 1(a), (c)），磁場印加によって配向構造化した（図 1(b), (d)）。両者の分散・凝集状態は異なるため，磁氣的な配向構造も異なり，結果として MR 効果の大きさも異なった（図 2）。オイル等の非水溶媒中での粒子間の凝集力は主に分子間力によるものであり，凝集性はナノ粒子の方がより大きい。この凝集性の低減が均質な磁氣的配向構造の形成と MR 効果の向上につながるものと示唆された。

### 3. 研究目標の達成状況

コロイド分散系の磁気粘性効果に関する研究は少なく，また磁氣的に誘起されたコロイド粒子の構造変化と磁気粘性効果との関係を調べた研究報告例がない。今回の共同研究によって，Fe ナノ粒子分散系における巨視的な磁氣的配向構造に関する知見が得られるなど，当初の研究目標を達成した。

### 4. まとめと今後の課題

ナノ Fe 粒子分散コロイドの磁氣的構造形成と MR 効果との関係を調べるとともに，ミクロンサイズの Fe 分散系についても同様に実施し，粒子サイズとその粒子凝集性が MR 効果に及ぼす影響についての基礎的知見を得た。今後はナノ Fe 粒子のオイル中での凝集制御が課題となるが，コロイド化学的な手法だけでなく，ミクロン粒子との複合化によるアプローチ等も検討する予定である。

### 5. 研究成果

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

Project code	J12028
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	3rd year

## Non-Destructive Detection of Cracks Using Electromagnetic Phenomena

Jinhao Qiu\*†, Toshiyuki Takagi\*\*††

Jun Cheng\*, Tetsuya Uchimoto \*\*

\*State Key Laboratory of Mechanics and Control for Mechanical Structures,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The recent large quantities usage of carbon-fibre reinforced composites (CFRP) in the aeronautics engineering has suggested a new application trend for the eddy current testing. Composite materials, however, are inherently anisotropic, which means that the classical ECT technologies for isotropic metal materials are no longer applicable. This study will carry out the new analysis to develop effective strategies for using eddy currents in quantitative NDE of carbon-fibre reinforced composites. The electromagnetic characteristics of the material as well as the properties of the ECT signals will be studied, using experiment and numerical simulation methods.

### 2. Details of program implement

The anisotropic electrical property and eddy current path in CFRP are analyzed. A laminated CFRP sample has three electrical directions: longitudinal direction of fibres, transversal directions of fibres and thickness direction. Fig.1 shows the variations of normalized impedance in the three electrical directions as function of frequency. According to the figure, the impedance in the longitudinal direction mainly depends on the properties of the carbon fibres. The fibre-contact-network and capacitive couplings at high frequencies produce electrical conductance in the other two directions.

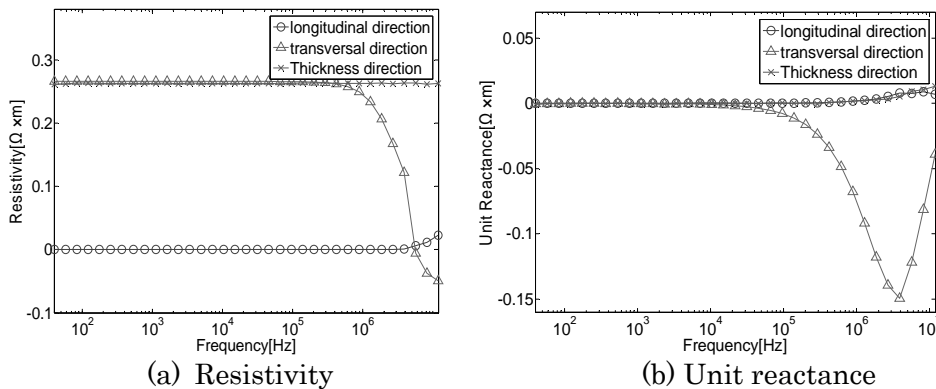


Figure 1: Normalized impedance-frequency characteristic in the three directions of CFRP.

Based on the experimental investigation, eddy current is expected to flow along fibres and from one fibre to another via the contact points. At high frequency region, due to the capacitive coupling, the current path across the resin matrix is also a

favorable path. As the eddy current spreads in the laminate instead of circulating in individual fibres, the integrated modeling of CFRP laminate with equivalent anisotropic conductivities is effective in the finite element simulation.

The reduced magnetic vector potential ( $A_r$ ) formulation using edge-element finite element method is proposed to enable the 3D electromagnetic simulation of anisotropic medium. In the modeled system, the conductivity and permeability of CFRP region are represented by tensors in order to take into account electrical anisotropy. The  $A_r$  formulation and way to calculate the pickup signals are derived. The usage of edge elements guarantees continuity of electric field on the interface between two plies of CFRP laminate. To validate of the developed simulation code, a comparison is conducted between the numerical signals and experimental results of surface cracks in a CFRP sample, which indicates the code can predict ECT signals with good precision.

### 3. Achievements

- (1) The anisotropic impedances in the three electrical directions of CFRP material are measured.
- (2) Eddy current path in the CFRP is obtained on the basis of the measuring results.
- (3) A numerical solver based on  $A_r$  formulation and edge based finite elements is developed to simulate the eddy current in CFRP laminate.
- (4) The validity of the solver is proven.

### 4. Summaries and future plans

From April 2012 to March 2013, we worked on the electromagnetic properties and interface behaviors of CFRP laminate. It turned out that the electrical conductance of CFRP is directional, and its conductivities in the three electrical directions are distinct from each other. We managed to establish the finite element model for the simulation of eddy current in CFRP laminated composite and ECT signals. The eddy currents in the layers and on the interfaces are obtained. At present we are analyzing the eddy current perturbation caused by the delamination in CFRP, and optimizing the probe configuration and test frequency for the identification of delamination and impact defects with the help of numerical simulation.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
\*[1] Jun Cheng, Jinhao Qiu, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto and Ning Hu: Numerical analysis of correlation between fibre orientation and eddy current testing signals of carbon-fibre reinforced polymer composites, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 39 (2012), pp. 251-259.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)  
\*[2] Jun Cheng, Jinhao Qiu, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto and Ning Hu: Development of Numerical Solver to Calculate Eddy Current Testing Signals for Anisotropic Laminated Epoxy-Carbon Fibre Composite, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 174-175.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.



課題番号	J12029
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1年目

ニュートラルビーム改質チャンネル層電界効果型トランジスタへの新規開発アプタマーによる  
 バイオ分子選択固定高感度バイオセンサー  
 Development of a Field Effect Transistor with Channel Surface Covered by Probe-Biomolecules  
 with a Newly Developed Aptamer

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

ニュートラルビームにより作製したチャンネル層をセンシング部とする電界効果型トランジスタにおいて、チャンネル層表面を認識するアプタマー（表面特異的認識ペプチド）を用いて DNA などのバイオ分子を固定し、一塩基多型などを検出できるバイオセンサーを開発する。本手法はアプタマー付 DNA 溶液をチャンネル層に塗布するだけで固定できる特徴を持ち同時に、被覆されていないチャンネル表面がアプタマー付 DNA により確実に被覆されることからしてプローブとなる DNA を高密度に確実に被覆できる特徴も持つ。チャンネル層としては安定性に特徴を持たせダイヤモンドライクカーボン層を作製し使用することを最終目標とする。

2. 研究成果の内容

まず第一段階として電界効果型トランジスタでのセンシングを行うため奈良先端大でトランジスタチャンネルを想定した熱酸化シリコン表面を作り、この表面を認識するアプタマーをファージディスプレイ法により作製した。熱酸化膜付シリコンウエファを115℃で10分間オゾン洗浄し、尾部にランダムペプチドを提示するM13ファージ溶液に浸漬した。その後、吸着力の弱いファージだけを酸で洗い流すことで選択し、(図1参照)、得られたファージを大腸菌で増幅した後、再び吸着実験を行った。その後強い吸着を見せたファージの遺伝子解析を行って酸化シリコン吸着性ペプチド=アプタマーを作製した。得られたアプタマーのアミノ酸シーケンスおよび酸化シリコンに対する吸着乗数を表1に示す。得られたアプタマーのうち2つは数十μM程度のかい離定数を持つことから、これらを複数本持つプローブDNAにより、目的のセンサチャンネル部に簡便にプローブDNAを高密度に配置できるめどが得られた。

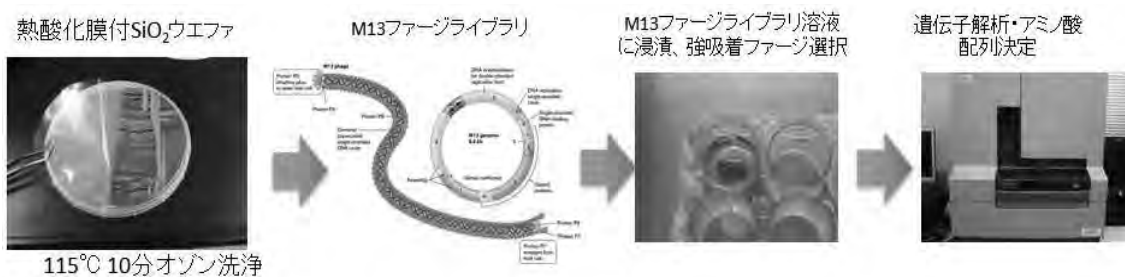


図1：ファージディスプレイ法と作製したアプタマーのアミノ酸配決定の流れ

表1：ファージディスプレイ法で得た熱酸化シリコン結合アプタマーのアミノ酸配列

吸着回数	名称	アミノ酸シーケンス	分子量	平衡乗数
8回乖離脱着	8rUay	GPHPHHHHPQ	1432	~18.9 μM
8回乖離脱着	8rUby	APHPHQHSHSI	1385	~309 μM
6回乖離脱着	6rUay	KLPFHKPAKHCL	1420	~242 μM
4回乖離脱着後	4rUay	HALHMKPHNAR	1449	~19.2 μM

### 3. 研究目標の達成状況

酸化シリコンを認識するアプタマーを得ることができた。アプタマーの吸着定数が予想ほど伸びなかったが、現在このアプタマーを複数個束ねた分子とする実験を推進している。

### 4. まとめと今後の課題

新規テーマであるニュートラルビーム改質チャネル層電界効果型トランジスタのチャネル層に吸着させるための新規アプタマーの開発に取り組み、4つのアプタマー候補をファージディスプレイ法で作製した。その吸着力をQCMにて測定し、2つのアプタマーを作製した。今後はこのアプタマーを複数本持つDNApローブを作製して吸着特性の向上を行う。

### 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] N. Okamoto, T. Yoshida, K. Iwahori, Y.S. Yang, I. Yamashita: Bio Panning of Silicon Oxide Specific Peptides for Si Nanowire Transistor, *Taiwan-Japan Workshop on Nano Devices 2013*, Hsinchu, Taiwan 5<sup>th</sup> March 2013.

[2] T. Yoshida, N. Okamoto, K. Iwahori, Y.S. Yang, I. Yamashita: Si Nanowire Specific Binding Properties of the Newly Developed Peptides, *Taiwan-Japan Workshop on Nano Devices 2013*, Hsinchu, Taiwan 5<sup>th</sup> March 2013.

\*[3] I. Yamashita, S. Samukawa: Development of a Field Effect Transistor with Channel Surface Covered by Probe-Biomolecules with a Newly Developed Aptamer, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 176-177.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）該当なし

課題番号	J12030
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	2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\*\*††

渡邊 正人\*, 野平 博司\*, 和田 章良\*\*

\*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, 酸化膜界面の結合状態について詳細に調べた.

図1に作製した試料構造を示す. 通常, 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. ここで, 歪み Ge 上への Si キャップ層形成の効果を調べるため, キャップ層を成長した構造としない構造のそれぞれを作製し, その上に膜厚 3-4nm の NBO 膜を形成した.

図2に両構造で NBO 膜形成後の XPS スペクトルを示す. Si キャップ層を挿入した構造において(図2(a)), 酸化膜厚増加によるピーク増加が見られ, 歪みチャンネル上にも, バルク Si と同様に制御性高く NBO 膜が形成できることを示している. また, Ge の酸化に起因するピークが全く見られず, Si キャップ層挿入によって Ge が完全に埋め込まれ, Ge の酸化を抑制することができていると言える. 一方, Si 層を挿入せず, Ge を直接酸化した構造における XPS

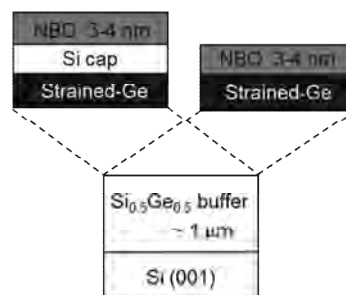


図1: 歪み Ge 試料構造

スペクトルを図2(b)に示す。Geを自然酸化した試料のスペクトルと比べると低エネルギー側にシフトしていることが分かり、NBOによってサブオキシドの形成が抑制されていることを示唆している。

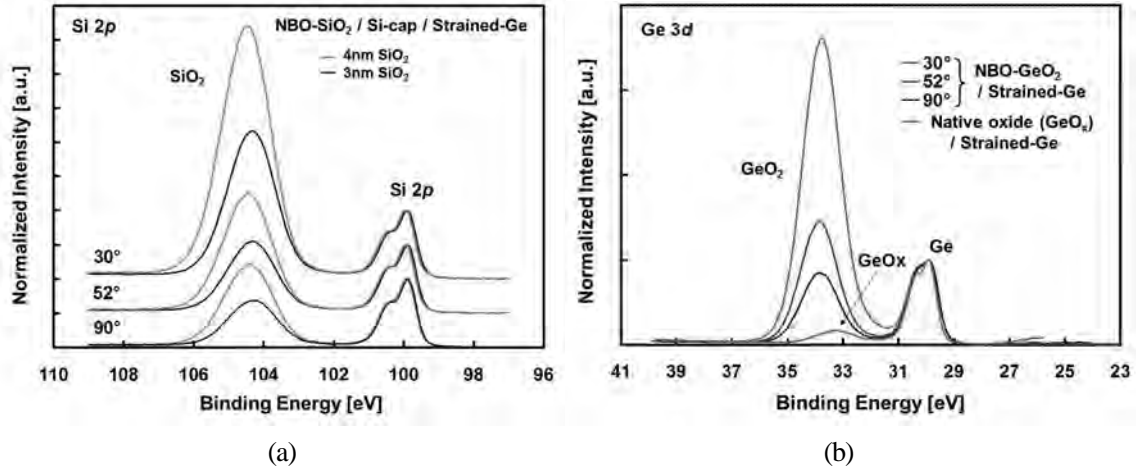


図2：(a) Si キャップ層を挿入した試料のXPS Si 2p スペクトル

(b) Si キャップ層を挿入していない試料のXPS Ge 3d スペクトル

### 3. 研究目標の達成状況

Si 基板上に SiGe バッファー層を形成後、歪み Ge チャネルを成長させ、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 SiO<sub>2</sub>層が、Ge の直接酸化の構造においても、サブオキシド形成が抑制された良質な GeO<sub>2</sub> が形成されていることを示す結果を得ており、今後の高移動度歪み GeMOSFET へ向け順調に進んでいると言える。

### 4. まとめと今後の課題

MBE による高品質 Ge チャネル結晶成長、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

\*[1] Kentarou Sawano, Masato Watanabe, Arata Komatsu, Hiroshi Nohira, Akira Wada, Seiji Samukawa: Development of High Performance Strained-Ge Channel Device Utilizing Neutral-beam Oxidized Film, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 128-129.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

Project code	J12031
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	3rd year

## Parallel Computations on the Base of GPU for Modeling of Gas Combustion Processes

Roman Fursenko\*†, Kaoru Maruta\*\*††

Sergey Minaev\*, Fedor Palessky\*, Evgeniy Sereshchenko\*, Hisashi Nakamura\*\*

\* Institute of Theoretical and Applied Mechanics, SB RAS, Novosibirsk, Russia,

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Project oriented to development of effective algorithms of numerical simulations of near limits combustion waves that will promote design of lean burn and eco-friendly gas combustion technologies.

### 2. Details of program implement

Increasing interest for clean and effective combustion technologies encourages investigations of lean premixed flames due to less pollutant emission and higher efficiency. Difficulties arising in the fundamental investigations of near-limit lean premixed flames are attributed to complex interaction of transport, chemical processes and gas flows. Modeling of these processes demands development of effective methods of simulations.

The GPU-based numerical algorithms of two different fundamental models underlie more complex combustion models have been elaborated. 3D reaction-diffusion model

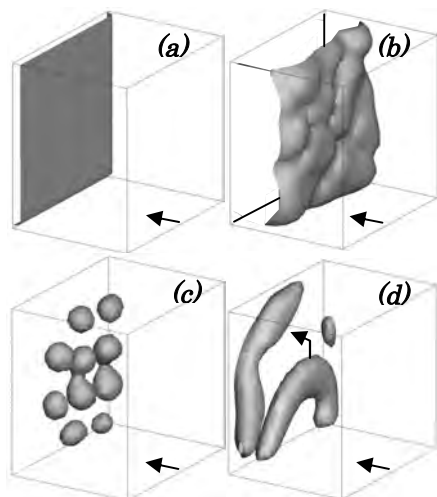


Fig. 1. Typical flame structures (equiscalar surfaces  $T=0.6$  are depicted) of planar (a), cellular (b), sporadic (c) and spiral-like (d) counterflow flames.

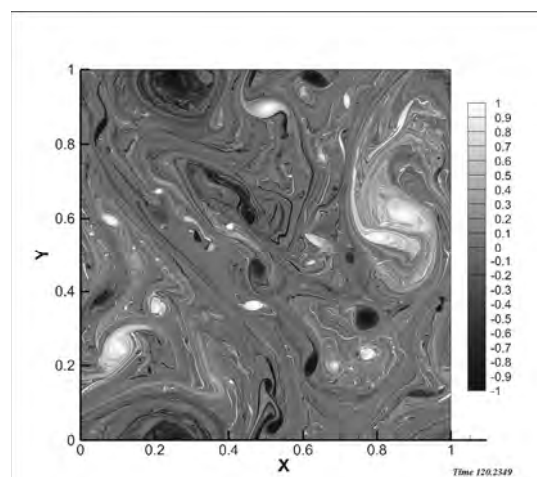


Fig. 2. Spatial distributions of vorticity  $w$  field at time 120

for lean stretched premixed flames with radiative heat losses (Fig.1) and 2D hydrodynamic model of turbulent flow (Fig.2) were examined. Flammability limits and regions of existence of different combustion regimes (see Fig.1) of the

low-Lewis-number lean premixed flames with radiative heat losses propagating in stagnation-plane flow have been investigated. In particular, it was found that the low-Lewis-number counterflow flames can exist beyond the flammability limits of 1D planar flame in the form of sporadic combustion wave. The 2D hydrodynamic simulations emphasized on modeling of evolution of large gradients of vorticity in turbulent flows. In contrast to the first model the thermo-diffusion effects are ignored in this simulation. The 2D hydrodynamic simulations show that the Kraichnan type with fall-off  $k^{-3}$ -spectrum is appeared due to the formation of sharp vorticity gradients (see Fig.2). The performance results show that GPU gives a significant facilitation for computations of both examined problems.

In the course of project implementation Russian project members (R.Fursenko, E. Sereshchenko and S.Minaev) 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 12<sup>th</sup> International AFI/TFI conference and presented the results of the project.

### 3. Achievements

All results which have been expected in the submitted project were achieved. The fulfillment of the project allows decreasing of computation cost and computation time of simulations of fundamental models underlie more complex combustion models. On the base of numerical simulations and microgravity experiments new knowledge on dynamical behavior, flammability limits and regions of existence of different combustion regimes of lean low-Lewis-number premixed flames have been obtained.

### 4. Summaries and future plans

Flammability limits and regions of existence of different combustion regimes of the low-Lewis-number lean premixed flames with radiative heat losses propagating in stagnation-plane flow has been studied numerically. The comprehensive regimes diagram was obtained. The evolution of vorticity in 2D turbulence was investigated in order to study the energy spectra of vortex motion. It was found that the spectrum coincides with the theoretical direct cascade of the Kraichnan type with fall-off  $k^{-3}$ -spectrum.

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: *Proceedings of Combustion Institute*, 34/1, (2013), pp. 981-988.
  - [2] A.N. Kudryavtsev, E.A. Kuznetsov, E.V. Sereshchenko: *JETP Letters*, 96, (2013), p. 783.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - \*[3] R. Fursenko, E. Sereshchenko, S. Minaev, K. Maruta, H. Nakamura: Parallel computations on the base of GPU for modeling of gas combustion processes, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 54-55.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

Project code	J12032
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st year

## Investigations of Sporadic Regimes of Gas Combustion

Sergey Minaev\*†, Kaoru Maruta\*\*††  
 Evgeniy Sereshchenko\*, Dmitrii Mazurok\*, Nakamura Hisashi\*\*,  
 Takase Koichi\*\*

\*ITAM SB RAS, Novosibirsk, Russia,

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The objective of the proposed project is to develop tractable nonlinear model of spatially non uniform combustion waves that is capable to describe collective dynamics of localized in space hot spots.

### 2. Details of program implement

The most distinctive feature of combustion waves is its ability to assume the form of a self-sustained reaction wave propagating at a well-defined speed. Generally the flame front is considered as continuous surface although it can possess cellular structure in some cases. Formation of flame cellular structure is result of development of thermo-diffusive instability. The instability is most prominent in weak near-limit low-Lewis-number premixtures sensitive to radiative heat losses. The combustion wave in this case represents an array of separate flame-ball like objects in the state of permanent chaotic motion. Such combustion wave may be termed as “sporadic combustion wave” to distinguish its special structure being different from conventional continuous flame structure. One of the unusual features of sporadic combustion wave is incomplete burning of fuel which remains in the combustion products. This incompleteness is caused by fuel leakage through the gaps among ball-like flames. The uncertainty in evaluation of total heat release related with incompleteness of combustion as well as complex spatial-temporary structure of reaction zone create difficulties in estimation of propagation velocity of sporadic combustion waves. The present study is an attempt to estimate propagation velocity and to distinguish general parameters determining dynamics of sporadic combustion wave. We suggested that propagation velocity of sporadic combustion wave is close to maximal velocity of a single ball-like flame propagating in the tube. To estimate this value we conducted 2D numerical simulations of gas combustion in the rectangular channel with different diameters to select optimal diameter of the channel corresponding to maximal propagation velocity of ball-like flame. The set of governing equations [1] describing flame propagation within thermo-diffusion model was solved numerically. It was demonstrated that in very narrow channel the flame is extinguished after ignition. The combustion becomes possible if the channel diameter exceeds a certain critical diameter. With increase of channel diameter a single fast moving flame cell is formed Figure 1 (a). In the wider channels the initially continuous flame fronts quickly break into disconnected flames that are convex toward the fresh gas and are separated by narrow, extinguished regions Figure 1 (b)-(e). These cells extinguished in some cases, but division of the leading

cells typically replaces lost cells. The numerical simulations revealed that maximal propagation velocity of flame ball is attained in a channel with near critical diameter when the flame propagates without quenching. With increase the heat loss parameter the flame balls velocity decreases. This conclusion coincides with theoretical and experimental results on sporadic flames in counter flow geometry [1]. In the course of project implementation Russian project members visited Institute of Fluid Science, Tohoku University and took part in the 12<sup>th</sup> International AFI/TFI conference.

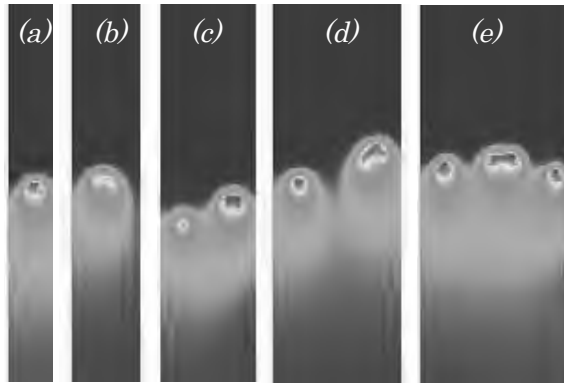


Figure1. Temperature distributions in the channels with combustion of lean low Lewis number premixture evaluated at different diameters of the channel.

### 3. Achievements

All results which have been expected in the submitted project were achieved. The results of this project demonstrated possibility of entering concept on flame front of sporadic combustion wave even in the case when the combustion wave is constituted of separate ball-like flames being in the state of chaotic motion. The method of evaluation of propagation velocity of a sporadic combustion wave consisted of separate ball-like flames is proposed.

### 4. Summaries and future plans

The future research will be directed towards the verification of theoretical results in future experiments on lean low-Lewis-number premixed gas combustion and further development of analytical theory of sporadic combustion regimes.

### 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: *Proceedings of Combustion Institute*, 34/1, (2013), pp. 981-988.

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

\*[2] S. Minaev, E. Sereshchenko, D. Mazurok, R. Fursenko, H. Nakamura, K. Takase, X. Li, T. Tezuka, K. Maruta: Investigations of Sporadic Regimes of Gas Combustion, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 56-57.

#### 3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.



Project code	J12033
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	2nd year

## Visualization, “Real Time” Algorithms and Parallel Computations of Reacting Flows

Boris Mazurok\*†, Kaoru Maruta\*\*††  
Minaev Sergey\*\*\*, Boris Dolgovesov \*\*, Nakamura Hisashi\*\*

\*IAE SB RAS, Novosibirsk, Russia

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\* ITAM SB RAS, Novosibirsk, Russia

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Development of effective numerical codes for simulations, visualization and control of reactive flows on GPU to promote advanced combustion technologies.

### 2. Details of program implement

Nowadays rapid developments of computation facilities give rise specific problems connected with large data storing and visualization of complex 3D objects. Although storing of all computed data in simulations allows extracting exact value of computed variables at any point of computation domain, it requires extremely large disc space and makes problematic visualization of process during long time evolution. In some applications it is important to change point of observation of computed 3D objects in the course of visualization. Large volume of storing data makes impossible to realize this opportunity. To overcome these difficulties one can apply special algorithms of data compression. We developed two algorithms, one is based on uniform data sampling with following post-processing steps allowing picture quality improvement and another is based on adaptive grid method. These algorithms were applied to the data obtained in the course of back-to-back counterflow premixed flames simulations [1]. In this configuration the isosurfaces of temperature or concentration forms complex spatial-temporal pattern is composed of 3D objects resembling liquid drops. In order to speed up numerical computations the GPU-based parallel numerical code has been developed. In many applications the qualitative analysis of dynamical behavior of examined objects provides insight into the process and detailed quantitative analysis of the simulation results is necessary only for some special cases. Besides, the most problems demand a number of preliminary computations not required to be storage in detail. Data compression by uniform sampling is a suitable method for these purposes. However, improving of the visualization quality seems to be necessary. In order to obtain smooth and adequate representation of the compressed results the data were transformed into 3D textures by 3D accelerator. These textures were rasterized by raycasting algorithm and antialiased by hardware trilinear filtering based on eight nearest texture elements. Combination of uniform data sampling compression and smoothing algorithm makes possible fast and high defined qualitative visualization of 3D objects during long-term evolution. The potential of changing of view point during the animation is realized as well. In order to preserve quantitative information in stored data the compression algorithm based on adaptive grid concept was elaborated. Proposed algorithm compresses computed data by merging neighboring grid nodes with close values of independent variables into one bigger node. In Figure. 1 in addition to the equiscalar surfaces of

temperature the temperature distributions and compressed grid in two perpendicular slices are presented. Proposed algorithm allows to control compression ratio and data loss level to gain optimal relationship between compression and accuracy of stored data.

In the course of project implementation Russian project members visited Institute of Fluid Science, Tohoku University and took part in the 12<sup>th</sup> International AFI/TFI conference. During the visit Japanese and Russian groups discussed on the results obtained in the frame of the project and formulated plans of the future research.

### 3. Achievements

The fulfillment of the project allows to develop effective algorithm for visualization of complex 3D structure objects that gives optimal relationship between compression and accuracy of stored data.

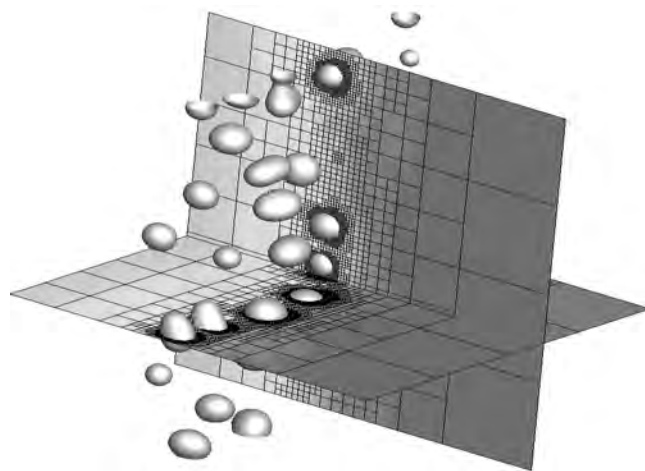


Figure. 1. Equiscalar surfaces of temperature, two perpendicular slices with temperature distributions and compressed grid.

### 4. Summaries and future plans

The developed algorithms on the base of GPU allows to decrease of computation cost and time of engineering simulations of combustion processes with complex spatial-temporal structure of reactive flows and to create informative visualization of the 3D flame structures. The future research will be directed towards the development of new effective algorithms of temperature, concentration, flow field and 3D flame interface visualization to facilitate representation of numerical simulations of combustion processes.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- \*[1] B. Mazurok, D. Mazurok, B.Dolgoesov, R. Fursenko, S. Minaev, H.Nakamura, K. Maruta: Visualization, “real time” algorithms and parallel computations of reacting flows, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 58-59.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

課題番号	J12034
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	1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, ††所外対応研究者

**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。核沸騰冷却において核沸騰を維持できる限界熱流束を向上させることは重要な技術的課題である。従来の研究は、マイクロピンフィンや多孔質体を用いて限界熱流束が向上することを示している一方で、さらなる限界熱流束向上の余地が十分に残されていることを示唆している。

限界熱流束を向上するためには、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う必要がある。本研究では、熱伝導率の高い平滑な伝熱面上に熱伝導率の低い材料で周期的な微細三角形状くぼみを形成した伝熱面を製作し、液体窒素を用いてプール沸騰熱伝達特性の測定を行って、その伝熱促進と限界熱流束向上の効果を実証する。

**2. 研究成果の内容**

本研究で製作した伝熱試験部の概略を図1に示す。伝熱面は、無酸素銅製の円形（直径 25 mm）で、その上に、微細な三角形穴が周期的に配置された直径 25 mm の SUS304 製の薄板を置いて、核沸騰熱伝達率の測定を行った。SUS 板を伝熱面上に置いた様子を図2に示す。三角形穴の一辺の長さは 2.5mm、穴の角部の曲率半径は 0.06 mm、穴を隔てる梁の幅は 0.2 mm、板厚は 0.1 mm である。また、比較のため、SUS 板を置かない銅平滑面の核沸騰熱伝達率も測定した。試験流体には、大気圧下の液体窒素を用いた。

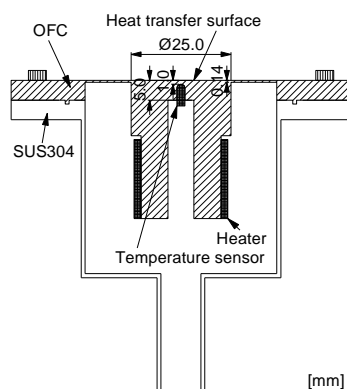


図1：伝熱試験部

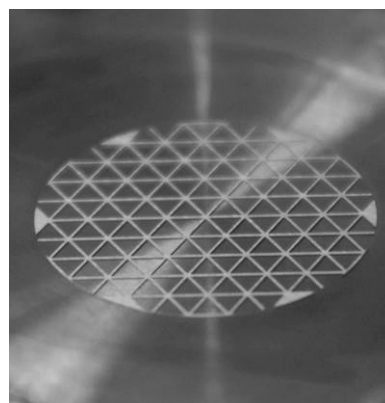


図2：伝熱面の写真

実験で得られた熱伝達特性を、熱流束  $q$  と壁面過熱度  $\Delta T$  の関係で図 3 左図に、熱伝達率  $h$  と熱流束  $q$  の関係で図 3 右図に示す。図中には、くぼみ付き面(Pitted)と平滑面(Smooth)の結果を併記して比較している。また、左図には、限界熱流束  $q_c$  の値を示している。

図に示すように、くぼみ付き伝熱面の限界熱流束は、平滑面に比べて、約 20% 向上した。くぼみ付き面で沸騰形態が膜沸騰に遷移した際の沸騰様相を観察したところ、蒸気膜に覆われているのはくぼみの内側の銅面上のみで、SUS 部は液との接触を保っていた。すなわち、SUS 部は、蒸気泡の発生には寄与しないものの、高熱流束下でも液との接触を保ち、銅面への液供給を促進して、限界熱流束の向上に寄与したと考えられる。

また、くぼみ付き面の熱伝達率は、熱流束が増大するにつれ、平滑面よりも大きくなる。限界熱流束近傍の沸騰の様相を比較すると、平滑面の場合、伝熱面直径 25 mm と同程度の直径の蒸気泡が頻繁に発生したのに対し、くぼみ付き面の場合、離脱する気泡は三角形くぼみと同等の大きさの場合が多かった。すなわち、くぼみが離脱する気泡を微細化していることがわかった。気泡が微細化するため、蒸発に資する伝熱面上の気液界面長さが増大し、熱伝達率が高くなったと考えられる。

### 3. 研究目標の達成状況

提案した微細くぼみ付き伝熱面の限界熱流束は、平滑面に比べて約 20% 向上し、本研究の目標は達成された。

### 4. まとめと今後の課題

今後は、限界熱流束向上のメカニズムを詳細に検討し、微細くぼみの最適な大きさを導くことが重要である。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

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

\*[1] K. Miyata, H. Mori and K. Ohira: Development of the heat transfer surface with micro-pits to enhance the critical heat flux in nucleate boiling, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 60-61.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

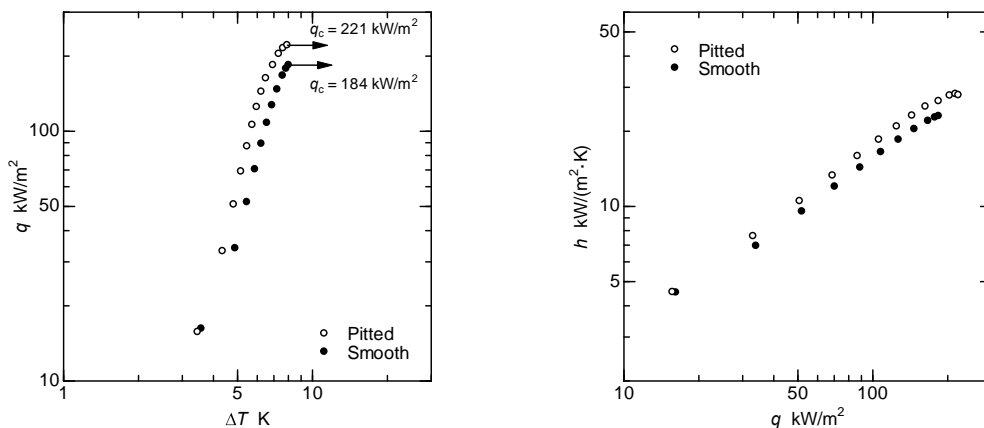


図 3 : くぼみ付き面と平滑面の核沸騰熱伝達特性の比較

Project code	J12035
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st year (progressing)

## 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 a numerical study of shock wave propagation in microchannels for different Knudsen (Reynolds) numbers. Shock propagation is considered for low Kn numbers when CFD methods are still valid and also for high Knudsen numbers when a kinetic description of the flow is required. The process of the entry of the shock wave (generated in a conventional shock tube) into the microchannel is studied in detail.

### 2. Details of program implement

The main goal for this year was a numerical study of the shock wave entry and propagation in microchannels. The calculations were performed for a diatomic gas ( $\gamma=1.4$ ) at different Knudsen numbers  $Kn=8\cdot 10^{-3}$ ,  $8\cdot 10^{-2}$ , and  $8\cdot 10^{-1}$ . The case with  $Kn=8\cdot 10^{-3}$  corresponds to the conditions of the experiment performed by M. Brouillette, 2009.

A typical flow pattern of the shock wave entry obtained in numerical simulations is presented in Fig. 1 (left), which shows the Mach number flowfield at the time instant  $t=0.2 \mu s$ . The time  $t=0$  is the instant when the shock wave enters the microchannel. It is clearly seen that the Mach reflection of the shock wave is formed in the plane of symmetry out of the microchannel. The boundary layer is formed on the microchannel walls. Multiple reflections of the shock wave inside the microchannel just after the entrance are also observed.

Figure 1 (right) shows the shock wave position inside the microchannel as a function of time obtained in NS/DSMC simulations at different values of Kn, experiment, analytical 1D Salas model, and Euler computation. The solid line shows the trajectory of the shock wave with a constant velocity equal to the velocity of the initial shock wave before it entered the microchannel. The dashed line corresponds to propagation of the shock wave with the Mach number  $M=2.42$  in accordance with the analytical 1D Salas model (details can be found in Salas, 1991). This model allows us to calculate the shock wave Mach number behind the cross-sectional discontinuity ignoring viscosity and heat conduction. It is seen in the figure that shock wave acceleration (amplification) occurs behind the microchannel entrance in the inviscid case; after that, the shock wave moves with an almost constant velocity. At the Knudsen number  $Kn=8\cdot 10^{-3}$ , small amplification of the shock wave is also observed, but the wave attenuates during its further propagation, which agrees with experimental results. At the Knudsen numbers  $Kn=8\cdot 10^{-2}$  and  $Kn=8\cdot 10^{-1}$ , the results of numerical simulations reveal intense attenuation of the shock wave to a velocity close to the sonic speed. No amplification is found for these Knudsen numbers.

The study of the shock wave amplification via entrance geometry variations is

continued. To understand the role of the high pressure region in front of the microchannel entrance, we carried out Euler computations with an additional splitter plate on the junction of the channels. Inviscid 2D computations show that the shock wave velocity is affected by this high pressure region. For example, it has been already found that, at  $Kn=8 \cdot 10^{-2}$ , the use of a rounded junction of two channels (one quarter of a circumference with the rounding radius  $R=2 \cdot H$ , where  $H$  is the microchannel half-height) leads to a delay of the instant when the shock velocity becomes close to the sonic speed.

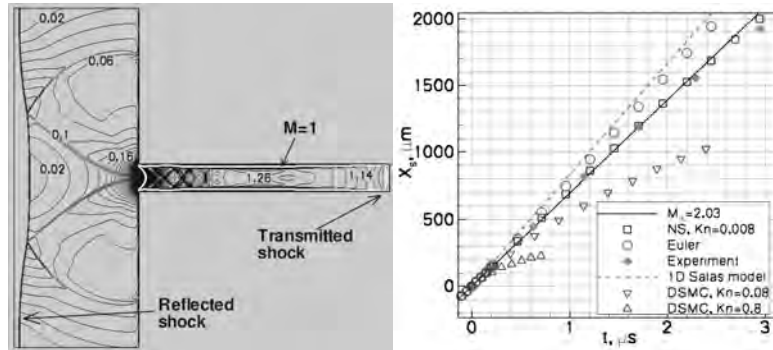


Figure 1 : NS and DSMC computations at  $M_{is}=2.03$ ,  $Kn=8 \cdot 10^{-3}$ , and  $\gamma=1.4$ . Left: Mach number contours. Right:  $(t, x_s)$  diagram.

### 3. Achievements

The expected results were achieved completely.

### 4. Summaries and future plans

The entry and propagation of a shock wave in a microchannel has been numerically studied with the use of kinetic and continuum approaches. It has been shown that one of the main criteria determining the dynamics of shock wave propagation inside a microchannel is the Knudsen number (or Reynolds number). The results obtained allow us to conclude that there exists a certain critical value of the Knudsen number  $Kn_{cr}$  that alters the flow pattern in the microchannel. At Knudsen numbers  $Kn < Kn_{cr}$ , the shock wave propagates with a supersonic velocity. At  $Kn > Kn_{cr}$ , the shock rapidly attenuates to a velocity close to the velocity of sound. At the next stage of the project, it is planned to perform viscous simulations for modified entrance geometry, e.g., junction of two channels with an additional thin splitter plate and rounded junction of two channels (with variations of the rounding radius). The impact of the shock Mach number will also be considered.

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

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

\*[1] G. V. Shoen, Ye. A. Bondar, D. V. Khotyanovskiy, A. N. Kudryavtsev, K. Maruta and M. S. Ivanov: Numerical study of shock wave entry and propagation in a microchannel, *Thermophysics and Aeromechanics*, Vol. 19, No. 1, (2012), pp. 17-32.

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

[2] G. Shoen, A. Kudryavtsev, M. Ivanov: Shock wave propagation at microscales, *Proceedings of the 20th International Shock Interaction Symposium*, (2012), pp. 179-182.

\*[3] G. Shoen, Ye. Bondar, K. Maruta, M. Ivanov: Numerical study of shock wave entering and propagation in microchannel, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, (2012), pp. 130-131.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J12036
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	2012.4~2013.3
継続年数	2年目

**実用的な船舶設計技術の開発**  
**Development of High Efficient Ship Design Technique**

鄭 信圭\*†, Hyunyul Kim\*\*††

\*東北大学流体科学研究所, \*\*George Mason University

†申請者, ††所外対応研究者

**1. 研究目的**

船舶の設計は船主からのオーパ後に設計が始まるのでコストや時間が掛かる設計手法はあまり採用さればいのが現状である。本研究の目的は船舶の設計に利用できる効率の高い設計技術を開発することである。

**2. 研究成果の内容**

本研究では流体研で開発した近似局面を利用する設計手法と George Mason 大学で開発した船舶にかかる力を計算する解析ツールを融合して効率のよい設計システム（図1）を開発した。特に、今年度は昨年度に行った最適設計結果に関するデータマイニングをSOM(Self-Organizing Map)を行い、各目的関数の間の関係はもちろん各速度領域で優れた性能を持つ船舶の形状特徴を確認した。

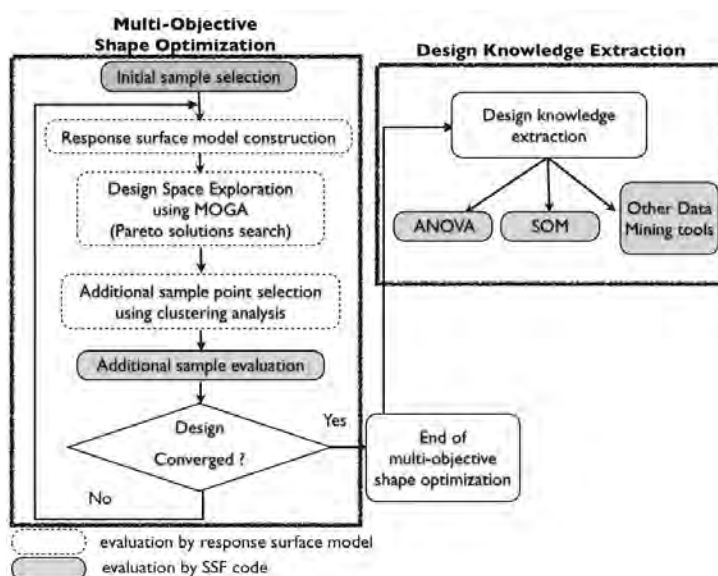


図1：設計システム

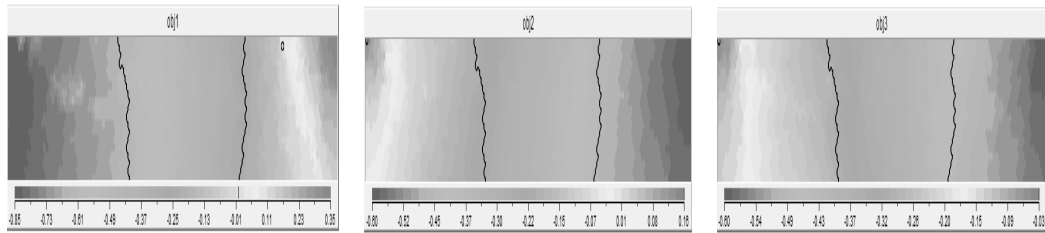


図 2：目的関数間の関係を表す SOM

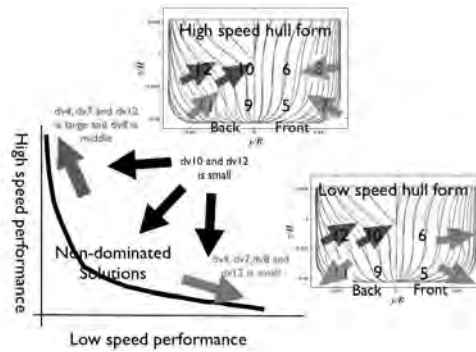


図 3：性能の形状との関係

### 3. 研究目標の達成状況

本研究の目標は、早さと利便性が要求される船舶の基礎設計において、より早く最適解を提示できる利点を持っていることから市場競争力の高い設計を可能にすることであった。開発した設計手法は、効率はもちろん RBF を用いた形状定義法による製造コスト削減の効果も期待できる。

### 4. まとめと今後の課題

船舶の設計に利用できる効率の高い設計手法の開発とその有効性の検証を行った。設計結果から本研究で開発した設計システムは既存の手法より設計時間を 1/1000 に短縮することができた。今後は、より多様な船舶設計に応用して本手法の適用範囲を広げる予定である。

### 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] S. Jeong, H. Kim: Design and Data Mining for Hull Form, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 30-31.

#### 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	J12037
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	2nd year

Development of High Reliability Numerical Simulation Code  
for Next Generation Low Noise Rotor Design

Shinkyu Jeong\*†, Kwanjung Yee\*\*††  
Sanghyun Chae\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Department of Aerospace Engineering, Pusan University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

In helicopter aerodynamics, the accuracy of the vortex capturing determines the prediction qualities of vortex interaction noise as well as the precision of the helicopter performance estimation. In this paper, the adaptive wavelet method is presented as an efficient way for the structured grid system. The adaptive wavelet uses the interpolating wavelet transformation including decomposition and threshold to construct an adaptive dataset to a solution. Then, fluxes are calculated only at the points within the adaptive dataset, which enhances the computational efficiency.

### 2. Details of program implement

The implementation of wavelet method is composed of the following steps.

**Step 1. Wavelet Decomposition:** To construct the adaptive dataset, decomposition is conducted by interpolating wavelet transformation.

**Step 2. Flux Evaluation:** After constructing the adaptive dataset, the flag values of the data set determine whether the flux values are to be evaluated or not. 5th order WENO scheme is used to evaluate the conservative variables in selected cells.

**Step 3. Residual Interpolation:** Residual on the excluded cell is interpolated as same way of the interpolating wavelet method. On the cell in the adaptive dataset, residual is calculated by the way of existing CFD code.

**Step 4. Time Integration:** After organizing the residual distribution in the whole computational domain, time integration is performed. 4 stage Runge-Kutta is used to achieve high accuracy of time domain for precise wake capturing.

### 3. Achievements

As interim results, a 2-D transonic airfoil-vortex interaction problem was investigated, because this situation can be occurred as blade vortex interaction of helicopter rotor and shows the vortex conservation capability of the adaptive wavelet with 5th order WENO scheme. Figure 1 represents the variation of lift as a function of the instantaneous streamwise position of the vortex. The variation of lift of WENO scheme (filled circle symbol) and WENO scheme with the wavelet method (solid line) is in reasonably good agreements with those of other Euler and Navier-Stokes investigations [1-3]. The calculation efficiency of 5th order WENO scheme with the wavelet method is compared with that of 3rd order MUSCL scheme in Fig 2. Figure 2 highlights that the adaptive wavelet reduced calculation time of 43% with 3rd order

MUSCL and 24% with 5th order WENO. However, the adaptive wavelet method with 5th order WENO scheme improved calculation time as the level of 3rd order MUSCL scheme while the high accuracy of 5th order WENO scheme.

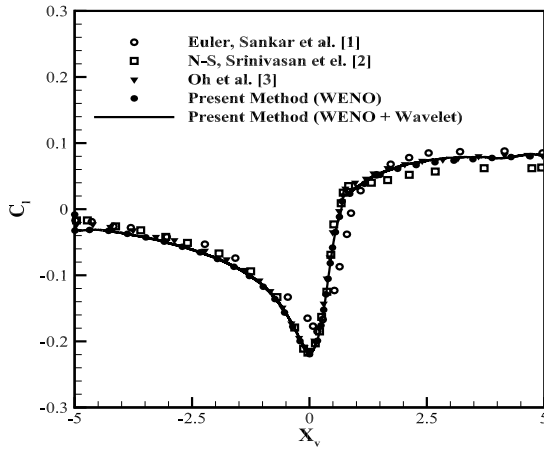


Fig. 1 Comparison of lift variations.

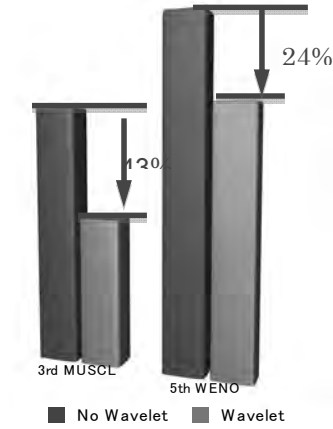


Fig. 2 Comparison of Elapsed Time

#### 4. Summaries and future plans

The efficient calculation using the adaptive wavelet with 5th order WENO scheme has been developed for the analysis of helicopter rotor. As interim results, the present abstract suggested capability of the present method to solve the 2-D airfoil-vortex interaction problem that requires the high accuracy scheme to conserve the vortex strength. The adaptive method with 5th order WENO scheme shows the physical characteristics of airfoil-vortex problem clearly, and reduces 24% of the computational time of no adaptive wavelet case, while the accuracy of WENO scheme is retained. This method will be extended to 3-D application of helicopter aerodynamics, and its usability will be enlarged.

#### References

- [1] Sankar, N. U., and Malone, J. B., "Unsteady Transonic Full Potential Solutions for Airfoils Encountering Vortices and Gusts," AIAA Paper 85-1710. 1985.
- [2] Srinivasan, G. R., McCroskey, W. J. and Belder, J. D., "Aerodynamics of Two-Dimensional Blade-Vortex Interaction," AIAA Journal, Vol. 24, No. 10, pp. 1569-1576, 1986.
- [3] Oh, W., Jo, K., and Kwon, O., "Two-Dimensional BVI Revisited Using Unstructured Dynamic Meshes," American Helicopter Society 58th Annual Forum, Montreal Canada, June 11-13, 2002.

#### 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] S. Chae, S. Jeong, K. Yee: Implementation of Adaptive Wavelet Method for the Efficient Design of Helicopter Rotors, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 32-33.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

課題番号	J12038
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1年目(発展)

### 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\*\*\*, 吉野 大輔\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*トーヨーエイトック株式会社

\*\*\*静岡大学工学部

†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24年度は、水中で発生するプラズマ微細気泡の可視化を行った。図1は、プラズマ発生時に水が白濁する様子である。プラズマ発生1s後には周囲が白濁し始め、

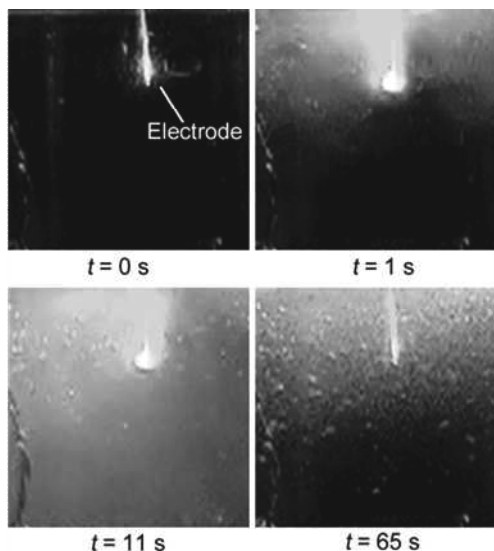


図1 プラズマ微細気泡の生成写真。プラズマ発生前( $t=0$  s), プラズマ発生直後( $t=1$  s), 生成した気泡で白濁した様子( $t=11$  s), プラズマ発生終了後気泡が上昇している様子。

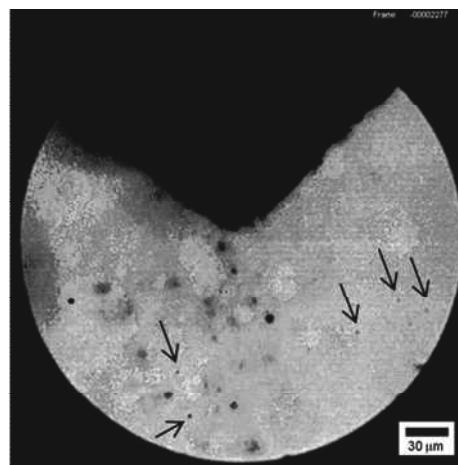


図2 プラズマ生成微細気泡の顕微鏡写真。矢印の気泡は $5\ \mu\text{m}$ 以下のサイズである。

11 s 後には完全に白濁する。白濁して見える気泡は直径数十  $\mu\text{m}$  以上のマイクロバブルと考えられ、放電終了後にはマイクロバブルが上昇してしまうため、白濁が消滅し透明になる。透明になった後を高倍率顕微鏡で観察した様子を図 2 に示す。写真には数  $\mu\text{m}$  以下の気泡が観察されることより、微細気泡が生成されていることが明らかになった。

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、微細気泡の可視化を目指し、数  $\mu\text{m}$  程度の気泡の撮影に成功した。気泡生成機構についてはより詳細に検討する必要があるが、気泡生成過程についても、予備実験により気泡生成機構を把握しつつある。

### 4. まとめと今後の課題

プラズマにより微細気泡が生成されることが明らかになった。これらの気泡の寿命や気泡径の変化について把握していく必要がある。また、気泡発生機構についても超高速カメラなどを利用して解明していく必要がある。

### 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: Development of Observation Method for Plasma-generated Bubbles, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp.76-77.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許)

- [1] Plasma Generation System and Plasma Generation Method, Takehiko Sato, Tatsuyuki Nakatani and Tatsuo Kimura, 2012.5.1, 取得. (特許番号: US 8,168,130 B2)
- [2] 還元水生成装置および還元水生成方法, 佐藤岳彦・中谷達行・阿部義紀, 2012.8.31, 特許登録. (特許番号: 特許第 5070644 号)
- [3] プラズマ発生装置およびプラズマ発生方法, 佐藤岳彦・古屋修・中谷達行・木邑達男, 2013.2.8, 特許. (特許番号: 特許第 5193483 号)
- [4] 気泡発生方法, 佐藤岳彦・落合史朗・宮原高志・中谷達行・木邑達男・阿部義紀, 2013.2.8, 特許登録. (特許番号: 特許第 5190834 号)

(受賞) 該当なし.

(マスコミ発表) 該当なし.

Project code	J12039
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	3rd year

## New Exact Solutions for Vortex Rings with Swirl and Magnetic Field

Stefan G. Llewellyn Smith\*†, Yuji Hattori\*\*††

\*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, UCSD

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The vortex ring is one of the most fundamental of the many vortical structures encountered in both laminar and turbulent flows. It is a self-propagating structure with vorticity confined inside a compact region. Similar eddy-like structures with vorticity concentrated on the boundary of the vortex exist in the presence of toroidal magnetic field and swirl. The goal of the project is to obtain new exact solutions for steady and unsteady eddies and vortex rings, and to investigate their properties. Knowing exact solutions to the nonlinear equations of fluid dynamics and magnetohydrodynamics is always useful, as these solutions give insight into the fundamental physical processes at work and also can be used as benchmarks for numerical simulations.

### 2. Details of program implement

We consider the motion of axisymmetric magnetic eddies with swirl in ideal magnetohydrodynamic flow. The magnetic field is assumed to be toroidal, while the velocity field has both toroidal and poloidal components. The contour-dynamics formulation by Hattori and Moffatt (2006) for the case without swirl is extended to include swirl velocity so that the cross helicity does not vanish in general. The strength of the vortex sheets that appear on the contours varies with time under the influence of the centrifugal force due to swirl and the magnetic tension due to the Lorentz force. Numerical simulation using the contour-dynamics formulation shows that there exist counter-propagating dipolar structures whose radius is given by a balance between the centrifugal force and the magnetic tension. These structures are well described by the steady solutions obtained by perturbation expansion. The effects of vorticity inside the eddy on the motion of eddies are also investigated.

### 3. Achievements

Our objectives were to pursue new exact solutions for steadily-propagating eddies in the presence of magnetic field and to give further insight into these solutions, which should also prove valuable for their possible use as benchmarks for numerical simulation and for modeling coherent vortical structures, by numerical calculations. This year we have obtained solutions that describe the counter-propagating dipolar structures observed in numerical calculation by perturbation expansion. We have also clarified the role of cross helicity in the time evolution of hydrodynamic and magnetic energy. Thus we have surely achieved the objectives of our project.

### 4. Summaries and future plans

The motion of magnetic eddies with interior vorticity in the presence of swirl is studied

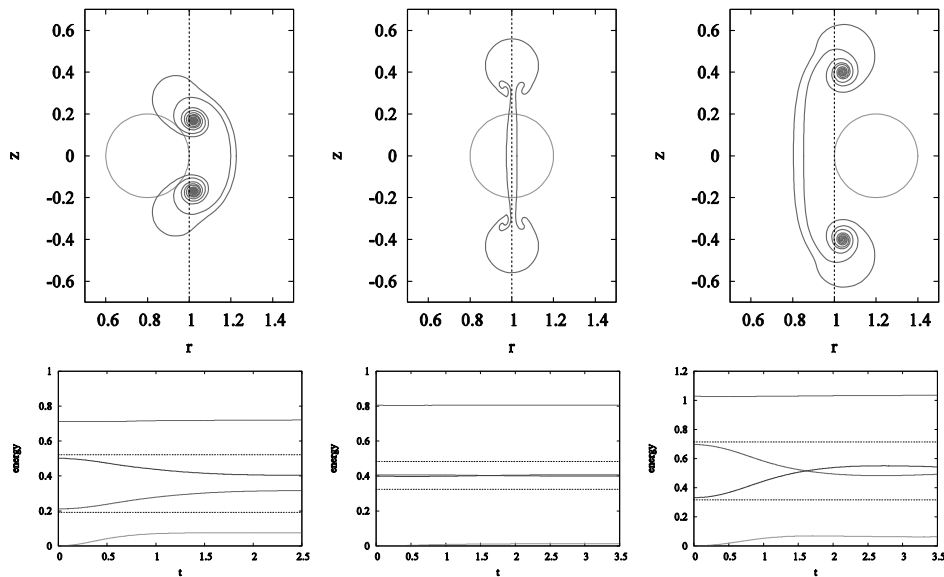


Figure 1 : Time evolution of eddy and energies. Top: contours at the initial and final instants; the dotted lines show the equilibrium radius. Bottom: time evolution of total energy, hydrodynamic energy, magnetic energy and poloidal component of hydrodynamic energy; the dotted lines show the bounds for hydrodynamic and magnetic energy.

by contour dynamics simulation. First, the bounds for hydrodynamic and magnetic energy determined by cross helicity are checked by numerical simulation. Starting from the values close to the bounds, both energies become close to a half of the total energy as the eddy approaches the equilibrium radius where the Lorentz and centrifugal forces balance.

Next, the effects of vorticity inside the eddy are investigated. Depending on the magnitude of the Lorentz and centrifugal forces two types of motion are observed. For small forces the motion of the eddy is similar to that of a vortex ring; it propagates with constant speed with its boundary or contour oscillating. For large forces the eddy splits into two counter-propagating rings.

## 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: Contour Dynamics of Vortex Rings with Swirl and Magnetic Field, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 166-167.

[2] Y. Hattori and S. G. Llewellyn Smith: Motion of axisymmetric magnetic eddies with swirl, *IUTAM Symposium on Topological Fluid Dynamics*, Cambridge, UK, (2012).

[3] 服部裕司, Stefan Llewellyn Smith: swirl をもつ磁気渦輪の contour dynamics とその一般化, 日本物理学会第 67 回年次大会, 西宮, (2012).

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

課題番号	J12040
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	2012.4～2013.3
継続年数	1年目（発展）

**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\*\*, 宮田 一司\*, 坂田 廉\*\*\*  
 \*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 では液体水素を燃料とするエミッションフリー、極超音速旅客機技術の研究開発を進めており、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には、極低温気液二相流体の流動・伝熱特性が重要となる。公募共同研究にて実施した液体窒素気液二相流動・伝熱研究において、流量－圧力損失特性が負性勾配をもつ領域が存在するため、不安定流動が発生し流動様式が周期的に変化することが判明した。Ledinegg 型不安定現象と考えられ、流動様式が周期的に変化する際のボイド率、圧力損失、熱伝達係数については従来、研究が行われておらず、これらの特性を実験により解明する。

**2. 研究成果の内容**

伝熱管断面形状の異なる正方形管、三角形管の定常流において、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た。高熱流束時（10 kW/m<sup>2</sup>以上）において、伝熱管上流にあるランタンク（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（以下、遷移流）を両者の形状で確認した。圧力損失の実測値を、ボイド率計算に Winterton, Khalil, Butterworth の 3 式を用いた分離流モデルの計算値と比較した。三角形管の場合は Khalil 式、正方形管の場合は Butterworth 式が実験値と良い一致を示した（±30%）。図 1 は三角形管の実測値と Khalil 式を適用した計算値の比較であり、定常流と遷移流（★印）を示す。図 2 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 (ABCD) を示す。図 1 の遷移流の値は平均値であるため、質量流束と熱流束により異なるが、図 2 に示すように平均値（☆印）の 3 倍程度の最大圧力損失が周期的に現れる。熱伝達率の実測値を、沸騰による熱伝達が支配的な分離流（スラグ流、環状流、波状流、遷移流）で Gungor-Winterton, Liu-Winterton 式等で評価を行った。Liu-Winterton 式で良い一致が見られ、計算値は±30%で評価できる。図 3 は Liu-Winterton 式と比較した三角形管の場合であり、定常流と遷移流を示す。遷移流の値（★印）は平均値である。また、1 周期内で流動様式が変化するため、特に伝熱管上部の熱伝達特性が気相の影響により大きく変動する。質量流束と熱流束により異なるが、熱伝達係数は平均値の 30%程度周期的に低下する。遷移流の平均質量流束と周期（2 秒～7 秒を観測）の関係については、平均質量流束が大きいほど周期が短くなる結果が正方形管、三角形の両者で得られた。「JAXA－流体研 研究打合せ、成果報告会（流体研）」H24. 4. 27, H25. 1. 8, 出席者各 8 名

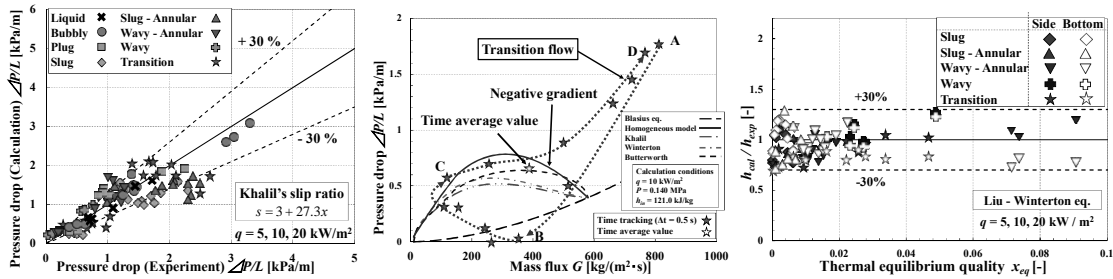


図 1：遷移流の圧力損失特性      図 2：遷移流の圧力損失変動      図 3：遷移流の熱伝達特性

### 3. 研究目標の達成状況

2 種類の水平伝熱管（正方形管，三角形管）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，熱伝達係数の関係が明らかになった．正方形管，三角形管の遷移流における圧力損失，熱伝達係数の平均値は定常流（スラグ流，環状流，波状流）の圧力損失，熱伝達係数評価式で推定できるが，1 周期内では大きく変動しており，その変動量が明らかとなった．

### 4. まとめと今後の課題

得られた成果を JAXA にて実施中の沸騰液体水素気液二相流の結果と比較し，エンジン設計データに反映する．遷移流発生時に周期的に変化する気相の影響が大きいと考えられる断面形状（例えば，熱交換器の波状フィン形状で想定される逆三角形断面の上面）での熱伝達特性，および Ledinegg 型不安定流動の発生起点と考えられる，質量流束－圧力損失の負性勾配が急激に増加する流動様式（現状ではプラグ流が発生起点と推定される）について，定量的（質量流束，熱流束）に把握し，Ledinegg 型不安定流動現象を解明する必要がある．

### 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] R. Sakata, K. Ohira, K. Miyata, K. Takahashi, H. Kobayashi, H. Taguchi, M. Hongoh, T. Kojima: Flow Instabilities of Boiling Nitrogen in a Horizontal Pipe, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 34-35.
  - \*[2] 坂田 廉, 大平 勝秀, 宮田 一司, 高橋 幸一, 小林 弘明, 田口 秀之: 水平三角形管を流れる液体窒素沸騰流の流動・伝熱特性およびボイド率計測, 日本航空宇宙学会北部支部 2013 年講演会, 仙台, (2013), JSASS-2013-H020.
  - [3] 大平 勝秀, 中山 忠, 宮田 一司, 高橋 幸一, 小林 弘明, 田口 秀之: 水平正方形管を流れる液体窒素沸騰流のボイド率測定と圧力損失特性, 第 86 回 2012 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 盛岡, (2012), p. 59.
  - [4] 大平 勝秀, 中山 忠, 宮田 一司, 高橋 幸一, 小林 弘明, 田口 秀之: 水平正方形管を流れる液体窒素沸騰流の熱伝達特性, 第 86 回 2012 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 盛岡, (2012), p. 60.
- 他 合計 6 件
- 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等） なし



課題番号	J12041
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1年目(発展)

**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、観測手法の構築に共同研究の力を置き、新規ふく射観測ゾンデ技術の確立を目指し、低温室におけるセンサ感度の基礎実験、流体研からの飛揚観測等を行った。

2012年4月12日に本ゾンデによる気球観測を実施した。飛揚地点は仙台市青葉区片平の東北大学流体科学研究所1号館屋上(地上約25m)とし、ゾンデ2台を打ち上げた。2台目は1台目よりも浮力が若干小さくなるよう気球へのHeガス充填量を調整した。図1にゾンデ高度の時間変化と水平方向の飛行経路を示す。図2に観測で得られた気温、相対湿度、上向き/下向き大気放射フラックス、さらに、正味フラックスから求められる放射加熱率の鉛直プロファイルを示す。2台のゾンデによる結果は良く一致しており、測定の妥当性を示唆している。また、各量の分布傾向は過去の文献等で報告されている観測結果とも整合する。地表面近傍における下向き大気放射フラックスの値は市販の赤外放射計による地上観測値と一致した。1台目と2台目で大気下層における下向きフラックスが異なる理由として、1台目の方が相対湿度の高い大気を通過したこと、日没時刻(18:10JST)直後の飛揚開始であったため、散乱日射の寄与があったことなどが考えられる。

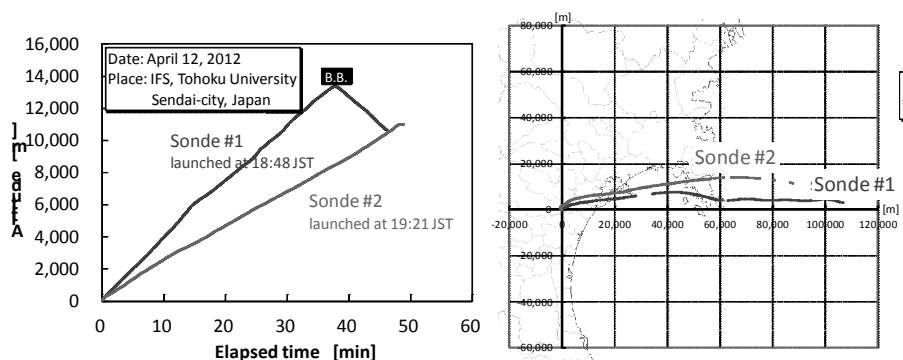


図1: ゾンデ高度の時間変化と水平方向の飛行経路

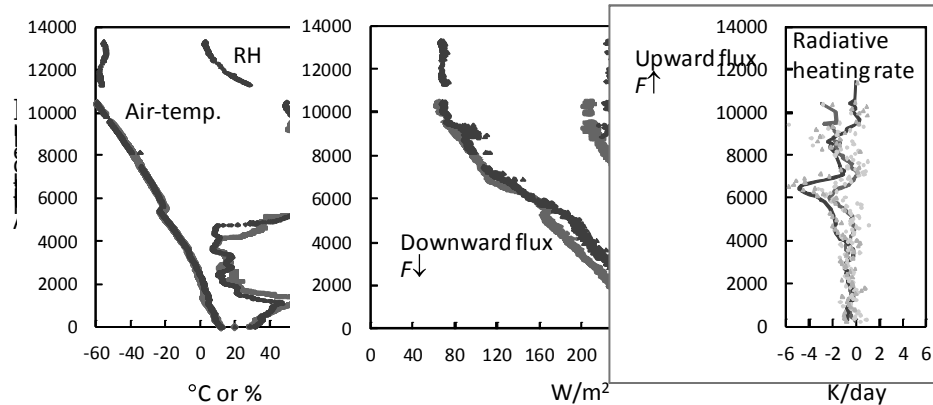


図2：観測で得られた気温，相対湿度，上向き/下向き大気放射フラックス，さらに，正味フラックスから求められる放射加熱率の鉛直プロファイル（青：sonde#1，赤：sonde#2）

### 3. 研究目標の達成状況

メガスケール伝熱現象である都市温暖化および地球温暖化の精緻なシミュレーション・局所温度予測等を実現するためには，数値モデリングと平行して実地観測による相互検証が不可欠であり，本研究成果により，研究目標の達成に大幅に前進したと考えている。

### 4. まとめと今後の課題

本年度の共同研究では，新規ふく射観測ゾンデの実践的な検証実験まで進展することができた。今後は観測手法の精度検証を行い，仙台市等において複数回のゾンデ観測を実施し，実測結果を数値モデリングへ反映するプロセスに入る予定である。

### 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] N. Yamada, J. Okajima, A. Sakurai, A. Komiya, and S. Maruyama: Evaluation and Analysis of Atmospheric Radiative Energy Transfer, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 72-73.

\*[2] 山田昇，岡島淳之介，櫻井篤，小宮敦樹，円山重直：GPS ラジオゾンデを用いた大気放射フラックスの気球観測，第33回日本熱物性シンポジウム講演論文集(2012)，C307.

[3] 山田昇，岡島淳之介，櫻井篤，小宮敦樹，円山重直：高高度気球による大気放射フラックス鉛直プロファイルの in-situ 観測，JAXA 大気球シンポジウム，(2012)，isas12-sbs-038.

#### 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）河北新報，電磁波ピピッ！温暖化測定，2012.5.5.

課題番号	J12042
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	1年目（発展）

**ふく射特性制御膜の計測に関する研究**  
**Measurement of Radiative Properties Controlled-Film**

圓山 重直\*†, Rodolphe Vaillon\*\*††

江目 宏樹\*\*\*, Adil Almahdouri\*\*\*, Abid Ustaoglu\*\*\*, 小宮 敦樹\*, 岡島 淳之介\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*CETHIL, INSA-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、マイクロ・ナノ粒子群に代表されるマイクロ・ナノ構造を用いて波長選択性を有するふく射特性制御膜を製作し、可視域から近赤外領域に至るふく射特性に関する実験的・解析的知見を得ることを目的とする。研究室既存のふく射解析コードで、マイクロ粒子群が存在する薄膜の反射特性を評価し、赤外分光光度計等を用いて特性を評価する。

**2. 研究成果の内容**

昨年度から実験および解析を更に推進し、設計した CuO を利用した膜について大気曝露による温度測定実験を行い、遮熱性能を評価した。図 1 に CuO を利用した膜と一般黒色塗料の赤外画像の比較を示す。明らかに CuO を利用した Cool black paint の方が温度は低い。以上から、CuO を利用した膜の有用性を示すことで、ふく射特性制御膜の設計手法を確立した。

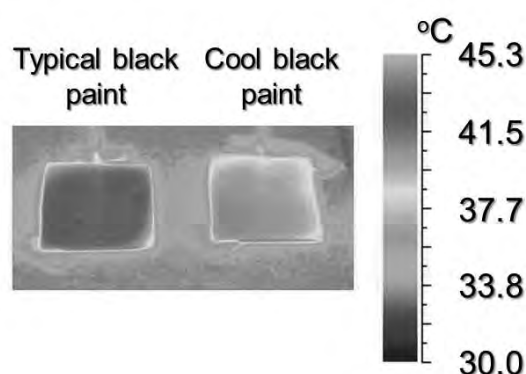


図 1 : CuO を利用した膜と一般黒色塗料の赤外画像の比較

**3. 研究目標の達成状況**

CuO を利用した膜に関して、大気曝露による温度測定実験を行い、遮熱性能を評価した。ここから、CuO を利用した膜の有用性を示した。この点から、ふく射特性制御膜の設計手法の確立が達成された。しかしながら、この手法の高分子材料へ展開は未だ着手できていない。

#### 4. まとめと今後の課題

上記のように、本研究で最適化した CuO 膜の有用性を示した。今後はこの CuO 膜を実用化することで、太陽ふく射の有効利用や省エネルギー技術への展開を目指す。

#### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

##### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- \*[1] Hiroki Gonome, Mehdi Baneshi, Rodolphe Vaillon, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama: The Effect of Dispersed State to Control of Radiative Properties of Coatings Pigmented with Nanoparticles, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 7, No.2, (2012), pp. 364-378.

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] Hiroki Gonome, Mehdi Baneshi, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya and Shigenao Maruyama: Temperature Analysis of Spectral Selective Coatings Pigmented with Cool Black CuO Submicron particles, *Proceedings of International Workshop on Nano-Micro Thermal Radiation (NanoRad2012)*, Matsushima, (2012), pp. 104-105.
- [3] A. Al Mahdouri, M. Baneshi, H. Gonome, J. Okajima and S. Maruyama: Spectral Radiative Properties of Greenhouse Plastic Films Using Inverse Method, *Proceedings of International Workshop on Nano-Micro Thermal Radiation (NanoRad2012)*, (2012), pp. 118-119.
- [4] 江目宏樹, Mehdi Baneshi, 岡島淳之介, 小宮敦樹, 円山重直: CuO 粒子を用いたクールブラックコーティングのふく射特性に関する研究, 第 49 回日本伝熱シンポジウム, 富山, (2012), I+II, pp. 161-162.
- [5] A. Almahdouri, M. Baneshi, H. Gonome, J. Okajima and S. Maruyama: Spectral Radiative Properties of Polyvinylchloride and Polyethylene Greenhouse Plastic Films Using Inverse Method, 第 49 回日本伝熱シンポジウム, 富山, (2012), I+II, pp. 93-94
- \*[6] Hiroki Gonome, Mehdi Baneshi, Rodolphe Vaillon, Adil Al Mahdouri, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya and Shigenao Maruyama: Measurement of Radiative Properties of Controlled-Films, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 62-63.
- [7] Mehdi Baneshi, Hiroki Gonome and Shigenao Maruyama: Numerical Temperature Analysis of Optimized TiO<sub>2</sub> Pigmented Coatings under Sendai Climate Conditions, *Proceedings of Ninth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2012)*, Sendai, (2012), pp. 118-119.
- [8] 江目宏樹, Mehdi Baneshi, 岡島淳之介, 小宮敦樹, 山田昇, 円山重直: サブマイクロ粒子を用いた波長選択膜のふく射特性, 第 33 回熱物性シンポジウム, 大阪, (2012), pp. 386-388.

##### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J12043
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	1年目（発展）

### 複雑媒体における複合伝熱解析

### Analysis of the Combined Mode Heat Transfer in Complex Materials

圓山 重直\*†, Mishra Subhash Chandra\*\*††,

小針 達也\*\*\*, 小宮 敦樹\*, 岡島 淳之介\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*Indian Institute of Technology, Guwahati

\*\*\*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、生体組織や断熱材に代表される複雑系非等方性媒体中の伝熱現象の解明を目的とする。特にふく射伝熱解析、熱伝導解析、そしてそれらの複合伝熱解析手法の確立を目指す。

#### 2. 研究成果の内容

これまで流体科学研究所と IIT で行なってきた近赤外レーザーと表面冷却を組み合わせた生体内温度分布制御手法について医療技術へ応用するための評価を行った。図 1 に計算モデルを示す。計算領域は二次元軸対称となっており、熱源としてレーザー光、表面は水による強制対流熱伝達を仮定している。まず生体組織内のレーザー光の伝播を光の散乱と吸収を考慮したふく射輸送方程式により解析した。得られた発熱密度分布を生体伝熱方程式へ与え、非定常温度分布を解析した。

図 2 に得られた計算結果を示す。図 2(a)は異なる臓器に対して治療を行った場合である。結果から熱伝導率の低い脂肪は温度が高くなり、血液かん流率の高い腎臓や肝臓は温度が低くなることが分かった。また図 2(b)は表面冷却の熱伝達率を変えて治療した例である。熱伝達率の大きさに最大温度が変化することがわかった。つまり冷却水の流速を変化させることで温度制御できる可能性を示した。

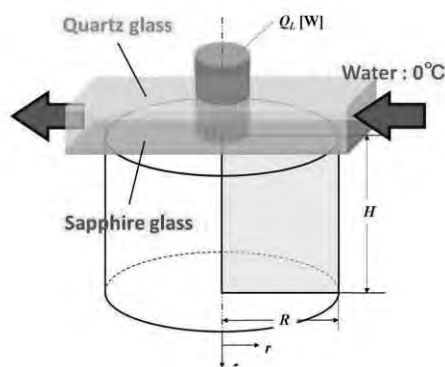
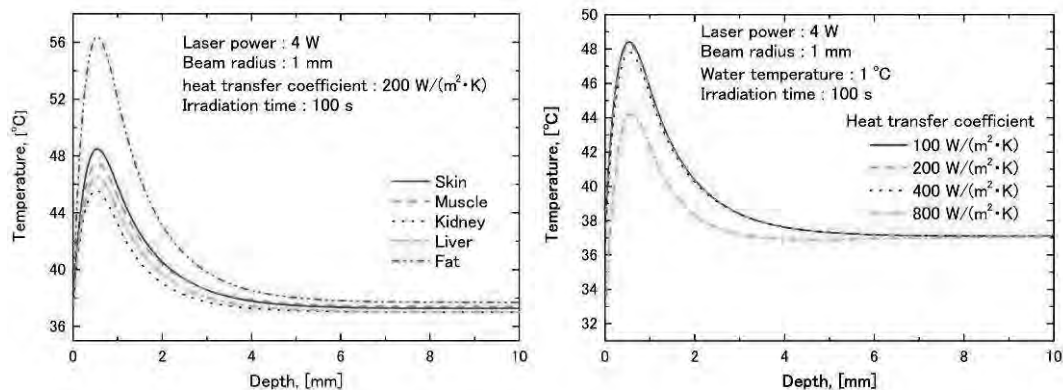


図 1：計算モデル



(a)異なる臓器に対する結果

(b)異なる熱伝達率に対する結果

図 2 : 計算結果

### 3. 研究目標の達成状況

複雑系媒質のふく射・熱伝導複合伝熱解析により生体組織内の非定常温度分布を評価し、医療応用への展開を行った。当初目的としていた定量的な温度分布評価は達成された。

### 4. まとめと今後の課題

生体組織に代表される複雑系媒質の複合伝熱解析手法の確率と評価を行なった。今後は、他の複雑媒体へ手法を展開する予定である。

### 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] R.P. Chopade, S.C. Mishra, P. Mahanta and S. Maruyama: Estimation of power of heaters in a radiant furnace for uniform thermal conditions on 3-D irregular shaped objects, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, Issue 15-16, (2012), pp.4340-4351.
- [2] S.C. Mishra, M.Y. Kim and S. Maruyama: Performance evaluation of four radiative transfer methods in solving multi-dimensional radiation and/or conduction heat transfer problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, Issue 21-22, (2012), pp.5819-5835.
- \*[3] S.C. Mishra, R. Muthukumaran and S. Maruyama: Comparison of the thermal effects of the transport of a short-pulse laser and a multi-pulse laser through a participating medium, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, Issue 21-22, (2012), pp.5583-5596.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

なし

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J12044
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	2年目

**ふく射要素法を用いた生体内光伝播と伝熱現象に関する研究**  
**A Study of Light Transport and Heat Transfer in Biological Tissue Using Radiation Element Method**

圓山 重直\*†, 櫻井 篤\*\*††, 小宮 敦樹\*, 岡島 淳之介\*  
 \*東北大学流体科学研究所, \*\*新潟大学工学部  
 †申請者, ††所外対応研究者

**1. 研究目的**

本研究では、レーザー治療時における生体内の光伝播とそれに伴い生じる伝熱現象の定量的評価を行う。当研究グループで開発したふく射要素法により、生体内光伝播の詳細な解析と体内の血流や代謝熱を考慮した生体伝熱方程式とのカップリングを行い、レーザーによる生体加熱機構を評価する。また生体試料へのレーザー照射実験を行うことにより、レーザー治療解析コードの評価を行う。

**2. 研究成果の内容**

本研究では、生体内の光伝播について二次元軸対称ふく射要素法を、生体伝熱方程式には有限体積法を適用し、レーザー治療解析コードを構築した。図1に計算モデルの概要を示す。このモデルにより、生体内の光多重散乱や、体内の血流や代謝熱を考慮した複合伝熱解析を行うことが出来る。一方、図2はレーザー照射実験の概要である。生体試料に YAG レーザー(波長 1064nm)を照射し、内部の温度分布を熱電対によって測定する。ここで生体試料は人間の熱・光物性に近い豚肉を使用している。この実験により、加熱特性に関する基礎データを取得し、レーザー治療解析コードの評価を行うことが出来る。

2D axisymmetric model

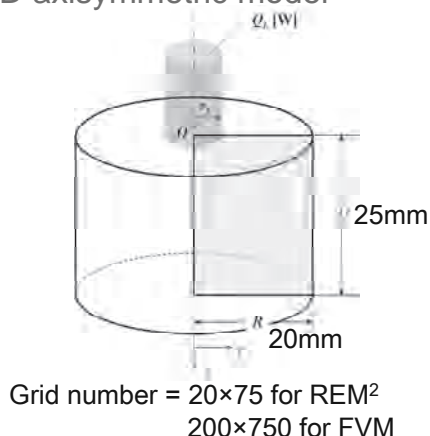


図1 二次元軸対象生体伝熱モデル

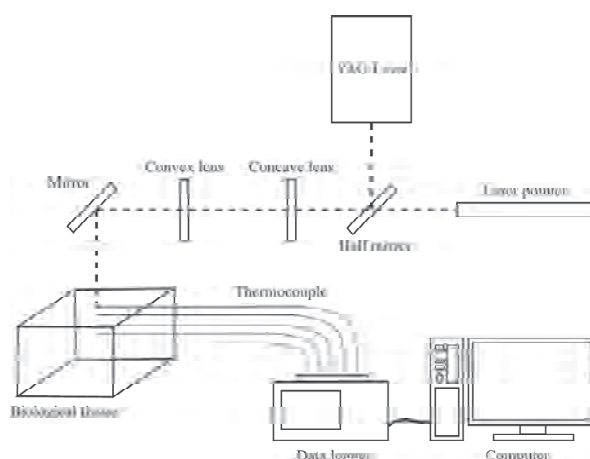


図2 レーザー照射実験の概要

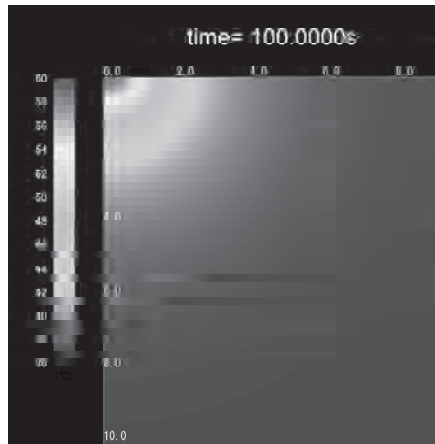


図3 照射100秒後の温度分布予測

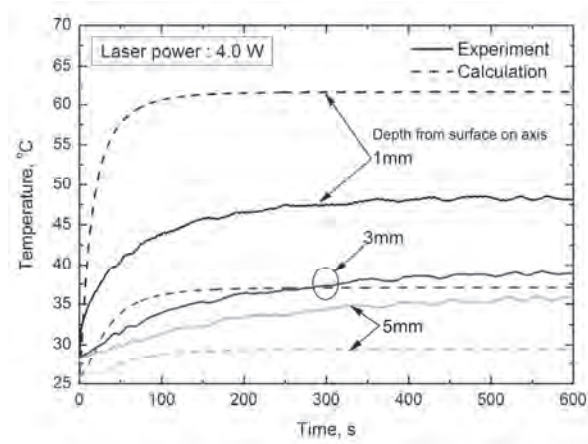


図4 実験と計算の比較

図3に数値計算によって得られたレーザーパワー0.1W、ビーム径1.0mmで100秒間照射後の生体試料内部における温度分布を示す。生体内部に侵入したレーザー光は強い多重散乱を受けるため、皮膚表面下1mm以下程度でレーザーのほとんどが減衰する。またその加熱によって皮膚内では半球状に熱が拡散していく様子がわかる。

図4に、数値で得られた温度分布の予測と、レーザー照射実験によって得られた温度測定結果の比較を示す。皮膚表面下1mmでは計算と実験の誤差が大きく、深さ5mmでは計算による温度予測が実験結果を下回る結果となったが、深さ3mmの場合は良く一致した。

### 3. 研究目標の達成状況

レーザー照射による加熱特性を定量的に評価でき、それらを踏まえた治療方針を提供することができる。レーザー治療において熱のみを計算する手法はあるが、光伝播と伝熱を連成させて解析する手法は例がなく、ユニークである。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

レーザー治療を定量的に評価する数値解析コードを構築し、それをを用いて新たなレーザー治療の可能性について評価した。今後は、レーザー治療の定量評価において重要になる生体組織の光学物性の測定方法の確立を通じて、本解析コードの更なる精度向上を目指す。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

該当なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] A. Sakurai, Y. Sato, J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama: Experimentally and Numerically Investigations for Light and Heat Transport inside Biological Tissues, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 64-65.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

該当なし



課題番号	J12045
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4 ~2013.3
継続年数	1 年目

二次元円形チャンネル内に形成される火炎面不安定の非線形ダイナミクス  
 Nonlinear Dynamics of Flame Front Instability in Two-Dimensional Radial Microchannels

後藤田 浩\*†, 丸田 薫\*\*††

\*立命館大学 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

燃焼は流動、熱・物質拡散、化学反応が相互に作用し合う非線形現象であることから、複雑に変動する火炎面不安定のダイナミクスを明らかにしていくことは重要な研究課題の一つである。二次元円形チャンネル燃焼器では、螺旋波に類似したスパイラル現象や、火炎面が動径方向と周方向に振動する非線形現象が観察される(参考文献[1])。これまで研究代表者は位相空間内の軌道不安定性や自己相似性を抽出する力学系理論(参考文献[2-4])を用いて、様々な火炎・燃焼不安定のダイナミクスを明らかにしてきた。本研究では、二次元円形チャンネル燃焼器で形成される火炎面不安定のダイナミクスの一端を明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究期間では、位相空間内の軌道不安定性に着目して、二次元円形チャンネル燃焼器内で形成される **B-unsymmetric flame** と **spiral flame**(参考文献[1])のダイナミクスの特徴の解明を試みた。軌道不安定性を定量化する手法として、位相空間内の局所的な軌道間距離の変化に着目した非線形予測法(参考文献[2], [3])を用いた。以下に本研究期間で得られた研究成果の内容を示す。

図1に無次元火炎輝度  $I$  の時間変化を示す。ただし、 $I$  は RGB 最大値で無次元化したものとする。**B-unsymmetrical flame** が形成されるとき、 $I$  は不規則的に変動するが、**spiral flame** が形成されると  $I$  は大きな振幅を伴ったパルス的な周期振動に変化する。 $I$  の時間変化から構築される三次元位相空間( $I(t), I(t+\tau), I(t+2\tau)$ )内の点分布を図2に示す。ただし、位相空間の構築には、埋め込み次元定理を用い、遅れ時間  $\tau$  は相互情報量(参考文献[2], [3])から算出するものとする。**B-unsymmetrical flame** が形成されるとき、位相空間内の点は幾何学的な特徴を残すものの、アトラクターの中心部分を埋め尽くす。他方、**spiral flame** が形成されるとき、図1で示された  $I$  の時間変動に対応して、アトラクターの形状は周期性の強いリミットサイクルに変化する。このとき、アトラクターの形状は **Generalized Kuramoto-Sivashinsky(gKS)** 方程式のパルス振動解のものに近い(参考文献[4])。

研究代表者は、近年、輻射熱損失の影響を受けた一次元拡散火炎の温度変動や磁場の影響を考慮に入れた低次元力学系から生成されるカオス解に対して、データベースから構築される位相空間内の軌道の情報を更新させた新しい非線形予測法(参考文献[2], [3])を提案し、解の複雑な時間変動を短期的に予測できることを明らかにした。そして、データベースに加えらるる解の時間  $t_p$  を増加させると、解とその予測値との相関係数  $C$  が指数関数的に減少する特徴を見出し、カオスの特徴である「短期予測可能・長期予測不可能」を抽出できることを提案している(参考文献[4])。本研究においても、 $I$  の短期予測を行い、相関係数  $C$  と位相空間のデータベースに加えらるる  $I$  の実測値の時間  $t_p$  の関係を調べた。その結果を図3に示す。**B-unsymmetrical flame** と **spiral flame** の両方とも、 $t_p = 0.001$  s のとき、 $I$  の実測値は予測値とほぼ一致している。 $t_p$  の増加に伴って、**B-unsymmetrical flame** の  $C$  は指数関数的に減少するが、**spiral flame** の  $C$  はほぼ一定のままである。これらの結果から、**B-unsymmetrical flame** の  $I$  は「短期予測可能・長期予測不可能」の特徴を有していると思われる。

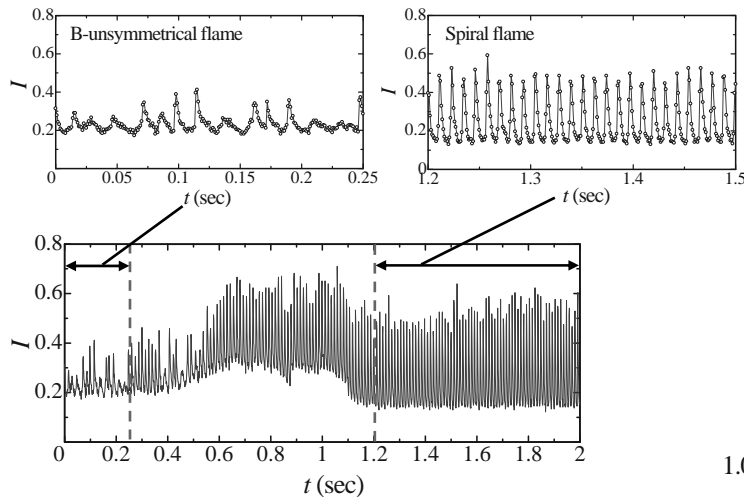


Fig. 1 Time variation in  $I$  as a function of  $t$

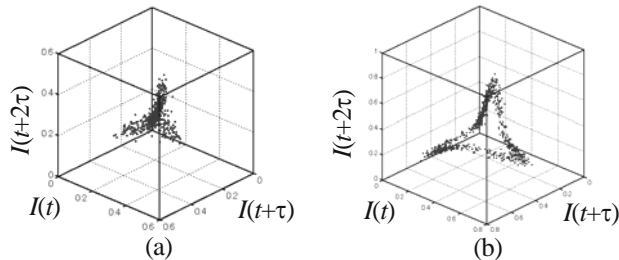


Fig. 2 Three-dimensional phase space ( $I(t), I(t+\tau), I(t+2\tau)$ )  
(a) B-unsymmetrical flame (b) spiral flame

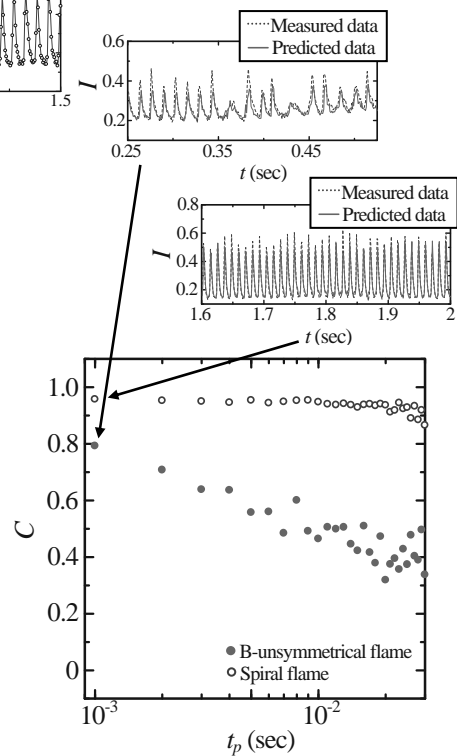


Fig. 3 Variation in  $C$  as a function of  $t_p$

### 3. 研究目標の達成状況

本年度においては、東北大学 流体科学研究所で過去に実施された実験データ(参考文献[1])に力学系理論を適用し、火炎面不安定のダイナミクスの一端を明らかにした。

### 4. まとめと今後の課題

二次元円形チャンネル燃焼器内に形成される B-unsymmetric flame のダイナミクスは「短期予測可能・長期予測不可能」の特徴を有したカオスである可能性が示唆され、spiral flame のダイナミクスはパルス的な振動を伴ったリミットサイクルであることが明らかとなった。二次元円形チャンネル燃焼器において観察される他の火炎形態(参考文献[1])についても本研究で導入した力学系理論を導入する必要があると思われる。

### 参考文献

- [1] S. Kumar, S. Minaev, K. Maruta, *Physics of Fluids* **20**, 024101 (2008).
- [2] H. Gotoda, T. Ikawa, K. Maki, T. Miyano, *Chaos* **21**, 013124 (2012).
- [3] H. Gotoda, T. Riyota, Y. Okuno, T. Miyano, *Journal of Applied Physics* **133**, 124902 (2013).
- [4] H. Gotoda, M. Pradas, S. Kalliadasis, *British Applied Mathematics Colloquium 2013*, April, (2013).

### 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. Onodera, Y. Shinoda, S. Fujita, H. Gotoda, S. Minaev, K. Maruta: *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 66-67.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J12046
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	2012.4~2013.3
継続年数	2年目

Background-Oriented Schlieren 法を用いた超音速飛しょう体の大視野可視化法の研究  
Global Flow Visualization around Supersonic Projectiles Using Background-Oriented Schlieren Method

水書 稔治\*†, 大林 茂\*\*††

\*東海大学工学部, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

本研究は、静粛超音速機縮尺模型の自由飛行実験に際し、模型周囲に発生する流れ場の定量的可視化計測に Background-Oriented Schlieren 法（以下、BOS 法）を適用し、広範囲にわたる飛行経路での連続的な計測を可能にすることを目的とする。

2. 研究成果の内容

BOS 法によって超音速飛しょう体が大視野で計測する際、計測精度の向上には、背景画像に関する課題を解決することが不可避である。特に野外におけるサブ・スケール・モデルを用いた実験での背景として、自然物（樹木など）または、人工的に創出した幾何学模様を候補とできる。本年度は、レーザスペckルを利用して、広範囲にランダム模様を創出し、BOS 法による計測を実施し、印刷背景との計測結果の比較を行った。

スペckル模様の創出には全固体レーザ（波長 532 nm, 出力 5 W）を用いた。レーザヘッドより出射されたレーザ光を平凸レンズで集光させ、光ファイバを通じて拡散板により散乱光とし、さらに凹レンズで拡大光とした。生じたスペckル模様をスクリーンに投影し、デジタル一眼レフカメラ（Nikon, D200）で撮影した。凹レンズからスクリーンまでの距離は 5000 mm とした。拡散板なし、拡散板砂番#600, #1000, #1500 の 4 条件でスペckル模様を創出した。創出した投影型背景を利用し、衝撃波管端から発生させた圧縮性渦輪の発達過程を可視化計測し、ランダムドットを紙面に印刷したものを背景とした場合（印刷背景）を用いた結果と比較した。得られた可視化画像を Fig.1 に示す。

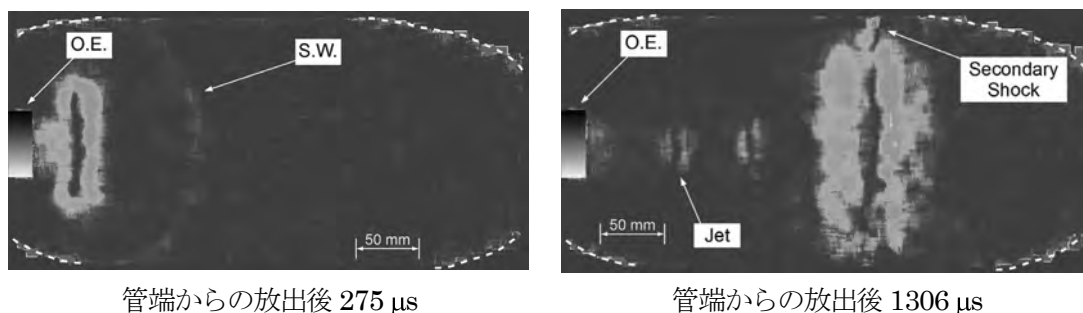


Fig. 1 Visualization of vortex rings using projection-type BOS, at shock Mach number  $1.50 \pm 0.01$ , O.E., Open-end of shock tube; S.W., Shock waves.

Fig. 2 に渦輪直径の時間変化のグラフを示す。横軸は衝撃波が衝撃波管管端に到達した時間からの経過時間、縦軸は渦輪の直径  $D_r$  を衝撃波管開放端内径  $D$  で無次元化したものを表している。数値計算結果と実験結果に差がある。これは計測した衝撃波 Mach 数と管端付近の衝撃波 Mach 数に差が生じたためであると考えられる。また、投影型背景 BOS 法とランダムドット背景 BOS 法の計測結果の差異は 8.00%であった。

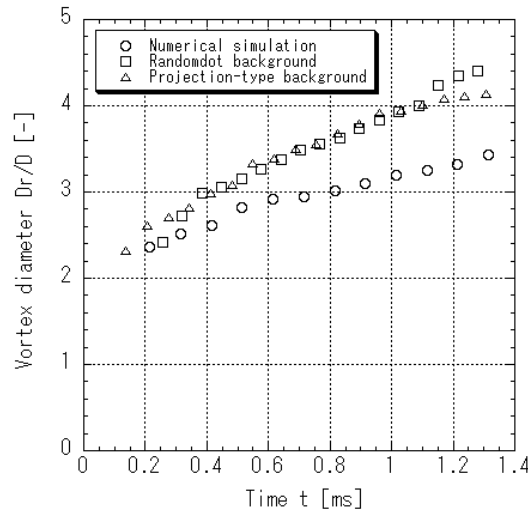


Fig.2 Transformation of compressible vortex.

### 3. 研究目標の達成状況

本研究の目的は、自由飛行する超音速飛しょう体模型周囲の衝撃波発生状態を飛行経路の広い範囲で定量的な可視化計測を行うことであった。飛しょう体加速装置の改造計画の変更のため、超音速機を想定した飛しょう体模型の自由飛行実験が行われなかったものの、広範囲の可視化を可能とする投影型ランダムドット模様の創出とその精度確認が達成できた。

### 4. まとめと今後の課題

本年度実施した計測により投影型背景を利用した BOS 法による計測が、自由飛行する高速飛しょう体計測に十分な精度で適用可能であることが確認できた。今後は、超音速機模型の自由飛行実験に備え、測定精度の関連の定式化を行うことが課題としてあげられる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] T. Mizukaki and S. Obayashi: Quantitative Visualization of Flow Field around High-Speed Projectiles by using Background-Oriented Schlieren, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 162-163.

#### 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	J12047
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	3年目

**レーザ誘起熱音響波を利用した超音速非定常気流の温度計測法の開発**  
**Temperature Measurement of Unsteady Supersonic Flows Using Laser-Induced Thermal Acoustics**

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

**1. 研究目的**

強い衝撃波背後やノズル始動過程など、強い非定常性を有する超音速気流の温度を、レーザ誘起熱音響波 (Laser-Induced Thermal Acoustics: LITA) を利用した流体媒質の極短時間音速測定法と取得音速に基づく温度評価法を確立する。従来の超音速非定常流れ場の温度計測法は、供試模型表面に熱流束センサなどを設置し、評価するものが多く、供試模型から遠距離の流れ場の計測は困難である。当該計測法は、流体の任意位置の温度を非接触かつ極短時間 (10 ナノ秒以下) で計測する手法であり、高速非定常現象測定に貢献できる。

**2. 研究成果の内容**

非定常衝撃波背後の温度計測を LITA で達成するには、衝撃波管内で発生した衝撃波が測定部に到達する時刻と計測用レーザの照射時刻マイクロ秒単位で同期させる必要がある。一般的な衝撃波管は高圧室と低圧室間に単一の隔膜を設置し、高圧室充てん圧の上昇に伴う自然破膜方式あるいは、ニードルなどを機械装置で隔膜突き立てる撃針方式で、破膜させる。自然破膜方式では、破膜圧力にばらつきが生じ、衝撃波 Mach 数の繰り返し精度が低く、撃針方式では、撃針駆動装置を高圧室内に設置する必要があり、小型の衝撃波管では、高圧室容量の少ない割合を撃針駆動部に占められること、また、高圧室内を伝播する膨張波が駆動装置と干渉し、管内流れを複雑にする欠点がある。そこで、本研究で利用する正方断面小型衝撃波管では、衝撃波管に高圧室と低圧室間に小容積の中圧室を設置し、双方の領域間に隔膜を設置した。具体的には、中圧室の充てん圧を高圧室、低圧室間の圧力差の中間圧とし、高圧-中圧室間圧力差 (= 中圧室-低圧室間圧力差) をわずかに上回る破膜圧を有する隔膜 (ポリエチレン・テレフタレート) を使用する。これにより、中圧室圧力を急速に減圧することで、機械装置を使用せず、任意時刻に破膜可能となる。また、隔膜毎に存在する破膜圧力のばらつきに影響を受けない測定が可能となるため、測定毎の衝撃波 Mach 数の繰り返し精度を高めることが可能となった。

供試衝撃波管 (Fig. 1) の初期圧力比  $P_4/P_1$  (高圧室充てん圧  $P_4$ , 低圧室圧力  $P_1$ ) と発生衝撃波 Mach 数  $M_s$  の校正曲線の取得および衝撃波背後に誘起される温度比  $T_2/T_1$  (低圧室温度  $T_1$ , 衝撃波背後温度  $T_2$ ) の推定を実施した結果、 $P_4/P_1-T_2/T_1$  校正曲線が得られた。

昨年の子備実験結果から、供試衝撃波管内の測定部への計測光の導入および測定位置の調整方法に改善の余地があることが判明した。そこで、光学系の反射鏡の一部を波長選択反射鏡 (ダイクロイック・ミラー) に変更し、励起光とプローブ光路の一部を共通化を設計し、

本年度光学系の改善を行った。

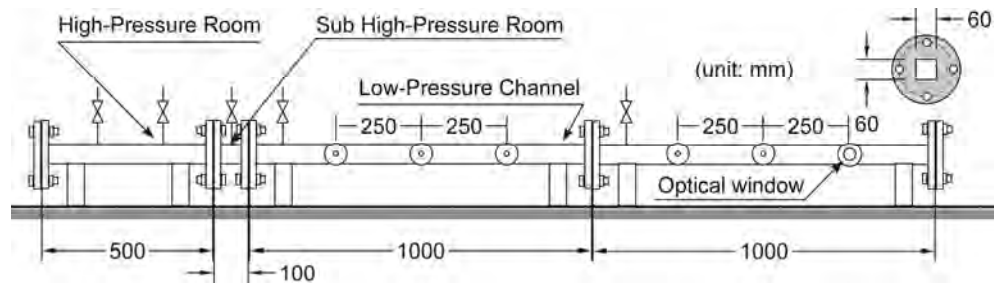


Fig. 1 Schematic diagram of shock tube for LITA measurement.

### 3. 研究目標の達成状況

未だに、本研究の目標である、平面衝撃波背後の温度分布計測には至っていない。遅延の原因は、装置特性の再取得に多くの時間を費やしたからである。すなわち、衝撃波管で発生させた平面衝撃波を利用することで、放電によるものより数値解析結果と比較・評価が容易な基礎実験を行い、本手法の精度評価を行う予定とした。衝撃波管には、自然破膜方式とした。しかし、自然破膜方式の場合、発生する衝撃波のMach数の繰り返し性にばらつきが大きいことがわかった。そのため、ばらつきの低減のため、衝撃波管を2重隔膜式に変更したこと。また、計測精度向上のために、光学系の一部を変更したためである。

### 4. まとめと今後の課題

衝撃波発生部と計測部の特性は本年のまでの研究でおおむね把握した。今後は、衝撃波背後温度分布のLITAによる本格的な計測に進むための課題の抽出を予備実験と通し、行う必要がある。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] T. Mizukaki and S. Obayashi: Shock Induced Temperature Measurement using Laser-Induced Thermal Acoustics, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 36-37.

#### 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	J12048
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	1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

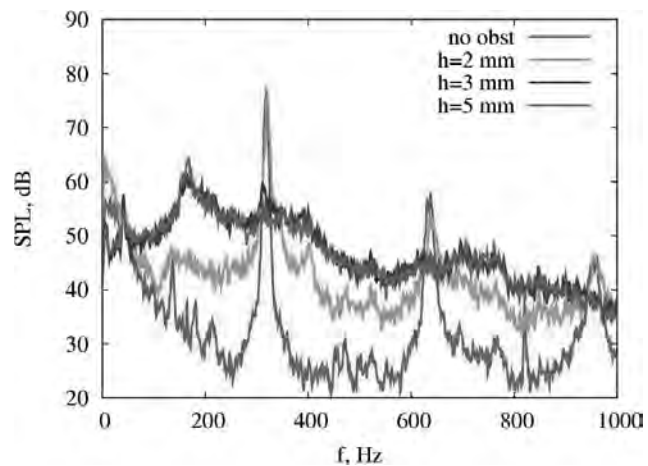
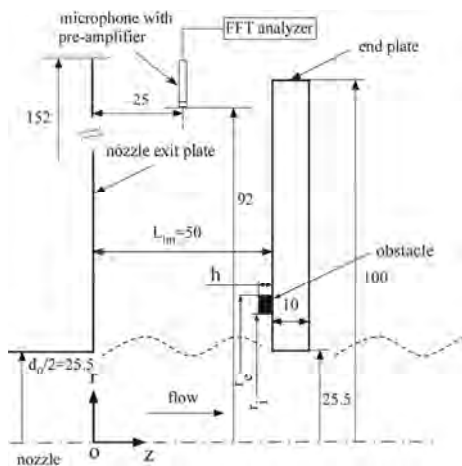
†申請者, ††所外対応研究者

## 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期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、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ドリング機構が、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。



(a) Experimental system with an obstacle (b) Measured sound pressure levels for  $h=0, 2, 3, 5$  mm ( $r_i=35.5$  mm,  $r_e=40.5$  mm)

図 1 : Effects of the proposed control method of the hole tone with an obstacle on the downstream end plate

### 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50%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。今後、より広い条件においてより高い消音効果を有する制御法を開発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] K. Matsuura and M. Nakano: A Throttling Mechanism Sustaining a Hole Tone Feedback System at Very Low Mach Numbers, *J. Fluid Mech.*, Vol. 710, (2012), pp. 569-605.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[2] K. Matsuura and M. Nakano: Researches on the Suppression Control of Hole-Tone Phenomena, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 164-165.

[3] K. Matsuura and M. Nakano: Flow Structures under Passive Control in a Hole-Tone System, *Proceedings of the Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp.346-347.

[4] 松浦一雄, 中野政身: ホールトーン現象のパッシブ制御に関する研究, 第32回流力騒音シンポジウム概要集, 鳥取, (2012), No.16.



課題番号	J12049
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	2012.4~2013.3
継続年数	1年目(発展)

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

森 仁\*†, 高木 敏行\*\*††, 出江 紳一\*\*\*

\*(株)IFG, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*東北大学大学院医工学研究科

†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

これまでに培った磁気刺激装置に関するノウハウをもとに, 生体筋肉自体を磁気刺激によりアクチュエーションし, 任意の運動をさせることを目的とした研究を行う。

**2. 研究成果の内容**

①「任意の」部位の筋収縮を誘発するためには, 磁気刺激によって他の部位の筋収縮と連動しない「独立した筋収縮」を得ることが必要となる. この「独立した筋収縮」を得るためには, どの部位にどの程度の磁気刺激を与える必要があるかについて調査実験を行った. 簡単なテストコイルを作成し, 右腕内側表面上に設置し, 充電電圧を徐々にあげながら磁気刺激実験を繰り返し, 各刺激位置において変化が生じた最低電圧を方眼上へとマッピングした. 測定の様子を図1に示す. 測定の結果を, 生じた運動ごとに分離し, 最低刺激電圧ごとに色分けすることにより, 磁気刺激部位および刺激レベルを示す磁気刺激マップを作成した. その一例を図2に示す. これらのマップを重ね合わせると, 磁気刺激部位が重なり合わない位置, つまり, それぞれの運動独自の刺激位置が存在していることが判明した.



図1. テストコイルを装着した状態

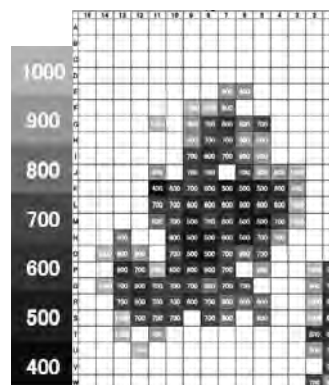


図2. 第3指屈曲運動の磁気刺激マップ

②任意の運動強度を得るために, 磁気刺激のパルス数にて運動強度をコントロールすることを試みた. 磁気パルス電源を8台並列接続し, 連発磁気刺激ができる連発パルス電源とし, この電源に磁気刺激コイルを接続して, 最大8連発の磁気刺激が可能な磁気刺激装置とした.

次に図 3 のような機構に磁気刺激コイルを密着装着した右手を固定し、連発数に対する指先の動作量を測定した。図 4 にパルスの連続数に対する指先の上昇距離を示す。このグラフが示す通り、磁気パルスの数と筋肉の収縮量の間には、明白な相関があり、パルスの連発数を調整することにより、精度よく筋収縮の運動強度をコントロールすることが可能であることが明らかとなった。

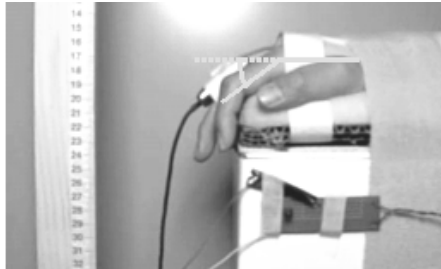


図 3 . 連続パルス刺激による指先の上昇実験

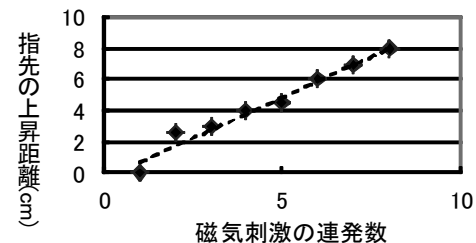


図 4. パルス連続数に対する指先の上昇距離

### 3. 研究目標の達成状況

今回の研究により、①適正な部位に適正な磁界強度の磁気刺激を行うことで、任意の部位の筋収縮が得られること、②目的とする筋肉の運動強度のコントロールは磁気パルスの連発数の制御によって行うことが可能であること、が明らかになった。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

今回の研究により、小さな運動ではあるが、磁気刺激により任意の運動を誘発することが可能であることが判明した。今後の課題として、①任意の独立した筋収縮を得るためのさらに詳細な刺激条件の導出と、②その結果を踏まえた刺激コイルの最適設計、③磁気パルスの連発性能の強化、等が求められる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] H. Mori, T. Takagi, S. Izumi, H. Kanetaka, E. Suzuki, K. Mori, R. Sasaki and T. Abe: Study on the Biological Actuation with the Magnetic Stimulation. *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 90-91.

\*[2] 森仁,高木敏行, 出江紳一, 他: 連続パルス磁場による末梢神経への磁気刺激に関する研究, 第 33 回バイオメカニズム学術講演会, 東北大学医学部良陵会館, (2012).

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許)

細胞培養法と該方法に使用する磁気刺激コイル並びに電源ケーブル, 森仁・出江紳一・金高弘恭・高木敏行他, 2013.02.27, 出願.

Project code	J12050
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st year (progressing)

## Numerical Studies of Rarefied Chemically Reacting Flows about Space Vehicles

Mikhail Ivanov\*†, Shigeru Yonemura\*\*†, Yevgeniy Bondar\*, Alexander Shevyrin\*

\*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

This project is aimed at solving an urgent problem of high-altitude aerothermodynamics: development and application of an effective numerical approach for studying hypersonic flow around space vehicles with allowance for rarefaction effects and thermochemical nonequilibrium of the flow. The main tasks of the project are

- development and improvement of models and methods, as well as software tool for numerical investigations of chemically reacting hypersonic flows with the use of kinetic description (DSMC method);
- study of aerothermodynamics of high-altitude flight of promising space vehicles, including those with leading edges of small-radius bluntness, with allowance for nonequilibrium physical and chemical processes and analysis of their influence on distributed (pressure, friction, and heat flux) and integral (drag force, lift force, heat transfer, pitching moment, etc.) aerothermodynamic characteristics along the hypersonic segment of the flight trajectory.

### 2. Details of program implement

A model for DSMC computations taking into account high-temperature nonequilibrium chemical reactions in the air mixture was developed and implemented in the SMILE++ software system. The vibrationally specific cross sections of chemical reactions are obtained as functions of the sum of translational and rotational energies on the basis of the known two-temperature reaction rate constant  $K(T, T_v)$ . The reaction cross-sections are found numerically as an approximate, but stable solution of the integral equation containing this reaction rate constant. The model provides DSMC reaction rates for nitrogen and oxygen dissociation, which reproduce two-temperature kinetics under conditions of rotational-translational equilibrium and the Boltzmann distribution of vibrational energy. For a hypersonic air flow under typical re-entry conditions, the application of the new model yields a lower nitrogen dissociation rate behind the wave than the TCE model, which leads to a higher temperature of the flow (which is manifested in the form of more intense heat fluxes on the body surface) and to a greater stand-off distance of the shock wave. This fact is demonstrated in Fig.1, where the translational temperature flow fields for the 2D flow about a cylinder at typical re-entry conditions for different chemical models are shown. The models were validated against experimental data on shock-wave structure in oxygen. It was demonstrated that the new model provides significantly better agreement with experimental data than conventional DSMC chemical models as TCE.

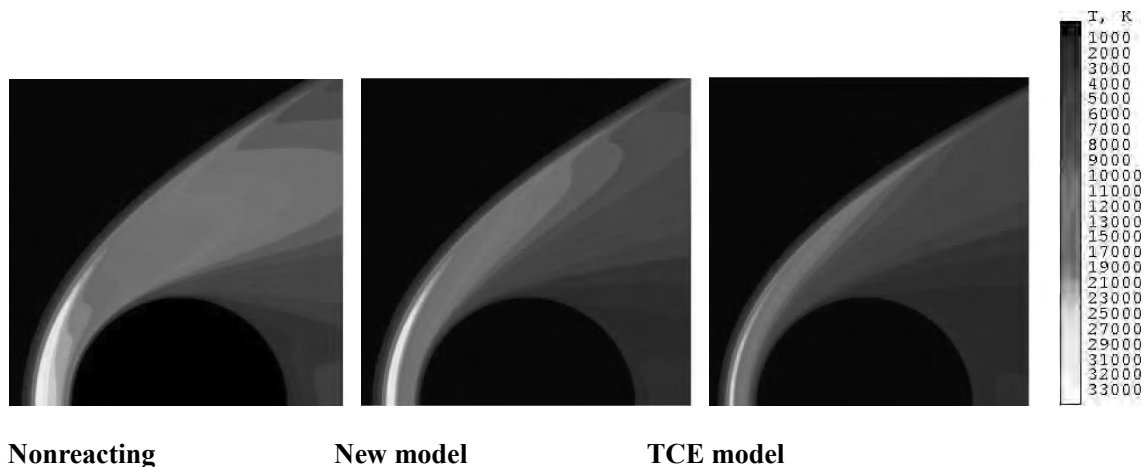


Figure 1: Flow fields of translational temperature (Knudsen number  $Kn=0.01$ ).

### 3. Achievements

The expected results stated in the application form of the project proposal were achieved completely.

### 4. Summaries and future plans

New collisional models and procedures have been developed for study of rarefied chemically reacting high-enthalpy flows, and implemented in the SMILE++ software system. Study of different gas flows has been carried out: the nitrogen flow about a wedge, the air flow about a cylinder and the flow about a blunted plate. The application of the new model leads to significant increase in surface heat flux in comparison with conventional DSMC chemistry models. The model has been validated against the experimental data on shock wave structure in oxygen. The application of the new model improved the agreement with the experimental data.

*Future research plans:*

1. Development of the model for associative and electron-impact ionization of the gas molecules and the kinetic model of the spacecraft plasma environment and their implementation into the SMILE++ software system.
2. 2D/Axisymmetric computations. Validation against available experimental data and computational results.

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

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

\*[1] M.S. Ivanov, D.V. Khotyanovsky, A.A. Shershnev, A.N. Kudryavtsev, A.A. Shevyrin, Sh. Yonumura, Ye.A. Bondar: Rarefaction effects in hypersonic flow about a blunted leading edge, *Thermophysics and Aeromechanics*, December 2011, Vol.18, Issue 4, pp. 523-534. – *in fact was published in 2012 during the report period.*

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

\*[2] Alexander Shevyrin, Mikhail Ivanov, Yevgeniy Bondar and Shigeru Yonemura: *Numerical Studies of Rarefied Chemically Reacting Flows about Space Vehicles, Proceedings of the Twelfth International Symposium of the Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 38-39.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J12051
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	2012.4~2013.3
継続年数	2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 by 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  
\*\*\*東北大学医学部脳神経外科  
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

脳動脈瘤の破裂に、内部の血流によって引き起こされる力学的刺激が重要な役割を果たしていることが指摘されている。本研究の目的は、核磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) による血行動態の評価方法開発である。

2. 研究成果の内容

位相差MR法 (Phase-contrast MR法) を用い、複数の脳動脈瘤患者の頭部スライス画像の計測を行い、汎用医療画像解析ソフトウェア (Flowa, アールテック社製) を用いて血流動態の可視化や、壁せん断応力 (Wall Shear Stress: WSS) の分布の解析と可視化を行った (図1)。また、MR計測融合シミュレーションに必要な4次元データ (血管形状および速度分布) の蓄積を行った。

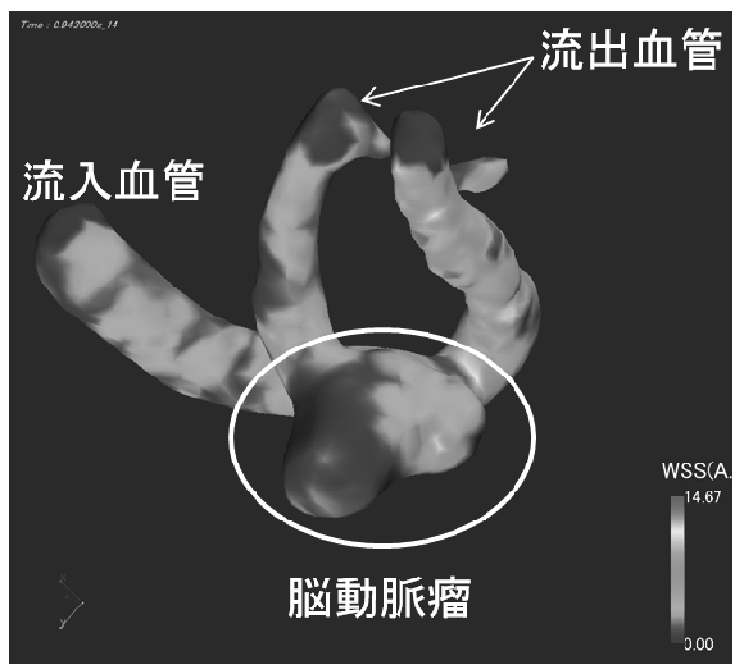


図1：脳動脈瘤における壁せん断応力の分布

### 3. 研究目標の達成状況

位相差 MR 法により脳動脈瘤を含む頭部スライス画像を計測し、医療画像解析ソフトウェアを用いて得られた画像データを解析することにより、脳動脈瘤内の血行動態および血行力学の概略を知ることが可能であった。しかし、詳細かつ正確に血流動態を把握するためには、位相差 MR 法により得られるデータは、時間空間分解能および計測精度がいずれも不十分であり、信頼性の観点において問題を有することが明確となった。

### 4. まとめと今後の課題

我々は、位相差 MR 法により得られる 4 次元データを適切に補完する方法論として、MR 計測融合シミュレーションこそ有望であると考えている。今後は、MR 計測融合シミュレーションによる脳動脈瘤内の血行動態評価を行い、既存の計測方法等との比較を行う予定である。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] S. Sugiyama, K. Funamoto, T. Hayase, H. Shimizu, and T. Tominaga: Magnetic resonance fluid dynamics for intracranial aneurysms, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 118-119.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J12052
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	2012.4~2013.3
継続年数	2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  
 \*\*\*東北大学医工学部, \*\*\*\*東北大学医学部脳神経外科  
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

脳動脈瘤の発生・成長・破裂あるいは安定化については、血流によって引き起こされる力学的刺激が重要な役割を果たすことが指摘されている。とくに、壁面せん断応力 (wall shear stress: WSS) は、血管内皮細胞に影響を与え、ひいては脳動脈中の自然歴に関与する。本研究は、脳動脈瘤患者から医療目的に得られた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することを企図するものである。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貴重な医学的資源となりうる。

2. 研究成果の内容

脳動脈瘤壁の性状は一様でないことが知られている。そこで、本研究においてこれまでに解析してきた脳動脈瘤のうち、中大脳動脈に発生し、開頭手術によって脳動脈瘤壁の外観が明らかになった連続 30 例を抽出し、壁の動脈硬化性変化をきたした 5 例ときたしていない 25 例とを比較検討した。その結果、動脈硬化性変化をきたした例においては、壁せん断応力 (WSS) が著しく低下していることが明らかとなった。

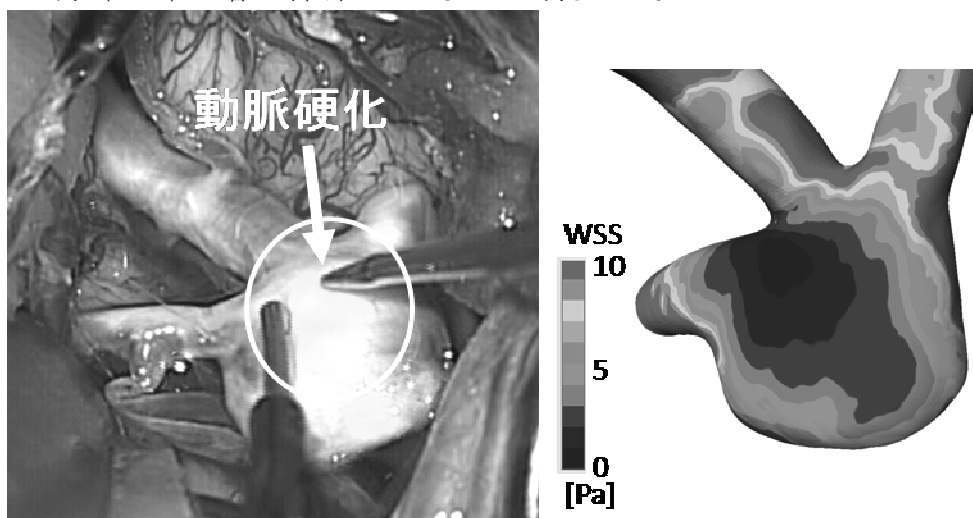


図 1 : 脳動脈瘤の外観 (左) と壁せん断応力 (WSS) 分布 (右)

### 3. 研究目標の達成状況

中大脳動脈瘤は大半が開頭手術によって治療され、その際に壁の性状が明らかとなる。この点に着眼し、データベースから適する症例を抽出、検討を加えることで、脳動脈瘤壁の動脈硬化性変化と壁せん断応力の低下との関係を明らかにすることができた。脳動脈瘤壁の動脈硬化性変化は、破裂を回避する生体側の防御的炎症反応の帰結であると考えられ、脳動脈瘤の自然歴を考えるうえで非常に興味深い知見である。無論、本知見は他の部位の脳動脈瘤にも当てはまるものと考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

次年度は、さらなるデータベース登録症例の蓄積が見込まれるが、本研究の最終目的は脳動脈瘤患者の診療に役立つような医学的知見の発見であり、データベース構築はその手段にすぎない。新知見を得るためには、臨床的特徴を切り口としてその血行動態を解釈する視点、すなわち、医学・工学の両者にバランスよく依拠したいいわゆる「医工学的」視点からの研究を推し進めていく必要がある。

### 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. Sugiyama, M. Ohta, T. Nakayama, H. Shimizu, and T. Tominaga: Oscillatory and stagnant flow in intracranial aneurysms: possible association with atherosclerosis, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 120-121.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし



Project code	J12053
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st year

Development of a Micro-Motor for MEMS Utilizing Smart Polymer  
Fabricated by Photolithography

Masami Nakano\*†, Miklos Zrinyi\*\*††

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Laboratory of Nanochemistry, Semmelweis University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

As a direct continuation of our previous research work, we have proposed to study the electrorotation phenomena of pure photo polymers and polymer composites. Our intention was to develop highly cross-linked epoxy based photoresist polymers designed for micromachining and other microelectronic applications. This polymer should undergo electrorotation in DC field. It was also our intention to study the torque as well as load bearing capacity of polymer rotors.




2. Details of program implement

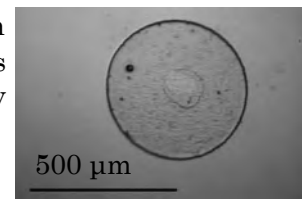
The advantage of using photoresist as base material for micro-motor lies either in the photolithographic technique which makes possible easy microfabrication. Photolithographic technique allows us to transfer geometrical patterns from a photomask to a light sensitive resin which then engraves the exposure pattern into material in the desired pattern. The photopolymer we intend to use is most commonly exposed with conventional UV radiation and may also be exposed with e-beam or x-ray radiation. It has been widely employed in the fabrication of MEMS devices.

3. Achievements

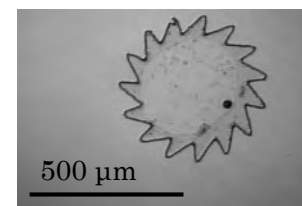
1) Micro-fabrication of polymer rotors: We have succeeded in preparation of photoresist polymer disks, hollow cylinders and gears with variable size, which were fabricated by photolithographic technique, as shown in table 1 and Fig.1..

Table1: Geometrical parameters of polymer microrotors.

SHAPE	SIZE (in $\mu\text{m}$ )					THICKNESS (in $\mu\text{m}$ )	
Disk 	120 X 130	220 X 264	372 X 348	515 X 461	600 X 620	38	
	120 X 130	220 X 264	372 X 348	515 X 461	600 X 620	22	
	120 X 130	220 X 264	372 X 348	515 X 461	600 X 620	16	
Hollow cylinder 	R	100	200	300	400	500	38
	r	40	50	60	70	80	
	R	100	200	300	400	500	22
	r	40	50	60	70	80	
	R	100	200	300	400	500	16
	r	40	50	60	70	80	
Similar to gearwheel 	100	200	300	400	500	38	
	100	200	300	400	500	22	
	100	200	300	400	500	16	



(a) Disk:  $D=500 \mu\text{m}$ ;  
 $t=38\text{mm}$



(b) Gear: Size= $500 \mu\text{m}$ ;  
 $t=38\text{mm}$

Figure 1: Photos of fabricated microrotors.

2) Measurement of rotational speed and torque: A home made device was developed in order to measure the rotational torque of the polymer rotor. The toe of a nylon fiber connected to the shaft of a DC motor is fixed perpendicular to the center of the rotor. When the DC motor rotates the rotor disk immersed in the oil between two electrodes under DC electric field, a torsional angle between two fibers (a distance between two fibers is 10mm) adhered perpendicular to the nylon fiber shaft is measured by recording on a high speed camera. The rotor torque is calculated from a relationship between the applied torque and the torsional angle of the nylon fiber shaft. The representative measured results of polymer composite rotors are shown in Fig. 2.

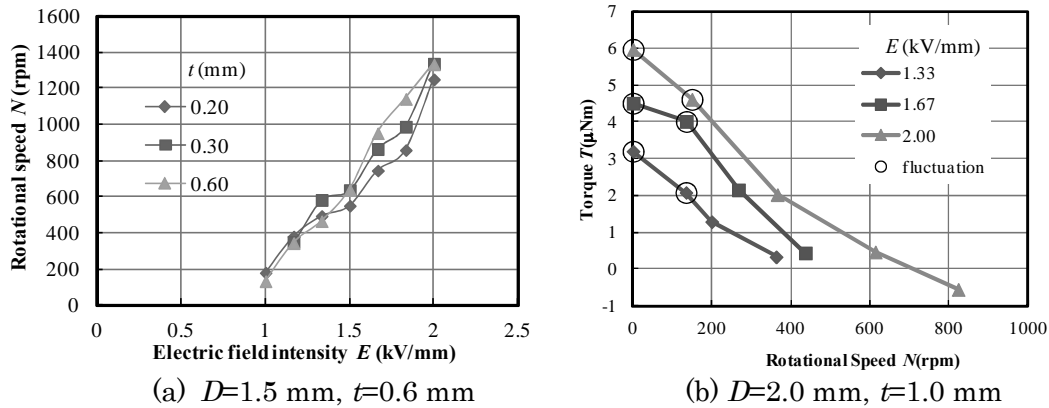


Figure 2: (a) Dependence of rotational speed  $N$  on DC electric field intensity  $E$  and rotor thickness  $t$ , and (b) changes of torque  $T$  vs. rotational speed  $N$  with applied electric field intensity  $E$ .

#### 4. Summaries and future plans

We have prepared several smart polymers showing intensive rotation under DC electric field. The polymer samples can be divided into two groups. One group includes polymer composites that electrorotation phenomena were already intensively studied. The other group contain pure photopolymers that can be fabricated by photolithography. Rotors of different shape and size (disks, hollow cylinders, gears...) were prepared. The next plan refers to the study of electrorotation of photoresist based materials. Not only the rotation speed as a function of DC electric field intensity, but also torque characteristics are planned to study.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - \*[1] M. Zrinyi, M. Nakano, T. Tsujita: Electrorotation of novel electroactive polymer composites in Uniform DC and AC electric field, *Smart Materials and Structures*, Vol.21, No.6, (2012), pp.1-6.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
  - [2] M. Zrinyi, M. Nakano: Novel electroactive polymer composites that performs rotation in uniform DC and AC electric field, *2nd International Conference on Electromechanically Active Polymer (EAP) Transducer and Artificial Muscles*, Potsdam, (2012).
  - [3] M. Zrinyi, M. Nakano: Colloidal Particles that Make Polymers Smart, *International Association of Colloid and Interface Scientists*, Sendai, (2012).
  - \*[4] M. Zrinyi, M. Nakano: Towards Development of Micromotors Based on Electrorotation of Smart Polymers, *Proc. of Twelfth Int. Symp. on AFI/TFI*, Sendai, (2012), pp.132-133.
  - [5] M. Nakano, T. Okumura, M. Zrinyi: Micro-Motor consisting of Electro-Active Polymer Composite Rotor in Dielectric Liquid, *Proc. of JFPS Autumn Conference on Fluid Power Systems*, (2012), pp.37-39. (In Japanese)
- 3) Patent, award, press release etc.
  - [6] The 27th issue of the WW-EAP Newsletter: M. Zrinyi and M. Nakano: Novel electroactive polymer composites performing rotation in uniform DC electric field, (2012). URL: [http://ndea.jpl.nasa.gov/nasa-nde/newsltr/WW-EAP\\_Newsletter14-1.pdf](http://ndea.jpl.nasa.gov/nasa-nde/newsltr/WW-EAP_Newsletter14-1.pdf)

Project code	J12054
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st year (progressing)

### Metal-Containing DLC: Toward a Smart Coating

Julien Fontaine\*†, Toshiyuki Takagi\*\*††  
Takanori Takeno, Koshi Adachi\*\*\*,  
Michel Belin, Sandrin Bec, Thierry Le Mong\*  
Hiroyuki Miki\*\*\*\*

\*Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Ecole Centrale de Lyon,

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\*School of Mechanical Engineering, Tohoku University

\*\*\*\*Center for Interdisciplinary Research, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

DLC coatings are widely used as protective coatings to improve the surface properties of structural materials; for example, to increase hardness and chemical stability. A new type of smart coatings based on metal-containing diamond-like carbon (DLC) is proposed in this study. With the addition of metal clusters into DLC coatings, good electrical conductivity, exhibiting low friction and wear, and high durability under extreme environment appears. A novel smart coating will be developed and characterized.

#### 2. Details of program implement

The evolution of friction coefficient for experiments stopped at 5, 35, 100 and 1000 cycles is plotted on figure 1, with optical images of the corresponding tribofilms formed on the ball counterface in inset. For less than 50 sliding cycles, the friction coefficient increases from about 0.12 to 0.15. Although a tribofilm can indeed be observed as early as 5 cycles, it is not covering the entire contact area. However, after about 50 sliding cycles, the evolution of the friction coefficient is rather slow and increasing very slowly from 0.15 to 0.2. The tribofilms after 100 and 1000 cycles look both smooth and continuous, covering the entire apparent contact area.

Nanoindentation experiments were then conducted on the tribofilms obtained after 100 and 1000 cycles. In order to improve the processing of the load-displacement curves, AFM was also performed on the tribofilm, in an attempt to evaluate the tribofilm thickness and in order to measure piling-up around the indents. Indeed, it is paramount to check the contact area between the berkovich indenter and the probed material to properly compute Hardness and Young's modulus.

As the tribofilms consist mostly of copper, it is not surprising that their hardness is lower than the nanocomposite Cu-DLC itself. Nevertheless, the hardness measured on the tribofilms is 3 to 4 times larger than the value expected for pure copper, which would be about 0.4 GPa. Interestingly, the tribofilm after 100 cycles is thicker than after 1000 cycles, while its hardness is significantly lower. Such increase in hardness could thus account for the increase in friction, and could be explained by shear-induced hardening.

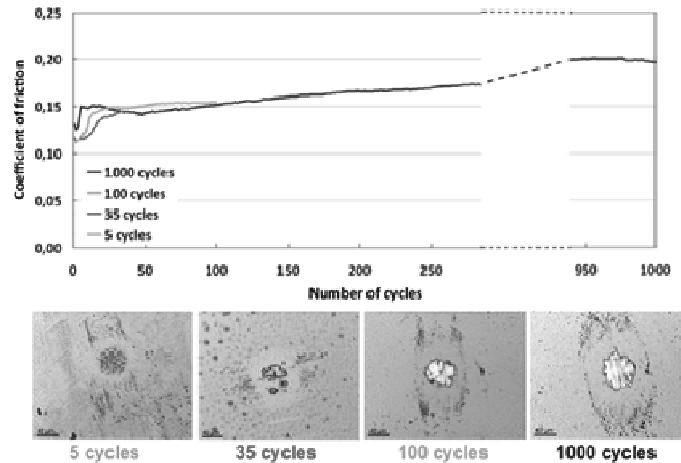


Fig. 1: Evolution of coefficient of friction for a Cu-DLC coating and optical observations of the tribofilms formed on the ball counterface for 5, 35, 100 and 1000 sliding cycles.

### 3. Achievements

Innovative metal-DLC (Me-DLC) nanocomposite coatings are developed, and their tribological behaviour is investigated under various contact conditions. We have achieved most of our purpose.

### 4. Summaries and future plans

The tribological behavior of Me-DLC strongly depends on the growth and evolution of a metal-rich tribofilm formed on the counterface. In the case of Cu-DLC, an unusually hard copper-rich tribofilm is found on the counterface. Its hardness evolution seems correlated with the friction evolution.

(Future plan)

Metal/DLC nanocomposite films will be evaluated as a sensor. Vibration fatigue testing and tribological testing under atmospheric conditions, and nanoindentation testing have been planned. The experiments lead to show the possibility of smart sensor using of Metal/DLC nanocomposite films.

### 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] P. Wang, T. Takeno, J. Fontaine, M. Aono, K. Adachi, H. Miki, T. Takagi: Effects of substrate bias voltage and target sputtering power on the structural and tribological properties of carbon nitride coatings, *The Ninth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2012)*, (2012), pp.764–765.
  - \*[2] H. Miki, T. Takagi, T. Takeno, K. Adachi, J. Fontaine, M. Belin, S. Bec, T. Le Mogne: Metal-Containing DLC: Toward a Smart Coating, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 178-179.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

課題番号	J12055
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	2012.4～2013.3
継続年数	1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\*\*, 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24年度は、細胞の生存率とプラズマ照射条件を検討し、ウイルス照射条件の抽出を行い、この条件においてウイルスの不活化実験を行った。図1に実験装置の概要を示す。平板型電極に高電圧を印加し電極表面にプラズマを発生させる。プラズマは、培地上部に設置した。この時、培地中には過酸化水素が生成されるが、過酸化水素は細胞の不活化の主たる因子として知られているため、過酸化水素を添加した培地も作成し、同様に暴露実験を行った。ウイルスによる細胞変性効果（CPE）の観察には光学顕微鏡を使用し、CPEの有無からウイルスの感染力の指標であるウイルス力価(TCID<sub>50</sub>)を算出した。TCID<sub>50</sub>は以下の様に定義される。

$$\log_{10}(\text{TCID}_{50}) = (\sum h + 0.5)d \tag{1}$$

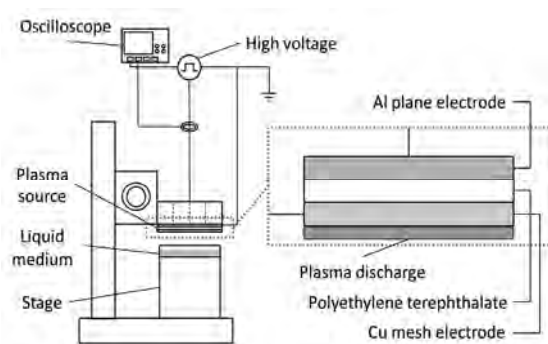


図1 実験装置概要

表1 プラズマ照射培地(a)と過酸化水素添加培地(b)へ暴露した場合のウイルスのTCID<sub>50</sub>の解析結果

(a)	TCID <sub>50</sub> /mL
プラズマ照射培地暴露	2 × 10 <sup>6.83</sup>
コントロール	2 × 10 <sup>6.50</sup>

(b)	TCID <sub>50</sub> /mL
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 添加培地暴露	2 × 10 <sup>5.50</sup>
コントロール	2 × 10 <sup>5.83</sup>

ここで  $h$  は各希釈濃度における陽性率、 $d$  は希釈倍率の常用対数を表す。今回はウイルスソースを 10 倍希釈して実験を行ったので  $d=1$  である。表 1 にウイルスへの暴露実験結果を示す。本実験では、インフルエンザウイルスソースにプラズマ照射培地を混合した場合、インフルエンザウイルスは不活化されなかった。また、過酸化水素添加培地に関しても不活化効果は確認できなかった。原因として、ウイルスソースへの曝露では Fenton 反応に必要な鉄(II)イオンが不足しており、酸化力の強いヒドロキシルラジカルが生成されなかったことが考えられる。ウイルスの不活化効果が報告されている例もあることから、鉄イオンの添加や直接照射について検証を進める必要がある。

### 3. 研究目標の達成状況

(1) プラズマ照射による細胞の不活性化特性が明らかになり、プラズマ照射条件を最適化することを目標とし、当初の目標を達成した。

(2) プラズマ照射によるウイルス不活化特性が明らかになり、プラズマがウイルスの不活化に有効かどうか明らかにすることを目標としたが、ウイルスへの影響を認められる結果は得られなかった。有効性については、さらなる検証が必要である。

### 4. まとめと今後の課題

今年度は、プラズマ照射した培地をウイルスに暴露する手法を用いたが、高活性な化学種を照射するために直接照射する手法を検討する必要がある。また、フェントン反応に必要な鉄イオンを供給した場合についても検証を行う必要がある。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

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, Takehiko Sato, Daisuke Yoshino, Akira Suzuki and Hitoshi Oshitani: Inactivation of MDCK Cell Viability by Exposure to Plasma-treated Medium, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 92-93.

[2] 工藤雄治, 佐藤岳彦, 鈴木陽, 押谷仁: プラズマ照射による MDCK 細胞の不活性化, 第 22 回環境工学総合シンポジウム 2012, (2012), pp. 205-206.

#### 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

課題番号	J12056
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1年目(発展)

### 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. 固体-固体界面においては表面粗さを主な支配因子として熱抵抗がよく観察され, また, 近年では固体-液体界面においても熱抵抗が様々な検討の対象となり, その重要性が広く認識されつつある. 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間隔が界面近傍の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, 面心立方格子の固体結晶における結晶面構造の表面が様々な鎖長をもつアルカンに接する系について熱伝導の NEMD を実施し, 固液界面における界面熱抵抗を観測すると共に, アルカン鎖長や固体表面の違いが熱抵抗に及ぼす影響を解析した.

## 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. 表面ナノ構造間隔  $L$  と熱伝導方向の局所非平衡性の関係を図 1 に示す. ここで, 局所非平衡性は各自由度に対する温度とその平均温度の差として定義した. この図より, 表面ナノ構造間隔  $L$  によって, 界面近傍の局所非平衡性が変化しており, その局所非平衡性の変化は別途調査した表面ナノ構造に起因する固液界面近傍の原子間エネルギー輸送機構の変化に主に起因していると考えられる.

**(2)結晶格子界面** FCC(111)面 (Wall A) と(100)面 (Wall B) が 4 種の直鎖アルカン飽和液 ( $\text{CH}_4, n\text{-C}_4\text{H}_{10}, n\text{-C}_8\text{H}_{18}, n\text{-C}_{16}\text{H}_{34}$ ) に接する系において, 液体を挟む 2 つの固体壁面に温度差を設定することにより, 固液界面を通過する熱流束を発生させ, その際の界面における温度降下を計測した. 解析にあたっては, 古典分子動力学シミュレーションにおいて世界標準の一つとなっている LAMMPS を適用した. 界面における温度降下と熱流束の比により定義される熱抵抗について得られた値を図 2 に示す. 2 種の固体壁表面で大きな差は認められない

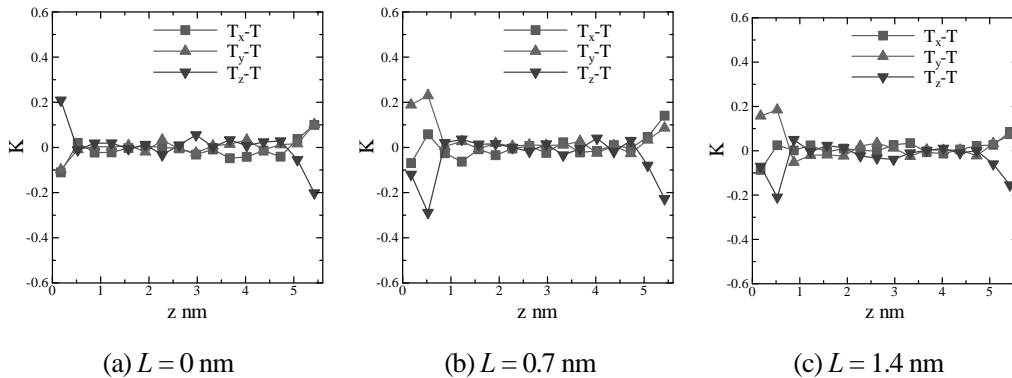


図 1: 表面ナノ構造間隔  $L$  と熱伝導方向 ( $z$  方向) の局所非平衡性の関係

が、固体壁の表面構造が現象に与える影響については、さらに(110)面についても検討する必要がある。液体を構成するアルカン分子の鎖長が大きくなると熱抵抗が増加する傾向が顕著に観察される。これは、固体表面における結晶格子スケールの構造に長い液体分子が適合できず、固液分子間の相互干渉によるエネルギー伝搬が小さくなることによるものと考えられるが、この傾向は C16 程度の鎖長で飽和しつつある。

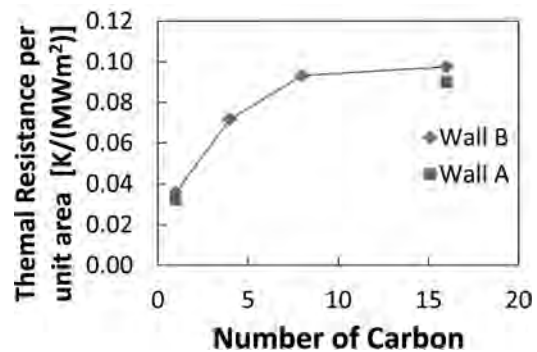


図 2: 固体各表面と各種アルカンの組み合わせに対する固液界面抵抗

### 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] S. Murakami, M. Shibahara and T. Ohara: Molecular Dynamics Study on the Influences of Nanostructure Geometry on the Energy Transport and Local Non-equilibrium Behavior at Liquid-Solid Interfaces, *Proceedings of 23rd International Symposium on Transport Phenomena*, (2012), USB-memory.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[2] M. Shibahara, T. Ohara and G. Kikugawa: Thermal resistance between nano-structured surfaces and liquids, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Tansdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 134-135.

[3] 村上翔, 芝原正彦, 小原拓: 微細構造によって誘起された局所非平衡性が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響, 第 49 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2012), H212.

[4] 芝原正彦, 村上翔, 松本拓也, 小原拓: ナノメートルスケールの微細構造が固液界面の熱抵抗とエネルギー輸送機構に与える影響に関する分子動力学的研究, 日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集, (2012), J053026.

[5] 村上翔, 芝原正彦, 小原拓: 微細構造が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響, 第 26 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2012), E01-1.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし



課題番号	J12057
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	2012.4~2013.3
継続年数	1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、新生組織への血管誘導、再生医療用組織の培養条件の最適化などに関連している。しかし、細胞の酸素環境を制御して応答を観測する手法は十分に確立していない。そこで本研究では、新たなマイクロ流体デバイスを開発し、非線形光学顕微鏡で細胞応答を継時観測することを目的とする。

**2. 研究成果の内容**

本年度は低酸素状態の細胞応答として血管新生に着目した。血管新生の培養モデルとして、正常ヒト臍帯静脈内皮細胞 (normal human umbilical vein endothelial cell: HUVEC) をコラーゲングル基質で培養した。コラーゲンの構造の可視化には第 2 高調波発生 (second harmonic generation: SHG) を用いた。SHG 光はコラーゲンから特異的に発生するので、コラーゲンの構造を無染色で可視化することができる。開発したマイクロ流体デバイスには、コラーゲン注入してゲル化させる観察領域に接する培養液流路とガス流路があり、ガス流路内の酸素濃度を調整することで、観察領域の酸素濃度を制御することができる。

図 1 はコラーゲングル上でコンフルエントになった HUVEC がゲル内へ浸潤して毛細血管様のネットワークを形成する過程で取得した SHG 画像である。細胞播種後の 1 日目には、細胞直下の基底膜の形成に伴うと考えられる SHG 光強度の高い領域がみられた。3 日目には細胞がゲル内へ侵入しているが、SHG 画像では基底膜の分解が確認できる。7 日目にはゲル内に毛細血管様の細胞ネットワークがゲル内で形成されており、細胞周辺には SHG 光強度の高い領域が現れた。SHG を用いることにより従来の可視化法では難しい定量的な構造解析が可能となったことが確認できた。

図 2 にデバイスの観察領域内のコラーゲングルに封入した HUVEC の継時観察画像から解析して得られた細胞の軌跡を示す。コラーゲングルの厚さは 150  $\mu\text{m}$  であるため、不透明なゲル内の細胞も無染色で追跡できる。ガス流路内の酸素濃度を 20% (normoxia) と 5% (hypoxia) にした場合を比較すると、低酸素状態の方が総軌跡長の大きい細胞の数が増加した (図 3)。低酸素状態になると内皮細胞の運動性が亢進することは従来研究の知見と一致している。ただし、細胞ごとに動態は異なっており、細胞スケールの環境は均一ではないことを示唆している。デバイスを用いることで環境を厳密に制御できるので、細胞応答の個体差を考慮した解析が可能となった。

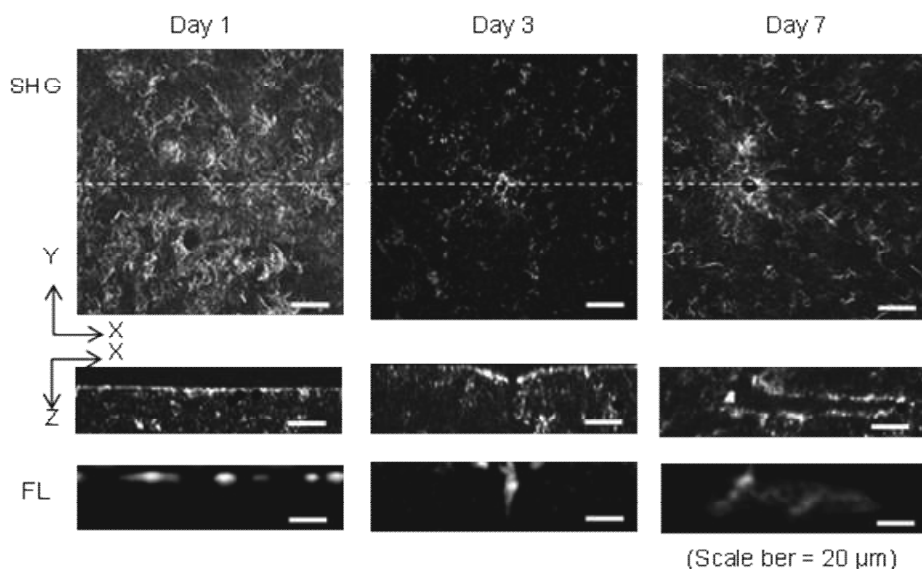


図1：血管新生過程のコラーゲングルの再構成



図2：遊走過程の追跡例

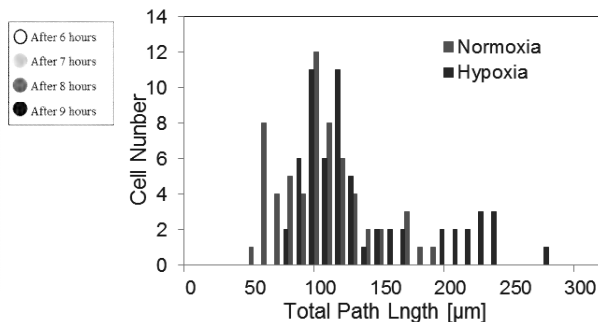


図3：細胞移動距離

### 3. 研究目標の達成状況

当初計画していた実験系の構築は達成した。細胞応答に関する新たな知見を得るまでには至らなかったが、基質再構築を解析する方法は確立できた。

### 4. まとめと今後の課題

酸素濃度制御型マイクロ流体デバイスとSHG顕微鏡を組み合わせた実験系は、血管新生過程における基質再構築の解明に有用であることが確認できた。今後は酸素濃度場と基質構造の細胞スケールの不均一さに着目して、細胞-基質間の相互作用の詳細を明らかにする。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] S. Fukushima, R. Maehara and K. Funamoto: Observation of hypoxia cellular response by using microfluidic devices, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 122-123.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J12058
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1年目(発展)

**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\*, 玉井寛人\*, 鈴木雄太\*, 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

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 Ti<sub>3</sub>Al, TiAl, および TiAl<sub>3</sub> 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, 原料粉末のミリング時間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

成形体の断面を機械的に研磨し, 断面組織について調べた. 図 1 (a)~(e)に成形体断面の SEM 像を示す. 図 1 (a)~(e)中の白色は Ti, 灰色は Al の領域である. ミリング時間 MT の増加に伴い, Ti 粉末は微細化し成形体中に存在する. また, 成形前の Al 粉末は, 凝集し粗大化していたが, 成形後には, Ti の領域間に細かく分散している. これは, Al の変形抵抗が Ti と比較し低いことから, 圧縮応力の負荷により扁平化し, Ti 粉末間に入り込んだと考えられる.

図2に引張試験により得られた応力-ひずみ線図を示す。図2から  $M_T = 10$  min および  $60$  min とそれ以上のミリング時間  $M_T$  の成形体では引張強さ、および伸びに大きな違いが見られる。ミリング時間  $M_T = 10$  min, および  $60$  min では、図1(a)および(b)の断面SEM観察より、成形体厚さ、分散割合に変化はみられなかったが、粗大なTi粉末がまばらに分散している様子が見られた。このことから、Tiの分散性が引張強さおよび伸びに影響していると考えられる。

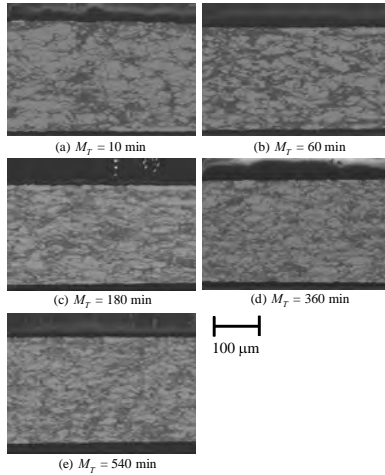


図1：試験片の横断面のSEM像

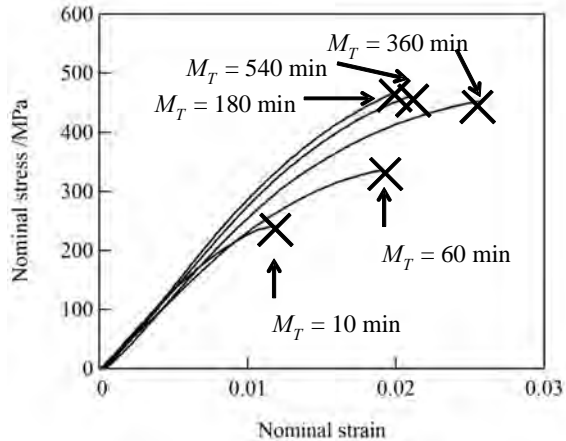


図2：応力-ひずみ曲線

### 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

全ての成形体でAl基Ti分散の組織となった。ミリング時間の増加にともないTi粉末の粒径は微細化され、成形体中のTi分散性が高くなる。ミリング時間360 min以上の成形体でTiAl多結晶体と同等の引張強さが得られた。破断伸びはミリング時間360 minの成形体が最も良好であった。以上のことからCOSME-RTによりTi、およびAlの特性を有した新しい複合材料を開発することができた。

### 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] 堀田 将臣, 中山 昇, 三木 寛之, 宮崎 孝道, 武石 洋征: 常温圧縮せん断法により成形したTi/Al薄板の引張特性に及ぼすミリング時間の影響, 塑性加工, 塑性と加工, Vol. 54, No. 625, (2013), pp. 181-185.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\* [2] Syou Takeda, Noboru Nakayama, Masaomi Horita, Shintaro Abe, Hiroyuki Miki and Hiroyuku Takeishi: Fabrication of Ti/Al Composite Material by Compression Shearing Method at Room Temperature, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 136-137.

[3] M. Horita, N. Nakayama, N. Saito, H. Miki, H. Takeishi, H. Mugishima, T. Suzuki: Mechanical Properties of Ti Composite Material by Compression Shearing Method at Room Temperature, *5TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS*, Venice, (2012), USB.

[4] 堀田将臣, 中山昇, 三木寛之, 武石洋征: 常温圧縮せん断法により成形したTi分散Al基複合材料の機械的性質, 日本塑性加工学会平成24年度塑性加工春季講演会, (2012), pp. 213-214.

課題番号	J12059
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	2012.4~2013.3
継続年数	1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\*\*††

吉田 義樹\*\*\*

\*金沢工業大学工学部, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙輸送ミッション本部

†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。微細気泡群の特性量に基づくキャビテーションの熱力学的効果の数値モデル及び高精度な数値予測が可能なCFDコードを開発することによって、ロケットエンジン用ターボポンプの高性能化や開発コストの縮減が可能となる。また、高精度なCFD解析を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・設計が期待できる。

## 2. 研究成果の内容

申請者はこれまでに、熱力学的効果が顕著である極低温流体を用いたキャビテーション実験を行い、極低温流体に発生するキャビテーションがマイクロオーダー以下の非常に微細な気泡で構成されていることを明らかにし、また、発生したキャビティ周囲の乱れ強さが熱力学的効果の程度を支配要因の一つであることを明らかにしてきた。本研究課題では、申請者のこれまでの研究成果から得られた知見に基づいた数値モデルを構築し、所内対応研究者がこれまでに構築してきたキャビテーション解析用CFDコードに適用し、微細気泡群における熱力学的効果の作用メカニズムの解明を試みる。

本年度は、均質モデルの計算コードに容易に適用可能な簡易熱力学的効果モデル(図1)を提案し、本モデルの感度解析として、主流温度を一定、経験定数を1として三枚周期平板翼列まわりの数値解析を行い、キャビテーションの様相と時間平均キャビティ体積、および揚程低下点の変化について考察し、本モデルの有効性を検討した。その結果、常温水のキャビテーションでは、図2(a)に示すようにシート状のキャビテーションが発生し、シート界面に沿って蒸発領域が分布した。一方、熱力学的効果の顕在

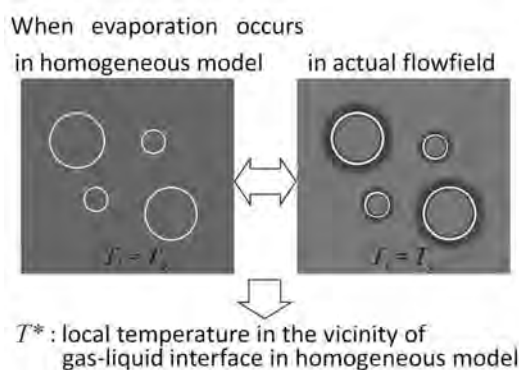
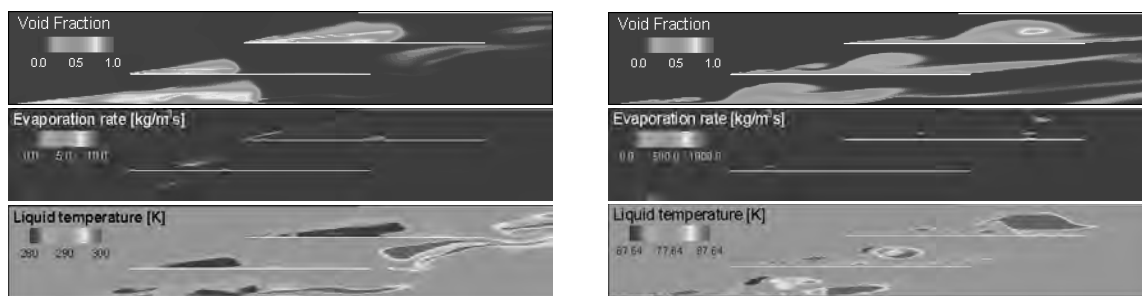


Fig. 1 conceptual diagram of the simplified thermal effect model for homogeneous model

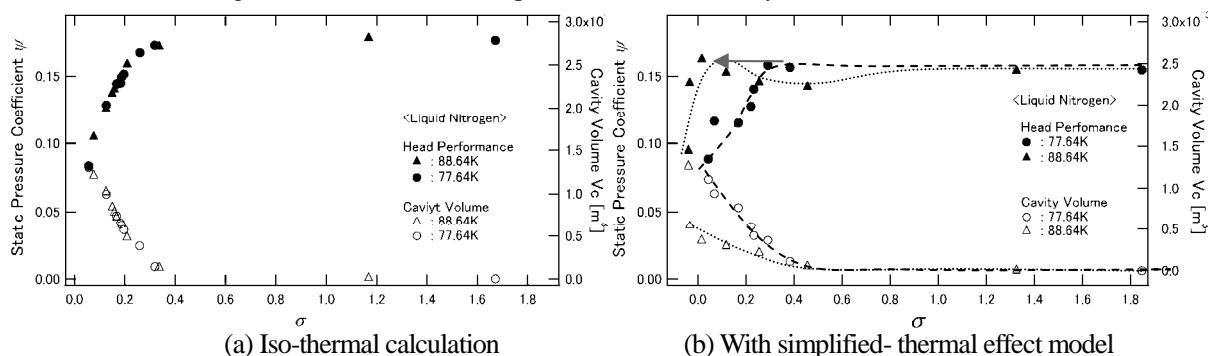
化する液体窒素のキャビテーションでは、図2(b)に示すようにキャビティ全体のボイド率が低くなり、実験で観察される微細気泡から成る雲状のキャビテーションに相当する状態が再現できた。また、主流温度を変えた液体窒素のキャビテーションの計算では、図3(b)に示すように、主流温度が高いほど、同じキャビテーション数で比較して時間平均キャビティ体積が抑制され、その結果、揚程低下が低キャビテーション数側へとシフトするという、極低温ポンプで見られる熱力学的效果が定性的に再現された。



(a) Water (290K,  $\sigma = 0.0121$ ,  $\psi = 0.159$ )

(b) Nitrogen (77.64K, 0.1221,  $\psi = 0.128$ )

Fig. 2 Time evolution of the aspect around three-blade cyclic cascade at  $AoA=7^\circ$



(a) Iso-thermal calculation

(b) With simplified-thermal effect model

Fig. 3 comparison of time averaged cavity volume and cascade head at 77.64 K and 88.64 K

### 3. 研究目標の達成状況

熱力学的效果が顕在化する極低温キャビテーションの数値解析にある程度有効なモデルを提案することができたが、定量的予測の高精度化と、微細気泡群における熱力学的效果の作用メカニズムの解明には至っておらず、本研究課題を継続して行う必要があると言える。

### 4. まとめと今後の課題

本年度の研究では、定性的にはあるが、本簡易熱力学的效果モデルの有効性が示された。今後は、申請者らの先の実験において得られている単独翼まわりの温度分布に対してベンチマーク計算を行い、経験モデル定数の値を検討し、定量的な熱力学的效果の再現を試みる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)  
なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] Yuka IGA and Kazuki NIIYAMA: Mechanism of Thermal Effects in Micro-bubble Cavitation, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 40-41.

\*[2] 伊賀由佳, 新井山一樹: 均質モデルによる極低温流体中の翼形まわりに発生するキャビテーションの数値解析, キャビテーションに関するシンポジウム (第16回) 講演論文集, 金沢, (2012), No. S1-6, pp. 1-6, in CDROM.

課題番号	J12060
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	3年目

渦構造の安定性に対する軸流効果の研究  
Effects of Swirl on the Stability of Vortices

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

層流・乱流を問わず種々の流れにあらわれる渦構造の安定性は流体力学の基本問題の一つである。本研究において、われわれは渦構造の安定性における渦度方向の速度成分（軸流）による効果を解明し、これにより渦構造の動力学に新たな知見を付与するとともに、いくつかの具体的な流れについて応用することを目的とする。

### 2. 研究成果の内容

渦構造の安定性として引き続き曲率不安定性に着目した。曲率不安定性は曲がりにより直接の起源をもつパラメタ共鳴型の不安定性であり、曲がりをもつ最も単純な渦構造である渦輪について初めて存在が示されたものである (Fukumoto & Hattori, 2005; Hattori & Fukumoto, 2003)。一昨年度、昨年度に続いて、回転翼端渦のモデルである軸流をもつらせん渦を対象とした。これまでのモデルでは、解析を簡便にするため、らせん渦の渦核表面が固定されて動かないという境界条件を仮定していたが、これは実際の回転翼端渦には当てはまらない。そこで、より現実的に渦核表面が自由に動くことができる場合を扱うため、渦核外部をポテンシャル流とし渦核表面において接続条件を課す自由境界の場合のモード安定性解析を行った。

まず、自由境界の場合の不安定成長率を評価するための定式化を行った。次に、Kelvin 波の分散曲線を調べ、自由境界の場合にのみ存在する孤立モードが、軸流の強さによって特徴的なふるまいをすることを明らかにした (図 1)。この結果、曲率不安定となる Kelvin 波の組の中で成長率が大きい principal mode のあらわれ方に固定境界の場合にはないユニークな性質を発見した。この結果、遷移のおこる波数において不安定成長率が大きくなることがわかった。また短波長の極限においては不安定成長率の値が境界条件に依存しないことも確認された (図 2)。

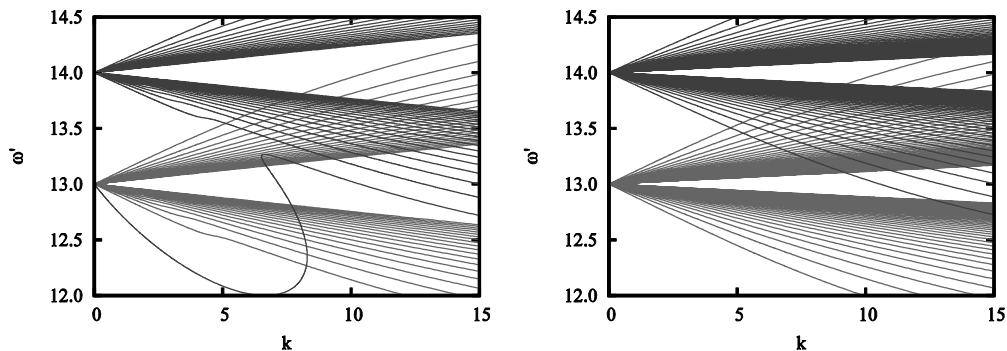


図 1 : 境界条件による分散関係の違い。(左) 自由境界, (右) 固定境界

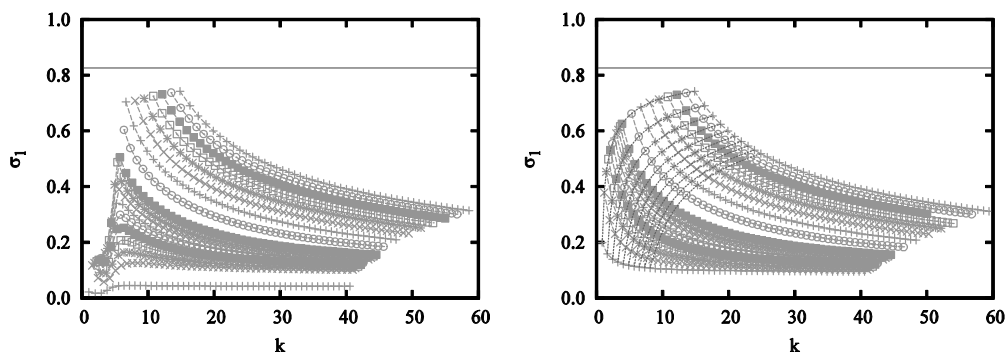


図2：境界条件による不安定成長率の違い。(左)自由境界，(右)固定境界

### 3. 研究目標の達成状況

本研究は、軸流効果の一般論を確立し、その応用として流体機械・風車などの回転翼から放出される翼端渦の安定性に対する軸流の効果を定量的に明らかにすること、特に、不安定化現象とその後の流れの状態が、流れの条件にどのように依存するかを解明することにより、流体機械や風車の効率向上、騒音低減の指針を与えることを目標としてきた。今年度の研究により、回転翼端渦のモデルであるらせん渦の不安定性について、無限領域中の場合のモード安定性解析を行い、らせん渦がどのような擾乱に対して不安定化するかを明らかにすると同時に、軸流が Kelvin 波の分散曲線を大きく変え、これが不安定成長率に影響することを見出した。さらに境界条件による不安定成長率の違いを明らかにすることができた。モード安定性解析の結果は投稿中である。

総じて十分な結果を得たと考える。

### 4. まとめと今後の課題

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を調べた。一般に軸流をもつ場合に、モード安定性解析により、軸流の効果および軸流の振りの結合効果を解明した。特に、境界条件を変更することにより、現実の回転翼端渦に近い無限領域中のらせん渦の不安定性を明らかにすることができた。

### 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] Y. Hattori and Y. Fukumoto: Effects of axial flow on the stability of a helical vortex tube, *Phys. Fluids*, 24, (2012), 054102 (15 pages).

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[2] Yuji Hattori and Yasuhide Fukumoto: Modal Stability Analysis of a Helical Vortex Tube with Axial Flow, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 168-169.

[3] Yuji Hattori and Yasuhide Fukumoto: Effects of Axial Flow on the Curvature Instability of a Helical Vortex Tube: Modal Analysis, *The Twenty third International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2012)*, Beijing, (2012).

[4] 服部裕司, 福本康秀: 軸流をもつらせん渦の不安定性, 第61回理論応用力学講演会, 東京, (2012).

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし



課題番号	J12061
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	2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 Contact Alignment for the Slider Specimen of Tribometer**

後藤 実<sup>†</sup>, 高木 敏行<sup>\*\*††</sup>  
 伊藤 耕祐<sup>\*\*\*</sup>, 竹野 貴法<sup>\*\*\*\*</sup>, 三木 寛之<sup>\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>宇部工業高等専門学校, <sup>\*\*</sup>東北大学流体科学研究所  
<sup>\*\*\*</sup>日本大学工学部, <sup>\*\*\*\*</sup>東北大学工学部  
<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>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。硬質炭素膜のトライボロジー現象の正確な理解のためには摩擦界面を高精度に解析する必要があり、そのためには分析・解析装置内で摩擦時の接触アライメントを再現可能であることが必要である。そこで、スライダー側の摩擦面と平行な基準面を持つスライダー試料保持機構の開発と、往復動摩擦・摩耗試験時の荷重変化に対して接触アライメントが変化しない摺動機構をそれぞれ開発する。継続研究の2年目にあたる本年度は、前年度の研究成果を反映したアライメント機構を流体研所有の往復動式摩擦・摩耗試験機(Ecole Centrale de Lyonの技術提供)に実装し、金属含有DLC(高木研究室開発)に安定した動的導電性と低摩擦摺動をもたらすトライボフィルム形成条件並びにその諸物性を明らかにする。

**2. 研究成果の内容**

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補助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銀含有DLC(以下、Ag-DLC)と真鍮球の摩擦試験を実施し、摩擦により摺動相手材表面に生成したトライボフィルムの観察およびエネルギー分散分光法による組成分析を実施した(図1参照)。その結果、トライボフィルムはほぼAgのみで構成されていることが明らかになった。

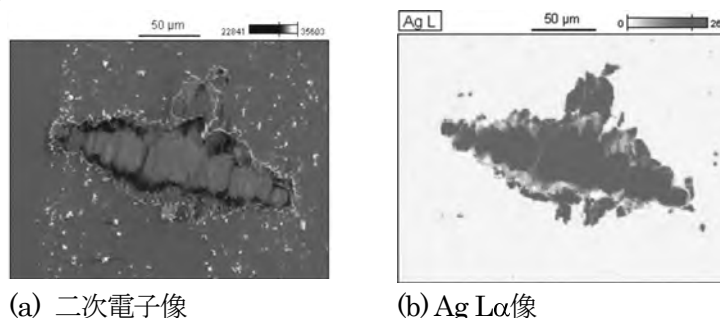


図1：銀含有DLCとの摩擦で摺動相手材摩擦面に生じたトライボフィルムの分析例

また、共同研究相手先である ECL において、ナノインデンテーション装置によるトライボフィルムの硬さ測定も可能なアライメントの精度であることを確認した。

### 3. 研究目標の達成状況

本研究課題の成果により開発し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および摩擦試験時の接触アライメント変化を抑制する補助機構により、摩擦力 0.01~2.5 N の範囲におけるスライダ側試料のねじれ変形が抑制され、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硬さ測定が可能である水準のスライダ側摩擦面と保持機構基準面との平行が保たれることを実験的に確認でき、当初の研究目的は達成された。

### 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詳細寸法形状の最適化を図ると共に、トライボフィルムのナノインデンテーション測定および透過型電子顕微鏡、X 線回折による構造解析への適用性を明らかにしていく。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

該当なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Minoru Goto, Julien Fontaine, Takanori Takeno, and Hiroyuki Miki: Tribological Properties of Ag-DLC under Various Loading Conditions, *Proceedings of the Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 19-21.

\*[2] Minoru Goto, Kosuke Ito, Hiruyoyuki Miki, Takanori Takeno, Toshiyuki Takagi: Study of Contact Alignment for the Slider Specimen of Tribometer, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 138-139.

[3] 後藤 実, Julien Fontaine, Sandrine Bec, 伊藤 耕祐, 竹野 貴法, 三木 寛之: Cu-DLC ナノコンポジットコーティングの摩擦特性におよぼすトライボフィルム生成の影響, 日本機械学会 [No. 12-14] 第 12 回機素潤滑設計部門講演会, (2012), pp. 99-100.

[4] 後藤 実, Fontaine Julien, 竹野 貴法, 三木 寛之: 異なる荷重条件における銀含有 DLC ナノコンポジット膜の摩擦係数と接触電気抵抗, ライボロジー会議 2012 秋, 室蘭, (2012), pp. 65-66.

#### 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

Project code	J12062
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	3rd year

## Entropy Flow in Magnetically Ordered Heusler Alloys under Influence of Temperature or Magnetic Field

Vladimir Khovaylo\*†, Toshiyuki Takagi\*\*††, Hiroyuki Miki\*\*,  
Ekaterina Avilova\*, Makoto Ohtsuka\*\*\*, Vladimir Sokolovskiy\*\*\*\*,  
Vasiliy Buchelnikov\*\*\*\*

\*National University of Science and Technology “MISiS”

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

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

\*\*\*\*Faculty of Physics, Chelyabinsk State University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Purpose of the project is to study, both experimentally and theoretically, entropy change in magnetically ordered Heusler alloys  $\text{NiMnX}$  ( $X = \text{Ga}, \text{In}, \text{Sn}$ ) caused by temperature or by an external magnetic field.

### 2. Details of program implement

In  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Ga}$ , the magnetostructural transition occurs just above room temperature, e.g. at  $T_m \approx 308$  K for the  $x = 0.25$  composition. Recently, a giant magnetocaloric effect (MCE) with  $\Delta S_{mag} \approx -64$  J/(kgK) for the magnetic field change of 5 T has been reported for  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Ga}$  at 308 K. This temperature is very suitable for the purpose of the room-temperature magnetic refrigeration. Therefore, there is a strong motivation for a detailed investigation of MCE and magnetic properties of the  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Ga}$  alloys.

We performed experimental and theoretical studies of magnetocaloric effect and the

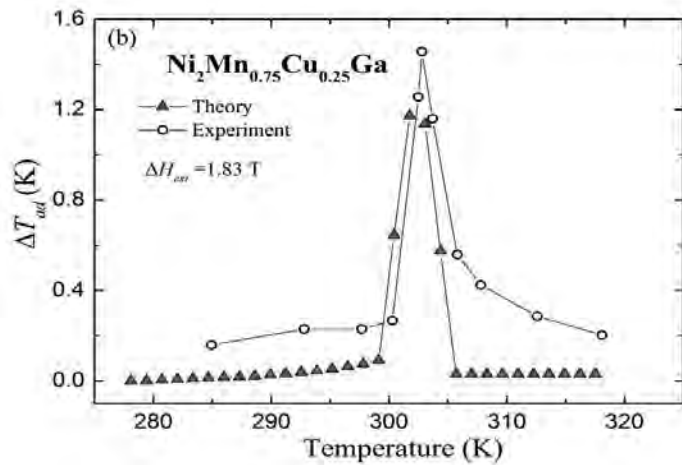


Fig. 1. Theoretically calculated vs experimentally measured adiabatic temperature change in  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Ga}$  for the magnetic field change from 0 to 1.83 T.

exchange interactions in  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Ga}$  Heusler alloys by the direct measurements of MCE and the *ab initio* and Monte Carlo calculations. We employ first-principles electronic structure calculations in conjunction with a Heisenberg model to compute the sublattice specific pairwise exchange interactions. The knowledge of the exchange interactions in  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Ga}$  helped to construct, both qualitatively and quantitatively, a correct picture of the magnetic interactions in this system. Also, it allows one to track

the trends in magnetization and to calculate the main characteristics of MCE which then can be compared with the experimentally measured ones.

The *ab initio* study of the influence of the Cu excess  $x$  on the strength of magnetic interactions revealed that Cu weakens Mn-Ni interaction and has a complex impact on the Mn-Mn interactions. Theoretically calculated magnetic phase diagram of  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Ga}$  is in a good agreement with available experimental data. Calculated by the Monte Carlo method the isothermal magnetic entropy change  $\Delta S_{mag}$  in a  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Ga}$  alloy is significantly smaller around the coupled magnetostructural phase transition temperature than the reported earlier experimental  $\Delta S_{mag}$ . This discrepancy is ascribed to an overestimation of the experimental  $\Delta S_{mag}$  at the magnetostructural phase transition. Theoretically determined adiabatic temperature change  $\Delta T_{ad}$  in  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Ga}$  agrees well with  $\Delta T_{ad}$  measured experimentally by a direct method.

### 3. Achievements

The main achievements are as follow

- Magnetic exchange constants and magnetocaloric properties of  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Ga}$  Heusler alloys were calculated by *ab initio* and Monte Carlo methods. Theoretical magnetic phase diagram of the system is in a good agreement with experimental one.
- Adiabatic temperature change  $\Delta T_{ad}$  in  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Ga}$  was measured experimentally by a direct method. Theoretically calculated  $\Delta T_{ad}$  is in a good agreement with the experimental one.

### 4. Summaries and future plans

In summary, magnetic exchange constants of  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{Ga}$  Heusler alloys were calculated from the first principles. Magnetocaloric properties of a representative of this alloy system,  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Ga}$  were studied theoretically by a Monte Carlo method and experimentally by direct measurements of the adiabatic temperature change. Calculated by the Monte Carlo method the isothermal magnetic entropy change  $\Delta S_{mag}$  in a  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Ga}$  alloy is significantly smaller around the coupled magnetostructural phase transition temperature than the reported earlier experimental  $\Delta S_{mag}$ . This discrepancy is ascribed to an overestimation of the experimental  $\Delta S_{mag}$  at the magnetostructural phase transition. Theoretically determined adiabatic temperature change  $\Delta T_{ad}$  in  $\text{Ni}_2\text{Mn}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Ga}$  agrees well with  $\Delta T_{ad}$  measured experimentally by a direct method.

### 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, K. Skokov, H. Miki, O. Gutfleisch: Dependence of the magnetocaloric effect in ferromagnetic shape memory Heusler alloys on measurement protocol, *Program and Abstracts Book of 19<sup>th</sup> International Conference on Magnetism (ICM-2012)*, Busan, (2012), p. 63 (oral talk).
  - \*[2] V. Khovaylo, K. Skokov, E. Avilova, V. Sokolovskyi, V. Buchelnikov, S. Taskaev, H. Miki, T. Takagi: Magnetic Field Induced Entropy Change in Ni-Mn(Cu)-Ga Heusler Alloys, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 170-171.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

Project code	J12063
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st year (progressing)

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

Jiří Jeništa\*†, Hidemasa Takana\*\*, Hideya Nishiyama\*\*††, Milan Hrabovský\*,  
Tetyana Kavka\*

\*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 the hybrid-stabilized argon-water electric arc for broad range of operational parameters for subsonic-supersonic plasma flow regimes. Investigation of characteristics and processes in the discharge and near-outlet regions of the arc for homogeneous/non-homogeneous mixing of plasma species within the discharge. A comparison of the calculated results with available experiments.

### 2. Details of program implement

Further calculations of processes in the hybrid-stabilized electric arc and interpretation of the obtained results for currents 300-600 A and for 22.5-40 standard liters per minute (slm) of argon have been focused on the influence of turbulence within the discharge and near-outlet regions of the arc. Turbulence is modelled by Large-eddy simulation using the Smagorinsky sub-grid scale model with the constant values of the Smagorinsky coefficient ( $C_s = 0.1$ ) and the turbulent Prandtl number ( $Pr_t = 0.9$ ). To suppress turbulence near the walls we applied a Van Driest damping function near the walls. Results between turbulent and laminar flow regimes have been then compared.

### 3. Achievements

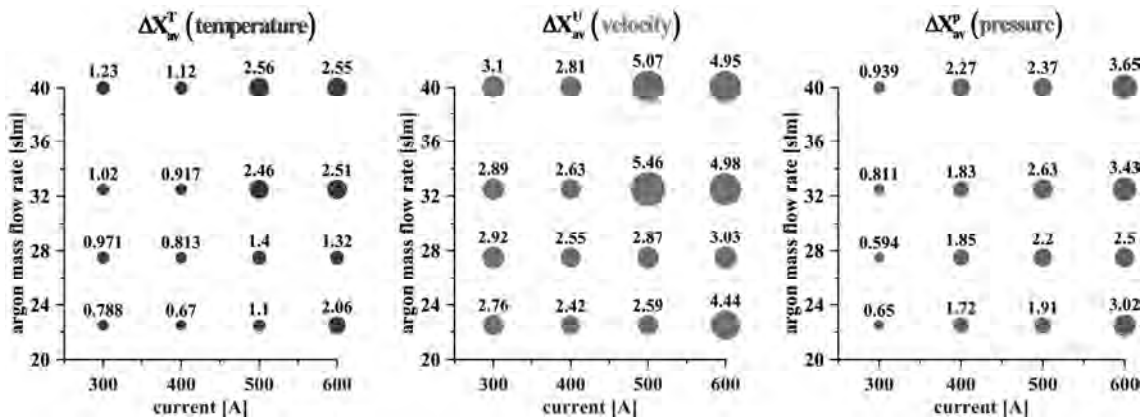


Figure 1. Average relative difference in per cent between turbulent and laminar models within the volume of the discharge and the region downstream of the nozzle exit for temperature, velocity and pressure.

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

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

- Maximum relative difference of each of the monitored physical quantities calculated at the arc axis, along the radius near the outlet nozzle and within the volume of the discharge and near-outlet region is less than 10 %.

- Difference generally increases with current; the maximum value of the difference occurs for the Reynolds number. The maximum value of the Reynolds number is about 13 000.

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

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

#### 4. Summaries and future plans

The results of the project demonstrate relatively weak influence of turbulence on performance of the hybrid-stabilized arc.

Our future plans includes mainly:

- 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)  
Not applicable.

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

\*[1] 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: Role of Turbulence and Radiative Transfer Method, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Information*, Sendai, (2012), pp. 68-69.

[2] 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, *Proceedings of the Ninth International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 698-699.

[3] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlová, V. Aubrecht and P. Křenek: The influence of turbulence and radiative transfer method on characteristics of a hybrid-stabilized argon-water electric arc, *Scientific Program & Abstracts of the Twelfth European Plasma Conference (HTPP-12)*, Bologna, (2012), on USB flash disc.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J12064
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	1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\*  
 \*東北大学流体科学研究所, \*\*Ecole Centrale Lyon  
 †申請者, ††所外対応研究者

**1. 研究目的**

本研究では、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、光干渉技術を応用利用し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、観察実験を東北大学側で行い、数値シミュレーションを Ecole Centrale Lyon 側で行う体制をとり、期間内に適宜研究打ち合わせを行ってきた。観察実験では、流体科学研究所にて開発・改良された温度場・流動場同時計測システムを用いて、パラメトリックな実験を行った。自然対流が十分に発達し観察できる最小サイズの観察セルを製作し、 $Pr=7$ の純水を用いて実験を行った。利用した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 (PTV) を融合したもので、2つの情報を同時に確認できるソフトウェアを開発したものである。図1に示すように、干渉計による温度場および PTV による流れ場を可視化することができ、閉空間内自然対流場の温度場・流動場ともに非接触で計測を行った。これにより信頼のある諸データを取得でき、温度場と流れ場の関係性を定量的に評価した。

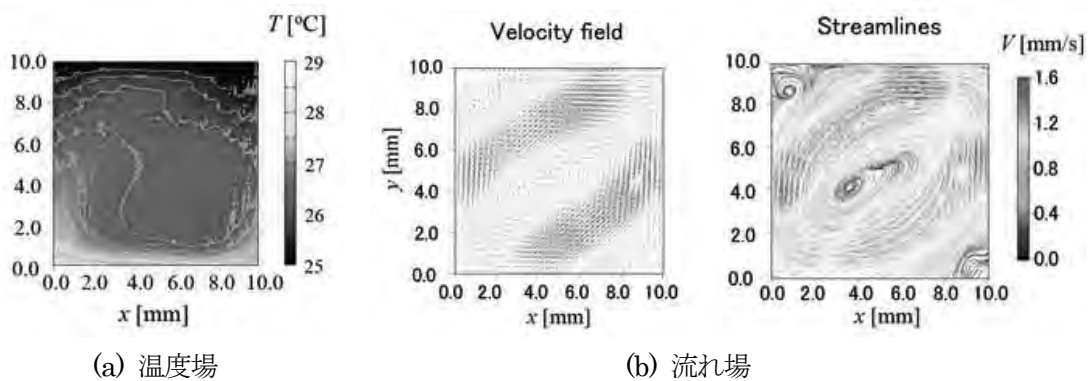


図1：同時計測システムによる温度場・流れ場の可視化

一方、数値シミュレーションでは、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。これらの結果を元に、観察実験結果と合わせて不安定化に至る条件の検証を行い、不安定化メカニズムの解明を行った。

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、実験実施と数値計算実施の役割を明確にして研究を遂行したので、並行して研究成果を上げていくことができた。数値シミュレーションにて推定された重力加速度の方向が不安定化に及ぼす影響については実験をすることができなかったため、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、実験的および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、重力加速度方向が遷移過程に大きな影響を及ぼすことが分かった。今後は実験的にその影響を評価し、数値解析によって得られた結果と比較を行っていく。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[1] J.F. Torres, A. Komiya, E. Shoji, J. Okajima and S. Maruyama: Development of phase-shifting interferometry for measurement of isothermal diffusion coefficients in binary solutions, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.50-9, (2012), pp. 1287-1296.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] J.F. Torres, D. Henry, 小宮敦樹, 円山重直: Instability Analysis of Natural Convection inside a Tilted Cubic Cavity, 第49回日本伝熱シンポジウム講演論文集 Vol. II+III, (2012), 675-676 頁.

[3] J.F. Torres, A. Komiya, D. Henry and S. Maruyama: Measurement of Soret Coefficients in Binary Solutions by Phase-Shifting Interferometry, *Abstracts of 10th International Meeting on Thermodiffusion*, Brussels, (2012), CD-ROM.

\*[4] J.F. Torres, A. Komiya, D. Henry and S. Maruyama: Instability of Rayleigh-Benard Convection: Comparison Between Experimental and Numerical Approaches, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 70-71.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許） なし

（受賞） 受賞者：J.F. Torres, D. Henry, A. Komiya and S. Maruyama,

年月日：2013年 2月 20日

受賞名：Best Poster Award

組織名：ELyT Laboratory

題目：Instability of Natural Convective Flows inside Tilted Cubic Cavities

（マスコミ発表） なし



課題番号	J12065
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1年目(発展)

**珪藻の二酸化炭素吸収過程におけるマイクロチャンネル内物質輸送**  
**CO<sub>2</sub> Absorption Process and Mass Transfer in Micro Channel of Diatoms**

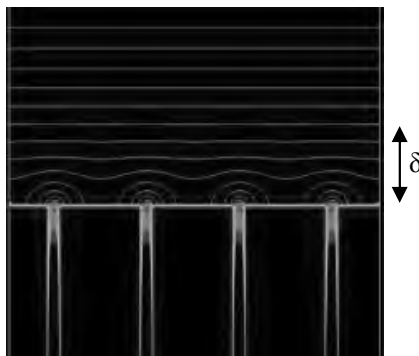
小宮 敦樹\*†, Gary Rosengarten\*\*††  
 \*東北大学流体科学研究所, \*\*MIT University  
 †申請者, ††所外対応研究者

**1. 研究目的**

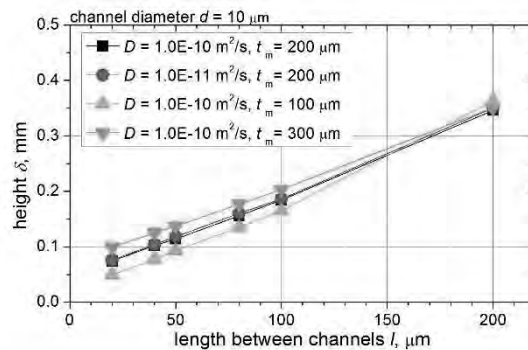
本研究は、海洋中の珪藻類が行っている二酸化炭素吸収過程に着目し、珪藻の口に相当する唇状突起周辺における物質移動現象をその場観察して、マイクロスケール狭チャンネル内における物質輸送過程とその促進・抑制方法を実験的に捕らえようとするものである。初年度である本年度は、高精度位相シフト干渉計を用いて狭チャンネル近傍の物質移動過程を観察し、束縛拡散における物質流束および見かけの物質拡散係数導出法を検討する。併せて、珪藻近傍のサブミリスケール領域の高精度可視化技術の確立を図る。

**2. 研究成果の内容**

本年度は既存システムの改良と、サブミリスケールの高精度可視化に向けた装置およびソフトウェアの開発を中心に行った。オーストラリア側で開発された珪藻類の顕微観察システムを、流体研既有的のマッハツェンダー型位相シフト干渉計に組み込めるようなレイアウトで干渉計を改良した。可視化領域の決定には、簡易数値計算結果を用いた。干渉計は光軸方向に一様分布を呈する密度分布は定量的に可視化することができるが、三次元分布を有する場においては、その光軸方向における積分値しか得ることができない。そのため、数値計算を用いて濃度分布が十分に一次元とみなせる領域を推定し、可視化領域を決定した。図 1(a)に示すように、マイクロチャンネル径5-20μmを通過する物質の濃度分布は直ちに均一化され、図1(b)に示すようにチャンネル端から約0.3mmの領域ではほぼ一次元とみなすことができる。これにより、干渉計で可視化すべき領域は2mmもあれば十分であることがわかった。



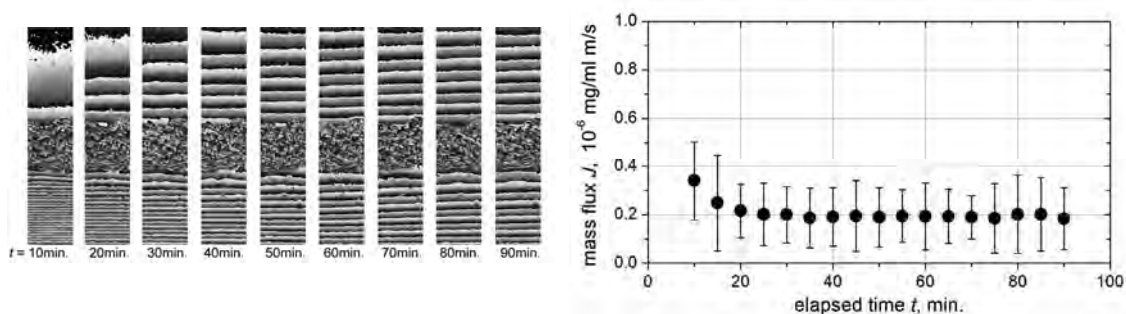
(a) チャンネル端近傍の濃度場



(b) 一次元濃度分布とみなせる厚さとチャンネル間距離の関係

図 1：非定常濃度場の数値計算による一次元性評価

そこで、視野を拡散の進行方向に2mmとし、マイクロチャネルを通過する物質輸送現象である束縛拡散の可視化実験を行った。可視化結果を図2(a)に示す。図2(a)はLysozymeの拡散実験結果であり、上部に純水を、下部にLysozyme溶液を満たして行った結果である。図から明らかなように、濃度分布を示す縞の粗密度合いが上部と下部で大きく異なっており、これはマイクロチャネルを通過する水分子とLysozyme分子の物質流束が等しくないことを意味している。つまりは、マイクロチャネルという物理的空間制限により、物質流束が制御されていることになる。図2(b)は、拡散開始からの各時刻におけるチャネル端近傍のLysozyme物質流束の変化を表している。時間の経過とともに物質流束は一定値に収束し、物質流束を定量的に評価できたといえる。



(a) 干渉計による非定常拡散場の可視化

(b) 各時刻における物質流束の変化

図2：分子量と物質拡散係数の関係

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、高精度位相シフト干渉計を用いて狭チャネル近傍の物質移動過程を観察し、束縛拡散における物質流束および見かけの物質拡散係数導出法を検討することに焦点を絞り、実験的アプローチを中心に研究を遂行した。マイクロチャネル近傍の非定常濃度場を定量的に計測できたことから、全体としては90%の達成度と評価することができる。

### 4. まとめと今後の課題

今年度はマイクロチャネル近傍の非定常濃度場可視化技術の確立を図った。その結果、干渉縞画像から定量的な物質流束の導出を行うことができ、マイクロチャネルの拡散場への影響について評価することができた。今後は、珪藻を用いた実験を行っていく。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

[1] J.F. Torres, A. Komiya, J. Okajima and S. Maruyama: Measurement of the Molecular Mass Dependence of the Mass Diffusion Coefficient in Protein Aqueous Solutions, *Defects and Diffusion Forum*, Vol.326-328, (2012), pp. 452-458.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] A. Komiya and J. Chevalier: Experimental Trial to Active Control of Protein Mass Flux in Hindered Diffusion Field, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Transport Phenomena*, Auckland, (2012), CD-ROM 268.

#### 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	J12066
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	2012.4~2013.3
継続年数	2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。われわれは爆風波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 (媒体の密度と音速の積) 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、衝撃波作用動物実験や脳の模擬物質を用いた衝撃波伝播実験等を行って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、衝撃解析コード ANSYS®AUTODYN®を用いて、先の動物実験における空気中で発生させた微小爆薬起爆衝撃波をアクリル円管内で伝播させ、脳と干渉させた挙動についての数値模擬を行い、脳内の圧力伝播挙動に関して検討した。

**2. 研究成果の内容**

空気中における微小爆薬起爆衝撃波と脳の干渉挙動を ANSYS®AUTODYN®を用い、Euler ソルバーを適用した 2 次元軸対称モデルで解析を行った。本解析では、ラット頭部の模擬は簡略的に頭蓋骨等がない脳だけのモデルとした。解析領域は 14 mm×70 mm で、x 軸を対称とした。第一段階として微小爆薬起爆直後から 3 μs までの間を 0.01mm/cell の等間隔で wedge 状の 10mm の範囲を計算後、リマップ手法によって、0.1mm/cell の等間隔で図に示す計算領域で計算を行った。動物実験と同配置でアクリル管および脳を模擬したゼラチン (20wt%) を配置した。解析領域に脳モデルの直前の空気中、脳モデル内の図中で示す位置に圧力測定点を設けた。材料モデルとして、空気は、密度  $1.225 \times 10^{-2} \text{g/cm}^3$ 、比熱比 1.4 の理想気体状態方程式を適応、脳の模擬としてゼラチン 20wt% を想定して、AUTODYN 物性ライブラリーの水の状態方程式、Mie-Gruneisen 型線形 Shock Hugoniot 状態方程式を用いてゼラチンに調整して適応した。また、空気とゼラチンは大気圧 (101.3kPa) を考慮して領域を満たした。アクリル (管) は、Mie-Gruneisen 型線形 Shock Hugoniot 状態方程式とし、微小爆薬 (AgN3) に対しては、JWL 状態方程式を適用した。

動物実験時におけるアクリル矩形管内を伝播する微小爆薬起爆衝撃波挙動の光学可視化は連続光源 (メタルハライドランプ, MME-250, モリテックス) を光源としたシュリーレン光学系で可視化し、高速度カメラ (IMACON200, DRS Technologies, Inc, 解像度 1200pixel × 980pixel) を用いて記録した。可視化実験では円管でなく可視化可能な同幅の矩形管を用い

た。撮影速度は 5 $\mu$ s/フレーム、露光時間は 0.5 $\mu$ s で撮影を行った。微小爆薬はアジ化銀ペレット (AgN<sub>3</sub>, 昭和金属工業, 10.0 $\pm$ 0.1mg) を起爆し衝撃波を発生させた。ラットの脳に作用する圧力をアクリル管管端と上部の同距離位置で (45mm) に圧力変換器 (model 603B, Kistler) を設置して同時測定した。衝撃波の到達による過剰圧のピークは上部で約 354kPa, 下部アクリル管出口で約 1428kPa であった。

アクリル管を介した微小爆薬アジ化銀起爆衝撃波の脳モデル干渉挙動の数値模擬結果、圧力時間分布の時間変化を解析したところ、(1). アジ化銀を起爆して発生した衝撃波がアクリル管内壁で反射しながら伝播し、脳モデルに干渉、(2). 衝撃波の一部は反射し、一部は脳モデル内部を伝播、(3). 脳モデル (ゼラチン) の音速が周りの空気より速いため、脳モデルを伝わる衝撃波が空気中の反射衝撃波を伴う衝撃波に先行して照射面の反対側まで到達、(4). 反対側まで到達した衝撃波は、音響インピーダンスの差によって負圧、膨張波となって反射し、中心軸上の反対面近傍で収束し、その後再膨張し、高圧を発生していた。空気中脳モデルの直前と脳モデル内に設置した圧力測定部位での圧力の時間履歴からも、球状の脳モデル内を衝撃波が伝播する際には複雑な圧力伝播挙動を示すことがわかった。

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、Blast Injury 発生に寄与する生体内の衝撃波伝播現象を明らかにするため、生体模擬物質を用いたモデル衝撃波実験を行った。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、本年度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

本年度得られた知見をさらに掘り下げ、次年度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] Sato C, Nakano T, Nakagawa A, Yamada M, Yamamoto H, Kamei T, Miyata G, Sato A, Fujishima F, Nakai M, Niinomi M, Takayama K, Tominaga T, Satomi S.: Experimental Application of Pulsed Laser-Induced Water Jet for Endoscopic Submucosal Dissection: Mechanical Investigation and Preliminary Experiment in Swine. *Dig Endosc.* (2012). [Epub ahead of print]

\*[2] 中川敦寛, 富永悌二. 衝撃波による血管病変治療法: 現状と今後の展開, *分子脳血管病*, 11(1), (2012), pp. 35-39.

#### 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: Propagation of Shock Wave within Complex Biomaterial Layer: Implications for the Mechanism Blast-Induced Traumatic Brain Injury, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 124-125.

[4] 大谷清伸, 中川敦寛, 合田圭介, 荒船龍彦, 鷺尾利克, 早瀬敏幸: 爆風による外傷性脳損傷機序解明に関する研究. 平成 24 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, (2013), pp. 303-304.

[5] 中川敦寛, 大谷清伸, 古川宗, 荒船龍彦, 鷺尾利克, 富永悌二: 爆風脳損傷の機序解明: 頭蓋模擬モデルにおける可視化、圧測定、理論解析, 第 36 回日本脳神経外傷学会, O-03, (2013).

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(受賞) 受賞名: 日本脳神経外傷学会 牧野賞, 受賞者: Nakagawa A, Manley GT, Gean AD, Armonda R, Ohtani K, Tsukamoto A, Yamamoto H, Takayama K, Tominaga T., 受賞論文名: Mechanisms of primary blast-induced traumatic brain injury: Insights from shock wave research. *J Neurotrauma* 28: 1101-1119, 2011, 受賞年月日: 2013 年 3 月 8 日, 授与組織: 日本脳神経外傷学会.

Project code	J12067
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	3rd year

Integrated Analysis by Kinetic Model and Fluid Model  
for Innovative Plasma Applications

Zhi-Bin Wang\*, Pei-Si Le\*, Xiao-Fei Zhang\*, Qiu-Yue Nie\*, He-Ping Li\*†, Cheng-Yu Bao\*, Hidemasa Takana\*\*††, and Hideya Nishiyama\*\*

\*Department of Engineering Physics, Tsinghua University, P. R. China

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this project is (i) to develop an innovative discharge modeling of a radio-frequency atmospheric-pressure helium glow discharge (RF APGD) with the integration of the kinetic and fluid models; (ii) to clarify the effects on the plasma flow characteristics with the consideration of different chemical reactions; and (iii) to investigate the mechanism of the innovative applications to biological effects, decomposition of exhaust gas and polluted water by enhancing the chemical reactions.

2. Details of program implement

In this project, the 2-D simulations with the consideration of the non-equilibrium effects in the quasi-charge-neutrality sub-region of a radio-frequency atmospheric-pressure glow discharge (RF APGD) plasma are conducted based on a kinetic-fluid integrated model.

For a RF APGD produced by a planar-type plasma generator, the discharges region can be divided into two sub-regions along the direction normal to the electrode, i.e., the sheath (Reg. #1) and the quasi-charge-neutrality (Reg. #2) sub-regions, as shown in Fig. 1. On one hand, the kinetic model and fluid model are employed in the sheath and quasi-charge-neutrality sub-regions, respectively; on the other hand, the quasi-steady assumption is employed in Reg. #2, which requires the time-averaged values of the electron and heavy-particle temperatures, electron and heavy-particle number densities as the boundary condition at the interface between Reg. #1 and Reg. #2.

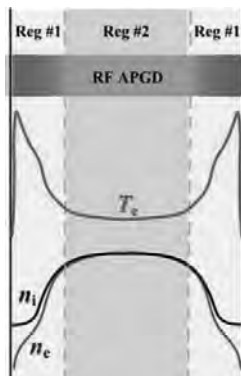


Figure 1: Schematic of a RF APGD

The assumptions used in this hybrid model are as follows [1]: (i) only the influences of the sheath behavior on the core region of the discharge is considered, that is to say, the influences of the gas flow on the sheath behavior are negligible; (ii) the sheath thickness does not change along the flow direction; (iii) only three species (electrons, ions and atoms) are involved in the chemical reactions in Reg. #2, and the plasma is in LCE state but deviates from LTE state with the consideration of the gas flows.

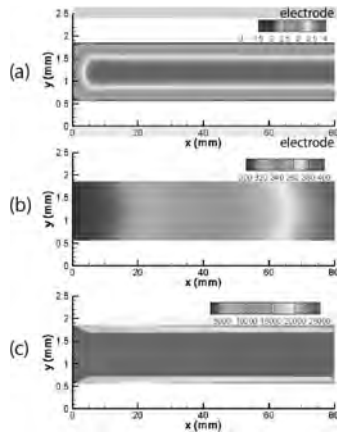


Figure 2: Distributions of (a) axial flow velocity, (b) gas temperature and (c) electron temperature in Reg. #2

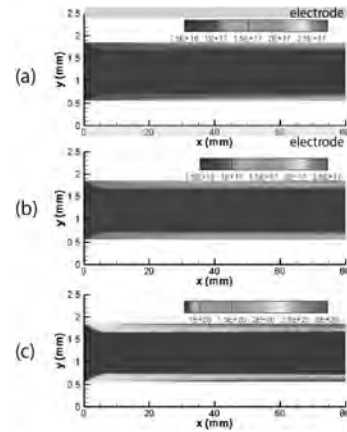


Figure 3: Number density distributions of electron (a), ions (b) and metastable species (c) in Reg. #2

The calculated distributions of the axial velocity component, gas temperature and electron temperature in Reg. #2 are shown in Figures 2(a)-(c), respectively. It is shown that the plasma flow is accelerated due to heat addition by Joule heating. The gas temperature increases from 300 K to 400 K, and the electron temperature is lower in the boundary layer. Figure 3 shows the number densities distributions of electrons (a), ions (b) and metastables (c) in Reg. #2. As found from these figures, the excitation and ionization are enhanced in the boundary layer due to the longer reaction time, which results in the lower electron temperature in the boundary layer as shown in Figure 3 (c).

### 3. Achievements

Establishing a simplified kinetic-fluid model for simulating the time-averaged, thermodynamic and chemical non-equilibrium features occurring in a RF APGD plasma system with considering the energy exchange between electrons and heavy species.

### 4. Summaries and future plans

We have established the physical-mathematical models, including the governing equations and the boundary conditions, for the kinetic and fluid simulations in the plasma sheath and flow-affected regions of a RF APGD plasma system with the supporting of this international collaborative research project.

### 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] Hidemasa Takana, Hideya Nishiyama, Zhi-Bin Wang, Pei-Si Le, He-Ping Li and Cheng-Yu Bao: Studies on Non-equilibrium Feature of Radio-frequency Helium Plasma Flow at Atmospheric-pressure, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 78-79.

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

課題番号	J12068
区分	共同研究集会
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	2年目

**次世代高温センサ研究会**  
Seminar for Next Generation Sensors for Super-High Temperature Environment

高木 敏行\*†, 宍戸 郁郎\*\*††  
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  
\*\*\*東北大学学際科学国際高等研究センター  
\*\*\*\*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

フラウンホーファ非破壊検査研究所IZFPでは長年にわたり、高温環境における電磁超音波試験に関する技術を蓄積し、測定の経験を積み重ねてきていることから、Gerd Dobmann先生（東北大学流体科学研究所客員教授）をお招きし、その実績について紹介して頂いた。

日 時： 平成24年11月8日（木）13時30分 — 17時10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： 52名

講 演：

基調講演「電磁超音波システムによる高温環境測定」

Gerd Dobmann（フラウンホーファ研究機構 非破壊検査研究所、ドイツ）

「動き始めたシリサイド系熱電デバイス」

梶谷 剛（東北大学）

「セラミックパッケージ技術 ～セラミックパッケージの現状と高温用途への可能性～」

長田 倫一（京セラ株式会社）

「火災における高温センサ」  
「次世代センサの今後の展望について」

鶴田 俊 (秋田県立大学)  
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25年3月26日(火) 13時40分 — 16時40分

場 所： 東北大学 片平さくらホール 2階 会義室

参加者数： 51名

講 演：

「高温センサ用新規単結晶材料の開発」

吉川 彰 (東北大学)

「過酷環境MEMS」

田中 秀治 (東北大学)

「鑄造分野における高温センサへの期待」

鈴木 克美 (ものつくり大学)

「高温環境電磁超音波探触子の開発」

内一 哲哉 (東北大学)

## 3. 研究目標の達成状況

本年度は、昨年度の調査活動を踏まえて、シーズを中心とした調査活動を行うべく、2回の研究集会を開催した。多くの分野において、本研究領域の関心が高いことが確認され、高温領域でのセンサが新たな学問分野、研究開発分野、そしてビジネスの対象となることに寄与できる。本研究会では、その道筋を与え、将来のプロジェクト化やコンソーシアムの設立等を具体的に議論できたと考えている。

## 4. まとめと今後の課題

本研究会では、昨年度の活動を含めると合計5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。また、シーズ側の調査により、センサ本体の技術に加え、電気的な接続端子、パッケージ、接着剤などの周辺技術の耐熱性に関する調査も必要なことがわかった。来年度も、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。

## 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] Toshiyuki Takagi, Kazuo Shoji, Tetsuya Uchimoto, Hiroyuki Miki: Perspectives for the Next Generation Sensors for Super-High Temperature Environment and Their Industrial Applications, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 80-81.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

該当なし



課題番号	J12069
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	2012.4～2013.3
継続年数	2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 a Force Balance and Its Application to a Silent Supersonic Biplane Model in the Low Speed Wind Tunnel**

川添 博光<sup>\*†</sup>, 大林 茂<sup>\*\*††</sup>  
末村 紘志<sup>\*</sup>, 山田 剛治<sup>\*</sup>, 澤 剛史<sup>\*</sup>  
<sup>\*</sup>鳥取大学工学部, <sup>\*\*</sup>東北大学流体科学研究所  
<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>所内対応教員

1. 研究目的

衝撃波による騒音の発生軽減を目指した静粛性超音速航空機において、その離着陸時の空力特性、特に事故に直結する地面近傍の大気擾乱に基づくピッチング運動やローリング運動といった動的な空力特性を把握するための力天秤の設計法を開発することを目的とする。力の検出感度を測定対象に応じて変更できる設計法であり、製作コストが安価で使い易い三分力天秤の開発に的を絞る。

2. 研究成果の内容

楕円形状をした天秤を提案し、その長軸と短軸の比率を変化させて揚力と抗力に対する感度を可変にすることを実験的に確認している (図 1)。この天秤の測定精度をさらに向上する

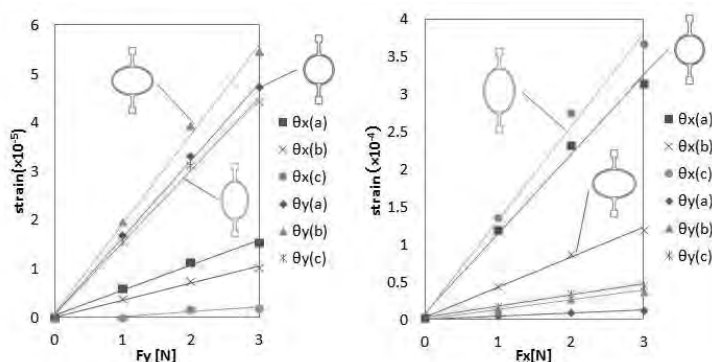


図 1：楕円天秤の形状と検出感度の変化 (数値解析)

ために、これから開発・製作する天秤の校正装置を製作した (図 2)。この校正装置の特徴は軽量かつ単純構造で天秤の 1 成分ごとに負荷をかけることが可能である。

また、製作した天秤を用いて小さなデルタ翼モデルの風洞試験を行った (図 3)。実験条件を表 1 に、結果を図 4 に示す。さらに CFD による計算結果を行い比較検証した。

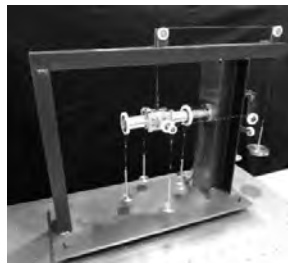


図2 製作した校正装置



図3 風洞試験装置

表1 実験条件

Velocity	6 m/s
Reynolds number	$5.2 \times 10^4$
Angle of Attack	0~15°
Model	Delta wing
Leading edge swept angle	60°
Root chord length	130mm

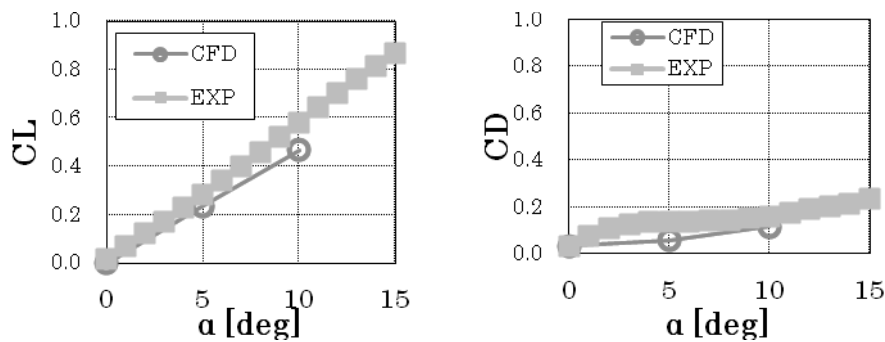


図4 実験結果

### 3. 研究目標の達成状況

測定装置の開発研究における精度向上の目処が立ち、本年度の目標は十分に達成した。

### 4. まとめと今後の課題

揚力と抗力の検出感度を変えて測定する対象に応じた力天秤の開発、および検出精度向上のための検定装置の開発ができた。今後は楕円形状への平らな歪みゲージ貼付とその位置における歪み誤差の影響を軽減するため、形状を楕円に限らない天秤開発を行い利用する予定である。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

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

\*[1] Hiroshi Suemura, Kouhei Takishita, Gouji Yamada, Takashi Matsuno, Sigeru Obayashi, Hiromitsu Kawazoe: Development of a Compact Three-Component Force Balance and Its Application, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 42-43.

[2] 末村紘志, 山田剛治, 松野隆, 大林茂, 川添博光: 任意出力3分力天秤の設計・製作とその低Re数デルタ翼への適用, 第50回飛行機シンポジウム講演集CD-ROM, (2012).

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J12070
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	2012.4~2013.3
継続年数	2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<sup>\*†</sup>, 大林 茂<sup>\*\*††</sup>

山田 剛治<sup>\*</sup>, 吾郷 祥太<sup>\*</sup>, 久保 優斗<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>鳥取大学工学研究科, <sup>\*\*</sup>東北大学流体科学研究所

<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>所内対応教員

### 1. 研究目的

宇宙機が大気圏突入する際には前方に強い衝撃波が発生して機体表面は厳しい空力加熱を受ける。そこで再突入飛行体の耐熱設計の観点からは、衝撃波背後の熱化学過程を把握して空力加熱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。しかしながらこの現象について調べた研究例は少なく、定量的な知見は依然として得られていない。そこで本研究の目的は衝撃波前方で生成される電子が衝撃波背後の熱化学過程に及ぼす影響を調べることである。

### 2. 研究成果の内容

本年度は新たに極短時間多点分光計測システムを開発して分光計測を実施した。図1に極短時間多点分光計測システムの概要図を示す。本計測システムは集光レンズ、ファイバアレイ、イメージング分光器及びICCDカメラから構成される。ファイバアレイの集光面上ではファイバ素線10本が1.0mm間隔で配置されている。そこで観測部中心軸における像が1:1になるように光学系を配置することにより、一度の計測でスペクトル空間分布特性を1.0mm間隔で取得することが可能である。本計測システムを用いて、アルゴン試験気体中に発生させた衝撃波前後領域における分光計測を行った。実験条件は衝撃波速度5.0km/s、観測部圧力100Paである。得られた計測スペクトルの一例を図2に示す。図2(a)は衝撃波前方領域で計測したスペクトル、図2(b)は衝撃波後方領域で計測したスペクトルである。この結果から衝撃波後方領域だけでなく、衝撃波前方領域においてもアルゴン原子が励起状態にあり発光することが確認できた。この結果は衝撃波前方領域で生成されるプリカーサ電子によりアルゴン原子が励起され発光することを示唆している。今後スペクトル解析を実施して衝撃波前後領域における熱化学特性について解明する。

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は衝撃波管観測部に極短時間多点分光計測システムを新たに開発して分光計測を実施した。申請書の「予想される成果」に記載した衝撃波背後領域の発光スペクトルを取得するだけでなく、衝撃波前方領域においても発光スペクトルを取得することができた。また計画していた衝突放射モデルによる解析については来年度も引き続き実施する予定である。

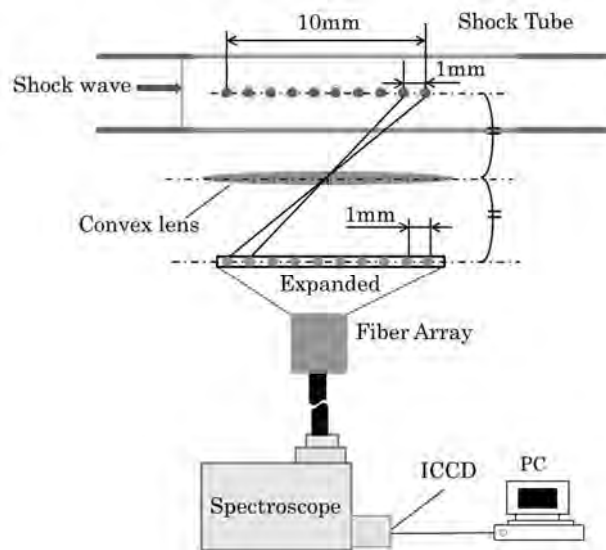
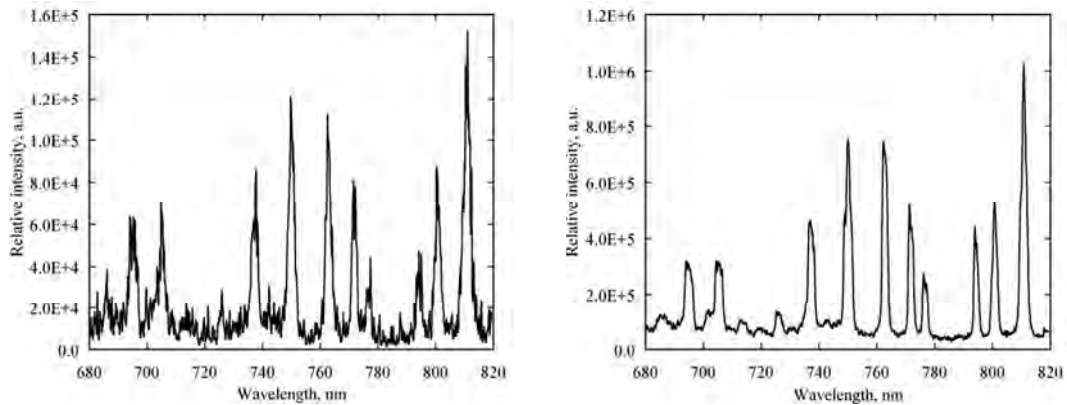


図 1：極短時間多点分光計測システムの概要図



(a) 衝撃波前方

(b) 衝撃波後方

図 2：計測した発光スペクトル

#### 4. まとめと今後の課題

本年度は新たに開発した極短時間多点分光計測システムを用いて衝撃波前後領域における分光計測を実施した。この結果衝撃波後方だけでなく衝撃波前方領域においても発光スペクトルの計測に成功した。これより衝撃波前方領域においてアルゴン原子は励起状態にあり発光することを確認した。今後衝撃波前方領域を対象としてトリプルプローブ計測を実施して衝撃波前方の熱化学特性について解明する。

#### 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] S. Ago, G. Yamada, Y. Kubo, T. Matsuno, H. Kawazoe and S. Obayashi: Shock Tube Study for Electron Behavior in the Shock Layer, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 44-45.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）なし

課題番号	J12071
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	2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\*\*††  
 \*大阪大学工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所  
 †申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

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付いており、より高性能のデバイスを作成するために、既存のプレーナー型とは異なる新しい形状を持つデバイスの開発がすすめられている。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プラズマ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 や酸化膜表面のダメージを、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もない、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、近年、ゲート構造に多用されるシリコン窒化膜の選択性エッチングプロセスによるダメージ生成を解明することを目的に、シリコン窒化膜のハイドロフロロカーボンプラズマによるエッチングプロセスの分子動力学シミュレーションの開発を進めた。例として、図1に、250eVのCF<sup>+</sup>イオンとCH<sub>2</sub>F<sup>+</sup>イオンを窒化シリコンに照射した際の表面近傍の原子密度分布のシミュレーション結果を示す。図2から、CF<sup>+</sup>イオン照射のほうが、ポリマー膜が厚く堆積することがわかるが、これは、過去に得られたビーム実験の結果と合致している。このように、本研究では、シリコン窒化膜の堆積において、ハイドロフロロカーボン中の水素が、シリコン窒化膜上に堆積するポリマー膜の堆積を阻止する方向に働き、ポリマー膜の膜厚が薄くなることにより、ハイドロフロロカーボンプラズマによるエッチング処理によるほうが、フロロカーボンプラズマによるエッチング処理の場合よりも、窒化膜のエッチングイールドが高くなることが明らかになった。

**3. 研究目標の達成状況**

前年度(2011年度)の研究において、シリコンや酸化膜に対する各種イオンビームの低エネルギー照射による表面ダメージ形成過程が、イオン種やエネルギーの関数として分類でき、また、それらの表面ダメージ形成の物理機構を解明することにより、FinFETのような従来型とは異なる先端デバイス製造におけるプラズマエッチングの問題点とその解決方法が明らかになった。2012年度は、その結果をうけ、ひずみシリコンゲートなどの構造形成に用いられ

るシリコン窒化膜のエッチング機構を解明し、実験結果の再現が可能な分子動力学シミュレーションを開発した。シミュレーションの結果、ハイドロフロロカーボンプラズマによる窒化膜の高いエッチングレートの物理機構が明らかになり、当初の目的は、100%達成した。

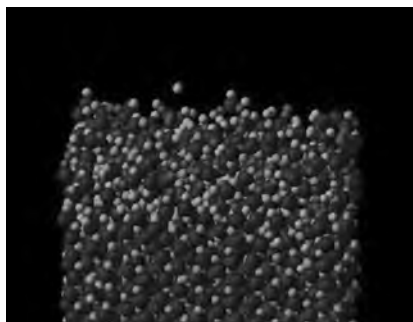


図 1: 分子動力学シミュレーションによる、窒化シリコン基板に 250eV の  $\text{CH}_2\text{F}^+$  イオンを照射した際の表面構造。

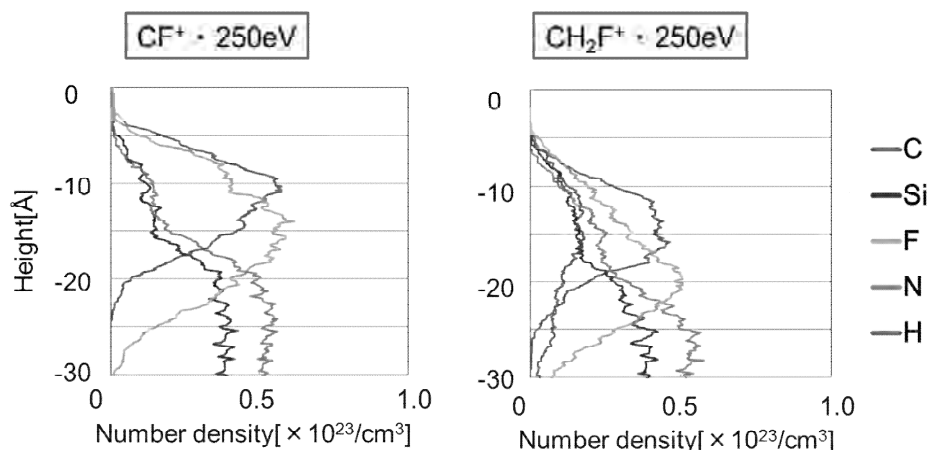


図 2: 250eV の  $\text{CF}^+$  イオンと  $\text{CH}_2\text{F}^+$  イオンを窒化シリコンに照射した際の表面近傍の原子密度分布。(分子動力学シミュレーション結果)。 $\text{CF}^+$  イオン照射のほうが、ポリマー膜が厚く堆積することがわかる。

#### 4. まとめと今後の課題

今後の課題は、シリコン窒化膜中に生成されるイオン照射によるダメージ形成の物理機構を解明することが重要である。具体的には、流体研究所寒川研究室で現在おこなわれている中性ビーム入射装置による表面ダメージの実験結果と大阪大学のシミュレーション結果を比較することにより、表面ダメージ形成の物理機構を解明する。

#### 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)

\*[1] Tomoko Ito, Kazuhiro Karahashi, Song-Yun Kang, and Satoshi Hamaguchi: Si damage due to oblique-angle ion impact relevant for vertical gate etching processes, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 51(8), (2012), 08HB01 (4pp).

他 合計 11 件

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

合計 49 件

##### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) 2 件, (受賞) 合計 2 件, (マスコミ発表) なし

課題番号	J12072
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	2012.4~2013.3
継続年数	2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<sup>\*,\*\*\*†</sup>, 佐藤 岳彦<sup>\*\*††</sup>

中野 禎久<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>東北大学加齢医学研究所, <sup>\*\*</sup>東北大学流体科学研究所

<sup>\*\*\*</sup>東北薬科大学

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

2011年度は多剤耐性緑膿菌 (MDRP) と *Acinetobacter* 属に対する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, 誘電体バリア放電法 (DBD) が優れた殺菌を示すことを明らかにした。しかし, DBD 法は浴槽等を想定した平面構造体に対し優れた殺菌能を示したが, 水道蛇口等の複雑構造体に対する殺菌力が得られなかった。

そこで, 今年度我々は, プラズマ殺菌法の臨床応用に向け, DBD 法以外のプラズマ殺菌法の殺菌効果の検討を行った。

## 2. 研究成果の内容

今年度は, ガス発生法 (gas method) ならびに水面放電法 (water method) の 2 法の biofilm 産生 *P. aeruginosa* および *A. baumannii* に対する殺菌効果について検討を行った (図 1)。培養法による殺菌効果の判定結果を表 1, 2 に示す。ガス発生法および水面放電法は単純形状モデルの biofilm 産生株に対し, 30 分で殺菌した。一方, 立体形状モデルに対しては, 水面放電法は 60 分以内で両菌株ともに殺菌したが, ガス発生法では *P. aeruginosa* を殺菌することができなかった。

60 分間放電処理された汚染モデルの表面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察したところ, 両菌とも菌体の coccoid 化が確認された (図 2)。

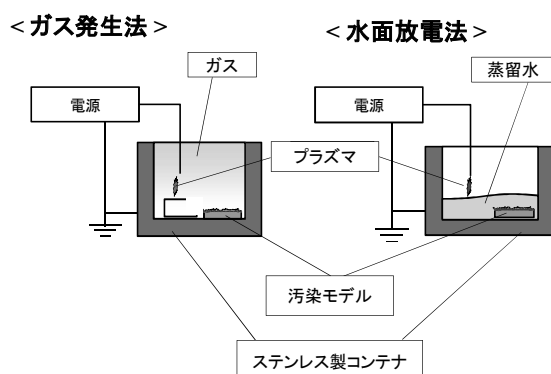


図 1 : プラズマ殺菌装置モデル

表 1：ガス発生法の殺菌成績

放電時間 (分)	<i>P. aeruginosa</i>		<i>A.baumannii</i>	
	単純平面	立体形状	単純平面	立体形状
5	survival	survival	survival	survival
10	survival	survival	survival	survival
15	survival	survival	survival	survival
30	x	survival	x	x
60	x	survival	x	x

表 2：水面放電法の殺菌成績

放電時間 (分)	<i>P. aeruginosa</i>		<i>A.baumannii</i>	
	単純平面	立体形状	単純平面	立体形状
5	survival	survival	survival	survival
10	survival	survival	survival	survival
15	x	survival	survival	survival
30	x	x	x	survival
60	x	x	x	x

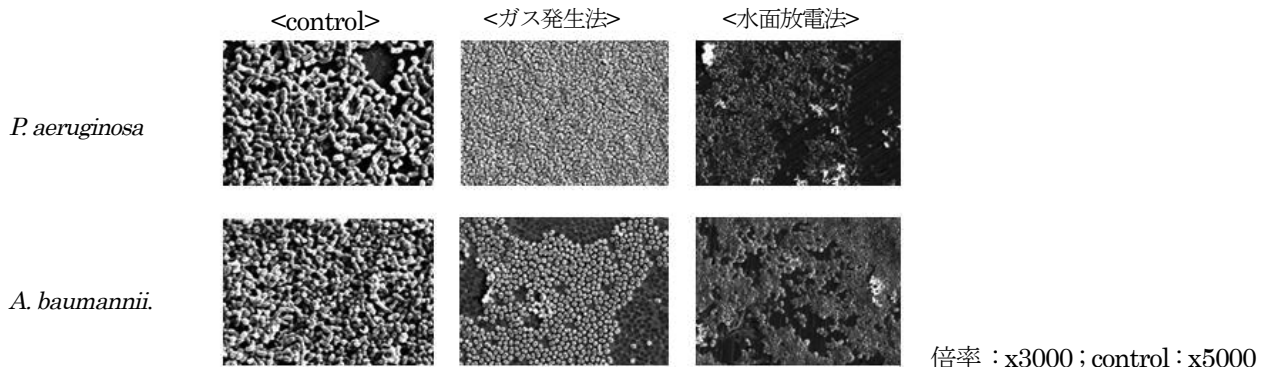


図 2：SEM によるプラズマ殺菌効果の判定

### 3. 研究目標の達成状況

ガス発生法ならびに水面放電法は単純平面上の biofilm 産生 *P. aeruginosa* および *A. baumannii* に対し優れた殺菌能力を示した。しかし、*P. aeruginosa* に対して立体形状ではガス発生法が効果を示さなかった。一方、水面放電法では両菌株の殺菌に 60 分を要した。以上のことから、ハーバード浴槽のような立体（複雑）形状の殺菌に本法は不向きである可能性がある。本法の単純平面に対する効果の臨床応用を検討する必要がある。

### 4. まとめと今後の課題

ガス発生法ならびに水面放電法は環境殺菌への応用に向けた際に、複雑構造体に対して短時間での殺菌効果が得られないこと、殺菌装置が大きくなってしまふ等の問題点が生じた。

今回の結果をもとに、臨床応用するにあたり、眼科領域のコンタクトレンズ関連角膜炎の感染予防に応用を考えている。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む） なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1]Y. Nakano, S. Fujimura, T. Sato : Anti-bacterial Effect of a Plasma Irradiation against Biofilm-Producing *Pseudomonas aeruginosa* and *Acinetobacter baumannii*, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 94-95.

[2]中野禎久, 藤村茂, 渡辺彰: Biofilm 産生グラム陰性桿菌に対するプラズマ間接殺菌法の効果, 第 61 回日本感染症学会東日本地方会学術集会・第 59 回日本化学療法学会東日本支部総会・合同学会, 東京, (2012).

[3]中野禎久, 藤村茂, 佐藤岳彦, 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, 札幌, (2013).

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等） なし



Project code	J12073
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	3rd year

## Analysis of Plasma Flow at Gas-Liquid Interface for Biological Interaction

Takehiko Sato\*†, Gregor E. Morfill\*\*††  
Tetsuji Shimizu\*\*, Daisuke Yoshino\*, Naoya Kishimoto\*\*\*  
\*Institute of Fluid Science, Tohoku University  
\*\*Max-Planck Institute for extraterrestrial physics, Germany  
\*\*\*Graduate School of Engineering, Tohoku University  
†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The plasma flow produced between an electrode and water surface is observed and analyzed in order to understand the production as well as transport of chemically reactive species. They are one of the main agents relevant to biomedical reactions. Both the production and transport are the key issues to control and optimize the reactions depending on the purpose. A dielectric barrier discharge technique, which is often used in the field of biomedical application using cold atmospheric plasma (Plasma Medicine), is used in this study.

### 2. Details of program implement

As reported earlier, the plasma discharge generated between a pin electrode and water surface was used and a flow formation in both gas and liquid phase was observed. The plasma discharge induces a gas flow from the collisions between accelerated ions and neutrals. The induced gas flow generates a liquid flow due to the friction between the gas flow and the water surface, and this liquid flow is crucial to understand the transport of chemically reactive species. In this project, we aimed to analyze with a thinner water depth than the previous study that was already reported because the liquid covers biological targets often thinly.

Figure shows time evolution of the thermal flow field in water observed by the Schlieren visualization technique. Between the pin electrode and counter electrode placed below a glass cell filled with water, a high voltage of 7.5 kV was applied with a square waveform. The repetition frequency was 5 kHz and the plasma discharge was ignited at  $t = 0$ . The input power to the plasma discharge was about 0.5 W. A plasma discharge was generated and the gas flow was produced accordingly. When the water depth was 3mm as shown in figure (a), the water surface was pushed down at the beginning ( $t = 0.01$  s) and afterwards recovered in 0.2 s. This behavior of the water surface is due to the change of electrical property in water. By the plasma discharge, many kinds of chemically reactive species dissolve into water and the electrical conductivity becomes high. We have detected nitrite and nitrate in the treated water and pH of the water was dropped. As a result, the plasma discharge itself was changed and the velocity of generated gas flow became smaller. At 0.2 s, the thermal flow field expanded toward the glass cell on the water surface. The generated field started to propagate to the bottom of the cell around  $t = 0.5$  s. After 1 s of the discharge, a circulating flow was developed.

Figure (b) shows the temporal changes of the developed thermal flow field when the water depth was 0.5 mm. Similar to the case with 3 mm in water-depth, the water

surface became hollow at the beginning. Since the water is much shallower, the hollow reached the bottom of the cell and the water height was changed all over the cell. It took longer to recover the flat surface. At  $t = 1$  s, a circulating flow was developed similarly. From the result, it is shown that the width of the formed circulating flow with 0.5 mm deep water is smaller than that with 3 mm.

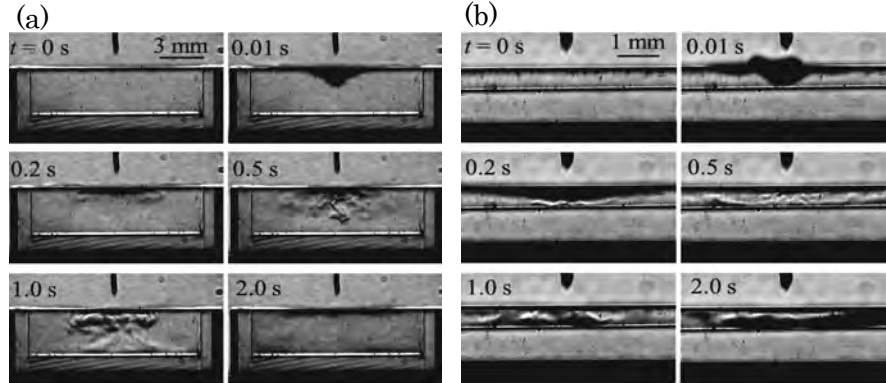


Figure: Thermal flow field generated by the plasma discharge. (a) The water was 3 mm in depth and (b) 0.5 mm.

### 3. Achievements

By the plasma discharge, the circulating flow was generated even in very shallow water. This flow formation is one of the most important factors for the transport of chemically reactive species in water. This circulating flow is initiated by the produced gas flow by the plasma discharge. There are many species dissolved in water, e.g. nitrite and nitrate, and they can play a role in biological reactions. Furthermore, we have shown the relation between the water property and the velocity of the gas flow induced by the plasma discharge.

### 4. Summaries and future plans

The plasma discharge generated between the pin electrode and the water surface can produce the circulating flow in the water through the gas flow formation. Due to the production of chemically reactive species in the gas, the water property is changed and the flow field is modified. It is shown that the circulating flow in water is induced even in very shallow water. This finding is important in many possible biological applications like a cell treatment by the cold atmospheric plasma because the biological samples are often covered by a thin liquid film.

In the next step, it is necessary for the optimization of the plasma discharge in biomedical applications to observe further the relation between the plasma condition and the flow formation especially in the gas phase. The gas flow formation is a key issue for the transport of chemically reactive species.

### 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] Naoya Kishimoto, Tetsuji Shimizu, Gregor E. Morfill and Takehiko Sato: Formation of Thermal Flow Field in Shallow Water Cell by Plasma Flow, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 96-97.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

Project code	J12074
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	2nd year

## Cavity Formation Mechanism in a Cavitation Process

Takehiko Sato\*†, Mohamed Farhat\*\*††  
 Marc Tinguely\*\*, Daisuke Yoshino\*, Kiyonobu Ohtani\*  
 \*Institute of Fluid Science, Tohoku University  
 \*\*Ecole Polytechnique Federale de Lausanne  
 †Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Laboratory of Hydraulic Machines, Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL) is the one of the world center of research in cavitation dynamics. A cavity formation mechanism in an initial stage of a cavitation process has not clarified yet, although there are several established hypothesis. Prof. Farhat from the LHM group has many experiences about the research and Prof. Sato from the Tohoku University group has developed a microscopic observation system. The aim of this project is to clarify the mechanism how the cavity appear and grow in a cavitation process.

### 2. Details of program implement

To understand the effect of dissolved oxygen on the cavitation generation, a relationship between cavitation conditions and the dissolved oxygen concentration in the cavitation tunnel was investigated.

Figure 1 shows photographs of the test section without cavitation (left) and with cavitation (right). The cavitation was generated when the wing angle was  $5^\circ$  and bubble clouds were observed at the near/downstream of the wing.

Figure 2 shows the temporal change of dissolved oxygen concentration in the case of with cavitation. The time at 0 min was the starting time of the cavitation generation. The dissolved oxygen concentration was 6.9 mg/l at the initial stage, then the concentration slightly decreased to 6.8 mg/l at the time of 60 min and the concentration became more stable. This result

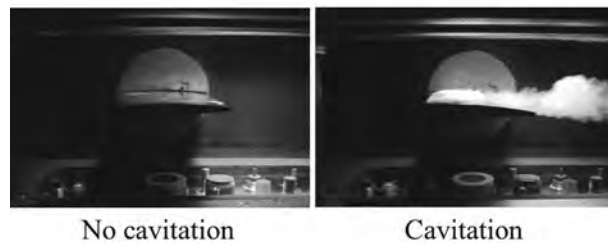


Fig. 1 Photographs of the test section without cavitation (left) and with cavitation (right).

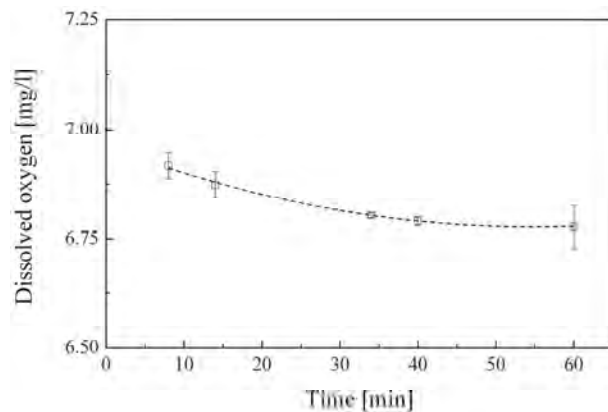


Fig. 2 Temporal change of the dissolved oxygen concentration in the case of with cavitation.

implied that the deposit gas from the water was removed efficiently by the degassing system, then the total dissolved gas decreased.

Figure 3 shows the dissolved oxygen concentration for the without/with cavitation. In both cases, the concentration was 6.8 mg/l. This result implies that there is no effect of cavitation generation on the dissolved oxygen.

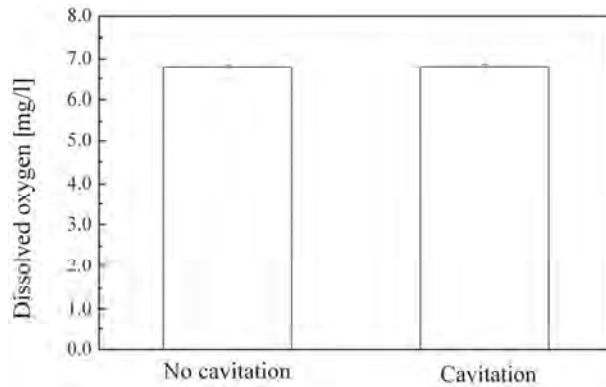


Fig.3 Dissolved oxygen concentration for the cases of without cavitation and with cavitation.

### 3. Achievements

1. The dissolved oxygen concentration did not change in the both cases of with and without cavitation though the visible bubbles by naked eyes increased significantly with cavitation.

### 4. Summaries and future plan

To understand the effect of dissolved gas on cavitation bubble dynamics, we are planning the following topics will be covered in 2013.

1. Microscopic visualization of the collapse process of a laser induced bubble
2. Discussion about the phenomenon in the bubble at the bubble collapse

5. Research results (\* reprint included) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)

\*[1] Takehiko Sato, Marc Tinguely, Masanobu Oizumi and Mohamed Farhat: Evidence for hydrogen generation in laser- or spark-induced cavitation bubbles, *Applied Physics Letters*, Vol. 102, Issue 7, (2013), article no. 074105 (4 pages).

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

\*[2] Naoya Kishimoto, Takehiko Sato, Marc Tinguely, Matthieu Dreyer and Mohamed Farhat: Effect of Cavitation Generation on Dissolved Oxygen Concentration in the Cavitation Tunnel Downstream, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 140-141.

2) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

課題番号	J12075
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	2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\*, 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**

図1に水中プラズマの1次ストリーマ進展過程を示す。本研究では、フレームレート 100 Mfps, 露光時間 10 ns で撮影することに成功した。また、印加電圧、放電電流と同期して観察することに成功した。これにより、水中ストリーマは微小なパルス状放電電流の発生と共に進展することを世界で初めて明らかにした。また、図2に示す樹状に進展する1次ストリーマについては、図1に示す球状と異なるため、今まで2次ストリーマの進展によるものと

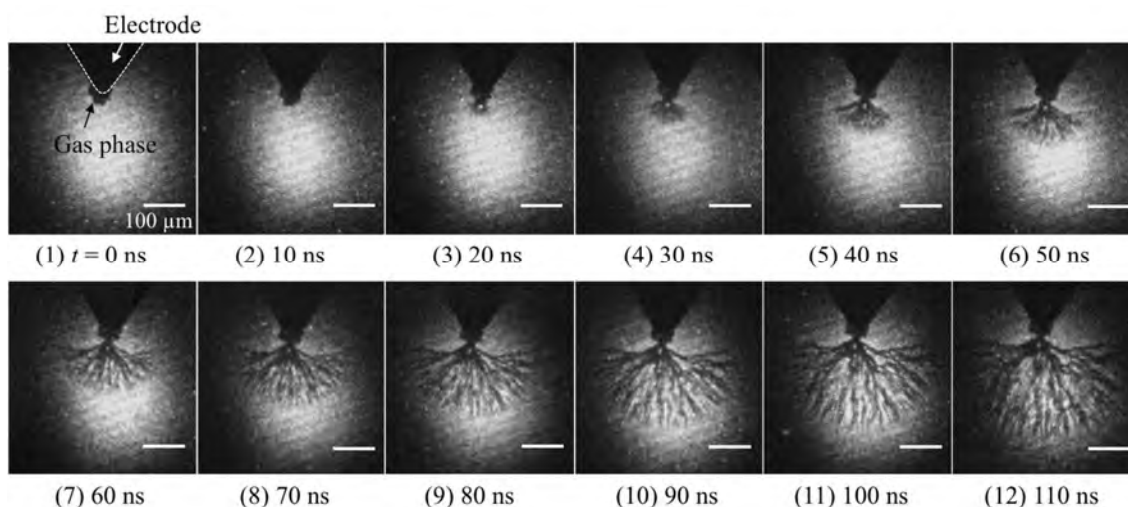


図1： 水中ストリーマ進展過程の連続写真：フレームレート 100 Mfps, 露光時間 10 ns

考えられていた。本研究により、これが1次ストリーマであることを世界で初めて明らかにした。これらの成果は、*Journal of Applied Physics* に掲載された。

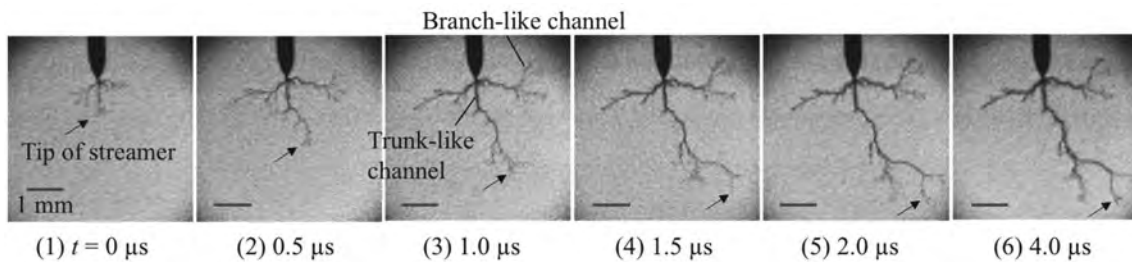


図2： 樹状に進展する水中1次ストリーマの様子

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、水中における1次ストリーマの詳細な進展機構を明らかにし、当初計画していた水中におけるストリーマの微細構造の解明を達成した。

### 4. まとめと今後の課題

今後は、2次ストリーマの進展機構について詳細に検討し、早い段階で公表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] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya and Takehiko Sato: Spatiotemporal analysis of propagation mechanism of positive primary streamer in water, *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, Issue 11, (2013), article no. 113304 (7 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: Development of Visualization Methods of Streamers in Water, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 142-143.

[3] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya and Takehiko Sato: Propagation Process of Streamer Discharge in Water, *Proceedings of the Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 166-167.

[4] 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 佐藤岳彦: 水中プラズマのストリーマ形成過程, 第22回環境工学総合シンポジウム2012, (2012), pp. 209-210.

[5] 佐藤岳彦, 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹: 水中ストリーマ進展過程の可視化, 日本機械学会2012年度年次大会, (2012), 講演番号: S055012.

[6] 佐藤岳彦, 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹: 水中ストリーマの極微小時空間計測, 第36回静電気学会全国大会, (2012), pp.103-104.

[7] 藤田英理, 佐藤岳彦, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹: 水中プラズマのストリーマ進展過程, 電気学会プラズマ・パルスパワー合同研究会, (2012), pp. 21-24.

[8] 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 佐藤岳彦: 水中1次ストリーマの進展過程, 日本機械学会東北支部第48期総会・講演会, (2013), pp. 88-89.

#### 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

Project code	J12076
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st year

## Development of New Energetic Materials Using Design Exploration

Shinkyu Jeong\*†, Fumiya Togashi\*\*††  
Rainald Lohner\*\*\*

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

\*\*\*College of Science, George Mason University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

To model an effective material composition for a confined situation using the Multi-Objective Design Optimization methodology

### 2. Details of program implement

The multi-objective genetic algorithms based on the Kriging response surface model, which has been developing Dr. Jeong at IFS, was applied to the determination of the heavily aluminized energetic material composition. The Kriging model estimates function value and its uncertainty at unknown points simultaneously. Based on these values, an exploration of the optimum point can be performed efficiently.

Figure 1 shows the computational domain and pressure measuring stations for this study. The objective functions were the peak pressure value and the impulse value. The compositions of the energetic material were x% of high explosive, y% of aluminum particles, and 100-x-y% of oxidizer where the range of x was from 5 to 100%.

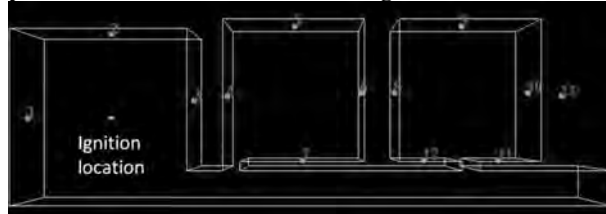


Fig. 1 Computational domain and pressure measuring stations

Eight sample compositions and one benchmark composition were prepared before the optimization as shown in Table 1. The peak pressure value and impulse value at the closest location (station#2) and at the furthest location (station#9) were shown in Table 2.

Table 1. Eight sample compositions and one benchmark composition

	Al (%)	HE (%)	Oxidizer(%)
Sample1	35.71	9.242	43.04
Sample2	49.12	4.632	34.25
Sample3	4.894	44.52	38.59
Sample4	25.67	24.73	37.60
Sample5	13.29	43.59	31.12
Sample6	20.74	64.98	2.275
Sample7	33.86	18.61	35.52
Sample8	61.98	25.66	0.36
benchmark	33	25	30

Table 2. Peak pressure and impulse values of sample and benchmark compositions.

	Peak pressure (st2)	Impulse (st2)	Peak pressure (st9)	Impulse (st9)
Sample1	25.857	0.815	9.622	0.379
Sample2	27.545	1.078	11.336	0.459
Sample3	28.364	0.374	6.042	0.209
Sample4	25.764	0.547	7.084	0.278
Sample5	30.473	0.505	7.651	0.268
Sample6	29.133	0.631	8.705	0.316
Sample7	26.791	0.808	9.437	0.370
Sample8	25.857	0.815	9.622	0.379
benchmark	26.806	0.826	9.418	0.382

Table 3 shows the optimized compositions obtained from the multi-objective design optimization code. Table 4 shows the peak pressure and impulse values of three optimized compositions. Figure 2 shows the pressure impulse histories. The peak pressure values of station #2 don't show great improvements, however, the peak pressure at station #9 and impulse values at both stations were significantly improved.

Table 3. Optimized compositions

Optimization1	44	40	4
Optimization2	48	30	10
Optimization3	45	33	10

Table 4. Peak pressure and impulse values of optimized compositions

	Peak pressure (st2)	Impulse (st2)	Peak pressure (st9)	Impulse (st9)
Optimization1	28.232	1.134	12.539	0.480
Optimization2	28.592	1.163	12.062	0.481
Optimization3	29.562	1.137	12.084	0.481

### 3. Achievements

A Soft-coupling of developing CFD code and an evolutionary optimization code in this study will be able to be applied to various types of practical energetic materials. This research result shows the possibility of shortening a development time and reducing the cost exceedingly.

### 4. Summaries and future plans

The optimization of the heavily aluminized energetic materials was investigated. The multi-objective design optimization code was applied to this optimization and showed significant performance improvement. The future plan is to develop this model applicable to various energetic materials and conditions such as cased/confined.

### 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, and R. Lohner : Optimization of a Heavily Aluminized Energetic Material, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 82-83.

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



Project code	J12077
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st year (progressing)

## Improvement of Numerical Scheme and Theory for Kinetic Force Method

Vladimir Saveliev\*†, Shigeru Yonemura\*\*††

\*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 this equation opens some new opportunities for mathematical description of the rarefied gas dynamics. The scattering operator  $\hat{\chi}$  acts only on angular components of relative velocity and its main property is its invariance under the group of rotations. Using this property, it is possible to represent the scattering operator in many equivalent forms. The general method of the new forms construction is based on the following simple idea: Firstly, one prepares an invariant under rotations operator with an arbitrary function. Then the arbitrary function is specified by the demand to have the operator eigenvalues being equal to eigenvalues of the scattering operator.

### 2. Details of program implement

**Right inverse operators to  $\hat{\sigma}^2$ .** For working with spherically invariant operators, it is convenient to introduce right inverse operators  $\hat{D}_a^{-1}$  of an operator of differentiation:

$$\hat{D}_a^{-1}f(\mu) = \int_a^\mu d\mu_1 f(\mu_1), \quad \hat{D} = \frac{d}{d\mu}, \quad \hat{D}\hat{D}_a^{-1} = 1, \quad \hat{D}_a^{-1}\hat{D} = 1 - \hat{a}, \quad \hat{a}f(\mu) = f(a).$$

In respect to the inner product  $(\Phi, f) = \int_{a_1}^{a_2} \Phi(\mu) f(\mu) d\mu$ ,  $(\Phi, \hat{B}f) = (\tilde{B}\Phi, f)$ , the couple of right inverse

operators  $\hat{D}_{a_1}^{-1}$  and  $\hat{D}_{a_2}^{-1}$  have remarkable property: one operator is the transpose of another with opposite sign  $\tilde{\hat{D}}_{a_1}^{-1} = -\hat{D}_{a_2}^{-1}$ . When Cazimir operator  $\hat{\sigma}^2$  acts on function, which depends on angles only

via cosine  $\mu = \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}_0}{v v_0}$  with the arbitrary vector  $\mathbf{v}_0$ , operator  $\hat{\sigma}^2$  is reduced to the second order

ordinary differential operator  $\hat{\sigma}^2 = \frac{\partial}{\partial \mu} (1 - \mu^2) \frac{\partial}{\partial \mu} = \hat{D} (1 - \mu^2) \hat{D}$ . Legendre polynomials are the

eigenfunctions of this operator  $\hat{\sigma}^2 P_l(\mu) = -l(l+1)P_l(\mu)$ . If we take  $a_1 = -1$  and  $a_2 = 1$  then the operators  $\hat{\sigma}_1^{-2} = \hat{D}_1^{-1}(1-\mu^2)^{-1}\hat{D}_1^{-1}$ ,  $\hat{\sigma}_{-1}^{-2} = \hat{D}_{-1}^{-1}(1-\mu^2)^{-1}\hat{D}_{-1}^{-1}$  are right inverses to the Cazimir operator  $\hat{\sigma}^2$ :

$$\hat{\sigma}^2 \hat{\sigma}_{\pm 1}^{-2} = 1, \quad \hat{\sigma}_{\pm 1}^{-2} \hat{\sigma}^2 = 1 - (\pm 1), \quad (\pm 1)f(\mu) = f(\pm 1).$$

Under a transposition, right inverses  $\hat{\sigma}_{\pm 1}^{-2}$  transform one into another  $\tilde{\hat{\sigma}}_{\pm 1}^{-2} = \hat{\sigma}_{\mp 1}^{-2}$ . Operators  $\hat{\sigma}_1^{-2}$  and  $\hat{\sigma}_{-1}^{-2}$  act on Legendre polynomials as follows:

$$\hat{\sigma}_{\pm 1}^{-2} P_l(\mu) = \frac{1}{-l(l+1)} \left[ 1 - (\pm 1) \right] P_l(\mu), \quad l \neq 0, \quad \hat{\sigma}_{\pm 1}^{-2} 1 = \ln \left( \frac{2}{1 \pm \mu} \right)$$

**Factorization of scattering operator  $\hat{\chi}$ .** Making use of right inverses  $\hat{\sigma}_1^{-2}$  and  $\hat{\sigma}_{-1}^{-2}$  we factorize eigenvalues of scattering operator in the following way:

$$\lambda_l = 2\pi \int_{-1}^1 d\mu b [P_l(\mu) - 1] = -l(l+1) 2\pi \int_{-1}^1 d\mu P_l \hat{\sigma}_{-1}^{-2} b.$$

The factorization of eigenvalues corresponds to the factorization of scattering operator  $\hat{\chi}$  on two factors  $\hat{\sigma}^2$  and  $\hat{\chi}_-$ :

$$\hat{\chi} = \hat{\sigma}^2 \hat{\chi}_-, \quad \hat{\chi}_- F(\mathbf{v}) = \int b_-(\mu) F(\mathbf{v}') d\Omega_{\mathbf{v}'}, \quad b_-(\mu) = \frac{1}{2} \int_{-1}^{\mu} d\mu_2 b(\mu_2) \ln \frac{(1+\mu)(1-\mu_2)}{(1-\mu)(1+\mu_2)}$$

### 3. Achievements

We developed a new technique for factorization of the scattering operator. This technique provides the most easy way for exact transformation of the Boltzmann collision integral to the Landau-Fokker-Planck like form.

### 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.
3. To perform the DSMC simulations of the same problems to compare with Kinetic Force Method. We will feedback results to the theory and numerical scheme for the Kinetic Force Method.

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

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

\*[1] V. L. Saveliev and S. Yonemura: New forms of two-particle and one-particle kinetic equations, *28th International Symposium on Rarefied gas dynamics, AIP Conference Proceedings*, Vol. 1501, (2012), pp. 175-182.

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

\*[2] Vladimir Saveliev and Shigeru Yonemura: Two-Particle and One-Particle Kinetic Equations in Landau-Fokker-Planck like Form, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 172-173.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J12078
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1年目(発展)

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\*, 富 正人\*\*  
 \*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

分子動力学(Molecular Dynamics : MD)法を用いた水素のナノスケールの熱流動特性の解析は、水素を安全かつ効率良く利用するためにとっても重要である。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、通常の古典的な取り扱いが難しい。そこで本研究では、この水素の量子効果を取り込んだ分子動力学法を用いて、量子効果とその熱流動特性に与える影響を解明することを目的としている。平成24年度は、特に低温水素のマクロな熱力学的特性に注目し、経路積分セントロイド分子動力学(CMD)法を用いて低温水素の熱物性評価を行い、この量子効果が水素の熱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

量子効果が水素の熱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熱物性評価を行った。計算は幅広い温度-密度条件で行い、低温水素の状態方程式(EOS)を作成し実験値と比較を行った。さらに得られたEOSより臨界点を導出し、その臨界点を用いてEOSを無次元化し、量子効果の定性的影響を調べた。その結果、古典MD法では温度-密度飽和線図を定量的に再現できず、臨界温度を大きく見積もる傾向が見られた。一方、CMD法の結果は実験値と定量的に良い一致を示した。さらに、臨界点で無次元化した飽和線図(図1)に対しては、古典MD法ではどんなに高精度の分子間ポテンシャルやポテンシャルパラ

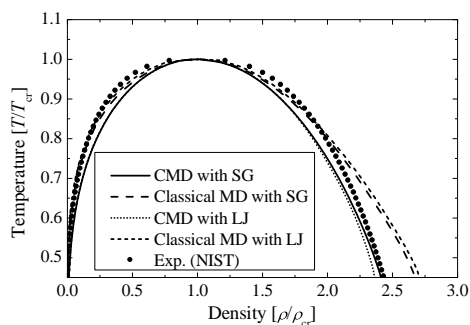


図1: 臨界点で無次元化した飽和線。SGはSilvera-Goldmanポテンシャルの略であり、LJはLennard-Jonesの略である。

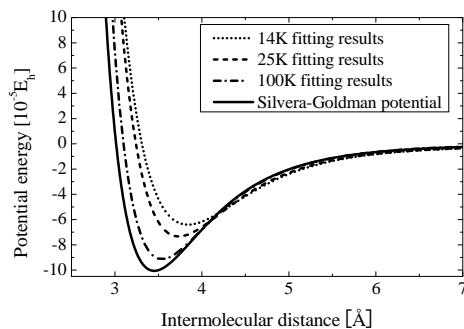


図2: Force matching法により作成した水素分子間ポテンシャル。Silvera-Goldmanが古典的なポテンシャルである。

メーターをフィッティングしても、液体領域で実験値を再現できず、密度を大きく見積もる傾向が見られた。一方、CMD 法より得られた結果は、実験値と定性的に良い一致を示した。これらの結果より、臨界点で無次元化を行った EOS に対する分子間ポテンシャルの影響は小さく、従来の MD 法では再現できない事が明らかとなった。また、CMD 法を用いた結果は実験値と良く一致していることより、臨界点で無次元化を行った EOS に対する量子効果の定性的影響は大きいと言える。また、CMD 法における水素分子間ポテンシャルと古典的な分子間ポテンシャルを比較(図 2)すると、井戸が浅くなり、斥力範囲が広がることが分かった。これは、量子効果により水素分子間の相互作用が古典の場合よりも小さくなることを意味している。これにより、古典 MD の場合よりもビリアル圧力が大きくなり、実験値と一致したと考えられる。

### 3. 研究目標の達成状況

平成 24 年度の目標であった、温水素のマクロな熱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言える。

### 4. まとめと今後の課題

平成 24 年度の研究により、量子効果が低温水素の熱物性に与える定量的・定性的影響は大きく、古典的手法の範疇でその熱流動特性を再現する事は大変難しいことが明らかとなった。また、水素分子間ポテンシャルの比較より、量子効果を考慮することで、分子間相互作用が小さくなり、これによりビリアル圧力が古典 MD の場合よりも大きくなるという、量子効果と分子論的メカニズムとの関係についても明らかとなった。今後の課題としては、現在の解析では静的な熱物性、つまり  $p$ - $V$ - $T$  関係についてのみしか行っていないため、この量子効果が水素分子の拡散性や、熱伝導性などの動的な物性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 (\*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. Nagashima, T. Tokumasu, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi: Limits of Classical Molecular Simulation on the Estimation of Thermodynamic Properties of Cryogenic Hydrogen, *Molecular Simulation*, Vol. 38, No. 4-6, (2012), pp. 404-413.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi, A. K. Hayashi, T. Tokumasu: An Analysis of Quantum Effect on the Thermodynamic Properties of Cryogenic Hydrogen, *3rd International Forum on Heat Transfer*, (2012), IFHT2012-181.

[3] H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi, A. K. Hayashi, T. Tokumasu: A Molecular Dynamics Study on the Thermodynamic Analysis of Cryogenic Hydrogen, *9th International Conference on Fluid Dynamics*, (2012), OS 11-36.

\*[4] M. Tomi, N. Tsuboi, S. Tsuda, H. Nagashima, T. Tokumasu: A Molecular Dynamics Study on the Density Fluctuation of Diatomic Fluid around the Critical Point, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 144-145.

他 合計 8 件

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(受賞) The Third International Forum on Heat Transfer, The best poster award.

課題番号	J12079
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1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\*\*††, 吉本 勇太\*\*

\*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

ナノテクノロジーの進歩により、ナノチャネルやナノ多孔質体内における流体の輸送現象が注目を集めている。分子動力学 (Molecular Dynamics: MD) 法を適用することが困難なメゾスケールを対象とするシミュレーション法として、散逸粒子動力学 (Dissipative Particle Dynamics: DPD) 法は非常に有効な手法である。しかし、従来の DPD 法ではパラメータが無次元であるため、実現象と対応づけるためにはスケージングが必要である。力のパラメータやスケージングパラメータは、液体の等温圧縮率や拡散係数が実験値と合うように決定されるため、従来の DPD 法はトップダウン的な手法であるといえる。そこで本研究では、より下層のミクロスコピックな系から、ボトムアップ方式に上層の粗視化モデルを構築する手法を提案する。これにより、現象論的なスケージング等の手順を踏むことなく、より体系立てて粗視化モデルを構築することが可能となる。

## 2. 研究成果の内容

Kinjo and Hyodo (Phys. Rev. E, 2007)が射影演算子法を用いて導いた複数の原子・分子で構成されるクラスタの重心運動を記述する一般化 Langevin 方程式を出発点にして、非マルコフ性を考慮に入れた散逸粒子動力学 (Non-Markovian DPD: NMDPD) 法における運動方程式を定式化した。NMDPD における相互作用モデルは、平均力、摩擦力、揺動力によって構成される。平均力はクラスタ間に作用する力のアンサンブル平均で表される。摩擦力はクラスタ重心の過去の位置及び速度に依存する。また揺動力は、従来の DPD 法で用いられる白色雑音ではなく、ある周波数特性を持った有色雑音で与えられる。MD 計算 (図 1(a)) において、クラスタ間平均力、摩擦係数、揺動力の相関をサンプリングすることで、NMDPD モデルをボトムアップ方式で構築できる。

図 1(b)に NMDPD モデルの平衡温度及び Lei ら (Phys. Rev. E, 2010)の DPD モデルの平衡温度を示す。対応する MD の温度 (121 K) に比べ、DPD モデルでは温度がかなり過小評価されており、時間刻みに対する温度依存性も大きい。これはマルコフ近似に基づいた DPD モデルが本計算系では不適切であることを示している。一方で、履歴効果を考慮した我々の NMDPD モデルは MD の温度をよく再現できており、時間刻みに対する温度依存性も小さい。したがって、NMDPD 計算において、ゆらぎと散逸のバランスが適切にとられていることが分かる。また、図 1(c)に示すように、NMDPD における平均二乗変位は MD のものと長時間に渡ってよい一致を示しており、液体の拡散性を正しく再現できていることが確認された。

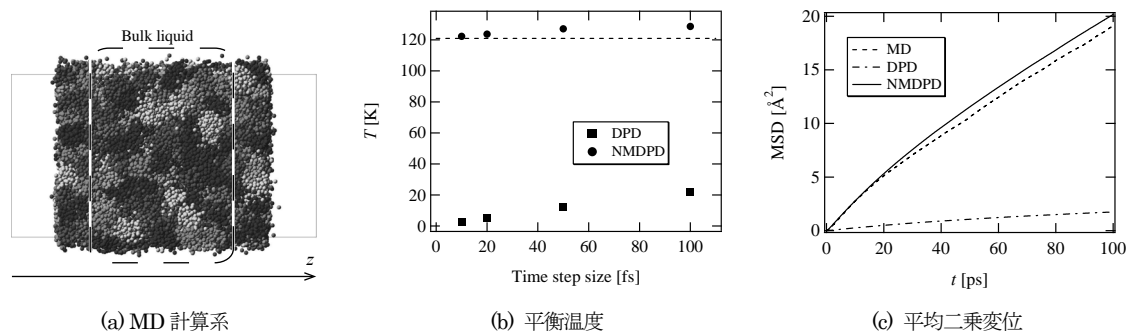


図 1 : NMDPD モデルの構築及び評価

### 3. 研究目標の達成状況

本年度の共同研究により、MD 法による解析から DPD 法における粗視化モデルを構築する手法の確立に関して目途をつけることができた。

### 4. まとめと今後の課題

履歴効果を組み込んだ NMDPD 法の運動方程式を定式化し、MD を用いて NMDPD 法の相互作用モデルをボトムアップ方式で構築する手法を提案した。DPD モデルでは温度及び拡散係数が MD に比べてかなり小さくなるのに対し、NMDPD モデルは MD の温度及び拡散係数をよく再現できた。これらの結果より、NMDPD 法はメソスケールにおける輸送現象を解析する手法として非常に有効であるといえる。今後、本手法を用いて水の粗視化モデルを構築する予定である。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[1] Yuta Yoshimoto, Toshiki Mima, Akinori Fukushima, Ikuya Kinefuchi, Takashi Tokumasu, Shu Takagi, Yoichiro Matsumoto: Construction of Interaction Models of Dissipative Particle Dynamics by Coarse-graining Lennard-Jones Fluids, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 146-147.
- [2] Y. Yoshimoto, T. Mima, A. Fukushima, I. Kinefuchi, T. Tokumasu, S. Takagi, Y. Matsumoto: Construction of interaction models of dissipative particle dynamics by coarse-graining Lennard-Jones fluids: Investigation on the system with vapor-liquid interfaces, *Conference on Computational Physics 2012*, Kobe, (2012), No. 109.
- \*[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: 分子動力学法による散逸粒子動力学相互作用モデルの構築: Lennard-Jones 流体に関する検討, 第 26 回分子シミュレーション討論会, 福岡, (2012), 205P.
- [4] Yuta Yoshimoto, Toshiki Mima, Akinori Fukushima, Ikuya Kinefuchi, Takashi Tokumasu, Shu Takagi, Yoichiro Matsumoto: Construction of interaction models of dissipative particle dynamics by coarse-graining Lennard-Jones Fluids: Evaluation of non-Markovian formulation, *APS March Meeting 2013*, Baltimore, (2013), A43.5.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J12080
Classification	General collaborative research
Subject area	Micro/nano technology
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st year (progressing)

## 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

In this year, a steady momentum flux in a nanoscale liquid bridge made of water between Si surface was generated by nonequilibrium molecular dynamics method. The schematic diagram of the simulation system is shown in Fig. 1. The dimension of the simulation system was set at  $L_x = 80 \text{ \AA}$ ,  $L_y = 120 \text{ \AA}$  and  $L_z = 30 \text{ \AA}$  in  $x$ ,  $y$  and  $z$  direction, respectively and periodic boundary condition was assumed in all direction. Silicon surfaces consisted of 1152 Si atoms and the number of water molecules was changed to express the difference of the width of liquid bridge. The S-W potential and the SPC/E potential was used as an interaction between Si atoms and water molecules, respectively. The interaction potential between Si atoms and water molecules were obtained as

$$\phi = 4\alpha\varepsilon \left\{ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right\} \quad (1)$$

and  $\alpha$  was changed to express the difference of wettability. Fennell method was used to consider the coulomb interaction between water molecules. A

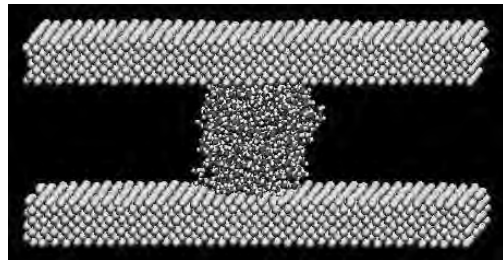


Fig. 1. Schematic diagram of this simulation

cutoff distance was set at  $R_c=15 \text{ \AA}$ . Time integration was performed by Velocity Verlet method and time interval was set at  $\Delta t=1 \text{ fs}$ .

Upper Si surface moved to +y direction at the velocity of  $V=50 \text{ m/s}$  and the lower surface moved to -y direction at  $V=50 \text{ m/s}$  to maintain the velocity gradient. During the simulation the temperature in the bottom layer of these surfaces were controlled to  $T=300 \text{ K}$  by velocity control. All cases of simulations were performed 200,000 steps and data were sampled except for the temperature control region.

By this simulation momentum fluxes through liquid bridges are obtained from the tangential force acting on the surface from the liquid bridge and contact area between liquid bridge and the surfaces (as shown in Fig. 2. ). The momentum flux decreases with the decrease in the width of liquid bridge. Moreover the momentum flux depends on the wettability of the surface. Comparing these results with those obtained by the simulations without surfaces, we will obtain the effect of the surface on the characteristics of momentum transport.

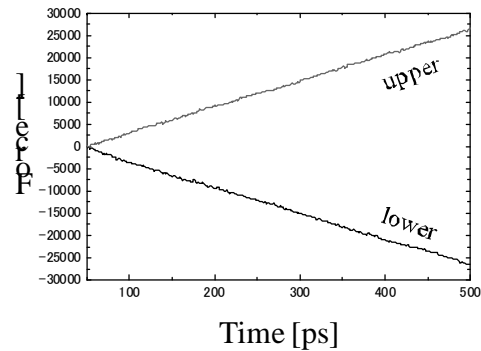


Fig.2 . Friction Force acting on the liquid bridge from surfaces.

### 3. Achievements

In this year we made a model of momentum transport of liquid bridge with surfaces. We developed an original technique that allows an accurate quantification of the wall/molecules interaction. We think the goal of this year was achieved.

### 4. Summaries and future plans

Using this simulation code, we will perform the simulation of momentum transport with surfaces at various conditions and compare the results with those without surfaces. From the comparison, we will analyze the effect of interaction between liquid bridge and surface on the momentum transport phenomena of liquid bridge.

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

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

\*[1] T. Tokumasu, M.-H. Meurisse, N. Fillot and P. Vergne: A Molecular Dynamics Study of a Nanoscale Liquid Bridge under Shear, *Tribo. Int. J.*, 72, (2013), pp. 10-16.

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

\*[2] T. Tokumasu, M.-H. Meurisse, N. Fillot and P. Vergne: Nano-Scale Modeling of Confined Liquid Films and Bridges, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 148-149.

[3] T. Tokumasu, M.-H. Meurisse, N. Fillot and P. Vergne: A Molecular Dynamics Study of Lubrication Characteristics of Nanoscale Liquid Bridge, *Abstracts for 15th Nordic Symposium on Tribology*, (2012), pp. 137.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.



Project code	J12081
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	3rd year

## Optimization of Stent Design Based on Blood Flow Analysis Using LBM Method

Makoto Ohta\*†, Bastien Chopard\*\*††  
 Daniel Ruefenacht\*\*\*, Toshio Nakayama\*\*\*\*  
 K. Srinivas\*\*\*\*\*, Hitomi Anzai\*\*\*\*\*

\*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

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

To develop an optimization program for design of intracranial stent as a use of flow diverter.

### 2. Details of program implement

3D optimization program is completed. After the finishing program, we analyzed the design of stent after optimization. Then, we reached that our assumption for stent design, “The strut will be placed on the BOI (Bundle of Inflow).” Figure 1 shows the schematic strut placement. After optimization, the struts are placed such as figure 2.

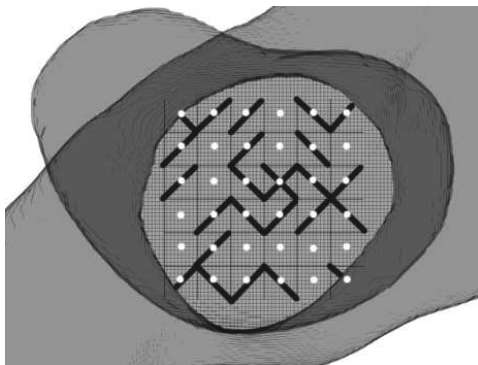


Figure 1: Strut placement in the program



Figure 2: Stent placement after optimization and a schematic flow pattern

3. Achievements

Excellent progress

4. Summaries and future plans

3D optimization program was completed. A realistic patient aneurysmal geometry will be used in the future.

5. Research results (\* reprint included)

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

[1] Chaoyang Shi, Masahiro Kojima, Hitomi Anzai, Carlos Tercero, Seiichi Ikeda, Makoto Ohta, Toshio Fukuda, Fumihito Arai, Zoran Najdovski, Makoto Negoro, Keiko Irie: In-vitro Strain Measurement in Cerebral Aneurysm Models for Cyber-Physical Diagnostic, *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, (2013), accepted.

[2] Keiko Irie, Hitomi Anzai, Masahiko Kojima, Naomi Honjo, Makoto Ohta, Yuichi Hirose, Makoto Negoro: Computational fluid dynamic analysis following recurrence of cerebral aneurysm after coil embolization, *Asian Journal of Neurosurgery*, Vol. 7(3), (2012), pp. 109-115.

[3] Chaoyang Shi, Masahiro Kojima, Carlos Tercero, Hitomi Anzai, Makoto Ohta, Katsutoshi Ooe, Seiichi Ikeda, Toshio Fukuda, Fumihito Arai, Makoto Negoro, Keiko Irie, Guiryong Kwon: A Cyber-Physical System for Strain Measurements in the Cerebral Aneurysm Models, *IROS 2012, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, Algarve, (2012), pp. 4137-4142.

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

\*[4] Hitomi Anzai, Jean-Luc Falcone, Bastien Chopard, Makoto Ohta: Stent designs for efficient reduction of intra-aneurysmal flow with various aneurysms, *The 9th International Interdisciplinary cerebrovascular Symposium (ICS12)*, Madison, (2012).

[5] Hitomi Anzai, Jean-Juc Falcone, Bastien Chopard, Makoto Ohta: Optimum Design of Flow Diverter Stent Associated with Arterial Geometries, *Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 414-415.

[6] Mingzi Zhang, Hitomi Anzai, Youjun Liu, Makoto Ohta: A Development of Lattice Boltzmann Model and Lumped Parameter Model Connection for Cardiovascular Multiscale Analysis, *Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 412-413.

\*[7] Makoto Ohta, Bastien Chopard, Hitomi Anzai: Characterization of Design of Stent Strut Positioning using LBM Method, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 98-99.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award)

[1] Intracranial Stent Meeting 2012(ICS 2012) Best Abstract Presentation (First author, M. Ohta), "Modeling Flow Diverter Stent using Porous Media".

[2] Intracranial Stent Meeting 2012(ICS 2012) Best Abstract Presentation (First author, T. Nakayama), "Classification of flow Pattern in Neck Based on Parent Artery Configuration and Optimized Stent Implantation".

(Press release) Not applicable.

Project code	J12082
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	3rd year

## Development of Biomodel for Blood Cell

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 biomodel of blood cell used for blood cell analysis. To achieve the purpose, at first, the physiological characteristics and the geometry of pore-forming proteins will be performed.

### 2. Details of program implement

Membrane proteins have many roles to make a function on the membrane. Pore-forming by hemolysin makes a hole on the lipid bilayer of cell and the cell loses the medium in the cell. In case of many holes, the layer is damaged, and the membrane-damaging activities occur. This result may show the number of membrane protein will related to the mechanical properties of lipid bilayer. If the damage mechanism will be revealed, the number of proteins could control the mechanical properties of membrane. We selected  $\gamma$ -hemolysin and FhuA for this project.

Activities and structures of membrane proteins are affected by the lipid bilayer environment. We herein show diversity in channel properties of engineered ferric hydroxamate protein uptake component A (FhuA  $\Delta C/\Delta 4L$ ), an outer membrane receptor of *Escherichia coli*, on planar lipid bilayers consisting of various types of phospholipids. Single-channel electrical analysis revealed that the shape of phospholipids affects the sensitivity of the FhuA  $\Delta C/\Delta 4L$  channel to closure under high-voltages. This study expands the versatility of the engineered FhuA  $\Delta C/\Delta 4L$  channel, making the channel suitable for biosensors and nanodevices.

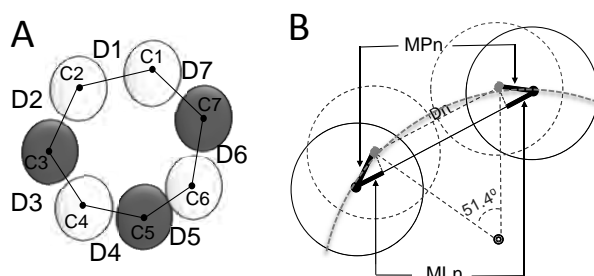


Fig. 1: Defined terms of measurement for mismatch of structure in the component of  $\gamma$ -hemolysin

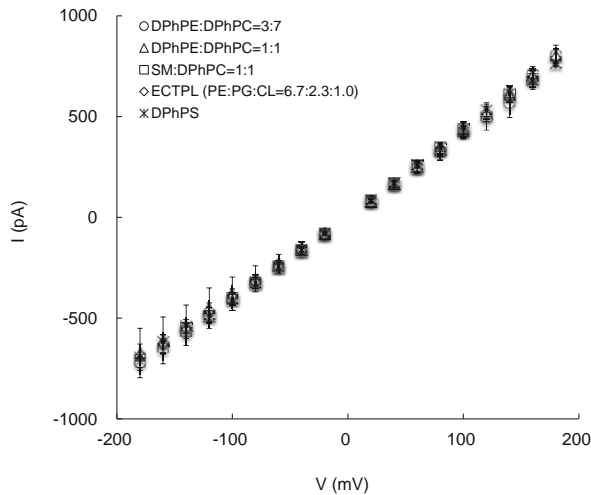


Fig. 2: Single-channel conductance of the engineered FhuA  $\Delta C/\Delta 4L$  in different lipid bilayers

### 3. Achievements

Excellent progress

### 4. Summaries and future plans

A bigger pore-forming will be higher effect on the physio- and mechanical properties. We will use another proteins for checking the effect.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - \*[1] Tomita N, Mohammad MM, Niedzwiecki DJ, Ohta M, Movileanu L: Does the lipid environment impact the open-state conductance of an engineered  $\beta$ -barrel protein nanopore?, *Biochim Biophys Acta. Biomembrane*, Vol. 1828(3), (2013), pp. 1057-65.
  - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
    - [2] Xiaobo Han, Naoya Sakamoto, Noriko Tomita, Meng Hui, Masaaki Sato, Makoto Ohta: Relationship between Fluid Shear Stress and the Phenotype Change of Smooth Muscle Cells in a Co-culture Model, *Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 614-615.
    - [3] 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).
    - \*[4] Makoto Ohta, Liviu Movileanu, Noriko Tomita: Channel Properties of Membrane Proteins on Lipid Bilayer, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 100-101.
    - [5] Noriko Tomita, Liviu Movileanu, Makoto Ohta: Electrophysiological properties of bacterial membrane channel proteins depending on lipid component and bilayer stability, *Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 432-433.
  - 3) Patent, award, press release etc.
 

Not applicable.

Project code	J12083
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	1st year(progressing)

## Research of Friction and Drilling on Bio-Composite Model

Makoto Ohta\*†, Phillippe Kapsa\*\*††  
 Hiroyuki Kosukegawa\*\*, Vincent Fridrici\*\*  
 Kei Ozawa\*\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*ECL

\*\*\*Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The friction characteristics between medical materials and blood vessel and the drilling affect the medical device strongly. We will find an effect of medical material on the frictions using bio-composite biomodel.

### 2. Details of program implement

In order to investigate the friction properties of medical alloys, ball-on-disc friction tests using biomimetic hydrogel called poly (vinyl alcohol) hydrogel (PVA-H) with the mechanical properties similar to those of soft tissue were carried out under the existence of water. For further understanding in friction, the surface characteristics of alloys were also measured with XPS and contact angle wettability test. The significant difference in friction between alloys having different surface energy and chemical oxides were observed. Those results indicate that surface characteristics of medical materials can influence friction on biomimetic hydrogel.

Analysis of friction behavior of medical materials in vivo is important in development of various medical devices. It is, however, not easy to measure the friction properties and to maintain the measurement condition because of instability of living tissue. Then, it is effective to use in vitro biomimetic model (biomodel) as a counter material in friction test, instead of living tissue. Poly (vinyl alcohol) hydrogel (PVA-H) has been developed as a material for biomodel to have similar physical and mechanical properties to blood vessels [1, 2]. Because PVA-H biomodel has good transparency and low friction coefficient like in vivo tissue because of high content of water [2], it is useful not only for training but technical evaluation of medical devices. In this study, ball-on-disc friction tests have been performed with medical metallic alloys on PVA-H. In addition, for further investigating the relationship with friction properties, the wettability of the medical alloys was measured with contact angle tests and the surface chemical components were analyzed with X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).

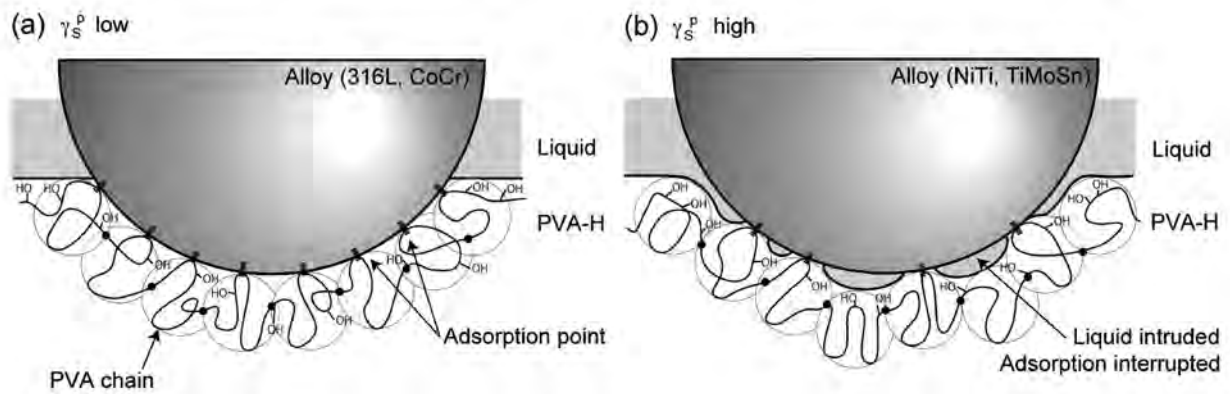


Figure 1 : Different states of hydrophilic liquid caught between PVA-H and metallic alloy in the elastic friction.

### 3. Achievements

Excellent progress

### 4. Summaries and future plans

The surface energy has an important role for friction. The lubricant will be focused next future.

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

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

\*[1] Boyko Stoimenov, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Hiroyuki Kosukegawa, Makoto Ohta: Bioengineering Materials and Conditions for Obtaining Low Friction with PVA Hydrogels, *Tribology Online*, Vol. 8 (1), (2013), pp. 140-152.

[2] Yasutomo SHIMIZU, Shuya SHIDA, Kenichi FUNAMOTO, Toshiyuki HAYASE, Makoto OHTA: Influence of plaque stiffness on change of blood vessel geometry leading hemodynamical changes in PVA-H stenosis models, *Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Houston, (2012), IMECE2012-87073.

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

[3] Kei Ozawa, Yuji Katakura, Yukihiro Shibata, Philippe Kapsa, Vincent Fridrici, Gaetan Bouvard, Makoto Ohta: Friction and thermal Properties in Drilling of Bone Biomodels, *Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp. 584-585.

\*[4] Hiroyuki Kosukegawa, Makoto Ohta, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa: Tribology of Medical Materials on PVA-H Biomodel, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 102-103.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable.

(Award)

Not applicable.

(Press release)

Not applicable.

Project code	J12084
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2012 ~ March 2013
Project status	2nd 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 first year, the aim of the second year project is to evaluate the efficiency of typical inverse analysis methods, both deterministic and stochastic, for the reconstruction of wall thinning defect from Pulsed Eddy Current Testing (PECT) signals in view of the practical application to the In-service inspection of coolant pipes in Nuclear Power Plants (NPP).

### 2. Details of program implement

The PECT method is a relative new NDT technique. Last year, several defect reconstruction methods, such as the conjugate gradient method, and the neural network method have been adopted for the reconstruction of defect profile from PECT signals in this project. In addition, a rapid forward numerical code has also been developed for the high efficient simulation of the PECT signals, which give a possibility to use heuristic optimization method for the defect sizing. However, which method is more suitable for PECT inversion is still a problem to be clarified.

In this work, reconstructions of defect depth, length, and position are conducted based on the genetic algorithm (GA), simulated annealing (SA) and the tabu search (TS) method. With the efficient numerical code developed last FY for PECT signal simulation, inversion codes of GA, SA and TS are developed respectively, and Reconstructions of wall thinning defect from both simulated and measured PECT signals are performed to demonstrate efficiency of the developed numerical method and the corresponding numerical codes.

Table 1 Reconstruction results with noises

Method	Noise Level				
	1%	3%	5%	7%	10%
Simulated Annealing	-3.98	-3.97	-3.96	-4.00	-3.96
	1.96	1.94	2.05	2.13	2.11
	3.10	3.16	2.94	2.74	2.50
Genetic Algorithm	-4.0,	-4.0	-4.0,	-4.0,	-3.9
	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Tabu Search	-3.9,	-3.9	-3.9,	-3.9,	-3.8,
	1.9	2.0	1.9	2.1	1.9
	3.3	3.1	4.9	3.9	3.4

From numerical results, it is found that all the 3 heuristic methods (GA, SA, TS) can give good inversion results for simulated signals without artificial noise.

Comparison among the convergent process is shown in Fig.1. From the figure, it can be seen that all the algorithms have good accuracy while the genetic algorithm has better convergent speed. On the other hand, Table 1 shows a comparison of the reconstruction results for different noise level. One can find that the robustness of the genetic algorithm is also the strongest against white noise. Even under noise of 10%, the solution keeps stable.

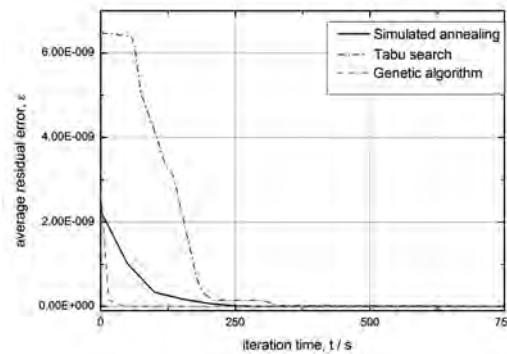


Fig.1 Evolution of residual errors

### 3. Achievements

Reconstructions of defect are conducted by using numerical codes of the genetic algorithm, the simulated annealing and the tabu search method developed aiming to clarify their validity and efficiency for practical applications through comparing their performances. It is found that the GA method has relatively better efficiency for the defect sizing from both simulated and measured PECT signals.

### 4. Summaries and future plans

Based on the researches in the former two years, the work of the third year project will focus to investigate the efficiency of PECT for the nondestructive evaluation of plastic deformation in austenitic stainless steel, a typical material in NPPs. Both simulation and experiments will be conducted based on the code and the experimental setup constructed in the last two years

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - \*[1] Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Li Wang: An Inversion Scheme for Sizing of Wall Thinning Defect from Pulsed ECT Signals, *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, Vol.39, No.1-4, (2012), pp. 203-211.
  - [2] Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto: Development of a Very Fast Simulator for Pulsed Eddy Current Testing Signals, *NDT&E Int.*, Vol.51, (2012), pp. 45-50.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - \*[3] Zhenmao Chen, Shejuan Xie, Xiaowei Wang, Yong Li, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi: Comparison of Inversion Methods for Reconstruction of Defect from Pulsed Eddy Current Testing Signals, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 84-85.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.



課題番号	J12085
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2012.4~2013.3
継続年数	1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\*\*, 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  
†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

鋭敏化した Alloy 600 では, Cr 濃度分布の違いから結晶粒界上と結晶粒内では磁気特性が異なることが知られており, 実際に Fig.1 に示すように  $\mu$ Kerr 磁気特性測定システムの測定結果では, 結晶粒界上(a)と結晶粒内(b)での磁化過程の違いが確認されている. この Cr 濃度分布が磁気特性にどのように影響するかを解析するため, Cr 濃度分布が様々に異なる局所構造を想定して, 磁性サイト拡散モデルによるクラスターを構築し, その磁化過程のモンテカルロシミュレーションを行った. その結果, Fig.2 に示すように磁性サイト分布によって B-H 曲線が異なり, 磁性サイトの分布と B-H 曲線の対応関係についての知見を得ることができた. この解析により, Cr 濃度分布による磁気特性の変化を予想することが可能となり, 鋭敏化した Alloy 600 の Cr 欠乏量の微細分布構造を磁気特性から把握する可能性を高めた.

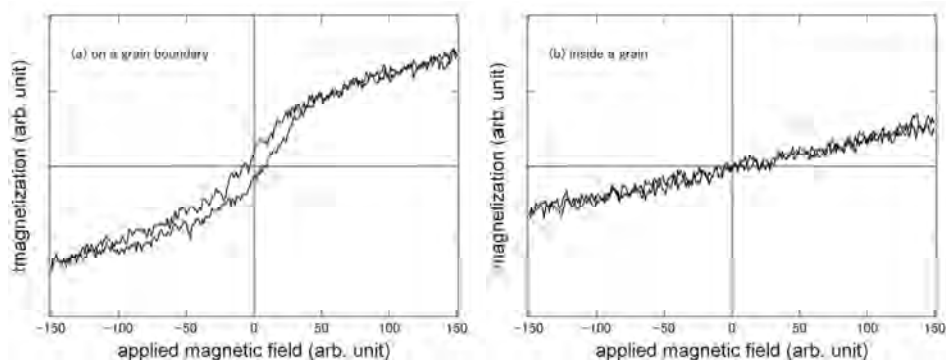


Fig. 1 : Magnetic hysteresis curves measured by  $\mu$ -MOKE magnetometer (a):on a grain boundary and (b):inside a grain.

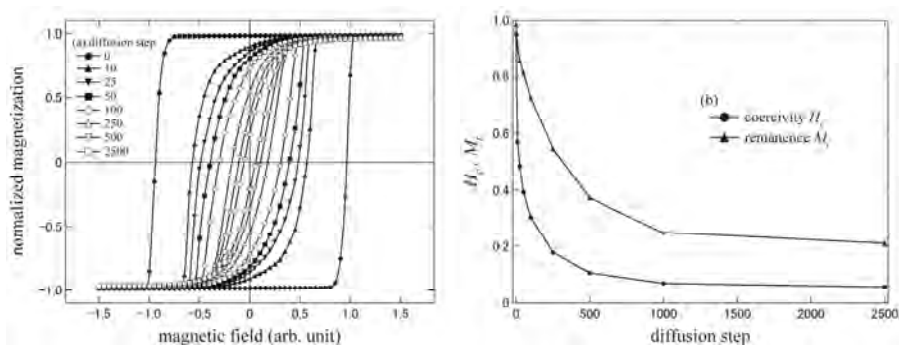


Fig. 2 : Magnetic hysteresis loops for each diffusion cluster (a) and diffusion step dependence of magnetic coercivity and remanence (b).

### 3. 研究目標の達成状況

鋭敏化した Alloy 600 の局所領域に対して  $\mu\text{Kerr}$  による磁化測定を行い、実際に Cr 濃度分布をもつ局所領域の磁気特性がそのほかの領域と異なることを受け、様々な Cr 濃度分布を想定した磁性サイト拡散モデルによる局所領域の磁化過程シミュレーションを行った。その結果により、鋭敏化の初期段階では保磁力・残留磁化が大きく、あらわれてくる磁化が強いことが示され、B-H 曲線の形状と Cr 濃度分布との対応関係についての知見が得られた。以上のように、鋭敏化した Alloy600 に対する局所領域の磁気特性の検証をマイクロレベルで行うことができ、磁気非破壊検査への応用が期待される磁気特性から Cr 濃度分布の状態を知るための知見を得ることができた。

### 4. まとめと今後の課題

磁性サイト拡散モデルによる局所領域の磁化過程シミュレーションと実際の  $\mu\text{Kerr}$  による磁化測定によりマイクロレベルでの Cr 濃度分布による局所構造の検証を行った。今後の課題は、 $\mu\text{Kerr}$  による磁化測定の精度を高め、より現実に即した Cr 濃度分布モデルを構築してシミュレーションを行い、それらを組み合わせることで定量的な検証を行うことである。

### 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] K. Suzuki, K. Yamaguchi, T. Uchimoto, T. Takagi: Simulation analysis on grain boundaries thought relation between Cr depletion distribution and local magnetic properties, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp.74-75.

[2] K. Suzuki, K. Terashima, K. Yamaguchi, T. Uchimoto, T. Takagi: Monte Carlo simulation for Magnetic Granular System with Gaussian Distribution, *JSST 2012 International Conference on Simulation Technology*, Kobe, (2012).

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし (受賞) なし (マスコミ発表) なし

## 2. 研究成果報告書

＜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	J12B01
課題分野	次世代反応流体科学
研究期間	2012.4～2013.3
継続年数	3年目

[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いえない。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

本年度は研究から3年目に当たり、徐々にではあるが各研究分野間の融合研究成果が形成されつつある。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進捗状況の確認を行った。

特に本年度は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「高圧下における微粒化現象と噴霧燃焼挙動の解明」がスタートしたので、この研究に関する初期成果概要を簡単に紹介する。混相流体力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つつある。

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。

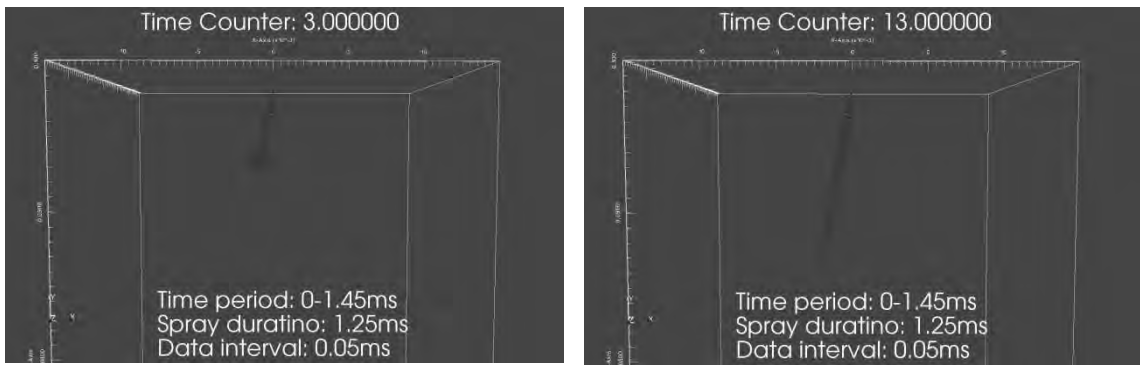


図 1： 高圧条件下における噴霧微粒化液滴群の挙動（容器内圧 5.0MPa）

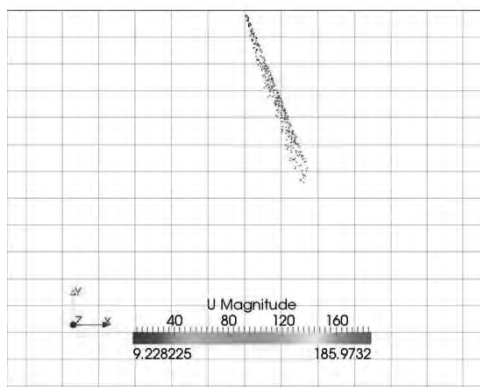


図 2： 高圧条件下における噴霧微粒化液滴群の流速分布

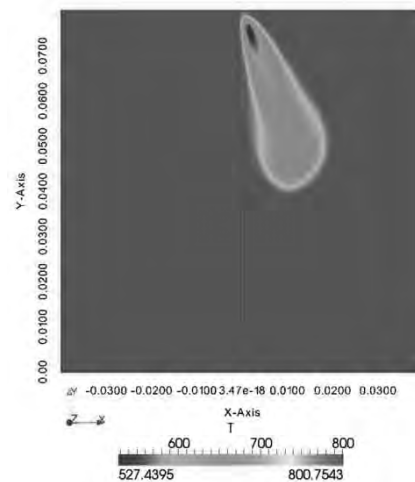


図 3： 高圧条件下における噴霧微粒化液滴群の温度分布

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。

### 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

現在のところ、各研究分野間の融合研究成果が形成されつつあり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てきていると言える。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。そこで次年度からは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を計画している。

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<sup>1)†</sup>, 小原 拓<sup>1)</sup>, 太田 信<sup>1)</sup>,  
白井 敦<sup>1)</sup>, 小宮 敦樹<sup>1)</sup>, 富田 典子<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>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

本年度は、上記研究課題に対応して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）

ミトコンドリア膜電位測定は、初期アポトーシスを判定する手法として用いられている。初期アポトーシスでは、ミトコンドリア膜電位の低下が起こるため、膜電位測定によってアポトーシスの検出が可能である。そこで、プラズマ流により生成された化学種の細胞に与える影響について、ミトコンドリアの膜電位の変化についてフローサイトメーターを利用して解析を行った。図1に各暴露条件に対するミトコンドリアの膜電位の変化を示す。グラフの縦軸はミトコンドリア膜電位が高い細胞数を示し、横軸はミトコンドリア膜電位が低い細胞数を示す。(A) Control, (B) プラズマ処理培地 (40 s 照射) と(C) 過酸化水素添加培地 (51  $\mu$ M), (D) Positive control である。プラズマ照射培地や過酸化水素への暴露は、Control と同じ傾向を示し、膜電位低下は観察出来なかった。これより、ミトコンドリアへ傷害や初期アポトーシスは本条件下では検出しなかった。

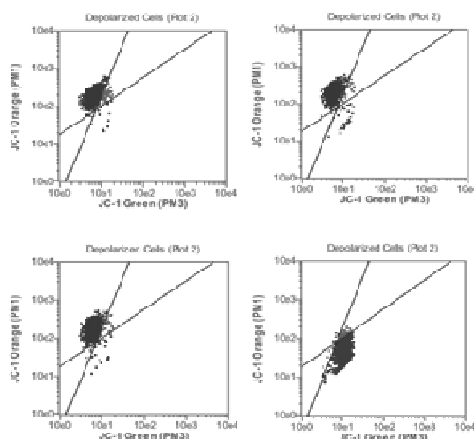


図1：各暴露条件に対するミトコンドリアの膜電位の変化。(A) Control, (B) 40sec Plasma,



(C) 51uM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, (D) Positive Control (50uM CCCP).

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。特に、脂質の分子種による違いが大きく現れる二重膜として、DPPC と SMPC の二重膜に対してそれぞれ膜面垂直方向に熱流束を与え、生じる温度分布を計測して二重膜各部の熱抵抗を計測した。図2から、単層膜がその脂質分子尾部を向かい合わせて弱く結合している二重膜中央付近の熱抵抗が顕著であること、この部分の熱抵抗は、SMPCの方がDPPCより小さいことなどがわかる。SMPC 単層膜界面の熱抵抗が小さいのは、SMPC 分子の尾部が凹凸に富んだ界面を形成していることによるものと考えられ、他のさまざまな界面熱抵抗と同様の傾向を示しているが、そのメカニズムはさらに検討する必要がある。

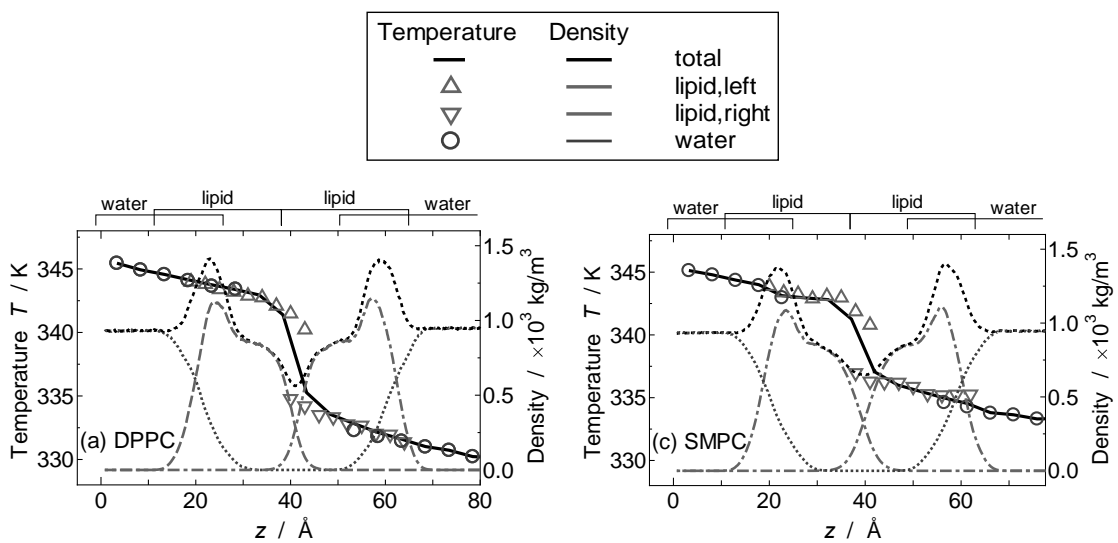


図2：脂質二重膜垂直方向熱伝導における膜内温度分布。(左)DPPC, (右)SMPC

③生体適合材料と細胞の相互作用 (太田, 富田)

生体適合性材料を用いた生体軟組織の生体外循環システムモデル開発のため、脂質膜の構成要素が膜タンパク質に及ぼす影響について調べた。特に、本研究では、FhuA と呼ばれるβバレル型膜タンパク質について調べた。本型は、典型的な膜タンパク質を構成するが、脂質の影響を受けにくいとされてきた。






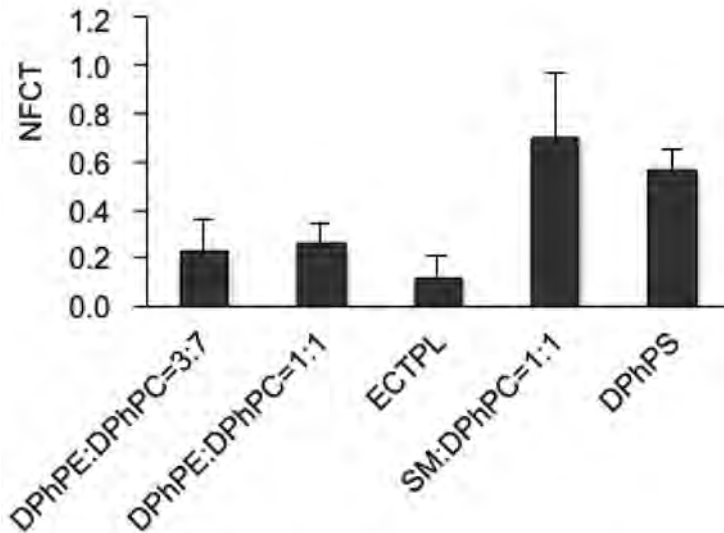
	Inverted cone	Truncated cone	Truncated cone	Cylinder	Cone
Lipidshape					
Dimensionless shape parameter	<1/3	1/3 - 1/2	1/2 - 1	~ 1	> 1
Phase	Spherical micelle	Cylindrical micelle	Lipid vesicle	Planar bilayer	Inverted micelle (Hexagonal (H <sub>II</sub> ))

図 3：脂質の形状と脂質膜の形状について

脂質膜を構成する脂質の形状は、図 3 のように分けられ、脂質膜の形状も決まってくる。



これらの膜タンパク質のエレクトロフィジオロジーへの影響を調べた。

図 4：一定時間における膜タンパク質孔の閉鎖回数

その結果図 4 のように、様々な脂質において、一定時間における膜タンパク質の閉鎖回数に差があることが分かった。これは、 $\beta$  バレル型膜タンパク質においても孔を閉じる(=形状を変化させる)のに、周りの脂質の影響を受けていることを表す。次年度は、さらに大きな孔(=脂質膜の強度を低下させるため)を持つ膜タンパク質を調べる。

#### 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)

好中球のモデル細胞である HL60 は、20%FBS を含む RPMI-1640 Medium を培地とし、CO<sub>2</sub> 濃度 5%、37°C で培養した。ここで、atRA(all-trans Retinoic Acid) を 99.5% エタノールに溶解させた後、HL60 の培地に最終濃度 1 $\mu$ M となるように添加し、5 日間培養した。その結果、NBT 還元法により 90% 以上の細胞が分化していることを確認した。実験には、分化した細胞を PBS で洗浄した後に、濃度を 5 $\times$ 10<sup>5</sup> cells/ml に調節して用いた。また、比較用として atRA を添加せずに培養した細胞も同濃度に調節して準備した。

傾斜遠心顕微鏡を用いて、ガラス平板上に押しつけられながら移動する HL60 細胞の挙動を観察した。まず、図 5 に、ガラス平板に対する付着率の比較を示す。ここで、血球挙動の PTV 計測における計測誤差を考慮し、移動速度が 5.27 $\mu$ m/s 以下の細胞を付着細胞と定義した。図より、HL60 は分化により付着率がほぼ倍増することが明瞭である。これは、分化により HL60 の表面に接着分子が発現したことに起因すると考えられる。次に、図 6 に、付着細胞を除いた細胞について、平均移動速度の比較を示す。図より、分化した HL60 の方が平均移動速度が小さい。この血球の挙動を観察したところ、分化した細胞では stick-slip 運動が確認された。これが付着率の上昇および平均移動速度の低下の一因であると考えられる。ただし、平均移動速度の差は、付着率の差と比較して著しく小さいことから、slip 状態の血球の移動速度に対しては、分化の有無はほとんど影響がないといえる。

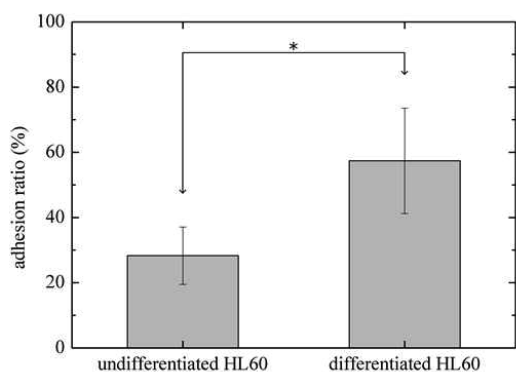


図 5: 分化による HL60 の付着率の比較  
(\*  $p < 0.001$ )

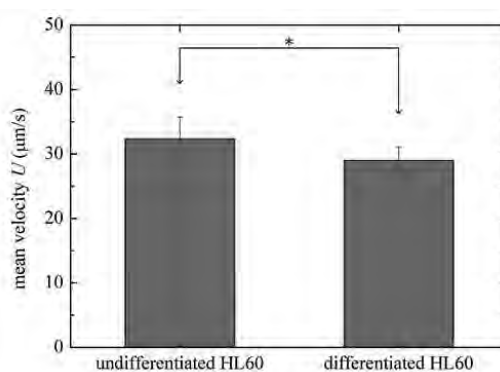
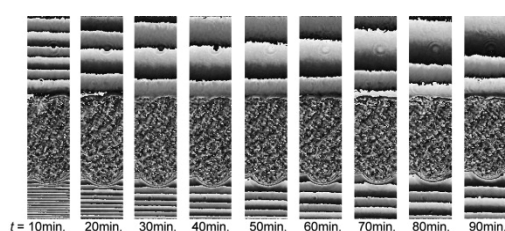


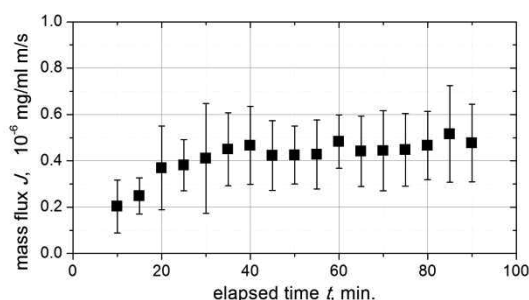
図 6: 分化による HL60 の平均移動速度の比較  
(\*  $p < 0.001$ )

### 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を用いて、サブミリスケールの物質輸送可視化を行った。生体膜を模擬したマイクロチャネルを通過する物質輸送現象である束縛拡散の定量的評価を行った。結果を図 7 に示す。図 7(a) は Lysozyme の拡散実験結果であり、上部に純水を、下部に Lysozyme 溶液を満たして行った結果である。図中央のグレー部分は膜を示しており、膜内は初期条件として下部溶液が満たされている。図からわかるように、両液混合後、直ちに上部純水側に Lysozyme が拡散を開始するが、その後、濃度勾配は一旦緩やかとなり、再び急勾配となる。これは、拡散初期においては膜内に存在した Lysozyme が純水側に拡散するが、その後の下部溶液からの Lysozyme の供給が不足し、膜内を通過するのに時間を要することを意味しており、マイクロチャネルという物理的空間制限により、物質流束が制御可能であることを示している。図 7(b) は、拡散開始からの各時刻におけるチャネル端近傍の Lysozyme 物質流束の変化を表している。時間の経過とともに物質流束は一定値に収束することがわかる。



(a) 非定常拡散場の可視化結果



(b) 各時刻における物質流束の変化

図 7: マイクロチャネルによる Lysozyme 物質流束の制御

## 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ている。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、プラズマ流の刺激に対するミトコンドリアの膜電位解析を進め、弱い刺激に

においては、プラズマ流による傷害を受けないことを明らかにした。これより、本条件下では初期アポトーシスが発生しないことを示した。

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解析を続行し、単層膜界面の熱抵抗について興味深い特性を見出した。

③生体適合材料と細胞の相互作用（太田、富田）

細胞表面に存在するタンパク質の脂質膜との相互作用について、脂質膜の影響を受けることをβバレル型膜タンパク質でも存在する可能性を示唆した。

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）

分化した HL60 細胞を用いた実験により、当初の目標通りに、細胞の分化が HL60 の挙動に影響を与えることが示された。

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、マイクロチャネル近傍のタンパク質物質移動過程を詳細観察し、束縛拡散における物質流束および見かけの物質拡散係数導出法を検討することに焦点を絞り、実験的アプローチを中心に研究を遂行した。諸種条件下におけるマイクロチャネル近傍の非定常濃度場を定量的に計測できたことから、全体としては80%の達成度と評価できる。

#### 4. まとめと今後の課題

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）

ミトコンドリアの膜電位の計測から、細胞に初期アポトーシスが誘導されないことが示されたが、網羅的遺伝子解析と比較しどのような条件で初期アポトーシスが誘導されるのかについて検証する。

②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究（小原）

単層膜界面の熱輸送特性を決定するメカニズムを解析する必要がある。また、運動量の伝搬メカニズムと脂質二重膜の摩擦特性の解明が大きな課題として残っている。

③生体適合材料と細胞の相互作用（太田、富田）

今後、さらに大きな孔を構成する膜タンパク質について調べる。

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）

従来の研究では未分化の HL60 を用いてきたが、移動する細胞の平均移動速度については、分化の有無はあまり影響がないことが明らかとなった。ただし、血管内皮細胞基板を用いた場合、内皮細胞側の接着分子の影響が現れると考えられる。そのため、次年度は、HUVEC を培養したガラス平板を用い、分化の有無による HL60 の挙動を比較する。また、接着分子以外の要因がないかを確認するために、タンパクの結合を阻害する MPC でガラス平板をコーティングして挙動を比較する。

⑤物質・熱の細胞膜内輸送現象の実験的研究（小宮）

マイクロチャネル近傍の非定常濃度場可視化技術の確立および物質流束の同定法の確立を図った。得られた実験結果より、干渉顕画像から定量的な物質流束の導出を行うことができ、自由拡散の場合と異なる物質流束を求めることができた。今後は、マイクロチャネル径を変えたパラメトリックな実験を行っていく。

#### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

[1] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya and Takehiko Sato:

- Spatiotemporal analysis of propagation mechanism of positive primary streamer in water, *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, Issue 11, (2013), article no. 113304 (7 pages).
- [2] A. Shirai and S. Masuda: Numerical Simulation of Passage of a Neutrophil Through a Rectangular Channel with a Moderate Constriction, *PLoS ONE*, Vol. 8, No. 3 (2013), e59416.
- [3] A. Shirai, H. Sato and T. Hayase: Motion of fMLP-Stimulated HL60 Cells on HUVEC Cultured on a Flat Glass Plate, *Surface Modification Technologies XXVI*, Ecully, (2012/6/20-22), 83-91.
- [4] J.F. Torres, A. Komiya, J. Okajima and S. Maruyama: Measurement of the Molecular Mass Dependence of the Mass Diffusion Coefficient in Protein Aqueous Solutions, *Defects and Diffusion Forum*, Vol.326-328 (2012), pp. 452-458.
- [5] Tomita N, Mohammad MM, Niedzwiecki DJ, Ohta M, Movileanu L.: Does the lipid environment impact the open-state conductance of an engineered  $\beta$ -barrel protein nanopore?, *Biochim Biophys. Acta. Biomembrane*, Vol. 1828(3) (2013), pp. 1057-65.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [1] Takehiko Sato, Mayo Yokoyama and Kohei Johkura: Gene Expression Analysis Using a Microarray for HeLa Cells Exposed to a Plasma Flow, *Book of abstracts of the 9th International Bioelectrics Symposium (BIOELECTRICS 2012)*, Kumamoto, (2012), Paper No. O-23.
- [2] Mayo Yokoyama, Takehiko Sato and Kohei Johkura: Comprehensive Gene Expression Analysis of HeLa Cells in Response to Plasma Stimuli, *Proceedings of the Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp.748-749.
- [3] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya and Takehiko Sato: Development of Visualization Methods of Streamers in Water, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp.142-143.
- [4] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya and Takehiko Sato: Propagation Process of Streamer Discharge in Water, *Proceedings of the Ninth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2012), pp.166-167.
- [5] A. Shirai, T. Umimoto, H. Uranuma and T. Hayase: INFLUENCE OF PRESSING FORCE ON MOTION OF HL60 CELLS ON HUVEC SUBSTRATE, *18th Congress of the European Society of Biomechanics (ESB2012)*, Lisbon, (2012/7/1-4), Presentation1717.
- [6] A. Komiya and J. Chevalier: Experimental Trial to Active Control of Protein Mass Flux in Hindered Diffusion Field, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Transport Phenomena*, New Zealand, (2012), CD-ROM 268.
- [7] 佐藤岳彦: 大気圧低温プラズマ流のラジカル輸送機構と滅菌機構, スマート材料・デバイスの発展と技術イノベーション, (2012). (招待講演)
- [8] 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 佐藤岳彦: 水中プラズマのストリーマ形成過程, 第22回環境工学総合シンポジウム2012 講演論文集, (2012), pp.209-210.
- [9] 佐藤岳彦: 大気圧プラズマのバイオ・医療に関する基礎と応用, 大気圧プラズマの産業応用に関する特別講演会, (2012). (招待講演)
- [10] 佐藤岳彦, 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹: 水中ストリーマ進展過程の可視化, 日本機械学会2012年度年次大会, (2012), 講演番号: S055012.

- [11] 佐藤岳彦: プラズマの生体作用, 第 2 回パルスパワーおよび放電の農水系利用調査専門委員会, (2012).
- [12] 佐藤岳彦: 大気圧プラズマ流の照射による HeLa 細胞の生体応答, 第 28 回九州・山口プラズマ研究会, (2012). (招待講演)
- [13] 佐藤岳彦, 横山茉代, 城倉浩平: 大気圧プラズマ流処理培地への暴露による HeLa 細胞の機能応答, 日本機械学会第 25 回バイオエンジニアリング部門講演会, (2013).
- [14] 杉山, 白井, 早瀬: ガラス平板上における HL60 の挙動に与える分化の影響, 日本機械学会第 25 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, つくば, (2013/1/9-11), 331-332.

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

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<sup>1)†</sup>, 小林 秀昭<sup>1)</sup>, 中村 寿<sup>1)</sup>, 店橋 護<sup>2)</sup>, Sergey Minaev<sup>3)</sup>, Yiguang Ju<sup>4)</sup>  
<sup>1)</sup>東北大学流体科学研究所, <sup>2)</sup>東京工業大学, <sup>3)</sup>SB RAS, ITAM, <sup>4)</sup>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, 光学計測や表面反応の評価へと展開する.

## 2. 研究成果の内容

平成 24 年度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)

- ・ CH 比が異なる元燃料の改質ガスに対して, CCS を想定した純酸素・高濃度二酸化炭素予混合気に対する高圧乱流燃焼実験を実施した (図 1).
- ・ 次世代バイオ燃料であるプロパノールに対し円形ノズルバーナによる高圧乱流燃焼実験を実施した (図 2).
- ・ プロパノール異性体における熱分解過程の違いが乱流火炎構造におよぼす影響について, 詳細反応経路解析と 2 段反応モデルによる不安定性解析によってそのメカニズムを明らかにした.
- ・ 高圧燃料改質炉内の気体混合部における純酸素燃焼基礎特性を明らかにした.
- ・ 廃棄物焼却炉内の燃焼数値解析により低酸素高温空気燃焼の有効性を明らかにした.
- ・ 低酸素高温空気燃焼条件におけるポリマーの熱分解過程を明らかにした.

### ② 燃焼・反応現象の理解 (燃料の着火特性)

- ・ 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, ガソリン燃料のオクタン価評価能の提示に続き, 正ヘプタンへのトルエン添加効果とその機構, およびセタン価評価能の提示 (図 3) を行った.
- ・ マイクロリアクタ内の化学種の分光計測に着手し, リアクタ内でも光学計測 (OH 基) が可視化できることを示した.
- ・ マイクロリアクタにおける壁の化学的消炎作用について実験および数値計算により検討し, 従来から使用されてきた壁でのラジカル失活モデルは, 失活効果を過大評価していることを示した.

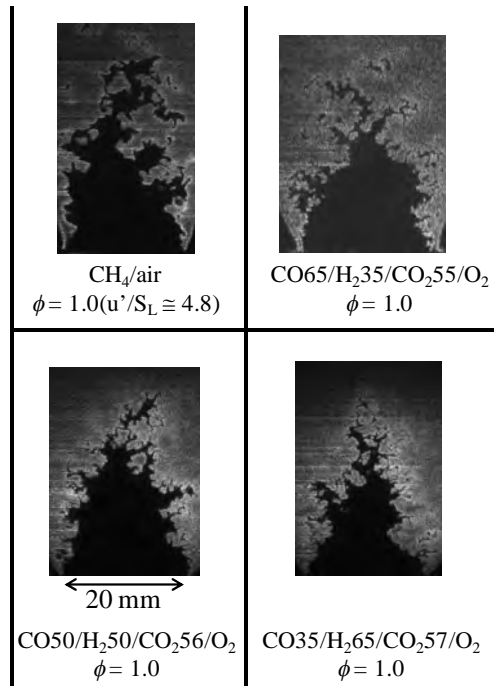
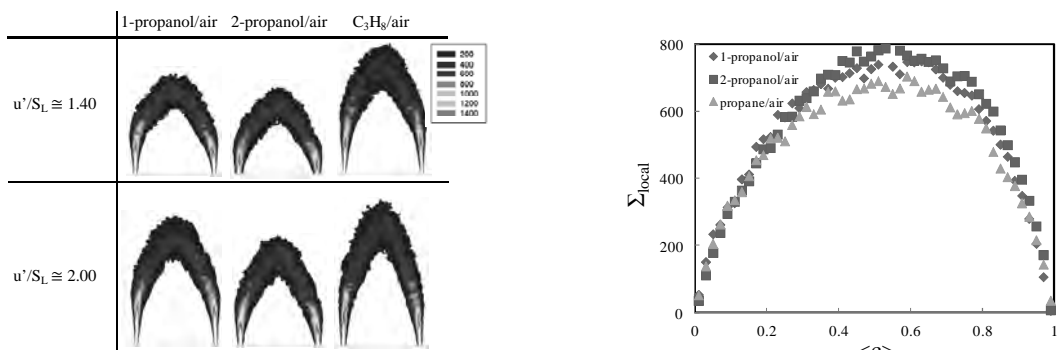


図 1 : CO/H<sub>2</sub>比が異なる純酸素・高濃度 CO<sub>2</sub> 高圧乱流予混合火炎の OH-PLIF 画像 (0.5 MPa)



(a) 局所火炎面密度分布

(b) 火炎面密度と反応進行変数の関係 ( $u'/SL=1.4$ )

/SL=1.4)

図 2 : プロパノール異性体における火炎密度分布の違い (0.5 MPa)

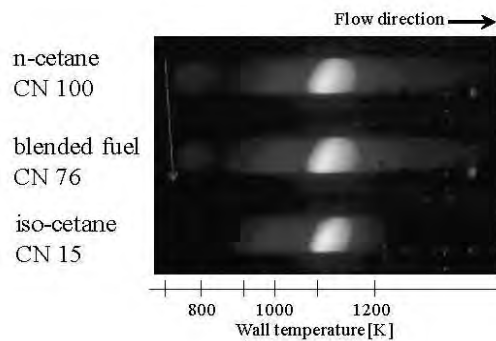


図 3 : マイクロフローリアクタにおける Weak flame がセタン価に依存して変化する様子



### 3. 研究目標の達成状況

計画に基づき、平成 24 年度も順調に推移している。

### 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、計測手段の展開を実施した。平成 25 年度はこれらをさらに押し進め、実験から素反応計算、さらには直接数値計算までを総合した研究を実施することが課題である。

### 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] J. Wang, Z. Huang, H. Kobayashi, Y. Ogami: Laminar burning velocities and flame characteristics of CO/H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixtures, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.37(2012), pp.19158-19167.
- [2] Y. Ogami, M. Mori, K. Yoshinaga, H. Kobayashi: Experimental Study on Polymer Pyrolysis in High-Temperature Air Diluted by H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> Using Stagnation-Point Flow, *Combustion Science and Technology*, Vol.184 (2012), pp.735-749.
- [3] 傳田知広, 中山剛, 内山武, 岩崎敏彦, 鈴木康夫, 小林秀昭, 大上泰寛, 奥山昌紀: 数値シミュレーションによるストーカ炉内燃焼挙動解析, 日本機械学会論文集 78 巻 789 号,(2012), pp. 65-69.
- [4] 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: 高圧環境における同軸酸素噴流拡散火炎の安定性に関する研究, 日本燃焼学会誌第54巻170号,(2012), pp.269-278.
- [5] J. Wang, F. Matsuno, M. Okuyama, Y. Ogami, H. Kobayashi, Z. Huang: Flame front characteristics of turbulent premixed flames diluted with CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O at high pressure and high temperature, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.34 (2013), pp. 1429-1436.
- [6] H. Kobayashi, Y. Otawara, Jinhua Wang, F. Matsuno, Y. Ogami, M. Okuyama, T. Kudo, S. Kadowaki: Turbulent premixed flame characteristics of a CO/H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixture highly diluted with CO<sub>2</sub> in a high-pressure environment, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.34 (2013), pp.1437-1445.
- [7] Aiwu Fan, Jianlong Wan, Kaoru Maruta, Hisashi Nakamura, Hong Yao: Flame dynamics in a heated meso-scale radial channel, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.34, Issue 2:3351-3359 (2013).
- [8] Roman Fursenko, Sergey Minaev, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Koichi Takase, Xing Li, Masato Katsuta, Masao Kikuchi, Kaoru Maruta: Cellular and sporadic flame regimes of low-Lewis-number stretched remixed flames, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.34, Issue 1:981-988 (2013).
- [9] Satoshi Suzuki, Mikito Hori, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: Study on cetane number dependence of diesel surrogates/air weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.34, Issue 2:3411-3417 (2013).
- [10] Hisashi Nakamura, Akira Yamamoto, Mikito Hori, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Study on pressure dependences of ethanol oxidation by separated weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.34, Issue 2:3435-3443 (2013).

- [11] Mikito Hori, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Characteristics of n-heptane and toluene weak flames in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.34, Issue 2:3419–3426 (2013).
- [12] Hisashi Nakamura, Aiwu Fan, Sergey Minaev, Evgeniy Sereshchenko, Roman Fursenko, Yosuke Tsuboi, Kaoru Maruta: Bifurcations and negative propagation speeds of methane/air premixed flames with repetitive extinction and ignition in a heated microchannel, *Combustion and Flame*, Vol.159, Issue 4 : 1631-1643 (2012).
- [13] Dae Keun Lee and Kaoru Maruta: Heat recirculation effects on flame propagation and flame structure in a mesoscale tube, *Combustion Theory and Modelling*, Vol.16, Issue 3:507-536 (2012).
- [14] Mikito Hori, Akira Yamamoto, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: Study on octane number dependence of PRF/air weak flames at 1-5 atm in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Combustion and Flame*, Vol.159, Issue 3 : 959-967 (2012).

## 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] H. Kobayashi, Y. Otawara, Jinhua Wang, F. Matsuno, Y. Ogami, M. Okuyama, T. Kudo, S. Kadowaki: Turbulent premixed flame characteristics of a CO/H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixture highly diluted with CO<sub>2</sub> in a high-pressure environment, *34th International Symposium on Combustion*, 2A10, (2012/7/29-8/3).
- [2] S. Souyoshi, T. Suzuki, T. Kudo, H. Kobayashi: Turbulent Combustion Characteristics of Propanol Isomers in a High-Pressure Environment, *34th International Symposium on Combustion*, W4P093, (2012/7/29-8/3).
- [3] S. Kadowaki, H. Kobayashi: Formation of Cellular Fronts in High-Temperature Premixed Flames, *The Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI-2012)*, (2012), pp.46-47. (2012/9/19-21).
- [4] S. Souyoshi, T. Suzuki, T. Kudo, H. Kobayashi: Combustion Characteristics of Propanol/Air Turbulent Premixed Flames at High Pressure, *Ninth International Conference on Flow Dynamics (9th ICFD 2012)*, OS11-40, (2012/9/19-21).
- [5] 大島卓也, 小林秀昭, 門脇敏, 高温予混合火炎の数値解析: 固有不安定性に及ぼす未燃ガス温度とルイス数の影響, 日本機械学会北陸信越支部 第 49 期総会・講演会 講演論文集 (2012) 0516.(2012/3/10).
- [6] 宗吉俊吾, 鈴木拓朗, 工藤琢, 小林秀昭: アルコール系バイオ燃料の高圧乱流燃焼特性に関する研究, 第49回日本伝熱シンポジウム2012 講演論文集, (2012), pp.441-442. (2012/5/30-6/1).
- [7] 傳田知広, 中山剛, 内山武, 岩崎敏彦, 小林秀昭: 数値シミュレーションによるストーカ炉内燃焼挙動解析 (第二報), 第 22 回環境工学総合シンポジウム 2012,(2012)205, (2012/7/4-7/6).
- [8] 白川駿, 熊上学, 工藤琢, 小林秀昭: 高圧環境における同軸酸素噴流拡散火炎の安定化機構, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2012, (2012), pp.93-94. (2012/11/17-11/18).
- [9] 鈴木拓朗, 宗吉俊吾, 工藤琢, 小林秀昭: 高圧環境におけるアルコール系バイオ燃料の乱流燃焼メカニズムに関する研究, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2012), pp.44-45. (2012/12/5-7).
- [10] 青木佑丞, 山崎渉, 小林秀昭, 門脇敏: 高温予混合火炎の数値解析: 固有不安定性による三次元セル状火炎の形成, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2012), pp.146-147. (2012/12/5-7).

- [11] 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: 高圧環境における同軸酸素噴流拡散火炎の安定性に及ぼす乱流強化の影響, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2012), pp.564-565. (2012/12/5-7).
- [12] 高瀬 光一, Xing Li, 中村 寿, 手塚 卓也, 長谷川 進, 勝田 真登, 菊池 政雄, 丸田 薫: 微小重力場における低伸長率  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Xe}$  対向流予混合場中の球状火炎, 第 49 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 Vol. I + II, (2012), 255-256 頁.
- [13] 鈴木 聡史, 堀 幹人, 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ディーゼルサロゲート燃料のセタン価と燃焼特性第 49 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 Vol. I + II, (2012), 251-252 頁.
- [14] 鎌田 大輝, 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低級アルカン燃料の Weak flame の高分解能観察, 第 49 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 Vol. I + II, (2012), 399-400 頁.
- [15] 中村 寿, 堀 幹人, 手塚 卓也, 長谷川 進, 丸田 薫: 温度分布制御マイクロフローリアクタによるエタノール酸化反応の圧力依存性, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2012), 438-439 頁.
- [16] Xing Li, Li Jia, 大西孝和, 手塚卓也, 長谷川進, 丸田 薫: Study on Ignition and Combustion Characteristics of  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{C O}_2$  Mixture Using a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2012), 194-195 頁.
- [17] 高瀬 光一, Xing Li, 中村 寿, 手塚 卓也, 長谷川 進, 勝田 真登, 菊池 政雄, 丸田 薫: 微小重力場における低伸長率  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Xe}$  対向流予混合火炎の球状火炎への遷移, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2012), 278-279 頁.
- [18] 鎌田 大輝, 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天然ガス成分燃料の着火・燃焼特性に関する研究, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2012), 22-23 頁.
- [19] 鈴木 聡史, 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におけるディーゼル基準燃料のすす生成, 第 50 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2012), 190-191 頁.

### 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<sup>1†</sup>, 西山 秀哉<sup>1)</sup>, 高奈 秀匡<sup>1)</sup>, 徳増 崇<sup>1)</sup>, 寒川 誠二<sup>1)</sup>, 久保田 智広<sup>1)</sup>  
Kozo Saito<sup>2)</sup>, 姫野 武洋<sup>3)</sup>, 新城 淳史<sup>4)</sup>, 岡村 崇弘<sup>5)</sup>, 松浦 一雄<sup>6)</sup>, 井上 元<sup>7)</sup>

<sup>1)</sup>東北大学流体研, <sup>2)</sup>IR4TD, University of Kentucky, USA, <sup>3)</sup>東京大学大学院,  
<sup>4)</sup>JAXA 研究開発本部, <sup>5)</sup>KEK 素核研低温, <sup>6)</sup>愛媛大学大学院, <sup>7)</sup>京都大学大学院  
†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 プラズマチューブによる管内微粒子流動制御 (西山・高奈 G)

近年、自動車の排気ガスや工場から発する煤煙などによる大気汚染は深刻化しており、環境への配慮が責務である産業界にとっては環境汚染対策が急務の課題になっている。そこで本研究では、大気汚染微粒子の除去ならびに高効率微粒子搬送技術の確立を目指し、空気を誘電体バリア放電(Dielectric Barrier Discharge)を用いて活性化させた管内において、微粒子の攪拌・搬送及び浄化を可能とするプラズマチューブを提案するとともに、その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は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 プラズマチューブによる管内微粒子流動制御 (西山・高奈 G)

図1(a)(b)に実験装置の概略図及びプラズマチューブの断面図をそれぞれ示す。表裏に幅5 mm の一対の螺旋状の銅電極を有する内径12 mm 及び20 mm のテフロン製の長さ100 mm のプラズマチューブを製作し、大気圧・室温の下で放電を行った。なお、プラズマチューブの外壁及び内壁には幅5 mm の銅電極が3 mm 及び4 mm の間隔で交互に螺旋状に巻きつけられており、電極角度は45°である。流れのない状態で管中央底部に30 nm のアルミナ粒子を静置し、±14 kV 程度の電圧を1 kHz の正弦波で印加すると、管内微粒子は静電気力により攪拌されながら管軸方向にプラズマアクトチュエータ効果により搬送される。

図2に14.3 kVpp を1 kHz でパルス状に印加した際の数値計算により得られたプラズマチューブ内の電界強度分布及び微粒子の軌道を示す。なお、粒子の初期導入位置 $r_i$ は、管入口の $r_i=4$  mm,  $\theta_i=30^\circ$ である。粒子径が50 nm 及び1  $\mu\text{m}$  の場合では、静電気力により電極間において電界の向きに応じて半径方向に振動しつつ、誘起流により軸方向に搬送される。一方、10  $\mu\text{m}$  の場合では、慣性力が大きいいため振幅がより大きく、静電気力の小さな領域では、重力により鉛直下向きに下降しながら軸方向に搬送される。また、振幅は電界強度の高い壁面近傍においてより大きい。

図3にプラズマチューブ出口における粒子速度を様々な粒径及び粒子の初期半径位置に対して示す。粒子の初期位置が管中心軸に近いほど管出口における粒子速度が高い。これは、管中心に近いほど主流域で粒子が加速されるためである。また、特に粒子の初期位置が壁面近傍( $r_i=4$  mm)の場合、0.4  $\mu\text{m}$  以下の粒子では、粒径が小さいほど粒子速度が高くなる。これは、粒径が小さくなると慣性が小さくなるため、誘起流により加速されることによる。一方、0.4  $\mu\text{m}$  以上の粒子に対して粒径の増加に伴って粒子速度が高くなるのは、粒径が大きいほど帯電量が大きく、また、慣性力が大きいため、静電気力による振幅が大きくなり、主流域に搬送されるようになるためである。

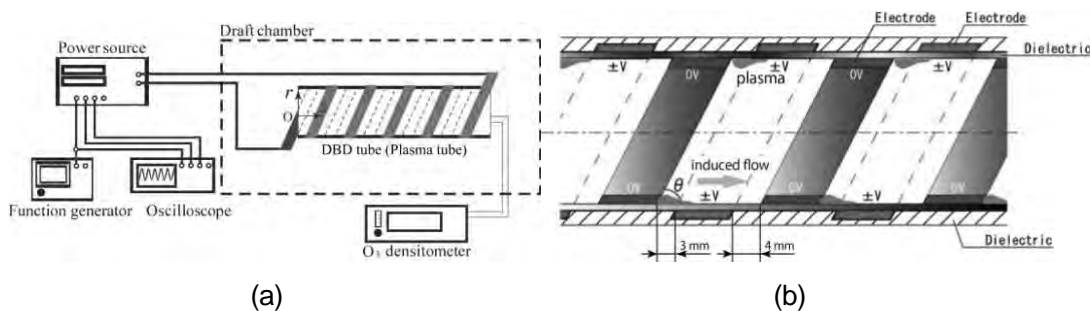


図 1 : (a) 実験装置の概略図, (b) プラズマチューブの断面図

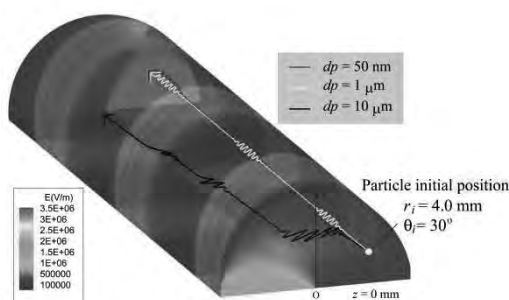


図 2 : プラズマチューブ内における微粒子軌跡

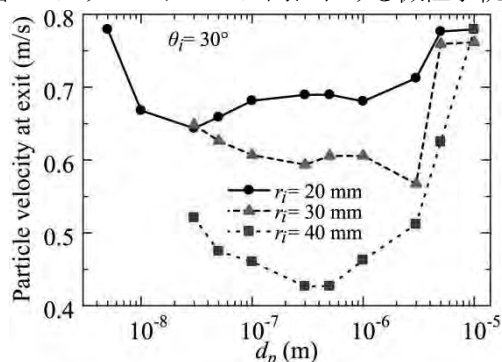


図 3 : 粒径に対する出口粒子速度

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)

東北大学側では, まず前年度に得られた計算結果の妥当性を検証すべく, 計算規模を拡大してその再現性を確認した. またアニーリングの方法を変化させてその再現性を検証した. その結果, どのようなアニーリング方法を用いてもアイオノマーの含水率が增加すると酸素透過性能は減少する結果が得られることが確認された. さらに今年度は同様の計算を炭化水素系膜で行うためのプログラムを作成した. 用いた炭化水素系膜を図 4 に示す. 炭化水素系膜は構成する原子数が多いため,

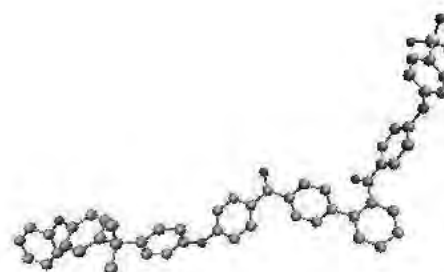


図 4: United Atom Model を用いた炭化水素系アイオノマーを構成する高分子

そのまま計算したのでは多大な計算時間を要する。そのため本研究では **United Atom Model** を導入して計算負荷の軽減を図った。この膜をアニーリングして白金に付着させ、アイオノマー内部の水分布などを計測した。

京都大学側では、昨年度担持カーボンとアイオノマーからなる複雑多孔質内部の電気化学反応と物質輸送の連成解析を行い、その複雑不均一構造が酸素・プロトン輸送に及ぼす影響を明らかにした。そして各白金点の反応量分布を評価し、電極構造と白金有効利用率の相関から、低白金化の指針として実構造の把握が極めて重要であることを把握して、そこで今年度は作成したアイオノマー被覆モデルを発展させ被覆成形シミュレータの開発を目指し、まずは基礎検討として細孔構造が大きい **PEFC** ガス拡散層のバインダー被覆シミュレータの開発を行った(図 5)。

実プロセスを対象とし多孔質体であるガス拡散層への塗布、含浸、乾燥を考慮した解析により、厚み方向の樹脂不均一偏析の形成メカニズムと、その構造がガス拡散性能に及ぼす影響を明らかにした(図 6)。今後は触媒層に適用して検証を行う予定である。

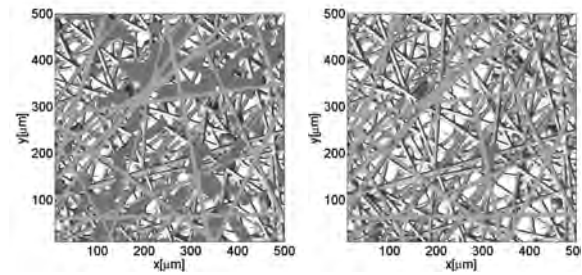


図 5: ガス拡散層内の樹脂偏析解析結果  
乾燥時相対湿度 (左) RH=5%, (右) RH=95%

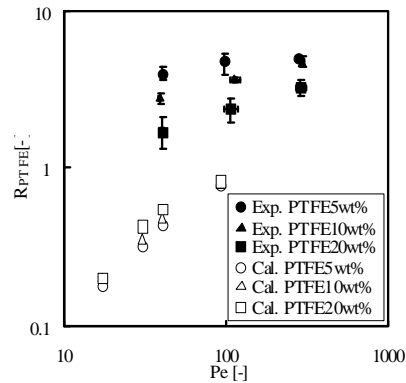


図 6: 触媒層構造と反応量分布の相関

#### 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 7)。

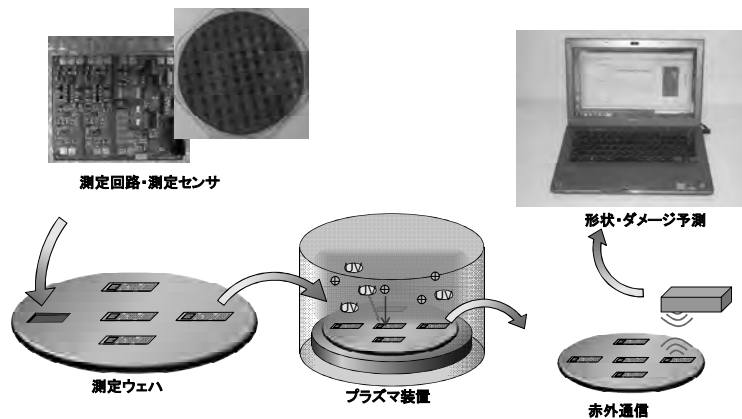


図 7: ワイヤレス・オンウェハモニタリング測定システム

ワイヤレス測定システムの実現のために、測定回路の改良を行った。適切なシールド方法、およびセンサから入力されるノイズから測定回路を保護するための方法を開発した。これら

の改良により、これまで開発してきた紫外光照射損傷センサ・チャージアップセンサ・シース形状センサについて、ワイヤレスでの測定を実現した。

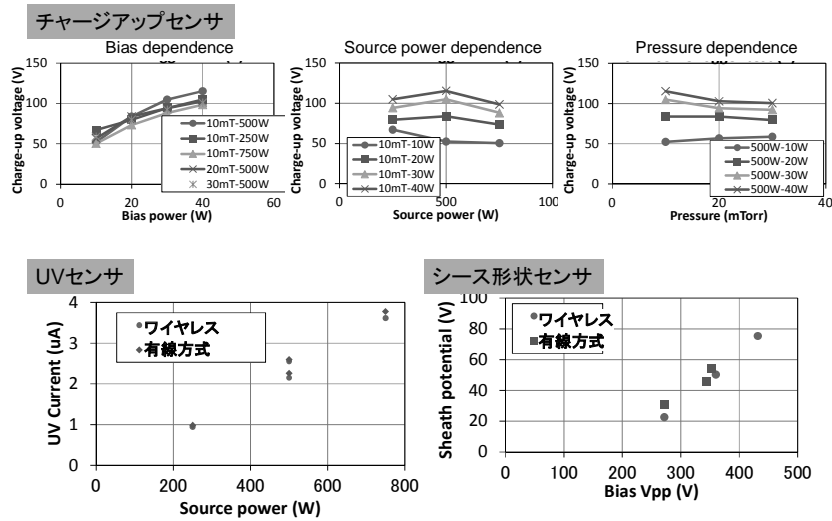


図 8 : ワイヤレス・オンウェハモニタリング測定システムによる測定結果

さらに、測定システムから得られる情報をもとにしたイオン軌道の予測についても改良を加えた。まず、シース形状センサから得られる情報をもとに、任意の3次元形状の周囲におけるシースのひずみを計算できるソフトウェアを開発した。このソフトウェアを用いて、シース形状センサの測定結果に基づいた予測を行い、その結果と実際のエッチング結果を比較した。エッチング結果を図 9、エッチング結果と予測結果の比較を図 10 に示す。図 9 を見ると、段差付近でエッチング形状が実際に傾いていることが分かる。図 10 を見ると、実験結果における傾きが正確に予測されていることが分かる。このことから、図 9 で見られる傾きはシース形状のゆがみによるものであること、センサ測定とシミュレーションの組み合わせによってエッチング形状異常が正しく予測できたことが分かる。

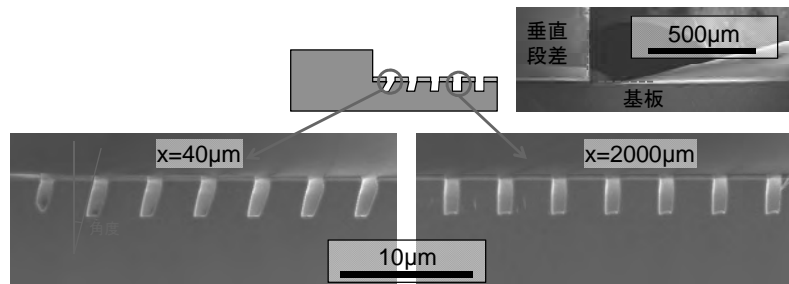


図 9 : 垂直段差を持つサンプルの塩素プラズマエッチングの結果



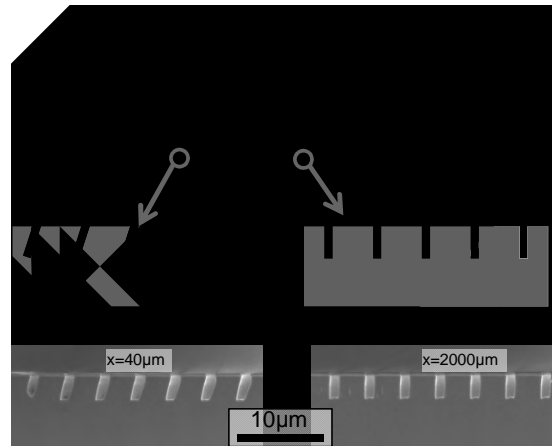


図 10：エッチング形状と予測形状との比較

### 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 プラズマチューブによる管内微粒子流動制御 (西山・高奈 G)  
 数値計算によりプラズマチューブ内の3次元電位分布を明らかにするとともに、粒子帯電を考慮した帯電微粒子軌道解析を行い、粒径が微粒子挙動に与える影響を詳細に解析することに成功したことから、本研究目標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)  
 今年度は昨年度の成果をさらに各研究室単位で発展させ、より詳細な現象の理解を行うことができ、さらにお互いの計算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)  
 今年度は、オンウェハモニタリングの実用性を高めるためのワイヤレス化を実証することができた。さらに、3次元形状の周囲ではシースのゆがみに起因するエッチング形状異常が生じることを実証し、定量的な形状予測も可能となった。従って、目標を十分に達成することができたと言える。

### 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 プラズマチューブによる管内微粒子流動制御（西山・高奈 G）

管内に誘電体バリア放電(DBD)発生機構を有するプラズマチューブに対し、数値モデルを構築し、3次元シミュレーションによりプラズマチューブの微粒子搬送特性を明らかにした。今後は、実験により本数値モデルの妥当性を評価するとともに、数値シミュレーションと実験との統合解析により、微粒子の攪拌・搬送のための最適条件を明らかにし、さらには、微粒子の浄化効果についても検討することが重要である。

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）

今後はお互いの計算結果の融合を視野に入れ、ナノスケール(分子動力学法)のシミュレーションで得られた酸素透過現象に関する知見のモデリングを行い、メソスケールのシミュレータに組み込む予定である。また遅れているプロトン輸送についても計算を行っていく予定である。

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）

今後、ワイヤレス測定システムの実用性を更に高めるため、ウェハー型の容器や薄型の回路などを開発することで真空搬送可能なシステムを目指す。また、シミュレーションをさらに発展させ、チャージアップやUV照射によるエッチング形状異常予測、さらにはエッチング形状の時間発展の予測も試みる。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。

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, Daisuke Tan: Integrated Computational Study of Ultra-High Heat Flux Cooling Using Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Spray, *Cryogenics*, Volume 52, Issue 10, October 2012, Pages 505-517. **(Top 25 Hottest Articles in *Cryogenics*, July to September 2012, 15th).**
- [2] Jun Ishimoto, Daisuke Tan, Hiroto Otake and Seiji Samukawa: Thermomechanical Resist Removal-Cleaning System Using Cryogenic Micro-Slush Jet, *Solid State Phenomena*, Vol. 187, (2012), pp. 145-148.
- [3] Kazuo MATSUURA, Masami NAKANO, Jun ISHIMOTO: Acceleration of hydrogen forced ventilation after leakage ceases in a partially open space, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, Issue 9, May 2012, Pages 7940-7949.
- [4] Kazuo MATSUURA, Masami NAKANO, Jun ISHIMOTO: Sensing-based risk mitigation control of hydrogen dispersion and accumulation in a partially open space with low-height openings by forced ventilation, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, Issue 2, January 2012, Pages 1972-1984.
- [5] U Oh, Jun Ishimoto, Naoki Harada and Daisuke Tan: ULTRA-COOLING HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS USING CRYOGENIC MICRO-SOLID NITROGEN SPRAY, *Proceedings of the ASME 2012 Summer Heat Transfer Conference*, July 8-12, 2012, Rio Grande, Puerto Rico, USA [in CD-ROM].
- [6] G. Inoue, N.Ishibe, Y.Matsukuma, M.Minemoto: Understanding mechanism of PTFE distribution in fibrous porous media, *ECS Trans.* (Honolulu) (2013) 50(2): 461-468 (8 page).

- [7] T. Tokumasu, A. Fukushima, T. Mabuchi and Y. Sugaya: Large-scale Molecular Dynamics Simulations for Analyses of Transport Phenomena in Polymer Electrolyte Fuel Cell, *Journal of Computational Chemistry, Japan*, (2013) 12(1): 8-15(8 page)
- [8] Tomohiro Kubota, Akira Wada, Yuuki Yanagisawa, Batnasan Altansukh, Kazuhiro Miwa, Takahito Ono, and Seiji Samukawa: 3-Dimensional and Defect-free Etching by Neutral Beam for MEMS Applications, *2012 International Conference on Solid State Devices and Materials*, Kyoto, (2012), pp. 935-936.
- [9] Yuuki Yanagisawa, Tomohiro Kubota, Batnasan Altansukh, Kazuhiro Miwa, and Seiji Samukawa: 3-Dimensional and defect-free neutral beam etching for MEMS applications, *AVS 59th International Symposium and Exhibition*, Tampa, (2012), p. 216.
- [10] Akira Wada, Tomohiro Kubota, Yuuki Yanagisawa, Batnasan Altansukh, Kazuhiro Miwa, Takahito Ono, and Seiji Samukawa: 3-Dimensional and Damage-Free Neutral Beam Etching for MEMS Application, *IEEE Sensors 2012 Conference*, Taipei, (2012), B3P-J7

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Jun Ishimoto: Supercomputing approach of flotsam mixed tsunami in narrow region, *International Innovation Workshop on Off Shore Tsunami Energy Dissipation and Peak Height Alleviation*, September 10-12, 2012, Tohoku University, Sendai, Japan **(Invited)**.
- [2] Jun Ishimoto: Innovative Nano-Device Cleaning Technology Using Cryogenic Spray Flow of Micro-Solid Nitrogen, *Painting Technology Workshop (PTW2012)*, October 30-31st, 2012, Lexington, Kentucky, USA **(Invited)**.
- [3] Jun Ishimoto: Thermomechanical Resist Removal - Cleaning Technology Using Cryogenic Micro - Nano Solid Nitrogen Spray, *Center for High-rate Nanomanufacturing Fall Seminar Series*, November 16<sup>th</sup>, 2012, College of Engineering, Northeastern University, Boston, USA **(Invited)**.
- [4] U Oh, Naoki Harada and Jun Ishimoto: Innovative Wafer Resist Removal-Cleaning Technology by Using Smart Cryogenic Spray Flow of Solid Nitrogen, *Technical Congress of Progress and Innovation for Smart Materials and Related Technology (PI-SMART)*, April 24 2012, Hirosaki, Japan [in CD-ROM].
- [5] Naoya Ochiai, Yuka Iga, Motohiko Nohmi, Toshiaki Ikohagi, Jun Ishimoto and Kozo Saito: Numerical Prediction of Cavitation Erosion Using a Coupled Analysis of Cavitating Flow Field and Bubbles, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 50-51.
- [6] U Oh, Jun Ishimoto and Jin-Goo Park: Thermomechanical Nano Device Resist Removal-Cleaning Technology by Using Cryogenic Spray Flow of Solid Nitrogen, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2012), pp. 114-115.
- [7] G. Inoue, Nishibe, Y.Matsukuma, M.Minemoto: Understanding mechanism of PTFE distribution in fibrous porous media, *222<sup>th</sup> ECS meeting (PRiME2012)* (Honolulu), (2012), B12-1627 (1page).

- [8] 王 宇 (東北大), 原田 直樹 (名古屋大), 石本 淳 (東北大): 微細固体窒素スプレーを用いたウエハレジストはく離-洗浄特性に関する研究, 混相流学会年会講演会 2012 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). [2012年 8月 9-11日, (東京大学 柏キャンパス)]
- [9] 石部直之, 井上元: 繊維状多孔質電極内の樹脂偏析機構の解明, 第 49 回日本伝熱シンポジウム講演論文, (富山), (2012), (2page).
- [10] 菅谷悠太, 徳増崇: PEFC カソード側触媒層 ionomer における酸素分子透過に関する分子論的研究, 第 26 回数値流体力学シンポジウム講演予稿集, (2012), E02-4 (1page).
- [11] 柳沢優希, 和田章良, 荒木良亮, 久保田智広, 寒川誠二: 中性粒子ビームを用いた 3 次元 MEMS 構造の無損傷エッチング, 2012 年秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会, (2012), 13a-F7-2.
- [12] 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プロセスダメージ・形状予測, 第 60 回 応用物理学会春季学術講演会, (2013), 27p-A3-4.

### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

- [1] 高奈秀匡, 篠原圭介, 西山秀哉, 「微粒子搬送装置及びこの装置を用いた微粒子の浄化方法」, 特開 2012-91925, (2012 年 5 月 17 日)
- [2] 特許出願名称: 極低温マイクロスラッシュ生成システム  
 発明者: 石本淳  
 出願番号: 2006-170710  
 公開番号: 2008-002715  
 出願日: 2006 年 06 月 20 日  
 公開日: 2008 年 01 月 10 日  
**登録日: 2012 年 04 月 06 日**
- [3] 津波、建物ごとに予測 — 東北大 発電所や工場、模擬実験 —  
 掲載日: 2013 年 1 月 24 日 日経産業新聞 11 ページ