



東北大学

**平成 26 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 2014  
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 26 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、104 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 27 年 11 月

東北大学流体科学研究所長  
大林 茂



# 目 次

## 1. 平成 26 年度流体科学研究拠点活動のまとめ

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

## 2. 研究成果報告書

<一般公募共同研究>

J14001	Investigation of a Novel Magnetorheological Shear Thickening Fluid Li Weihua( University of Wollongong)、中野 政身( 東北大学)	7
J14002	メカノクロミズム金属錯体を用いたスペースデブリ 空気漏れ穴の表示システムの検討 榎原 幹十朗( 東北大学工学研究科)、大谷 清伸( 東北大学)	9
J14003	予混合火炎の固有不安定性に及ぼす中間生成物の影響 門脇 敏( 長岡技術科学大学)、小林 秀昭( 東北大学)	11
J14004	航空分野における流体シミュレーション結果の比較可視化 伊藤 貴之( お茶の水女子大学)、大林 茂( 東北大学)	13
J14005	飛翔体の空力性能改善に関する研究 長谷川 裕晃( 秋田大学)、大林 茂( 東北大学)	15
J14006	節足動物の運動器官と運動機能に関する工学的研究 須藤 誠一( 秋田県立大学)、早瀬 敏幸( 東北大学)	17
J14007	微量磁性流体の磁気界面不安定性 須藤 誠一( 秋田県立大学)、西山 秀哉( 東北大学)	19
J14008	電磁非破壊検査方法に基づいた塑性変形の評価 陳 振茂( 西安交通大学)、高木 敏行( 東北大学)	21
J14009	空隙媒体による水中爆発の減衰と軽減効果について 北川 一敬( 愛知工業大学)、大谷 清伸( 東北大学)	23
J14010	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( 九州大学)、寒川 誠二( 東北大学)	25
J14011	水および液体窒素の高圧環境下における噴霧特性の研究 渡邊 力夫( 東京都市大学)、小林 秀昭( 東北大学)	27
J14012	高機能ハイブリッドプラズマ流動システムを用いた液相微粒子プロセス 西山 秀哉( 東北大学)、Oleg P. Solonenko( ロシア科学アカデミーシベリア支部)	29
J14013	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)	31
J14014	Development of a Micro-Motor for MEMS Utilizing Smart Polymer Fabricated by Photolithography 中野 政身( 東北大学)、Mikóls Zrínyi( Semmelweis University)	33
J14015	ホールトン現象の低減化制御に関する研究 中野 政身( 東北大学)、松浦 一雄( 愛媛大学)	35
J14016	コルゲート管を流動する気液二相液体窒素の圧力損失特性 大平 勝秀( 東北大学)、小林 弘明( JAXA)	37

J14017	準地衡風乱流における高エネルギー(負温度)領域での渦の動力学	39
	高橋 直也(東京電機大学)、服部 裕司(東北大学)	
J14018	Investigation of Shock Waves Propagation on Microscales	41
	Bonder Yevgeniy( SB RAS)、丸田 薫(東北大学)	
J14019	Numerical Studies of Rarefied Chemically Reacting Flows about Space Vehicles	43
	Bonder Yevgeniy( SB RAS)、米村 茂(東北大学)	
J14020	Investigation of Subsonic-Supersonic Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc with Inhomogeneous Mixing of Plasma Species	45
	Jiří Jeništa( Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i.)、西山 秀哉(東北大学)	
J14021	移動物体周りの非正常流体現象予測の高度化のための研究	47
	大林 茂(東北大学)、高橋 俊(東海大学)	
J14022	センシングに基づく漏洩水素の動的強制ベント制御に関する研究	49
	松浦 一雄(愛媛大学)、中野 政身(東北大学)	
J14023	超高効率太陽電池用量子ドット構造のバンド構造と光学的性質	51
	福山 敦彦(宮崎大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J14024	The Continuous Spectrum in the Moore Sa man Tsai Widnall Instability	53
	Stefan Llewellyn Smith( University of California, San Diego)、服部 裕司(東北大学)	
J14025	ナノ構造体を用いた量子効果の発現とその応用に関する研究	55
	高橋 庸夫(北海道大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J14026	The Theoretical Modes of the Wake Flow of Road Vehicles	57
	Chenguang Lai( Chongqing University of Technology)、大林 茂(東北大学)	
J14027	Kinetic Modeling of Energy Transfer in Non-Equilibrium Nanosecond Pulse Discharges in Air and Fuel-Air Mixtures	59
	高奈 秀匡(東北大学)、Igor Admovich( The Ohio State University)	
J14028	常温圧縮せん断法を用いたTi/Al複合材料の固化成形	61
	中山 昇(信州大学)、高木 敏行(東北大学)	
J14029	タンパク質のシグナル配列の物理化学的性質と細胞内小器官への輸送に関する研究	63
	池田 有理(明治大学)、太田 信(東北大学)	
J14030	風力エネルギー高度利用のための電磁エネルギー変換装置の開発	65
	岩本 悠宏(同志社大学)、高奈 秀匡(東北大学)	
J14031	Numerical and Experimental Research on Active Control of Self-Sustained Flow Oscillations with Sound Interaction	67
	Mikael Langthjem(山形大学)、中野 政身(東北大学)	
J14032	非定常現象を伴う航空宇宙機に対する設計情報学の拡張	69
	千葉 一永(北海道工業大学)、大林 茂(東北大学)	
J14033	伝熱面内の熱移動制御による高性能核沸騰伝熱面の開発	71
	宮田 一司(九州大学)、太平 勝秀(東北大学)	
J14034	Energy Release Dynamics in Porous Media	73
	Nickolay Lutsenko( Far Eastern Federal University)、丸田 薫(東北大学)	
J14035	次世代型太陽電池に向けた量子ドット3次元構造の光応答制御	75
	喜多 隆(神戸大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J14036	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	77
	田中 克史(京都工芸繊維大学)、中野 政身(東北大学)	
J14037	Ignition Studies of Gaseous Pre-mixtures in Turbulent Flow	79
	Roman Fursenko( SB RAS)、丸田 薫(東北大学)	

J14038	しゅう動面における Me-DLC 由来軟質金属層の諸物性と摩擦・摩耗特性に関する研究	81
	後藤 実(宇部工業高等専門学校)、高木 敏行(東北大学)	
J14039	歪み Ge-on-Insulator 基板の作製とデバイス応用	83
	澤野 憲太郎(東京都市大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J14040	乱流中の渦の複雑な時空間構造の解析	85
	石原 卓(名古屋大学)、服部 裕司(東北大学)	
J14041	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	87
	石本 淳(東北大学)、Kozo Saito(University of Kentucky)	
J14042	反応性混相流の活用によるナノデバイスクリーニング	89
	石本 淳(東北大学)、Jin-Goo Park(韓国漢陽大学)	
J14044	磁気刺激による生体アクチュエーションに関する研究	91
	森 仁(株式会社 IFG)、高木 敏行(東北大学)	
J14045	Numerical Study of Thermal and Chemical Non-Equilibrium Effects in Near-Continuum Hypersonic Flows	93
	Georgy Shoen( ITAM SB RAS)、米村 茂(東北大学)	
J14046	Elucidation of Mechanisms of the Frictional Characteristics of Erythrocytes under Inclined Centrifugal Force	95
	船本 健一(東北大学)、Luca Brandt(スウェーデン王立工科大学 (KTH))	
J14047	Improvement of Numerical Scheme and Theory for Kinetic Force Method	97
	Vladimir Saveliev( NCSRT)、米村 茂(東北大学)	
J14048	流体科学と材料科学に関する東北大学・KTH 国際ワークショップ	99
	早瀬 敏幸(東北大学)、Fredrik Lundell(スウェーデン王立工科大学 (KTH))	
J14049	バリステックレンジへ適用可能な感圧塗料技術の開発	101
	沼田 大樹(東北大学工学研究科)、大谷 清伸(東北大学)	
J14050	Generation and Transport of Chemical Species in Low-Temperature Atmospheric Plasma for Sanitization Device	103
	Tetsuji Shimizu( terraplasma GmbH)、佐藤 岳彦(東北大学)	
J14051	Advanced LES of Aircraft Wake Vortices	105
	大林 茂(東北大学)、Thomas Gerz( DLR)	
J14052	Study of Thin Films and Ribbons of Heusler Alloys for the Use in Energy Saving Magnetic Refrigeration Technology	107
	Vladimir Khovaylo( National University of Science and Technology "MISIS")、高木 敏行(東北大学)	
J14053	応力を受けたステンレスの局所磁気特性解析	109
	山口 克彦(福島大学)、高木 敏行(東北大学)	
J14054	Physical Insight into Mach Reflection Transition and its Hysteresis in Axisymmetric Intakes in Continuum and Rarefied Conditions for High-Speed Airbreathing Engines	111
	Hideaki Ogawa( RMIT University)、大谷 清伸(東北大学)	
J14055	Effects of Temporal and Spatial Oxygen Heterogeneity on Cell Processes	113
	船本 健一(東北大学)、Roger D. Kamm( Massachusetts Institute of Technology)	
J14056	空間的せん断応力勾配環境下における血管内皮細胞の力学応答	115
	吉野 大輔(東北大学)、坂元 尚哉(川崎医療福祉大学)	
J14057	グラフェンのキャリア伝導機構におけるグラフェンエッジの効果解明	117
	増淵 覚(東京大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J14058	プラズマ流による気泡生成機構に関する研究	119
	佐藤 岳彦(東北大学)、中谷 達行(岡山理科大学)	
J14059	閉空間キャビティ内自然対流の不安定性解析	121
	小宮 敦樹(東北大学)、Daniel Henry( Ecole Centorale de Lyon)	

J14060	波のエネルギーに基づく軸流を持つ渦の安定性解析とその応用……………	123
	服部 裕司( 東北大学)、福本 康秀( 九州大学)	
J14061	バイオテンプレート 法による大面積2 次元高密度および分散型ナノ粒子エッチングマスクの実現…	125
	山下一郎( 奈良先端科学技術大学)、寒川 誠二( 東北大学)	
J14062	<b>Flammability Limits of Low-Lewis-Number Premixed Flames</b> ……………	127
	<b>Sergey Minaev( Far Eastern Federal University)</b> 、丸田 薫( 東北大学)	
J14063	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……………	129
	藤村 茂( 東北薬科大学)、佐藤 岳彦( 東北大学)	
J14064	<b>MR 計測融合血流シミュレーションの脳血管障害診療への応用</b> ……………	131
	杉山 慎一郎( 広南病院)、船本 健一( 東北大学)	
J14065	頸部頸動脈狭窄における血行動態の解析……………	133
	杉山 慎一郎( 広南病院)、太田 信( 東北大学)	
J14066	新力天秤を用いたサイレント 超音速複葉翼モデルの空力特性……………	135
	川添 博光( 鳥取大学)、大林 茂( 東北大学)	
J14067	2 波長マッハツェンダー干渉法によるプリカーサ現象の解明……………	137
	川添 博光( 鳥取大学)、大林 茂( 東北大学)	
J14068	<b>Cavity Formation Mechanism in a Cavitation Process</b> ……………	139
	佐藤 岳彦( 東北大学)、 <b>Mohamed Farhat( Ecole Polytechnique Federale de Lausanne)</b>	
J14069	腸骨内の骨髄流れの数値流体モデルの構築……………	141
	中山 敏男( 東北大学)、太田 信( 東北大学)	
J14072	次世代高温センサ研究会 (フェーズ2) ……………	143
	内一 哲哉( 東北大学)、坂本 敏昭( インテリジェントコスモス研究機構)	
J14073	大気環境におけるふく射エネルギー評価とその解析……………	145
	圓山 重直( 東北大学)、山田 昇( 長岡技術科学大学)	
J14074	<b>Measurement of Diffusion Coefficient Through Artificial Micro and Nanopores</b> ……………	147
	<b>Gary Rosengarten( RMIT University)</b> 、小宮 敦樹( 東北大学)	
J14075	ナノ構造化表面・液体間の熱抵抗……………	149
	小原 拓( 東北大学)、芝原 正彦( 大阪大学)	
J14076	柔いフィンの流体励起振動に関する研究……………	151
	李鹿 輝( 山形大学)、中野 政身( 東北大学)	
J14077	自然環境中の大規模非定常高速流体现象の定量的可視化計測法……………	153
	水書 稔治( 東海大学)、大林 茂( 東北大学)	
J14078	小型航空機の空力性能向上に関する研究……………	155
	佐々木 大輔( 金沢工業大学)、下山 幸治( 東北大学)	
J14079	複雑媒体における複合伝熱解析……………	157
	圓山 重直( 東北大学)、 <b>Subhash Chandra Mishra( Indian Institute of Technology Guwahati)</b>	
J14080	ふく射特性制御膜の計測に関する研究……………	159
	圓山 重直( 東北大学)、 <b>Rodolphe Vaillon( INSA de Lyon)</b>	
J14081	温熱治療における局所加熱法の理論的・実験的研究……………	161
	圓山 重直( 東北大学)、 <b>Victoria Timchenko( The University of New South Wales)</b>	
J14082	中性粒子ビームプロセスによる高性能高移動度 MOSトランジスタに関する研究 ……………	163
	遠藤 和彦( 産業技術総合研究所)、寒川 誠二( 東北大学)	
J14083	革新型旅客輸送機に用いる主翼空力形状設計……………	165
	金崎 雅博( 首都大学東京)、大林 茂( 東北大学)	

J14087	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……………	167
	福島 修一郎(大阪大学)、船本 健一(東北大学)	
J14088	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……………	169
	足立 高弘(秋田大学)、岡島 淳之介(東北大学)	
J14089	計算と実験の融合によるプラズマ表面反応解析……………	171
	浜口 智志(大阪大学)、寒川 誠二(東北大学)	
J14090	コロイド磁気粘性流体の粒子構造形成と磁気粘性効果……………	173
	阿部 浩也(大阪大学)、中野 政身(東北大学)	
J14091	<b>Numerical Simulation for Reducing Future Tsunami Damage</b> ……………	175
	大林 茂(東北大学)、Fumiya Togashi( Applied Simulations Inc.)	
J14092	心電計と超音波を融合したマウス胎仔心機能評価……………	177
	杉林 里佳(国立成育医療研究センター)、船本 健一(東北大学)	
J14093	<b>SiC</b> 基板成膜プロセスの量子・分子論的解析 ……………	179
	徳増 崇(東北大学)、須藤 理枝子( 樹さがみはら産業創造センター)	
J14094	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……………	181
	徳増 崇(東北大学)、杵淵 郁也(東京大学)	
J14095	<b>Transport Phenomena of Nanoscale Water Droplet in a Nano Pore</b> ……………	183
	徳増 崇(東北大学)、Philippe Vergne( INSA de Lyon)	
J14096	<b>Transport Phenomena of Substances in Electrolyte of Solid Oxide Fuel Cell</b> ……………	185
	徳増 崇(東北大学)、Jeongmin Ahn( Syracuse University)	
J14097	分子動力学法を用いた水素の相転移現象に対する量子効果の影響解析……………	187
	徳増 崇(東北大学)、坪井 伸幸(九州工業大学)	
J14098	水中におけるストリーマ進展機構……………	189
	佐藤 岳彦(東北大学)、金澤 誠司(大分大学)	
J14099	<b>LBM</b> を用いた血流と細胞挙動の相互作用解明プログラムの開発 ……………	191
	太田 信(東北大学)、Bastien Chopard( Geneva University)	
J14100	セルロースを用いた新しいスマートマテリアルの開発……………	193
	太田 信(東北大学)、Fredrik Lundell( スウェーデン王立工科大学 (KTH))	
J14101	生体複合組織モデルの摩擦およびドリリングに関する研究……………	195
	太田 信(東北大学)、Philippe Kasp( Ecole Centrale de Lyon)	
J14103	大気圧プラズマ流によるウィルスの不活化特性……………	197
	佐藤 岳彦(東北大学)、押谷 仁(東北大学)	
< 萌芽公募共同研究 >		
J14H001	羽ばたき飛行実用化に向けた影響因子の最適化……………	199
	石出 忠輝(木更津工業高等専門学校)、大林 茂(東北大学)	
J14H002	極低温微細固体窒素粒子を用いた環境にやさしいレジスト除去技術……………	201
	堀邊 英夫(大阪市立大学)、石本 淳(東北大学)	
J14H003	<b>2</b> 次元キャビティ流れのホップ分岐……………	203
	岩津 玲磨(東京電機大学)、服部 裕司(東北大学)	
J14H004	タンパク質の糖鎖修飾における糖転移酵素の空間的認識に関する研究……………	205
	池田(向井) 有理(明治大学)、太田 信(東北大学)	
J14H005	旋回流プラズマジェットによる熱プラズマ微粒子形成プロセスの最適化……………	207
	安藤 康高(足利工業大学)、西山 秀哉(東北大学)	



<連携公募共同研究プロジェクト>

- J14R01** 漂流物混入型津波に関するスーパーコンピューティングとスケールモデリング…………… 209  
石本 淳( 東北大学)、今村 文彦( 東北大学災害科学国際研究所)、  
**Kozo Saito( University of Kentucky)**、**Jean-Yves Cavaille( INSA de Lyon)**
- J14R02** 先進的医用超音波イメージングに関する研究…………… 219  
橋本 浩( GEヘルシケアジャパン)、船本 健一( 東北大学)、田邊 将之( 熊本大学)
- J14R03** 省エネルギーのための知的層材料・層構造に関する国際共同研究…………… 223  
高木 敏行( 東北大学)、**Jean-Yves Cavaille( INSA de Lyon)**、  
**Christian Boller( Fraunhofer Institute for NDT)**、**Jinhao Qiu( 南京航空航天大学)**、  
**Julien Fontaine( Ecole Centrale de Lyon)**、**Kohl Manfred( Karlsruhe Institute of Technology)**、  
**Henrik Alfredsson( KTH Royal Institute of Technology)**

## 1. 平成 26 年度流体科学研究拠点活動のまとめ

### 1.1 概要

流体科学研究拠点では、公募共同研究の実施にあたり、関連学会内における専門性および国際性の観点から選任した外部委員を過半数含む共同研究委員会を設置している。研究者コミュニティの意向と関連研究分野の動向を反映させながら公募共同研究の実施方法を決定し、1) エアロスペース、2) エネルギー、3) ライフサイエンス、4) ナノ・マイクロ、5) 基盤研究の 5 分野における流体科学に関わる国内外研究者との一般公募共同研究を実施した。

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

平成 25 年度より本研究所所属の研究者と本研究所以外の複数の研究機関の研究者が行う連携公募共同研究が開始された。さらに、平成 26 年度からは、これまで本研究所との共同研究実績はないが、本研究所の研究者との共同研究や、共同研究の前段階の議論を希望されている国内の研究者をサポートする萌芽公募共同研究が開始された。

平成 26 年度の公募共同研究は、平成 26 年 4 月 1 日から平成 27 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 25 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 26 年 10 月に、公募共同研究成果報告会、平成 26 年 11 月に運営委員会、共同研究委員会が開催された。

### 1.2 公募共同研究成果報告会

平成 26 年 10 月 9 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-2014 において仙台国際センターにて開催した。本報告会では 96 件（連携公募共同研究プロジェクト 2 件、萌芽公募共同研究 5 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、133 人の出席者

があった（写真 1、2）。

発表は全て英語で行われ、海外からの共同研究者も交えて活発な議論が行われた。



写真 1：ショートプレゼンテーションの様子



写真 2：ポスターセッションの様子

### 1.3 流体科学データベース

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

表 1：流体科学データベースへの登録件数とアクセス数

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度
公募共同研究成果の登録数	16	32	42	47	54	60
登録済みデータ総数	458	478	488	493	500	516
流体科学データベースへの アクセス件数	10,040	12,123	10,815	8,591	7,587	6818

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

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

#### 1.5 公募共同研究実施状況

##### 1) 申請・採択状況

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

表 2：一般公募共同研究の申請・採択状況

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

\*取り下げ

表 3：分野横断プロジェクト申請・採択状況

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

表 4：連携公募共同研究プロジェクトおよび萌芽公募共同研究の申請・採択状況

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

## 2) 研究者の受け入れ状況

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

表 5：研究者の受け入れ状況

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

### 3) 研究費

本公募共同研究にて使用した研究費の内訳を表 6 に示す。

表 6：研究費の内訳

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

#### 1.6 研究成果の発表件数

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

表 7：研究成果の発表件数

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度
学術雑誌 (査読つき国際会議、 解説等を含む)	51	84	88	88	139	109
国際会議、国内会議、研究会、 口頭発表等	152	198	291	304	457	374
その他 (特許・受賞・マスコ ミ発表等)	5	19	11	22	28	14
合計 (件)	208	301	390	414	624	497



## 2. 研究成果報告書 ＜一般公募共同研究＞

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





Project code	J14001
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamental
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	3rd 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

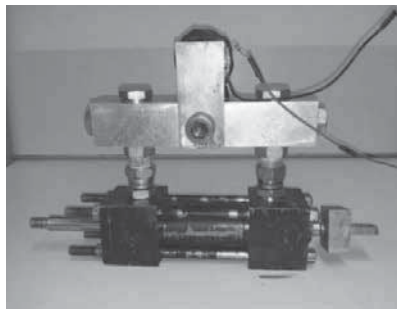
†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

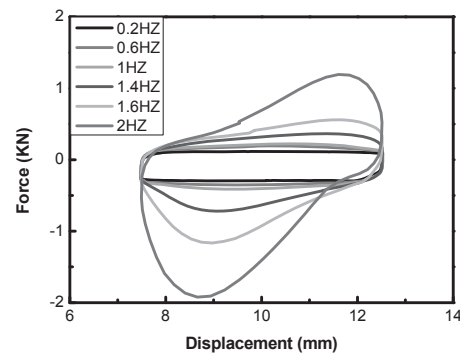
The objective of this project is to develop smart or intelligent devices working with MR shear thickening fluids and MR elastomers. Two novel devices, including a linear MR shear thickening fluid damper and a multi-layer MRE isolator, were designed and prototyped. Their performance under both static and dynamic loading conditions was experimentally evaluated. The research will lead to new applications of MR technology.

### 2. Details of program implement

We designed and prototyped a linear MRSTF damper, as shown in Figure 1a, with a double-ended structure. The damper is filled with 20% and 80% weight fraction of STF and its performance was tested with a MTS machine. As shown in Figure 1b, when the excitation frequencies are relatively small such as 0.2Hz, 0.6Hz, and 1Hz, the hysteresis shape is more like a parallelogram which is similar to the traditional MR damper performance, however, the hysteresis loops tend to be irregular with some bending or pinching when the frequency grows gradually. The increase of the excitation frequency increases obviously the peak force and the effective stiffness which is indicated by the effective slope of the main-axis loop.



(a) MRSTF damper prototype



(b) MRSTF damper performance

Figure 1 : Prototype of the linear MRSTF damper and its performance.

### 3. Achievements

In the third year, two novel smart devices, MRSTF damper and MRE isolator, were designed and prototyped. Their mechanical properties were investigated through both experimental and modelling approaches. The research has led to three journal articles. One journal paper was submitted and under review. Partial of the research work was presented in the 14<sup>th</sup> International Conference on ER Fluids and MR Suspensions, which was held in Granada, Spain in July 2014.

#### 4. Summaries and future plans

Summaries: We have been doing excellent collaborative research for the past three years. We did pioneering work in fabricating and characterizing MR shear thickening fluids. We also expanded our research to novel MR elastomers and their applications. This collaborative research has obtained excellent achievements, including: (a) a total of 8 peer-reviewed journal articles and 8 conferences papers were published; (b) two PhD students have got excellent joint-supervision through this collaborative research project; (c) Prof. Weihua Li was awarded a prestigious JSPS Invitation Fellowship. He worked at IFS a visiting professor in 2012, 2013, and 2014; and (d) Both Prof. Weihua Li and Prof. Masami Nakano won research funding to continue their MR research.

Future plans: Both Prof. Weihua Li and Prof. Masami Nakano would maintain or enhance their research collaboration in the MR research field. They submitted a proposal, entitled "Development of novel multi-layer magnetorheological elastomer isolators", to IFS to seek support in developing novel multi-layer MRE isolators for seismic control. The proposed collaborative research will lead to a new research direction in smart base isolation. The achievements from this project will be published in top international journals and significant international conferences, and the intellectual property will be filed with patents.

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

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

- \*[1] G.R. Peng, W.H. Li, T.F. Tian, J. Ding and M. Nakano: Experimental and modeling study of viscoelastic behaviors of magneto-rheological shear thickening fluids, *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol.26, No.2, (2014), pp.149-158.
- [2] W.H. Li, M. Nakano, T.F. Tian, A. Totsuka and C. Sato: Viscoelastic properties of MR shear thickening fluids, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.9, No.2, (2014), 14-00059 (8 pages).
- [3] T.F. Tian, G.R. Peng, W.H. Li, J. Ding and M. Nakano: Experimental and modelling study of the effect of temperature on shear thickening fluids, *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol.27, No.1, (2015), pp.17-24.
- [4] S. Sun, H. Deng, J. Yan, W.H. Li, H. Du, G. Alici, and M. Nakano: An adaptive tuned vibration absorber based on multilayered MR elastomers, *Smart Materials and Structures*, Vol.24, No.4, (2015), 045045 (13 pages).
- [5] J. Yang, S. Sun, W.H. Li, H. Du, G. Alici, and M. Nakano: Development of a linear damper working with magnetorheological shear thickening fluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, in press, doi: 10.1177/1045389X15577653 (7 pages).

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

- [6] J. Yang, S. Sun, W.H. Li and M. Nakano: Development of a novel multi-layer MRE isolator, *Proc. of the 11th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2014)*, (Oct. 8-10, 2014), Sendai, Miyagi, Japan, Paper ID: OS9-1, pp.390-391.
- [7] T.F. Tian, G.R. Peng, W.H. Li and M. Nakano: Creep and Recovery Behaviours of MR Shear Thickening Fluids, *Proc. of the 11th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2014)*, (Oct. 8-10, 2014), Sendai, Miyagi, Japan, Paper ID: OS9-2, pp.392-393.
- \*[8] G.R. Peng, W.H. Li, T.F. Tian, M. Nakano: Rheology of MR Shear Thickening Fluids under Instantaneous Flow, *Proc. of the 14th Int. Symp. on Advanced Fluid Information (AFI-2014)*, (Oct. 9, 2014), Sendai Japan, pp.164-165.

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

Not applicable.

課題番号	J14002
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	2年目

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

榎原 幹十朗\*†, 大谷 清伸\*\*††

長谷川 美貴\*\*\*, 松本 紀彦\*, 山口 将史\*\*\*, 後藤 直人\*\*\*, 土屋 佑斗\*\*\*

\*東北大学工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*青山学院大学理工学部

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

スペースデブリが宇宙ステーションなどの有人宇宙施設に衝突し与圧壁に貫通穴が生じれば、空気漏れが起こる。スペースクルーは早急に貫通穴を発見し対処する必要があるが、衝撃によって電気系統がダウンし、既存の PC を使った位置同定手法は使えない可能性が高い。そこで、暗闇でも貫通穴を認識できる位置表示手法が求められる。これまで、デブリ防護に念頭を置いた研究は多数存在するが、貫通穴が生じることを前提とし、修復に着目した研究は殆ど無い。本研究では、急激な温度・圧力上昇をトリガーにして長時間発光・蓄光するメカノクロミズム金属錯体を与圧壁内側に塗布することで、暗闇でも衝突貫通穴の周りを長時間発光させ続けるシステムを構築することを研究目的とする。

2. 研究成果の内容

- (1) 光化学物質と接着物質を混ぜ合わせる。宇宙ステーションの Whipple bumper を模擬したアルミ標的板の二枚目に塗る。計測装置を設置した後、実際に超高速衝突実験を行った。本研究では、衝突貫通穴周辺に塗料物質が残っていることを設計目標とし、衝突中心そのものの裏面の塗料物質の剥落・飛散は許容する方針を取った。
- (2) 光化学物質を塗布したバンパーを用いて、発光実験も行った。衝突前後の変化から、光化学発光物質の発光が確認された。複数回確認されたので、発光現象の再現性があると考えている。高速衝突後に発光体に化学変化を起こしたことが目視で確認でき、デジタルデータとしても捉えられている。(投稿論文の公表準備に付き、データ図表を掲載しない)。
- (3) 新規の光学的測定方法(光ファイバーと分光器)の技術を確立した。発光現象をリアルタイムに計測する試みを行った。図1に示すように、真空チャンバー内に光ファイバー等を設置し、真空中であっても分光器を用いて計測する高度な観測技術にも取り組んだ。図2に示すように、設置時に光化学反応が起こらないように、暗幕フードで覆うなどの工夫も施した。超高速実験では、実験中にデータ保存装置がフリーズする不具合トラブルにも見舞われた。フリーズが原因か発光量が少ないのが原因かは不明であるが、光スペクトルをデータに取り込むことが出来なかったため、定量的なデータが得られなかった。

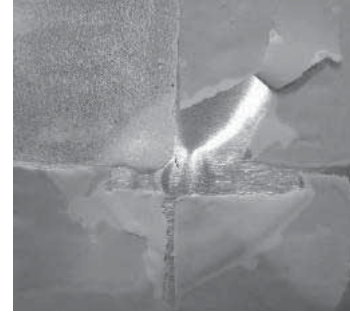


図1：光ファイバーによる計測 図2：設置時にフードで覆う 図3：衝突後の試料剥がれ

### 3. 研究目標の達成状況

高速衝突実験に於いて、発光物質の発光が確認された。複数回の実験で確認されたので、高い再現性をもって成功したと考えている。研究目的の第一歩目は達成できた。光化学物質を取り扱う企業とも連携しながら、光化学物質を創生し、多様な衝突実験を行う準備が出来ている。様々な試行錯誤・トラブルを経験しながらも、チャレンジングな新規着想研究として、研究はほぼ予定通り進捗しており今年度の目標を達成していると考えている。

### 4. まとめと今後の課題

真空チャンバー内にも分光器で観測できる計測装置システムは完成したので、真空中の高精度なリアルタイム計測の成功は来年度の課題である。今後は、定量的計測を伴う衝突実験にも挑戦する。チャンバー内に光ファイバーを通し、メカノクロミズム金属錯体の発光をリアルタイムで計測する。光ファイバーの1端を2枚目裏面に設置する。光ファイバーの他端はチャンバー外の分光器に繋ぐ。真空を破られない接続工夫が必要となる。光ファイバーに繋いだ分光器をPCに接続し計測データを処理する。接着に必要な材料の選定は終了しているが、条件によっては、図3で見られるように、衝突後に資料が剥がれる現象が見られた。これらを今後の課題とする。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] Matsumoto, N., Oki, Y., Ohtani, K., Hasegawa, S., Hasegawa, M., and Makihara, K.: Elementary Experiments of Air-Leakage Detection for Space-Debris Impact using Photoluminescent Substance, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 22-23.

[2] 沖義弘, 榎原幹十郎: 確率理論を駆使した高速衝突画像のデブリクラウド形状の自動抽出, 平成25年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, 神奈川, (2015).

[3] 沖義弘, 根元翔, 榎原幹十郎, 長谷川直: 斜め衝突時におけるデブリクラウドの運動エネルギーを用いた与圧壁損傷推定, 日本機械学会東北支部第50期総会講演会, 宮城, (2015).

#### 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

課題番号	J14003
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	2年目

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

門脇 敏\*†, 小林 秀昭\*\*††

\*長岡技術科学大学技術経営研究科, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

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

**2. 研究成果の内容**

本研究では、化学反応を考慮した圧縮性ナビエ・ストークス方程式を基にした二次元非定常反応流の数値計算を遂行した。計算スキームとしては、有限差分法の一つである陽的マッコーマック法を用いた。本数値計算では、申請者らがこれまでに開発してきたコードをベースとし、中間生成物のレイス数や反応速度の頻度因子を変化させて計算を遂行した。なお、計算の遂行では、流体科学研究所のスーパーコンピューターを用いた。

本計算では、火炎面に正弦波状の微小擾乱を加え、その増幅率と波数の関係（分散関係）を明らかにし、特性波長（火炎セルサイズ）を求めた。また、時間発展の数値計算を遂行し、固有不安定性により生じるセル火炎の特性に及ぼす中間生成物の影響を明らかにした。

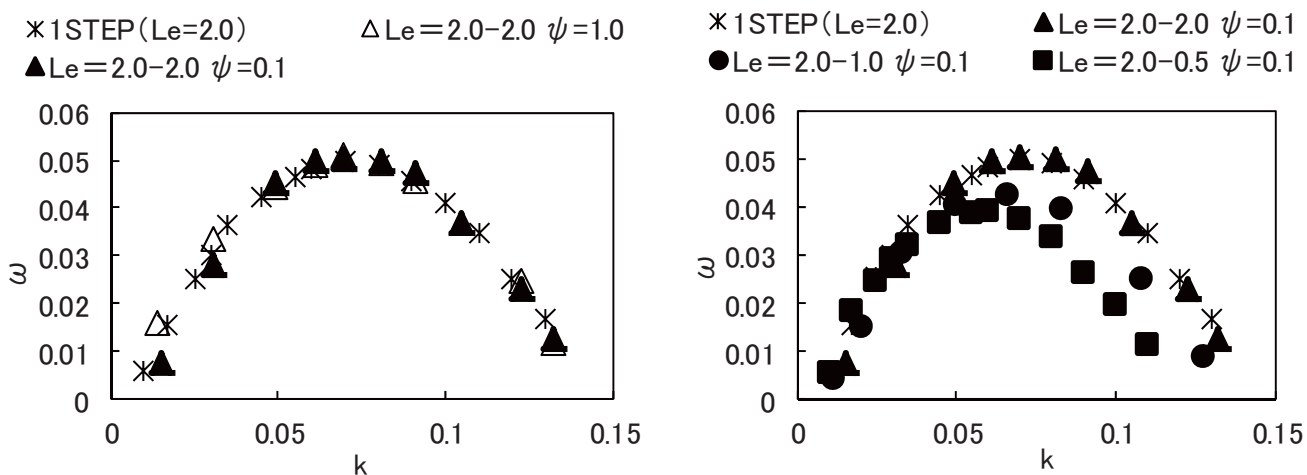


図1 分散関係 ( $Le_1 = 2.0$ ,  $Le_2 = 2.0, 1.0, 0.5$ ,  $\psi = 0.1$ )

表1 セル状火炎の特性

	$S_{cf}$	$D_{cf}$	$\lambda_c$	$D_{cf}/\lambda_c$
$Le_1 = 2.0, 1\text{-step}$	1.27	31.4	90.0	0.35
$Le_1 = 2.0, Le_2 = 2.0, \psi = 0.1$	1.27	31.4	90.0	0.35
$Le_1 = 2.0, Le_2 = 0.5, \psi = 0.1$	1.34	44.9	104.7	0.43

図1は、分散関係（増幅率 $\omega$ と波数 $k$ の関係）を示したものであり、未燃ガスのレイス数は $Le_1 = 2.0$ 、中間生成物のレイス数は $Le_2 = 2.0, 1.0, 0.5$ である。ここで、 $\psi$ は反応速度の頻度因子の比であり、その値が小さくなると中間生成物の発生量は大きくなる。未燃ガスと中間生成物のレイス数が等しいとき（ $Le_1 = Le_2 = 2.0$ ）、中間生成物の発生量が変化しても分散関係はほぼ同じであり、中間生成物を考慮しない場合と同等である。中間生成物のレイス数が小さくなると、増幅率は小さくなる。これは、中間生成物の拡散が大きくなることに依るものである。また、特性波数は小さくなるので、特性波長 $\lambda_c$ は長くなる。

表1は、固有不安定性により形成されるセル状火炎の特性を示したものである。火炎面がセル状になるので、燃焼速度は増大する（ $S_{cf} > 1$ ）。また、セルの深さ $D_{cf}$ は、中間生成物のレイス数が小さくなると大きくなり、セルの深さと特性波長の比 $D_{cf}/\lambda_c$ も大きくなる。

### 3. 研究目標の達成状況

予混合火炎の数値計算を遂行し、不安定挙動における中間生成物とレイス数の影響を精査した。未燃ガスと中間生成物のレイス数が等しいとき、中間生成物の発生量が変化しても分散関係はほぼ同じであり、中間生成物を考慮しない場合と同等であることを示した。また、セル状火炎の特性においても両者は同等であることを確認した。一方、中間生成物のレイス数が小さくなると、増幅率が小さくなるが、セル状火炎の燃焼速度は大きくなることを示した。これは、セルの深さがより深くなり、火炎面が広くなることに依るものである。

以上のことから、予混合火炎の固有不安定性における中間生成物に着目した本研究は、十分な成果を得ていると思われる。

### 4. まとめと今後の課題

予混合火炎の固有不安定性における中間生成物とレイス数の影響を精査することは、バイオ燃料の有効利用の観点から、主要な地位を占めるものである。今後は、種々のパラメータを変化させて数値計算を遂行し、火炎の不安定機構を体系的に、そして詳細に調べる予定である。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

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

\*[1] Kadowaki, S., Thwe Thwe Aung, Yamazaki, W., and Kobayashi, H., The effects of intermediate product on the intrinsic instability of premixed flames with high Lewis number reactant, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 62-63.

[2] 門脇敏, Thwe Thwe Aung, 安藤謙司, 山崎渉, 小林秀昭, 予混合火炎の不安定性に及ぼす中間生成物の影響, 第52回燃焼シンポジウム, pp. 28-29, (2014)

- 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）なし

課題番号	J14004
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目 (発展)

## 航空分野における流体シミュレーション結果の比較可視化 Comparative Visualization of Fluid Simulation Results

伊藤 貴之\*† 久保田 真季\* 桑名 杏奈\*  
大林 茂\*\*†† 竹島 由里子\*\*  
\*お茶の水女子大学 \*\*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

航空分野に限らず流体シミュレーションを使用する学術分野および産業分野では、物理条件や空間条件などを調節しながら流体シミュレーションを反復することが多い。そのような反復的な流体シミュレーション結果の比較は重要であり、その工程において可視化技術が貢献できる余地は大きい。本研究では流体シミュレーション結果を可視化する2つの手法を研究する。一方は平成25年度に引き続き流体シミュレーションの多目的最適化結果の可視化手法について研究する。他方は3次元実空間において2つのシミュレーション結果を重ねて表示する可視化手法について研究する。

### 2. 研究成果の内容

多目的最適化結果の可視化については、平成25年度に引き続いてPCP (Parallel Coordinate Plots) という多次元データ可視化手法を適用し、特に解集合のクラスタ分析に力を入れた。図1にその一例を示す。この例では776件のパレート解を776本の折れ線で表示し、目的関数の値によって4個のクラスタに分類して4色で表現している。これを見ると、特定の目的関数において良好な値を示す解クラスタや、全ての目的関数において悪くない値を示す解クラスタなどがあることがわかる。

3次元実空間における比較表示については、矢印や流線による流れ方向の比較表示機能や、渦度分布の比較表示機能を開発した。これによって、3次元空間中において2つの流れ場に差異がある部分だけを強調表示できることを確認した。図2にその例を示す。図2(左)は渦度分布の比較表示の例である。2つのシミュレーション結果において渦度に差がない領域を白のドットで、一方の結果にのみ大きな渦度が見られる領域を緑のドットで、他方にのみ大きな渦度が見られる領域を赤のドットで表示している。図2(右)は流線の比較表示の例である。2つのシミュレーション結果において流れ方向が一定以上の角度差を有する領域に流線の始点を設定し、一方の結果から生成される流線を水色で、他方の結果から生成される流線をピンク色で描いている。

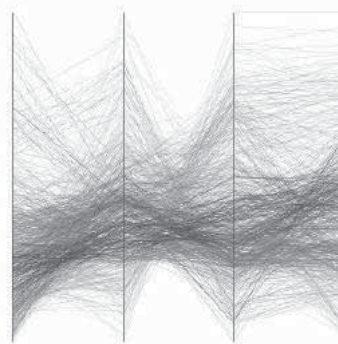


図1 多目的最適化による解集合を構成する目的関数値をクラスタ分析して色分け表示した結果。



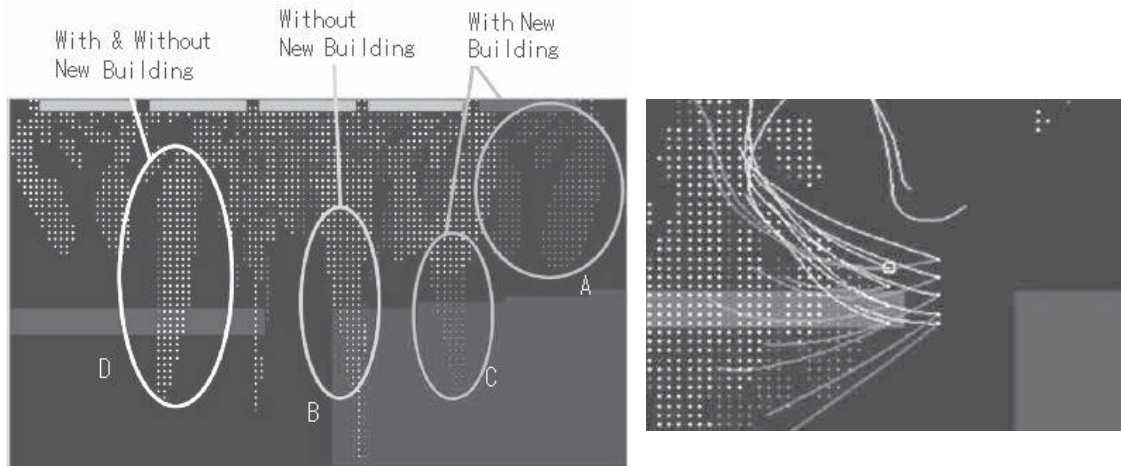


図2(左) 渦度分布の比較表示. (右) 流線の比較表示.

### 3. 研究目標の達成状況

多目的最適化の可視化においては研究目標をある程度達成できた. 本研究をさらに発展させるためにはPCP以外の可視化手法の適用が必要であると考え. 3次元実空間での比較可視化においては, 一定の効果を確認できたものの, まだインパクトのある学術的新規性を示すに至っていない. さらなる新しい描画手法の開発が必要不可欠である.

### 4. まとめと今後の課題

今後の課題として以下を考えている. 多目的最適化結果の可視化については, 設計変数と目的関数の関係性のさらなる分析, パレート解と非パレート解の混合環境における可視化などについて検討を続けると同時に, PCPだけに頼った可視化ではなく他の多次元データ可視化手法を搭載した高機能な可視化システムを構築したい. 3次元実空間での比較可視化については, もっと多彩な可視化手法を追加実装したい. そして重要な点として, 両者を統合した可視化環境の開発を試みたい. 具体的には, 多目的最適化結果の中から2つのパレート解を選択し, それに対応するシミュレーション結果を3次元実空間で比較表示する, といった形での連携を試みたい.

### 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] M. Kubota, T. Itoh, S. Obayashi, Y. Takeshima, EVOLVE: A Visualization Tool for Multi-Objective Optimization Featuring Linked View of Explanatory Variables and Objective Functions, *18th International Conference on Information Visualisation*, (2014), pp. 351-356.

\* [2] A. Kuwana, K. Hattanda, T. Itoh, S. Obayashi, Y. Takeshima, A Comparative Visualization Technique for Fluid Simulation Results, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 34-35.

[3] 久保田真季, 伊藤貴之, 大林茂, 竹島由里子, 多目的最適化問題のための説明変数と目的関数の連携可視化, 日本機械学会 第27回計算力学講演会(CMD2014), (2014).

[4] 久保田真季, 伊藤貴之, 大林茂, 竹島由里子, 説明変数と目的関数の連携可視化によるパレート最適解の対話的探索, 情報処理学会第77回全国大会, (2015), 3Y-04.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

久保田真季, 情報処理学会第77回全国大会学生奨励賞

課題番号	J14005
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

飛翔体の空力性能改善に関する研究

Study on Improvement of Aerodynamic Performance for an Airborne Projectile

長谷川 裕晃\*†, 大林 茂\*\*††

中川 健一\*, イトゲル ウグームル\*, 手倉森 重一\*

\*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

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

2. 研究成果の内容

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

飛翔体の空力安定性について、シャトルコックは打球した際、その姿勢のまま飛翔するのではなく向きを変えながら飛んでいく。このシャトルコックのインパクト直後の急激迎角変化中の飛翔メカニズムに着目し解明を行う。飛翔安定性解明のアプローチとして、シャトルの隙間部、羽根部に軽量で通気性の無い和紙で加工を行い4つのシャトルを用意し、流体力特性の比較を行った。その結果、Standard型とConic w/o gaps型モデルと定常ピッチングモーメント係数  $C_M$  において違いが顕著に表れた。迎角  $\alpha=0^\circ$  周りの  $C_M$  曲線について Standard型の方がConic w/o gaps型よりも微係数および、線形安定性が高いことがわかった。図1は縦回転を模したシャトル周りの流れ場のポンチ図である。縦回転中、Standard型では、 $\alpha=0^\circ$  を境にオーバーシュート (O.S.) へ至る際、内部の流れを受けてスカートの片側のみから渦の生成放出されることが見られた。また、Conic w/o gaps型では、 $\alpha=0^\circ$  を境にオーバーシュート中絶えず、シャトルスカート部から交互に渦が生成放出することがわかった。

一方、スキージャンプスーツの異なる生地通気量での空力特性を評価する為に、楕円柱に生地を巻きつけ、定常流体力特性評価を行った。表1および図2は巻きつけた生地の空気通気量(中布に穴を開け空気通気量を調整)と巻きつけた生地、および楕円柱の流体力曲線である。その結果、通気量が全く無い生地の揚力係数は、通気量のある生地に比べ大きくなることがわかった。また生地の通気量が大きくなると、揚力は低下することを示している。一方、通気量の大きいCase1, Case2では失速角が後退することがわかった。失速角はCase0,

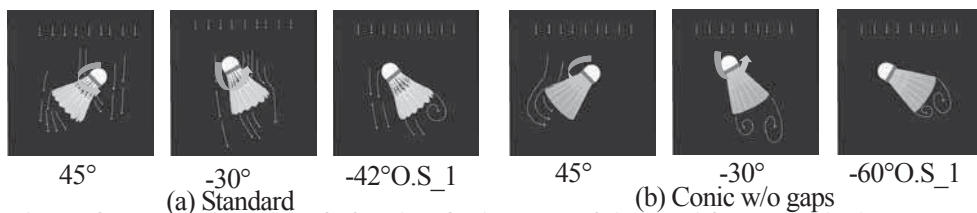


Fig.1 : Cartoon of vortices behavior during Impulsive Incidence Variation

Table1: Fabric air Permeability

Fabric	Case0	Origin	Case1	Case2
Permeability [L/m <sup>2</sup> /s]	0.0	40.8	62.9	68.6

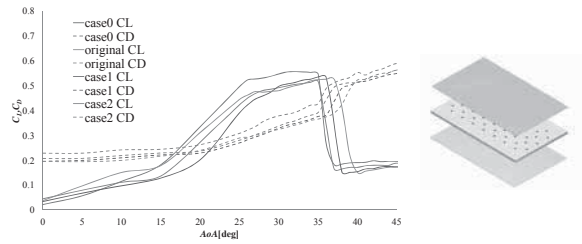


Fig.2: Lift and drag coefficient curves ( $Re = 2.0 \times 10^5$ ) and fabric of Ski Jumpsuit  
 Original が  $35^\circ$ , Case1 が  $36^\circ$ , Case2 が  $37^\circ$  であった. 通気量が大きくなると大迎角では高揚力を得る一方, 通気量のある生地はない生地に対し抗力が低減している. Original の生地は Case0 の生地に対し 7.5 % 減少している. さらに, Case1, Case2 は Original に対して 3.7 % 低減している. つまり, 生地の通気量が増加すると抗力は低下する. しかし, Case1 と Case2 の差はわずかであった. そのため, 通気量の増加での抗力係数低下には限界値が存在する.

### 3. 研究目標の達成状況

バドミントンシャトルコックの縦回転挙動においてはシャトルスカート端から生じる渦の挙動を捉え, 安定性メカニズムの解明を行った. スキージャンプスーツの生地を巻きつけた楕円翼の抵抗化について, 生地の通気量と失速角後退および抗力低下の関係について明らかになった. 次項に示す課題を残しつつも当初の目標は概ね達成できた.

### 4. まとめと今後の課題

空力安定性について, シャトルの縦回転挙動においてシャトルスカート端から放出される渦の挙動が回転中の挙動を支配していることがわかった. しかし, シャトル内部の流れが後流に与える影響は不明である. 今後内部流れの挙動について調べる必要がある. 次に高揚力, 低抵抗化について, 翼表面に空気通気量がある生地を付与することにより, 抗力減少と失速角後退が生じることがわかった. また翼表面生地の空気通気量の増加と, 最大揚力係数の減少および, 失速角の後退と抗力低減という事実を, 流れ場の可視化, 圧力場の測定を行い, より詳細に調べる必要がある. 今後は流れ場を詳細に調べることで, 生地通気量の違いで空力特性が変化するメカニズムを明らかにする.

### 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] Tekuramori Shigekazu, Hiroaki Hasegawa, Shigeru Obayashi, Study on Improvement of Aerodynamic Performance for an Airborne Projectile – Effect of Air Permeability of Ski Jumpsuit on Aerodynamic Characteristics –, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 2-3.

[2] Itgel Uguumur, 長谷川裕晃, 大林茂, シンセティックジェットによる翼背面の流れ場構造, 日本機械学会 2014 年度年次大会, (2014), S0510404.

[3] 中川健一, 長谷川裕晃, 村上正秀, 大林茂, 急激な姿勢変化に対するバドミントンシャトルコックの空力安定性, 日本流体力学会年会 2014, (200).

[4] 手倉森 重一, 長谷川裕晃, 瀬尾 和哉, 大林茂, 通気量の異なるスキージャンプ用生地の空力特性, シンポジウム: スポーツ・ヒューマン・ダイナミクス 2014, A-1.

[5] 手倉森 重一, 長谷川裕晃, 瀬尾 和哉, 大林茂, 空気通気量の異なるスキージャンプ用生地での空力性能, 日本航空宇宙学会北部支部 2015 年講演会, JSASS-2015-H015.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J14006
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

**節足動物の運動器官と運動機能に関する工学的研究**  
**Technological Research on Locomotive Organs and Functions of Arthropods**

須藤 誠一\*†, 早瀬 敏幸\*\*††

白井 敦\*\*, 井上 浩介\*\*

\*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**

食物連鎖の下層に位置付けられている比較的小さな生物（アミヤコペポータなどの海洋性プランクトン、ハエやカなどの飛行昆虫、トビムシなどの粘管目微小動物）の運動器官を微視的に観察・計測し、さらに、その生物の生死にかかわる極限状況下での運動挙動やその際に発揮する機能・機構を調べ、生物の有する構造・形態の意義を工学的な観点から明らかにする。

**2. 研究成果の内容**

本研究では体長が 1mm~2mm のトビムシの跳躍器官の観察および跳躍の詳細な運動解析を行い、トビムシの跳躍器官と跳躍挙動の関連性を調べ、特に、水面と陸上を行き来しているトビムシを取りあげ、固体平板上での跳躍と水表面上での跳躍の相違について考察し、跳

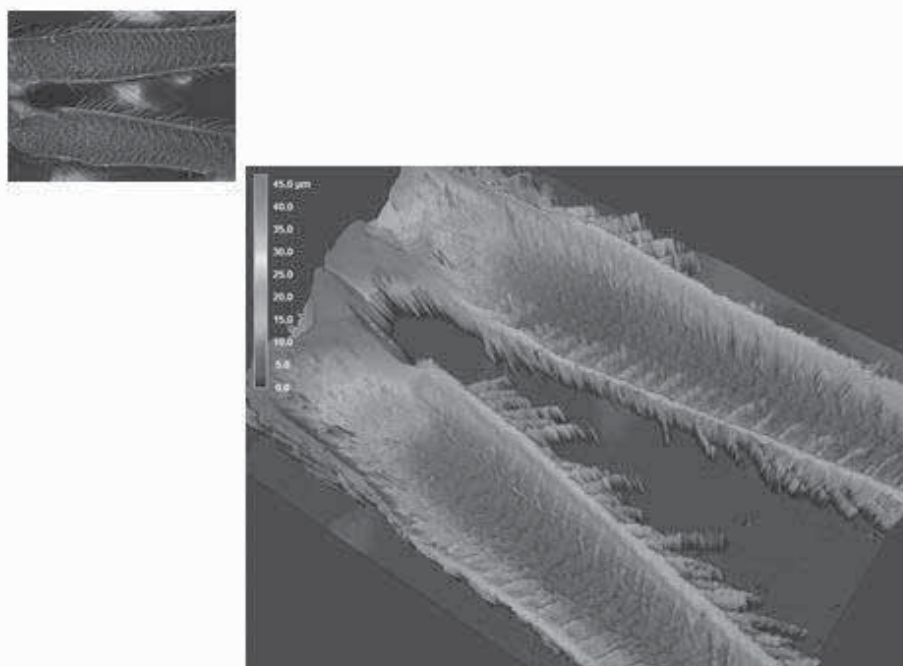


図1：体長 1.5mm のトビムシの跳躍器（撃ちつけ側）の光学画像とその3次元形状表示

躍のメカニズムが跳躍器内の空気の圧縮と膨張流動によることを示した。さらに、昆虫の離陸上昇飛行に関して、翅の折りたたみが単純なモンキチョウから複雑なクロウリハムシの翅展開・鉛直上昇飛行の詳細な解析を行い、昆虫の有する優れた特性や機能を明らかにした。

### 3. 研究目標の達成状況

いくつかの種類の節足動物の有する優れた運動機能・機構・形態構造・組織などの詳細が明らかにされ、それらの定量的なデータが運動機械などの開発に関して基礎資料となる可能性が示されたことから判断して、初期の研究目標はほぼ達成されたといえる。

### 4. まとめと今後の課題

本研究によって求められた生物の運動特性や解明されたメカニズムを利用した、マイクロ機器あるいはマイクロロボットの開発が、今後の課題となろう。

### 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, K. Kitadera, A. Shirai and T. Hayase: Take-off Flight of the Butterfly *Colias erate* Esper, *Journal of JSEM*, Vol.14, Special Issue, (2014), pp.s279-s284.
- [2] S. Sudo, M. Sato, M. Shiono, A. Shirai, and T. Hayase: Dynamic Behavior of Dandelion Flower Head and Spherical Seed Head, *International Journal of Mechanical Engineering and Automation*, Vol.2, No.1, (2015), pp.32-39.
- [3] S. Sudo, T. Kainuma, T. Yano, A. Shirai and T. Hayase: The Jump of Water Springtail and Morphology of the Jumping Organ, *Proceedings of the 9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics*, New Delhi, India, CD-ROM, (2014), pp.1-7.
- [4] S. Sudo, T. Amano, A. Shirai, and T. Hayase: On the Motility and Locomotive Organs of Beach Flea, *Proceedings of the Sixth International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms*, Honolulu, USA, (2014), pp.112-117.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[5] S. Sudo, T. Kainuma, A. Shirai, K. Inoue and T. Hayase, Microscopic Observation of Jumping Organ of Collembola, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp.80-81.
- [6] S. Sudo, R. Tanaka, K. Inoue, A. Shirai and T. Hayase: An Aspect in Flight Morphology of the Butterfly, *Proceedings of Eleventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp.70-71.
- [7] 須藤誠一, 貝沼俊哉, 矢野哲也, 白井 敦, 井上浩介, 早瀬敏幸: 固体平板と水面でのトビムシの跳躍挙動における比較, 日本流体力学会年会 2014 講演論文集(USB メモリ), (2014), pp.1-4.
- [8] 山本翔也, 須藤誠一, 白井敦, 早瀬敏幸: クロウリハムシの離陸飛行に関する研究, 日本機械学会東北支部第 50 期総会・講演会講演論文集, No.2015-1, (2015), pp.161-162.

#### 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	J14007
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	2年目

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

須藤 誠一\*†, 伊東 正英\*\*

中西 将人\*, 西山 秀哉\*\*\*††

\*秋田県立大学システム科学技術学部, \*\*秋田県立大学大学院システム科学技術研究科

\*\*\*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**

微少量（マイクロリットル）の磁性流体が静磁場および変動磁場を受ける場合に発生する磁性流体の界面不安定性について実験的に解明し、さらに磁性流体界面現象を利用した磁氣的に制御可能なマイクロデバイス・マイクロマシンへの応用展開をはかる。

**2. 研究成果の内容**

本研究においては、人間の目の虹彩機能に倣う人工絞り機構を、小さな永久磁石と磁性流体によって構成し、外部交流磁場によってリング状磁性流体ホールの拡大・縮小振動を誘起し、外部入力信号で制御するシステムを構築し、マイクロデバイスの駆動特性を求めた。

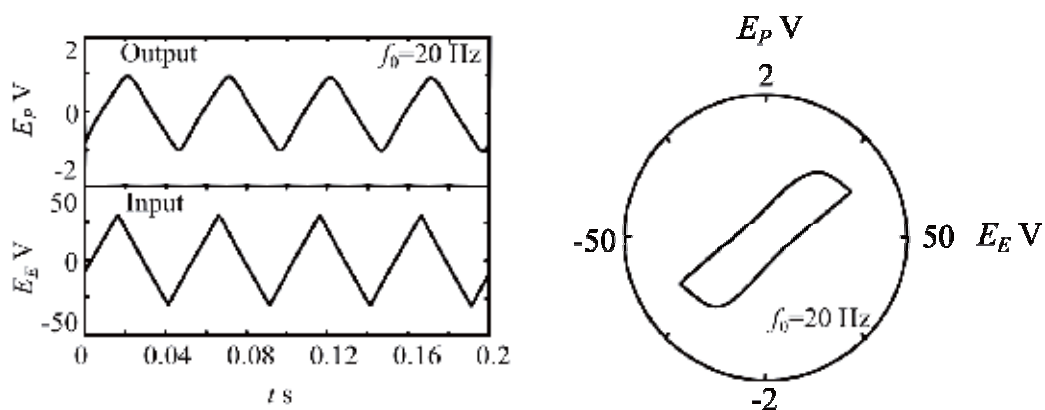


図1：マイクロデバイスにおける入出力信号(左図)とその軌道(右図)

**3. 研究目標の達成状況**

小さなリング状永久磁石に微少量の磁性流体を吸着し、その系に外部から磁石の磁極方向に交流磁場を印加した場合の磁性流体の界面現象をまず初めに調べ、さらに、その磁性流体界面現象の磁気信号に対して示す応答特性を最大限に発揮するマイクロ磁性流体デバイスを提案し、その駆動特性を得ることができたことから、研究目標はほぼ達成されたといえる。

#### 4. まとめと今後の課題

小さな NdFeB 永久磁石，流動性の高い炭化水素ベース磁性流体，比較的小さな強さの外部交流磁場（あるいは微弱な磁気信号）を基本要素として，磁性流体界面現象を利用したマイクロデバイスを提案した本研究は，デバイスの実用化に向けた開発が必要となろう。

#### 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] 須藤誠一，中西将人，篠崎成大，西山秀哉: 磁性流体の界面現象を利用したマイクロ絞り機構の開発，日本機械学会論文集，Vol. 23, No. 3, (2015), 10.1299/transjsme.14-00500 (13 pages).
- [2] S. Sudo, H. Takamatsu, T. Yano, H. Takana and H. Nishiyama: The Dynamic Behaviour of a Micro Liquid Bridge of Magnetic Fluid in Static and Alternating Magnetic Fields, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.45, Nos.1-4, (2014), pp.61-67.
- [3] S. Sudo, M. Shinozaki and H. Nishiyama: A Study on the Optical Diaphragm Using Magnetic Fluid and a Permanent Magnet, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.46, No.4, (2014), pp.943-949.

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[4] M. Nakanishi, S. Sudo and H. Nishiyama: The Dynamic Behavior of Magnetic Fluid Adsorbed on the Cylindrical Permanent Magnet in Water Container Subject to Alternating Magnetic Field, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp.162-163.
- [5] M. Ito, S. Sudo and H. Nishiyama: Water Flow Produced by the Oscillation of Magnetic Fluid Adsorbed on a Permanent Magnet in Alternating Magnetic Field, *Proceedings of Eleventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp.394-395..
- [6] S. Sudo, M. Shinozaki and H. Nishiyama: Vibration Characteristics of Liquid Hole Composed of Magnetic Fluid and a Ring-Shaped Permanent Magnet Subject to Alternating Magnetic Field, *Abstracts of 2014 Japan-Taiwan Joint Conference on Magnetic Nanoparticles for Biomedical Application*, Taipei, (2014), pp.46-48.
- [7] S. Sudo, M. Shinozaki and H. Nishiyama: Vibration Characteristics of Magnetic Fluid adsorbed on the Ring-Shaped Permanent Magnet in Cylindrical Pipe Subject to Alternating Magnetic Field, *Book of Abstracts of 14<sup>th</sup> International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, Granada, (2014), p.78.
- [8] 中西将人，篠崎成大，須藤誠一，西山秀哉: 永久磁石に吸着したマイクロ磁性流体リングの交流磁場応答の研究，第26回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集，(2014)，pp. 223-229.
- [9] 中西将人，矢野哲也，須藤誠一，西山秀哉: 水-磁性流体系における動的界面現象に関する研究，磁性流体連合講演会講演予稿集，(2014)，pp.7-9.

##### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）優秀講演賞，水-磁性流体系における動的界面現象に関する研究，中西将人，2014.11.21，磁性流体研究連絡会。

（マスコミ発表）なし

Project code	J14008
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	New(progressing)

## Characterization of Plastic Deformation using Electromagnetic NDT Methods

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

### 1. Purpose of the project

The aim of this research is to evaluate feasibility of different electromagnetic Non-Destructive Evaluation (NDE) methods for quantitatively evaluation of plastic deformation in carbon steel used in nuclear power plants. The efficiency of the methods are compared through experiments.

### 2. Details of program implement

To evaluate feasibility of different ENDE methods for quantitative evaluation of plastic deformation in carbon steel, the major works performed in this year project are as follows: 1) Fabrication of test-pieces with different scale of plastic deformation; 2) Establishment of experimental setups of 4 electromagnetic NDE methods, i.e., Magnetic Barkhausen Noise, Magnetic Incremental Permeability, Pulsed Eddy Current Testing and Eddy Current Testing for plastic deformation measurement; 3) Plastic deformation measurements using different methods and investigation on correlation of the plastic deformation and the signals of NDE methods to clarify the validity of the methods; 4) Discussion on the microstructure changed due to plastic deformation, and extraction of a suitable way for evaluation of plastic strain.

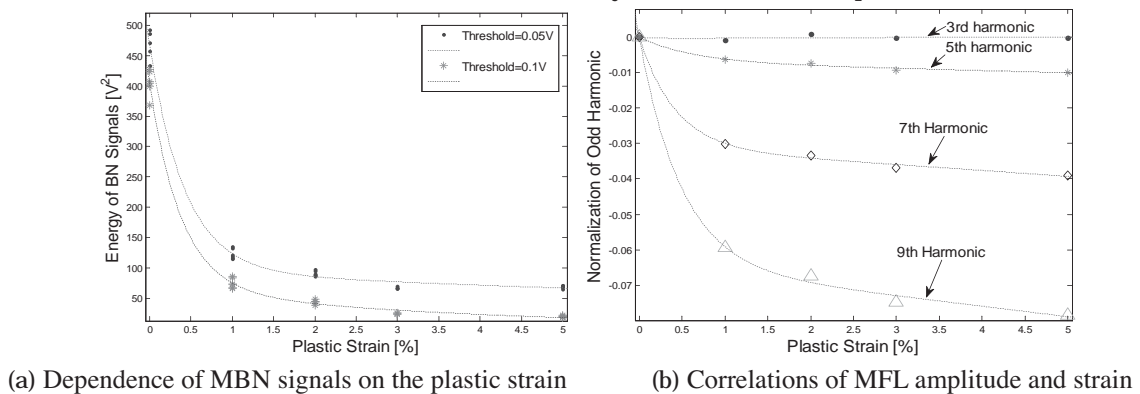


Fig. 1 Dependence of ENDE signals on residual plastic strains

Figure 1a) shows typical MBN signals for TPs with different level of residual plastic deformation for the measurement points at the TP center. The other signals measured near by the center point and from the other side are of the same feature. The testing conditions for all the TPs are the same. From the figure, one can find that the peaks of MBN signal decrease abruptly for TPs with and without plastic deformation (0% to 1%). The reduction of the signal amplitudes, however, becomes slower for a relatively large plastic deformation. For a large plastic strain such as



that over 3%, the signal reduction is very small. On the other hand, the signals caused by the phase of cementite gradually became stronger for a large plastic deformation. For this reason, different threshold signal values are necessary to process the raw MBN signals and to extract the MBN feature parameters.

The MIP profiles for TPs with residual plastic strain of 0%, 1%, 2%, 3% and 5% were measured respectively. It is found from the results that the feature parameters of the measured MIP profiles changes regularly with the status of residual plastic strain in the TPs. The MIP profiles of the imaginary part shows more changes than those of the real part, and MIP of virgin material is significantly different from TPs with plastic strain.

Figure 1 b) gives the dependence of the measured amplitudes of super-harmonic components of MFL signals on the plastic strains. In this case, results of the normalized average values are illustrated. Similar results are obtained with the MFL signal amplitudes of different harmonic and the correlation can be fitted with an exponential function for the normalized average values. These experimental results reveal that the MFL signal measurement is also a potential way for the plastic strain evaluation of the SS400 material. Moreover, the result of MFL method is simple and stable, and is more robust against the surface status of the test-pieces.

### 3. Achievements

The measurement results show that the plastic deformation can cause significant change of magnetic properties in such a carbon steel, and the measured signals of magnetic NDE methods depend on the levels of plastic deformation. There is a good possibility to quantitatively evaluate the plastic strain in SS400 steel by using these methods. In addition, an integrated testing system and signal fusion of these three methods may improve the plastic strain evaluation further.

### 4. Summary and future work

The correlations of plastic deformation in SS400 carbon steel on signals of MBN, MIP and MFL methods are investigated via experiments in this year. The influence of strain state (biaxial strain) on the ENDE signals will be investigated as next step.

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

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

- [1] H-E. Chen, S. Xie, Z. Chen, T. Takagi, T. Uchimoto and K. Yoshihara: Quantitative Nondestructive Evaluation of Plastic Deformation in Carbon Steel Based on Electromagnetic NDE Methods, *Material Transactions*, 55(12), (2014), pp. 1806-1815.
- [2] W. Cai, H-E Chen, Y. Li, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi, Y. Yoshida: Studies on the Influence of Plastic Deformation on the Conductivity and Permeability of Carbon Steel, *Int. J. Appl. Electromagn.*, 45, (2014), pp. 371-378.
- [3] H-E. Chen, S. Xie, H. Zhou, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi, Y. Yoshida: Numerical Simulation of Magnetic Incremental Permeability for Ferromagnetic Material, *Int. J. Appl. Electromagn.*, 45, (2014), pp. 379-386.

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

- \*[4] Z. Chen, H-E. Chen, S. Xie, T. Uchimoto, T. Takagi: Characterization of Plastic Deformation by using Electromagnetic NDT Methods, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 76-77.
- [5] S. Xie, Z. Chen, T. Takagi, T. Uchimoto: Nondestructive Evaluation of Plastic Deformation in Biaxial Specimen using Pulsed ECT Method, 11th ICFD, *Proc. 2nd Int. Sym. Smart layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, (2014), pp. 21-22.

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

Not applicable.

課題番号	J14009
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	2年目

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

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

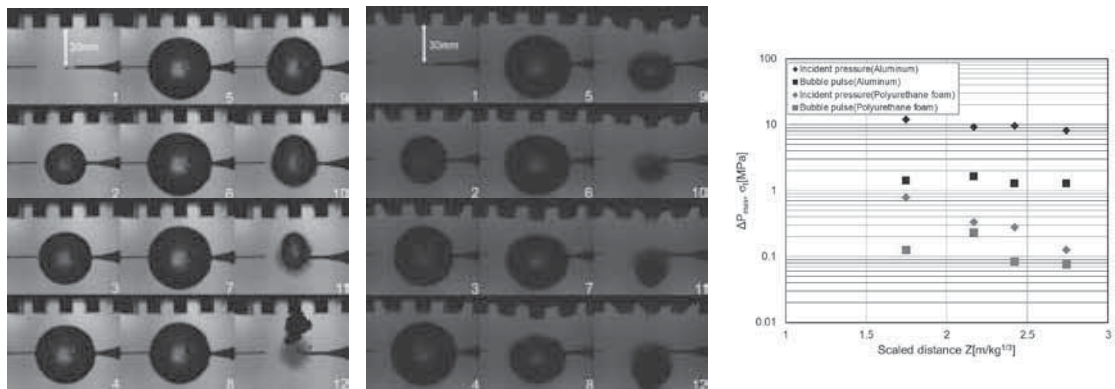
**1. 研究目的**

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

本研究では、発泡構造の複雑媒体で、水中爆発時の衝撃圧減衰、爆発ガスの気泡膨張収縮の抑制による衝撃環境と水流ジェットの軽減とその減衰法を確立することが目的である。

**2. 研究成果の内容**

図1(a)と図1(b)は爆薬を物体面から下方30mmの位置で起爆させた時に発生した爆発ガスの変形挙動の可視化結果を示す。図1(a)は凹凸形状の剛体壁面、図1(b)は凹凸形状の空隙フォームの2次元変形の結果である。各図のNo.1は0ms、時間間隔は $\Delta t = 0.46\text{ms}$ である。また、凹凸形状の高さとピッチは各々10mmである。凹凸剛体壁面の場合(図1(a)), No.1で爆薬の起爆、No.2で爆薬中心から高温、高圧の爆発生成ガスが発生する。キャビテーションは、水中衝撃波が剛体壁面で反射した圧縮波によって爆発ガス周辺と凹凸面近傍で発生する。



(a) 凹凸形状剛体壁 (b) 凹凸形状空隙フォーム

図1 水中爆発の可視化( $\Delta t = 0.46\text{ms}$ )

図2 最大圧力と換算距離の関係

No.2 から No.6 間に、爆発ガスはほぼ真球状(縦横比 1:0.993)に膨張する。No.7 から No.10 間に、中心部圧力が負圧となり、爆発ガスは収縮を始め、左右の収縮速度が速く縦長の楕円球状(縦横比 No.7:1:0.993~No.10:1:0.718)になる。また、爆発ガス上部は下部より収縮速度が遅くなる。No.11 では、爆発ガスの上面が膨らみ、真球にならない。No.12 では、爆発ガス下側から爆発ガス内を通り、強い水流ジェットを発生する。凹凸形状の空隙フォームの場合

合(図 1(b)), No.1 で爆薬の起爆, キャビテーションは, No.2 の爆発ガス周辺と凹凸面近傍で発生している. これは, 音響インピーダンスが水と比べポリウレタンフォームの方が低く, 水中衝撃波は空隙フォーム面で膨張波反射し, 気泡形成を促す. No.2 から No.6 間に爆発ガスは楕円球状(縦横比 1:0.961)に膨張する. No.7 から No.10 間で, 中心部圧力が負圧となり, 収縮を始め, 爆発ガス上部の収縮速度が速く横長の楕円球状(縦横比 No.7:1:0.993~No.10:1:0.644)になる. No.11 では, 爆発ガスの下面が膨らみ, No.12 では, 爆発ガス上側から爆発ガス内を通り, 剛体壁と逆向き(下向き)の水流ジェットが発生する. 図 2 は入射衝撃波とバブルパルスの最大過剰圧・応力の関係を示す. 入射衝撃波及びバブルパルスの過剰圧の場合, 凹凸剛体壁よりも凹凸空隙フォームでは 90 から 99%減衰し, 従って, 水中爆発の減衰と軽減が行われた.

### 3. 研究目標の達成状況

水中爆発時に印可される衝撃圧・動的破壊挙動を, 複雑構造媒体の組合せによって, 物体損傷軽減の評価を行うことが研究目標である. 平面形状と凹凸形状フォームによる物体形状の影響を調べ, 凹凸形状の空隙フォームにおいても, 衝撃圧の減衰と水流ジェットを物体から遠ざける事ができ, 本年度の結果からおおむね順調に進展している. 水中爆発の減衰と軽減効果は, 媒体形状 (三角, 半円), 媒体の物性値や分布変更により得られると考えている.

### 4. まとめと今後の課題

凹凸形状の空隙フォームを用いて, 90%以上の衝撃圧とバブルパルスの減衰効果とフォームによる水流ジェットの軽減から水中爆発の軽減効果を得る事ができた. フォーム骨格固体によって, 衝撃波からのキャビテーション発生が多くなり, 水流ジェットが減衰し, 爆発生成ガスが物体より離れていく事が明らかになった.

来年度の課題として, 水中爆発の軽減効果は, 入射衝撃波とバブルパルスのインパルス, 水流ジェットの流速, 爆発生成ガスの膨張収縮運動を総合判断し, 更に水中爆発の軽減効果を向上させる.

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

[1] K. Kitagawa, T. Nomura, K. Ohtani and A. Abe : Attenuation of underwater explosion propagating through porous compressible foam, *Proceedings of the fifth International Symposium on Energetic materials and their Applications*, 49, (2014).

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\* [2] K. Kitagawa and K. Ohtani : Attenuation and Reduction Effect of Underwater Explosion by Porous Materials(2nd report), *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 82-83.

[3] 長廣大樹, 野村達也, 北川一敬, 大谷清伸, 阿部淳 : 水中爆発と凹凸形状の可変形空隙媒体との衝突干渉, 平成 26 年度衝撃波シンポジウム, (2015), P-01.

[4] 北川一敬, 野村達也, 長廣大樹, 大谷清伸 : PIV による水中爆発周りの流れ場の可視化, 平成 26 年度衝撃波シンポジウム, (2015), 1B2-1.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

課題番号	J14010
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4~2015.3
継続年数	3年目

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

森江 隆\*†, 寒川 誠二\*\*††

東原 敬\*, 倉光 良明\*, 田村 洋典\*\*

\*九州工業大学生命体工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

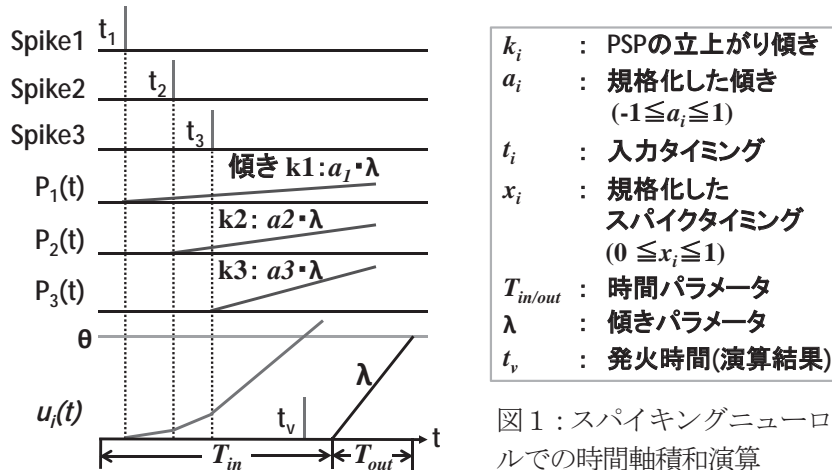
**1. 研究目的**

九工大が産総研の協力の下で開発する **Fin** 型トランジスタ (**FinFET**) と、東北大の独自技術である中性粒子ビーム加工技術を用いた超微細構造 (ナノディスクアレイ) を組み合わせ、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、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。

本共同研究では、ゆらぎを含む微細ニューロンデバイス実現のために、微細化に有効で、かつ低ゲート容量を実現できる **FinFET** と、**NDA** を組み合わせたデバイス (**NDA-FinFET**) を開発し、スパイクタイミングと **PSP** の立ち上がり傾きで計算される積和演算 (図1) を、提案デバイス構造 (図2) 上でシミュレーション及び実デバイスで確認した。シミュレーション結果 (図3) では計算誤差は 10%程度以下だが、実デバイスでは 10 数%に達した。これは、抵抗を介した充電動作のために、直線的な立ち上がりにならないためと考えられる。



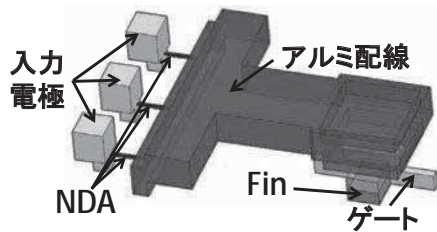


図2 : NDA-FinFET デバイス構造

ナノディスク サイズ	直径	10 nm
	高さ	2 nm
	間隔	3 nm
各NDAのナノディスクの数	16×3	
入力電極とアルミ配線の間隔	220 nm	
ゲート容量 (FinFET)	230 aF	
FinFETサイズ	L	50 nm
	w	80 nm

$$\sum_{i=1}^n (a_i \cdot x_i) = \frac{(T_{out} + T_{in} - t_v)}{T_{in}}$$

入力電圧 [V]	左辺	右辺	誤差
2.0	0.336	0.304	+10.6 %
2.5	0.448	0.446	+0.3 %
3.0	0.566	0.533	+6.1 %

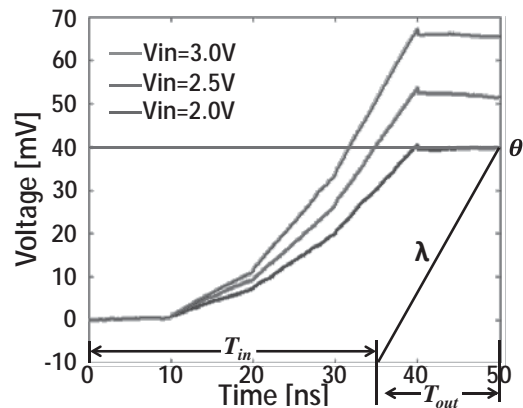


図3 : NDA-FinFET での時間軸積和演算 (シミュレーション結果)

### 3. 研究目標の達成状況

ナノ構造を利用した超低電力・小型の脳型処理回路の実現に向けて、NDA-FinFET デバイスで脳型処理の基本機能である積和演算を確認し、単体デバイスレベルで目標を達成した。

### 4. まとめと今後の課題

FinFET と複数ナノディスクアレイ構造を結合したデバイスで、積和演算機能をシミュレーションで確認するとともに、実デバイスでの測定結果と比較した。今後の課題はゆらぎ特性を含めた積和演算機能を実現し、連想処理などの脳型情報処理を実現することである。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)  
なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
  - [1] 倉光 良明, 東原 敬, 遠藤 和彦, 寒川 誠二, 昌原 明植, 森江 隆: FinFET-ナノディスクアレイ構造デバイスによる時間軸での積和演算, 応用物理学会秋季学術講演会, (2014), p. 13-177.
  - [2] 東原 敬, 遠藤 和彦, 五十嵐 誠, 寒川 誠二, 昌原 明植, 森江 隆: FinFET-ナノディスクアレイ構造結合のためのプロセス手法, 応用物理学会秋季学術講演会, (2014), p. 13-178.
  - \*[3] T. Morie, T. Tohara, K. Endo, M. Igarashi, and S. Samukawa: Intelligent Information Processing Circuits Using Nanodisk Array Structure, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 122-123.
- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)  
なし

課題番号	J14011
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

**水および液体窒素の高圧環境下における噴霧特性の研究**  
**Atomizing Characteristics of Water and Liquid Nitrogen Jets under High Pressure Environment**

渡邊 力夫\*†, 小林 秀昭\*\*††

\*東京都市大学工学部, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

東京都市大学では、液体窒素の気化膨張圧を利用したロケットエンジンの開発をしている。このエンジンの特性を解析するためには、背景圧力が高い混合室内部における推進剤（水と液体窒素）の噴霧特性を明らかにする必要があるため、東北大学流体科学研究所小林研究室所有の「高圧環境噴霧試験装置」を利用して、推進剤噴流の粒子径分布や流速分布を明らかにすることを目的とする。

**2. 研究成果の内容**

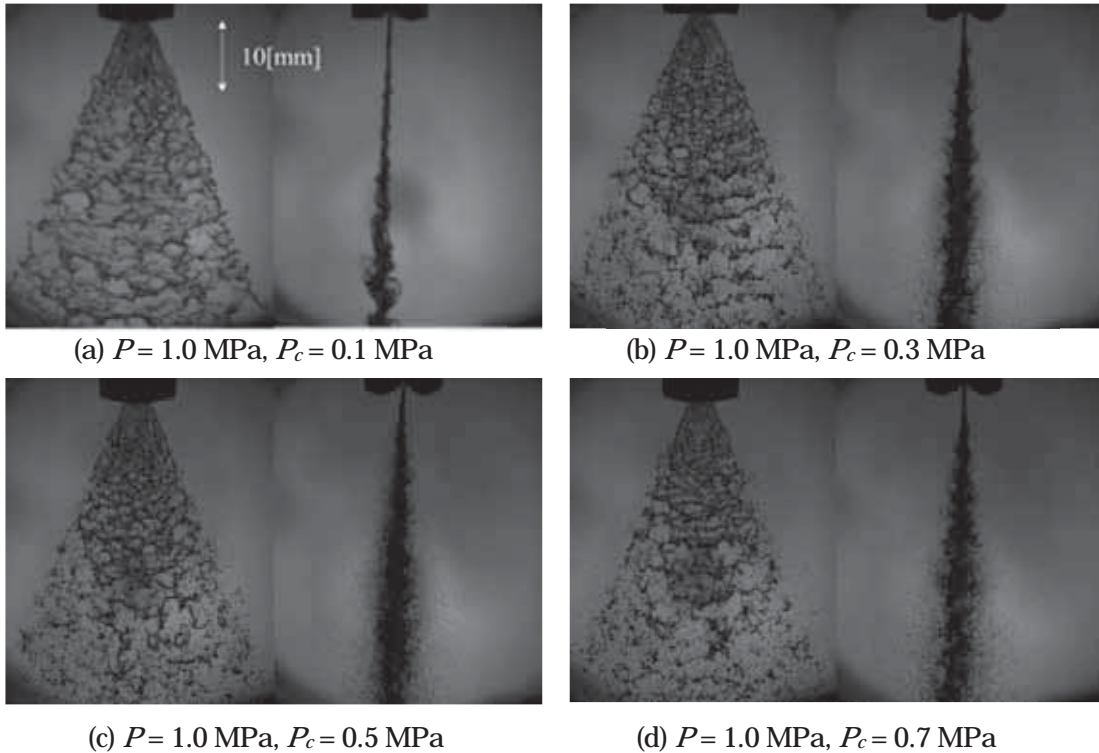
共同研究開始後よりスカイプによる遠隔会議によって数度に渡り本年度の研究計画や準備状況について協議を重ねた結果、平成 26 年度は常温水を使用した可視化試験により高圧スプレイノズル噴霧の微粒化特性を把握するとともに、背景圧力を変化させた場合の微粒化特性へ与える影響を定量的に解析することを目標とした。流体科学研究所における実験は、平成 26 年 9 月 16 日から 9 月 19 日まで 4 日間実施され、表 1 に示す試験条件範囲で 82 ケースの実験を行った。試験内容としては、常温水をスプレイノズルによりチャンバ内に噴射し、後方から光源により照射した状態で高速度ビデオカメラ（撮影速度 75000 [fps], シャッター速度 1/1000000 [s]）により撮影するバックライトイメージング法（シャドウグラフ法）による光学可視化試験と、レーザービームの干渉により噴霧内粒子の直径と速度を同時に計測することができる PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)システムを利用した粒子特性計測試験を実施した。

表 1：試験条件

噴射圧力 $P$ [MPa]	1.0 ~ 2.0
背景圧力 $P_c$ [MPa]	0.1 ~ 0.8
水温度 [K]	288

図 1 に代表的な光学可視化試験の結果を示す。図 1(a)~(d)は、噴射圧力を 1.0 MPa と固定し、背景圧力を 0.1 MPa から 0.7 MPa まで変化させた時の噴流可視化写真であり、噴流の縦方向と横方向から撮影したものである。図より、背景圧力を増大させるにつれて、噴流の乱れが増大して微粒化が促進されていることがわかる。また、噴流も幅も乱れの増大とともに大きくなっていることがわかる。PDPA による粒子の粒子直径や移動速度の計測結果からは、粒子直径が背景圧力と共に大きくなることや、粒子流束が減少することなどがわかり、

背景圧力との関係性についてモデル化検討を行った。



### 3. 研究目標の達成状況

最終的な成果としては高温水と液体窒素を目指している。本年度は初年度ということもあり、まずは実施可能な常温水の加圧噴射試験から実施した。装置検討の結果、さらなる設備・装置の設置が必要なのことがわかったので、今後は実験設備の準備を進める。

### 4. まとめと今後の課題

平成 26 年度は常温水の噴射試験により微粒化特性解明の足がかりを得た。背景圧力の影響などは流体力学的にモデル化を行うなどの成果を得ることができた。今後は当初の目的が達成できるように装置の改良に努める予定である。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] R. Watanabe, N. Hiramoto, H. Ishii and H. Kobayashi: Atomizing Characteristics of Water and Liquid Nitrogen Jets under High Pressure Environments, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 16-17.

\*[2] 石井浩貴, 平本成実, 渡邊力夫, 小林秀昭: 高温水及び液体窒素の高圧噴流における噴霧様態に関する研究, 第 23 回微粒化シンポジウム, (2014), pp. 23-26.

#### 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

課題番号	J14012
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	2年目

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

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

\*東北大学流体科学研究所, \*\*ロシア科学アカデミーシベリア支部・理論および応用力学研究所  
 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究の目的は二つの高機能ハイブリッドプラズマ流動システムを用いた液相微粒子プロセスより高機能性微粒子の創製と液相有機物質の分解である。共同研究1年目はDC-RFハイブリッドプラズマ流動システムを用いて液相微粒子原料より高機能性微粒子を創製し、メチレンブルーの脱色率を向上させた。2年目からは熱源としての熱プラズマジェットと活性化学種発生源としての非熱DBDプラズマをハイブリッド化した革新的な熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムを提案し、新たに構築した。このシステムを応用すると、液相有機物質の分解率が向上され、金属の表面処理に効果があると期待されている。しかし、このシステムをハイブリッド化するためにはそれぞれのシステムを最適化する必要がある。本研究では、革新的な熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムの作動条件を最適し、ハイブリッドプラズマ流を用いて金属の表面処理の効果に有効性があることを示す。

2. 研究成果の内容

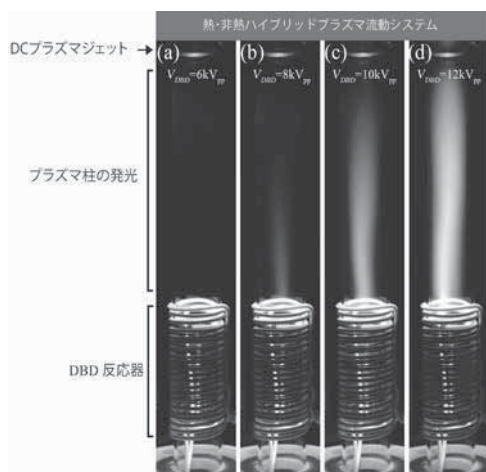


図1. 熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムの発光

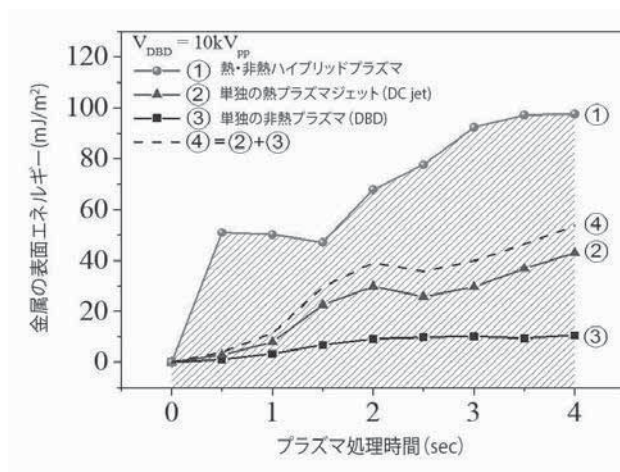


図2. プラズマ処理による金属の表面エネルギーの変化



異なる特性を有している二つのDCプラズマジェットとDBDプラズマをハイブリッド化し、革新的な熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムを構築した。最適化するため、イメージ解析、放電特性と熱流動特性を調べ、金属表面の親水性効果を定量化し、単独のプラズマ流と比較した。このシステムは非熱プラズマに印加する高電圧強度によってプラズマは敏感に変化する。ある印加電圧から熱・非熱ハイブリッドプラズマ流はDCプラズマジェットとDBDプラズマ反応器の電極の間に新しくプラズマ柱が生じる「図1」。DCプラズマジェットから飛び出したイオンや電子はDBDプラズマ反応器に構成された高電場からエネルギーを得て、プラズマ柱が生じると予想される。この高いエネルギーを有している荷電粒子はDBDプラズマと混合され、DBDプラズマを高活性化させる。しかし、荷電粒子が入ってもDBDプラズマの電圧波形の大きさは変わらず、DBDプラズマは活発化される。

革新的な熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムはDBDプラズマの印加電圧の強度によってプラズマ柱の安定性から二つのモードが存在することがわかった。印加電圧を増加するとある以上の印加電圧からは電圧波形が変化し、安定だったプラズマ柱が動き始め、結局不安定になる。以上の特性を解明した上で金属の表面処理による金属の親水性を評価した。アルゴンを用いた革新的な熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムはDCプラズマジェットとDBDプラズマを単独に使うことより金属の親水性が向上させた「図2」。また、安定なプラズマ柱を生成される作動条件の範囲でDBDプラズマの印加電圧を増加すると、金属の親水性が最大2.5倍向上した。プラズマ処理された金属の表面は吸収酸素の濃度が増え、高い酸素の濃度は表面の親水性と緊密な関係があることをわかった。

さらにプラズマプロセスで世界一流のミネソタ大学に約11か月滞在し、非熱プラズマを用いてコア-シェル構造を有する光触媒ナノ粒子の革新的創製技術とその評価を体得して来た。

### 3. 研究目標の達成状況

革新的な熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムの作動条件を最適化し、プラズマ表面処理による金属の表面エネルギーの増加からこのシステムの有効性を明らかにした。

### 4. まとめと今後の課題

熱・非熱ハイブリッドプラズマ流動システムを用いて液相微粒子プロセスより液相有機物質を分解させ、分解率を向上させる。

### 5. 研究成果 (\*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] O. P. Solonenko, H. Nishiyama, A. V. Smirnov, H. Takana and J. Jang: Visualization of Arc and Plasma Flow Patterns for Advanced Material Processing, *Journal of Visualization*, Vol. 18, No. 1, (2015), pp. 1-15.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \* [2] J. Jang, H. Takana, Oleg P. Solonenko, and H. Nishiyama: Hydrophilization of Metal Surface Using Thermal-Nonthermal Coupled Plasma Flow System, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 110-111.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J14013
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2014.4~2015.3
継続年数	3年目

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

酒井 康彦\*†, 早瀬 敏幸\*\*††  
 長田 孝二\*, 夏 爽\*, 周 毅\*, 渡邊 智昭\*, 竹内 康介\*  
 \*名古屋大学工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所  
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

昨年度に引き続き、初年度に開発した三次元直接数値計算 (DNS) コードを用いて、壁面からの熱輸送を伴う空間発展境界層に及ぼす外部 (主流) 乱れの影響を調査した。主流乱れとしては、角柱 (一片の長さ  $d$ ) によって生成される後流を用いた。計算領域は流れ方向の長さが  $48d$ 、断面が  $8d \times 8d$  の矩形流路であり、入口から  $3d$  の位置に角柱を設置した。角柱と加熱底壁面の距離  $c$  を  $c/d = 0.25, 3.0$  とした。計算の結果、 $c/d = 0.25$  の場合には角柱上部から発生する渦によって角柱から比較的近い領域 ( $x/d < 20$ ) で壁面摩擦係数が減少すること (図 1)、その一方で、角柱下部から発生する渦によって下壁面から流体への熱輸送 (Stanton 数  $St = h / (\rho C_p U_\infty)$  :  $h$  は熱伝達係数,  $\rho$  は流体の密度,  $C_p$  は定圧比熱,  $U_\infty$  は一様流速) が著しく促進されることが明らかとなった。これにより、外部乱れ導入により、壁面摩擦抵抗低減と壁面からの熱輸送の大幅な促進が可能であることが示された。その他、LES コードの開発や噴流の乱流/非乱流界面の構造とスカラー輸送に関する数値計算も行った。

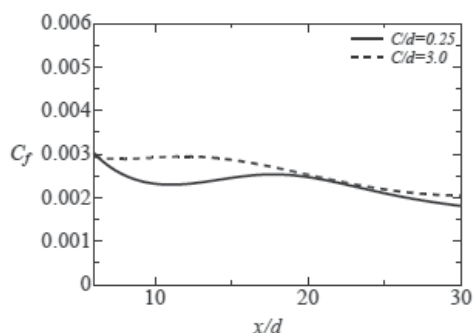


図 1 : 壁面摩擦係数の主流(x)方向分布

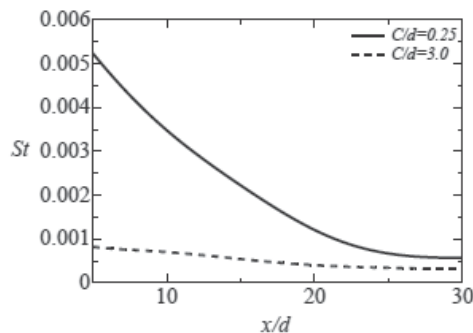


図 2 : Stanton 数の主流(x)方向分布

### 3. 研究目標の達成状況

空間発展乱流の代表として壁面境界層を取り上げ、その乱流構造および壁面摩擦抵抗や壁面熱伝達係数が外部乱れの導入によってどのように変化するかを数値計算により調べた。その結果、外部乱れ導入により壁面摩擦抗力低減と壁面からの熱輸送の大幅な促進が可能であることを明らかにした。また、LES コードの開発や噴流の乱流/非乱流界面の構造とスカラー輸送特性に関する数値計算も行った。これらは、当初の研究目標を達成するものである。また、以下に示すように、共同研究結果を論文や国際会議、国内会議において広く公表した。

### 4. まとめと今後の課題

本研究により、壁面境界層に対して外部乱れ導入による熱流動制御が可能であることが示された。今後は、噴流等の壁面境界層とは異なる空間発展乱流についても外部乱れ導入による熱流動制御が可能であるか否かを調査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] S. Xia, Y. Ito, K. Nagata, Y. Sakai and T. Hayase: Numerical Study on a Boundary Layer with Heat Transfer Affected by a Wake of a Square Bar, *J. Fluid Sci. Tech.*, 9 (2014), 14-00042.
- [2] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito and T. Hayase: LES-Lagrangian Particle Method for Turbulent Reactive Flows based on the Approximate Deconvolution Model and Mixing Model, *J. Comput. Phys.*, accepted.
- [3] N. Wu, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito and T. Hayase: Study on the Dynamics and Geometry of Developing Planar Jets in View of the Invariants of the Velocity Gradient Tensor, *J. Hydrodyn.*, accepted.
- [4] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito and T. Hayase: Vortex Stretching and Compression Near the Turbulent/Nonturbulent Interface in a Planar Jet, *J. Fluid Mech.*, 758 (2014), pp.754-785.
- [5] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito and T. Hayase: Enstrophy and Passive Scalar Transport near the Turbulent/Non-Turbulent Interface in a Turbulent Planar Jet Flow, *Phys. Fluids*, 26 (2014), 105103.
- [6] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito and T. Hayase: Reactive Scalar Field near the Turbulent/Non-Turbulent Interface in a Planar Jet with a Second-Order Chemical Reaction, *Phys. Fluids*, 26 (2014), 105111.
- [7] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito and T. Hayase: Wavelet Analysis of Coherent Vorticity near the Turbulent/Non-Turbulent Interface in a Turbulent Planar Jet, *Phys. Fluids*, 26 (2014), 095105.
- [8] Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, H. Suzuki, Y. Ito, O. Terashima and T. Hayase: Relevance of Turbulence behind the Single Square Grid to Turbulence Generated by Regular- and Multiscale-Grids, *Phys. Fluids*, 26 (2014), 075105.
- [9] Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, H. Suzuki, Y. Ito, O. Terashima and T. Hayase: Development of Turbulence behind the Single Square Grid, *Phys. Fluids*, 26 (2014), 045102.
- [10] N. Wu, Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki, O. Terashima and T. Hayase: Influence of Reynolds Number on Coherent Structure, Flow Transition and Evolution of Plane Jet, *J. Fluid Sci. Tech.*, 9 (2014), 13-00288.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [11] Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, Y. Ito and T. Hayase: The Helical Behavior of the Single-Square Grid-Generated Turbulence, *Proc. of the 11th Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp. 544-545.
- [12] S. Xia, Y. Ito, K. Nagata, Y. Sakai and T. Hayase: Heat Transfer in a Developing Region of a Boundary Layer Affected by a Wake of a Square Bar, *Proc. of the 11th Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp. 606-607.
- [13] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito and T. Hayase: Implicit Large Eddy Simulation of a Scalar Mixing Layer in Fractal-Grid Generated Turbulence, *Bulletin of the International Conference "Turbulent Mixing and Beyond"*, Trieste, Italy, (2014), pp.14-15.
- [14] Y. Sakai, T. Watanabe, K. Nagata, Y. Ito and T. Hayase: Non-Equilibrium Transport of Enstrophy and Scalar near the Turbulent/Non-Turbulent Interface in a Planar Jet, *JSPS Supported Meeting on Interscale Transfers and Flow Topology in Equilibrium and Nonequilibrium Turbulence*, Sheffield, UK, (2014).
- [15] T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, O. Terashima, Y. Ito and T. Hayase: Effect of Free Stream Turbulence on the Entrainment Characteristics of Jets, *American Physical Society 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, San Francisco, USA, (2014).
- \*[16] Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito, T. Hayase, S. Xia, Z. Yi, T. Watanabe, A. Sasoh, N. Wu, K. Takeuchi: Effects of External Disturbances on Spatial Development of Turbulence and toward the Control of Thermo-Fluid Dynamics (Cases of Boundary Layer, Wake, and Jet), *Proc. of the 14th Int. Symp. on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 170-171.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

Project code	J14014
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	3rd year

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

Masami Nakano\*†, Mikols Zrinyi\*\*††

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Laboratory of Nanochemistry, Semmelweis University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Electrorotation is the circular movement of an electrically polarized micron sized particle or material. Wide range of applications (e.g. microscopic motor) motivates researchers to find materials showing electrorotation with micro-fabrication possibilities. In this research, we proposed to study the electrorotation phenomena of epoxy based polymer rotors and so far have developed the sub-millimeter sized micro-motors for MEMS utilizing epoxy based polymer that can be fabricated by photolithography. Polymer rotors of different shape and size have been prepared, and the non-load rotational properties will be investigated in uniform DC electric field.

### 2. Details of program implement

The epoxy based polymer rotors of three different shapes: disk, ring (hollow cylinder), gear with asymmetric teeth (Fig.1) were made of SU8 2075 photoresists at two different thicknesses and four different diameters by the photolithography technique. Their diameter was varied between 100 to 500 microns with heights of 20 - 40 microns. Electrorotation was studied in oil mixture containing substantial amount of triglycerid of oleic-, palmitic-, and linoleic acids. We have studied the influence of DC electric field intensity on the speed of rotation by using the experimental device to apply uniform electric field perpendicularly to the axis of the polymer rotors. The rotation was followed by optical microscope (OLYMPUS, Japan) equipped by a high speed camera (4500 fps, Photron, Japan). The angular frequency of the rotation was determined by recording the spinning motion of the disk on the high speed camera.

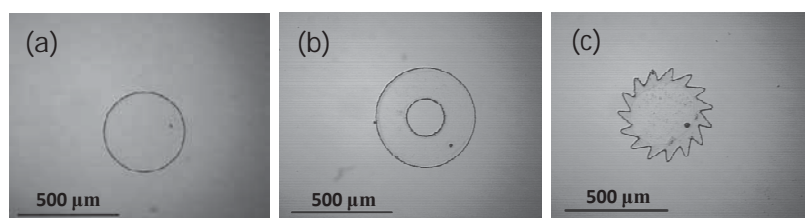


Figure 1: Epoxy based polymer rotors. (a) disk, (b) hollow cylinder, (c) gear with asymmetric teeth.

### 3. Achievements

We first determined the dependence of spinning rate on the electric field intensity for the disk-shaped rotors. In Fig.2, it can be seen that with increasing electric field intensity, the rate of spinning significantly increases and within the experimental accuracy the dependence is linear. Figure 2 also indicates that there is a significant size

effect on the speed of rotation. At the same electric field intensity, the rotation speed of the thicker disk (38 micron) is higher, and the smallest disk (100 micron) performs the most intensive rotary motion. The highest rotation speed that we were able to monitor was around 3000 rpm.

At the same electric field intensity, the smaller hollow cylinder and gear perform more intensive rotary motion similarly to the rotation of polymer disks. We always observed random selection of direction of rotation for disks and hollow cylinders. The controlled rotation direction can be achieved by using gears with asymmetric teeth. The asymmetric teeth were shaped using different angles on the drive side and coast side of the teeth (see Fig. 1(c)). Due to the presence of asymmetric rotor teeth, we always observed directed rotation for these rotors.

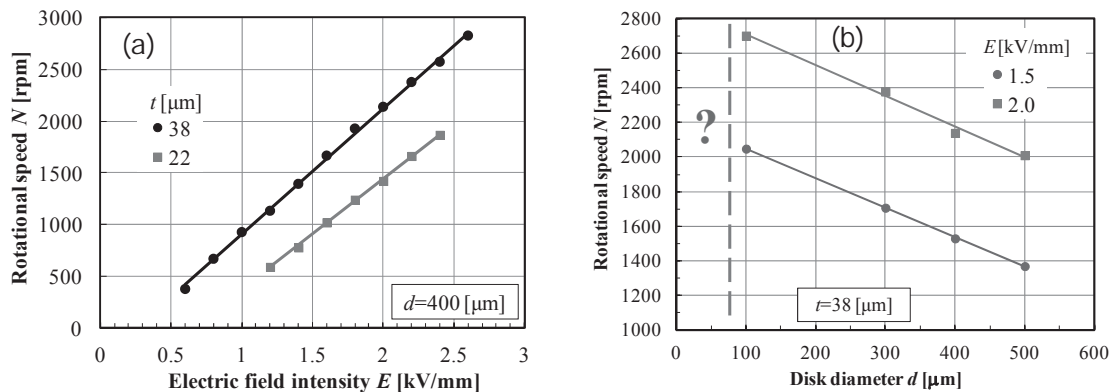


Figure 2: Dependence of rotational speed  $N$  of polymer disks on electric field intensity  $E$ , (a) Effect of disk thickness  $t$  at constant diameter, (b) Effect of disk diameter  $d$  at constant thickness.

#### 4. Summaries and future plans

Disk, hollow cylinders and gear with asymmetric teeth of different size as prototypes were successfully manufactured by mask lithography technique. The sub-millimeter sized rotors perform very intensive rotation in uniform DC electric field. The extrapolation of the observed trends suggests that motors of several micrometers diameter could be built that could rotate with at least the rate presented here. Regarding the driving principle of the micromotors presented here, it may open new perspectives for their use in several MEMS applications.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] R.A Bauer, L. Kelemen, M. Nakano, A. Totsuka, and M. Zrinyi: Fabrication and electrorotation of novel epoxy based micromotor working in uniform DC electric field, *Smart Materials and Structures*, (2015), under review.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - \*[2] M. Zrinyi and M. Nakano: Development of Micro-Motor using Electrorotation of Smart Polymer, *Proceedings of the 14th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp.114-115.
  - [3] M. Zrinyi and M. Nakano: Novel Electroactive Polymer for Micro-Motor Development, *Proceedings of 11th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp.404-405. (Invited)
  - \*[4] M. Nakano, T. Okumura and M. Zrinyi: Micro-Motor Consisting of Electro-Active Polymer Composite Rotor in Dielectric Liquid, *Proceedings of 11th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp.406-407.

課題番号	J14015
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	3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空力自励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し、単体の発音システムとしては研究が進んでいるが、共鳴体との干渉については不明なことも多い。そこで本研究は、実験および直接音解析を併せて行い、ホールトーンに対する尾管の影響を詳細に解明することが目的である。

### 2. 研究成果の内容

長さ 1562 mm の尾管を付けたホールトーンシステムを構築した。ノズル直径、下流板の穴直径、尾管直径は共に 51 mm であり、ノズル出口と下流板間の衝突距離は 50 mm である。実験では噴流速度を 20 m/s 以下の範囲で行った。噴流速度が 11 m/s 未満の時、尾管がないオリジナルのホールトーンと同様に流速の変化に対して発振周波数が線形的に変化した。噴流速度が 11 m/s 以上では、15 m/s まで発振周波数が一定となるロックイン現象が見られた。レーザー・スモーク法により噴流せん断層の可視化を行った。その結果、ロックイン現象が起きている際、噴流せん断層が噴流の外側に向かって曲がる現象(フラッピング現象と名付けた)が見られた。噴流速度が 12 m/s の場合を対象として、直接音解析を行った。本解析は、衝突距離に対して尾管が非常に長く、スティフなものであるが、実験で見られた上記現象が、数値解析でも見られ、数値解析は実験と定性的に一致することが分かった。

### 3. 研究目標の達成状況

尾管を付けたホールトーンシステムの実験計測および直接音解析を行い、ホールトーンに対する尾管の影響を明らかにすることが出来た。フラッピング現象など、共鳴体の存在が発音周波数を変化させるにあたり、どのように流れ場を変化させるのか知ることが出来た。研究目的に対するこれまでの全体達成度は75%である。

### 4. まとめと今後の課題

尾管を付けたホールトーンシステムの実験計測および直接音解析を行い、ホールトーンに対する尾管の影響を明らかにした。今後、尾管の存在がホールトーンの流れ場に与える影響や尾管長さの影響を詳細解明することが課題である。

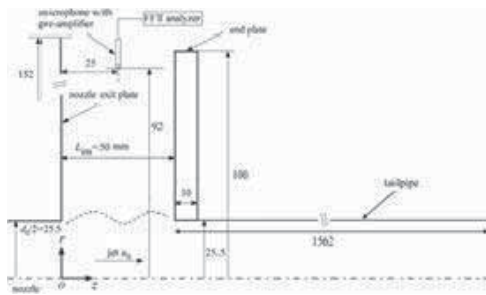


Fig. 1 Hole tone system with a tailpipe

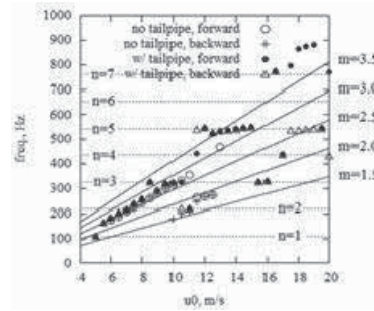


Fig. 2 Variation of the most dominant peak tone frequency with jet speed  $u_0$



(a) When the shear layers impinge on the hole edge



(b) When the shear layers bend outward

Fig. 3 Flapping motion of jet shear layers visualized by laser-smoke method (experiment,  $u_0=12$  m/s)



(a)  $t=72 L_{im}/c_\infty$



(b)  $t=144 L_{im}/c_\infty$



(c)  $t=216 L_{im}/c_\infty$



(d)  $t=288 L_{im}/c_\infty$



(e)  $t=360 L_{im}/c_\infty$



(f)  $t=432 L_{im}/c_\infty$

Fig. 4 Computed shear layers visualized in terms of vorticity magnitude ( $u_0=12$  m/s),  $c_\infty$ : sound speed,  $L_{im}$ : impingement length

## 5. 研究成果 (\*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: Disorganization of a hole tone feedback loop by an axisymmetric obstacle on a downstream end plate, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 757, pp. 908-942.

### 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 Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 166-167.

[3] K. Matsuura and M. Nakano: Effects of a Tailpipe on Hole Tone Phenomena, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Fluid Dynamics*, Sendai, (2014), pp. 422-423.

課題番号	J14016
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	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	2年目

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

大平 勝秀\*†, 小林 弘明\*\*††

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

\*東北大学流体科学研究所, \*\*宇宙航空研究開発機構(JAXA)

\*\*\*東北大学大学院工学研究科博士前期課程

†申請者, ††所外対応研究者

## 1. 研究目的

JAXA ではエミッションフリー航空機、極超音速旅客機技術の開発を実施中であり、液体水素燃料システムがキー技術となる。エンジン始動時、巡航時において、液体水素は配管内で極低温気液二相状態となる。低温時に発生する配管収縮はコルゲート管を多用して吸収することになる。コルゲート管を流動する単相流体の圧力損失計算式の報告があるが、申請者の液体窒素実験結果と比較するとかなり大きな値が得られる場合があり、液体単相においても圧力損失の推定精度は十分ではない。また、気液二相流体のコルゲート管の圧力損失の報告は殆どない状況である。本研究では、気液二相液体窒素が形状の異なる2種類のコルゲート管を流動する際の圧力損失特性を明らかにし、サブクール二相流、飽和二相流の各々について、形状の違いをパラメータとして気液二相圧力損失を統一的に予測できる式を提案する。

## 2. 研究成果の内容

実験に使用した2種類のアニューラー型ステンレス製コルゲート管の形状は、内径  $d = 12, 15$  mm, ピッチ  $s = 3.3, 3.0$  mm, 山の高さ  $t = 2.75, 2.20$  mm, 圧力損失測定長さ 600 mm である。上流には気液二相流の熱平衡クオリティを制御する内径 15 mm の予熱管 (熱流束  $q = 0, 10, 20$  kW/m<sup>2</sup>), 下流の可視化部には内径 15 mm のポリカーボネート樹脂製平滑円管を取り付けた。図1に非加熱時(液体単相)の15 mm 管の管摩擦係数  $\lambda$  と  $Re$  数を示す。実験結果は Daniels らが報告している遷移領域での  $Re$  数の範囲であり、Daniels らの結果と傾向が一致する。よく知られている Hawthorne 式では  $\lambda$  が一定であり実験結果を再現できない。図2は2種類のコルゲート管形状を考慮した ( $\phi = (t/d) \cdot (s/d)$  をパラメータ) 予測式を用いて実験値と比較した結果である。±10%程度で圧力損失を予測できる。図3はサブクール二相流(予熱管出口クオリティが負)の圧力損失を評価するため、管形状とクオリティを考慮した予測式を用いて実験値と比較した結果である。図中に下流で観測した流動様相を示す。大部分の実験値を±15%程度で予測できる。飽和二相流(予熱管出口クオリティが正)の12, 15 mm 管の圧力損失を平滑管の McAdams の均質流モデル, Lockhart-Martinelli 相関を用いた Chisholm の分離流モデルで評価した。均質流モデルは実験値を-30%以下で過小評価し、分離流モデルは実験値を±30%以内で評価できない。図4は飽和二相流の12, 15 mm 管の圧力損失の実験値と、クオリティと2種類のコルゲート管形状を考慮した予測式の値を比較した結果である。大部分の実験値を±30%以内で予測可能である。



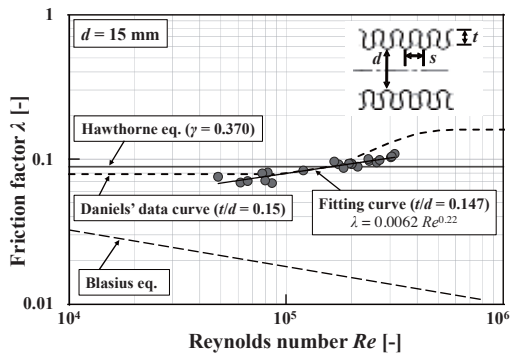


図 1：管摩擦係数と  $Re$  数の関係（15 mm 管）

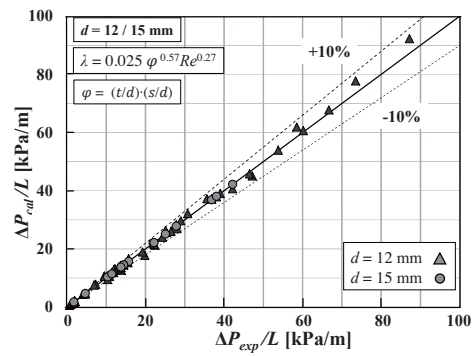


図 2：予測式による液体単相圧力損失評価

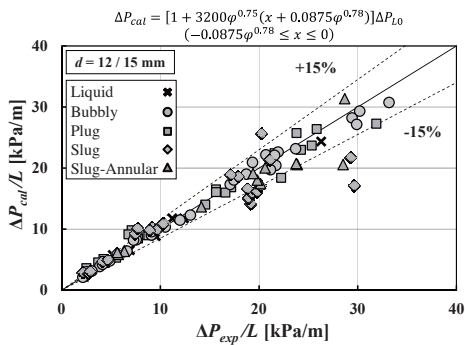


図 3：予測式によるサブクール二相圧力損失評価

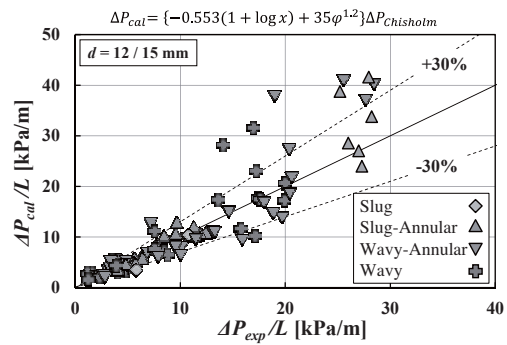


図 4：予測式による飽和二相圧力損失評価

### 3. 研究目標の達成状況

内径 12, 15 mm の 2 種類のコルゲート管を流動する液体窒素単相流の圧力損失, および気液二相流のクオリティ, 流動様式と圧力損失の関係が明らかになった. 液体単相の実験結果は Daniels らが報告している遷移領域での  $Re$  数の範囲であり, 管摩擦係数は Daniels らの結果と傾向が一致した. サブクール二相流, 飽和二相流の圧力損失を各々の場合について, クオリティとコルゲート管の形状の違いを考慮に入れた圧力損失予測式を提案して実験値との評価を実施した結果, 精度の良い予測式が得られた. 所期の研究目標は達成された.

### 4. まとめと今後の課題

得られた成果を JAXA にて実施中のエンジン設計データに反映する. また, コルゲート管は超伝導送電ケーブル等極低温機器に広く使用されており, 提案する気液二相状態の圧力損失予測式の適用により機器の性能向上が期待できる.

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

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

\*[1] J. Ohta, K. Ohira, K. Miyata, K. Takahashi, H. Kobayashi, H. Taguchi, M. Hongoh, T. Kojima: Pressure Drop of Vapor-Liquid Two-Phase Nitrogen Flow in a Corrugated Pipe, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 10-11.

[2] 太田純平, 大平勝秀, 宮田一司, 高橋幸一, 小林弘明, 田口秀之, 青木五男: コルゲート管内における液体窒素気液二相圧力損失, 第 90 回 2014 年度低温工学・超電導学会講演概要集 (2014), p. 207.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J14017
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

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

高橋 直也\*†, 服部 裕司\*\*††

畠山 望\*\*\*, 宮崎 武\*\*\*\*, 石原 雅也\*\*\*\*

\*東京電機大学工学部機械工学科, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*東北大学未来科学技術共同研究センター/流体科学研究所

\*\*\*\*電気通信大学大学院情報理工学研究科知能機械工学専攻

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

地球流体现象に現れる3次元渦構造の相互作用をf平面一様密度勾配の準地衡風近似に基づいて解析し, その統計力学的性質を調べる. 異符号渦の混在する乱流場でも, 高エネルギー(負温度)領域では同符号渦のクラスターリングが起きる. スペクトル法による大規模数値計算の結果と最大エントロピー理論に基づいて導出される平均場方程式の平衡解を比較することで, 平衡渦分布のエネルギー依存性を調べることにより, 地球流体運動における乱流場の特徴を明確にできる. 大規模数値シミュレーションにより, 微細な渦構造の変化, エネルギー逆カスケードやスカラー異常輸送現象など, 三次元非圧縮性流体では観察されない地球流体现象の詳細なメカニズムが解明できると期待される.

## 2. 研究成果の内容

当初, 準地衡風流れのフーリエ・スペクトル法で離散化したコードは並列化できていなかったため, 解像度が低く(128の三乗)制限されていた. これにより非線形相互作用が行われる前に減衰の影響が強くなり現れてしまい, 渦のクラスターリングが起こりにくい. これを解消するため, 高度な並列化を流体研服部教授から助言を受けながら行なった. その結果, 大規模な解像度(512の3乗)の計算が可能となった. これにより微細な渦構造とそのクラスターリング過程まで捉えられると期待されたことから, 平衡渦分布のエネルギー依存性を調べ, 最大エントロピー理論との比較が可能となった. 得られた結果をこの共同研究への参加者で議論することにより, 準地衡風渦モデルのための基礎的な知見を得た.

準地衡風流れにおける渦の振舞いの直接数値シミュレーション(Direct Numerical Simulation, DNS)を行なった. DNSによる流れ場でエネルギー散逸が落ち着いた準定常状態では, 異符号を持つ2つの円柱渦が形成された. この結果は, 最大エントロピー法を用いて理論的に得た, ポテンシャル渦度が垂直方向に熱的に最大エントロピーを持つ状態と非常によく似ている. またこの渦対の形成は, シヤノンエントロピーを最大化するための非粘性過程の結果と理解される.

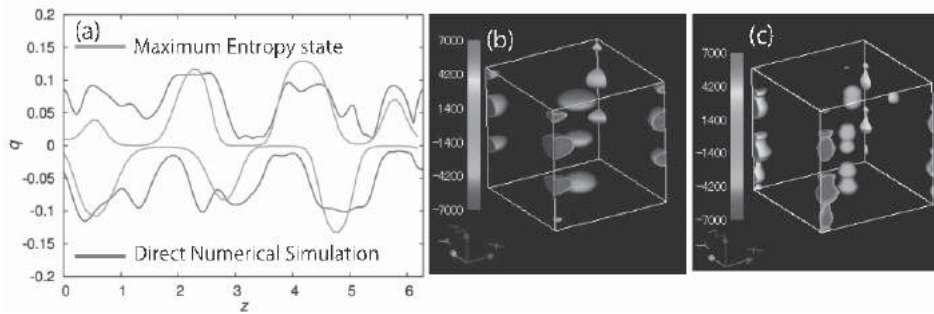


図1：ポテンシャル渦度の，最大エントロピー理論と直接数値シミュレーションとの比較．(a)ポテンシャル渦度の鉛直方向分布，(b)最大エントロピー理論によるポテンシャル渦度の等値面図，(c)DNSによる渦度の等値面図．

### 3. 研究目標の達成状況

直接数値シミュレーションプログラムについて，並列化による大規模解像度(512 の 3 乗)への対応と高速化ができた．精度向上のため，エイリアシングエラー除去の方法を，より高い精度の位相シフト法に切り替えることができた．得られた結果は最大エントロピー法による理論解析結果と比較しうるものであることがわかった．一方で，当初予定していた 1024 の 3 乗のプログラム実行を行うことはできなかった．これはプログラム全体の並列化やエイリアシングエラー対策の精度向上に手間取ったためである．

### 4. まとめと今後の課題

準地衡風乱流における高エネルギー領域での渦の動力学を解明するため，準地衡風流れの直接数値シミュレーションを行なった．流れ場は 2 つの渦対を形成し，準定常状態に落ち着いた．この結果は最大エントロピー法によって得られた結果とよく似ていることがわかった．

今後の課題として，1024 の 3 乗の大解像度での実行，および理論との比較を行う．このためには，フーリエ変換による処理の見直し，メモリ使用量を減じたいうえで速度向上を行う必要がある．理論との比較のためには，流れ場の統計解析のため，渦の集合(クラスタリング)の数え上げを自動的に行うアルゴリズムを用いた処理が必要となる．

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議，解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] T. Miyazaki, Y. Shimoda, Y. Konno: Clustering and Entropy Growth of Quasi-geostrophic Point Vortices under Periodic Boundary Conditions, *Japan-Russia Workshop on Supercomputer Modeling, Instability and Turbulence in Fluid Dynamics*, Moscow, (2015), P.28.

\*[2] Masaya Ishihara, Naoya Takahashi, Takeshi Miyazaki, Nozomu Hatakeyama and Yuji Hattori: Vortex Dynamics of the High Energy (Negative Temperature) State in Quasi-Geostrophic Turbulence, *Proceedings of the 14th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp.174-175.

#### 3) その他 (特許，受賞，マスコミ発表等)

なし

Project code	J14018
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano micro technology
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	3rd year

### Investigation of Shock Waves Propagation on Microscales

Yevgeniy Bondar\*†, Kaoru Maruta\*\*††  
 Georgy Shoen\*, Dmitry Khotyanovsky\*

\*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 the shock wave propagation in microchannels for different Knudsen (Reynolds) numbers. Shock propagation is considered for conditions when CFD methods are still valid as well as for conditions where a kinetic description of the flow is required. Shock wave propagation in a narrow cylindrical shock tube is studied in detail.

#### 2. Details of program implementation

The main goal of this year was to study viscous and rarefaction effects on shock wave propagation in a narrow shock tube at low initial pressure. The shock wave is generated after the diaphragm rupture at the initial time instant. We performed Navier–Stokes simulations of shock wave propagation in a cylindrical shock tube. The flow was considered as axisymmetric. The flow parameters corresponded to the experiments (Duff, Phys. Fluids, 2, 1959): the internal diameter of the tube was 28.575 mm, and the tube length was 7.5 m from the diaphragm to the right boundary of the computational domain. The tube wall is at constant temperature equal to the initial gas temperature 300 K. Argon is both the driver and the driving gas. Boundary conditions on the wall were specified with account for velocity slip and temperature jump. The pressure on the right from the diaphragm was fixed at  $p_0=66.66$  Pa, while the initial pressure ratio  $p_2/p_0$  was varied. At flow parameters considered herein (small ratio of the tube diameter to its length and low initial pressure), the gas-dynamic characteristics of the flow are greatly influenced by viscous effects. Note that the Reynolds number based on the tube diameter and initial values of sound speed and gas viscosity was  $Re_0=431$  in this case.

The flow structure behind the propagating shock wave and the contact surface is illustrated in Fig. 1. Due to the influence of flow viscosity, a thick boundary layer develops on the tube walls behind the shock wave. As a result, the shock wave is convex to the flow. The contact surface, which follows the shock wave, is greatly smeared by the flow viscosity and is concave to the flow.

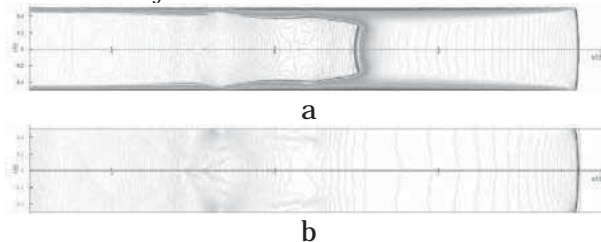


Figure 1 : Mach number (a) and pressure (b) contours at  $p_2/p_0 = 100$ .

The results of the simulations show that, due to the influence of flow viscosity, the shock wave is greatly attenuated compared to the inviscid theory. For example, the inviscid relations predict the initial pressure ratio  $p_2/p_0=11.9$  for a shock wave with the Mach number  $M_s=1.6$ . In the experiments the shock wave with  $M_s = 1.6$  was observed in some range of distances along the tube only at the initial pressure ratio  $p_2/p_0 \approx 125$ , which is higher than the inviscid value by an order of magnitude. This was confirmed in our computations (Fig. 2a). The numerical results obtained on a sequence of grids with varying cell sizes  $\Delta r/R$  are independent of the grid resolution and agree well with the experimental values. At lower initial pressure ratios (see, e.g.,  $p_2/p_0=50$  in Fig. 2a) the shock wave Mach number  $M_s$  along the tube axis decreases down to the value of  $M_s=1$ , beyond which the shock wave degenerates into a disturbance propagating with a subsonic velocity. Our numerical results show that shock propagation in a viscous gas in a large range of distances along the axis is maintained by the contact surface, which follows the shock. The shock velocity exceeds the velocity of the contact surface only in the range of distances  $x < 1$  m from the diaphragm (Fig. 2b). In this region, the shock wave decelerates, while the contact surface accelerates. At larger distances, the shock and contact surface propagate with approximately the same speed.

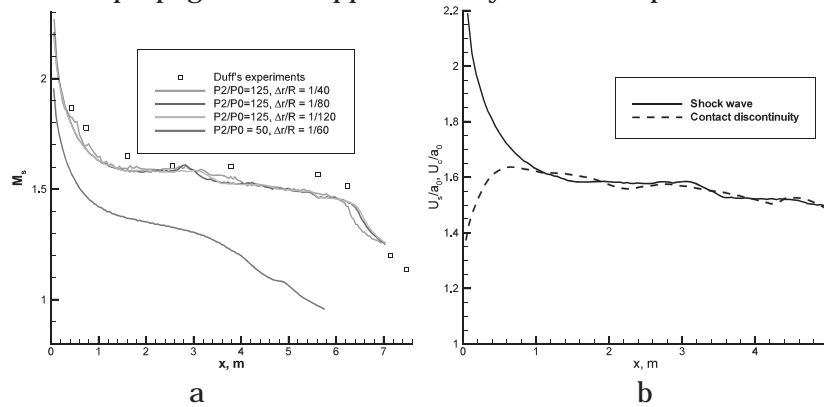


Figure 2 : Shock Mach number (a) and variation of the shock and contact surface velocities (b) along the tube axis.

### 3. Achievements

The expected results were achieved completely.

### 4. Summaries and future plans

Computations of shock wave propagation in a viscous shock tube demonstrate significant shock wave attenuation in comparison with the inviscid theory. The results of the computations at flow parameters corresponding to the experiments agree well with the experimental data.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

\*[1] Dmitry Khotyanovsky, Georgy Shoen, Yevgeniy Bondar, Kaoru Maruta: Investigation of Shock Waves Propagation on Microscale, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp.132-133.

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

Project code	J14019
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	3rd year

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

Yevgeniy Bondar\*†, Shigeru Yonemura\*\*††, Alexander Shevyrin\*, Anton Shershnev\*,  
Pavel Vashchenkov\*

\*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of  
Russian Academy of Science

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The purpose of the project was the development and numerical implementation of collision models and algorithms for the description of ionization and thermal radiation phenomena in hypersonic flows around space vehicles with the use of the kinetic approach (DSMC method). A new numerically efficient formulation of the collision models for ionization processes was proposed. Application of the models to high-enthalpy flows is presented.

### 2. Details of program implementation

The main goal of the present work was the development of collisional models for weakly ionized plasma environment beside super-orbital reentry vehicles. The high collisional frequency and the lightweight of electrons in comparison with gas molecules deteriorate the computational efficiency of the DSMC method. A new, energy-conserving, computationally efficient model of the reacting plasma for the DSMC method was developed. We utilized the assumptions of local neutrality, fast Maxwellization of the electron velocity distribution function, and slow relaxation rate of electron temperature. The simulation of electron-electron, electron-ion, and electron-neutral interactions was avoided in this model. Reactions with an electron as one of the reactants were implemented outside the scope of the collisional procedure. These reactions are dissociative recombination ( $AB^+ + e \rightarrow A + B$ ) and electron impact ionization ( $A + e \rightarrow A^+ + 2e$ ). The latter reaction is known for its high activation energy. Therefore, its implementation through the collisional procedure (usual technique for the DSMC method) will bring us to an extremely low reaction probability and, hence, a very high computational cost of the simulation.

New models for the DSMC method were constructed in order to define the reaction probability for the reagents in the collisional cell. The reaction probability can be defined as a function of reagent energy  $P(E)$ . Taking into account the normalization of the distribution functions to unity, the recombination rate coefficient  $k$  can be then expressed through the energy distribution function  $f(E)$  as

$$k(T) = \int_0^\infty P(E) f(E) dE.$$

This relation allows us to determine a particular dependence of  $P(E)$  for a given function  $k(T)$ . In contrast to the traditional approach to constructing chemical models for the DSMC method, where the reactions are usually implemented as a part of the collisional process, the proposed procedure allows us to determine the probability of the dissociative recombination and electron impact ionization for two randomly chosen reagents in the spatial cell. The new ionization models for the DSMC method were implemented into the SMILE++ software system. Excellent agreement of the calculated reaction rates with given temperature dependences was obtained during validation calculations. For the  $NO^+ + e \rightarrow N + O$  and  $N + e \rightarrow N^+ + 2e$  reactions, this agreement is illustrated in Fig. 1. The DSMC calculations were performed in a homogeneous case, where the initial reagent concentrations and temperature were assumed to remain unchanged in the course of the reactions (equilibrium bath). Validation of an improved model of dissociative recombination reactions against the RAM-C II in-flight data showed that the computed electron density agrees well with the experiment.

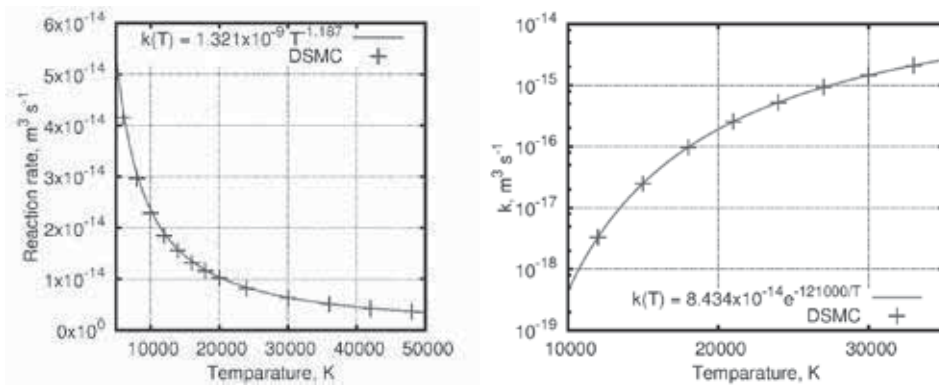


Figure 1 : Comparison of the calculated rates of ionization processes with a given reaction rate coefficient. Left: NO+ recombination; right: atom N ionization. A series of axisymmetric and 3D computations of flows for orbital and super-orbital velocities of reentry was performed. The plasma environment of super-orbital space vehicles was modeled by new models. Examples of the calculated electron density for the ORION-like capsule and Stardust reentry capsule are shown in Fig. 2.

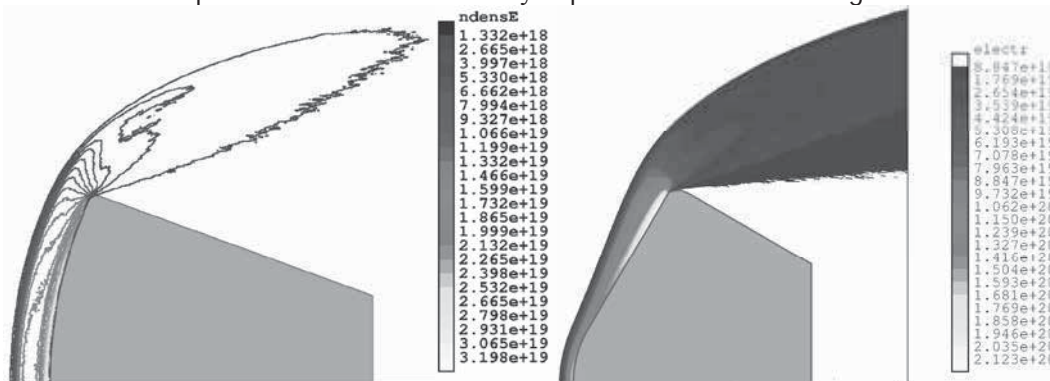


Figure 2 : Calculated electron density fields. Left: ORION-like capsule at 11 km/s and 90 km altitude; right: Stardust capsule at 12.8 km/s and 80 km altitude.

### 3. Achievements

All of the expected results were achieved.

### 4. Summaries and future plans

Molecular models of ionization processes and a kinetic model of spacecraft plasma environment were developed and implemented into the SMILE++ system. Their validation against experimental data presented. Spacecraft aerothermodynamics for different parameters of the reentry was studied, and plasma parameters (density and temperature of electrons and ions) were obtained. The models are suitable for analyzing the effect of ionization and radiation processes on the flowfield, as well as aerothermodynamic characteristics.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

\*[1] Alexander Shevyrin, Yevgeniy Bondar, Anton Shershnev, Pavel Vashchenkov, Shigeru Yonemura: Numerical studies of rarefied chemically reacting flows about space vehicles, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai*, (2014), pp. 14-15.

[2] Pavel Vashchenkov, A. Kashkovsky, A. Shevyrin, Shigeru Yonemura: Numerical Simulation of High-Altitude Aerothermodynamics of Prospective Spacecraft by the DSMC Method, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Flow Dynamics, Sendai*. (2014), pp. 102-103.

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

Project code	J14020
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	3rd year

## Investigation of Subsonic–Supersonic Hybrid–Stabilized Argon–Water Electric arc with Inhomogeneous Mixing of Plasma Species

Jiří Jeništa\*†, Hidemasa Takana\*\*, Satoshi Uehara\*\*, Hideya Nishiyama\*\*††, Milan Hrabovský\*

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

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Numerical simulation of physical processes in the hybrid–stabilized argon–water electric arc for broad range of operational parameters and plasma flow regimes with inhomogeneous mixing of plasma species in the discharge. Comparison of the calculated results with experiments.

### 2. Details of program implement

1) A number of new calculations of turbulent effects has been carried out in the hybrid–stabilized electric arc for currents 300–600 A using the existing code, but for more values of argon mass flow rates between 22.5–40 slm (standard liters per minute). Turbulence is modelled by Large–eddy simulation (LES) using the Smagorinsky sub–grid scale model with a Van Driest damping function near the walls.

2) Investigation of mixing of hydrogen, oxygen and argon plasma species within the discharge region of the hybrid arc has been started by the combined diffusion coefficients method , including the following tasks:

- a) derivation of the mass diffusion flux in the additional species equation, including the diffusion processes due to concentration, temperature, pressure and electric field gradients;
- b) normalization of the equation terms and programming;
- c) tuning the convective, diffusive, and source terms;
- d) modification of the existing code – implementation of the correct boundary conditions, ratio of specific heats, etc.

### 3. Achievements

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

(a) A larger number of new calculations of turbulent effects confirmed that turbulence is not a significant phenomenon in the discharge and in the near–outlet regions of the hybrid–stabilized argon–water electric arc. The result of this more detailed research, published in [2], is consistent with our previous findings and conclusions.

(b) Mixing of plasma species has been studied so far for 300–600 A and for 22.5 and 40 slm of argon. Preliminary results of our simulations show that:

- Mixing of water and argon plasma species is inhomogeneous under the all studied conditions.
- Argon species are dominant in the central regions of the arc, water ones in arc fringes. For higher currents argon mass fraction in the central arc region increases.



- Temperature and concentration (ordinary) diffusions are the most dominant contributions in the argon mass diffusion flux. Diffusion due to pressure gradients is lower and due to the electric field is nearly negligible.
- These first results qualitatively agree with our former experiments.

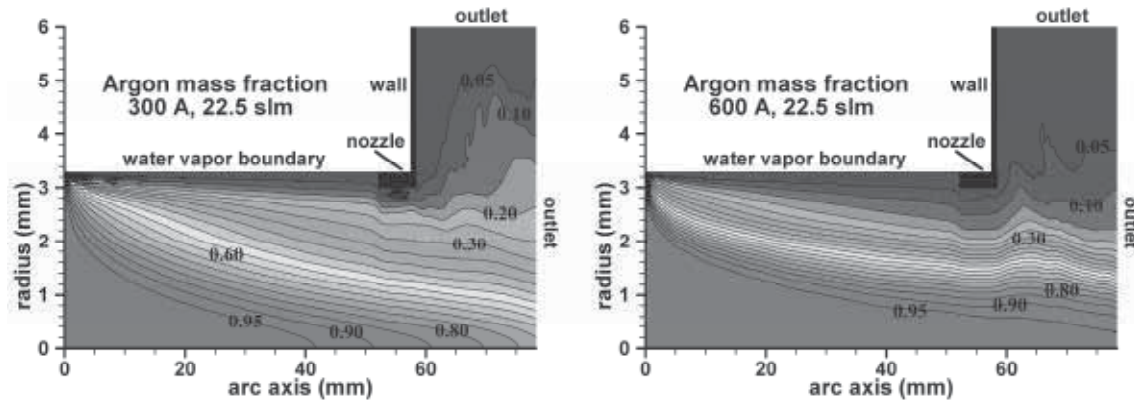


Figure 1. Argon mass fraction contours for 300 A (left) and 600 A (right) discharges. Water mass flow rates are  $0.228 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  (300 A) and  $0.363 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  (600 A); argon mass flow rate is 22.5 slm for both currents. The increase of argon mass fraction in the centre of the arc for higher current is clearly visible. Contour increments are 0.05.

#### 4. Summaries and future plans

The results of the project confirm a) quasi-laminar flow within the volume of the discharge and in the near-outlet region of the hybrid-stabilized arc, b) inhomogeneous mixing of argon and water plasma species in the discharge calculated by the combined diffusion coefficients method.

Our future plans include:

- elaboration of interpolation of all the plasma properties and combined diffusion coefficients in the code as functions of temperature, pressure and argon mass fraction;
- calculation of mixing for broad range of operational parameters for finer grids.

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

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

\*[1] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlová, V. Aubrecht, P. Křenek, Quasi-Laminar Flow Characteristics in Hybrid-Stabilized Argon-Water Arc Discharge for Subsonic-Supersonic Regimes, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 42, Issue 10, Part 1 (2014), pp. 2632-2633.

[2] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlová, V. Aubrecht, P. Křenek, Large-Eddy Simulation of Subsonic-Supersonic Flow and Heat Transfer in a Hybrid Gas-Water Stabilized Arc, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 550 (2014), 012016.

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

\*[3] J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, M. Hrabovský, Investigation of Mixing of Plasma Species in the Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc, *Proceedings of Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 52-53.

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

課題番号	J14021
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	2014.4~2015.3
継続年数	1年目

### 移動物体周りの非定常流体现象予測の高度化のための研究

Study for Accurate Prediction of Unsteady Aerodynamic Characteristics around Moving Objects

大林 茂\*†, 高橋 俊\*\*††

\*東北大学流体科学研究所, \*\*東海大学工学部

†申請者, ††所外対応研究者

#### 1. 研究目的

実際の工学製品における非定常流体现象の定量的な性能検討は、データ取得の困難さから未だ発展が強く望まれている。そこで本研究ではこの課題に対して非定常風洞試験技術開発と、簡易な直交格子法による数値シミュレーション技術により、実験と解析の両面から取り組む。

#### 2. 研究成果の内容

解析では、直交格子に基づいたレベルセット法と埋め込み境界法による移動境界の簡易表現により多数物体周りの高速解析を実現した。特に直接数値解析による精度検証により、数千程度のレイノルズ数への適用性と、移動物体周りの実験結果との比較による精度実証、また多数移動体周りの解析による適用性の実証を行った。図1は、超音速ですれ違う4つの球周りの流れ場の圧力分布を示しており、現在はこちらを応用した多数の粒子周りの解析を実施中である。

#### 3. 研究目標の達成状況

数値解析において、翼、固気混相流解析等は開発が進んでいるが、複雑形状の移動物体周りの解析法と、並列計算の未実装が残された課題である。

風洞試験技術としては、一連の試験装置と計測技術は開発できたものの、精度についてはまだ検討の余地が残されている。これらのことから、研究目標の達成度としては7割程度と言える。

#### 4. まとめと今後の課題

数値流体解析では、三次元移動物体周りの解析と検証も進みつつある。今後は大規模解析に移行することが予想され、高効率並列化の実装が必須であることと、また複雑形状の移動物体を簡便に扱うため、レベルセット関数の高速かつ高精度化が必要である。風洞試験においては、結果の比較と検証をより詳細に行い、非定常空力並びに表面圧力計測法について検討する。

#### 5. 研究成果

##### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Daichi Terayama, Kota Fukuda, Shun Takahashi, Shinya Hasegawa: FUNDAMENTAL INVESTIGATION ON THERMOACOUSTIC PHENOMENA INSIDE NARROW TUBE BY CFD, *Proc. of 11th World Congress on Computational Mechanics*, 2014.

- \* [2] Ryohei Serizawa, Shun Takahashi, Daisuke Sasaki, Masato Okamoto: Investigation of Flow Characteristics around an Oscillating Airfoil at Large Reduced Frequency, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 8-9.
- [3] Daichi Terayama, Kota Fukuda, Shun Takahashi, Shinya Hasegawa: Numerical Investigation on Fundamental Phenomena of Turbulent Flows in Thermoacoustic devices by CFD, *Proc. of 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models*, 2014.
- [4] 高橋俊, 長谷川真也, 野々村拓: 圧縮性 Navier-Stokes 方程式による熱音響エンジンの数値解析, 第 46 回流体力学講演会, 2014.
- [5] 芹沢涼平, 高橋俊, 佐々木大輔, 岡本正人: 数値解析による低レイノルズ数での運動翼まわりの流れ特性, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014.
- [6] 水野裕介, 高橋俊, 野々村拓, 福田紘大: 複数粒子が高マッハ数・低レイノルズ数で移動する流れ解析コードの構築と評価, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014.
- [7] 水野裕介, 高橋俊, 野々村拓, 永田貴之, 福田紘大: 固気混相衝撃波流れ解析に向けた衝撃波を通過する粒子周りの流れ場の数値解析, 平成 26 年度衝撃波シンポジウム, 2015.
- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)  
 Tecplot ホームページ 導入事例, [https://www.hulinks.co.jp/software/etc/case\\_tecplot201410.html](https://www.hulinks.co.jp/software/etc/case_tecplot201410.html), cited April/03/2015

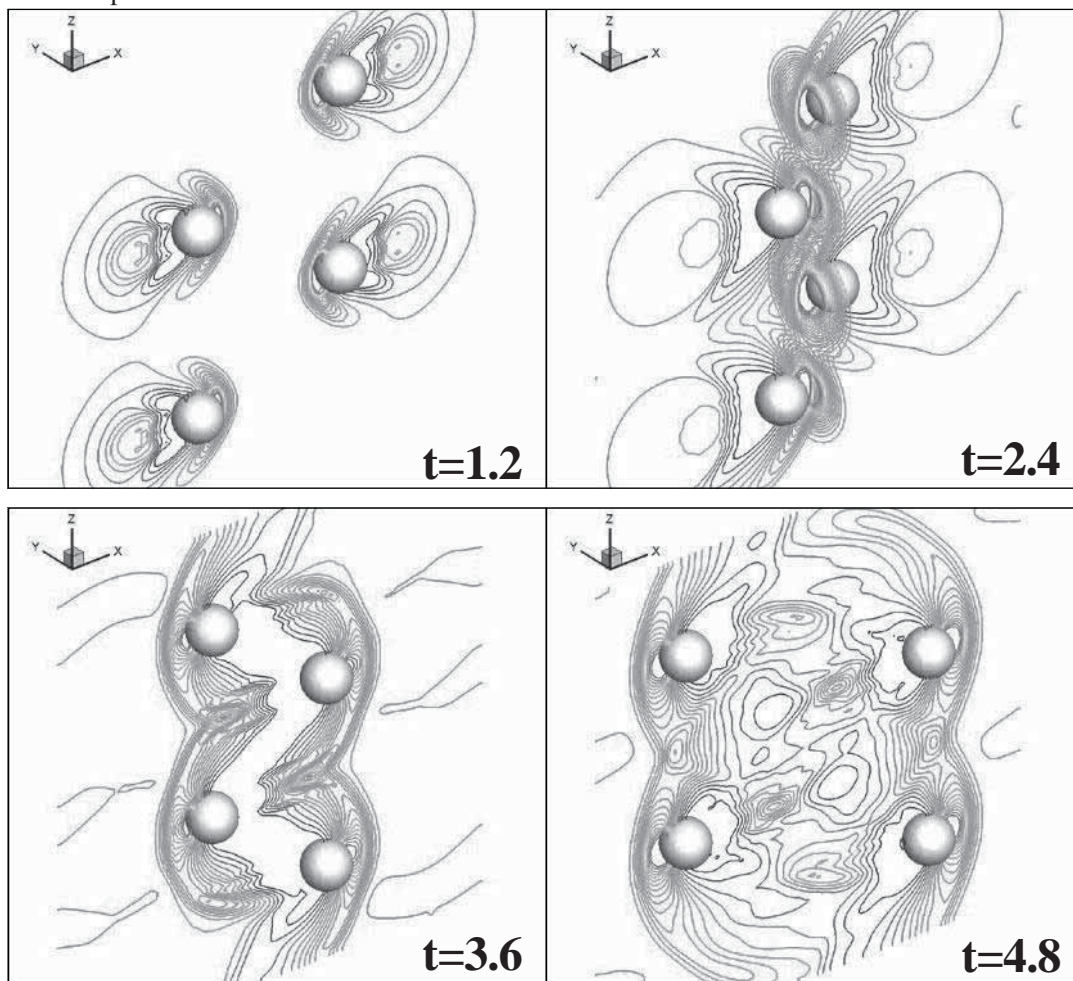


図 1: 超音速ですれ違う 4 つの球周りの圧力コンター図<sup>[6]</sup>

課題番号	J14022
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	2年目

**センシングに基づく漏洩水素の動的強制ベント制御に関する研究**  
**Researches on a Sensing-Based Dynamic Forced Ventilation Control of Leaking Hydrogen**

松浦 一雄\*†, 中野 政身\*\*††, 石本 淳\*\*  
 \*愛媛大学大学院理工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所  
 †申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

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

**2. 研究成果の内容**

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

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

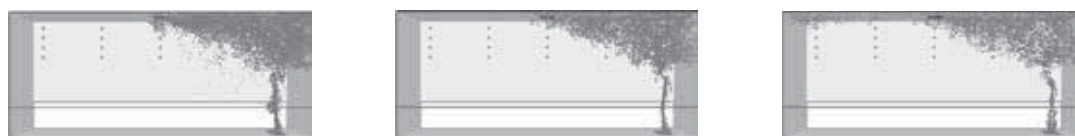
ここで、 $Y_i$  は天井近傍に設けられたセンサー  $i$  における体積濃度であり、 $\Delta V_i$  はそのセンサー一点に代表される体積要素である。 $t=0$  s は漏洩開始時刻を表す。 $T_p$  はセンサーのモニタリング時間であり、排出量  $Q_{ex}(t)$  は過去  $T_p$  秒の情報に基づき  $T_p$  時間毎に更新される。 $I_n \equiv [(n-1)T_p, nT_p)$ ,  $n \in \mathbf{N}$  は単一の  $T_p$  秒時間区間であり、 $Q_{accum}(t)$  は  $t=t_1, t_2, \dots,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

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

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

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

$Q_{ex}(t)$  を次の2段階により与える。



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

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

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

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

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

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

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

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

$\beta_g$  は、漏洩量に依存しない  $Q_{ex}(\hat{t})$  の大域的な下限値であり、天井近傍に水素が残っている際に  $Q_{ex}(\hat{t})$  が小さくなりすぎるのを防ぐ。  $\omega(\hat{t})$  は、許容しうる  $Q_{ex}(\hat{t})$  の上限値であり、漏洩量に対する依存性を有する。センシング情報に基づき動的に決定され、一定時間区間毎に更新される。提案した手法を、漏洩量の異なるケース、連続的あるいは間欠的な漏洩形態に適用し、その有用性を明らかにした。

### 3. 研究目標の達成状況

排出量の上限値を水素センシング情報から動的に決定しながらベント制御するロバストな方法を提案出来た。中心課題が解決され、プロジェクト全体の達成度としては 85% である。

### 4. まとめと今後の課題

本研究により、排出量の上限値を水素センシング情報から動的に決定しながらベント制御するロバストな方法を提案した。センサー位置の変更、漏洩量の時間変化や漏洩位置の変化が有る場合における本制御法の有効性を検証した。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

\*[1] K. Matsuura, M. Nakano and J. Ishimoto: Dynamic Restriction Mechanism for the Upper Limit of Exhaust Flow Rates in the Real-Time Sensing-Based Forced Ventilation Control of Leaking Hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 12, (2015), pp. 4401-4411.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[2] K. Matsuura, M. Nakano and J. Ishimoto: Researches on a Sensing-Based Dynamic Forced Ventilation Control of Leaking Hydrogen, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 48-49.

[3] K. Matsuura: Numerical Simulation of Leaking Hydrogen in a Partially Open Space, *Eleventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp. 240-241.

[4] 松浦一雄, 中野政身, 石本淳: 「リアルタイムセンシングに基づく漏洩水素の強制ベントにおける上限排出量の動的調整」, 日本混相流学会混相流シンポジウム 2014, (2014), pp. 1-2.

課題番号	J14023
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	2年目

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

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

**1. 研究目的**

太陽光発電が基幹電力となるには変換効率 50%以上が求められるが, 一般的な単接合太陽電池の理論限界は 29%である. そこで更に高効率な太陽電池を実現させる技術として量子ドットを三次元的に整列させて超格子構造とし, 形成されるミニバンドを利用した太陽電池が注目されている. 量子ドット構造を太陽電池に応用するには, そのバンド構造を詳細に調べることが不可欠であるが, これまでこの研究目的にかなう良質な量子ドットが得られていなかった. これに対して流体科学研究所で中性子ビームを用いることで従来よりも高密度で規則配列した量子ドット構造の作成に成功した. 本研究では, 宮崎大学が所有する各種光学的特性評価技術を適用し, そのバンド構造を評価することで超高効率太陽電池作成のための知見を得ることを目的とした.

**2. 研究成果の内容**

昨年度はバイオテンプレートと中性子ビームを組み合わせさせて SiC 結晶中に形成した Si ナノディスク (以下, NDs) 内に発生した光励起キャリアの再結合寿命が大幅に増加し, ミニバンド化による発電特性向上が期待できることを報告したが, その後の研究により Si 酸化物が Si-NDs 形成を阻害していることが明らかになった. そのため本年度は, 酸化膜の影響が少なく且つ同じ IV 属元素からなる Ge-NDs を用意し, ミニバンド形成による光学的特性変化を評価した. 太陽電池超高効率化には吸収光波長の異なるセルを複数接合させる必要があるが, Ge は長波長領域を吸収する重要な半導体材料である. 更に, 寒川研究室が有するバイオテンプレートと中性子ビームは対象材料を選ばないという大きな利点を有する.

Ge-NDs アレイは, アモルファス Si 中に形成させた. 本研究では直径を 10 nm に固定させながらその厚さを 4 と 8 nm に変化させた試料を用意し, マイクロ波光導電減衰 ( $\mu$ -PCD) 法でキャリア寿命を測定した. 4-nm 厚 Ge-NDs の結果を図 1 に示す. 昨年度に得られた成果と同様, Ge-NDs においても光励起キャリアの再結合寿命が大幅に増加する成分 ( $\tau_3$ ) が観測された. また, バンド構造変化による光学的特性変化を評価する目的で, 光励起キャリアの発光再結合過程を検出できるフォトルミネッセンス (以下, PL) 法による測定を行った. 図 2 に試料温度 10 K における PL スペクトルを示す. 比較のために 4 nm の Ge 薄膜から成る単一量子井戸 (QW) 試料の結果も示した. すべての試料において, Si 基板の TO フォノン起因の発光ピーク (TO および 2TO) が観測された. 低エネルギー側に観測された A-(0.93)

および B-peak (0.85 eV) は Ge-QW 試料には観察されず, Ge-NDs 起因の発光信号である可能性が高い. 本研究結果は, Ge-NDs アレイによりミニバンドが形成されたことでその光学的特性が変化したことを示す非常に重要な知見である.

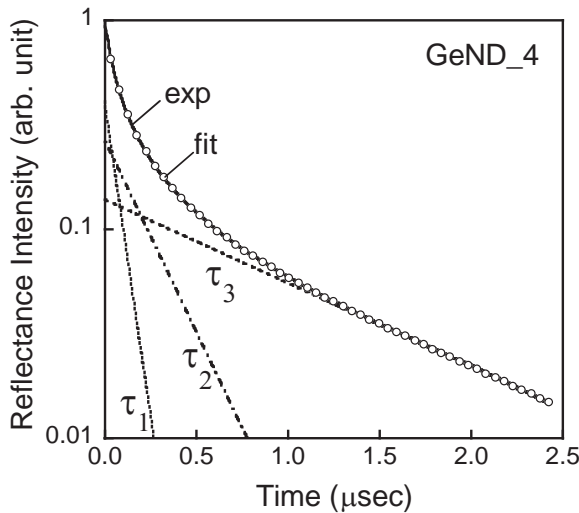


図 1 : 4 nm 厚 Ge-NDs 試料のキャリア減衰曲線

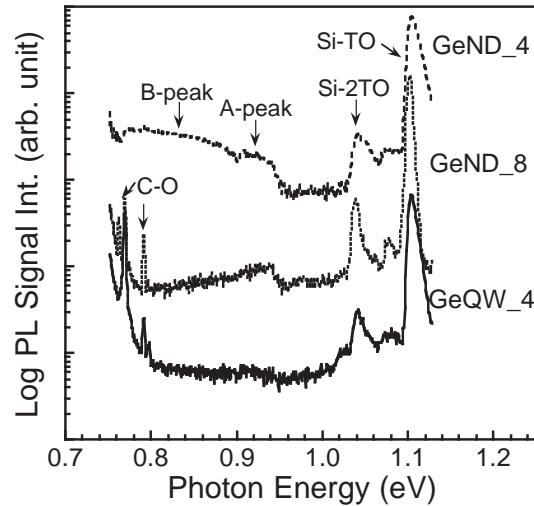


図 2 : 10 K における PL スペクトル

### 3. 研究目標の達成状況

今年度の研究では, 昨年度の Si-NDs と同様に Ge-NDs アレイにおいてもそのバンド構造がミニバンド化しキャリア寿命が大幅に増加することを明らかにした. さらには Ge-NDs 起因の発光信号を新たに検出した. これら得られた成果は, 未だ十分な物性評価が行われていない量子ドット起因のミニバンド構造に関する非常に重要な知見である. また, 流体科学研究所が所有する技術が材料に寄らずに NDs アレイを形成できることを改めて示した点でも価値が高い. よって本年度の研究目標達成度は 8 割と判断する.

### 4. まとめと今後の課題

本年度研究成果では, Ge-NDs の配列によってミニバンドが形成され光学的特性が変化することを見出した. 今後はどのようなミニバンド構造 (ミニバンド幅やエネルギー位置) が量子ドットを用いた超高効率太陽電池実現に適しているかを, これまでの評価法に加えて分光感度測定等の電気的評価を組み合わせた評価を実施することが必要である.

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] D. Ohori, Y. Murayama, K. Kondo, F. Takuya, T. Okada, S. Samukawa, A. Fukuyama, and T. Ikari: Photoluminescence of Ge nanodisk array structure fabricated by bio-template and neutral beam etching, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 118-119.

[2] 村山友基, 近藤清文, 大堀大介, 境健太郎, 福山敦彦, 碓哲雄, M. M. Rahman, 岡田健, 寒川誠二: 第 11 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム, p. 131.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J14024
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

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

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

\*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, UCSD

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

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

### 2. Details of program implement

Professor Llewellyn Smith visited the Institute of Fluid Science during the period September 15–19, 2014. During this visit, Professors Llewellyn Smith and Hattori discussed work on the two-dimensional MSTW instability using the exact solution and unsteady vortex solutions. Professor Llewellyn Smith attended the meeting of the Japanese Society of Fluid Mechanics held in Sendai on 15–17 September, 2014, and presented a talk during the meeting. Professor Hattori talked about the collaborative research at ICFD2014.

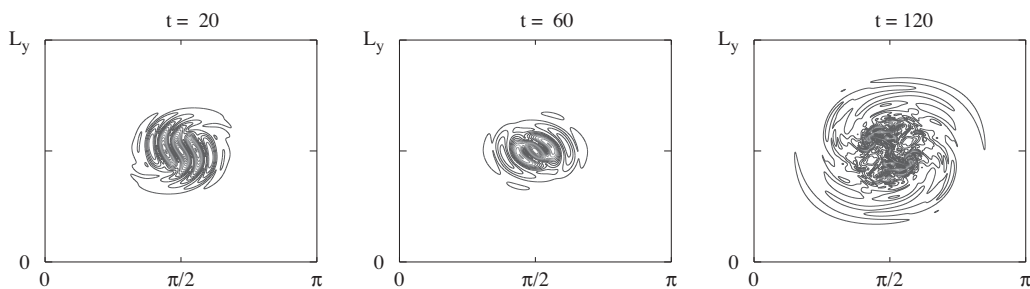


Figure 1 : Evolution of localized disturbance in 2D Taylor-Green vortices. Contours of the magnitude of disturbance vorticity is shown.

### 3. Achievements

Professor Hattori has studied the MSTW instability of two-dimensional Taylor–Green vortices. The evolution of a localized disturbance in the form of wave packet is followed using direct numerical simulation (Fig. 1). The 3D Navier–Stokes equations are solved by a Fourier spectral method. The effects of shear on the linear instability have been



elucidated. Exponential growth of disturbance energy is observed from the start of calculation when the initial disturbance is centered at the elliptic stagnation point, while energy decays initially when the initial disturbance is off the stagnation point. There is no clear distinction between weakly nonlinear stage and nonlinear stage, which is observed in Hattori and bin Marzuki (2014).

Professor Llewellyn Smith has investigated the problem of the MSTW instability in the presence of density differences. This first requires solving for the modes of the Rankine vortex without strain, following Kelvin's original formulation. Unlike the constant density case, there can be unstable modes: an important question then is the magnitude of their growth rate compared to that of the MSTW modes. He has also written a new algorithm to find steady states of vortex patches and Sadovskii vortices. This can be used to find basic states with finite strain as in Hill's hollow vortex. Finally, he has investigated solutions to two-dimensional vortical flows with piecewise constant density in the presence of sinks and sources.

#### 4. Summaries and future plans

Future work on the MSTW instability of the 2D Taylor–Green vortices includes analysis of the pseudospectrum and its relation to transient growth, which will be checked by direct numerical simulation. The effects of stratification will also be studied.

Extending the mapping technique use by Professor Llewellyn Smith to look at hollow vortex stability to the Abrashkin–Yakubovich family of vortices and to Sadovskii vortices in strain is the next step in examining the stability of these states, giving insight into strain-induced vortex stability with finite strain. A key question is that of steady and unsteady solutions for vortex sheets in the presence of density differences. The new complex variable method should lead to exact solutions in the former case. He has also been in discussion with colleagues in Spain and the United Kingdom about axisymmetric vortex sheet evolution with density difference.

#### 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, Makoto Hirota, and Stefan G. Llewellyn Smith: The continuous spectrum in the Moore–Saffman–Tsai–Widnall instability, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 178-179.
- 3) Patent, award, press release etc  
Not applicable.

課題番号	J14025
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	2年目

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

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

**1. 研究目的**

東北大が持つナノディスクアレイ（円盤状シリコンナノ構造が2次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低消費電力で、高集積化と高速動作が可能なデバイスの構築を目指す。

**2. 研究成果の内容**

Siのナノディスクを単電子トランジスタ（SET）を模擬した素子として使い、これをアレイ状に配置しトンネルにより電子を伝送することを考えると、電子の転送距離が短く、ディスクが小さいために少数の電子を移動させただけで大きな電位変化が得られるため、省電力で高速な動作が可能な高機能素子となる。従来のLSIでは、素子を接続する膨大な配線が大きな消費電力と時間遅れを生んでいるが、ナノドットアレイではこれが不要となるので、省電力で高い機能を出すことが可能となるということである。ナノディスク素子の特徴は、これに容量接続した多くのゲートを取り付け、多入力化し機能を高めることにあるので、単純には一つのゲート電極が多くのナノディスクと接続されることが望まれる。しかし、ナノディスクが小さいことを考えると、全てのドットに容量接続するように配置できるゲート電極数は限られる。本年度は、半導体ナノディスクの少数電子系に作用する量子サイズ効果などを用いることで、比較的孤立したゲート電極を用いても高い機能が導出できる可能性について、実験的な検討と実証を行った。

図1は、トップダウンプロセスで作製した3端子構成のナノディスクアレイの操作型電子顕微鏡写真の例であり、図2はこれに2つの下層ゲートと1つの上層ゲートを取り付けた場合の模式図である。この素子は、3入力（ゲート）で2出力（ソース）の素子として機能することになる。ここでは、より高機能を目指すため、

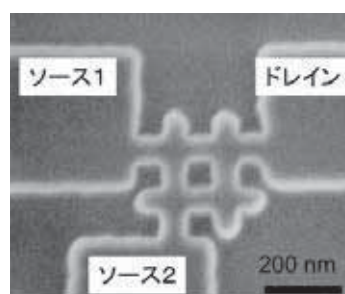


図1 Siのナノディスクアレイの電子顕微鏡写真

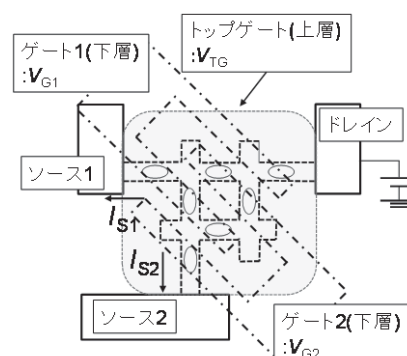


図2 ナノディスクアレイ素子に3個のゲート電極を取り付けた模式図（楕円がナノディスク）

上層ゲートの電圧で機能を変えて動作させることを考え、基本構成を2入力2出力とする。図2の構成では、全てのゲートが全てのディスクと容量接続するため、高い論理機能、例えばソース1に XOR (排他的論理輪)、ソース2に AND の出力を出す半加算器の機能などが実現できることを示した。

一方、図3のように一部のディスクとしか接続していない素子では、一見このような高い機能は期待できないと考えられるが、少数電子(ディスク内電子が数個の状態)系で動作させることで、同様な半加算器動作も可能なことを示した。

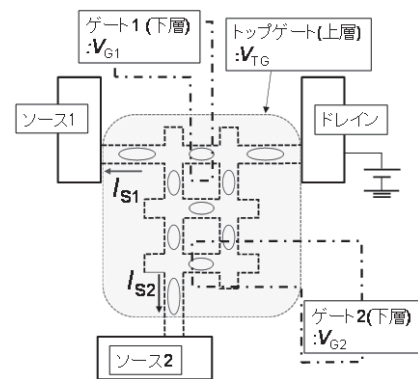


図3 ほぼ独立に配置された2入力ゲート(下層)を有するナノディスクアレイ素子

### 3. 研究目標の達成状況

低消費電力と高機能を併せ持つ、ナノディスクアレイ素子の検討として、少数のディスクとしか容量接続していない、より単純な独立性の高い入力ゲート構成を用いても、高い機能が実現できることを示した意義は実用的な素子化に向け大きく進展したといえる。この結果は、2013年度の量子力学的なディスク間結合を用いたものと解釈される。

### 4. まとめと今後の課題

ナノディスクアレイ素子を少数電子領域で動作させ、量子力学的効果を用いることで、より単純なゲート電極は位置でも高い機能を創出できることを示した。この手法で、より高度な機能を確実に実現していくため、ディスク間の結合状態の制御性の向上やアナログ的な電圧制御の検討などが次の課題となる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] M. Arita, R. Tokuda, K. Hamada, and Y. Takahashi: Development of TEM holder generating in-plane magnetic field used for in-situ TEM observation, *Materials Transactions*, **55**, (3), (2014), 403-409.
- [2] M. Kudo, M. Arita, Y. Ohno, and Y. Takahashi: Filament formation and erasure in molybdenum oxide during resistive switching cycles, *Applied Physics Letters*, **105**, (2014), 173504-1-4.

\*[3] T. Uchida, M. Arita, A. Fujiwara, and Y. Takahashi: Coupling capacitance between double quantum dots tunable by number of electrons in Si quantum dots, *Journal of Applied Physics*, **117**, (2015), 084316-1-6.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [4] Y. Takahashi, H. Takenaka, A. Fujiwara, and M. Arita (invited): High-frequency operation of Si single-electron transistor beyond cutoff by the use of rectifying effect, *The 6th IEEE International Nanoelectronics Conference*, (2014.7/28-31, @ Hokkaido Univ., Japan).
- [5] M. Arita, Y. Ohno, M. Kudo, and Y. Takahashi (invited): Evolution of conductive filaments in Cu/MoOx CBRAM observed by means of in-situ TEM, *The 6th IEEE International Nanoelectronics Conference*, (2014.7/28-31, @ Hokkaido Univ., Japan)

\*[6] Takafumi Uchida, Masashi Arita, Akira Fujiwara, Yasuo Takahashi, Seiji Samukawa: Gate-Voltage Tunable Coupling Capacitance of Si Double-Quantum-Dots with Multiple Gates, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 120-121.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J14026
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	3rd year

## The Theoretical Modes of the Wake Flow of Road Vehicles

Chenguang Lai\*†, Shigeru Obayashi\*\*††, Yuting Zhou\*\*\*, Kaiping Wen\*, Zhigang Yan\*, Sujuan Yu\*, Chao Man\*, and Chang Luo\*\*

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

### 2. Details of program implement

To better understand the mechanism of the unsteady three-dimensional wake structure of the high speed road vehicle, the vehicle aerodynamic performance and the flow characteristics during curve driving was investigated. The dynamic mesh and User-Defined Function (UDF) in Fluent were performed in the simulation, and the experimental verification was carried out in Jilin University Wind Tunnel (Figure 1). A notchback Mira model is used, and hybrid mesh technique was performed in this research. 9 boundary layers are generated around the vehicle to capture the flow structure better, shown as Figure 2.



Figure 1: Experimental verification in Jilin University Wind Tunnel

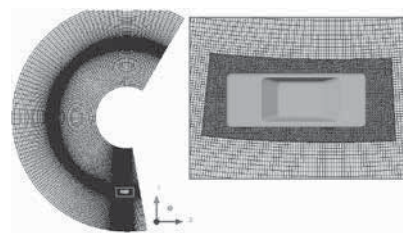


Figure 2: Numerical simulation with a hybrid mesh technique

### 3. Achievements

The following conclusions were made based on the results of the transient simulation: the transient simulation with dynamic mesh and UDF method can simulate the vehicle aerodynamic performance and catch the wake details during curve driving more realistic; the direction of aerodynamic drag is not the same with the driving direction while curve driving; while curve driving, the airflow at the outer side of vehicle head was intensified separation which is not helpful for the airflow re-attachment; the airflow at the inner side of

vehicle head was suppressed separation which is helpful for the airflow attachment.

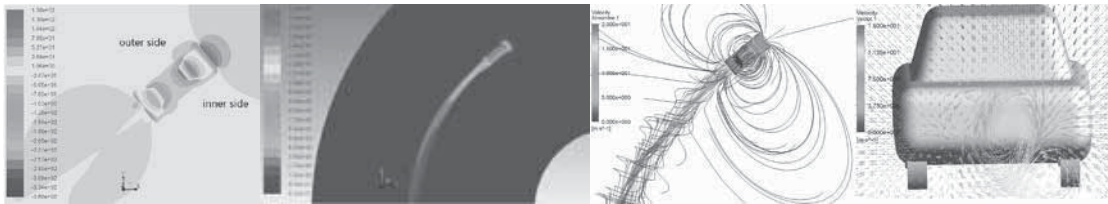


Figure 3: Some examples of the results of the transient simulation (they are the pressure distribution, counter of velocity, streamline and airflow in wake section of the model from left to right)

#### 4. Summaries and future plans

Summaries: Dynamic mesh and UDF were performed in the simulation. Through transient simulation analysis, the changes of aerodynamic resistance, pressure distribution, vortices and flow field during steering were obtained. The result shows that: there is an intersection angle between the aerodynamic resistance direction and the automobile movement direction; the vortex on the outside is larger than that on the inside; the outer lateral vortex appears in front of the vehicle, while the inner lateral vortex is at the end of the vehicle. This research provides a new and more real method for the study of vehicle aerodynamic properties and vehicle wake flow.

Future plans: catch the transient topologies of the separated flow generated on the end of the different type of road vehicles using numerical and experimental methods; study and conceive the form of the eddy motions on the wake of road vehicle; analyze and define the inherent mechanism and the laws of the flow on the wake of road vehicle

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

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

\* [1] C. Lai, K. Wen and C. Man: Influence of Airflow Uniformity over the Duct Outlet of Vehicle Air-condition on Cooling Performance, *Hydromechatronics Engineering*, Vol. 42, No. 12, (2014), pp. 17-21.

[2] C. Lai, C. Man, K. Wen, Z. Yan and M. Duan, Numerical study of cooling characteristics for blanking in hot stamping, *Hydromechatronics Engineering*, Vol. 43, No. 6, (2015), pp. 27-31.

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

\* [3] C. Lai, C. Man, and K. Wen: Numerical Study on vehicles aerodynamic performances during straight and curve crossings, *Proceedings of The Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 42-43.

[4] K. Wen, C. Lai, H. Sun and C. Man: Multi-objective Optimization for Intake and Vent Grilles of Tank, *Proceedings of Eleventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp. 430-431.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J14027
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

## Kinetic Modeling of Energy Transfer in Non-Equilibrium Nanosecond Pulse Discharges in Air and Fuel-Air Mixtures

Hidemasa Takana\*†, Hideya Nishiyama\*

Igor Adamovich\*\*††, Zak Eckert\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

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

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The main goal of proposed research is to provide critical insight into fundamental mechanisms of molecular dissociation, rapid heating of the flow (on sub-acoustic time scale), chemically active radical species formation, and chain processes of fuel oxidation in nanosecond pulse, diffuse filament discharges. Such insight is critical to predictive analysis of plasma flow control and plasma-assisted ignition applications.

### 2. Details of program implement

The present approach uses (i) reduced dimensionality (1-D axial + 1-D radial), master equation, nonequilibrium air plasma model (Shkurenkov 2014), (ii) 2-D axisymmetric N<sub>2</sub> / air plasma model (Eckert 2015), both developed at OSU under a collaborative project with IFS, and (iii) a 2-D fuel-air plasma model developed at IFS (Takana 2014).

### 3. Achievements

Kinetic modeling of a “diffuse filament” nanosecond pulsed discharge in nitrogen at  $P = 100$  torr, sustained between two spherical electrodes 7.5 mm in diameter and separated by 10 mm gap was done using a 2-D axisymmetric geometry kinetic model. The model predictions are compared with recent time-resolved measurements, showing good agreement. The model also reproduces the effect of N<sub>2</sub> vibrational temperature and N<sub>2</sub>( $v=1$ ) population rise after the discharge pulse, due to “downward” N<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> vibration-vibration energy exchange in the afterglow.

Kinetic modeling of reacting air and hydrogen-air plasmas, using a state-specific master equation kinetic model, has also been conducted. The results demonstrate that energy thermalization and temperature rise in these plasmas occur in two clearly defined stages, (i) “rapid” heating, caused by collisional quenching of excited electronic states of N<sub>2</sub> molecules by O<sub>2</sub>, and (ii) “slow” heating, caused primarily by N<sub>2</sub> vibrational relaxation by O atoms (in air) and by chemical energy release during partial oxidation of hydrogen (in H<sub>2</sub>-air).

### 4. Summaries and future plans

Future work includes predicting (i) time-resolved electric field and electron density and (ii) compression wave formation due to “rapid” in air plasmas, as well as comparison with measurements of electron density, electric field, and compression wave speed at Ohio State.

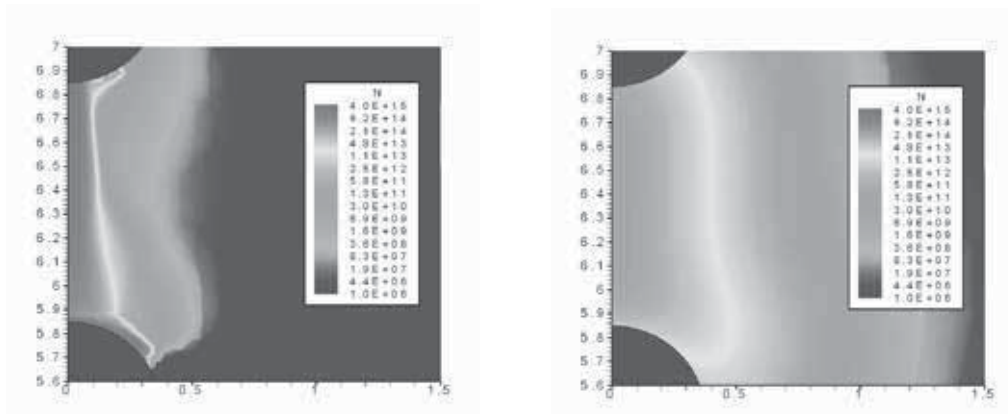


Figure 1: Contour plots of N atoms number density in a diffuse filament nanosecond pulse discharge in nitrogen at 100 Torr, at  $t=10 \mu\text{s}$  and 10 ms after the discharge pulse. Electrode gap 10 mm.

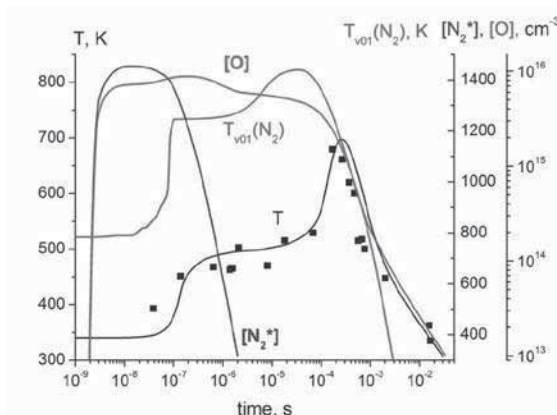


Figure 2: Time-resolved gas temperature, predicted  $\text{N}_2$  vibrational temperature, O atom number density, and total number density of electronically excited states of  $\text{N}_2$  during and after diffuse filament nanosecond pulse discharge in air at 100 Torr. Electrode gap 10 mm.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - [1] Shkurenkov, D. Burnette, W.R. Lempert, and I.V. Adamovich: Kinetics of Excited States and Radicals in a Nanosecond Pulse Discharge and Afterglow in Nitrogen and Air, *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 23, (2014), p. 065003.
  - \*[2] H. Takana, I.V. Adamovich, and H. Nishiyama: Computational Simulation of Nanosecond Pulsed Discharge for Plasma Assisted Ignition, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 550, (2014), p. 012051.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - \*[3] Z. Eckert, H. Takana, H. Nishiyama, and I. Adamovich: Master Equation Modeling of a Nanosecond Pulse Discharge in Nitrogen in a Pin-to-Pin Geometry, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 72-73.
  - [4] I. Shkurenkov, S. Lanier, I. Adamovich, and W. Lempert: Two-Stage Energy Thermalization Mechanism in Nanosecond Pulse Discharges in Air and Hydrogen-Air Mixtures, *67<sup>th</sup> Gaseous Electronics Conf.*, (2014), Raleigh, NC, USA.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

課題番号	J14028
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	3年目

### 常温圧縮せん断法を用いた Ti/Al 複合材料の固化成形

#### Fabrication of Ti/Al Composite Material by Compression Shearing Method at Room Temperature

中山 昇\*†, 高木 敏行\*\*††, 武石 洋征\*\*\*, 堀田 将臣\*, 坂上 将太\*,  
三木 寛之\*\*\*\*, 小助川 博之\*\*

\*信州大学工学部, \*\*東北大学流体科学研究所,

\*\*\*千葉工業大学工学部, \*\*\*\*東北大学大学院工学研究科,

\*\*\*\*\*東北大学学際科学フロンティア研究所

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

チタン材料は比強度, 耐食性に優れるため, 医療用材料, 海洋建造物, および航空宇宙分野と多岐に渡り使用される. 特にアルミとの金属間化合物である TiAl は, 軽量, 耐食性および耐熱性に優れることから, 次世代材料として期待される. 一般的に TiAl 合金の合成には, プラズマアーク溶解法や, 入熱を必要とする粉末冶金法が用いられてきたが, Ti と Al の化合物は  $Ti_3Al$ , TiAl, および  $TiAl_3$  等多岐に渡るため, 多数の化合物相が混在する. 特に TiAl 金属間化合物相を安定化させるためにバナジウムなどの他元素を入れることが試みられてきた. しかし, バナジウムは毒性を有するため, 生体材料として使用する場合には避けたい. また, 骨折等の固定用医療材料としての応用を考慮する場合には薄板化が必要であるが, 鋳造等により作製した TiAl 合金は 0.75mm 以下の薄板に成形することができないという問題点を有している. このことから TiAl 合金ではなく Ti/Al 複合材料で同等の機械的性質を有する新しい薄板材料を容易に製造することができれば, 以上の問題点が解決できると考えられる. 一般の粉末冶金法により Ti/Al 複合材料の開発を行う場合には, 低融点金属である Al と高融点材料である Ti の融点を考慮しなければならない. 特に, HIP 等加圧を行う手法では, Al の融点以下でも合金化が起こるとされる. したがって, 合金化せずに薄板成形を行うためには, 入熱を必要とせず, 常温下で作製を行う必要がある.

本研究では, 純 Ti および純 Al 粉末をボールミリングにより混合し, COSME-RT を用いて高強度な Ti/Al 材料の開発を目的とした. 本報では, 純 Ti と純 Al 粉末の結合メカニズムを明らかにした.

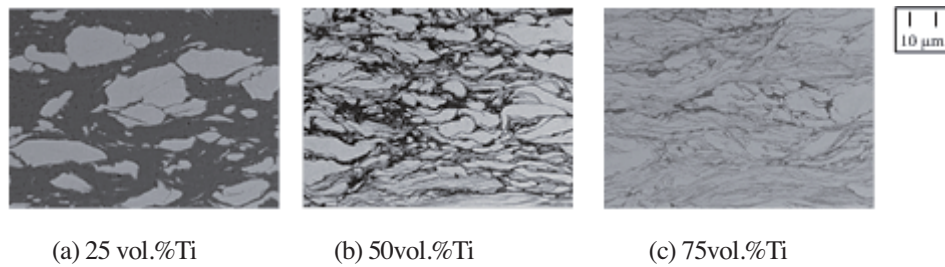
## 2. 研究成果の内容

純 Ti 粉末と純 Al 粉末を一軸のミリング装置にて回転速度 200 r/min, 混合時間 540 min で混合した. Ti 粉末の混合割合を 25~75vol.%まで変化させ, 常温圧縮せん断法で固化成形した. 固化成形の条件は, 垂直応力 1250MPa, せん断ひずみ 20 であり, 成形体の形状は,  $40 \times 10 \times 0.25$ mm である.

成形体の横断面の SEM 像を図 1 に示す. 白色は Ti, 灰色は Al である. 均一に Al や Ti が分散していることがわかる. 図 2 に 75vol.%Ti の TEM 像を示す. 図 2 より, Ti と Al の



境界は強固に結合されているが、一部には酸化膜が拡散されていることがわかった。



(a) 25 vol.%Ti

(b) 50vol.%Ti

(c) 75vol.%Ti

図1：横断面のSEM像

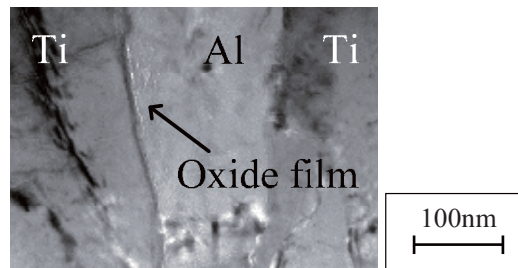


図2：TEM像（75vol.%Ti）

### 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し、その結合メカニズムが明らかになったことは目標を達成したと考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

本研究の結果、Ti の混合割合が増加するにつれて、TiAl 合金の引張強さまで増加することがわかった。今後は、Ti/Al 複合材料を用いた微細成形に関する研究を行う必要がある。

### 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] Noboru Nakayama, M. Horita, H. Miki, T. Takagi, H. Takeishi: Mechanical and Electrical Properties of Carbon Nanofiber Dispersed Ti Composite Formed by Compression Shearing Method at Room Temperature, *Materials Science Forum*, Vols. 783-786, (2014), pp. 2485-2490.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Shota Sakagami, Masaomi Horita, Noboru Nakayama, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, Hiroyuki Kosukegawa, and Hiroyuku Takeishi: Fabrication of Al/Ti Composite Material by Compression Shearing Method at Room Temperature, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2014), Sendai, pp. 138-139.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

課題番号	J14029
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

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

池田 (向井) 有理\*†, 太田 信\*\*††

越中谷 賢治\*\*\*, 濱田 康太\*\*\*

高知尾 尚志\*\*\*, 小川 翼\*\*\*

\*明治大学理工学部, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*明治大学大学院理工学研究科

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

合成されたタンパク質は適切な細胞内小器官に局在化され、その機能を発揮する。一方で、タンパク質の細胞内局在化のエラーが、がんや神経性疾患を引き起こすことも知られている。本研究では、アミノ酸出現傾向解析により設計された人工のタンパク質局在化シグナル配列を GFP に融合し、生存細胞の蛍光観察から細胞内局在化経路や局在化効率を評価することにより、目的のタンパク質を適切な細胞内小器官に輸送する手法の確立を目指す。

## 2. 研究成果の内容

小胞体局在化シグナルであるシグナルペプチドを GFP と融合させ、細胞内局在性を評価した。まず、シグナルペプチド融合 GFP 発現ベクターを構築して HeLa Cell に導入し、GFP 蛍光観察を行った。シグナルペプチドには、(1) 人工型、(2) ヒトプリオンタンパク質由来、(3) ヒトコラーゲンタンパク質由来 の 3 種を用い、小胞体輸送の有無を比較した。

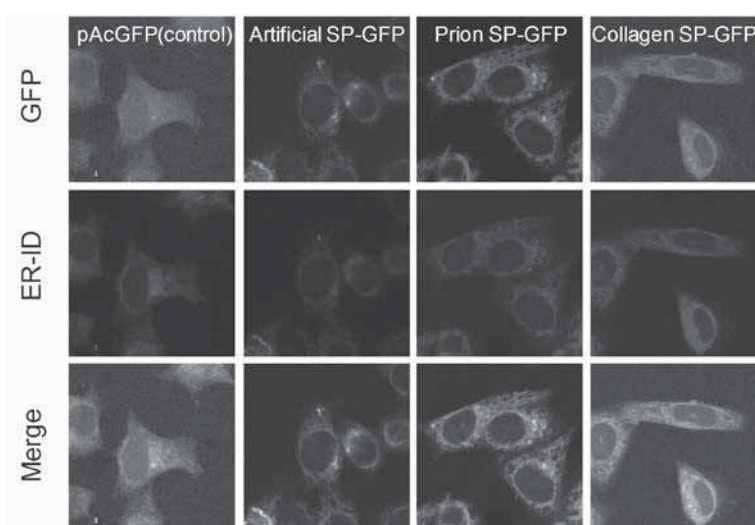


図 1. シグナルペプチド融合 GFP タンパク質の細胞内局在性観察

シグナル配列を持たない GFP は核内や細胞質への局在が認められたが、人工型、ヒトプリオン由来、コラーゲンタンパク質由来のシグナルペプチドを融合した GFP では、小胞体マーカー ER-ID による染色像とおおむね一致していた。このことから、シグナルペプチドが GFP を小胞体へ輸送していることが示唆された。また、GFP 蛍光は小胞体外への分泌経路においても確認された。

また、シグナルペプチド配列による細胞内局在の経路の違いを明らかにする目的で、GFPとは蛍光波長の異なる蛍光タンパク質である mCherry とシグナルペプチドの融合タンパク質の発現ベクターを構築した。

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、生存細胞内の GFP 蛍光検出を行うことにより、アミノ酸組成の異なる 3 つのシグナル配列の細胞内局在性を評価した。また、mCherry 融合タンパク質の発現ベクターを用いて、輸送経路の違いを比較できる系を構築した。国内外での学会発表については達成したが、論文発表に関してはまだ投稿準備の段階である。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、小胞体輸送シグナルであるシグナルペプチドを蛍光タンパク質に融合させることにより、固定細胞で細胞内局在性を評価する系を確立した。

今後は、生存細胞における GFP/mCherry 融合タンパク質の細胞内局在経時変化の評価系を確立し、シグナル配列の物理化学的性質とタンパク質の細胞内輸送経路との相関を明らかにする。本研究では、生存細胞内の GFP ならびに mCherry 蛍光の検出を行うことにより、物理化学的性質の異なる人工/天然シグナル配列の輸送経路および輸送効率を比較でき、シグナル配列の物理化学的性質とタンパク質細胞内局在との相関を理解することが可能となる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[1] Kota. Hamada, Naoyuki. Takachio, Hiromu Sugita, Noritaka Kato, Makoto Ohta, Kenji Etchuya, Yuri Mukai: Correlation between Physicochemical Properties of Protein Signal Sequence Variation and Subcellular Transportation, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2014)*, pp. 90-91.
- [2] 濱田康太, 高知尾尚志, 越中谷賢治, 向井有理: シグナルペプチドのアミノ酸配列と成熟タンパク質の細胞内局在との相関, 日本農芸化学会 2015 年度大会, 岡山, (2015).
- [3] 高知尾 尚志, 小西 達也, 高田 浩武, 寺崎 武夫, 加藤 徳剛, 向井 有理: 異なるシグナルペプチド及び GPI アタッチメントシグナルを導入した融合タンパク質の輸送経路の違い, 第 37 回日本分子生物学会年会, 横浜, (2014).
- [4] K. Hamada, K. Etchuya, Yuri Mukai: Influence of signal-peptide sequences on subcellular location of mature proteins, *European Conference Computational Biology 2014*, Strasbourg, September, (2014).
- [5] K. Hamada, K. Etchuya, Yuri MUKAI: Study on binding of signal recognition particles to signal-peptides, *FEBS & EMBO 2014*, Paris, August, (2014).
- [6] N. Takachio, T. Konishi, H. Takata, T. Terasaki, N. Kato, Y. Mukai: Transport pathway of GFP protein including signal-peptide and GPI-attachment signal, *FEBS & EMBO 2014*, Paris, August, (2014).

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

課題番号	J14030
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	1年目

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

岩本 悠宏\*†, 高奈 秀匡\*\*††

\*同志社大学理工学部, \*\*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**

日本のエネルギー事情は大きな方向転換を余儀なくされ、再生可能エネルギーへの注目が集まる中、風力エネルギーの導入率は国内外において年々増加している。風力発電において、一定出力を得るため、風速変動に対して風車翼ピッチ角を制御し、発電機回転数を一定に保つ定格出力制御が行われている。そこで本研究では、この余剰風力エネルギー回収による風力発電の高度利用を目的として、発電と回転トルク制御を同時に可能とする液体金属を用いた電磁エネルギー変換装置を提案し、そのファラデーの電磁誘導による発電出力とローレンツ力を活用した回転トルク制御機構の性能を実験的に明らかにすることにより、本装置の有用性を示す。また、発電特性とトルク制御メカニズムを格子ボルツマン法により数値解析的に解明し、本装置の高性能化に資する知見を得ることを目的とする。

**2. 研究成果の内容**

液体金属としてU-alloyを用いた電磁エネルギー変換装置を東北大流体研において試作し、その発電出力と回転トルク制御機構の性能評価を行った（高奈）。図1に各外部負荷抵抗値における出力電力と回転数の関係を示す。外部負荷抵抗値が2.38 mΩにおいて出力電力は最適値を示し、回転数約2000 rpmにおいて最大出力約81.2 mWが得られ、本装置がファラデーの電磁誘導により発電が可能であることを明らかにした。また、図2に最適外部負荷抵抗値2.38 mΩにおける各磁場印加強度における回転トルクと回転数の関係を示す。図2

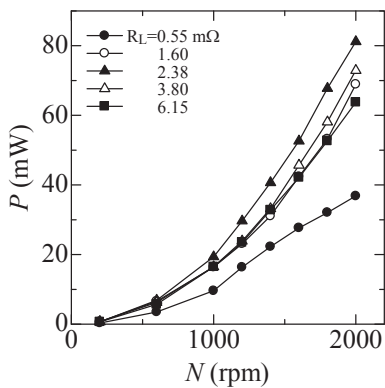


図1: 各外部負荷抵抗における出力電力と回転数の関係

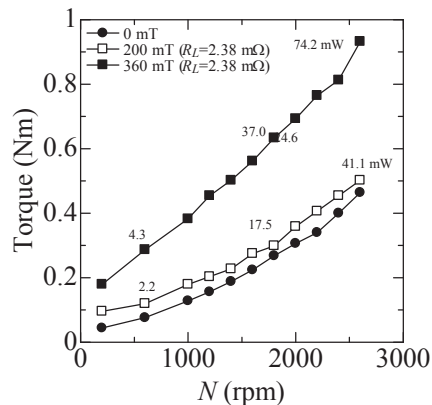


図2: 各印加磁場強度における回転トルクと回転数の関係

より、印加磁場強度の増加に伴い、電磁相互作用によるローレンツ力に起因して回転トルクが増加し、無磁場時に比べ最大で約 200% 回転トルクが向上することを明らかにした。

また、本研究では本装置におけるファラデーの電磁誘導による発電とローレンツ力に起因するトルク発生メカニズムを解明するために格子ボルツマン法を用いた電磁流体解析コードの開発を同志社大において行っている(岩本)。本解析対象(図3)は、電磁流体力学、複雑な幾何学的形状(同軸型二重円筒系、動的境界)、複雑磁場分布、乱流などの複雑物理現象を含む。そこで、これらの解析対象にして有利である格子ボルツマン法、特に、Dellor's lattice Boltzmann model と Immersed boundary method を用いた数値解析コードの開発に取り組んでいる。

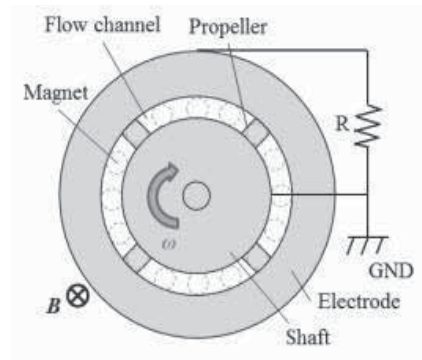


図3：解析モデル

### 3. 研究目標の達成状況

液体金属を用いた電磁エネルギー変換装置を試作し、その基礎性能評価として、外部負荷抵抗および印加磁場強度、回転数を変化させた場合のファラデーの電磁誘導による発電性能とローレンツ力による回転トルク制御性能を実験的に明らかにした。これにより、液体金属を用いた電磁エネルギー変換装置の実現可能性を示し、余剰風力からのエネルギー回収により更なる風力発電の高効率化が可能であることを示した。

また、ファラデーの電磁誘導による発電特性とローレンツ力に起因するトルク制御メカニズムの解明を目的として、格子ボルツマン法を用いた数値解析コードの開発をした。

### 4. まとめと今後の課題

本年度の研究では、液体金属を用いた電磁エネルギー変換装置を試作し、ファラデーの電磁誘導による発電出力とローレンツ力による回転トルク制御機構の性能について基礎的な知見を得た。今後は、本装置の性能向上に向けて、本装置の過渡的性能を実験的に調査するとともに、Dellor's lattice Boltzmann model に基づく電磁流体解析コードの開発を行い、ファラデーの電磁誘導による発電特性とローレンツ力に起因するトルク制御メカニズムの解明を行う。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議、解説等を含む)  
なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] Y. Iwamoto, H. Takana, K. Taki and H. Yamaguchi: Lattice Boltzmann Simulation on MHD Energy Conversion for Efficient Wind Utilization, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 70-71.

- 3) その他(特許、受賞、マスコミ発表等)  
なし

Project code	J14031
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

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

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

\*Faculty of Engineering, Yamagata University,

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

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

### 2. Details of program implement

We are investigated self-sustained flow oscillations in an expansion chamber followed by a tailpipe, as shown in Fig. 1. In particular, we are investigating how the flow oscillations can generate acoustic standing waves in the tailpipe, and interact with them.

The unstable shear layer of the jet is modeled via a discrete vortex method, based on axisymmetric vortex rings. The aeroacoustic model is based on the Powell-Howe theory of vortex sound. Our approach is thus a typical 'acoustic analogy approach'. The acoustic problem, that is, solution with respect to acoustic pressure and particle velocity within the cavity/tailpipe, is solved analytically, as discussed in the next section.

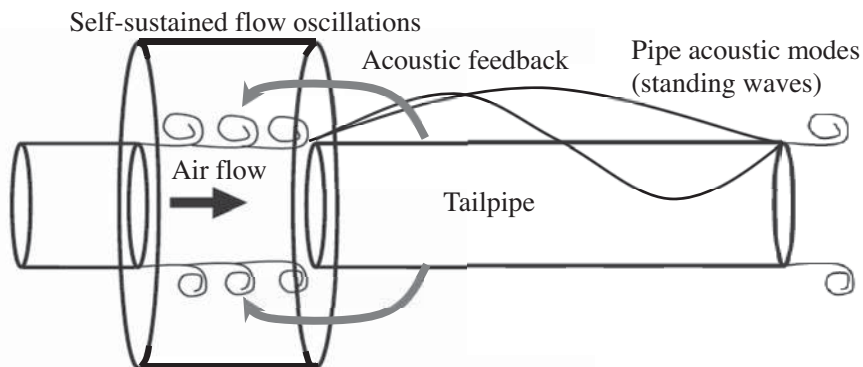


Fig. 1. An expansion chamber-tailpipe system. The red arrows symbolize acoustic feedback from the tailpipe to the self-sustained flow oscillations in the cavity.

### 3. Achievements

Analytical (approximate) expressions have been obtained, via matched asymptotic expansions, for the pressure and the axial component of the acoustic feedback velocity in a cavity-pipe system [4]. Advantages of such an approach are (i) fast numerical evaluations and (ii) analytical insights. As to (ii), it is found that the amplitudes of both the pressure in the pipe and the acoustic feedback velocity become infinite at the pipe resonance frequencies. This indicates an occurrence of lock-in of the self-sustained flow oscillations in the cavity to the resonant acoustic pipe pressure oscillations.

We have also, as a 'starting point', considered a very simple one-dimensional approximation to the acoustic problem [3].

### 4. Summaries and future plans

The main result is an analytical, approximate solution of the acoustic part of the problem, obtained via the method of matched asymptotic expansions [4].

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

The recently published paper [1] is relevant to the problem of active control.

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

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

\*[1] M. A. Langthjem and M. Nakano: A numerical study of the hole-tone phenomenon subjected to non-axisymmetric shape perturbations of the jet nozzle, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, (2015), DOI:10.1007/s00162-015-0343-z, provisionally scheduled for Vol. 29, Issue 3-4.

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

[2] M. A. Langthjem and M. Nakano: Interaction between Self-Sustained Flow Oscillations and Acoustic Resonance in a Cavity-Pipe System, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp. 424-425.

\*[3] M. A. Langthjem and M. Nakano: Numerical and experimental research on active control of self-sustained flow oscillations with sound interaction. *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 168-169.

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

Not applicable

課題番号	J14032
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

**非定常現象を伴う航空宇宙機に対する設計情報学の拡張**  
**Extension of Design Informatics for Aerospace Vehicle with Unstable Phenomena**

千葉 一永\*†, 大林 茂\*\*††  
 \*北海道科学大学工学部, \*\*東北大学流体科学研究所  
 †申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

騒音, 乱流, 振動をはじめとした非定常現象を伴う航空宇宙機の設計を取り扱うための新たな設計情報学の提案と構築を行う。

**2. 研究成果の内容**

非定常現象に伴う変数の増大に伴い, それらを効率的に取り扱うためのデータマイニング手法として階層型相関分析を提案し, 構築した. さらに, 本手法をハイブリッドロケットの概念設計に応用し, 課題を抽出するとともにアルゴリズムを発展させた.

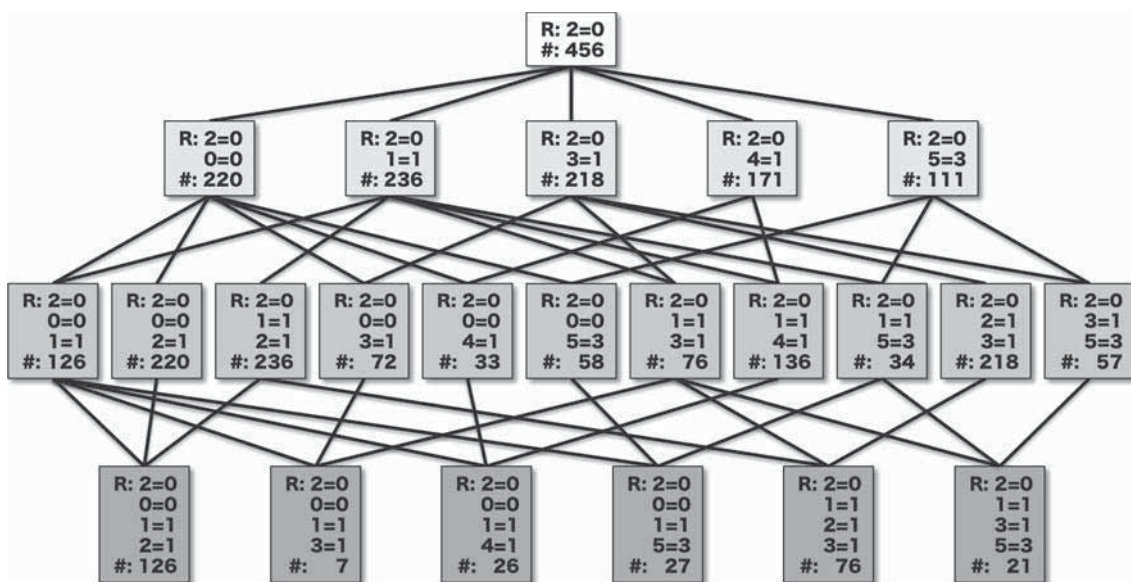


図1: 階層型相関分析により作成された階層樹形図の例.

**3. 研究目標の達成状況**

工学応用問題への適用が行われ課題も抽出できたため, 100%達成されたと言って差し支えない. 新たなアルゴリズムの構築と応用には多大な時間がかかるため, 複数の工学問題への応用は行っていない. しかしながら, 1年での成果としては申し分ないと思う。



#### 4. まとめと今後の課題

本研究では、非定常現象を伴う設計問題に対処すべく、新たなデータマイニング手法として階層型相関分析を提案し、工学問題に応用することで優位性を示した。本手法では、ルール生成に対して信頼度と確信度を用いている。ルール自体の信頼度を数学的に保証するため、信頼度が90%以上を確保している必要がある一方で、確信度はパラメータとすることができる。確信度を機械論的に決定するために、多様な工学問題に適用し試行錯誤することが今後の課題である。

#### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

##### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- \*[1] Chiba, K., Kanazaki, M., Watanabe, S., Kitagawa, K., and Shimada, T.: Structurization of Design Space for Launch Vehicle with Hybrid Rocket Engine Using Stratum-Type Association Analysis, *Adaptation, Learning and Optimization*, Volume 1, Edited by Handa, H., Ishibuchi, H., Ong, Y-S, Tan, K-C, Springer, (2015), pp. 509-521.
- [2] 千葉 一永, 渡邊 真也, 金崎 雅博, 北川 幸樹, 嶋田 徹: 設計情報学を用いたハイブリッドロケットエンジン搭載単段式宇宙輸送機概念設計, *日本機械学会論文集*, Vol. 80, No. 818, 特集号「設計工学とシステム工学の新展開 2014」, (2014), p. TRANS0287, pp. 1-13. (招待論文)
- [3] Chiba, K., Kanazaki, M., Watanabe, S., Kitagawa, K., and Shimada, T.: Structurization of Design Space for Launch Vehicle with Hybrid Rocket Engine Using Stratum-Type Association Analysis, *The 18<sup>th</sup> Asia-Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, IES2014*, Singapore, November, (2014), pp. 509-521.
- [4] Kanazaki, M., Chiba, K., Watanabe, S., Kitagawa, K., and Shimada, T.: Structurization and Visualization of Design Space for Launch Vehicle with Hybrid Rocket Engine, *IEEE International Conference on Data Mining, ICDM2014, 1<sup>st</sup> Workshop on Engineering Data Mining, EDM2014*, Shenzhen, China, December, (2014).

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[5] Chiba, K., Watanabe, S., Kanazaki, M., and Obayashi, S.: Stratum-Type Association Analysis for Conceptual Design of Hybrid Rocket in View of Fuels, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 30-31.
- [6] 千葉 一永, 渡邊 真也, 金崎 雅博, 北川 幸樹, 嶋田 徹: 燃料種を考慮したハイブリッドロケット概念設計における階層型相関分析, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 長崎, 2014年11月.

##### 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J14033
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	1年目 (発展)

### 伝熱面内の熱移動制御による高性能核沸騰伝熱面の開発

## Development of a High Performance Heat Transfer Surface for Nucleate boiling by Controlling Heat Conduction within the Surface

宮田 一司\*†, 森 英夫\*, 大平 勝秀\*\*††

\*九州大学大学院機械工学部門, \*\*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

核沸騰現象を用いた冷却は、高い熱伝達率を実現する方法として、電力を有効利用できる超伝導体や急速に発熱密度が増大している電子素子の冷却に有効である。本研究では、高い核沸騰限界熱流束を達成する伝熱面として、熱伝導率の高い材料と低い材料で構成される伝熱面を提案し、実験を行っている。熱伝導率の異なる材料の組み合わせにより、伝熱面表面に意図的に温度分布を作り出し、温度の高い高熱伝導率材上で核沸騰を生じさせ、温度の低い低熱伝導率材上では核沸騰を抑制して液相との接触を保つようにすることで高熱伝導率材上への液供給を補助する。結果的に、伝熱面全体では、高い熱流束まで核沸騰が維持されること、すなわち限界熱流束の向上が期待できる。

### 2. 研究成果の内容

今回実験を行った伝熱促進面は、銅製平滑面上に銅より熱伝導率の低い SUS 製の格子を置いたくぼみつき伝熱面および銅製平滑面上に格子状の溝を掘りエポキシ樹脂で埋めた平滑伝熱面である。実験に用いた 5 種の伝熱面 A-E の概要と仕様を図 1 および表 1 にそれぞれ示す。伝熱面 A, B および C は SUS 格子を用いた伝熱面、D はエポキシ樹脂を用いた伝熱面である。E は、伝熱促進効果検討の基準となる、銅製平滑面である。試験流体には、大気圧下の液体窒素を用いた。

実験で得られた各伝熱面の沸騰曲線と限界熱流束を図 2 に示し、銅製平滑面 E に対する限界熱流束の向上率と伝熱面表面積の拡大率の関係を図 3 に示す。図 2 に示すように、促進面

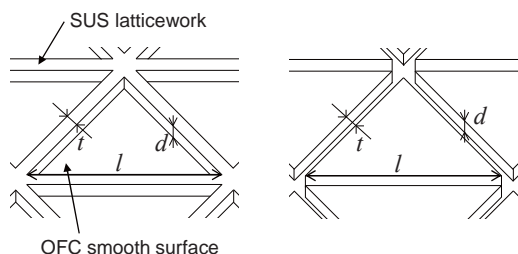


図 1 実験に用いた伝熱面の概要 (左図：伝熱面 A-C, SUS 格子を用いた伝熱面, 右図：伝熱面 D, エポキシ樹脂を用いた伝熱面)

表 1 実験に用いた伝熱面の仕様

	A	B	C	D	E
投影面積 $A_p$ mm <sup>2</sup>	490				
$d$ mm	0.05	0.05	0.01	0.5	-
$t$ mm	0.2	0.2	0.03	0.5	-
$l$ mm	2.5	1.0	0.3	2.3	-
表面積 $A$ mm <sup>2</sup>	545	593	569	490	490

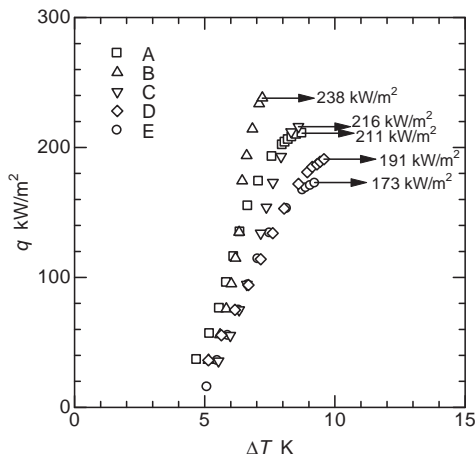


図2 各伝熱面の沸騰曲線

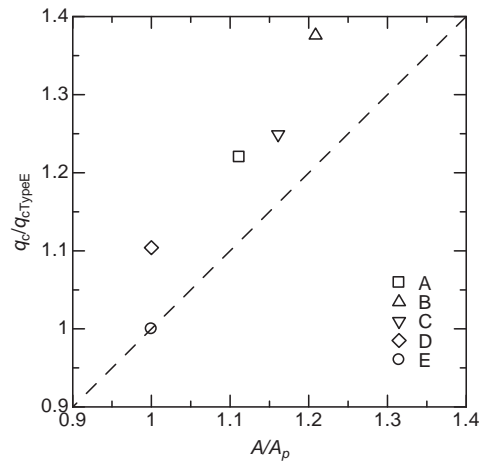


図3 限界熱流束向上率と伝熱面拡大率の関係

A-Dのすべてで限界熱流束は銅平滑面Eよりも向上している。また、図3に示すように、限界熱流束の向上率は伝熱面表面積の拡大率よりも高い。特に伝熱面Dは、表面は平滑でありながら、限界熱流束の向上効果がみられる。さらに、沸騰実験中の沸騰様相の観察結果から、促進伝熱面A-Dいずれの場合も、核沸騰は熱伝導率の高い銅表面上で優先的に生じ、熱伝導率の低いSUSあるいはエポキシ樹脂の表面上ではほとんど核沸騰が生じていないことが確認された。これらの結果から、本研究で提案する熱伝導率の高い材料と低い材料を組み合わせた伝熱面は、均質な伝熱面に比べて高い限界熱流束を達成できることが明らかとなった。また、この伝熱促進法は、伝熱面Dのように伝熱面表面積を増大させることなく限界熱流束の向上が可能で、強制対流沸騰冷却系に適用すれば、摩擦損失を増大させることなく限界熱流束の向上が可能である。

### 3. 研究目標の達成状況

従来提案されている限界熱流束向上効果を有する伝熱面は、多くが複雑な表面構造を有しており、流動沸騰冷却系では圧力損失を増大させる。本研究では、平滑な表面でも限界熱流束を向上させる手法の実証を目標とし、その目標は上記の通り達成された。

### 4. まとめと今後の課題

熱伝導率の高い材料と低い材料を組み合わせることで、高い限界熱流束を有する伝熱面の開発を行った。本方法は伝熱面表面を平滑にしても効果が現れる。効果の程度については、作動流体の物性値、伝熱面の形状や性状によって異なることが予想されるため、限界熱流束向上効果に対するこれらパラメータの影響について定量的関係を明らかにすることが今後の課題として挙げられる。

### 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] K. Miyata, K. Ohira and H. Mori: Nucleate Pool Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux of Liquid Nitrogen on the Surface Composed of a High and a Low Thermal Conductivity Materials, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 60-61.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

Project code	J14034
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

### Energy Release Dynamics in Porous Media

Nickolay Lutsenko\*†, Kaoru Maruta\*\*††, Anatolii Maznoy\*

\* Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

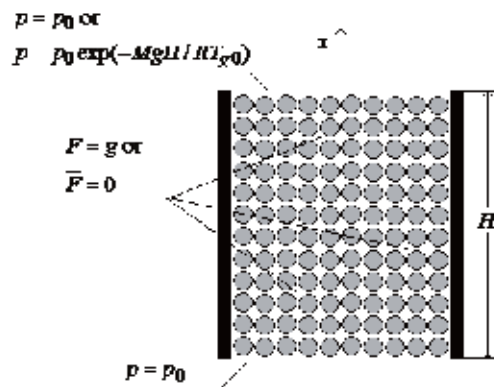
#### 1. Purpose of the project

The objective of the present project is to develop the efficient numerical algorithms and experimental techniques for investigating the fundamental characteristics of the time-dependent gas flows through porous media with combustion and other energy-release zones.

#### 2. Details of program implement

Gravity is known to affect heterogeneous combustion in porous media; especially it is appreciable at very low air (oxidizer) flow rates. Effect of gravity on the combustion of porous objects includes not only the force of gravity (gravity field inside the porous object), but also the pressure difference at boundaries of the porous object, which is caused by the action of gravity on the ambient air, if the open borders of the object are located at different heights.

In the present project, we have studied numerically how the gravity field inside the porous object and the above-mentioned pressure difference at the object boundaries affect the combustion process in the object. Using original mathematical model and numerical method, the one-dimensional unsteady combustion regimes have been compared in the following porous objects: the vertical (in which there are effect of the gravity field inside the porous object and the pressure difference on object borders), horizontal (in which there aren't effect of the gravity field and the pressure difference on object borders),



the object with gravity field inside the porous object and without the pressure difference on object borders, the object with the pressure difference on object borders and without gravity field inside (Fig. 1). It is revealed that in the object with the pressure difference at object boundaries and without gravity field the combustion wave spreads in the same direction and in the same propagation mode as in the real vertical porous object, but with a higher speed of propagation; in the porous object with gravity field and without the pressure difference at object boundaries the combustion wave spreads in the opposite direction or has a different propagation mode.

It is shown that a burner made from porous intermetallic Ni-Al compound in the filtrational combustion mode provides a radiative energy efficiency of up to 70 % of the total fuel heat capacity. The NO<sub>x</sub> exhaust is within 33÷36 mg/m<sup>3</sup> only. Up to 30 % of the

total radiative flux of the burner is accounted for by the gas-phase radiation, while the rest is made up by the thermal radiation from the porous material surface.

In the course of project implementation Russian project members (Nickolay Lutsenko, Anatolii Maznoy, Alexander Kirdyashkin) visited Institute of Fluid Science, Tohoku University. During the visit Japanese and Russian groups had discussions on the results obtained in the frame of the project and formulated plans of the future research. Project member took part in the 14th International Symposium on Advanced Fluid Information and presented results of the project.

### 3. Achievements

The results which had been expected in the present project were achieved. It was studied numerically how the gravity field inside the porous object and the pressure difference at the object boundaries, which is caused by the action of gravity on the ambient air, affect the appearance of self-sustaining heterogeneous combustion waves in the object. A combustion mode is experimentally demonstrated, wherein the combustion wave is localized inside the wall of the porous matrix. Under this condition, up to 70 % of the total heat value of the fuel mixture is converted into IR flux radiated from the surface of the nozzle, with the maximum lying within the wavelength region 3–11  $\mu\text{m}$ .

### 4. Summaries and future plans

It is revealed that the gravity field inside the porous object and the pressure difference at object boundaries, which is caused by the action of gravity on the ambient air, lead to opposite effects: the pressure difference on object borders leads to the propagation of the combustion wave in the same direction and the same mode as in the vertical porous object, but the gravity field leads to the spread of the wave in the opposite direction or in a different mode. In the vertical porous object the pressure difference at object boundaries defeats the effect of gravity field inside the porous object, but the gravity force leads to reducing the velocity of combustion wave.

The original numerical method for modeling the time-dependent 2D processes in porous media with zones of heterogeneous combustion under both natural convection and forced filtration will be developed and used for solving some problems. A wide variety of porous-material products manufactured by the combustion synthesis process, which could be applied in energy-conversion devices relying on the principle of filtrational combustion of gases, will be designed.

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

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

[1] N.A. Lutsenko, V.A. Levin V.A.: Effect of Gravity Field and Pressure Difference on Heterogeneous Combustion in Porous Media, *Combustion Science and Technology*, 186 (2014), pp. 1410-1421.

[2] A. I. Kirdyashkin, A. N. Guschin, A. S. Maznoy, S. S. Minaev, F. S. Palesskiy: Combustion-synthesized porous Ni-Al materials for radiative porous burners, *Advanced Materials Research*, 1040 (2014), pp. 442-448.

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

\*[3] N.A. Lutsenko, K. Maruta: On Numerical Modeling of Some Features of Heterogeneous Combustion Waves in Porous Media under Free Convection, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 58-59.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J14035
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	1 年目 (発展)

次世代型太陽電池に向けた量子ドット 3 次元構造の光応答制御  
Control of Optical Responses in Three-Dimensional Structure of Quantum Dots for  
Next-Generation Solar Cells

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

本研究では、これまでの一般共同研究で実施してきた精密なビームフラックス制御による高品質な InGaAs/GaAs 量子ドット超格子の作製技術を一層発展させて、量子ドット 3 次元構造を利用して次世代型高変換効率太陽電池に最適な光応答制御技術の構築をめざした。本研究では、3 次元構造化（超格子化）した高品質な InGaAs/GaAs 量子ドット構造を作製して、光吸収特性やキャリア励起緩和プロセスを明らかにすることによって太陽電池の高効率化に結びつく物性を顕在化させ、最適な太陽電池セル構造を明らかにした。

## 2. 研究成果の内容

高効率中間バンド型太陽電池実現のためには、中間バンドを介した 2 段階光吸収過程を顕在化させる必要がある。本開発では InAs/GaAs 量子ドット超格子により形成した励起準位ミニバンドの影響を詳細に調べた。量子ドット層間の中間層は、量子ドットどうしが面直方向に電子的結合を保てる程度に十分薄くし、量子ドット超格子を作製した。作製した太陽電池試料について、量子準位での光吸収とそれによる光電流の生成量を測定することで、面直方向のミニバンド形成による電子-正孔分離が太陽電池特性に与える影響を調べた。ΔEQE/EQE スペクトルは 940 nm 付近で約 50% 変化しており、明瞭な 2 段階光吸収による光電流生成を観測することに世界で初めて成功した。2 段階光吸収の増大にどのような量子準位が寄与したのかを PLE 特性から考察したところ、高次の量子ドットミニバンドにおけるキャリア分離による高効率な 2 段階光吸収が実現できていることが明らかになった。

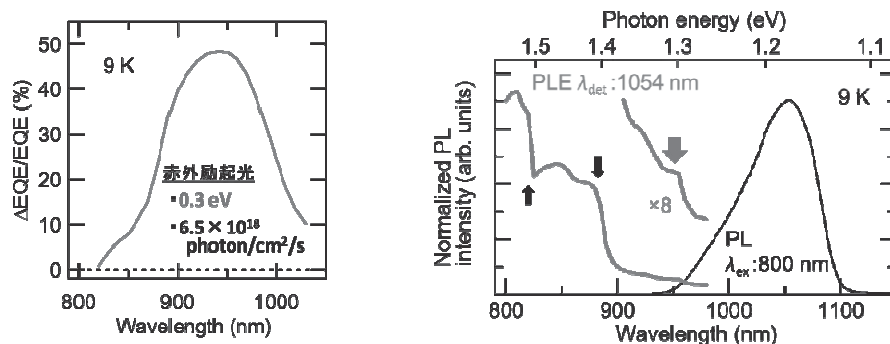


図 1. 量子ドット超格子太陽電池セルの ΔEQE/EQE スペクトル (左) と発光及び発光励起スペクトル (右) .

### 3. 研究目標の達成状況

光応答特性に優れた量子ドット3次元構造の量子状態を精密に制御でき、光励起キャリアダイナミクスを精密に評価することによって、効率のよいキャリア引出を実現する太陽電池構造が設計できる。特に、量子構造の最適化によって透過損失が著しい近赤外域の光応答を向上させることができれば、次世代太陽電池で期待されている50%の高変換効率を臨むような、これまでにない新しいデバイスを提案できる。本研究では、超格子ミニバンドにおけるキャリア分離を実現して、世界で初めて明瞭な2段階光吸収を観測することに成功した。

### 4. まとめと今後の課題

次世代の量子構造太陽電池セルではセル構造中に挿入した量子構造における光励起キャリアのダイナミクスを精密に理解することが不可欠である。本研究では、InAs/GaAs量子ドット超格子における2段階光励起過程をピコ秒の時間スケールで追跡し、サブバンド間光励起・緩和過程を明らかにした。これによって、量子ドット3次元構造における光吸収・緩和ダイナミクスとキャリア取出し効率について定量的に明らかにできた。今後は、キャリア寿命制御技術を構築することによって、次世代型高変換効率太陽電池に最適な光応答制御技術を開発できると考えている。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] S. Asahi, H. Teranishi, N. Kasamatsu, T. Kada, T. Kaizu, and T. Kita: Suppression of Thermal Carrier Escape and Efficient Photo-Carrier Generation by Two-Step Photon Absorption in InAs Quantum Dot Intermediate-Band Solar Cells Using a Dot-in-Well Structure, *J. Appl. Phys.*, Vol. 116, (2014), 063510-1~5.

\*[2] 喜多隆, 原田幸弘: 中間バンド型高効率太陽電池—量子ナノ構造中における光キャリアダイナミクス—, 応用物理「解説」, Vol. 83, No. 5, (2014), pp. 348-355.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[3] T. Kita: Growth and Characterization of Stacked InAs/GaAs Quantum Dots for Photovoltaics, *International Symposium on Recent Progress of Photonic Devices and Materials*, Kobe, November 13-14, (2014). (招待講演)

\*[4] T. Kaizu, and T. Kita: Photoluminescence Properties of InAs Quantum Dots on Nitrogen  $\delta$ -doped GaAs, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 148-149.

[5] T. Kita: Carrier Dynamics and Two-Step Photon Absorption in InAs/GaAs Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells, *High-Efficiency Materials for Photovoltaics 2014*, London, July 21-22, (2014). (招待講演)

#### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J14036
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	3年目

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

田中 克史\*†, 谷口 優\*, 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、及び、250 nm 程度の二酸化チタンナノ粒子を用いて分散系を調製した。分散媒は、粘度  $\eta_c = 0.05 \text{ Pa s}$  のシリコンオイル、 $\eta_c = 0.04 \text{ Pa s}$  の化学変成したシリコンオイル、及び、両者の等重量混合系オイルを用いた。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。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、及び、流動挙動の同時観測が可能な平行平板型回転粘度計を用い、平板の間隙は、50  $\mu\text{m}$  とした。

粒子径 400 nm 程度の粒子、変成シリコンオイルを用いて、粒子濃度 20 vol% で調製した流体について、流体調製直後、長期間貯蔵後の比較を行った。16 kV/mm の直流電場印加後における応力値は、調製直後は 4 kPa 程度、18 カ月経過後では、最大値として 3 kPa 程度の値を示したが、電場印加後における応力は非常に遅いモードで応答する結果が得られた。また、電場印加時における応力のせん断速度依存性を評価した結果、図 1 に示すように、せん断速度の増加にともない、50  $\text{s}^{-1}$  近傍において応力値が減少した後、増加に転ずる挙動が得られた。さらに、せん断速度の増加・減少に対応して応力値はヒステリシスを示す結果が得られた。流動挙動の同時観察の結果、対応するせん断速度域において、粒子の平行円板外への不可逆的な排出が認められた。

粒子径 250 nm 程度の粒子、シリコンオイル、変成シリコンオイル、及び、両者の等質量混合系オイルを用いて、粒子濃度 25 vol% で調製した流体について、無電場における流動挙動を中心に検討を行った。図 2 に、各流体について得られた無電場における応力のせん断速度依存性を示す。各流体は、見かけの降伏応力を示しており、全せん断速度範囲において、変性シリコンオイルを用いた流体は、シリコンオイルを用いた流体より、1 桁程度低い応力値を示す結果が得られた。混合系オイルを用いた流体について得られた応



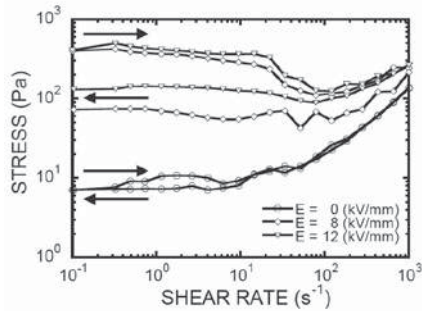


図 1：応力のせん断速度依存性

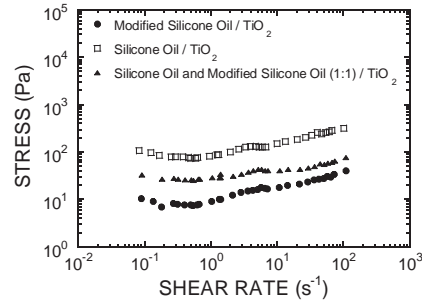


図 2：無電場における応力のせん断速度依存性

力については、シリコンオイルを用いた流体における応力値と、変性シリコンオイルを用いた流体における応力値との間の値として得られた。

### 3. 研究目標の達成状況

貴研究所における流動評価システムにより、図 1 で示した高せん断速度域の応力挙動に対応する粒子の平行円板外への不可逆的な排出が認められ、流動不安定性の一因と考えられる。また、図 2 の結果から、粒子界面で吸着する化学変性オイルの寄与が示唆される。

### 4. まとめと今後の課題

無電場下における応力値の一層の低下、流動の安定化が望まれる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)  
なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[1] K. Tanaka, S. Robson, K. Kitaura, H. Kobayashi, M. Nakano and A. Totsuka: Development and Micro-Channel Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proc. of the 14th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 152-153.
- \*[2] K. Tanaka, H. Kobayashi and M. Nakano: Electro-Rheological Behavior and Microstructure of Nano-Suspensions based on Titanium Dioxide Nano-Particles, *Proc. of the 11th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp. 398-399.
- [3] K. Tanaka, S. Robson, Y. Taniguchi, H. Kobayashi, M. Nakano and A. Totsuka: Micro-Gap Flow Behavior and Micro-Structure of Electro-Rheological Nano-Suspensions based on Titanium Dioxide Nano-Particles, *Proc. of the 14th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, Granada, (2014), 1 page.
- [4] 谷口優, ロブソン星夜, 田中克史, 小林治樹, 中野政身, 戸塚厚: ナノ粒子分散系エレクトロレオロジー流体における粒子挙動と流動特性, 日本レオロジー学会第 41 年会講演予稿集, 東京, (2014), pp. 19-20.
- [5] 田中克史, ロブソン星夜, 北浦啓太, 小林治樹, 中野政身, 戸塚厚: 二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流動挙動, 第 62 回レオロジー討論会講演要旨集, 福井, (2014), pp. 384-385.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J14037
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

## Ignition Studies of Gaseous Pre-mixtures in Turbulent Flow

Roman Fursenko\*†, Kaoru Maruta\*\*††  
 Evgeniy Sereshchenko\*, Sergey Mokrin \*, Hisashi Nakamura\*\*, Koichi Takase\*\*,  
 Onishi Takakazu\*\*

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

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

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

### 2. Details of program implement

Flame initiation in turbulent flow is one of the most important problems in combustion theory. It plays an important role in the performance of various energy conversion devices with gas combustion. Investigation of ignition processes have not only fundamental importance but also essential for a better control of fuel efficiency, exhaust emission, and idle stability of the engine operation. Most practical combustion devices require combustion events to be initiated at a predetermined location and time. Furthermore, the deep understanding of ignition processes is crucial for optimization of ignition systems especially when ignition of lean premixed mixtures under turbulent conditions is considered.

The ignition process in ABC-flow field modeling turbulent flow was investigated numerically in the frame of 3D thermal-diffusion model. The dependencies of minimum ignition energy on vortexes size, velocity amplitude and Lewis number were obtained (see Fig.1 and Fig.2). Dependencies of minimum ignition energy on wave number  $k$  calculated for different flow intensity  $U$  and Lewis number  $Le$  are shown in Fig. 1. It was found that for the fixed value of flow-intensity  $U$  there is a critical wave number corresponding to the maximal ignition energy (see Fig. 1). Unlike the 2D case, in the 3D case this critical wave number depends on

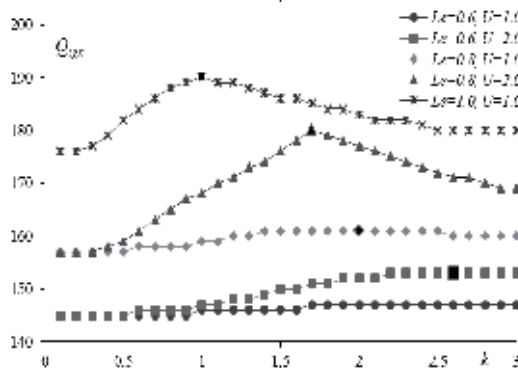


Fig. 1. Dependencies of minimum ignition energy on wave number calculated for different  $U$  and  $Le$

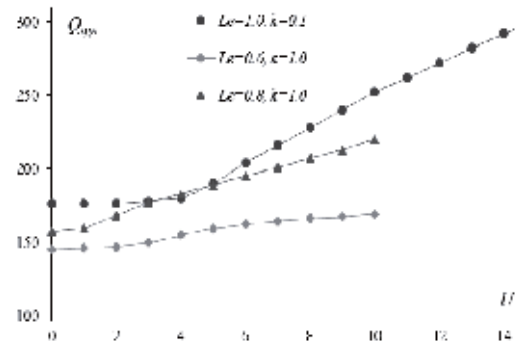


Fig. 2. Dependencies of minimum ignition energy on flow-intensity calculated for different  $k$  and  $Le$

flow-intensity. The numerical results shows that in large-scale eddies flow, the minimum ignition energy is almost constant until the turbulent intensity exceeds some critical value, then the abrupt linear increase of ignition energy is observed (see Fig. 2). Such behavior resembles previous experimental observations. It may be concluded that the reduced thermal-diffusion model combined with prescribed flow field is reasonable for qualitative investigations of the ignition in the turbulent flow. In the course of project implementation Russian project members (R. Fursenko and E. Sereshchenko) visited Institute of Fluid Science, Tohoku University. During the visit Japanese and Russian groups had discussions on the results obtained in the frame of the project and formulated plans of the future research. Project members took part in the 14<sup>th</sup> International AFI conference and presented the results of the project.

### 3. Achievements

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

### 4. Summaries and future plans

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

The future research will be directed towards further investigations of the influence of vortexes size, velocity amplitude, mixture contents, Lewis number and radiative heat losses on minimum ignition energy. Ignition of pre-mixtures in ABC-flow field modeling 3D turbulent flow will be examined numerically in the frame of thermal-diffusion model formulated for confined domain with non-adiabatic boundary conditions. Such simulations will contribute to the understanding of the effect of boundary conditions on ignition processes in practical devices. Numerical results obtained in the frame of proposed models will be verified on the basis of experimental data available in the literature. In 2D case, the numerical simulations in the frame of the model including hydrodynamic effects will be performed. It allow us to estimate the influence of gas thermal expansion on ignition process at various conditions.

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

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

[1] E. Sereshchenko, R. Fursenko, S. Minaev, S. Shy: Numerical Simulations of Premixed Flame Ignition in Turbulent Flow, *Combustion Science and Technology*, Vol. 186, (2014), pp. 1552-1561.

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

[2] E. V. Sereshchenko, S. S. Minaev, R.V. Fursenko, K. Maruta, S. Shy: Numerical studies of ignition gaseous pre-mixtures in stationary turbulent flows, *"Progress in Continuum Mechanics" International Conference dedicated to the 75th anniversary of academician V. A. Levin*, Vladivostok, (2014), pp. 442-443.

\*[3] E. Sereshchenko, R. Fursenko, S. Minaev, S. Shy, K. Maruta, H. Nakamura, Numerical studies of ignition in ABC-flow modeling 3D turbulence, *Proceedings of the 14th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 64-65.

課題番号	J14038
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目 (発展)

**しゅう動面における Me-DLC 由来軟質金属層の諸物性と摩擦・摩耗特性に関する研究**  
**Research on the Physical and the Tribological Properties of a Soft Metal Layer Originating**  
**in Me-DLC on Sliding**

後藤 実\*†, 高木 敏行\*\*††

伊藤 耕祐\*\*\*, 竹野 貴法\*\*\*\*, 三木 寛之\*\*\*\*\*, 小助川 博之\*\*

\*宇部工業高等専門学校, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*日本大学工学部, \*\*\*\*東北大学大学院, \*\*\*\*\*東北大学学際科学フロンティア研究所

†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

軟質金属と DLC マトリクスからなるナノコンポジットコーティングの摩擦界面に生ずる軟質金属質トライボフィルムの物性を明らかにし、摩擦界面における軟質金属質トライボフィルムの組成・構造および機械的性質が摩擦・摩耗特性におよぼす効果を明らかにすることで、軟質金属とアモルファス炭素からなるナノコンポジット膜しゅう動材料の摩擦・摩耗特性の設計手法の確立に資することを目的とする。

**2. 研究成果の内容**

東北大学流体科学研究所所有のPVD/CVD複合成膜装置で成膜したCu/DLCナノコンポジットコーティング (Cu-DLC) およびAg/DLCナノコンポジットコーティング (Ag-DLC) とSUJ2ベアリング鋼球およびC2700真鍮球との摩擦・摩耗試験を行った。その結果、Ag-DLCは、しゅう動相手材が硬度の高いSUJ2ベアリング球の場合には摩擦特性にヘルツ面圧依存性が強まるのに対し、硬度が低いC2700真鍮球の場合には摩擦係数のヘルツ面圧依存性が弱まることがわかった。しゅう動相手材の摩擦面には銀を主成分とするトライボフィルムが生成することをエネルギー分散型分光分析 (EDS) で確認した。一方、Cu-DLCとSUJ2ベアリング球との摩擦においては、摩擦係数の荷重依存性は極わずかであった。トライボフィルムのナノインデンテーション測定の結果、銀を主成分とするトライボフィルムに対する押し込み深さは銅を主成分とするトライボフィルムに対する押し込み深さよりも約31%程度深く、銀を主成分とするトライボフィルムの硬さの方が小さいことが確認できた。しゅう動相手材とその摩擦面に生成したトライボフィルムのナノインデンテーション硬さが大きく異なるほど摩擦特性のヘルツ面圧依存性が強まることが明らかになった。

金属ターゲットを用いてPVD/CVD複合成膜装置によって金属/DLCナノコンポジットコーティングを成膜する場合、比較的早い成膜速度が得られる反面、プロセスガス中の炭化水素イオンによる金属ターゲット表面の汚染を防いで安定した成膜速度を得るため、アルゴンと炭化水素ガス (今回はアセチレン) の流量比に応じてある程度高いDC出力を与えなければならない。そのため、銀や銅などのスパッタ率の高い金属とCVD-DLCのナノコンポジットコーティングを成膜する場合、膜中の金属含有量がある一定以上の高い濃度になってしまうことがわかった。銀の場合、EDSによって見積もった最低の金属含有量は約68at.%であ

った。そこで、RF マグネトロンスパッタ装置を使用し、炭素のベースターゲット上に銀または銅のタブレットを配置した複合ターゲットを用いて金属含有量が 50at.%以下の Ag-DLC および Cu-DLC の成膜を試みた。その結果、スパッタ出力と炭素のベースターゲット上に配置するタブレットの面積比と位置を適切に変化させることで、EDS による分析の結果銅含有量が 24~55at.%の Cu-DLC と銀含有量が 26~65at.%の Ag-DLC が作成可能であることを確認した。透過電子顕微鏡 (TEM) による膜構造観察の結果、これらのナノコンポジット膜は DLC マトリクス中に金属含有量に応じて粒径 5~20nm 程度の金属クラスターが分散する構造であることが確認され、PVD/CVD 複合成膜装置で成膜した膜と定性的に同一のナノ構造であることが明らかになった。

### 3. 研究目標の達成状況

これまでの PVD/CVD 複合成膜法によって成膜した Cu-DLC および Ag-DLC に加え、新たに金属含有量が低いナノコンポジット膜を RF マグネトロンスパッタ法で成膜する方法を明らかにしたことで幅広い金属含有量のナノコンポジットコーティングを成膜することが可能になり、知的流動評価研究分野に設置されている摩擦・摩耗試験機を用いた薄膜材料のトライボロジー特性評価の精度を飛躍的に向上させ、接触境界面におけるナノメカノ流動ダイナミクスの学理構築に寄与すると共に、次世代炭素ナノコンポジット摺動材料の設計手法の確立に 3 割程度資する結果を得た。

### 4. まとめと今後の課題

これまでの PVD/CVD 複合成膜法でスパッタ率の高い銅や銀と DLC のナノコンポジットコーティングを成膜した場合、金属含有量の低い膜を得ることは難しかったが、炭素のベースターゲット上に銀または銅のタブレットを配置した複合ターゲットを用いた RF マグネトロンスパッタ法により金属含有量が 50at.%以下で定性的に同一ナノ構造を持つ Ag-DLC および Cu-DLC が容易に得られることが明らかになった。今後、広範囲の膜中金属含有量変化と摩擦・摩耗特性の関係について明らかにしていくと共に、DLC ベースマトリクスの違いによる膜物性変化および摩擦・摩耗特性を明らかにしていく。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] Minoru Goto, Kosuke Ito, Hiroyuki Miki, Takanori Takeno: Research on the Physical and the Tribological Properties of a Soft Metal Layer Originating in Me-DLC on Sliding Surface, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 142-143.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

課題番号	J14039
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	1年目

**歪み Ge-on-Insulator 基板の作製とデバイス応用**  
**Fabrication of Strained Ge-on-Insulator and Device Application**

澤野 憲太郎\*†, 寒川 誠二\*\*††

深山 剛\*

\*東京都市大学総合研究所, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

近年, Si-CMOS はスケーリング限界をむかえつつあり, Si に代わる高移動度チャネルとしてゲルマニウム(Ge)が注目されている. Ge はもともと Si の数倍のバルク移動度を有するが, 高度結晶成長技術によって Ge に結晶歪みを導入することで, さらなる移動度の増大が実現可能である. 本研究では, Si 基板上に, 高品質 Ge-on-Insulator (GOI)構造を作製し, それを使った高移動度 Ge チャネル MOS デバイスの開発を行う. GOI 構造として, Ge のエピタキシャル成長と貼り合わせを用いた手法を開発する. さらに, 高移動度実現に最重要となる Ge 上のゲート絶縁膜について, 本研究では, 中性粒子ビーム酸化 (NBO) 法を駆使する. これにより, ダメージフリーの Ge 酸化膜形成を可能とし, 界面準位密度を大幅に低減させた, 高品質界面を実現する. Ge エピ膜は歪みを有しているが, NBO 法が低温での酸化が可能であるため, Ge チャネルの歪みを維持 (歪み緩和を抑制) することが期待でき, 超高移動度を有する歪み GOI チャネル MOS デバイスの実現を目指す.

## 2. 研究成果の内容

以下の手法で GOI 構造を作製した. Si(100)及び(111)基板上に固体ソース MBE を用いて成長温度 350°Cで膜厚 40 nm の LT-Ge 層を成長させた後, 成長温度 600~800°Cで 500nm ~1 $\mu$ m の HT-Ge 層を成長した. その後, SiO<sub>2</sub>/Si 支持基板への貼り合わせと選択エッチングプロセスにより GOI を作製した.

作製した GOI 基板の電機伝導特性を評価することで, 基板の結晶性やキャリア濃度を知ることができ, デバイス化に重要な知見を得ることができる. そこで今回は, GOI 作製プロセス前の Si 基板上 Ge エピ膜 (Ge-on-Si) と GOI 構造について Hall 測定を行った. 図 1 に各成長温度の Ge-on-Si, 及び GOI 構造の Hall 移動度と正孔密度の温度特性を示す.

Ge-on-Si の移動度について見ると, 低温領域では, 成長温度が高い方が高移動度, 低正孔度であり, 結晶性が良好であることを示す. 一方, 室温付近で大幅な移動度の低下, 正孔密度増大が見られた. これは, 欠陥を多量に含む LT-Ge 層からの低移動度の正孔が, 室温付近で急激に増加し, 全体としての移動度を低下させているためと考えられる. GOI 構造において, この LT-Ge 層は完全に除去されるため, 室温で 2090 cm<sup>2</sup>/Vs のいう高正孔 Hall 移動度が得られた. この Hall 移動度は高純度バルク Ge の Hall 移動度とほぼ一致し, この GOI 構造が非常に高品質であることを示している.

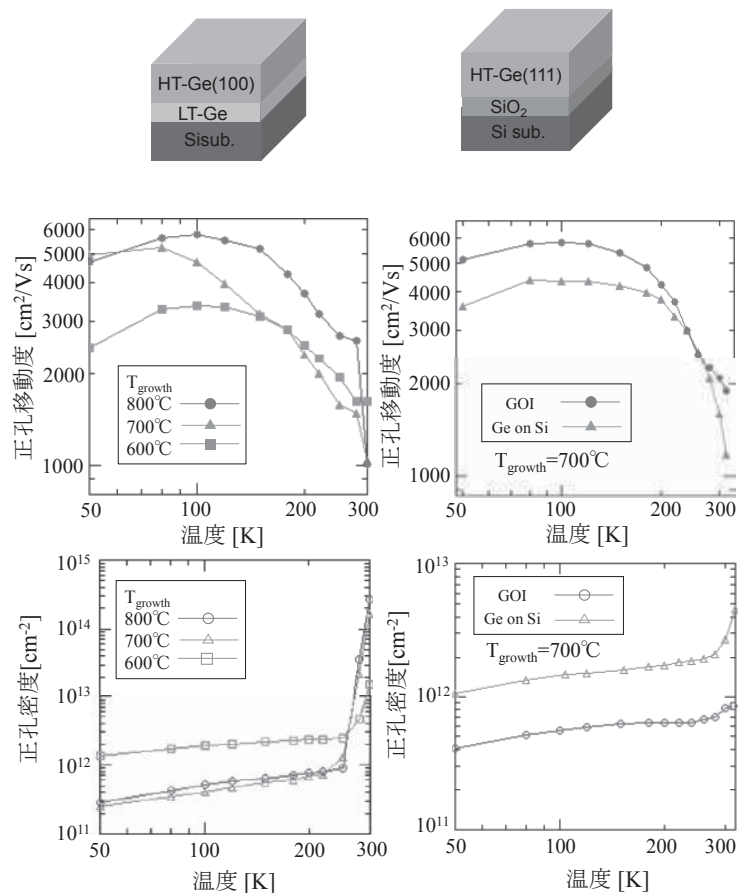


図1：各成長温度での、Ge-on-Si、及びGOI構造のHall移動度と正孔密度の温度特性

### 3. 研究目標の達成状況

今回、電気伝導特性評価より、当初目標の、欠陥密度が低く、欠陥由来のキャリア密度の低い、高品質歪みGOI基板（厚さ100nm以下）が得られていることを示す結果を得たと言える。今後TEM観察等で欠陥、転位の直接観察を進める。

### 4. まとめと今後の課題

高移動度Geデバイスの基板となる高品質GOIの形成が可能となったので、この基板をもとに、NBOによるダメージフリーかつ、低温での酸化膜形成により、低界面準位密度の高品質なゲート酸化膜を有する高移動度GOI-MOSFETへとつなげる。特に、原子層堆積法(ALD)によるゲート絶縁膜積層構造の形成を検討することにより、高誘電率かつ低リーク電流を同時に達成する構造最適化を進める。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

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

課題番号	J14040
区分	一般共同研究
課題分野	基礎研究分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	1 年目 (発展)

### 乱流中の渦の複雑な時空間構造の解析

#### Analysis of Complex Spatiotemporal Structures of Vortices in Turbulence

石原 卓\*†, 服部 裕司\*\*††

\*名古屋大学工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

#### 1. 研究目的

高レイノルズ数乱流中の強い管状渦はしばしば密に集合して複雑な大規模組織構造を形成する。本研究の目的は、乱流の大規模な直接数値計算を行い、その乱流中に存在する強い渦の合体・分裂などの複雑な時間変化を特徴付ける方法を開発し、それをを用いて、乱流中の渦の大規模組織構造の形成過程を理解するための解析を実施することである。

#### 2. 研究成果の内容

本年度は、これまでに開発した乱流中の強渦度領域の抽出および時空間追跡アルゴリズムを活用して、(1) 乱流の大規模直接数値計算 (DNS) によって得られた渦度場の解析、および (2) 抽出される渦構造を特徴付ける統計量の解像度依存性の解析を行った。

その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 高レイノルズ数乱流中では、強い渦管が集中して渦の組織構造を形成することが最近の研究で明らかになっているが、開発した強渦度抽出アルゴリズムをテイラー長程度の長さで粗視化したエンストロフィー場に適用することで、効率的に渦の「組織構造」が抽出できる。
- (2) 乱流 DNS では、微細な構造をどこまで解像するかを指標として、 $k_{\max} \eta$  の値がある。ここで  $k_{\max}$  は DNS における最大波数であり、 $\eta$  はコルモゴロフ長である。強渦度領域の時間変化に関する統計は  $k_{\max} \eta$  の値が 4 以上で収束する傾向を見せる。

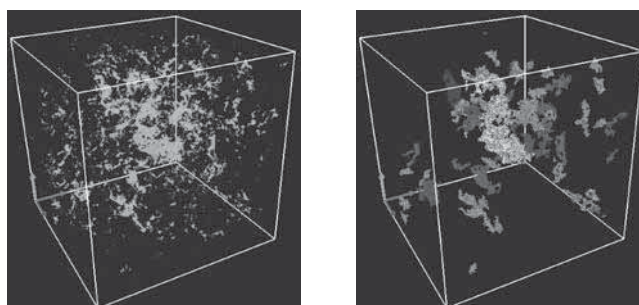


図 1：格子点数  $4096^3$  の乱流 DNS で得られた、粗視化した強渦度領域 (左) と開発したアルゴリズムを用いて抽出された高渦度組織構造 (右)



### 3. 研究目標の達成状況

研究の予想される成果（高レイノルズ数乱流中の強い渦度の大規模な組織構造が形成される過程が明らかになると期待される。）については、まだ解析の準備段階のため結果が得られていないが、(1) で今後の解析の指針が得られたこと、および、(2) により、微細な渦構造の時間変化を定量化する際に重要となる知見が得られたことにより、本年度の達成度は90%である。

### 4. まとめと今後の課題

これまでに開発した、乱流中の強渦度領域の抽出および時空間追跡アルゴリズムを活用して、高レイノルズ数乱流中の渦の組織構造の抽出に成功した。また、微細な渦構造の時間変化を特徴づけるのに必要な解像度を明らかにした。得られた知見を活かし、高レイノルズ数乱流場の階層的な時空間構造を定量的に明らかにしていくことが今後の課題である。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] T. Ishihara: Vortical structures in homogeneous high Reynolds number turbulence, *Joint Seminar*, Osaka University, (2014). (Invited)

[2] T. Ishihara: Vortical Structures in High Reynolds Number Turbulence ( $Re \sim 10^5$ ) by Large-Scale DNS on K computer, *Seminar at Imperial College London*, (2014). (Invited)

[3] T. Ishihara: Computational science of high Reynolds number turbulence, *Symposium on Analysis for structures and singularities in fluids*, Nagoya Univ., (2014). (Invited)

[4] 石原 卓: カノニカル乱流の大規模直接数値計算, 第27回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」, 国立天文台 三鷹キャンパス, (2014). (Invited)

\*[5] Takashi Ishihara, Yuji Hattori: Analysis of Complex Spatiotemporal Structures of Vortices in Turbulence: Extraction of Strong Vortical Clusters in High-Reynolds-Number Turbulence, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 172-173.

#### 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	J14041
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	3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,  $\text{SN}_2$ ) 噴霧流を利用した新型超高熱流束冷却システム開発のための基礎データを得ることを目的とし、相間エネルギー輸送と相変化を考慮した単一固体窒素粒子衝突による冷却熱伝達特性に関する検討を行った。その結果、加熱平板に衝突後、単一  $\text{SN}_2$  粒子接触熱伝達による熱輸送が生じ、また、 $\text{SN}_2$  粒子が相変化し、潜熱輸送による冷却が促進されるが、相変化過程が完了すると、冷却熱流束値が次第に減少する事が判明した。さらに、加熱基板の冷却効果が  $\text{SN}_2$  粒子の衝突による接触熱伝達のみではなく、衝突に引き続き粒子蒸気相変化に基づく潜熱輸送による冷却が行われる事により、圧力と限界熱流束のピーク値が単純に一致せず、ある程度の時間遅れを有していることが明らかとなった。

### 3. 研究目標の達成状況

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

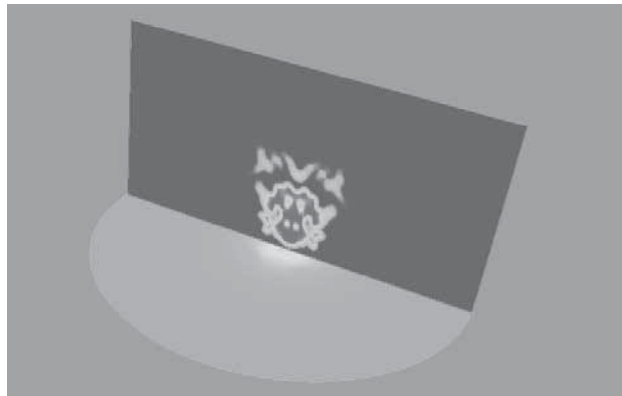


図 1：単一固体窒素粒子衝突による超高熱流束効果に関する超並列融合計算

達成度は90%である。これにより、ガソリン用インジェクターのみならず、各種ミスト冷却システム等、噴霧を利用するプロセッサ冷却系、自動車塗装、コーティングのバーチャルプランニングに貢献するものと考えられる。

#### 4. まとめと今後の課題

極低温微細固体窒素噴霧に関し、ミクロ的見地からに解明を目指し、単一固体窒素粒子超高熱流束壁面熱伝達のモデリングとエネルギー式考慮型 LES-VOF 数値スキームの開発を行った。さらに測定結果を計算情報として CFD 計算過程に導入する融合計算手法の基本方針を確立した。今後は、直噴インジェクターの高圧微粒化現象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, Zhao Guanghan, Tomoki Koike and Naoya Ochiai: Ultra-High Heat Flux Cooling Characteristics of Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Particles and Its Application to Semiconductor Wafer Cleaning Technology, *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 59, (2014), pp.1099-1106, doi:10.1063/1.4860828.

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[2] Jun Ishimoto, Kazuo Matsuura, Kozo Saito: Numerical Prediction of Compressible Vapor Flow with LDI Erosion, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 50-51.

##### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

- （受賞）WHEC Awards for Excellence Presentation, Jun Ishimoto, Supercomputing of Safety and Risk Assessment for Multiphase High Density Hydrogen, *The 20th World Hydrogen Energy Conference 2014, WHEC 2014* (第20回世界水素エネルギー一会議, 金大中コンベンションセンター, June 15-20, 2014, 光州広域市, 韓国).

課題番号	J14042
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	3年目

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

石本 淳\*†, 落合 直哉\*, Jin-Goo Park\*\*††

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

†申請者, ††所外対応研究者

### 1. 研究目的

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

### 2. 研究成果の内容

メガソニック場中で振動する気泡が及ぼす衝撃圧力は, メガソニック洗浄における粒子除去に大きな影響を与えると考えられる. 本研究では, メガソニック場を誘起する振動壁の振動振幅が気泡の挙動及び誘起衝撃圧力に及ぼす影響について, 数値解析を用いて考察した. 壁面近傍での気泡挙動を再現し(図 1), 振動壁の振動振幅が大きくなると, 気泡が及ぼす衝撃圧力が大きくなるとともにその回数も増加することがわかった.

メガソニック洗浄における粒子除去メカニズムを明らかにするためには, メガソニック場中の複数気泡挙動を理解する必要がある. 本研究では, 複数気泡挙動を明らかにするために, メガソニック場中で振動する 2 つの気泡の数値解析を行い, 気泡の初期半径や初期気泡間距離が気泡間相互作用及び気泡挙動に及ぼす影響について考察した. 過去の気泡の球状変形を仮定した気泡力学を用いた研究から, 両気泡の初期半径が共振半径より大きいまたは小さい場合には気泡間に引力が作用し, それ以外の場合には気泡間に斥力が作用することが知られている. 本研究の計算から, 初期気泡間距離が短い場合には, 過去の気泡力学を用いた計算同様に, 両気泡の初期半径が共振半径より大きいまたは小さい場合には気泡間に引力が作用し, それ以外の場合には気泡間に斥力が作用することがわかったが, 初期気泡間距離が長く, 一方または両方の気泡の初期半径が共振半径に近い場合に, 気泡間相互作用力の向きの反転が生じ, 二気泡間距離が増減を周期的に繰り返す挙動や気泡間距離が一定になる挙動を示すことがわかった.

### 3. 研究目標の達成状況

メガソニック場中の複数気泡挙動を扱う数値解析手法を構築し, 2 つの気泡の挙動について, 二気泡の反発, 合体, 気泡間距離が周期的に変動する挙動及び一定となる挙動といった様々な現象を本数値解析手法で再現できることを確認することができた.

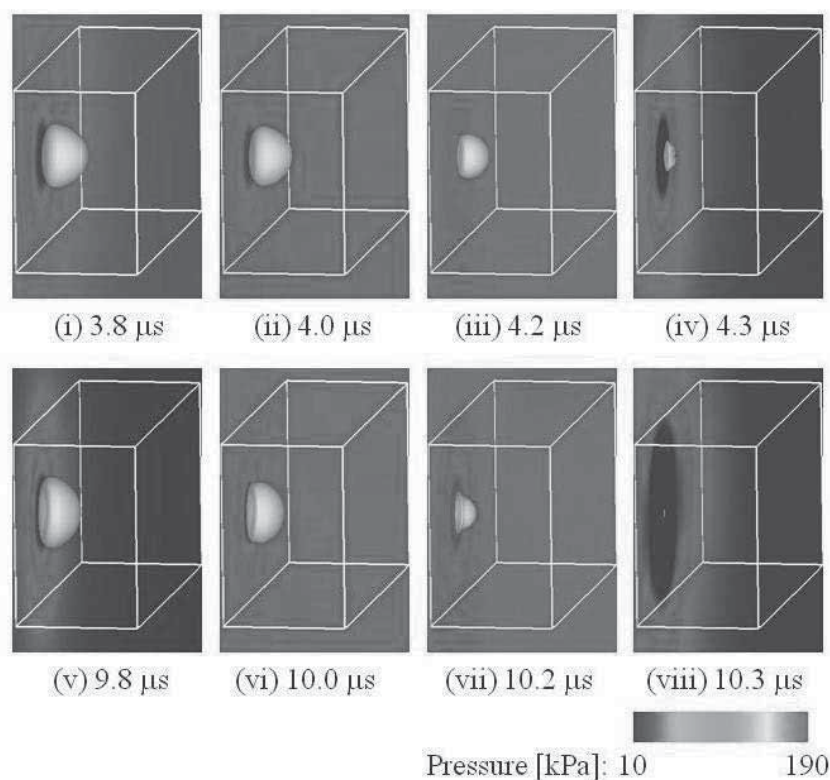


図1：メガソニック場中の気泡挙動と衝撃圧力の経時変化

#### 4. まとめと今後の課題

本年度の研究では、メガソニック場中の複数気泡挙動を解析する数値解析手法を構築できた。今後は、複数気泡の三次元挙動を解析するとともに、気泡振動が付着粒子に及ぼす力を詳細に解析していく。

#### 5. 研究成果 (\*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. Ochiai and J. Ishimoto: Numerical Investigation of Two Interacting Bubbles Behavior in a Megasonic Field, *Pro. Eleventh International Conference on Flow Dynamics (ICFD2014)*, (2014), pp. 248-249.

\*[2] N. Ohciai, J. Ishimoto and Jin-Goo Park: Computational Study of Bubble Behavior for Clarification of Particle Removal Mechanism in Megasonic Cleaning, *Pro. Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai*, (2014), pp. 128-129.

[3] 落合直哉, 石本淳: メガソニック場中における複数気泡挙動の数値解析, 日本混相流学会混相流シンポジウム 2014, OS6, C122 (CD-ROM) (2014).

[4] 落合直哉, 石本淳: メガソニック場中の二気泡間に作用する相互作用力に関する数値シミュレーション, 第23回ソノケミストリー討論会講演論文集 (2014), pp. 11-12.

##### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J14044
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	3年目

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

森 仁\*†, 八島 建樹\*, 高木 敏行\*\*††, 出江 紳一\*\*\*, 永富 良一\*\*\*,  
 小助川 博之\*\*, 阿部 玄治\*\*\*, 阿部 利彦\*  
 \*株式会社 IFG, \*\*東北大学流体科学研究所, \*\*\*東北大学医工学研究科  
 †申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

本研究の目的は、適切に制御されたパルス磁場による生体神経刺激により、筋肉の動きをコントロールして、任意の運動を得ることである。

**2. 研究成果の内容**

我々が現在研究をすすめている PAS(Paired Associative Stimulation)において求められる「目的の部位の運動情報をフィードバックした磁気刺激強度のコントロール」を実現するため、瞬時的なコントロールが困難なコンデンサ充電電圧の調整ではなく、パルス磁場波形の波の数を増減することにより磁気刺激強度をコントロールする方法について研究を行った。パルス磁場波形の波の数を変化させるため、トリガ信号の幅によらず十分な駆動電流をサイリスタに流すことができるよう図1に示すトリガ回路を開発した。

図2のパルス磁場波形はコンデンサの放電によって LCR 共振で生じる。LCR 共振の減衰は  $\exp(-R/2L)$  で表される。図3はケーブルの抵抗 R に対するパルス磁場の減衰率を測定したグラフである。ケーブルの抵抗が高い場合、磁気パルスの振幅が急激に減衰していることがわかる。末梢神経を刺激するためには 0.2T 以上の磁場強度が必要であるが、ケーブルの抵抗が 50 mΩ を超え減衰率が 0.5 より低くなると第1波で 1.3T の磁場強度の場合でも第5波の前に 0.2T 以下となる。そこで 10mΩ の低抵抗のケーブルを刺激コイルに使用した。

図4は電圧 600V, コンデンサ容量 80μF, 13巻の刺激コイルを使用し, 0.05ms から 3.8ms までゲート信号幅を変化させたときのパルス磁場の波形の数を測定したグラフである。図5はこの条件下で測定した 4 波と 8 波のパルス磁場波形である。最初のピークの磁場強度は 1.3T である。図4の波の数はゲート信号の幅の増加に伴って段階的に増加した。この結果は、電圧を一定に保ったままパルス磁場の波の数をゲート信号幅によって制御し、刺激強度を変更することが可能であることを示す。

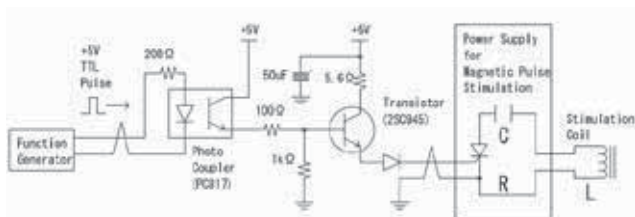


図1：開発したトリガ回路

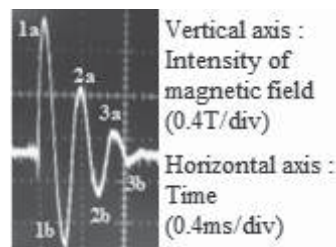


図2：パルス磁場波形の例

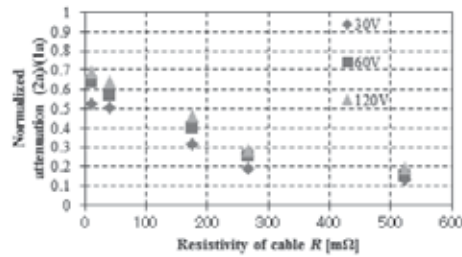


図3：ケーブル抵抗 R に対するパルス磁場減衰率

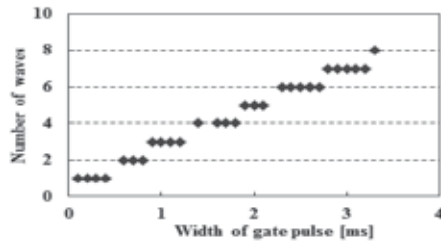


図4：ゲート信号幅に対する波の数

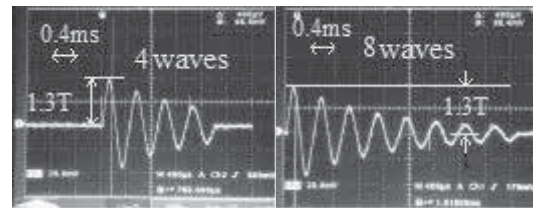


図5：4波と8波のパルス磁場波形

### 3. 研究目標の達成状況

今回の研究により、コンデンサの放電電圧は可変せず、パルス磁場の波の数をゲート信号幅によって制御することにより、磁気刺激強度を変更できるパルス磁気刺激電源を開発した。この電源を用いれば、目的の部位の運動情報を入力し、その運動情報に応じた強度にて磁気刺激を刺激部位に与えることにより、目的の部位の動きの大きさをコントロールすることが可能となる。

### 4. まとめと今後の課題

PAS のための新規のパルス磁気刺激電源を開発した。刺激強度はコンデンサの放電電圧ではなく、パルス磁場の波の数によって制御できる。この電源は、市販のパルス磁気刺激電源と比較して、1. 小型で軽量、2. パルス電圧が 600V で一定、3. 刺激強度が 1~8 波のパルス磁場の波の数によって制御できる、という利点がある。

今後、東北大学にて倫理委員会の承認が取れ次第、パルス磁場の波の数に対する生体の筋肉に対する反応について臨床研究を行う。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] H. Mori, K. Yashima, T. Takagi, S. Izumi, R. Nagatomi, H. Kosukegawa, G. Abe, and T. Abe: Biological Actuation with the Magnetic Stimulation, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 84-85.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) 医療用磁気パルス発生装置, 阿部利彦, 森仁, 八島建樹, 森和美, 高木敏行, 出江紳一, 金高弘恭, 永富良一, 2014.9.30, 出願。

Project code	J14045
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	1st Year

## Numerical Study of Thermal and Chemical Non-Equilibrium Effects in Near-Continuum Hypersonic Flows

Georgy Shoev\*†, Shigeru Yonemura\*\*††  
Yevgeniy Bondar\*, Pavel Vashchenkov\*

\*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The main challenge of the project is a numerical study of thermal and chemical non-equilibrium effects in near-continuum hypersonic flows for conditions where both continuum and kinetic descriptions of the flow can be used.

### 2. Details of program implementation

The main goal of this year was to study numerically the hypersonic flow of nitrogen ( $N_2$ ) with vibrational thermal relaxation around a blunted plate. In order to carry out such a numerical study, the development of the Fluent-neq code for the Ansys Fluent flow solver has been started. The conservation equation of vibrational energy is solved separately, and it is added to the system of Navier–Stokes equations by using the option of the user-defined scalar transport equation. Translational and rotational modes are assumed to be in equilibrium, so we distinguish only two temperatures: translational and vibrational. The Landau–Teller model is used for vibrational thermal relaxation. Source terms corresponding to the energy exchange are implemented through the define source macro. The vibrational relaxation time is calculated with the use of a semi-empirical formula by Millikan and White (1963) coupled with the Park (1985) correction for high temperatures. The density-based solver, specially developed for high-speed compressible flows, is used in a steady implicit formulation with an AUSM flux type and a second-order upwind scheme.

In order to test the code being developed, vibrational relaxation of molecular nitrogen ( $N_2$ ) under adiabatic conditions was computed (Fig. 1). The results of the computations (square symbols in Fig. 1) are in good agreement with the numerical solutions (solid curves in Fig. 1) of the Landau–Teller equation (Ye. Bondar et al., Proc. of 24th RGD, 2005). The results obtained show that the relaxation time decreases as the temperature increases.

The results of the calculation of a nitrogen ( $N_2$ ) flow around a 2D blunted plate at  $M_\infty=22$  and  $Kn_R=0.001$  are shown in Fig. 2. The plate length was equal to  $10 \cdot R$ , where  $R$  is the leading edge rounding radius. The flowfield around the leading edge of the blunted plate is given in Fig. 2 (left). The top picture shows the temperature flowfield obtained in the Navier–Stokes (NS) computation for a polytropic gas with a constant ratio of specific heats  $\gamma=1.4$  (ignoring excitation of vibrational degrees of freedom). The bottom picture shows the translational temperature flowfield obtained in the NS computation with allowance for vibrational thermal relaxation. It is clearly seen that exchange of translational and vibrational energy modes leads to a decrease in the shock stand-off distance. The temperature profiles along the



stagnation line obtained in DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) and NS computations are compared in Fig. 2 (right). The DSMC computations were performed by a SMILE software system (Ivanov et al., AIAA, 1998). Here "NS T" corresponds to the case of a polytropic gas and "NS Tt" and "NS Tv" correspond to the case of a thermally non-equilibrium flow. Accounting for vibrational relaxation leads to changes in the internal structure of the shock wave: a typical peak of the translational temperature is observed inside the shock wave. The continuum simulation with allowance for vibrational relaxation predicts a steeper profile of the shock wave than the kinetic simulation (marked as DSMC). At the same time, vibrational relaxation zones are approximately the same for both approaches.

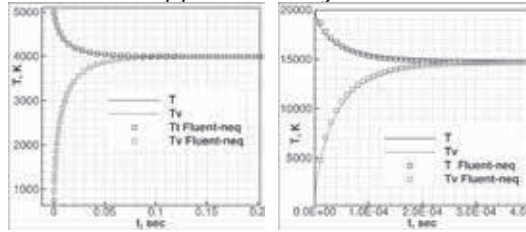


Figure 1 : Vibrational relaxation of N<sub>2</sub> for T<sub>0</sub>=5000 K (left) and T<sub>0</sub>=20000 K (right), T<sub>v0</sub>=200 K for both test cases.

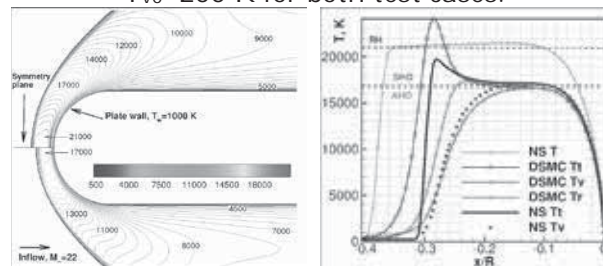


Figure 2 : Flowfields obtained in NS computations (left) and temperature profiles along the stagnation line (right).

### 3. Achievements

The expected results were achieved completely.

### 4. Summaries and future plans

Computations of a hypersonic flow around a blunted plate revealed a significant impact of thermal non-equilibrium on the stand-off distance and temperature behind the shock wave. In the next year, it is planned to develop a code that would allow us to take into account the dissociation rate of diatomic molecules in a multicomponent gas mixture. Numerical simulations of a near-continuum nitrogen (N<sub>2</sub>-N) flow over a wedge with real gas effects will be carried out in order to study the effects of thermochemical non-equilibrium. Results of these simulations will be compared with available experimental data.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

\*[1] Georgy Shuev, Yevgeniy Bondar, Shigeru Yonemura: Numerical Study of Thermal and Chemical Non-Equilibrium Effects in Near-Continuum Hypersonic Flows, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 12-13.

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

Project code	J14046
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	1st Year

## Elucidation of Mechanisms of the Frictional Characteristics of Erythrocytes under Inclined Centrifugal Force

Kenichi Funamoto\*†, Luca Brandt\*\*††, Akira Yatsuyanagi\*\*\*,  
Kosuke Inoue\*, Toshiyuki Hayase\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*KTH Mechanics

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

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Complicated interactions between blood cells, plasma proteins, and glycocalyx on an endothelial surface layer of a blood vessel have been extensively investigated. Our group developed an inclined centrifuge microscope, and obtained the nonlinear frictional characteristics of erythrocytes moving in media on a glass plate, an endothelia-coated one, and materials-coated ones under the effect of inclined centrifugal force. However, the mechanisms of the frictional characteristics and behaviors of erythrocytes in the inclined centrifuge microscope are still unclear. In this study, we perform numerical simulations of an erythrocyte moving in the inclined centrifuge microscope by considering the deformations due to the inclined centrifugal force and fluid-induced stresses.

### 2. Details of program implement

Luca Brandt visited IFS between Oct. 6th and Oct. 11th. We had a face-to-face discussion about our collaborative research. In addition, he gave a keynote lecture in the Second International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH, which was a special session in the International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2014).

In this fiscal year, IFS side did experiments using the inclined centrifuge microscope and accumulated measurement data of the frictional characteristics of erythrocytes moving on a glass plate and an endothelia-coated one. Moreover, a theoretical analysis of the mechanism of frictional characteristics of erythrocytes on the endothelia-coated plate was conducted based on the lubrication theory assuming an endothelial glycocalyx layer (EGL) as a compressible porous medium. KTH side considered how to apply an original simulation code for fluid-structure interaction (FSI) simulation for deformation of an elastic membrane.

### 3. Achievements

Experimental results showed the nondimensional frictional characteristics of erythrocytes on the endothelia-coated plate hardly change even if the normal force component of the centrifugal force is increased. Theoretical analysis qualitatively revealed that the presence of the EGL of a compressible porous medium worked for increase of frictional force though the slope of increment was different from the experimental data. In addition, an idea to computationally deal with a deformable erythrocyte was obtained.

#### 4. Summaries and future plans

In order to obtain insights about interaction between erythrocytes and endothelium of blood vessel, frictional characteristics of erythrocytes on a glass plate and an endothelia-coated one were investigated by measurement, theoretical analysis, and computation. Further experiments under different conditions and FSI simulation will be carried out in the future.

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

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

\*[1] Takashi Oshibe, Toshiyuki Hayase, Kenichi Funamoto, Atsushi Shirai, Numerical Analysis for Elucidation of Nonlinear Frictional Characteristics of a Deformed Erythrocyte Moving on a Plate in Medium Subject to Inclined Centrifugal Force, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 136, Issue 12, (2014), pp. 121003-1-9.

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

\*[2] Kenichi Funamoto, Luca Brandt, Akira Yatsuyanagi, Kosuke Inoue, Toshiyuki Hayase, Elucidation of Mechanisms of the Frictional Characteristics of Erythrocytes under Inclined Centrifugal Force, *Proceedings of the 14th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2014)*, Sendai, (2014), pp. 100-101.

[3] Akira Yatsuyanagi, Toshiyuki Hayase, Kenichi Funamoto, Kosuke Inoue, Atsushi Shirai, Fundamental Study of Interaction between Erythrocyte and Endothelial Cell under Inclined Centrifugal Force (Reproduction of Friction Characteristics by Numerical Analysis Using Simple Interaction Model), *Proceedings of the 11th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2014)*, (2014), pp. 296-297.

[4] 井上 浩介, 早瀬 敏幸, 船本 健一, 白井 敦, 傾斜遠心顕微鏡による内皮細胞上の赤血球の摩擦特性の計測 (傾斜遠心力の垂直成分の影響), 日本機械学会第 27 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No. 14-67, (2015), pp. 169-170.

[5] 八柳 暁, 早瀬 敏幸, 船本 健一, 井上 浩介, 白井 敦, 傾斜遠心力場における赤血球と内皮細胞との力学的相互作用の解明 (相互作用モデルの物理的解釈), 日本機械学会第 27 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No. 14-67, (2015), pp. 171-172.

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

Not applicable.

Project code	J14047
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	3rd year

## Improvement of Numerical Scheme and Theory for Kinetic Force Method

Vladimir Saveliev\*†, Shigeru Yonemura\*\*††, Svetlana Filko\*

\*Institute of Ionosphere, NCSRT, Kazakstan,

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

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

### 2. Details of program implement

We propose a new variant of the algorithm of the Kinetic Force Method (serial recalculation of the velocities of quasiparticles) using pairs of quasiparticles in which energy is exactly conserved in the course of simulation. The step of the algorithm consists of the following two operations:

- 1) All possible pairs  $(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_k)$ ,  $i < k$  are formed, there are  $N_p = N(N-1)/2$  pairs.
- 2) Pairs of quasiparticles are recalculated at each fractional time step  $dt/N_p$ , and the new values of velocities in the pair  $(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_k)$ ,  $i < k$  are calculated by the formulas:

$$\mathbf{v}_i \left( t + \frac{dt}{N_p} \right) = \mathbf{v}_i(t) + \frac{1}{2} \left[ \left( 1 - \cos \left( \frac{\Omega_{ik} dt}{N-1} \right) \right) \frac{\Omega_{ik} \times \Omega_{ik} \times}{\Omega_{ik}^2} + \sin \left( \frac{\Omega_{ik} dt}{N-1} \right) \frac{\Omega_{ik} \times}{\Omega_{ik}} \right] [\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_k(t)],$$

$$\mathbf{v}_k \left( t + \frac{dt}{N_p} \right) = \mathbf{v}_k(t) - \frac{1}{2} \left[ \left( 1 - \cos \left( \frac{\Omega_{ik} dt}{N-1} \right) \right) \frac{\Omega_{ik} \times \Omega_{ik} \times}{\Omega_{ik}^2} + \sin \left( \frac{\Omega_{ik} dt}{N-1} \right) \frac{\Omega_{ik} \times}{\Omega_{ik}} \right] [\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_k(t)].$$

On the Figures 1-2, there are results of simulation of molecular relaxation in the velocity space of two oppositely-oriented slightly divergent colliding beams of equal density parallel to the  $Ox$ . The initial distribution of particles in each beam is assumed to be a normal distribution with average velocities equal to  $\pm 1.0$  and with the standard deviation  $\kappa_\tau = 0.1$ . In each beam, there are 180 quasiparticles. The algorithm is tested at constant frequency of molecular collisions (Maxwell's molecules,  $\nu = \sigma v = const$ , where  $v$  is a relative velocity of

colliding molecules). We used the system of units where  $\langle v^2 \rangle = 1$ ,  $\nu = 1$ .

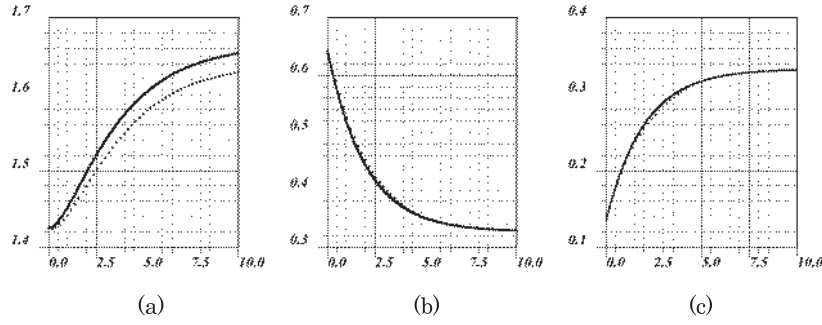


Figure 1. Time dependence of the moments of the distribution function obtained by algorithm with serial recalculation of velocities: (a) is  $\langle v^4 \rangle$ ; (b) is  $\langle v_x^2 \rangle$ ; (c) is  $\langle v_y^2 \rangle$ ; Solid lines are the exact moments.

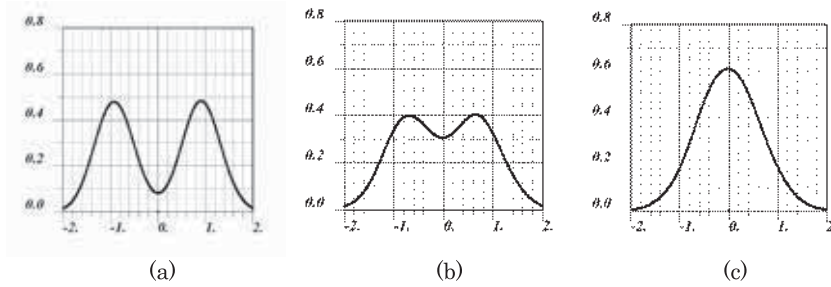


Figure 2: Distribution function  $f(v_x)$  obtained by algorithm with serial recalculation of the velocities of quasiparticles at different time: (a)  $t = 0.0$ ; (b)  $t = 2.0$ ; (c)  $t = 8.0$ .

### 3. Achievements

The new algorithm of Kinetic Force Method named serial recalculation of the velocities of quasiparticles is suggested. This algorithm automatically provides energy conservation in the system of molecules in the course of simulation without supplementary corrections.

### 4. Summaries and future plans

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

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

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
  - \*[1] V. L. Saveliev, S. A. Filko, S. Yonemura: Kinetic Force Method and Two-particle Kinetic Equation, *Proceedings of the 29th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics* (Xi'an, China, 2014), *AIP Conf. Proc.* Vol. 1628, (2014), pp. 634-639.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - \*[2] Vladimir Saveliev, Svetlana Filko and Shigeru Yonemura: A View on Kinetic Force Method from Two-Particle Kinetic Equation, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2014), pp. 180-181.
- 3) Patent, award, press release etc. Not Applicable.

課題番号	J14048
区分	共同研究集会
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

**流体科学と材料科学に関する東北大学・KTH 国際ワークショップ**  
**International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH**

早瀬 敏幸\*†, Fredrik Lundell \*\*††

太田 信\*, 内一 哲哉\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*スウェーデン王立工科大学(KTH)

†申請者, ††所外対応研究者

**1. 研究目的**

流体科学と材料科学およびその融合分野において、東北大学と KTH の共同研究をベースとして、参画および新規実施に興味のある世界の研究者が一堂に会し、関連研究の深い議論を行うことによって、共同研究の世界的な展開に繋げることを目的とした。

**2. 研究成果の内容**

2014 年 10 月に開催される ICFD2014 国際会議の中で、2 日に渡って実施した。流体科学と材料科学およびそれらの融合分野を対象として、キーノート講演 2 件、一般招待講演 8 件を実施した。キーノート講演は、流体科学と材料科学から、最新の研究成果等に関する講演が行われた。一般講演は、共同研究の実施者を軸に、東北大関係者と KTH 関係者が行った。

企画に関して、東北大側は、流体科学研究所の早瀬、太田、内一が実行委員として企画を行った。企画に当たっては、工学研究科、金属材料研究所からも協力を依頼した。KTH 側の取り纏めは本申請のメンバーである Lundell 准教授が担当した。2 日目は、core to core プログラムのシンポジウムとの共催とし、広範な研究者間での研究交流を行った。

本ワークショップの参加者は 32 名であった。

**3. 研究目標の達成状況**

流体科学と材料科学およびその融合分野において、東北大学と KTH の共同研究をベースとして、世界の研究者が一堂に会し、関連研究の深い議論が行われた。今後、共同研究の世界的な展開が大いに期待され、本共同研究集会の目標は十分達成された。

**4. まとめと今後の課題**

本ワークショップの開催により、流体科学と材料科学およびその融合分野における共同研究の世界的な展開が期待される成果が得られた。今後もより広い分野で継続的にワークショップを開催し、共同研究を発展させることが重要である。

**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)**

該当なし。

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Francesco Picano, Luca Brandt: Turbulent Channel Flow of Suspensions of Neutrally-Buoyant Particles, *Proceedings of the Second International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH*, (2014), pp. 4-5
- [2] Yu Fukunishi, Yoichiro Nishi, Yu Nishio, Seiichiro Izawa: Cavity Noise Suppression by Placing a Small Bar on the Cavity Wall, *Proceedings of the Second International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH*, (2014), pp. 6-7.
- [3] Nicolo Fabbiane, Shervin Bagheri, Dan Henningson: Adaptive Control of Finite-amplitude 3D Disturbances in 2D Boundary Layer Flows, *Proceedings of the Second International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH*, (2014), pp. 8-9.
- [4] Randy. K. Dumas, Sohrab. R. Sani, Majid Mohseni, Ezio Iacocca, Sunjae Chung, Philipp Dürrenfeld, Mohammad Haidar, Ahmad Awad, Mojtaba Ranjbar, Johan Åkerman: Spin Torque and Spin Hall Effect Nano-Oscillators, *Proceedings of the Second International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH*, (2014), pp. 10-11.
- [5] Shunsuke Fukami, Samik DuttaGupta, Chaoliang Zhang, Hideo Ohno: Three-Terminal Spintronics Devices for Nonvolatile Memory and Logic, *Proceedings of the Second International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH*, (2014), pp. 12-13.
- [6] Akira Yoshikawa, K. Kamada, S. Kurosawa, Y. Yokota, Y. Ohashi, M. Nikl: Material Design and Crystal Growth of High Performance Scintillators and Their Applications, *Proceedings of the Second International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH*, (2014), pp. 14-15.
- [7] Jiayu Wang, Yoshinori Nakamura, Andreas Carlson, Feng Yue, Yuji Suzuki, Gustav Amberg, Junichiro Shiomi, Minh Do-Quang Importance of Surface Structure for Dynamic Wetting, *Proceedings of the Second International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH*, (2014), pp. 16-17.
- [8] Makoto Ohta, Wataru Sakuma, Yuta Muramoto, Hitomi Anzai, Toshio Nakayama: Modeling of Cortical Bone and Bone Marrow, *Proceedings of the Second International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH*, (2014), pp. 18-19.
- [9] Karl Håkansson, Fredrik Lundell, Lisa Praeli-Wittberg, Daniel Söderberg: Flow Manipulation of Nano-Fibrillated Cellulose: a Key Technology for New Bio-Based Materials, *Proceedings of the Second International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH*, (2014), pp. 20-21.
- [10] Hidemasa Takana, Akira Tanida: Fundamental Characteristics on Electromagnetic Energy Conversion Device for Efficient Wind Energy Utilization, *Proceedings of the Second International Workshop on Fluid and Material Sciences in Cooperation between Tohoku University and KTH*, (2014), pp. 22-23.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

該当なし。

課題番号	J14049
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	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	1年目

### バリスティックレンジへ適用可能な感圧塗料技術の開発

### Development of Pressure-Sensitive Paint Techniques for Ballistic Range Experiments

沼田 大樹\*†, 大谷 清伸\*\*††

\*東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

本研究の目的は、バリスティックレンジを用いた実験に適用可能な、非定常圧力センサに代わる新たな非定常圧力場計測技術の開発である。具体的には、バリスティックレンジによって射出された超音速飛行物体上の圧力計測、及び飛行体から生じる衝撃波に起因する飛行体近傍の非定常圧力場の面計測技術の実現に向け、サブマイクロ秒の時間応答性を有する超高速応答型感圧塗料を用いた非定常圧力場計測技術の開発及び確立を目指すものである。特に、撮像装置に高速度カメラを用いることにより、超音速飛行物体によって生じる超音速で伝播する非定常圧力場を面計測かつ時系列的に可視化可能な技術の確立を目指す。

#### 2. 研究成果の内容

本研究の成果として、超音速飛行体から生じる衝撃波に起因する非定常圧力場の定性的な時系列可視化計測技術の開発を実現した。図1にその一例を示す。

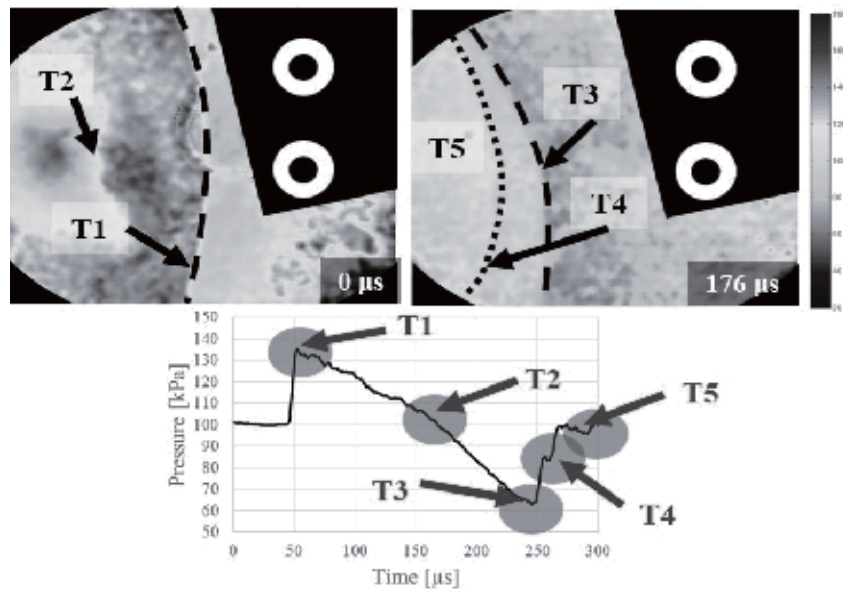


図1：飛行体から生じる衝撃波が試験板上に形成する非定常圧力場の時系列可視化計測結果  
(左上：飛行体通過後 0 μs 後, 右上：飛行体通過後 176 μs 後, 下：非定常圧力センサによる非定常圧力場計測結果)



図1は超音速飛行体が図の左から右に通過した後における飛行経路下部に設置されたサンプルプレート上に生じた非定常圧力場である。図の上段左側は飛行体が視野外に通過した直後の画像であり、上段右側はそれから 176  $\mu\text{s}$  後の圧力場である。また、図の下段は非定常圧力センサによる圧力計測結果である。

可視化画像を見ると、最初に飛行体前面から生じた衝撃波面が地面にもたらず急激な圧力上昇を明確に捉えることに成功している(図1左上図のT1)。また、衝撃波の背後は圧力が徐々に低下し、図中のT2位置による圧力減少率の急な低下を経てT3で再度圧力が上昇し、T4によるステップ的な圧力上昇を経て大気圧近傍まで圧力上昇している(T5)。この感圧塗料計測で見られたT1~T5に示される非定常圧力場の傾向は、非定常圧力センサで捉えた圧力履歴に見られる特徴点T1~T5に定性的に対応しており、感圧塗料を用いたバリスティックレンジ実験において、飛行体から生じた衝撃波に起因する非定常圧力場の計測は、定性的計測であれば十分に実現可能であることが示された。

### 3. 研究目標の達成状況

本研究における当初設定した目標は、従来までは実験的には取得が不可能かもしくは離散点でしか取得できなかった超音速飛行物体まわりの衝撃波に起因する非定常圧力場を面情報としてかつ時系列的に取得可能とすることだが、本研究を通じ、設定目標を達成するうえで必要となる感圧塗料計測系の構築及びそれを用いた時系列的な発光強度画像の取得に成功した。また、取得した時系列的な発光強度画像から、開発した画像処理法を用いて定性的な非定常圧力場の再構築に成功した。そのため、本研究では研究開始時に設定した研究目標を、概ね全て達成することができた。

### 4. まとめと今後の課題

本共同研究を通じ、バリスティックレンジ実験における超高速応答型感圧塗料技術を用いた非定常圧力場計測を実現するうえで必要となる基礎技術の構築が完了した。また、構築した計測系を用いることによって、超音速で飛行する物体が生じる衝撃波に起因する非定常圧力場を、高速度ビデオカメラを用いることで面計測かつ時系列的に可視化することが出来た。今後の課題としては、超高速応答型感圧塗料を改良することで発光強度を増強し、計測時の信号雑音比を改善する点、及び定量計測の実現に向けた感圧塗料計測系の更なる改良がある。

### 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] Daiju Numata, Keisuke Asai and Kiyonobu Ohtani: Development of PSP Technique for Ballistic Range Experiments, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 18-19.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J14050
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

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

Tetsuji Shimizu\*†, Takehiko Sato\*\*††

Gregor Morfill\*, Daisuke Yoshino\*\*

\*terraplasma GmbH,

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The usage of cold atmospheric plasma for biomedical application, so called plasma medicine, has been studied extensively. One major application in the research on plasma medicine is disinfection and sterilization. In public places, a new development of anti-microbial systems is becoming more and more important because a number of antibiotic-resistant bacteria is increased. Moreover, nosocomial infection has been seriously reported. In this project, we aimed at understanding the flow propagation mechanism generated by cold atmospheric plasma. In the cold atmospheric plasma, chemically reactive species which can inactivate microorganisms are produced and transported onto objects. Both production and transport of reactive species are important to achieve an effective inactivation of microorganisms. The simple set-up for plasma production was built up in the previous years and here we discuss mainly the flow generation by cold atmospheric plasma.

### 2. Details of program implement

As reported previously, a plasma discharge was produced between a pin electrode and water surface by applying AC high voltage. The pin electrode with a sharp edge was placed 1 mm above the water surface. The water was put in a quartz glass cell whose size was  $10 \times 10 \times 8 \text{ mm}^3$  and the water level was as high as the height of the cell. The cell was placed on a metal plate which was electrically connected to the ground. A high voltage of 7.5 kV<sub>op</sub> with 5 kHz repetition frequency, a dielectric barrier discharge plasma was produced. With this electrode configuration, a local plasma treatment is possible and the width of the plasma discharge was almost as same as the diameter of pin electrode, ~0.3 mm. In this experiment, pure water was used and the conductivity of water was 0.8  $\mu\text{S/cm}$  before the plasma was ignited. Note that the conductivity of water was increased by the plasma discharge because the plasma discharge produced several reactive species and they dissolved into the water.

The plasma discharge drives a flow in gas phase and also in water accordingly. The gas flow was driven by the collision between accelerated ions by the present electric field and neutrals. Here we showed a gas flow formation by the plasma discharge as seen in fig. 1. The gas flow was observed by Schlieren visualization technique. Signals of the applied voltage and electrical current were also monitored. The experimental observation showed that the gas flow was generated by the plasma discharge and its velocity reached ~20 m/s. The produced reactive species are transported by such a driven gas flow as well as diffusion. It was observed that the gas flow velocity strongly dependent on the conductivity of water. The input power into the plasma discharge was almost independent on the conductivity. It suggests that the charging on the water

surface by charged particles in plasma could affect the gas flow formation.

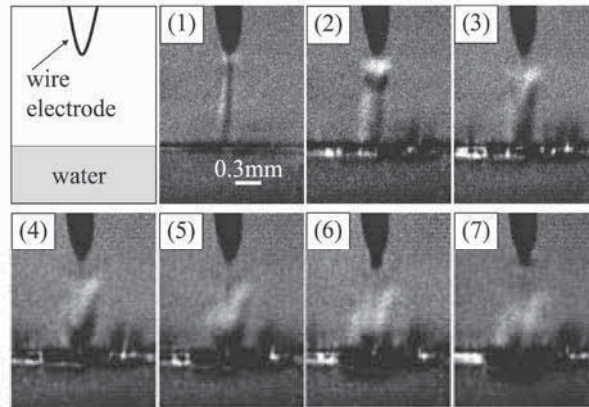


Figure 1 : Gas flow formation by the plasma discharge. Schlieren visualization technique was applied. The photos were shown every 20  $\mu$ s.

### 3. Achievements

It was observed that the gas flow was developed by the plasma discharge above the water surface. Using the pin electrode, a local plasma treatment was achieved in a range of 0.3 mm in diameter. The produced reactive species were transported by the driven gas flow. We found that the charging mechanism on the water surface could be crucial for the gas flow formation since the conductivity of water strongly affected on the velocity of driven gas flow.

### 4. Summaries and future plans

The plasma discharge produced above the water surface produced a gas flow toward the water surface with a velocity of up to 20 m/s. A local plasma treatment was possible. The produced reactive species relevant to biomedical applications are transported by such a driven gas flow as well as diffusion. The gas flow formation was dependent on the conductivity of water. Our finding is important to optimize the plasma 'inactivation' system because the transport of reactive species is crucial for the efficacy of applications.

In the next step, the charging mechanism on the water surface is discussed. Charged particles in the plasma discharge play an important role in charging. Through this investigation, the understanding of gas flow formation becomes clear and a development of inactivation system by the plasma discharge can be achieved in more effective way.

### 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] Tetsuji Shimizu, Naoya Kishimoto, Masashi Hara, Daisuke Yoshino, Gregor E. Morfill, and Takehiko Sato: Gas Flow Formation by Plasma Discharge on Water Surface, *ISEHD, International Symposium on Electrohydrodynamics 2014 Book of Abstracts*, p. 27.

\*[2] Tetsuji Shimizu, Masashi Hara, Gregor E. Morfill, Daisuke Yoshino, and Takehiko Sato: Generation and Transport of Chemical Species in Low-Temperature Atmospheric Plasma for Sanitization Device, *Proceedings of the 14th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 96-97.

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

Project code	J14051
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

## Advanced LES of Aircraft Wake Vortices

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

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

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

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

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

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

### 2. Details of program implement

We defined the following research items based on a meeting held at IFS, that is, the simulation of an entire landing phase until touch down, and wake vortex roll-up with jet exhausts. During the research period from April 2014 to March 2015, we invited a DLR researcher from the Institute of Atmospheric Physics for "Leading Graduate School Program on Global Safety Tohoku University-DLR Workshop" in Sendai. Figure 1 shows the near-field evolution of axial vorticity generated from a realistic high-lift configuration at several downstream positions at  $x^*=0.0$  and 0.8. On the other hand, Fig. 2 shows the mid-field wake at  $x^*=13.1$  visualized by vorticity magnitude, which indicates turbulent flow structure originated from the main wing and the fuselage.

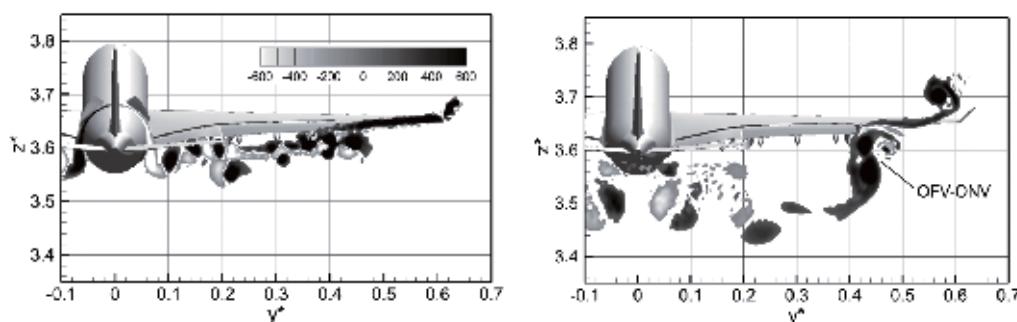


Figure 1: Near-field evolution of axial vorticity at several downstream positions at  $x^*=0.0$  and 0.8, where vortices detaching from wing-tip, outboard nacelle, outboard flap, inboard nacelle and wing-fuselage junction are shown [1].

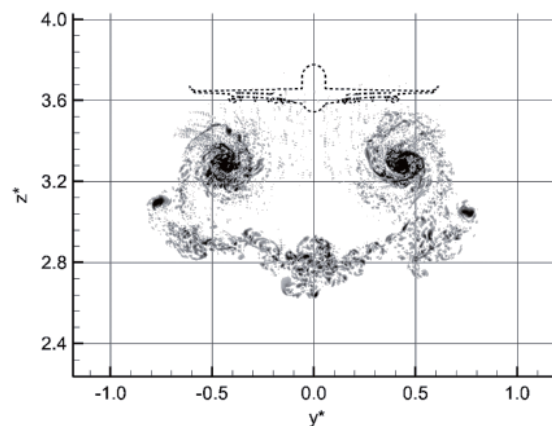


Figure 2: Distribution of the vorticity magnitude in the mid-field wake at  $x^*=13.1$  [1].

### 3. Achievements

We have developed numerical codes for simulating entire landing phase until touch down and wake vortex roll-up with jet exhausts. Further, we have conducted validation studies of the developed approach in this research period.

### 4. Summaries and future plans

Expected results were obtained during the collaboration period. Future work would be further improvement of the developed numerical codes. The development of the two-way coupling of near-field simulation around an aircraft and far-field LES of wake vortex is ongoing.

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

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

[1] Takashi Misaka, Frank Holzäpfel, Thomas Gerz: Large-Eddy Simulation of Aircraft Wake Evolution from Roll-Up Until Vortex Decay, *AIAA Journal*, (2015), doi: 10.2514/1.J053671.

[2] Anton Stephan, Frank Holzäpfel, Takashi Misaka: Hybrid Simulation of Wake-Vortex Evolution during Landing on Flat Terrain and with Plate Line, *International Journal for Heat and Fluid Flows*, Vol. 49, (2014), pp. 18-27, DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.05.004.

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

\*[3] Shigeru Obayashi, Takashi Misaka, Anton Stephan, Frank Holzäpfel, Thomas Gerz: Advanced LES of Aircraft Wake Vortices, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 28-29.

[4] Anton Stephan, Frank Holzäpfel, Takashi Misaka: Simulation of Aircraft Wake Vortices During Landing with Decay Enhancing Obstacles, *ICAS Paper 2.5.1, 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, St. Petersburg, Russia, September, (2014).

[5] Frank Holzäpfel, Anton Stephan, Nikola Tchipev, Tobias Heel, Stephan Körner, Takashi Misaka: Impact of Wind and Obstacles on Wake Vortex Evolution in Ground Proximity, *AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition (Aviation 2014)*, Atlanta, USA, June, (2014). (Invited)

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J14052
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

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

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

\*National University of Science and Technology "MISIS"

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

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

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

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

\*\*\*\*\*Chelyabinsk State University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Purpose of the project is the study of magnetic, transport and magnetocaloric properties of thin films and ribbons of Heusler alloys. Dependence of these properties on the structural state of the materials will be clarified. Special attention will be paid to evaluation of magnetocaloric performance of thin films and ribbons of Heusler alloys by a direct method.

### 2. Details of program implement

During the last year, the research was focused on the study of  $\text{Ni}_2\text{Mn}(\text{Fe})\text{Ga}$  melt-spun ribbons and  $\text{Co}_2(\text{Fe},\text{Ti})\text{Ga}$  thin films.

The  $\text{Ni}_2\text{Mn}(\text{Fe})\text{Ga}$  melt-spun ribbons has a  $\text{Ni}_{2.15}\text{Mn}_{0.79}\text{Fe}_{0.06}\text{Ga}$  nominal composition. Differential scanning calorimetry and thermoelastic test under bending stress revealed that martensitic phase transition temperatures are sensitive to the thermal treatment. The annealed ribbon demonstrates  $\approx 0.65\%$  bending strain upon martensitic transformation. Magnetic hysteresis loops measured at  $T = 77$  K in as-prepared and annealed ribbons exhibit a feature typical for materials with coexisting magnetically soft and magnetically hard phases. This can be explained as caused by the coexisting ferro- and antiferromagnetic interactions.

Magnetic, magneto-optical and magnetotransport properties of  $\text{Co}_{50.3}\text{Fe}_{20.3}\text{Ti}_{5.6}\text{Ga}_{23.8}$  thin films were studied for the as-prepared as well as annealed samples. Measurements of transverse magneto-optical Kerr effect revealed that the spectral response of the films strongly depends on the structural ordering which can be manipulated by annealing conditions. Peculiarities in the magnetic properties of the films were attributed to the coexisting phases with different degree of structural disorder. Magnetoresistance of  $\text{Co}_{50.3}\text{Fe}_{20.3}\text{Ti}_{5.6}\text{Ga}_{23.8}$  thin films was found to be linear in the fields above 1 T which is typical for half-Heusler systems as well as for Heusler-based ferromagnetic shape memory alloys.

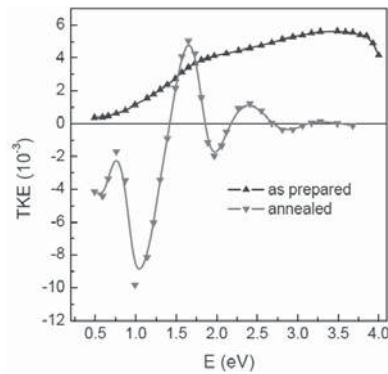


Figure 1 : Magneto-optical spectra of the as-prepared and annealed at 973 K for 3 h  $\text{Co}_{50.3}\text{Fe}_{20.3}\text{Ti}_{5.6}\text{Ga}_{23.8}$  thin films.

### 3. Achievements

The main achievements can be summarized as follow

First, it has been found that physical properties of  $\text{Ni}_2\text{Mn}(\text{Fe})\text{Ga}$  melt-spun ribbons and  $\text{Co}_2(\text{Fe},\text{Ti})\text{Ga}$  thin films can be controlled by thermal treatment. In the  $\text{Ni}_2\text{Mn}(\text{Fe})\text{Ga}$  melt-spun ribbons, a bending strain of about 0.65% was found to accompany martensitic transformation. Magnetoresistance of the  $\text{Co}_2(\text{Fe},\text{Ti})\text{Ga}$  thin films was found to be linear in the fields above 1 T.

### 4. Summaries and future plans

In summary, influence of heat treatment on magnetic and magnetotransport properties of  $\text{Ni}_2\text{Mn}(\text{Fe})\text{Ga}$  and  $\text{Co}_2(\text{Fe},\text{Ti})\text{Ga}$  Heusler alloy systems was clarified. Future plans is to study of structural, mechanical and magnetic properties of melt-spun ribbons of  $\text{X}_2\text{MnAl}$  (X = Ni, Fe) based Heusler alloys

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

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

\*[1] V.V. Khovaylo, V.V. Koledov, D.I. Kuchin, V.G. Shavrov, N.N. Resnina, H. Miki, J.J. Suñol and B. Hernando: Structural and Magnetic Properties of Melt-Spun Ni-Mn(Fe)-Ga Ferromagnetic Shape Memory Ribbons, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 50, (2014), pp. 2501203\_1-2501203\_4.

\*[2] V. Khovaylo, V. Rodionova, M. Lyange, K. Chichay, E. Gan'shina, A. Novikov, G. Zykov, A. Bozhko, M. Ohtsuka, R.Y. Umetsu, A. Okubo and R. Kainuma: Magnetic, magneto-optical and magnetotransport properties of Ti-substituted  $\text{Co}_2\text{FeGa}$  thin films, *Proc. of SPIE*, Vol. 9172, (2014), pp. 91720M\_1-91720M\_4.

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

[3] V. Rodionova, S. Shevyrtalov, K. Chichay, E. Gan'shina, A. Novikov, G. Zykov, A. Okubo, R. Kainuma, R.Y. Umetsu, M. Ohtsuka, A. Bozhko, V. Golub, M. Gorshenkov, M. Lyange and V. Khovaylo: Magnatic, magnetotransport and structural properties of  $\text{Co}_2(\text{Fe},\text{Ti})\text{Ga}$  thin films, *Moscow International Symposium on Magnetism*, (2014), p. 168.

[4] A. Kosogor, M. Lyange, M. Gorshenkov, V. Khovaylo, M. Ohtsuka, H. Miki and T. Takagi: Structural and Transformational Properties of  $\text{Ni}_{46.4}\text{Mn}_{38.8}\text{In}_{12.8}\text{Co}_2$  Thin Films, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 154-155.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J14053
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	1年目 (発展)

**応力を受けたステンレスの局所磁気特性解析**  
**Magnetic Simulation for Localized Structure of Stressed Stainless Steel**

山口 克彦\*†, 高木 敏行\*\*††

内一 哲哉\*\*, 寺島 顕一\*\*\*, 鈴木 健司\*

\*福島大学共生システム理工学類, \*\*東北大学流体科学研究所, \*\*\*福島大学理工学研究科

†申請者, ††所内対応教員

### 1. 研究目的

応力の影響により、局所的に磁性が発現したステンレスの磁気特性について、モンテカルロ (MC) 法によりシミュレーション計算を行い、 $\mu$  Kerr 顕微鏡による局所的な磁気特性の実験結果と比較しながら解析を行う。これにより構造材料として広く用いられているステンレスの磁気的非破壊検査手法の発展を目指す。

### 2. 研究成果の内容

応力により局所的に磁性が発現したステンレスを対象として、磁性が変化した局所領域を磁性サイトが均一に分散しているクラスターモデルを用いて、モンテカルロシミュレーションによるマイナーループ解析を行った。分散させる領域を変化させ濃度の異なるクラスターを用意した。解析結果と、760MPa の引っ張り応力を加えた SUS304 の実験結果を比較すると、概ね一致するクラスターが存在した。また、 $\mu$  Kerr 顕微鏡の磁区観察像を解析するためにシミュレーションを行った。図 1 (a) は研磨したステンレスの磁区観察像、(b) は区画ごとに磁気異方性の異なるクラスターのシミュレーション結果、(c) は (b) における区画 A, B, C それぞれのヒステリシスカーブである。磁気異方性の違いにより結晶粒が観察できることが確認できた。

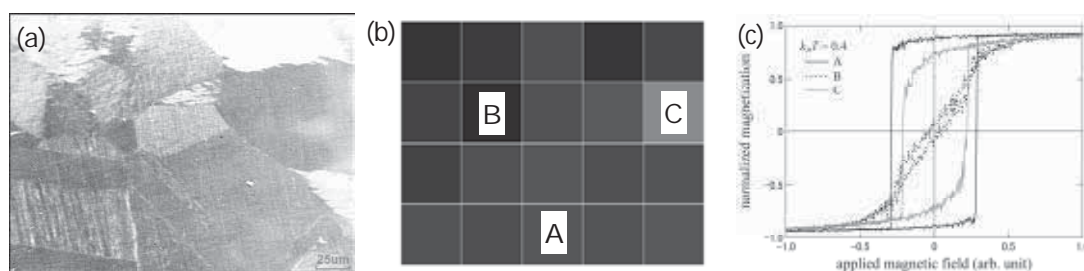


図 1 : 研磨したステンレスの磁区観察像(a)とシミュレーション結果(b)

### 3. 研究目標の達成状況

応力により局所的に磁性が変化したステンレスの一部として、磁性サイトが均一に分散したモデルを元に濃度の異なるクラスターを用意した。それらに対してマイナーループシミュレーションを行い、実験結果と比較し検証を行い、対応する濃度のクラスターを含むことが示された。また、磁区観察像と同様な結果をシミュレーションにより得ることが出来た。こ



れにより、相転移したステンレスの局所領域が持つ磁気特性を、シミュレーションによって解析することが可能となった。

#### 4. まとめと今後の課題

応力を受けたステンレスの磁性が発現した局所領域を、磁性サイトを均一に分散させたモデルを用いて、濃度の異なるクラスターを構築し、マイナーループ解析を行った結果、実験結果と概ね一致するクラスターの存在を示すことができた。また、 $\mu$  Kerr 顕微鏡の磁区観察像を解析するためにシミュレーションを行ったところ、観察像と同様な結果が得られ、磁気異方性の違いにより結晶粒が観察できることが確認できた。今後の課題は、相転移したステンレスに対する局所的な磁気特性の実験を進め、シミュレーション結果との比較、検証を行い、より高精度な解析手法を確立することである。

#### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

##### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] K. Terashima, K. Yamaguchi, K. Suzuki, T. Uchimoto and T. Takagi: Simulation for Magnetization Process of Torus Ring Cluster using Monte Carlo Method, *16th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, France, (2014), PE3:4, p.77.

[2] K. Yamaguchi, K. Terashima, K. Suzuki, T. Uchimoto and T. Takagi: Magnetization process under weak magnetic field fluctuation for micro-magnetic evaluation of micro residual stresses, *16th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, France, (2014), PE1:19, p.73.

[3] K. Terashima, K. Suzuki and K. Yamaguchi: Switching between Vortex state and Onion state of magnetic nano-torus ring cluster using weak local magnetic field, *The 24th International TOKI Conference*, Toki, (2014), P6-48.

[4] K. Terashima, K. Yamaguchi and K. Suzuki: Simulation analysis for magnetization process of torus ring clusters with different radius, *The 33rd JSST Annual Conference: International Conference on Simulation Technology*, Kitakyushu, (2014), OS1.

\*[5] K. Terashima, K. Yamaguchi, K. Suzuki, T. Uchimoto, H. Kosukegawa and T. Takagi: Magnetic Simulation for Localized Structure of Stressed Stainless Steel, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 78-79.

[6] 寺島顕一, 鈴木健司, 山口克彦, 内一哲哉, 高木敏行: トーラス型磁気クラスターにおける異なる磁化過程, 第38回日本磁気学会学術講演会, 横浜, (2014), 2pC-4, p. 46.

[7] 石渡真, 鈴木健司, 高瀬つぎ子, 山口克彦: 引張応力を加えたオーステナイト系ステンレス鋼の局所的磁気特性, 横浜, (2014), 4pC-7, P251.

##### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし (マスコミ発表) なし

(受賞) Student Presentation Award, Simulation analysis for magnetization process of torus ring clusters with different radius, Kenichi Terashima, 2014.10, Japan Society for Simulation Technology.

Project code	J14054
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	1st year

Physical Insight into Mach Reflection Transition and its Hysteresis in Axisymmetric Intakes in Continuum and Rarefied Conditions for High-Speed Airbreathing Engines

Hideaki Ogawa\*†, Sannu Mölder\*\*  
 Evgeny Timofeev\*\*\*, Hans Hornung\*\*\*\*  
 Georgy Shoev\*\*\*\*\*, Yevgeniy Bondar\*\*\*\*\*,  
 Kiyonobu Ohtani\*\*\*\*\*††, Shigeru Obayashi\*\*\*\*\*

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

\*\*Department of Aerospace Engineering, Ryerson University,

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, McGill University,

\*\*\*\*Graduate Aeronautical Laboratory, California Institute of Technology,

\*\*\*\*\*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Russian Academy of Science

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

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The air intake constitutes a key component of airbreathing engines for economical high-speed transport including ramjets and scramjets. Thorough understanding of intake physics and accurate prediction of the flowfield is of crucial importance for efficient engine operation and reliable intake start. Shock wave interactions play a primary role in intake flow compression. Our recent numerical study suggested a drastic change in the shock structure and possible hysteresis of the shock reflection mode in the shortening process of axisymmetric Busemann intakes (Fig. 1). New theories are required to predict the shock behavior in the axisymmetric regime, where the axis singularity prohibits the existence of regular reflection at the centerline. This project aims to fill this gap by scrutinizing flowfield characteristics and elucidating the driving mechanism in both continuum and rarefied gas regimes by coupling theoretical, computational and experimental approaches.

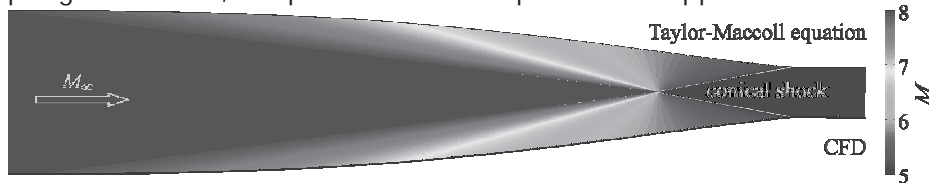


Figure 1 : Inviscid flowfield in full Busemann intake at  $M_\infty = 8$  from theory and CFD.

2. Details of program implement

The intake flowfields are investigated in numerical and theoretical approaches in the first phase of the project, focusing on Mach reflection (MR) in the light of shock polar analysis and two/three-shock theory. In particular, the shock structures and behavior are studied by probing into the transient flowfields in the Busemann intake gradually stunted (contracted) and re-stretched in the axial direction in a freestream at Mach 8. Time-accurate simulations have been performed for the inviscid flowfield by utilizing an Euler solver in conjunction with adaptive mesh capability for enhanced shock capturing. Particular attention has been paid to the intake configurations and flow conditions where mode transition of the shock

structure was observed in preceding studies between an MR with an extremely small Mach stem (resembling regular reflection) and that with a sizable Mach disc at the centerline. Close investigation of the transitional flowfields has revealed the presence of a ring (toroidal) vortex downstream of a highly curved Mach stem immediately after the onset of MR transition (Fig. 2 left) and a flat Mach stem (disk) in a steady flowfield after transition (right), where  $L/L_{full}$  denotes the instantaneous intake length factor. The variations of the centerline pressure distributions (Fig. 3 left) indicate abrupt decrease across mode transition, as per the solutions from the two-shock (strong oblique shocks) and three-shock theories. The time progression of the centerline Mach number (Fig. 3 right) is indicative of the presence of a ring vortex with supersonic recirculation followed by unsteady flow downstream.

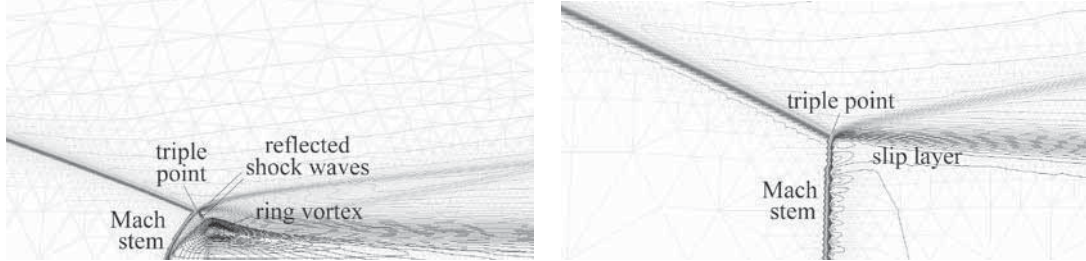


Figure 2 : Transitional flowfields near reflection in the stunting process of the Busemann intake (left:  $L/L_{full} = 88.05\%$ , right:  $L/L_{full} = 87\%$ ).

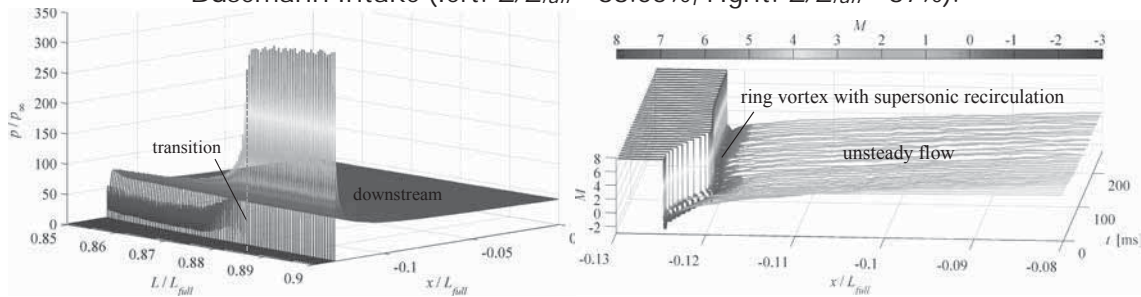


Figure 3 : Centerline pressure distributions (left) and Mach number progression (right).

### 3. Achievements

Physical insights have been gained into the transitional phenomena and unique flow characteristics associated with axisymmetric shock reflection and its mode transition in the shortening process of the Busemann intake in a hypersonic airflow. The knowledge acquired here will serve as an important basis for the development of new criteria for MR transition and elucidation of its hysteresis (if it exists).

### 4. Summaries and future plans

New knowledge has been obtained for the attributes and transition of the Mach reflection in the shortening process of the axisymmetric Busemann intake. Further investigation is continued, including rarefied gas simulations and experiments in IFS shock-wave facilities in the ongoing Multiple Collaborative Research Project.

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

- 1) Journal Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

\*[1] H. Ogawa, S. Mölder, E. Timofeev, H. Hornung, G. Shoen, Y. Bondar, K. Ohtani, and S. Obayashi: Numerical Investigation of Wave Reflections at the Centerline of Stunted Busemann Intakes, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 20-21.

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

Project code	J14055
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

## Effects of Temporal and Spatial Oxygen Heterogeneity on Cell Processes

Kenichi Funamoto\*†, Ioannis K. Zervantonakis\*\*, Roger D. Kamm\*\*\*††

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Department of Cell Biology, Harvard Medical School

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

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Both *in vivo* and *in vitro* studies have demonstrated that the hypoxic microenvironment with temporal and spatial oxygen gradients regulates many critical cellular processes, including cell proliferation, apoptosis, migration and differentiation. We have performed cellular experiments to observe cellular phenotypes under controlled oxygen tensions by using a microfluidic device. In this project, the effects of oxygen heterogeneity on cell migration, endothelial permeability regulation and angiogenesis are investigated. The specific target topics are as follows:

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

### 2. Details of program implement

I.Z. originally planned to visit Institute of Fluid Science for our collaborative research, but he couldn't come to Japan because of his current work as a postdoc at Harvard Medical School. Instead, K.F. visited Boston for experiments and face-to-face discussion at MIT and Harvard Medical School twice (7/8-7/13 and 12/18-12/23). In addition, during the research period, discussions about experiments were done by email and Skype as appropriate.

In this fiscal year, formation of an endothelial cell (EC) monolayer of human umbilical vein endothelial cells (HUVECs) was investigated as a fundamental study. Also, measurement of the permeability of the EC monolayer was performed to obtain a control result for elucidation of effects of hypoxic exposure.

### 3. Achievements

A method to stably form an EC monolayer on the collagen gel surface in the microfluidic device was established. The most effective way to create the monolayer was seeding cells twice after matrigel coating on the media channel. A firm EC monolayer was created on the gel surface after three-day cell culture. Then, permeability of the EC monolayer was quantified by measuring changes of fluorescent intensity in the collagen gel after an injection of fluorescent dextran of 70 kDa into the media channel (Fig. 1). The obtained values of diffusion coefficient of the dextran in the collagen gel and the permeability of the EC monolayer are summarized in Table 1. Both values in the present study are similar to those in the literature, implying validity of our experimental methods.

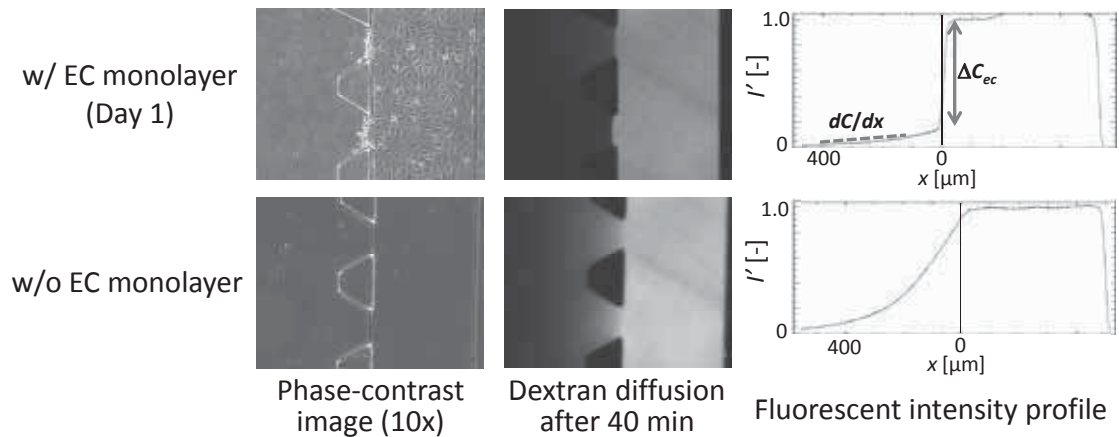


Figure 1 : Experimental results: phase-contrast microscope images of gel and media channels (left), fluorescent microscope images 40 min after the infusion of fluorescent dextran of 70 kDa into the media channel (middle), and the fluorescent intensity profiles (right).

Table 1 : Quantification results under normoxia

Parameter	Present study	Reference*
Diffusion coefficient of 70kDa dextran in collagen gel [m <sup>2</sup> /s]	4.0×10 <sup>-11</sup>	4.5×10 <sup>-11</sup>
Permeability of an endothelial monolayer under normoxia [m/s]	(2.52±1.01)×10 <sup>-7</sup>	2.8×10 <sup>-7</sup>

\* Zervantonakis, I.K., et al., PNAS, 109 (2012), 13515-13520.

#### 4. Summaries and future plans

The techniques necessary for evaluation of permeability of EC monolayer were established. And now, cellular experiments under hypoxic conditions are being conducted.

#### 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] Kenichi Funamoto, Ioannis K. Zervantonakis, Kento Matsubara, Kiyoe Funamoto, Takuya Ito, Yoshitaka Kimura, and Roger D. Kamm, Evaluation of Permeability of Endothelial Cell Monolayer under Controlled Oxygen Tension, *Proceedings of the 14th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2014)*, (2014), pp. 102-103.
  - [2] 船本 健一, 酸素濃度制御マイクロ流体デバイスを用いた細胞実験, 第18回酸素ダイナミクス研究会, (2014).
  - [3] 松原 健人, 船本 健一, Ioannis Zervantonakis, 船本 聖絵, 伊藤 拓哉, 正宗 淳, 木村 芳孝, 早瀬 敏幸, Roger Kamm: 低酸素マイクロ流体デバイスを用いた血管内皮細胞単層の物質透過性の評価, 日本機械学会第27回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, No. 14-67, (2015), pp. 121-122.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

課題番号	J14056
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	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	2年目

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

吉野 大輔\*†, 坂元 尚哉\*\*††

\*東北大学流体科学研究所, \*\*川崎医療福祉大学医療技術学部

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本研究では、前年度までに明らかになった空間的せん断応力勾配の有無およびせん断応力の大きさによる血管内皮細胞の伸長・配向性の違いを詳細に検討するために、高せん断応力環境における細胞内タンパク質の局在を評価した。高せん断応力環境の再現には図1の流れ負荷培養実験系を用い、対象とするタンパク質として、血管内皮細胞の形態変化に重要な役割を担うチロシン脱リン酸化酵素 Src homology 2-containing protein tyrosine phosphatase-2 (SH-PTP2)を採用した。流れ負荷培養実験後に頸動脈内皮細胞を氷温メタノールで脱水固定し、SH-PTP2の蛍光染色を行った。図2に各せん断応力環境下で10分間培養した内皮細胞の蛍光染色画像を示す。2, 6, 10 Paのせん断応力環境ではSH-PTP2は広

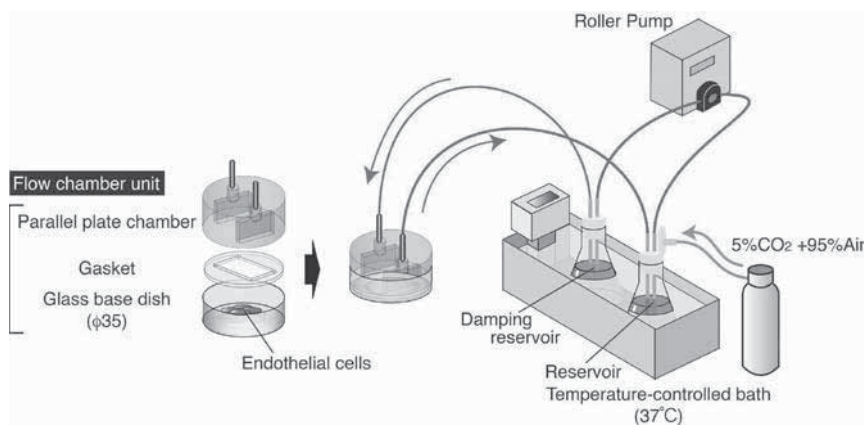


図1：血管内皮細胞の流れ負荷培養実験系

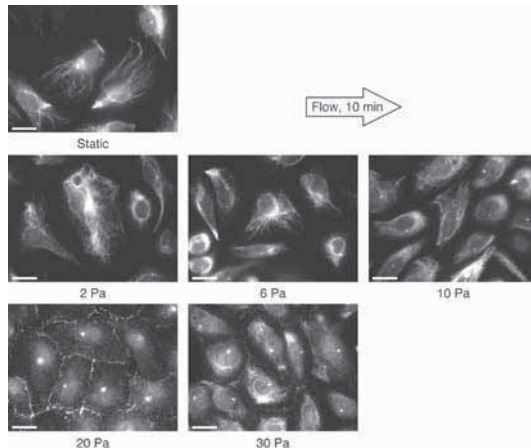


図 2 : 10 分の流れ負荷培養後の頸動脈内皮細胞中の SH-PTP2 の蛍光染色画像

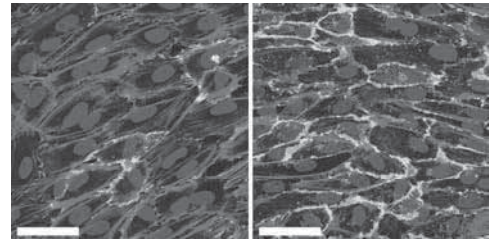


図 3 : 24 時間流れ負荷培養後の頸動脈内皮細胞の形態 : 2 Pa(左), 30 Pa(右)

く細胞質に分布するが、20 Pa を超えると、SH-PTP2 の細胞間接着部位への顕著な局在が認められた。図 3 に示すように、24 時間の流れ負荷培養実験では、低せん断応力環境(2 Pa)と比較して、高せん断応力環境(30 Pa)下の内皮細胞はより伸長することがわかった。

### 3. 研究目標の達成状況

2 年目の平成 26 年度は、高せん断応力環境における SH-PTP2 の局在を評価し、内皮細胞の伸長・配向性への影響を検討した。高せん断応力環境において SH-PTP2 の細胞間接着部位への局在が認められた。また、高せん断応力環境下では内皮細胞の高い伸長性が示されるため、細胞間接着部位に対する SH-PTP2 の顕著な局在が内皮細胞の伸長性に影響を与えることが示唆された。せん断応力の大きさによるタンパク質局在の違いを明らかにできたが、空間的せん断応力勾配に対する詳細な応答機構は未解明である。今後はタンパク質の活性や局在を力学的観点から考察していく予定である。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、高せん断応力環境を再現した流れ負荷培養実験を行い、細胞間接着部位に対する SH-PTP2 の顕著な局在が内皮細胞の伸長性に影響を与えることを示唆する結果を得た。今後は、SH-PTP2 に関連するタンパク質の活性や局在を力学的観点から検証し、動脈瘤発症に関わる細胞内シグナル伝達機構を解明する。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)  
なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] D. Yoshino, N. Sakamoto and M. Sato: Localization of Protein Tyrosine Phosphatase in Endothelial Cells under Shear Flow, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 86-87.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)  
なし

課題番号	J14057
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4~2015.3
継続年数	1年目

**グラフェンのキャリア伝導機構におけるグラフェンエッジの効果解明**  
**Investigation of Graphene Edge Effect on Carrier Transport Property of Graphene-Based Device**

増淵 覚<sup>\*†</sup>, 柏木 麗奈<sup>\*</sup>, 町田 友樹<sup>\*</sup>, 寒川 誠二<sup>\*\*††</sup>  
<sup>\*</sup>東京大学生産技術研究所, <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**

グラファイトの単分子膜であるグラフェンは、有効質量ゼロの相対論的粒子（ディラック電子）が電気伝導を担い、高い電子移動度を示すことから、次世代のエレクトロニクス材料として期待を集めている。本研究では、高品質グラフェンナノ構造の実現を目的として、中性粒子ビームエッチング法を用いた六方晶窒化硼素（h-BN）上グラフェンの微細加工と、磁気輸送特性の測定を行った。

**2. 研究成果の内容**

メカニカル劈開法・転写法を用いることで、h-BN/グラフェンヘテロ接合構造を作製した【図1】。作製したグラフェン/h-BNを電子線リソグラフィ法・中性粒子ビームエッチング法により微細加工し、ホールバー構造を作製した【図2】。h-BN

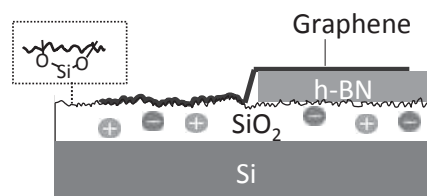


図1. BN上グラフェンとシリコン基板上グラフェンの比較。

上グラフェンは、従来実験に広く利用されてきたシリコン基板上グラフェンに比べて不純物による電子散乱が抑制されることから、高い電子移動度

$\mu = 63,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を示し、伝導電子の平均自由行程は

1  $\mu\text{m}$ に達した。作製した素子に対して垂直に磁場を印加し、非局所抵抗値の磁場依存性を測定したところ、チャンネル中でサイクロトロン運動した伝導電子が、電圧端子

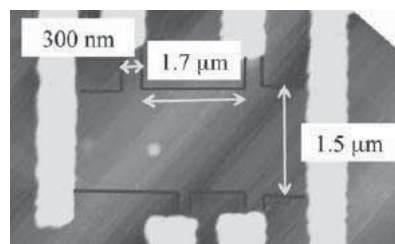


図2. グラフェンホールバー素子のAFM像。

に到達することで生じる特異な磁気抵抗ピークが観測された【図3 (i)】。磁場をさらに増大させると、試料端において一回・二回と反射された電子による磁気抵抗ピークが観測された【図3 (ii), (iii)】。観測され

た磁気抵抗ピーク強度を  $R^{\text{Peak}} \propto (\mu)^n$  にてフィットし、試料端における電子の鏡面散乱確率



$p = 0.3$ を求めた. この値は既存の反応性イオンエッチング法を用いた場合と同程度の値となっている.

### 3. 研究目標の達成状況

今回我々は, 中性粒子ビーム加工法を用いてグラフェン素子の作製を行い, 磁気輸送特性を測定することで試料端における伝導電子の鏡面散乱確率を決定することで, 研究目標はおおむね達成された.

### 4. まとめと今後の課題

今回我々は, 中性粒子ビームエッチング法により微細加工したh-BN上グラフェン素子において, 磁気輸送特性を測定することで, 試料端における電子の鏡面散乱確率を決定した. 今後は鏡面散乱確率の温度依存性の測定を行い, 試料端における電子散乱機構を解明することが課題となる.

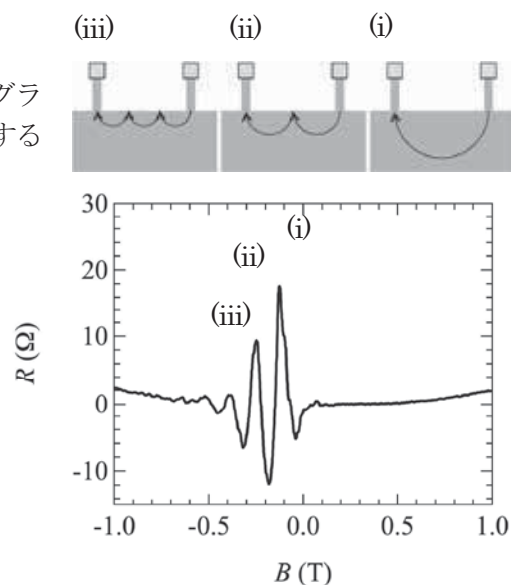


図3.  $T = 40 \text{ K}$  における非局所抵抗値( $R$ )の磁場( $B$ )依存性.

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

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

課題番号	J14058
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	3年目

### プラズマ流による気泡生成機構に関する研究

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

佐藤 岳彦\*†, 中谷 達行\*\*††

宮原 高志\*\*\*, 大谷 清伸\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*岡山理科大学技術科学研究所

\*\*\*静岡大学大学院工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

### 1. 研究目的

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

### 2. 研究成果の内容

平成 26 年度は、微細気泡の可視化法の開発に取り組んだ。図 1 に製作した実験装置を示す。パルス幅 7 ns の Nd:YAG ナノパルスレーザーを光学系を通し水中で収束させる。レーザー照射と同時に集光点から衝撃波が発生する。図 2(a) に示すように、この衝撃波は水面で反射し膨張波となる。図 2(b) に膨張波が下方向に伝搬する様子を示す。このように、膨張波の発生が可能なレーザー収束装置を開発した。

図 3 に図 2 で説明したレーザー収束により発生した衝撃波が伝搬の様子と、膨張波の発生と伝搬の様子を連続写真で示した。膨張波が通過すると、わずかに影の領域が形成される

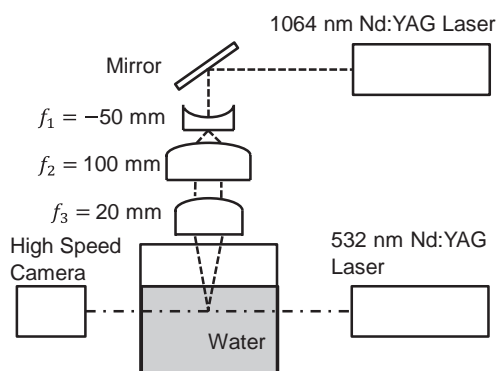


図 1 実験装置の概略

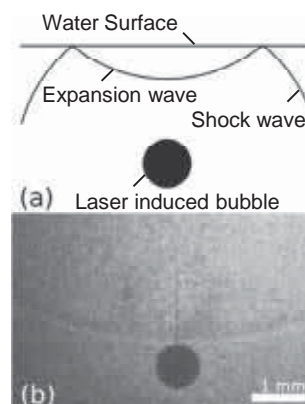


図 2 (a) 衝撃波の発生と膨張波の伝搬の模式図, (b) レーザー誘起気泡と膨張波の写真。

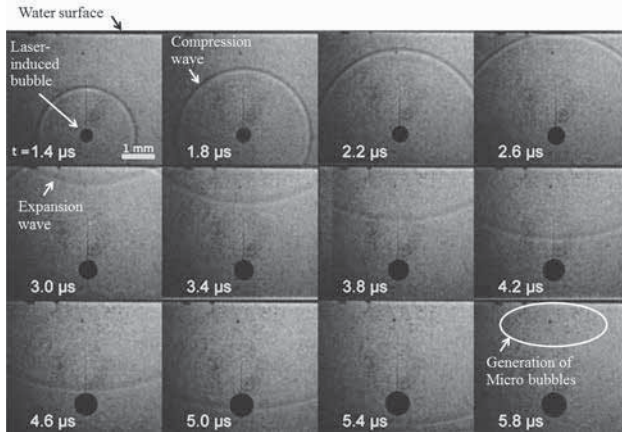


図 3 ナノパルスレーザーの収束による衝撃波と膨張波の発生と進展の連続写真。膨張波が通過した後に微細気泡が発生する。

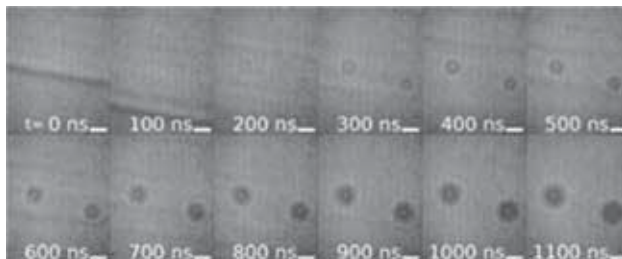


図 4 膨張波の通過後に成長する微細気泡の連続写真。スケールバーは 50  $\mu\text{m}$ 。

が、この影はマイクロバブル群の影である。これは、膨張波により超微細気泡が膨張し、マイクロバブルとなり可視化された様子であると考えられる。

図 4 に膨張波通過後に超微細気泡が、マイクロバブルに成長する様子の連続写真を示す。概ね 1  $\mu\text{s}$  後に数十  $\mu\text{m}$  まで成長している様子が示されている。この手法により、今まで可視化が困難であった微細気泡を可視化する要素技術を確立できた。

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、微細気泡の可視化法の開発に取り組み、今まで不可視であった微細気泡の可視化が可能な手法を確立し、当初の目的を達成したと考えている。

### 4. まとめと今後の課題

本年度は、水中のマイクロバブルより小さな超微細気泡の可視化法を開発したが、今後はマイクロバブル

より小さい超微細気泡の固気判別法の開発を進める。これは、未だ世界でも開発されていない技術であり、微細気泡科学の確立への多大な貢献が可能である。

## 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

該当なし

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] Takehiko Sato, Yuki Yamaguchi, Kiyonobu Ohtani, Takashi Miyahara and Tatsuyuki Nakatani: Development of New Visualization Method for Plasma-Generated Nano-Micro Bubbles, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2014)*, Sendai, (2014), pp. 186-187.

### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

該当なし

課題番号	J14059
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	3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。併せ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、フランス Ecole Centrale Lyon 側で開発された閉空間内流れ三次元数値シミュレーションコードを用いて、作動流体がプラントル数 ( $Pr$ ) が 0.7 および 5.9 における条件での立方体形状閉空間内自然対流現象を計算し、広範なレイリー数 ( $Ra$ ) 領域における流動場の様相を詳細検討した。計算結果より分岐線図を作成すると、安定状態であった流れが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く関係していることが分かった。本研究での計算では、自然対流の不安定化遷移現象には、閉空間立方体の傾斜角に臨界角が存在していることが分かった。図 1 に  $Pr = 5.9$  の作動流体における安定解存在領域を示す。図から明らかなように、傾斜角が約  $4.5^\circ$  を超えると不安定領域が存在しなくなり、流れは安定状態を維持し続けることが分かった。これらの結果を基に、自然対流が不安定化に至るメカニズムの解明を行った。なお、本研究内容は Journal of Fluid Mechanics に掲載された。

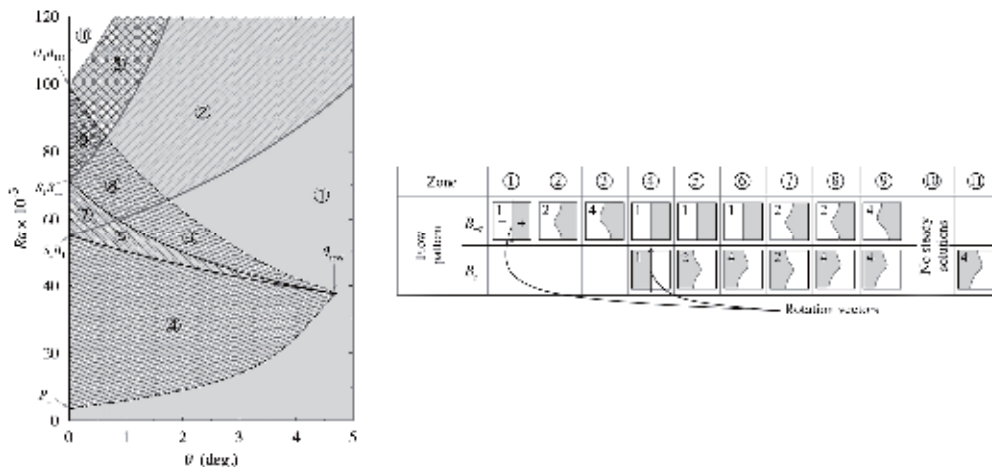


図 1 :  $Pr = 5.9$  の作動流体における安定解存在領域と傾斜角の関係

### 3. 研究目標の達成状況

本研究では、工業的に広範応用されている自然対流熱伝達の分野の一助となる知見として、自然対流の乱流不安定化には傾斜角に臨界角が存在することを計算によって明らかにした。この知見は乱流による伝熱促進技術の開発や、伝熱抑制技術の開発といった熱流動場における伝熱制御に大きく資する情報であると考えられる。全体としては80%の達成度と評価することができ、臨界角の実験的検証は今後の課題である。

### 4. まとめと今後の課題

今年度は昨年度の結果を基に、自然対流の不安定化遷移に関して、より詳細な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、自然対流の不安定化現象では、重力加速度の方向に臨界値が存在していることが示唆された。今後は、実験的検証として、温度場・流動場同時計測システムを用いた観察実験を実施していく。この同時計測システムは東北大学側で開発されたものであり、既存の高精度温度場可視化システムと粒子追跡計測システムを融合したもので、温度場・流動場ともに非接触で計測可能であることから、信頼のある諸データを取得できる。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

\*[1] J.F. Torres, D. Henry, A. Komiya and S. Maruyama: Bifurcation analysis of steady natural convection in a tilted cubical cavity with adiabatic sidewalls, *J. Fluid Mech.*, 756(2014), pp. 650-688.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[2] J.F. Torres, A. Komiya, D. Henry, J. Okajima, S. Maruyama: Instability Analysis of Natural Convection in Closed Cavity Configuration, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 56-57.

#### 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	J14060
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	2年目

### 波のエネルギーに基づく軸流を持つ渦の安定性解析とその応用

#### Stability Analysis of Vortices with Axial Flow based on Energetics and its Application

服部 裕司\*†, 廣田 真\*, 福本 康秀\*\*††

\*東北大学流体科学研究所, \*\*九州大学マス・フォア・インダストリ研究所

†申請者, ††所外対応研究者

#### 1. 研究目的

軸流をもつ渦の安定性を波のエネルギーの立場から捉え直すことにより, 任意の渦度分布をもつ渦のパラメタ共鳴不安定性の発現メカニズムを明らかにする. 波のエネルギーの表式を求めることにより, 軸流をもつ渦流れの不安定性の判別を行う. さらに複数の不安定源がある場合の取り扱い方法を確立する. その応用により, ひずみ変形を受けた翼端渦や, 回転翼端渦のモデルであるらせん渦の不安定性を解明する.

#### 2. 研究成果の内容

昨年度は軸流をもつ渦の曲率不安定性について, 波のエネルギーの立場から安定性の判別を行い, 孤立モードの特徴的な振る舞いにより安定/不安定の交代が実際に起きていることを明らかにした. しかしながら, エネルギーの評価に用いた式は分散関係を流用した経験的なものであった. この点で次元を含めて正しいエネルギーの評価を行い, それが安定性の判別に対して影響するかどうかを調べるのが課題であった.

波のエネルギーは kinematic な擾乱を考えることにより, Lagrange 変位  $\xi$  を用いて

$$H = 2 \int \frac{\partial \xi}{\partial t} \cdot \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} + \mathbf{u}_0 \cdot \nabla \xi \right) d^3 x$$

と表すことができる (Hirota et al., 2008). これを軸流をもつ Rankine 渦の場合に適用して

$$\frac{H}{2} = \omega \int_0^1 \left[ (\omega - m - \mu k) |\xi|^2 + 2 \xi_r^R \xi_\theta^I \right] r dr + \omega \int_1^\infty \left[ (\omega - m / r^2) |\xi|^2 + \frac{2}{r^2} \xi_r^R \xi_\theta^I \right] r dr$$

の表式を導いた.

図1に上式によるエネルギーの符号評価の結果と, 曲率不安定性の発現との関係を示す. 孤立モードのエネルギーは3か所で符号が変わる. このうち  $\omega' = 13$  での符号の変化は経験的な式ではとらえられなかったものであり,  $(k, \omega') = (0, 14)$  からこの点までの分枝上で符号が異なることがわかった. しかしながら曲率不安定性の場合, この分枝上では交点が存在しないため, 不安定性の発現に関しては結果は変わらなかった.

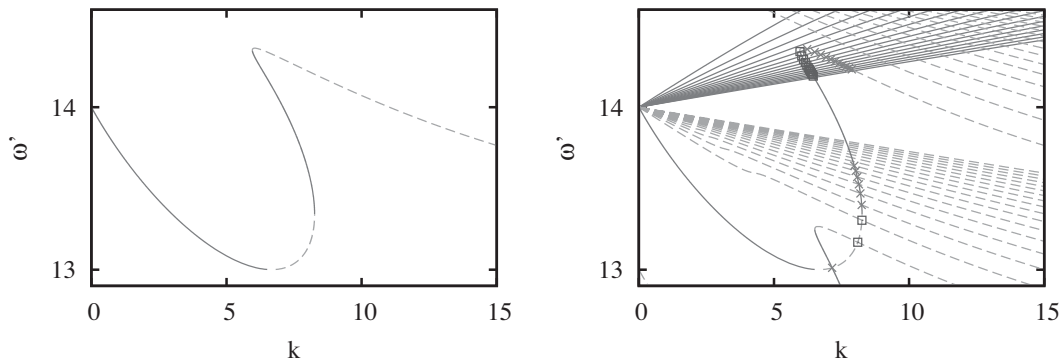


図1：(左) 孤立モードの分散曲線と波のエネルギーの符号. 実線が正エネルギー，破線が負エネルギーに対応する. (右) 曲率不安定性の発現と波のエネルギーの符号の関係. □が安定，×が不安定な交点に対応する.

### 3. 研究目標の達成状況

応用上重要な渦流れである翼端渦や回転翼端渦は一般に軸流をもち，その渦度分布は一般に翼を含む系全体の境界条件に依存する. 軸流をもつ渦の安定性の一般理論を構築することにより，これらの渦の安定性を解明し，渦度分布を制御することによる流れの安定化および不安定化への道を切り拓くことが本研究の目標である. 波のエネルギーによる安定性の判別は，一般には煩雑な安定性解析に対して，簡便な代替手段を与える. 本年度は正しいエネルギーの表式を導き，曲率不安定性の場合に実際に評価を行うことに成功した. 概ね十分な結果を得たといえる.

### 4. まとめと今後の課題

軸流をもつ渦の曲率不安定性について，波のエネルギーの立場から正しく安定性の判別を行い，孤立モードの特徴的な振る舞いによる不安定性の発現を確認した.

今後は，一般の渦度分布の場合や，歪み変形を受けた渦（楕円型不安定性）の場合，さらに複合的な不安定性への応用を行う.

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 服部裕司，廣田真，福本康秀：軸流をもつ渦のパラメタ共鳴不安定性と波のエネルギー，日本流体力学会年会 2014，仙台，(2014).

\*[2] Yasuhide Fukumoto, Makoto Hirota and Yuji Hattori: Stability Analysis of Vortices with Axial Flow based on Energetics and its Application, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2014), pp. 176-177.*

#### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J14061
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	2年目

**バイオテンプレート法による大面積2次元高密度および分散型ナノ粒子  
エッチングマスクの実現**

**Development of Bio-Template Process for Realizing Etching Mask of 2D Ordered or  
Dispersed Array of Nanoparticle**

山下 一郎\*†, 寒川 誠二\*\*††

\*奈良先端科学技術大学院大学, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

本研究の目的は、フェリチンタンパク質コアをマスクとするシリコンナノディスク量子井戸作製の大きな課題であるフェリチンタンパク質コアの制御された2次元大面積配列を実現するものである。これまで申請者は、寒川教授と球殻状タンパク質のナノ粒子コアをマスクとして酸化シリコンにサンドイッチされたシリコン薄膜をエッチングすることで10mm角の基板で数mmの領域でナノディスク配列を作製し、その量子効果を利用するデバイスの原理実証実験を進めてきた。そして作製されたナノディスク配列を用いて、各ナノディスクの電子エネルギー順位が量子化されていることや、ミニバンド形成を示唆する電気特性をナノディスク間間隔の制御で実現することに成功している。これらの実験結果は、作製されたシリコンナノディスク配列が、量子太陽電池などの電子デバイスの実現につながる可能性を実験的に示したものである。しかしながらデバイスの量産や商品化のためには、現在の10mm角のフェリチン配列では現実的ではなく、数インチウエファレベルでのナノ構造作製を可能にしなければならない。しかしながら、スピコート法で単純に基板を大型化するだけではフェリチンの大面積2次元高密度は実現不可能である。そのため、フェリチン粒子の遺伝子的改変および基板の表面処理により、大面積2次元高密度および分散型ナノ粒子エッチングマスクをバイオテンプレート法で実現することを目的とする。

## 2. 研究成果の内容

外表面にカーボンナノホーンやカーボンナノチューブに吸着するペプチドアプタマーを持つカーボンナノホーン吸着ペプチド修飾フェリチン (CNHF) は、疎水性相互作用を基にした粒子間引力を持ち、この近距離疎水相互作用に基づく性引力により、CNHFはシリコン基板上に小型の2次元結晶ドメインを作ることができる。しかしドメイン間に結晶粒界ができることや、フェリチンの被覆ができていない場所があるなど目的とする数インチのウエファ上に高密度フェリチン配列を作る技術として完成していなかった。そこで配列の大型化と被覆率の大幅な向上をめざし、シリコン基板上にCNHFを吸着させやすくまた単距離横方向移動を可能にするPEG表面修飾を導入しその効果をみた。その結果、被覆率の高い2次元結晶が得られるようになった。そのメカニズムは図1に示すようなものと考えられた。表面に形成さ



れた PEG 層はマイナスのゼータ電位を持つシリコン基板の負電荷の影響を抑制し、全体として負に帯電したフェリチンを吸着しやすくさせる。吸着後は CNHF と PEG との相互作用により PEG 層表面にフェリチンは固定されるが、柔らかい PEG が横方向のフェリチンの微小距離移動を可能にするため、フェリチン配列の空き部分に移動が可能で、その結果高密度、理想的には 2 次元結晶の 2 次元配列が実現できるものと考えられた。

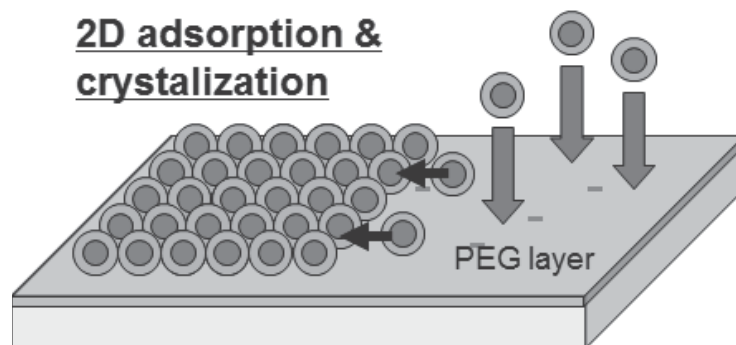


図 1. 類推された PEG コートされたシリコン基板上への CNHF の吸着挙動の模式図

### 3. 研究目標の達成状況

ナノ粒子内包のフェリチンの高密度基板吸着が、PEG 層形成によりスピコート法で簡便に作製できるようになった。この新手法は 12 nm の粒子間距離しか実現できないが PEG のパターンニングによるフェリチンナノパターン配列の実現にもつながる新しい成果である。

### 4. まとめと今後の課題

フェリチンの大面積配列化に向けて手法を変えて基板の PEG 修飾による大面積化手法を検討した。PEG 層形成修飾法はフェリチン粒子と基板間の弱い引力、PEG 層によるフェリチンの基板上微小距離移動により、大面積 2 次元高密度ナノ粒子エッチングマスクを実現できることが示された。来年度はその理論解析とパターンニングによる大面積化を行いたい。

### 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)

該当なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] I. Yamashita, R. Tsukamoto, S. Samukawa: Adsorption Control of Ferritin Molecules with Nano Particles, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 146-147.

[2] C. Y. Lee, A. Higo, J. Ohta, I. Yamashita, H. Fujioka, S. Samukawa: InGaN Quantum Nanodisks for High Efficiency Optoelectronic Devices by Combination of Bio-template and Neutral Beam Etching Processes, *Eleventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp. 190-191.

[3] C. Thomas, C. Y. Lee, Y. Tamura, K. Yoshikawa, A. Higo, I. Yamashita, and S. Samukawa: Neutral Beam Etching of III-V Compounds for Laser Devices, *Eleventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2014), pp. 192-193.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

該当なし

Project code	J14062
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	1st year

### Flammability Limits of Low-Lewis-number Premixed Flames

Minaev Sergey\*†, Maruta Kaoru\*\*††,  
 Fursenko Roman\*††, Kumar Sudarshan\*\*\*††,  
 Sereshchenko Evgeniy\*, Odintsov Egor\*, Nakamura Hisashi\*\*,  
 Takase Koichi\*\*, Kobayashi Tomoya\*\*

\*Engineering School, Far Eastern Federal University, Russia,

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

\*\*\*Aerospace Engineering Indian Institute of Technology, India

†Applicant, ††IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

In spite of recent years, significant progress in modeling of gas combustion the structure of near-limit low-Lewis-number flames near the flammability limits are still not well investigated. The main objective of the project is development and generalization of fundamental theory of non-stationary behavior of self-fragmented premixed flames near the flammability limits caused by heat losses, transport processes and flow non uniformity.

#### 2. Details of program implement

Development of advanced combustion technologies such as mild combustion demands fundamental knowledge on flammability limits and near-limit flame characteristics. Investigations of stretched premixed flames were proved to be usable for studies of extinction limits and ultra-lean flames behavior. Although, a number of experimental, numerical and theoretical works on combustion of stretched flames with Lewis number close to unity are available [1] there is a lack of fundamental knowledge on dynamical behavior and flammability limits of low-Lewis-number flames. In [2] the diffusive-thermal instabilities of low Lewis number flames were studied experimentally using counterflow slot jet apparatus. Unlike the conventional axisymmetric counterflowing jet apparatus [1] where the extensional strain occurs in both coordinate directions parallel to the flame surface, the counterflow slot-jet apparatus provides extensional strain only in the direction that is orthogonal to the plane of the slots. The experimental investigations demonstrate that stretched flames can exist beyond the extinction limits of planar flame, in the form of flame tubes [2]. Multiply flame tubes of ultra-lean mixtures exist in almost all range of stretch rates. At the same time, there is a lack of theoretical investigations of the diffusive-thermal instability of counterflow flames in slot-jet arrangement.

In the course of the project implementation the characteristics of lean low-Lewis-number flames in counterflow slot-jet burner were studied numerically in the framework of thermal-diffusion model with one-step irreversible chemical reaction. Numerical simulations showed that the twin planar flames, twin wrinkled flames and multiply flame tubes are observed depending on values of equivalence ratio and stretch rate. The placement of these combustion regimes in equivalence ratio /stretch rate plane was determined and corresponding regime diagram calculated for  $Le=0.3$  is shown in Fig.1. Inside the C-shape curve bounded extinction limits of 1D counterflow flames (solid marked curve in Fig.1) the twin planar and wrinkled flames exist. In the range of

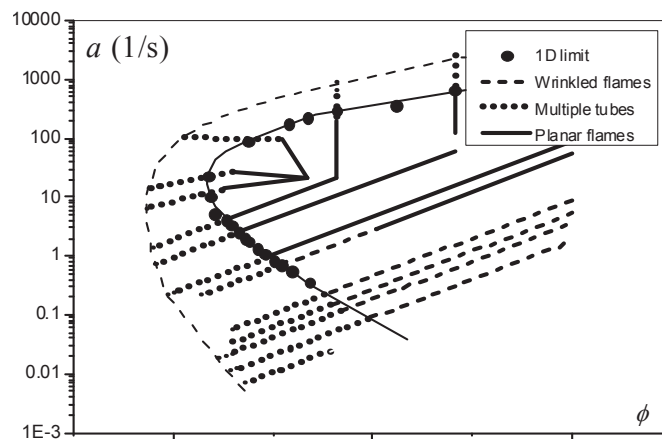


Fig. 1. Regime diagram in equivalence ratio / stretch rate plane calculated for  $Le=0.3$

high stretch rates the planar flames are observed. At relatively small stretch rates the flames have a cellular structure. Ultra-lean counterflow flames with mixture equivalence ratio less than extinction limit of 1D stretched flames appear throughout the entire range of stretch rates as a set of flame tubes. As can be seen from Fig.1 the extension of flammability limits of low-Lewis-number flames occur (dashed curve in Fig.1). The numerical results qualitatively coincide with previous experimental observations [2].

[1] K. Maruta, et al., *26th Symp. (Int.) Combust.* (1996) 1283-1289.

[2] C. Kaiser, J.-B. Liu, P.D. Ronney, *38th AIAA Aerospace Sci. Meeting*, (2000), p. AIAA2000-0576.

### 3. Achievements

All results which have been expected in the submitted project were achieved. Characteristics of low-Lewis-number stretched flames in counterflow slot-jet burner were studied numerically. The regions of existence of different combustion regimes in equivalence ratio / stretch rate plane were determined. The comparison between numerical results and the experimental data on stretched flames was done.

### 4. Summaries and future plans

Characteristics of lean premixed flames in counterflow slot-jet burner were studied numerically in the frame of thermal-diffusion model. A wide variety of flame structures were detected and regime diagrams summarizing the placement of different combustion regimes in fuel concentration / stretch rate plane were plotted. The future research will be directed towards the development and generalization of fundamental theory of non-stationary behavior of self-fragmented premixed flames near the flammability limits.

### 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, T. Kobayashi, K. Takase, M. Katsuta, M. Kikuchi, K. Maruta: Near-lean limit combustion regimes of low-Lewis-number stretched premixed flames, *Combustion and Flame*, doi: 10.1016/j.combustflame.2014.11.032, (2014).

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

\*[2] R. Fursenko, S. Minaev, K. Maruta: Low-Lewis-number premixed flames stabilization in stretched flow of two slot burners, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 68-69.

課題番号	J14063
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	3年目

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

藤村 茂<sup>\*,\*\*\*†</sup>, 佐藤 岳彦<sup>\*\*††</sup>, 中野 禎久<sup>\*\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>東北薬科大学薬学部, <sup>\*\*</sup>東北大学流体科学研究所  
<sup>\*\*\*</sup>東北大学加齢医学研究所  
<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>所内対応教員

**1. 研究目的**

これまで我々は、多剤耐性株を含む緑膿菌に対し、新たに開発したプラズマ殺菌法の条件設定ならびに殺菌効果について検討し 10 分で除菌できることを明らかにした。この効果の臨床応用に向けて、適応対象を眼科領域のコンタクトレンズ (CL) 関連角膜炎とした。同角膜炎の原因菌として、緑膿菌が高率に分離されることから、CL のプラズマ殺菌装置の殺菌機序について検討した。

**2. 研究成果の内容**

開発したプラズマ殺菌装置は CL 上の biofilm 産生 *P. aeruginosa* を 10 分間で殺菌することが確認された。走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察では、放電 10 分後においても菌体の残存が認められたが、蛍光顕微鏡を用いた観察により、残存している菌体は死菌であることを確認した。プラズマ放電による水質の変化については、水温は放電開始直後の  $18.1 \pm 3.27$  °C から 10 分後には  $44.0 \pm 2.97$  °C へ上昇した ( $P < 0.05$ )。pH は放電開始直後の  $5.9 \pm 0.10$  から低下し、5 分後には  $2.3 \pm 0.10$  を示した。また、O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> の各濃度について、O<sub>3</sub> 濃度は放電 3 分間で  $5.1 \pm 0.56$  ppm に上昇 ( $P < 0.05$ ) し、放電終了後 15 分経過した時点で検出限界以下まで減少した ( $P < 0.05$ )。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> の濃度は時間と共に上昇し、10 分後に各々  $28.0 \pm 4.00$  ppm,  $62.3 \pm 6.03$  ppm まで上昇 ( $P < 0.05$ ) し、その後その値を維持した (図 1)。10 分放電直後に得られた水質の変化による影響を各因子 (水温, pH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度) 毎に再現した。すなわち、50 °C の温水, pH 2 の酸性水および 30 ppm の H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> の各溶液に CL 汚染モデルを 10 分間浸漬させ、その殺菌効果を調査した。その結果、SEM 上では菌量と形態の変化は認められず、培養法においても、いずれの溶液も菌の発育が確認された。CL 上の biofilm 量は 3 分間の放電により約 1/2 に減少した ( $P < 0.05$ ) (図 2)。

**3. 研究目標の達成状況**

プラズマ放電により O<sub>3</sub> および NO<sub>2</sub> 等の発生が人体へ影響すると考えられ、これら副産物の軽減措置として、CL 殺菌装置の小型化を検討し、現行の CL 携帯ケースに電極を取り付けた装置を開発し、これによる殺菌効果を確認した。O<sub>3</sub> 濃度は放電終了後 15 分後に検出限界以下まで低下することを確認した。

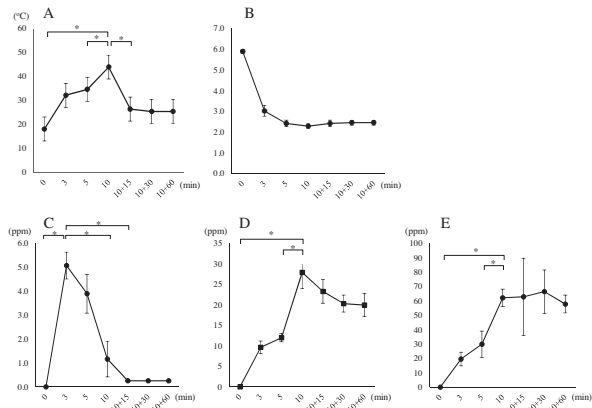


図 1: プラズマ放電による水質の変化 A: 水温, B: pH, C: O<sub>3</sub>, D: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, E: NO<sub>2</sub>

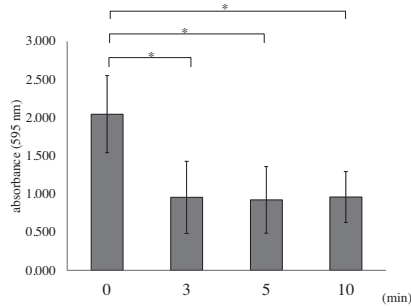


図 2: プラズマ放電による biofilm 量の継時的変化

#### 4. まとめと今後の課題

CL 上の biofilm 産生 *P. aeruginosa* の殺菌のメカニズムとして、プラズマ放電によって産生された H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> が殺菌効果の相乗効果をもたらす補助的な役割を担うこと、また、O<sub>3</sub> の濃度が biofilm の付着性に影響を与えている可能性が示唆された。NO<sub>2</sub> と O<sub>3</sub> の殺菌効果の確認は技術的な制約により検討できなかったが、これらの因子の関与は否定できない。

#### 5. 研究成果

##### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

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

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\* [2] Y. Nakano, S. Fujimura, T. Sato, D. Yoshino, A. Watanabe: Sterilization Mechanism of Plasma Discharge against Biofilm-producing *Pseudomonas aeruginosa* on Contact Lenses, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 88-89.

[3] Y. Nakano, S. Fujimura, T. Sato, D. Yoshino, A. Watanabe: Anti-bacterial Effect of the plasma discharge against biofilm-producing *Pseudomonas aeruginosa*. *24th ECCMID, Barcelona*, (2014).

##### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J14064
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目（発展）

**MR 計測融合血流シミュレーションの脳血管障害診療への応用**  
**Application of MR-measurement-Integrated Hemodynamic Simulation to Cerebrovascular Disease**

杉山 慎一郎\*†, 船本 健一\*\*††

遠藤 英徳\*, 鈴木 大地\*\*

\*広南病院脳神経外科, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*東北大学大学院医工学部

†申請者, ††所内対応教員

#### 1. 研究目的

我々は、計測融合シミュレーションを位相差 magnetic resonance (MR)法と組み合わせることで、非侵襲的に頭蓋内動脈の血行動態を解析できる可能性を報告してきた。本研究は、MR 計測融合シミュレーションを、実際の疾病に関する解析、すなわち脳動脈瘤、脳動静脈奇形、頸部頸動脈狭窄症といった対象疾患の解析に応用し、その临床上の有用性を検討するものである。

#### 2. 研究成果の内容

主に、脳動脈瘤について、位相差 MR を用いてデータを収集し、MR 計測融合シミュレーションを行うための基礎的方法論を確立した。さらに、脳動静脈奇形および頸部頸動脈狭窄症についてもデータを取得、解析中である。位相差 MR を用いてこれらの疾患を解析する試みは、国際的にも精力的に取り組まれている研究であるが、時間的・空間的解像度の粗さ・低さが問題となっている。計測融合シミュレーションは、この問題点を解決する有用な方法であると考えられた。

#### 3. 研究目標の達成状況

研究初年度として、実臨床におけるデータ取得を行った。さらに、共同研究施設として東北大学病院放射線科（大田英揮 助教）が加わり、多種の MR 装置によるデータ取得（GEヘルスケア・ジャパン、シーメンス・ジャパン）が行えるようになった。また、本研究グループ構成員および研究内容を主とした申請が、科学研究費助成事業（基盤研究 B）に採択された。

#### 4. まとめと今後の課題

MR 計測融合シミュレーションは、非侵襲的な生体内血流動態解析手法として、有用であると考えられる。本研究はその有用性を実際の臨床で確認するトランスレーショナル・リサーチである。国際的にみても、他に類をみない革新的な取り組みであるがため、その verification and validation に留意しつつ、研究を進める必要がある。

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] Shin-ichiro Sugiyama, Kenichi Funamoto, Daichi Suzuki, Toshiyuki Hayase, Teiji Tominaga: Application of MR-Measurement-Integrated Hemodynamic Simulation to Cerebrovascular Diseases, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 104-105.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

科学研究費助成事業（基盤研究B）：

数値流体力学解析に基づく脳動静脈奇形の血流解析と集学的治療への応用

研究代表者：清水宏明（秋田大学脳神経外科教授） 研究分担者：船本健一・杉山慎一郎

課題番号	J14065
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	2014.4~2015.3
継続年数	1年目

**頸部頸動脈狭窄における血行動態の解析**  
**Hemodynamic Analysis of Neck Internal Carotid Artery Stenosis**

杉山 慎一郎\*†, 太田 信\*\*††

遠藤 英徳\*, 中山 敏男\*\*

\*広南病院, \*\*東北大学流体科学研究所

\*\*東北大学大学院医工学部

†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

頸部頸動脈分岐部は、動脈硬化の好発部位である。動脈硬化が進行するにつれ、血管は狭窄をきたす。狭窄部位においては血栓が形成され、それが末梢へと流れていくことで脳梗塞を発症する（アテローム血栓性脳塞栓症と呼ばれる）。しかし、狭窄部の血行動態と脳梗塞発症との関連については、いまだ不明な点が多い。本研究は、頸動脈狭窄部位における血行動態を解析し、その血栓形成への関与を検討するものである。

**2. 研究成果の内容**

頸動脈狭窄部位における血行動態を、数値流体力学的に解析した。すなわち、医用データ（3次元形状の情報を含む DICOM 形式のデータ）から頸部頸動脈狭窄部位をコンピュータ上で再構築し、超音波機器で得た総頸動脈（分岐部の中枢側）の平均血流量を流入境界条件とした流体計算（定常計算）を行った。流出境界条件については、共同研究者らが以前に報告した手法を用いた（Hayase H, Tokunaga K, Nakayama T, Ohta M, Date I et al: Computational fluid dynamics of carotid arteries after carotid endarterectomy or carotid artery stenting based on postoperative patient-specific computed tomography angiography and ultrasound flow data. *Neurosurgery* 68: 1096-1101, 2011）。得られた計算結果における分岐部末梢側の血流量を、超音波機器で得た実測値と比較した。

**3. 研究目標の達成状況**

頸動脈狭窄症において、血管内部にどのような流れ場が生じているのかが、明らかになりつつある。ただし、強い狭窄を認める場合には、現在の計算モデルが不適切である可能性（乱流の存在）が疑われ、その解決策を検討中である。

**4. まとめと今後の課題**

狭窄部の流れ場は、通常の血管内部と比較して不安定である。これら不安定性の特徴を抽出し、血栓形成への影響を検討する。すなわち、流体計算の結果と実臨床における血栓形成の有無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  
なし
  - 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）  
なし

課題番号	J14066
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

### 新力天秤を用いたサイレント超音速複葉翼モデルの空力特性

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

川添 博光\*†, 大林 茂\*\*††

山田 剛治\*, 宮崎 綾\*

\*鳥取大学, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

#### 1. 研究目的

本研究の目的は、超音速風洞試験に適用可能な六角形状力天秤を設計・開発し、その効果と改善点を調査することである。

#### 2. 研究成果の内容

図1は超音速風洞試験用に新たに設計・開発した六角形状力天秤の形状、およびその強度解析結果を示す。超音速風洞試験では風洞始動時に衝撃波が上流から進行し、天秤には予期せぬ過大な荷重 ( $F_{SL}$ : スターティングロード) が作用する。この  $F_{SL}$  による天秤破壊を防ぐため、図1(b)に安全率で示す強度解析を行った。六角の根元で設計安全率2に近い最小安全率2.11となっている。

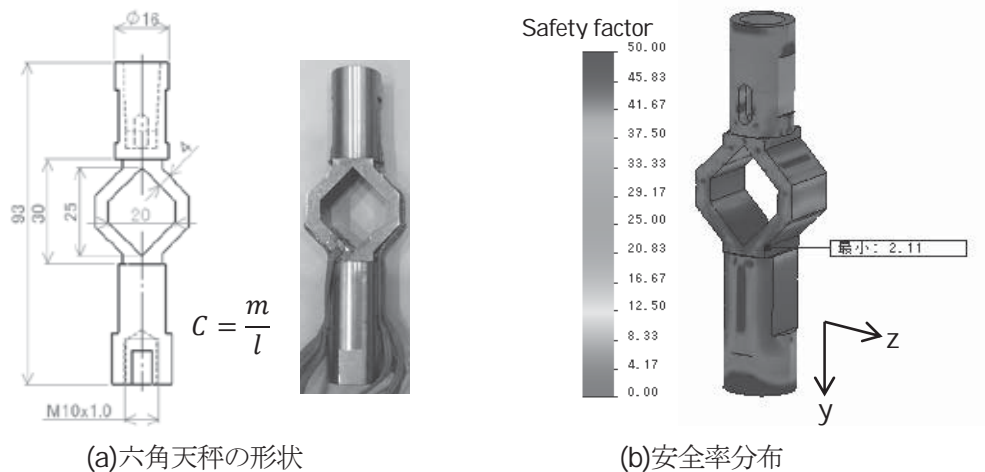


図1 超音速風洞試験用の六角力天秤とその強度解析結果

図2に六角形状力天秤の荷重に対するひずみ特性を示す。  $F_z$  と  $F_y$  間の干渉は極めて小さく、天秤として良好な特性を有していることが分かる。この天秤を超音速流(マッハ数  $M=3.8$ )の中に設置したくさび模型(図3)に適用した。その揚力に対する結果を図4に示す。模型には非定常に振動する空気力が作用し、揚力の最大値は36.1Nになった。一方、Normal Shock Theoryによる評価によれば、  $M=3.8$  に対するスターティングロードは75.8Nと推定される。実験ではこの予測値の1/2程度と小さい。今後、この不一致の原因を解明し、セン

シング精度の高い六角天秤の設計法を確立する必要がある。また、そのためには種々のマッハ数に対するスターティングロードの大きさを実験的に調査検証する必要がある。

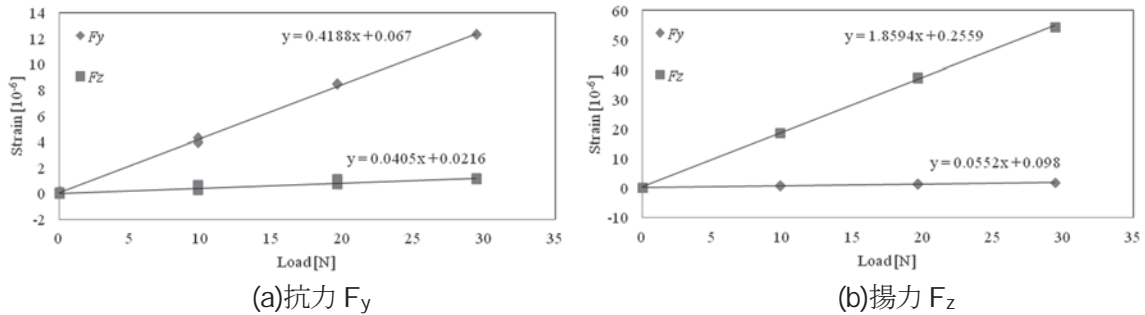


図2 六角形状力天秤のひずみ特性

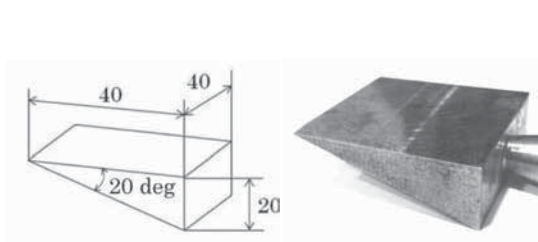


図3 くさび模型

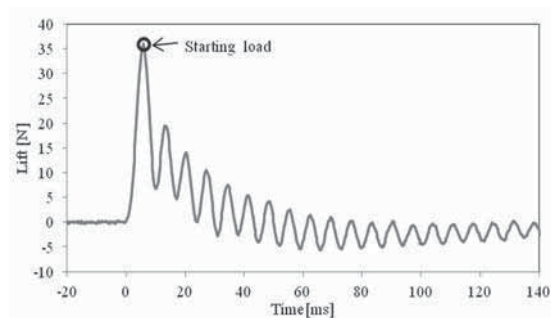


図4 風洞試験結果(揚力)

### 3. 研究目標の達成状況

超音速風洞試験用の感度特性可変な六角形状力天秤を開発し目標を達成した。

### 4. まとめと今後の課題

開発した六角形状力天秤は低亜音速流のみならず、超音速流にも適用可能なことを確認した。ただし、今回の設計においては天秤のスターティングロードに対する安全率を2で設計したが、実験結果によればこの設計値が過大評価していることがわかった。今後、マッハ数が  $M=3.8$  以下の種々の条件、特にサイレント超音速複葉翼機が対象とする  $M=1.7$  を中心に実験検証を進め、スターティングロードの大きさを高精度に推察する方法を確立し、六角天秤の高精度測定につなげる必要がある。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

\*[1] G. Yamada, S. Imagawa, K. Inoue, H. Kawazoe, and S. Obayashi: Improvement of a Sensitivity-Adjustable Three Component Force Balance and Its Application to Supersonic Wind Tunnel Testing, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol.9, No. 5, (2014), pp. 1-11.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[2] A. Miyazaki, T. Mizuguchi, G. Yamada, H. Kawazoe, and S. Obayashi: Aerodynamic Force Measurements in Supersonic Flow Conditions using a Sensitivity-Adjustable Three Component Force Balance, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 26-27.

#### 3) その他(特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J14067
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

**2波長マッハツェンダー干渉法によるプリカーサ現象の解明**  
**Analysis of Precursor Phenomena by Two-Wavelength Mach-Zehnder Interferometer**

川添 博光\*†, 大林 茂\*\*††  
山田 剛治\*, 丸山 隼平\*  
\*鳥取大学, \*\*東北大学流体科学研究所  
†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

大気突入飛行する宇宙機の周りで生じる熱化学的非平衡過程は、宇宙機の熱空力特性に大きな影響を与える。そのため熱化学的非平衡過程の解明は、大気突入飛行する宇宙機を開発するための重要研究課題となっている。著者らの一人は、これまで衝撃波管実験及び数値解析により熱化学的非平衡過程の解明に取り組んできた。その結果、電離が卓越する秒速 10km の衝撃波前方ではプリカーサ電子が生成され、衝撃波背後の熱化学的非平衡過程に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。しかしながら、プリカーサ電子の生成メカニズムについてはほとんどわかっていない。そこで現象を単純化するために、試験気体としてアルゴンを用いて衝撃波管実験を実施し、プリカーサ電子の生成メカニズムの解明に取り組んできた。その結果、アルゴン衝撃波前方で生成されるプリカーサ電子は、主に衝撃波背後の輻射光をエネルギー源とする光電離反応により生成されることが明らかになった。そこで、本研究ではプリカーサ電子が衝撃波背後の熱化学過程に与える影響を解明することを目的として、衝撃波背後の電離過程を調査した。

**2. 研究成果の内容**

本研究では、アルゴン中に生成した極超音速衝撃波背後の輻射光の分光計測を行った。衝撃波面から 30mm の位置で計測した発光スペクトルを図 1 に示す。CN Violet バンドの $\Delta v=0, -1$  のシーケンスが観測されているが、これは試験気体中に含まれる不純物に由来するものである。波長範囲 400~430nm 付近にはアルゴン原子スペクトルが観測されているのがわかる。また波長 486nm 付近には、水素原子のバルマー線が明瞭に観測されており他の化学種からの発光による影響が少ないのが分かる。本研究では、計測したバルマー線のシュタルク広がりを利用して電子密度を取得した。ここで他の要因によるスペクトル広がりと比較することにより、本実験条件においてはシュタルク広がり装置広がり支配的であることがわかった。そこで本研究では、装置広がり考慮して計測したバルマー線のシュタルク広がりを利用して、電子密度を取得した。図 2 に衝撃波背後の電子密度の空間分布特性を示す。図中の実線は、CFD による計算結果を示している。計測した電子密度のオーダーは  $10^{21} \text{ m}^{-3}$  であり、衝撃波面から離れるにつれて減少する傾向にあるのが分かる。一方で、電子密度の計算結果は実験値大きい値を示し、増加傾向にあることが分かる。これは今回行った CFD 解析では輻射輸送を考慮していないためであると考えられる。しかしながら輻射輸送を考慮していないにも関わらず、実験値と計算値の差異は一桁以内となっており、バルマー線による電子密度の評

値が妥当であることを示している。実験値で確認された電子密度の減少は、衝撃波背後の試験気体からの輻射エネルギー損失によるものであると考えられる。輻射エネルギー損失は、試験気体の温度あるいは密度の減少に対応しており、結果として電子密度の減少を生じさせる。申請者らが行った過去の研究から、アルゴン衝撃波前方のプリカーサ電子は衝撃波背後の輻射光をエネルギー源とする光電離反応により生成される。この結果として、衝撃波背後の輻射エネルギー損失が生じるものと考えられる。

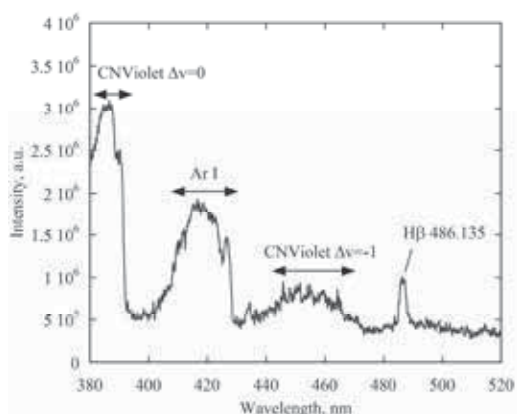


図1：衝撃波背後の発光スペクトル

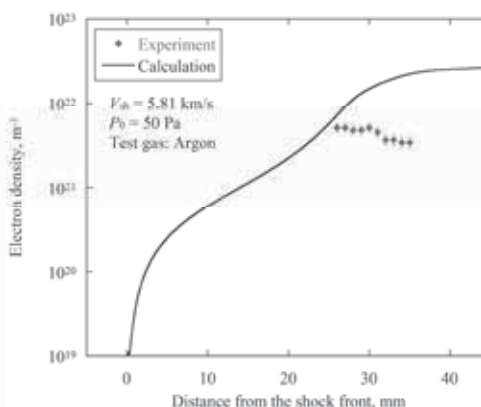


図2：衝撃波背後の電子密度分布特性

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は衝撃波背後の電離過程に着目して、水素原子のバルマー線により電子密度の空間分布特性を取得した。その結果、申請書の「予想される成果」に記載したプリカーサ電子の生成メカニズム及び衝撃波背後の熱化学過程に及ぼす影響の解明に必要な衝撃波背後の電子状態が取得できた。

### 4. まとめと今後の課題

本研究は、水素原子のバルマー線により衝撃波背後の電子密度の空間分布特性を取得した。この結果、衝撃波背後で生じる輻射エネルギー損失を取得して、衝撃波前方で生成されるプリカーサ電子のエネルギー源となることを明らかにした。今後は輻射エネルギー輸送を考慮したCFD解析を実施して現象解明を行っていく。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

\*[1] G. Yamada, S. Ago, H. Kawazoe and S. Obayashi: Generation Mechanism of Precursor Electrons ahead of a Hypersonic Shock Wave in Argon, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 9, No. 5, (2014), JFST0070.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[2] G. Yamada, S. Maruyama, H. Kawazoe and S. Obayashi: Electron Density Measurements behind a Hypersonic Shock Wave in Argon, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 24-25.

[3] 山田剛治, 丸山隼平, 川添博光: 極超音速アルゴン衝撃波背後の電子密度計測, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 長崎, (2014).

#### 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）なし

Project code	J14068
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	1st year (progressing)

## Cavity Formation Mechanism in a Cavitation Process

Takehiko Sato\*†, Mohamed Farhat\*\*††  
Outi Supponen\*\*, Kiyonobu Ohtani\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

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

### 2. Details of program implement

The experimental setup developed in this project is shown in Fig. 1. The bubble is generated by focusing a high-energy laser pulse of 7 ns and 150 mJ/pulse into ultrapure water in a cubic glass vessel with sides of 50mm. The collapse of the bubble was recorded by a high-speed camera at a maximum rate of 200 million of frames. A microscope lens with a maximum magnification of 500 is mounted on the camera.

Figure 2 shows the collapse of a bubble slightly elongated in the vertical direction. The collapse is not spherically symmetric. A first shock wave (SW) is emitted from the top of the bubble, on frame b), whereas a second is emitted 200 ns later, on frame c), on the lower half of the bubble. The collapse occurs sequentially, first the upper half, and then the other half. Figure 3 shows the collapse of a toroidal bubble. The single volume of the initial bubble breaks into several smaller volumes, visible on frame d). Each small volume then generates its own shock wave, resulting in an intricate pattern of shock waves. In both cases, the collapse does not occur exactly at the same time over the whole bubble. Some parts of the initial bubble reach their minimum volume before others which causes the bubble to break briefly into smaller volumes, each releasing its own shock wave. All the parts eventually coalesce back together to form the rebound bubble (coalescence is not shown on the figures here). At the last stage of the collapse, the bubble is not one single

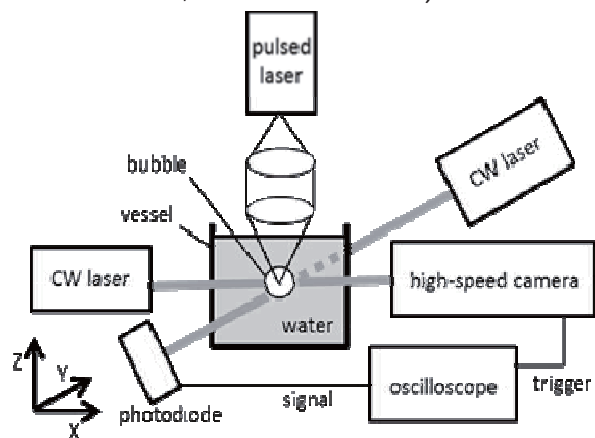


Fig. 1 Schematic of the experimental setup.

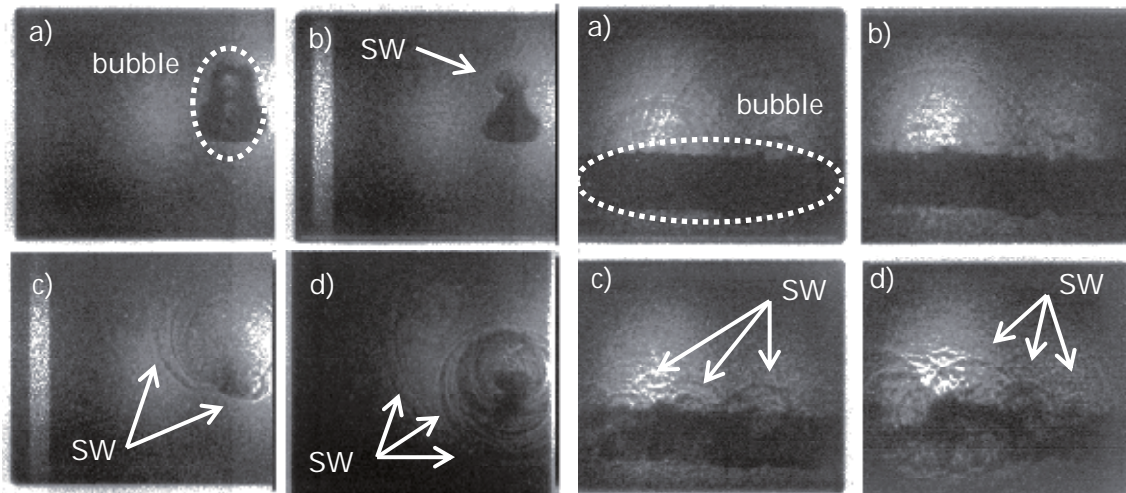


Fig. 2 Vertically elongated bubble: 5 million fps = 200 ns interframe time, 5 ns exposure, and 300x magnification. (Width of one image = 1.22 mm).

Fig. 3 Large toroidal bubble: 10 million fps = 100 ns interframe time, 5 ns exposure, and 300x magnification. (Width of one image = 1.22 mm)

volume of gas anymore. The compression of the gas inside the bubble is not homogeneous, which implies that the temperature and the pressure within each piece of the bubbles are not necessarily the same.

These observations help to understand the high erosive power of toroidal bubbles and clouds of microbubble. A surface located near those kinds of bubbles experiences multiple high pressure events at the collapse, spanned over nanoseconds, which might result in more damage than the effect of one single shock wave.

### 3. Achievements

We aimed at visualizing the last stage of the bubble collapse to clarify peculiar phenomena. The tasks for this aim have been sufficiently achieved because the visualization system was developed and succeeded in visualizing the process of the collapse of bubble.

### 4. Summaries and future plans

In this year, the visualization system was developed with nano-seconds temporal resolution using a specific trigger system for bubble collapse. It was shown that the bubble was not collapsed spherically. As it will be important to clarify the shape at the bubble collapse to know the phenomena in the compressed bubble because the phenomenon is still unclear, the detail of the collapse shape of the bubble will be investigated

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

\*[1] Marc Tinguely, Takehiko Sato, Kiyonobu Ohtani and Mohamed Farhat: Visualization of the Formation of Shock Waves at the Collapse of a Laser-induced Bubble, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2014)*, Sendai, (2014), pp. 108-109.

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

課題番号	J14069
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

**腸骨内の骨髓流れの数値流体モデルの構築**  
**Constructing CFD Model of Marrow Flow in an Ilium**

中山 敏男\*†, 太田 信\*\*††

\*鶴岡工業高等専門学校制御情報工学科, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

骨髓移植は白血病の有力な治療方法である。骨髓移植は健康なドナーの海綿骨の空隙内の骨髓中に存在する造血幹細胞を採取し、それを白血病の患者の静脈内に注入し移植する治療法である。骨髓採取では、1回の穿刺における骨髓液の吸引量に制限があり、吸引された骨髓液に含まれる造血幹細胞の数が少なく、骨髓移植に必要な量の造血幹細胞を得るまでドナーに対しておよそ50回から100回の穿刺が行われる。そのため、ドナーの肉体的・精神的負担が大きいことが問題である。そこで、本研究では骨髓採取時における骨髓採取用の針（穿刺針）周りの骨髓の流れについての知見を得ることを目的とする。

**2. 研究成果の内容**

数値流体力学（CFD）解析を用いることで海綿骨および海綿骨内の骨髓の流れについての知見を得る、そのために今回は海綿骨を多孔質媒体モデル（PM）でモデル化を行った。

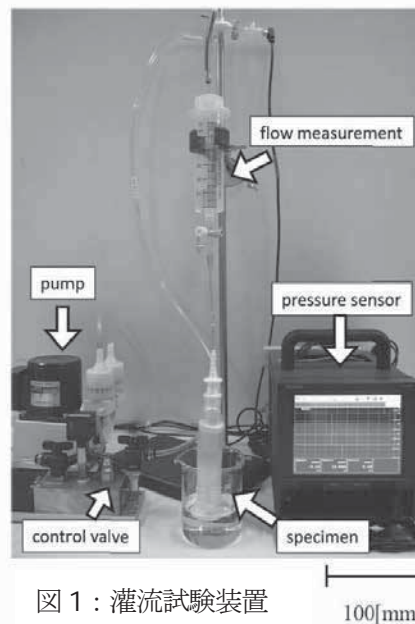


図1：灌流試験装置

多孔質媒体中を流れる流体は以下に示す Darcy の法則に従う。

$$\bar{v}_i = \frac{Q}{A} = \frac{k \Delta P}{\mu \Delta L}$$



ここで、 $i$ は流れの方向を表し、 $\bar{v}_i$ は Darcy 流速、 $Q$ は体積流量、 $A$ は多孔質媒体の流れ方向における断面積、 $k$ は浸透率、 $\mu$ は粘性係数、 $\Delta P$ は多孔質領域中を通る流体の圧力損失、 $\Delta L$ は多孔質媒体の厚みである。

この式において、海綿骨の圧力損失係数中の浸透率を求める必要があり、灌流試験より導出を行った。その実験装置を図 1 に示す。海綿骨はブタ腸骨の海綿骨を用いた。海綿骨試料作成にあたっては煮沸作業やアセトン及び KOH 水溶液への浸漬作業を行い骨内部のタンパク及び脂質を取り除き、海綿骨のみを抽出した。

### 3. 研究目標の達成状況

今年度の目標であったブタ腸骨内の骨髄流れの数値モデル構築のための実験装置作成を行い、多孔質媒体モデルを提案することが出来、目標を達成することができた。

図 2 は灌流試験による流速と単位長さ当たり圧力損失の関係を示す。この結果より、多孔質媒体中の流体の速度と単位長さ当たりの圧力損失は、原点を通る比例関係にあることがわかり、Darcy の法則を適用することが可能であることが判明した。また、(1)式より浸透率を導出したところ、ブタの海綿骨における値は $1.06 \times 10^{-10} [m^3]$ であった。

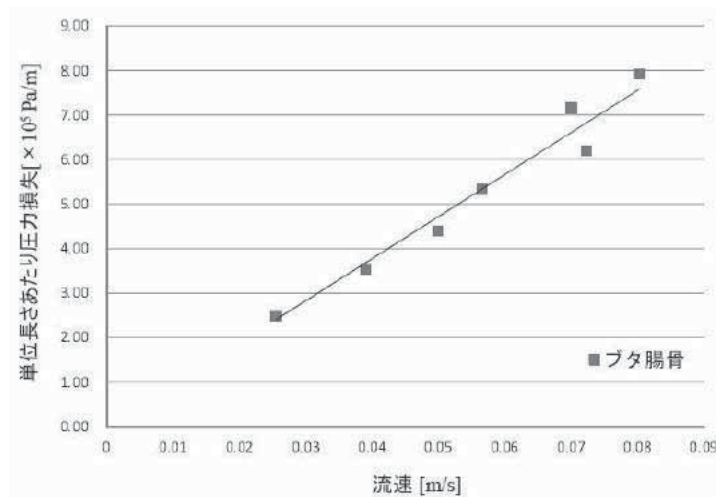


図 2：灌流試験による流速と単位長さ当たり圧力損失の関係

### 4. まとめと今後の課題

穿刺針周りの骨髄流れに関する知見を得るために、海綿骨の数値モデル化のための実験を行い、データ取得をした。このデータより多孔質媒体を用いて海綿骨を数値モデルとして表すことができた。

#### 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) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] W. Sakuma, T. Nakayama, H. Anzai, M. Ohta: A Comparison of Experimental and CFD Analyses for Permeability of Cancellous Bone, *1st International symposium for collaborative research between Tohoku University and Technische Universität Braunschweig*, Germany, (2014). (招待講演)

[2] 佐久間航, 太田信, 中山敏男, 中村修二, 佐渡克行, 高川浩和: 穿刺針周りの骨髄液流れの数値モデル化, 第 19 回計算工学講演会, (2014).

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J14072
区分	共同研究集会
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4~2015.3
継続年数	1年目(発展)

## 次世代高温センサ研究会 (フェーズ2)

Seminar for Next Generation Sensors for Super-High Temperature Environment (Phase 2)

内一 哲哉\*†, 坂本 敏昭\*\*††

三木 寛之\*\*\*, 高木 敏行\*, 青木 孝行\*\*\*\*, 井元 尚充\*\*\*\*\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

\*\*\*東北大学学際科学フロンティア研究所

\*\*\*\*日本保全学会, \*\*\*\*\*東北経済産業局

†申請者, ††所外対応研究者

### 1. 研究目的

本研究会では、高温での様々な物理量の計測を必要としている関係者と高温領域でのセンサのシーズを有する関係者が集い、各種産業において求められている500℃以上の高温環境に耐えるセンサの可能性と今後の開発の動向について議論する。シーズ側とニーズ側それぞれの立場から、より活発な議論を目指し、様々な産業において求められている500℃以上の高温に耐える温度センサ、電磁センサ、超音波センサ等のセンサについて調査する。これらの高温領域でのセンサに求められる機能とシーズ研究、実現した場合の産業上のインパクト、また、ノイズ除去、センサネットワークの観点からの情報処理、等についても議論する。

### 2. 研究成果の内容

平成26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

高温計測の損傷メカニズム解明における位置づけを議論し、高温環境センサによる新しい材料信頼性評価の方向について議論を行った。

日 時： 平成26年12月9日(火) 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：48名

講 演：

「非破壊材料信頼性評価の高温環境への展開」

志波 光晴 (独立行政法人物質・材料研究機構)

「マルチスケール解析による高温時間依存型破壊寿命予測法の構築のアルゴリズム」

横堀 壽光 (東北大学大学院工学研究科)

「C-Cの高温特性評価と今後の課題」

松嶋 正道 (宇宙航空研究開発機構 複合材技術研究センター)

「高温用電磁超音波探触子の開発と評価」

内一 哲哉 (東北大学流体科学研究所)

## (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 27 年 3 月 16 日 (月) 13 時 50 分 - 15 時 30 分

場 所： 沖縄県青年会館 (沖縄県那覇市久米 2-15-23)

参加者数： 34 名

講 演：

「固体電池開発における高温その場観察と情報処理技術の必要性」

佐藤一永、水崎純一郎、橋田俊之 (東北大学)

「新規ナトリウム循環施設への耐熱 FBG センサの実装とその先進的展開」

西村昭彦 ((独)日本原子力研究開発機構)

## 3. 研究目標の達成状況

第1フェーズの活動を通して明らかになった、高温環境センサが求められている産業分野に関する情報を参考に、シーズ側およびニーズ側の情報交換を通じて高温計測の位置づけ、技術開発の戦略について検討を行った。さらに、ニーズについての調査も継続して行い、ニーズとシーズの両者から課題を抽出した。

## 4. まとめと今後の課題

本研究会では、本年度を含め合計7回の研究会を開催してきた。毎回出席する研究者も多く、かつ学協会との連携による自立した研究会に移行できる見通しが得られている。また、日本非破壊検査協会誌の「非破壊検査」の第63巻(2014)の12号において、本研究会の活動を総括する特集号を刊行し、本研究の重要性を国内の研究者に向けて発信した。今後、非破壊検査協会等の研究会との連携を行い、高温計測に関する学術基盤の構築のための準備を行う。

## 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)

\*[1] 高木敏行, 庄司一夫, 和佐泰宏, 米津豊作, 富田健夫, 風岡学, 永井大樹, 町島祐一, 内一哲哉: 次世代高温環境センサの展望と産業応用, 日本非破壊検査協会誌「非破壊検査」, 63巻, 12号, (2014), pp. 604-611.

[2] 内一哲哉: 「高温環境における非破壊検査の現状と展望」特集号刊行にあたって, 日本非破壊検査協会誌「非破壊検査」, 63巻, 12号, (2014), p. 603.

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

該当なし

### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

[1] 次世代高温環境センサ平成26年度第1回研究会 講演概要集, 平成26年12月9日

[2] 次世代高温環境センサ平成26年度第2回研究会 講演概要集, 平成27年3月16日

課題番号	J14073
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	3年目

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

圓山 重直\*†, 小宮 敦樹\*, 岡島 淳之介\*, 山田 昇\*\*††

\*東北大学流体科学研究所, \*\*長岡技術科学大学工学部

†申請者, ††所外対応研究者

**1. 研究目的**

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

**2. 研究成果の内容**

本年度は、前年度に引き続き観測手法の検証に共同研究の力点を置き、独自のふく射観測ゾンデ技術の確立を目指し、JAXA 大気球実験のピギーバック搭載実験によるふく射観測ゾンデの測定系に関する信頼性検証を実施した。

JAXA 大気球実験の概要

ふく射観測ゾンデの早期実用化を目指し、従来手法との比較、高層でのセンサ表面への着氷の有無等を検証した。機器類が重くなるため通常の小型気球では実施困難であることから、JAXA の大気球（気球実験 B14-01）に搭載した。図 1 に実験装置の概要を示す。観測機器ゴンドラの側面にセンサユニットを取り付け、ゴンドラ内部の圧力容器に格納されたデータロガーとバッテリーにケーブル接続してある。センサユニットには、薄膜放射センサと従来型放射計を下向きに並列に設置し、ゴンドラ側からの放射を遮断するために高反射ミラーを背面に設置した。また、飛行中のセンサ面の様子を観察するためのデジタルカメラ（インターバル撮影）と温湿度センサも設置した。加えて、各部位における温度を熱電対、白金測温抵抗体で取得した。図 2 に示すように全センサの値を得ることに成功した。現在、詳細を解析中である。

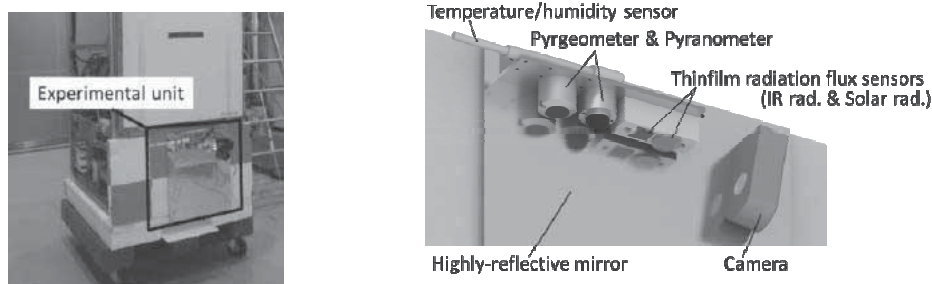


図1: 観測機器ゴンドラ側面に取り付けたセンサユニット(左)およびセンサユニット構成図(右)

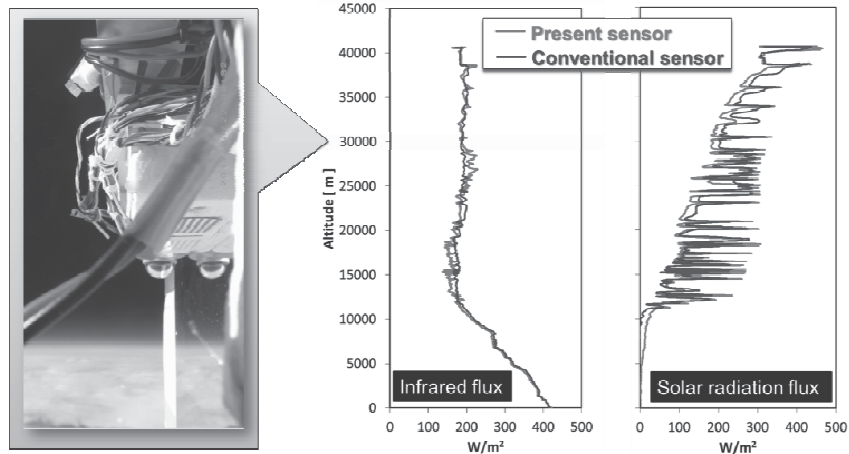


図2：B14-01ピギー実験結果：上空での写真（左），赤外放射（中），日射（右）

### 3. 研究目標の達成状況

メガスケール伝熱現象である都市温暖化および地球温暖化の精緻なシミュレーション・局所温度予測等を実現するためには、数値モデリング構築のための支援データを取得する信頼性が高く、且つ安価で高頻度の観測がおこなえる観測ツールが不可欠である。今年度の大気球実験では、開発したふく射観測ゾンデの測定系の信頼性検証を行う上で重要な成果が得られた。本研究成果により、研究目標の達成に向けて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、ふく射観測ゾンデの信頼性検証のための実験を完遂することができた。今回得られたデータを詳細に解析し、信頼性評価を行う予定である。加えて、雲粒子をカウントできる他機関の開発ゾンデとの共同観測も数回実施しており、雲過程のふく射エネルギー輸送の解明に向けた成果がまとまりつつある。

### 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] Noboru Yamada, Takahori Yoshida, Junnosuke Okajima, Shigenao Maruyama: Development of radiometer-sonde for flux measurement of solar and thermal radiation in Earth's Atmosphere, *Proceedings of the 14th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 66-67.

[2] 山田昇，吉田貴則，岡島淳之介：放射観測ラジオゾンデ用薄膜放射フラックスセンサーの検証(B14-01 ピギー)，JAXA 大気球シンポジウム，(2014)，isas14-sbs-034.

- 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J14074
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano micro technology
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

## Measurement of Diffusion Coefficient Through Artificial Micro and Nanopores

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

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

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

Quantitatively measure the mass diffusion field through diatom pores using phase-shifting interferometer equipment, the results will be supported by theoretical analysis. Biomimetic design based on these pores will help design low energy membranes for filtration.

### 2. Details of program implement

This research is being conducted using the interferometry setup developed by Prof. Komiya from Tohoku University. The phase-shifting interferometer will be used to measure the mass diffusion field through the diatom pores. These experimental results will be used to validate a computational model.

### 3. Achievements

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

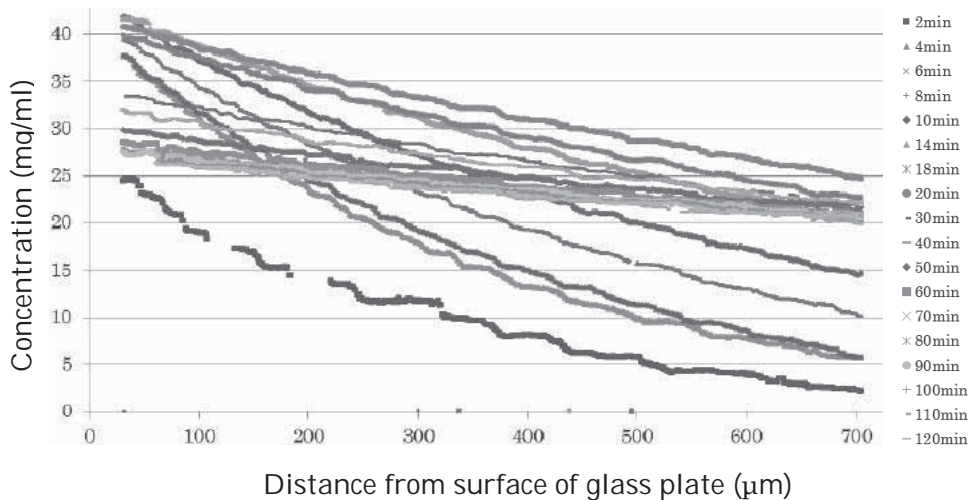


Figure 1: Concentration profile micrometers directly above the hole in the glass plate.

- Approval has been obtained from the OH&S department at RMIT University to allow safe use of the class 3B semi-conducting laser used in the interferometer setup.
- The PDMS gasket has been manufactured to minimize secondary diffusion through the gaps between the glass plate and the walls of the cuvette apparent from previous experiments (Fig. 2).

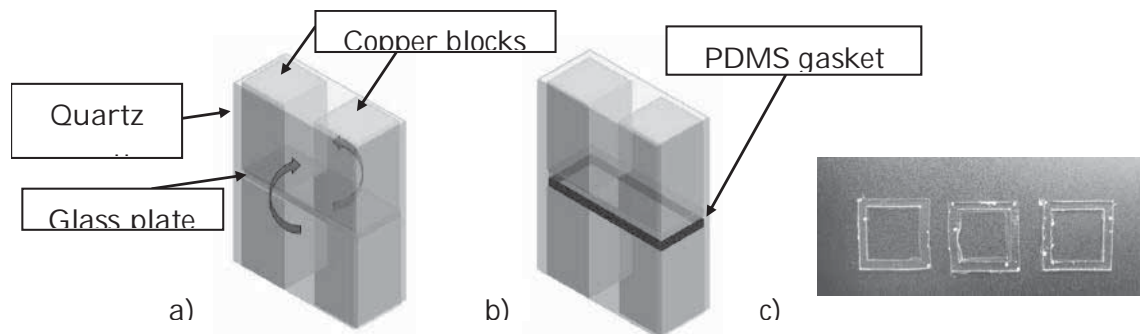


Figure 2: a) and b) Schematic of diffusion cuvette with and without the PDMS gasket, respectively, showing secondary diffusion (arrows) through the gaps between the glass plate and the quartz cuvette. c) Fabricated PDMS gaskets.

#### 4. Summaries and future plans

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

The interferometer equipment has now been successfully setup in labs at RMIT University (Australia).

The experimental plan is as follows:

- Conduct diatom/interferometry experiments 4× and 1× magnified field of view to determine the pseudo-diffusion coefficient as well as the detailed concentration gradient at smaller scales.
- Conduct measurements examining the effect of particle size and pore shape on the mass diffusion through the diatom membrane.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable.
  - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [1] Y. Song, J. Okajima, A. Komiya and S. Maruyama : Possibility of mass transfer control of protein by hindered diffusion, *Proceedings of 14<sup>th</sup> Student Conference of Tohoku branch of National Heat Transfer Society of Japan 2014*, Sendai, (2014), pp.11-12.
- 3) Patent, award, press release etc.
    - (Patent)  
Not applicable.
    - (Award)  
Not applicable.
    - (Press release)  
Not applicable.

課題番号	J14075
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4~2015.3
継続年数	3年目

### ナノ構造化表面・液体間の熱抵抗

#### Thermal Resistance Between Nano-Structured Surfaces and Liquids

小原 拓\*†, 芝原 正彦\*\*††, 菊川 豪太\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*大阪大学大学院工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

## 1. 研究目的

固液界面における輸送現象, とりわけ, 熱エネルギーが界面を通過する特性は, MEMS/NEMS, 微粒子が懸濁された液体, 生体内の構造など, ナノスケールの液体-固体系が示す特性を理解し設計するための重要な問題である. 従来のマクロな熱流体力学においては, 界面における熱輸送特性を理解するための概念として, 界面における温度ジャンプと熱流束との比として与えられる熱抵抗が広く用いられてきた. この場合は, 固体-固体界面とは異なり, 固体-液体間で何らかの熱輸送メカニズムにミスマッチを生じることが因子となると考えられているが, その分子動力学レベルのメカニズムは未だ詳細な検討が行われていない. 本研究においては, ナノスケールの構造をもつ固体壁表面-液体間の熱エネルギー輸送を解析するため, (1)ナノメートルスケールの構造をもつ界面, (2)分子スケール=結晶格子スケールの構造をもつ界面, の両面からこの問題にアプローチを試みた. (1)では, ナノ加工による溝構造とその高さが界面近傍の熱抵抗およびエネルギー輸送機構に及ぼす影響を調べるために, 非平衡分子動力学シミュレーション (NEMD) を用いて, 界面近傍のエネルギー伝搬の機構を調べた. (2)では, 分子スケールの輸送現象が応用上重要な系として, SiO<sub>2</sub>の各種結晶面がシラノール基 (-OH) で末端修飾され親水性を示している表面と直鎖アルカン液体との界面を解析対象に選択し, 界面近傍における液体構造を観察すると共に, 熱伝導の NEMD により固液界面における界面熱抵抗を解析した.

## 2. 研究成果の内容

(1)ナノ構造化界面 液体分子, 壁面および構造物の構成原子には, それぞれ水分子, 鉄原子の質量を有する 12-6 Lennard-Jones 粒子を仮定し, 平行に配置された固体層で液体領域を挟んだ計算モデルを用いた. 本モデルに対して液体領域をほぼ一定圧力に保つ条件を課して, 表面に付着するスリット構造の高さ  $h$ , 固液間相互作用強さ  $\alpha$  が固液界面熱抵抗に与える影響を調べた. 計算結果の一例を図 1 に示す. ここで,  $h=0$  は原子スケールまで平らな平面を示し, 固液間相互作用強さ  $\alpha$  は壁面および構造の構成原子と液体分子間ポテンシャルのエネルギーパラメータを無次元化した値である. 図 1

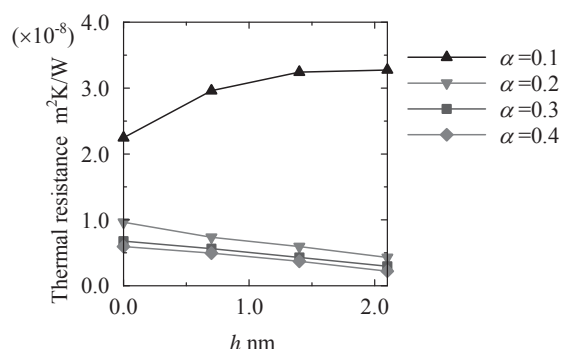


図 1: 一定圧力下におけるナノ構造高さ  $h$  と固液界面熱抵抗の関係



より、表面ナノ構造高さ  $h$  が 0 から 2 nm の範囲で変化すると、固液間相互作用強さ  $\alpha$  が大きい親水性ナノ構造が付着する界面においては、固液界面熱抵抗は減少するが、 $\alpha$  が小さい撥水性ナノ構造が付着する界面では、固液界面熱抵抗が増加することが分かった。また、表面ナノ構造高さ  $h$  の増加に対して、固液界面熱抵抗が減少する場合と増加する場合では、固液界面領域における分子間エネルギー輸送機構が定性的に異なることを示した。

(2) 結晶格子界面  $\alpha$ -quartz 構造の(001), (011), (100)の各結晶面がシラン基で末端修飾された表面と直鎖デカンの液体との間の固液界面を再現する分子動力学計算系を構築し、界面に垂直な熱流束を印加して熱輸送特性を解析した。図2に固液界面近傍の液体デカンが示す局所的な熱伝導率を示す。固液界面において熱伝導率が振動的な変化を示すことを見出した初めての報告である。この振動は、固体表面に液体デカン分子が吸着する構造に起因したものであるが、この局所熱伝導率と局所的な密度との相関は、バルク液体においてデカンが示す熱伝導率の密度依存性とは異なったものとなっている。また、固体壁面の結晶面によっても異なる特性を示し、熱エネルギーの伝搬が複雑なメカニズムによって行われていることを示している。

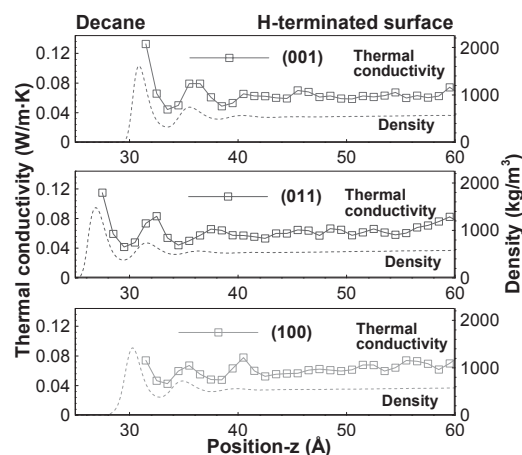


図2: SiO<sub>2</sub> 固体壁に接する液体デカンの熱伝導率。

### 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た。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て、研究に一つの区切りをつけた。

### 4. まとめと今後の課題

今後は、固体表面構造と固液界面領域の熱抵抗の相関やスケールの変化に伴う支配メカニズムの変移についてさらに研究を継続したい。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] R. Toda, Y. Ueki, M. Shibahara and T. Ohara: Molecular dynamics study on the influences of nanostructure on the thermal energy transport at a liquid-solid interface, *Proc. 25th Int. Symp. Transport Phenomena*, (2014), Flash Memory.
- [2] M. Shibahara, R. Toda, S. Murakami and T. Ohara: Molecular dynamics study on influences of surface structural characteristics on thermal energy transfer over liquid-solid interfaces, *Proc. 15th Int. Heat Transfer Conf.*, (2014), Flash Memory.
- \*[3] Hari Krishna Chikukoti, G. Kikugawa, M. Shibahara and T. Ohara: Investigation of thermal resistance and heat conduction at  $\alpha$ -quartz-liquid alkane interfaces using nonequilibrium molecular dynamics simulations, *Proc. 15th Int. Heat Transfer Conf.*, (2014), Flash Memory.
- [4] Hari Krishna Chikukoti, Gota Kikugawa and Taku Ohara: Structure and transport properties of liquid alkanes in the vicinity of  $\alpha$ -quartz surfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 79, pp. 846-857.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[5] M. Shibahara, T. Ohara and G. Kikugawa: Thermal resistance between nano-structured surfaces and liquids, *Proc. 14th Int. Symp. Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 134-135.
- [6] 戸田亮平, 芝原正彦, 小原拓, 微細構造が固液界面エネルギー輸送機構に及ぼす影響に関する分子動力学的研究, 第51回日本伝熱シンポジウム, 浜松, 2014年5月.
- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J14076
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	2014.4~2015.3
継続年数	2年目

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

李鹿 輝\*†, 中野 政身\*\*††

\*山形大学大学院理工学研究科, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

流れに関連した振動現象は身の回りに多く存在する。例えば、航空機の翼のフラッタや旗のはためき、キャビテーション等である。定常流での振動は自励振動系の作用で流れと振動が作用し、成長するものが主体である。非定常流では流れの乱れが構造物を振動させる強制振動の類である。これには乱流拡散効果があり、これを応用することで異なる気体同士や固気及び気液 2 層流を効果的に拡散できる。例えば、ジェット噴流の拡散や粉粒体空気輸送における被輸送物の浮遊助長による省エネルギー化に応用が検討されている。本研究の目的は空気流での柔らかいフィンの振動特性とフィンの振動による後流の乱れの関連を、柔らかいフィンの振動観察とフィンの後流の PIV により調べることである。

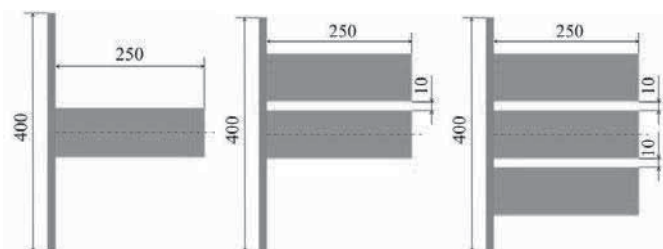
**2. 研究成果の内容**

**(1) 実験装置及び方法**

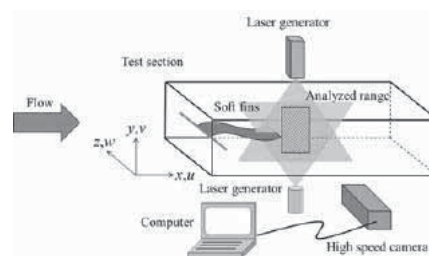
本実験は回流型風洞を用いて、フィンの振動観察及び後流の可視化を行う。Fig.1 に実験モデルを示す。フィンの概要は、枚数：1~3, 代表長さ L：250 mm, 幅 W：50, 60, 70 mm, 厚さ h：0.15 mm, 密度  $\rho$ ：1390 kg/m<sup>3</sup>, 材質：PET である

Fig.2 に風洞の測定部の概要と座標軸を示す。柔らかいフィンの振動観察の方法は次の通りである。①中央のフィンに上から流れ方向に広がるレーザシートを照射する。②流れの中でのフィンの挙動を側面から高速カメラで撮影する。③コンピュータで取得した画像データを低速再生し、中央のフィンの全振幅をスケールで、振動数と波形を目視で調べる。

フィンの振動観察時の実験条件は、平均主流速度 1.7, 2.4, 3.0, 3.7, 4.3 m/s, レイノルズ数 2.76, 3.91, 4.88, 6.02, 7.00 ( $\times 10^4$ )。次にフィンの後流の可視化時の実験条件は、平均主流速度 3.0, レイノルズ数  $4.88 \times 10^4$ , フレーム数 3000 fps, 露光時間 1/3000 s, 測定時間 1 s, 解像度 512 $\times$ 512 pixel である。



**Fig.1 Soft fins**



**Fig.2 Coordinate of test section in wind tunnel**

## (2)実験結果及び考察

Fig.3 (a)にフィンの上振れ, (b)に下振れするときの後流の無次元渦度を示す. 渦度の強い部分を境に速度ベクトルが変化している. すなわち, フィンの振動により渦度が発生し流れを乱している. Fig.3 に無次元レイノルズ応力を示す. Fig.3 (b)~(i)より, フィンの枚数の増加に伴い の絶対値が大きい領域が  $y/L = 0.1$  以上に拡大及び遷移する. 同様にフィンの幅の増加に伴いの絶対値が増大する. これらの結果は, フィンの幅及び枚数の増加に伴うストローハル数 (振動数) 及び平均全振幅の増大と一致する. すなわち, フィンのストローハル数 (振動数) 及び全振幅の増大は流れに乱れを誘発する. 次の絶対値は解析領域の  $y/L = 0$  付近では比較的に小さく, その上下では比較的に大きい. 初期条件として  $x$  方向 (主流方向) の速度しかもたない定常流の流れ場において, レイノルズ応力の絶対値が増大することは  $y$  方向の速度成分 (速度変動を含む) が発生しているということである. これは, フィンの上振れ下振れによって上辺下辺付近の流れは縮小と拡大を繰り返す, 速度変動が増大するからと考えられる, フィンが 3 枚のときにその傾向が顕著になり, 逆に 1 枚のフィンの場合は中心付近で小規模な縮小や拡大を繰り返す為, 中心付近で若干の乱れが生じる.

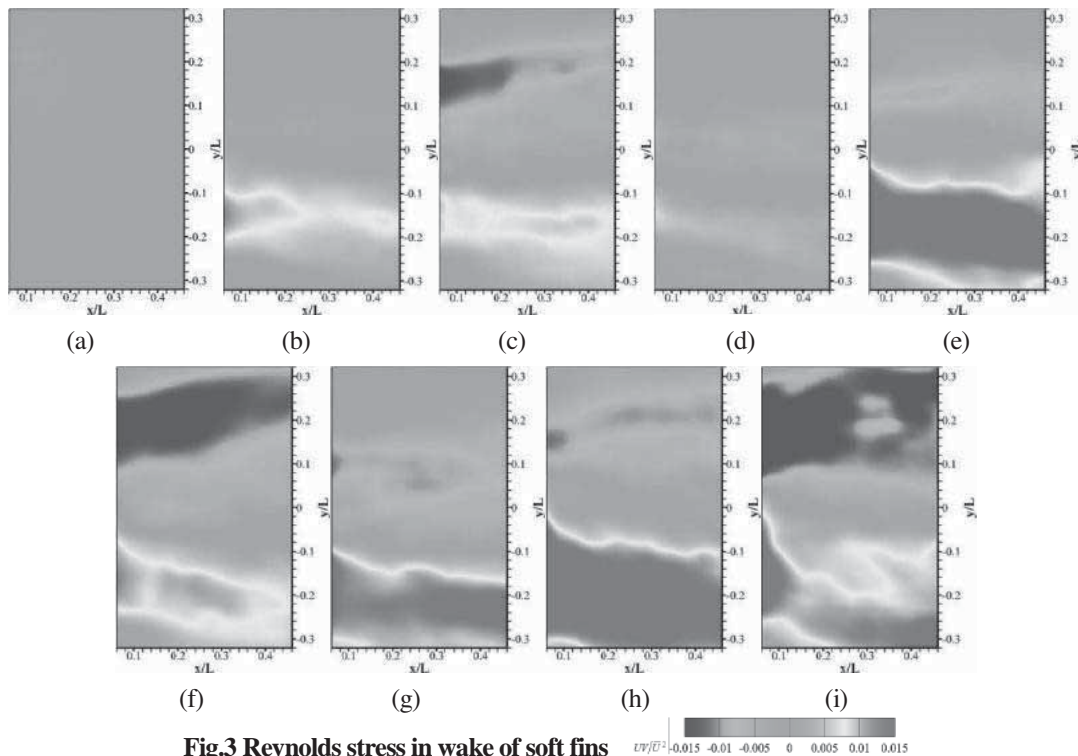


Fig.3 Reynolds stress in wake of soft fins

### 3. 研究目標の達成状況

柔らかいフィンの枚数及び幅の増加は, 柔らかいフィンのストローハル数及び平均全振幅を増大させ, 流れに乱れを誘発することがわかった.

### 4. まとめと今後の課題

柔いフィンの励起振動により発生した流れ場を PIV で計測し, フィンの形状と後流乱れ強さとの関係を明らかにした. しかし, 柔いフィンの周期的振動発生条件はまだ十分には解明されていない. フィンのフラッピング振動挙動と流れの構造との相互関係を実験計測で明らかにすることは今後の課題となる.

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

- \*[1] A. Rinoshika, Shunya Suzuki and M. Nakano: Measurement on wake flow induced by soft fins' vibration, *Proceedings of the Fourteen International Symposium on Advanced Flow Information*, Sendai, (2014), pp. 156-157.

課題番号	J14077
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

自然環境中の大規模非定常高速流体現象の定量的可視化計測法  
Quantitative Visualization of Unsteady High-Speed Fluid Phenomena in Nature

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

## 1. 研究目的

非定常高速流体現象研究では、光学的流れの可視化計測法は、研究手法として確立したものであり、定量・定性を問わず、様々な可視化計測法が提案され、実用化されてきた。一方、実験室を一步出た自然環境下では、流れ場の状態量を定量的に比較的容易に取得できる可視化計測法は実用化されていない。これは、実験室内と比較し、自然環境下では、制御不能な外的擾乱が多く、実験室内と同等の光学的に静粛な環境を担保できないことが大きな理由である。衝撃波現象など非定常高速流体現象を3次元かつ定量的に可視化計測が提案できれば、航空宇宙機開発など応用空気力学分野にとって有益な情報をもたらすことが可能である。たとえば、実機飛行条件での機体まわりの流れ場の直接計測が可能となる。これは、実飛行状態での翼面での離現象、機体と搭載物間での衝撃波干渉、大気中を広範囲に瞬時に伝播するソニックブームの地表付近の挙動の直接計測が可能となり、今まで培われてきた数値解析法や多点計測法と併用することで、測定精度・確度の向上、ならび流れ場全体の把握が容易になる。

本研究では、野外における大規模衝撃波現象の定量的可視化計測法の確立をめざし、背景型シュリーレン法 (Background-Oriented Schlieren, 以下, BOS) に着眼した自然環境下で容易に利用可能な光学的流れの可視化計測法の基礎研究を進めている。

本年度の研究では、微小爆発によって発生した衝撃波を利用して、視野中心から辺縁部に至る計測精度を評価した。自然環境下ではBOS計測に非テレセントリック光学系(計測に平行光束を用いない光学系)の利用が適用範囲も広く、利便性も高い。一方、BOSでは、注目現象による屈折率分布変化でおきる背景移動量が計測対象であるため、非テレセントリック光学系では、背景移動量が現象を見込む角度に影響を受ける。高精度の定量計測の実現には、視野角を関数とした評価関数の取得が不可欠である。

## 2. 研究成果の内容

テレセントリック光学系および非テレセントリック光学系の配置において、微小爆薬(アジ化銀 10 mg)による球状衝撃波のBOS計測を行った。アジ化銀は空中に固定し、レーザーで起爆した。光学系配置によって決定されるBOS法の感度  $e=ZB/ZD$  は、それぞれ約0.33である。ここで、ZBは、結像レンズから背景までの距離、ZDは測定対象(起爆位置)から背景までの距離である。テレセントリック光学系の集光系には大型凹面鏡(直径1.0 m, 焦点距離8 m)を用いた。撮影には高速度カメラ(Vision Research Phantom, v2511)を使用し、光源には可視化用インコヒーレントレーザー(Cavitar Ltd., CAVILUX Smart)を用いた。撮影フレームレートは25,600 fps, 有効画素数は1280×800 pix.である。露光時間は可視化レーザーのパルス幅で制御し、0.1 μsとした。背景模様

はランダムドット模様（ドットサイズは2ピクセル，密度20%）とした．実験では平行光束を使用するテレセントリック光学系で得られたズレ量と非テレセントリック光学系の誤差を評価した．

テレセントリック光学系および非テレセントリック光学系で取得した実験画像から背景模様移動量絶対値を色表示したところ，次に示す個結果を得た．；アジ化銀は爆発生成物を発生させるために爆点近傍にはノイズが見られ，移動量グラフからも爆点近傍ではノイズの発生が確認された．テレセントリック光学系の場合，非テレセントリック光学系よりも背景模様移動量が大きく取得されていることがわかる．具体的には，爆点から45°方向に約80 pix.位置では，非テレセントリック光学系は移動量が80%小さいことがわかった．同様に約150 pix.位置では55%，約230 pix.位置では27.2%，約380 pix.位置では37.5%小さいという結果が得られた．可視化画像から衝撃波面には移動量が均一でないことが確認でき，その影響により約230 pix.位置のみ大きく差異が生じた．これらの結果から，視野中心と辺縁部における背景移動量比較したところ，非テレセントリック光学系による市や中心部との移動量計測誤差は予測値の範囲に収まることとがわかった．

### 3. 研究目標の達成状況

本研究の目標は，非テレセントリック光学系による背景型シュリーレン法における視野辺縁部での計測誤差を評価するものである．球状衝撃波をテレセントリック光学系と非テレセントリック光学系双方で計測し，その結果から視野辺縁部での計測誤差を評価できたことから，研究目的が達成されたと考える．

### 4. まとめと今後の課題

測定部に平行光束を形成するテレセントリック光学系に対する非テレセントリック光学系を利用した背景型シュリーレン法（BOS）における視野辺縁部での誤差が，幾何学的な関係から導かれる予測式で評価可能であることを実験で示した．このことは，自然環境下での大規模流体現象の定量的可視化計測にBOSを適用した際にも同様と考える．

今後の課題として，解析精度と背景模様の空間周波数との関連を系統的に解明する必要があることがあげられる．

### 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 Unsteady High-speed Fluid Phenomena in Nature Environment, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 160-161.

\*[2] 清水泰順，末木未来，水書稔治，大谷清伸，大林茂: 背景型シュリーレン法における大視野角計測での誤差評価，平成26年度衝撃波シンポジウム，伊香保，群馬，(2015)，論文番号 P-18.

#### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J14078
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	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	2年目

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

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

**1. 研究目的**

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

**2. 研究成果の内容**

低レイノルズ数流れに対する数値解析手法の有効性を検討するため, 比較検証に用いる低レイノルズ数流れにおける水槽における実験方法の開発とデータの取得, また直交格子法に基づく CFD 解析手法の開発を行った。数値解析では, Building-Cube 法の計算精度向上及び並列化手法の構築を進めた。本年度対象とした折り曲げ薄翼に対し, 2次元解析を実施して層流での空力性能の解析を行い, 空力性能値を比較し妥当性の検証を行った。迎角の低い領域においては実験値と CFD の結果がよく一致していることが図 1 より確認できるが, 高迎角時の不一致を今後検討する必要がある。また, 図 2 に示すように折り曲げ部における複雑な流れ場を可視化することで, 直交格子法に基づく CFD 解析手法が有効であることが示された。

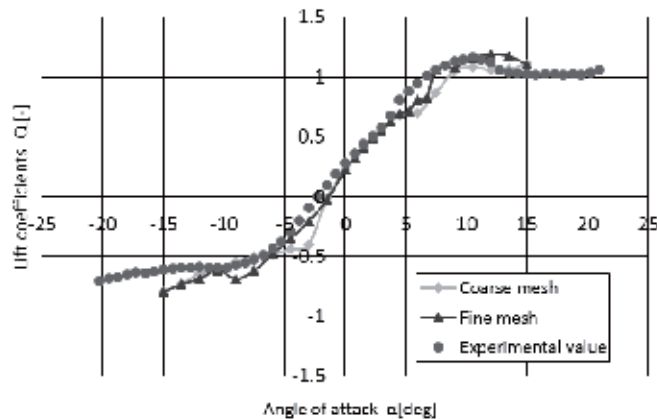


図 1 : 折り曲げ薄翼の揚力係数分布

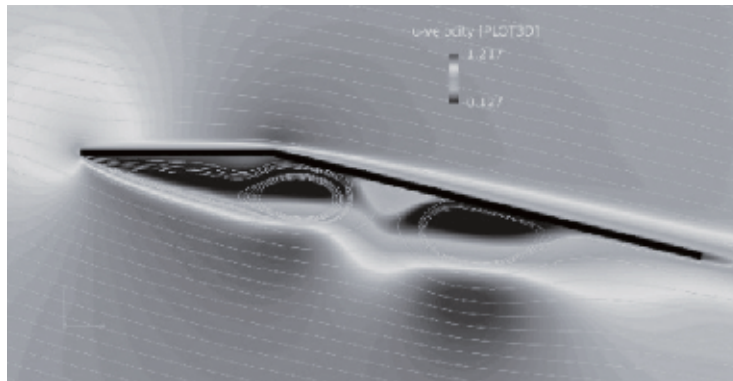


図2：折り曲げ薄翼における迎角-3度での主流方向流速分布及び流線

### 3. 研究目標の達成状況

剥離を伴う複雑な流れ場である低レイノルズ数での空力解析手法の構築を目的として、低レイノルズ数での水槽実験装置を構築し各種翼型のデータ取得を行った。高次精度 CFD の開発を行い、層流での折り曲げ薄翼の2次元解析を行い、低迎角において実験値との良い一致を確認できた。折り曲げ薄翼における複雑な流れ場の可視化結果より、本計算手法の有効性を明らかにすることができたことから、当初の目標を十分に達成できたと考えられる。ただし、高迎角時の解析や3次元における解析結果との比較等、更なる検証を進めることで小型航空機の空力性能向上につながる解析手法を確立できる。

### 4. まとめと今後の課題

空力性能の向上が求められる小型航空機の空力解析を行うために、低レイノルズ数における CFD の開発及び検証用実験データの作成を行った。その結果、折り曲げ薄翼に対する2次元層流解析の結果、低迎角での実験値との良い一致を確認できた。今後、3次元流体解析による比較等の検証をさらに進めると共に、他の翼型形状での妥当性検証を行うことで、低レイノルズ数翼に対する精度良い空力解析が可能となる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] D. Sasaki, and K. Nakahashi: Rapid Large-scale Cartesian Meshing for Aerodynamic Computations, *International Congress on Aeronautical Sciences, ICAS2014-2.7.2*, St. Petersburg, (2014).

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[2] Y. Kojima, D. Sasaki, T. Akasaka, M. Okamoto, K. Komatsu, S. Obayashi and K. Shimoyama: Low Reynolds Number Flow Analysis of Flat Plate, *Proc. of Fourteenth Int. Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 4-5.
- [3] K. Ebina, M. Okamoto: Aerodynamic Forces Measurements of a Corrugated Thin Airfoil at Very Low Reynolds Number, *Proc. of Eleventh Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2014).
- [4] Y. Takata, M. Okamoto: Aerodynamic force oscillation of the wing with leading-edge flap at low Reynolds number, *Proc. of Eleventh Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2014).
- \*[5] 飯岡大樹, 児島有哉, 佐々木大輔: 低レイノルズ数流れにおける折り曲げ薄翼の二次元流体解析, 日本機械学会北陸信越支部第44回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, (2015).
- [6] 栗下昂仁, 佐々木大輔: 製作誤差を考慮した人力飛行機用翼型のロバスト空力最適化, 日本機械学会北陸信越支部第52期総会・講演会論文集, (2015).

Project code	J14079
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

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

Shigenao Maruyama\*†, Subhash C. Mishra\*\*††, Kobari Tatsuya\*,

Atsuki Komiya\*, Junnosuke Okajima\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Indian Institute of Technology Guwahati

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

The project is aimed at numerical analysis of combined mode conduction and radiation heat transfer in complex materials. Towards this end, numerical analysis of dual-phase lag heat conduction in a long cylindrical medium using the lattice Boltzmann method has been done.

### 2. Details of program implement

With  $T$  as the temperature,  $k$  as thermal conductivity,  $q$  as the heat flux,  $t$  as the time and  $r$  as the radial coordinate,  $\tau_q$  as the phase lag of the heat flux and  $\tau_T$  as the phase lag of temperature gradient, the dual-phase-lag (DPL) heat conduction model in an infinitely long cylinder is given by

$$\tau_q \frac{\partial q(r,t)}{\partial t} + q(r,t) = -k \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} - k\tau_T \frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial t \partial r} \quad (1)$$

In the absence of convection and volumetric radiation, the governing equation pertaining to heat transfer in 1-D cylindrical geometry is given by

$$\rho c \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(r,t)}{\partial r} + \frac{1}{r} q(r,t) = 0 \quad (2)$$

where  $\rho$  the density and  $c$  is the specific heat. Substituting Eq. (1) into Eq. (2) leads to the DPL heat conduction equation with constant thermal properties as

$$\frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \frac{\partial T}{\partial r} + \tau_T \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \tau_q \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

where  $\alpha$  is the thermal diffusivity and is defined as  $\alpha = k / \rho c$ .

In the LBM formulation, the governing equation corresponds to Eq. (3) is given by

$$f_i(\eta + e_i \Delta \zeta, \zeta + \Delta \zeta) = f_i(\eta, \zeta) - \left[ \frac{\Delta \zeta}{\tau} + B \right] \left[ f_i(\eta, \zeta) - f_i^{eq}(\eta, \zeta) \right] - \frac{\Delta \zeta}{2} \left[ \frac{ny\psi_i}{2r_i} + 4ye_i\psi_i + B \right] \quad (4)$$

where  $f_i$  is the particle distribution function,  $f_i^{eq}$  is equilibrium particle distribution function and  $B$  is the phase lag ratio.



### 3. Achievements

For a concentric cylinder ( $R_2 = 2R_1$ ) which is initially at uniform temperature, the temperature distributions  $\Theta$  in the radial direction  $\eta = \frac{R - R_1}{R_2 - R_1}$  at

different time levels  $\zeta$  are shown in Fig.2 for lag ratio  $B=0.01$  when the inner surface of the cylinder is raised to scaled non-dimensional temperature  $\Theta(0, \zeta) = 1.0$ .

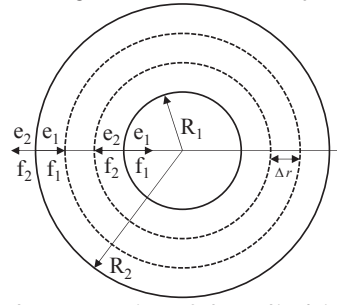


Fig. 1: Radial cross section of the cylindrical geometry.

Non-dimensional temperature  $\Theta$  distributions for lag ratio  $B = 0.0$  have been validated in Fig. 2b for lag-ratio 0.0 against the results reported in S.C. Mishra and H. Sahai, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 7015-7023, 2012.

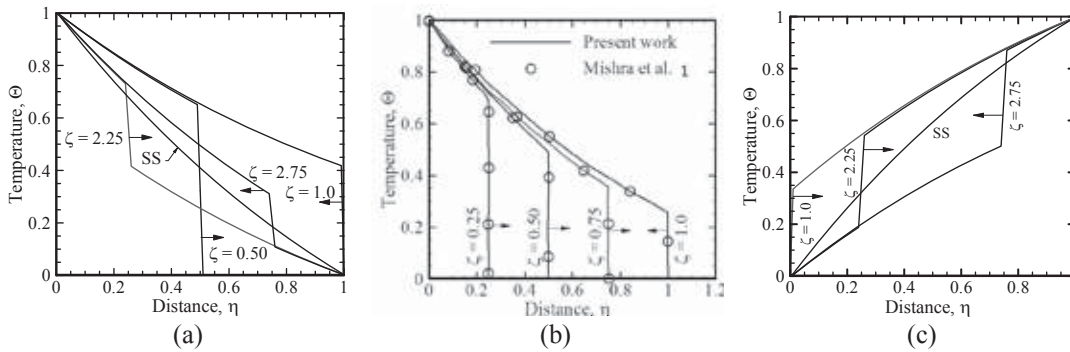


Fig. 2. (a) Comparison of temporal temperature  $\Theta$  distribution in the medium at different time levels for lag ratio 0.01, (b) Validation of temporal temperature  $\Theta$  distribution in the medium at different time levels for lag ratio 0.0 and (c) Comparison of temporal temperature  $\Theta$  distribution in the medium at different time levels for lag ratio 0.01.

### 4. Summaries and future plans

A general formulation of the LBM to analyze DPL heat conduction in 1-D cylindrical geometry was provided. It was observed that for phase lag ratio 0.0, the DPL problem transformed into a single-phase-lag problem. Evolution of the thermal wave fronts at different time levels including the steady-state were studied when either the inner or the outer boundaries were thermally perturbed. LBM results for DPL with phase lag ratio 0.0 were in good agreement with those available in the literature.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
  - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- \*[1] R.K. Chaurasia, S.C. Mishra, J. Okajima and S. Maruyama: Numerical analysis of dual-phase lag conduction in a long cylindrical medium using lattice Boltzmann method, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 40-41.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J14080
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2014~ March 2015
Project status	3rd year

### Measurement of Radiative Properties of Controlled Film

Shigenao Maruyama\*†, Rodolphe Vaillon\*\*††, Pierre-Olivier Chapuis\*\*, Hiroki Gonome\*\*\*, Yoichiro Tsurimaki\*\*\*, Atsuki Komiya\*, Junnosuke Okajima\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

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

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

†Applicant, ††non-IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

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

In the transition regime between the far field to the near field regimes, these two effects on the radiative heat flux are on the same order of magnitude. In addition, these effects depend on the distance, the materials and their temperatures. Thus, it is expected that a decrease of the radiative heat flux would occur by manipulating the experimental conditions.

The aim of the project is to experimentally measure the reduction of the radiative heat flux due to interferences of thermal radiation. For that purpose, we developed an experimental device to measure the radiative heat flux between two metallic surfaces.

#### 2. Details of program implemented

In previous works, we have shown by means of numerical calculations that the reduction of thermally-radiated propagative waves is greater in the case of metallic surfaces. The aim of the experiment is to measure the radiative heat flux between two macroscopic metallic surfaces separated by a vacuum gap in the transition regime. Aluminum surfaces with diameter of 5 cm at ambient temperature are considered as material surfaces and temperatures. The transition regime appears at distances on the order of 10  $\mu\text{m}$ . In the development of the measurement system, two difficulties have to be overcome. First of all, the exchanged heat flux is expected to be small for metallic surfaces. In fact, the minimum radiative heat transfer coefficient at 300 K is expected to be  $6 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Second, the required parallelism between the two surfaces is the pivotal condition so that a reduction of radiative heat flux due to interferences is to be detected accurately.

Figure 1 (a) shows a schematic of the developed measurement system. The measurement device employs the Guarded Hot Plate (GHP) method to precisely measure the small net radiative heat flux. A Peltier module is located between the main and guard plates and acts as temperature sensor between them, also enabling to reduce heat losses. As for the distance control, a kinematic alignment stage allows the GHP

device and the plate at bottom to move up and down. The parallelism is controlled by manipulating three piezo-actuators independently. The distance and parallelism between the two surfaces are monitored by three capacitance sensors attached at the upper structure of the device as shown in Fig. 1.

Figure 1 (b) shows the measured effective thermal conductivity of Styrofoam as a function of the average temperature of the specimen. The inset is the temperature difference between the main and guard plates. The temperature difference between the main and the guard plates is found within  $\pm 50 \mu\text{K}$  at steady state. Therefore, thermal conductivity of Styrofoam was precisely measured. The error bars indicate the standard error.

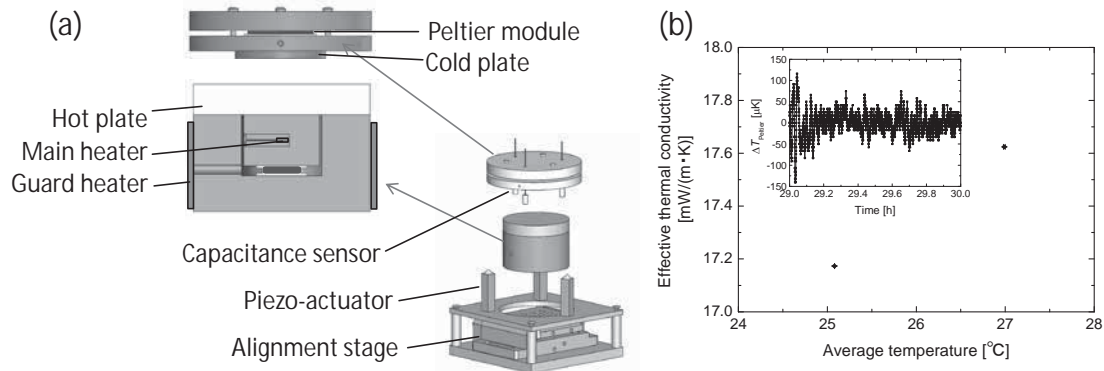


Fig.1 (a) Schematic of the measurement system and (b) Effective thermal conductivity of Styrofoam at ambient pressure with the inset showing the temperature difference between the surfaces of Peltier module

### 3. Achievements

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

### 4. Summaries and future plans

The measurement system for the radiative heat flux between two parallel plates was developed. As preliminary experiment, effective thermal conductivity of insulating material was successfully measured. Measurement of radiative heat flux between two blackbodies is currently conducted and the measurement between two metallic surfaces will be performed subsequently.

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

- [1] J. Mayo, Y. Tsurimaki, P-O. Chapuis, J. Okajima, A. Komiya, S. Maruyama, A. Narayanaswamy, and R. Vaillon: Thermal radiation between two plates: regime map and analytical expressions for the net radiative heat flux from far to near field, *Eurotherm 103: Nanoscale and Microscale Heat Transfer IV*, Lyon, October, (2014).
- \*[2] Y. Tsurimaki, P-O. Chapuis, R. Vaillon, J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama: Reducing thermal radiation between parallel plates in the far-to-near field transition regime, *15<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer*, IHTC15–9188, Kyoto, August, (2014).
- [3] Y. Tsurimaki, P-O. Chapuis, R. Vaillon, J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama: Radiative heat transfer between two semi-infinite parallel plates in the far-to-near field transition regime, *2<sup>nd</sup> International workshop on Nano and Micro Radiative Heat Transfer*, Shanghai, June, (2014), pp. 44–45.
- [4] Y. Tsurimaki, P-O. Chapuis, R. Vaillon, J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama: Radiative heat transfer between two semi-infinite parallel plates in the far-to-near transition regime, *51<sup>st</sup> Japan Heat Transfer Symposium*, H311, Shizuoka, May, (2014).

課題番号	J14081
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	2年目

### 温熱治療における局所加熱法の理論的・実験的研究

### Theoretical and Experimental Studies of Local Heating Method in Hyperthermia Treatment

圓山 重直\*†, Victoria Timchenko\*\*††, 小玉 哲也\*\*\*, 小宮 敦樹\*, 岡島 淳之介\*

\*東北大学流体科学研究所

\*\*School of Mechanical and Manufacturing Engineering, UNSW

\*\*\*東北大学医工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

#### 1. 研究目的

本研究では、ハイパーサーミアを見込むレーザー治療において、生体組織内の局所的な加熱手法を伝熱現象の観点から定量的に評価し、提案する。低侵襲レーザー治療の評価の第一段階として死肉を用いた実験と数値計算結果を比較する。具体的には入手しやすく、また臓器の中でも比較的均一な組織である豚レバーを実験対象とする。

#### 2. 研究成果の内容

本研究のレーザー照射実験に用いた装置を図1に示す。冷却装置に供給する水はポンプ内臓の低温循環水槽にて行った。またレーザー光源は波長 1064 nm の YAG レーザー(連続発振, 波長 1064 nm)を用いた。ここで、YAG レーザーは光ファイバー経由でレーザー・コリメーターユニットに取り付けられており、ビーム直径は 20 mm に拡大された上で出力される。このビーム直径を二枚の凸レンズを用いて任意のビーム直径に変更した。熱電対は豚レバー内部に2点(深さ 3-4 mm の範囲に1点, 深さ 5-6 mm の範囲に1点), 冷却装置表面に1点設置している。

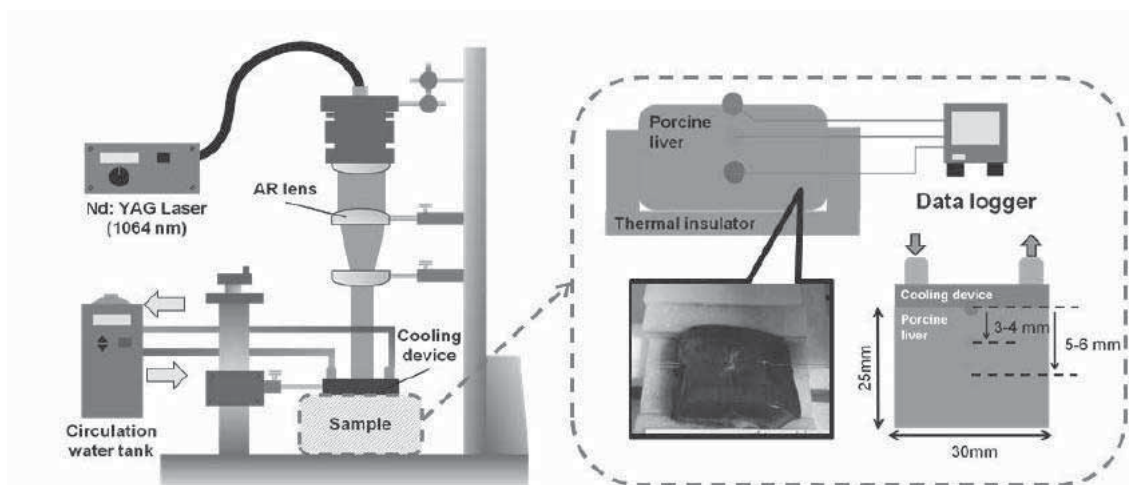


図1 豚肝臓を用いた低侵襲レーザー治療実験システム

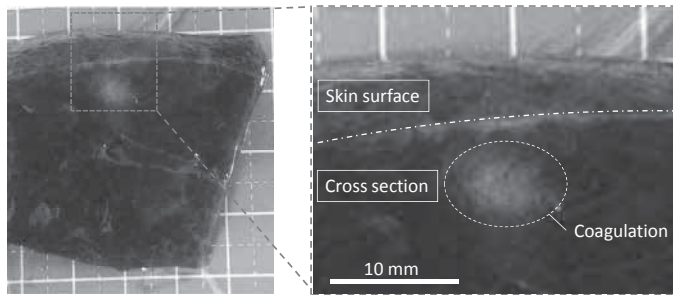


図2 レーザー治療後の豚肝臓断面図

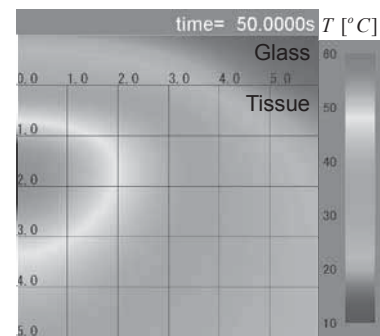


図3 豚肝臓内温度分布の計算結果

図2はレーザー照射後の豚肝臓の断面を含む斜投影図を示している。一点鎖線は豚レバーの表面と断面の境界を示し、破線で囲まれた領域は組織の凝固範囲を示している。凝固は表面から深さ約1.4 – 3.3mmの領域で確認された。生体組織の凝固は約60°Cから開始されるため、凝固範囲の豚レバー内部の温度は60°C前後となっていた可能性が考えられる。図3にレーザー照射時の豚肝臓内の温度場の数値解析結果を示す。レーザーの照射により生体組織の温度が時間と共に発達するとき、熱損傷は50°Cを超える温度分布に付随するように発達していることが分かる。

### 3. 研究目標の達成状況

レーザー照射に伴う生体内の温度制御に関して、定量的な評価をもとに、その条件を見積もることができる。また、生体内の温度制御を行うための手法・装置を提案し、設計した。さらに生体組織へのレーザー照射実験により、本手法の有効性を示すことができた。本研究が提案する手法は、治療という観点において現実的であり、実用化に向けて高い期待が持てる。以上を踏まえて、本年度の研究は100%達成できたといえる。

### 4. まとめと今後の課題

ハイパーサーミアを見込む生体組織内の局所的な加熱手法を、伝熱現象の定量的な評価により提案した。今後は動物実験にて生体内温度制御法の評価を行う。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

該当なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] T. Sugiura, T. Okabe, J. Okajima, A. Komiya, V. Timochenko, T. Kodama and S. Maruyama: Theoretical and Experimental Studies of Local Heating of Biological Tissue for Laser Therapy, *Proceedings of 14th International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2014), pp. 46-47.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

該当なし

課題番号	J14082
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	1 年目 (発展)

### 中性粒子ビームプロセスによる高性能高移動度 MOS トランジスタに関する研究

遠藤 和彦\*†, 昌原 明植\*, 水林 亘\*, 尾崎 卓哉\*\*, 寒川 誠二\*\*††

\*産業技術総合研究所, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

#### 1. 研究目的

近年の MOSFET の微細化に伴い、微細加工の際に発生する素子のダメージが、デバイス特性に与える影響が増大している。本研究は、半導体素子のダメージによる特性劣化を防止するために、新規のダメージフリー加工技術である中性粒子ビーム技術をナノデバイス作製に適用し、特性を向上させることを目的とする。特に中性粒子ビーム加工プロセスを用いた、高性能 Ge チャネル立体構造 MOSFET の研究・開発を行う。さらに、スイッチング特性を急峻に出来る Ge 縦型トンネルトランジスタ等の新規デバイスの研究・開発に向けた準備を進める。

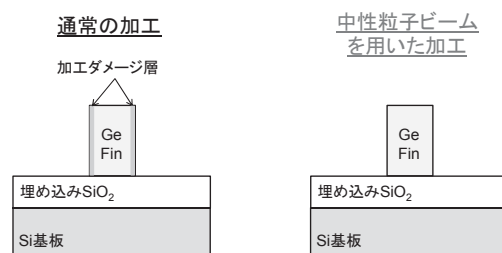


図 1 : 立体 Ge チャネル加工における、中性粒子ビーム無損傷加工概念図

#### 2. 研究成果の内容

これまで中性粒子ビームを用いたシリコン立体チャネルデバイス加工、立体チャネルデバイス用シリコンゲート絶縁膜の形成技術の開発を行い、立体チャネルのラフネス低減による移動度向上、高品位シリコン酸化膜の形成に成功した。本研究では、対象を次世代チャネル材料のゲルマニウムに発展させ、ゲルマニウムプロセスへの中性粒子ビームの適用について注力して研究を行った。特に MOS トランジスタ作製のための個々のプロセス技術の研究および無損傷 Ge 立体チャネルの加工について検討した。

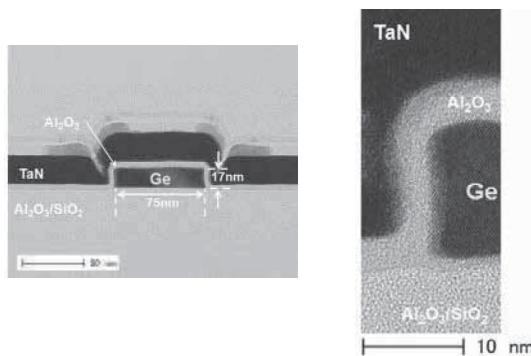


図2： 反応性プラズマエッチングによる Ge 加工

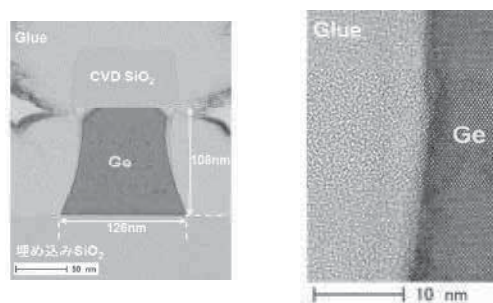


図3： 中性粒子ビームエッチングによる Ge 加工

### 3. 研究目標の達成状況

中性粒子ビームの Ge 立体トランジスタへの応用に取り組み、無損傷加工の検討を行った。通常のエッチングと中性粒子ビームエッチングとを比較し、中性粒子ビームエッチングが良好な特性を示すことが解った。しかしながら、界面特性やデバイス特性については、まだ取得に至っていないので、今後は界面特性の検証、MOS トランジスタを実際に試作し、トランジスタ特性を検証することが課題である。

### 4. まとめと今後の課題

本研究成果を基に、Ge 縦型チャネルを用いた、トンネルトランジスタの検討を始めている。トンネルトランジスタは、トンネル効果で動作するデバイスであり、Si より高いトンネルレートが得られる Ge への置き換え、およびトンネル領域を広くする縦型構造により、大幅な向上が期待でき、0.5V 以下駆動の超低消費電力用デバイスへの適用が可能となる。Ge のプロセスダメージによる特性劣化ができれば、高性能な Ge 縦型トンネルトランジスタの実現が現実となる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] Kazuhiko Endo, Wataru Mizubayashi<sup>1</sup>, Meishoku Masahara and Seiji Samukawa: Study on The High-Performance and High-Mobility MOS Transistor by The Neutral Beam Process, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 144-145.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J14083
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

**革新型旅客輸送機に用いる主翼空力形状設計**  
**Aerodynamic Design Optimization for Novel Civil Aircraft**

金崎 雅博\*†, 大林 茂\*\*††

\*首都大学東京システムデザイン学部, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

本研究の目的は、翼胴融合機（図1）を対象機体とし、その機体の主翼翼端デバイス形状の空力最適化を行い、既存機形状向けに最適化した際との性能の差異を観察する。翼翼端デバイスの形状設計には上反角、後退角など複数の設計変数に基づく大域的形状定義（図2）を用い、Efficient Global Optimization(EGO)により性能向上を図る。また、Winglet, Wingtipのような形状だけでなく新規デバイス形状として、Split winglet についても検討を行う。

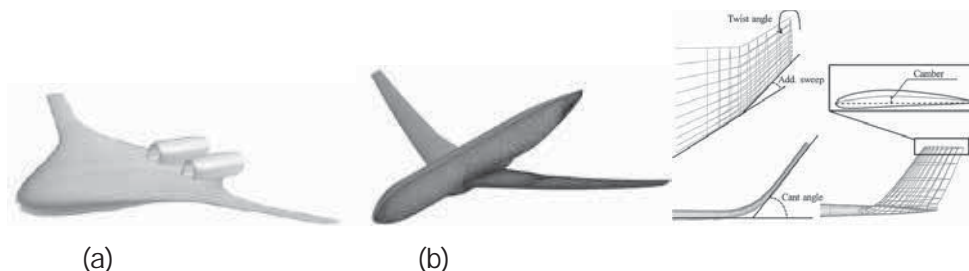


図1：検討対象とする機体。(a)翼胴融合機、(b)既存機の翼胴形状

(b)既存機の翼胴形状

## 2. 研究成果の内容

本申請研究の空力計算には非構造格子に基づく Euler 方程式を Tohoku University aerodynamic simulation code (TAS code)を用いた。

図2に翼翼端形状の定義パラメータについて示す。この定義により、既存機でも用いられる Blended winglet や Raked wingtip 形状の他、Down-ward facing winglet や Forward swept wing tip など実用例が殆どない形状についても大域的に設計空間内で定義できる。

この手法を図1.に示すふたつの形態に適用し、抵抗最小化と翼根の曲げモーメント最小化を目的として最適設計を行った。図3の結果より、翼胴融合機は下半角が付く“Down-ward facing winglet”が空力的に有利である一方で、既存機では上反角が浅めで後退角がつく、形状が抵抗低減効果について大きいことが分かった。

以上より、翼胴融合機では“Down-ward facing winglet”が有望であると考えられるため、上下に小翼を分ける Split winglet を検討し、まずは既存機について下翼の後退角と上半角の2変数に対してパラメトリックスタディを行った。図4(a)より、後退角が大きく、上反角が小さい（下半角が大きい）設計ほど低抵抗となり、上翼と下翼が遠い位置関係にあるほど低抵抗であることが分かった。図4(b)に低抵抗設計の圧力分布を示す。



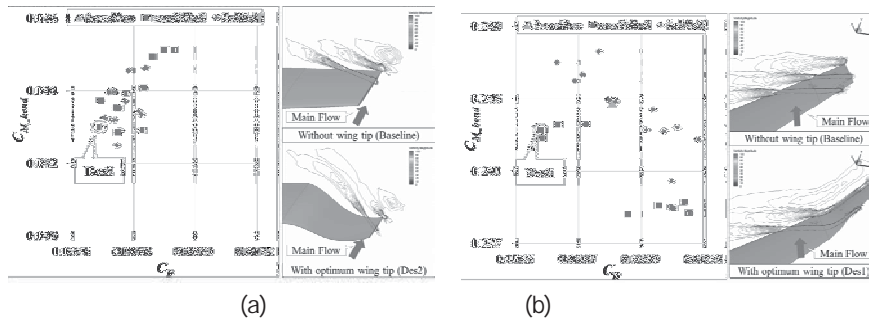


図3：最適化結果の比較。(a)翼胴融合機，(b)既存機の翼胴形状

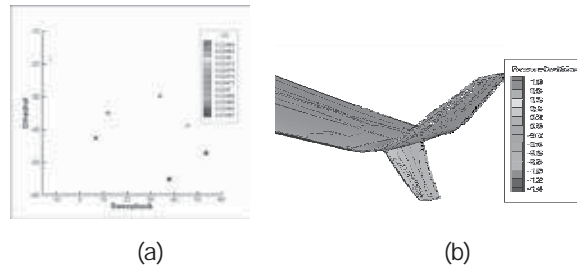


図4：Split winglet の最適化結果。(a)パラメトリックスタディの結果，(b)低抵抗設計の形状と表面圧力分布

### 3. 研究目標の達成状況

本申請研究では高自由度な形状設計法の確立が試みられ，実問題を解くことが出来た。また，大域的な設計手法により翼胴融合機と従来型翼胴形態における最適性についての差異を見出した。以上までが，研究目標のほぼ 100% の達成である。加えて，翼胴融合機で下半角が付いた翼端が空力的に有利であったことから Split winglet も有望であると考え，Split winglet 形状に対し初期検討を行った。

### 4. まとめと今後の課題

本申請研究では，まず，大域的な形状定義法を考案し，それを実際の翼胴融合機に適用した。結果として，翼胴融合機では下半角がつく Downward facing winglet タイプの翼端が高性能であることが分かった。このことに基づき，Split winglet の設計法も検討を行い，上翼と下翼で見られる圧縮流による造波抵抗に注意が必要であることなどが分かった。今後は，舵の装用を念頭に置いた翼胴融合機設計を行うことが検討項目となる。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

#### 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議，解説等を含む)

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] Y. Tuchiya, T. Sugiyama, M. Kanazaki, M. Murayama, M. Kurita, M. Kozai, S. Obayashi: Global Design Optimization of Winglet/Wingtip Shape for Furture Aircraft, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 32-33.

\*[2] 土屋陽祐，金崎雅博：並列評価計算が可能な環境下における Expected Improvement に基づく多数追加サンプルの獲得法と航空機翼端設計への応用，進化計算シンポジウム 2014，安芸市，(2014).

#### 3) その他 (特許，受賞，マスコミ発表等)

なし

課題番号	J14087
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	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	3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\*†, 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**

生体中の細胞は様々な酸素環境に置かれており、低酸素状態で誘発される血管新生などの酸素濃度に依存した応答を示す。一般的な細胞培養は大気中酸素濃度（21%）で行われることが多いが、最適な酸素濃度は対象とする培養系によって異なる。さらに、細胞スケールの酸素場は、細胞の酸素消費などの影響により不均一であると予想される。このような酸素濃度場の不均一性を把握して培養環境を最適化するために、本研究では規定濃度ガス環流型のマイクロ流体デバイスの開発し、デバイス内の酸素濃度分布を細胞スケールで測定する手法の確立する。

**2. 研究成果の内容**

本研究ではシリコン樹脂（PDMS）製のマイクロ流体デバイスを用いて酸素環境を制御した（図1）。デバイス中央の細胞培養のためのゲルチャネル、その両端の培養液流路2本、さらに外側のガス流路2本が存在し、ガス流路に流入する酸素濃度を变化させることにより培養チャンバ内の酸素濃度場を制御することができる。

酸素濃度はりん光を用いて光学的に測定した。りん光はその発光過程に起因して酸素存在下で消光する性質をもち、Stern-Volmerの式  $I_0/I = 1 + K[O_2]$  によって関係付けられる。ここで、 $I_0$ は無酸素時のりん光強度、 $I$ は酸素濃度 $[O_2]$ 時のりん光強度、 $K$ は速度定数である。本研究ではりん光体として酸素感受性微粒子（MitoImage MM2, LUXCEL BIOSCIENCES）を用いた。本粒子は波長380-405 nmで励起すると、酸素依存のりん光（630-670 nm）と酸素非依存の蛍光（430-450 nm）を発する。りん光強度の粒子密度依存を解消するために、りん光/蛍光強度比  $R$  をとることで定量性を確保した。図2は、窒素バ

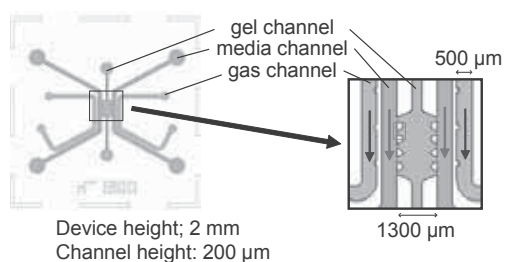


図1：マイクロ流体デバイス

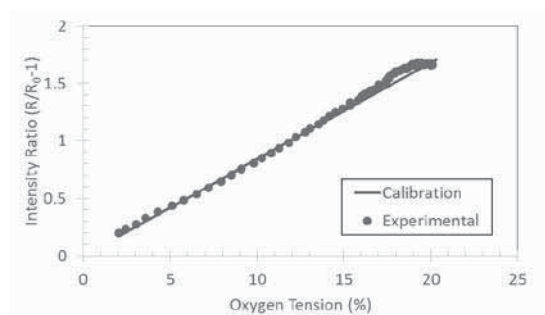


図2：酸素濃度の検量線

ブリッジした粒子懸濁液に雰囲気酸素が溶け込んでいく過程で、りん光/蛍光画像の取得とニードル型酸素濃度計 (MICROX TX3, PreSens) による計測で得た校正直線である。培養環境で想定している酸素濃度 (15%以下) では十分な精度の測定ができることを確認した。

デバイスのゲルチャネル内の酸素濃度場の実測が可能かを検証し、数値流体力学によるシミュレーションの結果と比較した。ゲルチャネル内に留置する酸素プローブとして、酸素感受性微粒子を分散させた培養液中で 24 時間培養後にホルマリン固定したヒト皮膚線維芽細胞を用いた。培養液チャネルには緩衝液を 0.18  $\mu\text{L}/\text{min}$  で流し、一方のガスチャネルからは  $\text{O}_2 20\% : \text{CO}_2 5\% : \text{N}_2 75\%$  の混合ガスを、他方からは  $\text{CO}_2 5\% : \text{N}_2 95\%$  のガスを 18  $\mu\text{L}/\text{min}$  で流した。30 分間環流後の定常状態において取得したりん光/蛍光画像の強度比から細胞毎の酸素濃度を計算した。図 3(a)は強度比から算出した酸素濃度分布の一例を示す。画像右端は  $\text{O}_2 20\%$  ガス流路側のゲルチャネル端であり、X 軸方向の酸素濃度の勾配が確認できる。シミュレーションでは COMSOL Multiphysics (COMSOL, Inc.) を用い、実験と同等の境界条件を設定した (図 3(b))。ゲルチャネルを等間隔に分割した各領域に含まれる全細胞の平均値を酸素濃度場の実測値とシミュレーションの結果を比較すると両者の傾向は一致しており (図 4)、酸素濃度場の測定および数値計算の手法は妥当であるといえる。

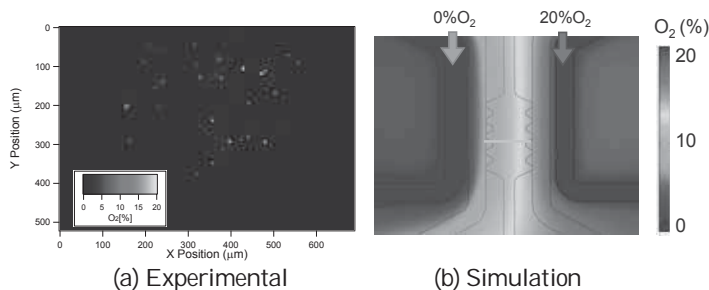


図 3 : デバイス内酸素濃度分布

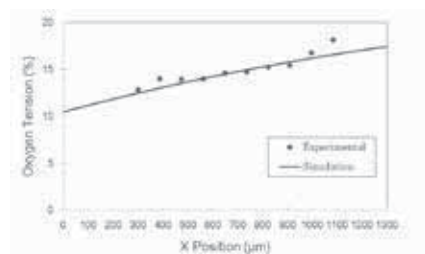


図 4 : 酸素濃度分布の比較

### 3. 研究目標の達成状況

所期の目標である細胞スケールの酸素濃度を実測する手法を確立することができた。

### 4. まとめと今後の課題

低酸素状態の細胞応答を解析するために必要となるマイクロ流体デバイスと酸素濃度場の測定法の有用性を確認した。今後、酸素消費の影響を考慮した細胞スケールの酸素濃度分布を活用した培養環境の最適化に応用する。

### 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 and K. Funamoto: Observation of Hypoxia Cellular Response by using Microfluidic Devices, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 98-99.

[2] 藤高直也, 福島修一郎, 船本健一, 橋本守, 荒木勉: 酸素濃度依存の細胞応答観察のためのマイクロ流体デバイスの開発, 第 27 回バイオエンジニアリング講演会, 新潟市, (2014), pp.123-124.

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J14088
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	3年目

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

足立 高弘\*†, 松田 圭祐\*

岡島 淳之介\*\*††, 秋永 剛\*\*\*

\*秋田大学, \*\*東北大学流体科学研究所, \*\*\*アストン大学

†申請者, ††所内対応教員

### 1. 研究目的

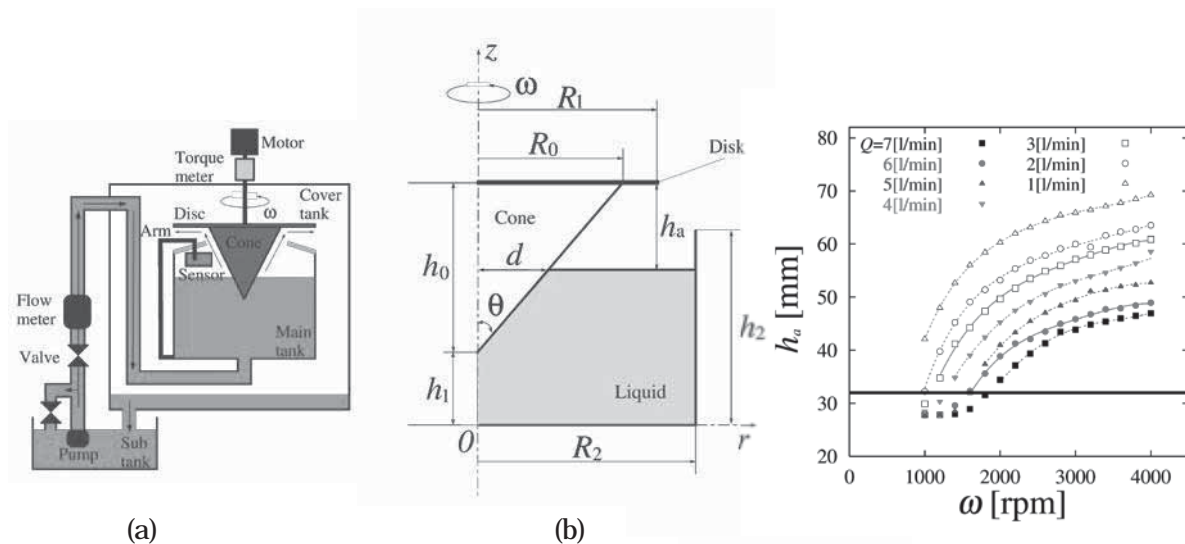
円すい体の頂角を下にして水に浸し回転させることで、円すい体の外表面を液が上昇し、液膜を形成する現象を本申請者等が見出した。この現象を利用してコンパクトで消費動力が少なく手軽に噴霧特性(粒径の大きさ、粒径分布、流量など)を調節できる新しい微粒化機構の開発に取り組む。円すい外表面の液膜には、遠心力が流体を表面から引き離し表面から飛散させる向きに作用するように考えられる。このため、遠心力は液膜を円すいの外表面に沿って上昇させ剥離せずに液膜流を形成させる要因とは考え難いなど、上昇液膜流生成のメカニズムについての詳細は明らかではない。本研究では数値解析と実験により回転円すい体の外表面を上昇する液膜流の生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

### 2. 研究成果の内容

本研究では、液供給量と水面位置との関係を調べることと本現象に必要な消費動力を計測することで、液膜流の微粒化特性を明らかにする。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。実験装置の概要を図1に示す。実験では、揚程 $h_a$ と円すいの回転軸に作用するトルク $T$ を計測した。円すいの回転速度は1000から4000[rpm]で、供給流量は $Q=1\sim 7$ [l/min]までで測定を行った。図2は回転速度と揚程との関係を示したものである。図より、回転数が増加するに従って揚程が増加する。図3は、回転数とトルクとの関係を示している。回転数の増加とともにトルクの値が増加することがわかる。回転数が増大し水面位置が減少すると揚水距離 $h_a$ が増大することになるので、揚水に必要な動力が大きくなるためトルク $T$ が増大する結果となったと考えられる。このように様々な実験条件(回転数と供給流量)の下で測定を行い、本現象に必要な消費動力と他のパラメータとの相関を求めたものを図4に示す。ここでは、相関式として $LL_m=1000FrE(L_p/L_m)$ が得られ、実験値との誤差は $\pm 15\%$ 以内に収まった。

### 3. 研究目標の達成状況

円すいの回転による水面水位の変化と必要なトルクを調べ、微粒化および液膜流の揚水に



(a)

(b)

図1 実験装置の概要

図2 揚程と回転数

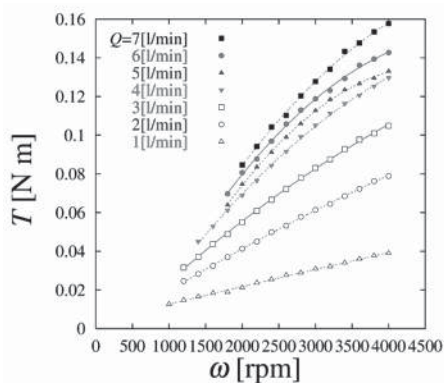


図3 トルクと回転数

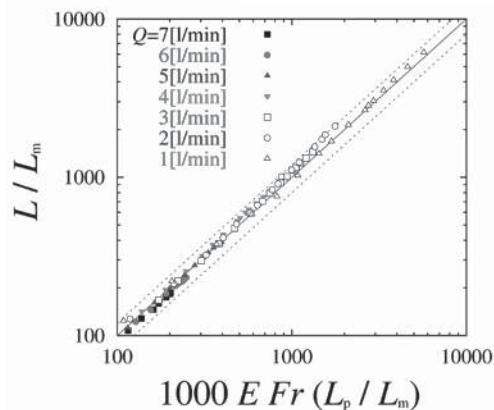


図4 消費動力の相関

必要となる消費動力に関する考察を行った．実用的な整理式を導出することが出来，回転数と揚程および消費動力の間関係を得ることができた．

#### 4. まとめと今後の課題

本研究では，円すいの回転による揚程の変化とトルクを超音波センサーおよびトルクメータを用いて実験的に調べた．揚程は回転数が上昇するに伴い増加することが分かった．トルクの値も回転数の上昇に伴い増加することがわかった．このような測定を様々な実験条件(回転数と供給流量)の下で行い，それらの間の相関を示す簡単な整理式を導くことができた．

#### 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] Adachi, T., Matsuda, K., and Okajima, J.: Power Consumption of Rising Film Flow along the Rotating Conical Outer Surface and the subsequent Atomized Mist Flow, submitted to *Experimental Thermal and Fluid Science*.

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[2] Matsuda, K., Adachi, Y., Okajima, J., and Akinaga, T.: Generation Mechanism of Rising Film Flow along the Rotating Conical Outer Surface and the Subsequent Atomization Characteristics, *Proceedings of the 14th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 158-159.

##### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J14089
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	1 年目 (発展)

**計算と実験の融合によるプラズマ表面反応解析**  
**Analysis of Plasma Surface Reaction by Combination of Calculation and Experiment**

浜口 智志\*†, 寒川 誠二\*\*††  
唐橋 一浩\*, 溝谷 浩平\*, 久保田 智広\*\*  
\*大阪大学工学研究科, \*\*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**

半導体微細加工に用いるプラズマプロセスは, 様々なエネルギー粒子 (イオン, ラジカル, 中性粒子, 電子, 光子) が入射する複雑なプロセスであり, 半導体の微細化に伴いますます高精度な制御が求められている. 本研究ではプラズマプロセス及びプラズマ照射ダメージ生成などの各種表面反応メカニズムを実験的手法と計算的手法を組み合わせることを目的とする.

**2. 研究成果の内容**

遷移金属 (特に磁性材料) の異方性エッチングプロセスは, 磁気抵抗メモリ (Magnetoresistive RAM, MRAM) の実用化のために極めて重要だが, 揮発性の高い化合物をハロゲン等のプラズマを用いて生成することによるエッチングが困難であるためアルゴンイオンミリングが使われており, 高精度プラズマプロセスに課題があった.

最近, 寒川らにより, 錯体反応と中性粒子ビームを用いることにより遷移金属の異方性ダメージフリーエッチングが可能であるという報告がなされた[1]. これは遷移金属に酸素・アルゴン混合中性粒子ビームとエタノールガスを同時に照射することによりエッチングが進行するというものであり, 従来にない全く新しいエッチング方法である. 本研究では高精度プラズマプロセス実現のため, このエッチングメカニズムの理解を目指し, 第一原理理論計算を用いた理論的アプローチを試みた.

計算は, タンタルエッチングを例にとり, タンタル酸化物とエタノールとの反応を想定したクラスターモデルを構築し, その電子状態計算を, 密度汎関数法に基づいて行った. エタノールが吸着したモデルを構築し計算を行った.

図 1 に, 図 1(a),(b),(c)に, エタノールが吸着したタンタル酸化物表面に 7.6eV の運動エネルギーを持つアルゴン原子が衝突する反応の計算モデル (初期状態, 中間状態, 終状態) を示す[2]. アルゴン原子の衝突によって, エタノールの OH 基の水素原子が移動してタンタル酸化物の酸素と結合し, それに伴ってタンタル酸化物のタンタル-酸素結合が切断したことが分かる. このような反応が順次起こることにより最終的にタンタルのエトキシ錯体が形成しエッチングが進行すると考えられる.

[1] X. Gu, Y. Kikuchi, T. Nozawa, and S. Samukawa, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47**, 322002 (2014).

[2] 久保田ら, 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会 19a-S10-14

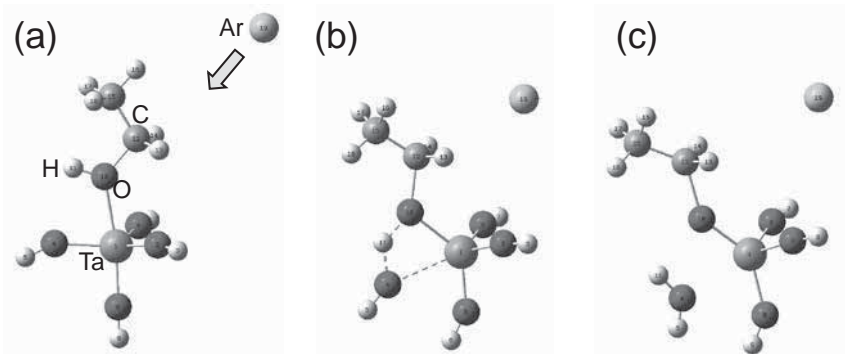


図1：エタノールが吸着したタンタル酸化物表面アルゴン中性粒子ビームを照射した際の反応の計算モデル。(a) 反応前, (b) 遷移状態, (c) 反応語

### 3. 研究目標の達成状況

プラズマ・ビームを用いた遷移金属の高精度エッチングプロセスのメカニズムを解明する結果であり、研究目的は十分に達成したと言える。

### 4. まとめと今後の課題

遷移金属エッチングにおける反応メカニズムについて解明がなされた。今後の課題としては、さらに詳細なメカニズムについて取り組むとともに、本成果に基づく新たな高精度プラズマ・ビームプロセスの提案が課題となる。

### 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. Mizotani, M. Isobe, M. Fukasawa, K. Nagahata, T. Tatsumi, and S. Hamaguchi: Molecular dynamics simulation of silicon oxidation enhanced by energetic hydrogen ion irradiation, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 48, (2015), pp. 152002 (5pp).
- [2] K. Mizotani, M. Isobe, K. Karahashi, and S. Hamaguchi: Numerical simulation of atomic-layer oxidation of silicon by oxygen gas cluster beams, *Plasma and Fusion Research*, Vol. 10, 1406079(2015).
- [3] K. Mizotani, M. Isobe, and S. Hamaguchi: Molecular dynamic simulation of damage formation at Si vertical walls by grazing incidence of energetic ions in gate etching processes, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 33, 021313(2015).

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [4] Kohei Mizotani, Michiro Isobe, Satoshi Hamaguchi: Si surface damage by HBr/O<sub>2</sub> plasma – Molecular dynamics simulation, *2ND International Symposium on Non-equilibrium Plasma and Complex-System Sciences*, Bochum, (2014).
- \*[5] Satoshi Hamaguchi, Tomohiro Kubota, Seiji Samukawa: Numerical study on charge transfer by collision of particle from plasma against surface, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 124-125.
- [6] 溝谷浩平, 磯部倫郎, 唐橋一浩, 浜口智志: 単原子層反応制御に向けたガスクラスタービームプロセスの数値解析, *STARC シンポジウム 2015*, 横浜, (2015).

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J14090
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2014.4~2015.3
継続年数	3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

MR 流体(Magnetorheological Fluid)は, 一般にミクロンサイズの強磁性体微粒子(鉄粒子)をオイル中に分散した懸濁液で, 磁場を加えるとレオロジー特性が変化するマグネトレオロジー効果(Magnetorheological effect, MR 効果)が発現する機能性流体である. 本研究では, ミクロンサイズの鉄粒子の MR 流体への鉄ナノ粒子の添加が磁氣的に誘起される粒子チェーン構造ならびに MR 効果への影響を明らかにするとともに, 高性能なナノ・マイクロ粒子混合系 MR 流体を開発することを目的とする.

## 2. 研究成果の内容

マイクロ粒子としてカルボニル鉄粒子(CIP CS 6.6 $\mu$ m, BASF Japan)を, ナノ粒子としてアークプラズマ法で合成した鉄ナノ粒子(約 100nm)を用い, これらの粒子をシリコンオイル(KF96-50cs, 信越化学)に混合分散することにより, ナノ・マイクロ粒子混合系 MR 流体を創製した. 昨年度までに, 鉄粒子の固体濃度は 10vol%一定とし, 鉄ナノ粒子の混合比(重量比)0, 25%, 50%, 75%, 100%の 5 種の MR 流体に関して, 混合比が 25%, 50%の MR 流体の場合に最大で約 2 倍程度の顕著な MR 効果の向上を見出すことができていることから, 本年度は, より詳細に最適な混合比を探るために, 加えて 5%, 15%, 35%の 3 種の試料を作成した.

供試 MR 流体の定常的及び動的な MR 効果の測定・評価には, 直径 $\phi$ 20mm の 2 枚の平行円盤間に磁場を垂直に均一に印加できる磁場印加装置 ( $B_{max}=1.0$  T at  $I=0.5$  A, 14W, 英弘精機: MR-101N) を有する高精度レオメータ[RS-150, HAAKE]を用いた. また, 磁氣的に誘起された粒子チェーン構造の可視化には, 磁場印加装置を備えたデジタルマイクロスコープシステム(Hirox KH7700)を用い, 供試 MR 流体をガラス基板上に約 10 $\mu$ m の厚さに広げ, この基板に平行に磁場を印加した場合に形成される粒子チェーン構造を観察・記録した. さらに, 本年度は, MR 流体のせん断流れ場での粒子チェーン構造の挙動を可視化観察できる装置を製作し, せん断流れにおける粒子混合比の違いによる粒子カラム構造の形成や崩壊の状況を観察・記録している.

図1には, 印加磁場 $B=0.3$  T の場合について, 各一定せん断速度10, 100, 800  $s^{-1}$ におけるナノ粒子の混合比 $\phi_{nano}$ による誘起せん断応力の変化を示す. いずれのせん断速度においても, 混合比 $\phi_{nano}$ が25%の場合に最もせん断応力が大きく, そのせん断応力はせん断速度が大きくなるほど増大する. 特に, 高いせん断速度800  $s^{-1}$ においては, Micro100% ( $\phi_{nano}=0\%$ )の約2倍のせん断応力を発揮している. 図2に示すように, 最もせん断応力が大きい最適な混合比 $\phi_{nano}25\%$ では,  $\phi_{nan}=0\%$ に比してより太い粒子クラスター構造が形成され, この構造形成によってMR効果が向上したと考え



られる。また、混合比 $\phi_{nano}$ 25%のMR流体では、せん断流れにおいてもより太いカラム状の構造が形成・崩壊している様子が観察されている。

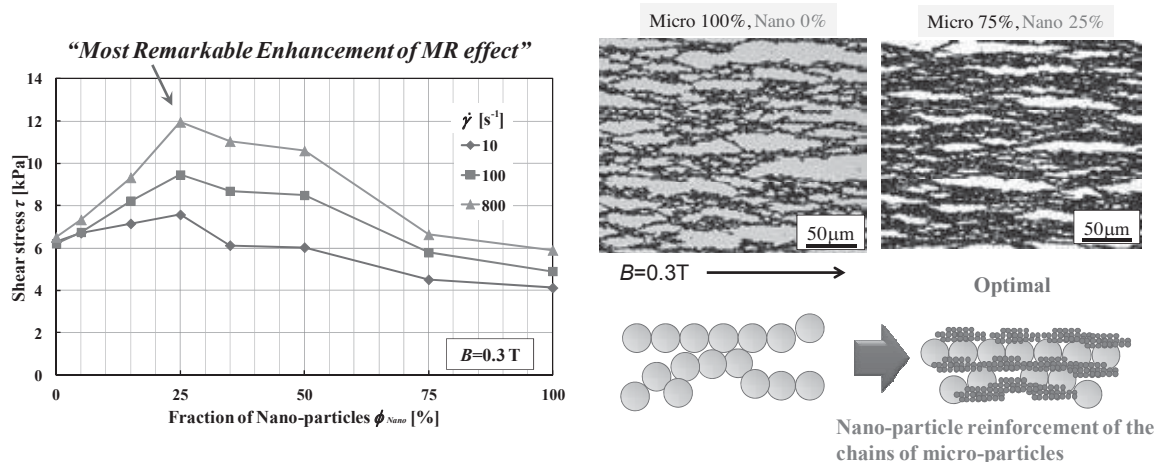


図1：混合比 $\phi_{nano}$ による誘起せん断応力の変化 図2：最適な混合比における粒子チェーン構造

### 3. 研究目標の達成状況

MR 効果を最大にする最適なマイクロ鉄粒子に対するナノ鉄粒子の混合比 $\phi_{nano}$ は 25%の場合で、最大で約2倍程度の顕著なMR 効果の向上を見出すことができた。さらに、ミクロンサイズ粒子のMR 流体に約 100nm の鉄ナノ粒子を添加する効果を粒子チェーン構造や粒子カラム状構造の違いから明らかにすることができ、当初の研究目標を十分に達成できた。

### 4. まとめと今後の課題

マイクロ鉄粒子に対するナノ鉄粒子の混合比によって著しくMR 効果を向上できることを確認でき、その最適な混合比と約 100nm の鉄ナノ粒子を添加するナノ・マイクロ混合系MR 流体のMR 効果向上のメカニズムを明らかにすることができた。これらの研究成果をまとめて、今後、学術雑誌に論文投稿をする予定でいる。

### 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] M. Nakano, H. Abe : Magnetorheology of Novel Fluidic Powder, *Abstract Book of the 14<sup>th</sup> Int. Conf. on ER Fluids and MR Suspensions (ERM2014)*, Granada, Spain, (2014), pp.24 (Plenary Lecture)

\*[2] H. Abe, M. Nakano: Particle Structural Formations of Colloidal MR Fluid and Their Influences on Magnetic Rheological Response, *Proceedings of the 14th Int. Symp. on Advanced Fluid Information (AFI-2014)*, Sendai, (2014), pp. 116-117.

\*[3] 中野政身, 阿部浩也, 戸塚厚, 佐藤忠一郎: ナノ・マイクロ粒子混合系MR流体のせん断モードでのMR効果と構造形成, 第92期日本機械学会流体工学部門講演会USB講演論文集, 富山, Paper No.1307 (2014), pp. 1-3.

[4] M. Nakano : MR effect enhancement of bidisperse MR fluids containing micron- and nano-sized iron particles, *Abstract of APS(American Physical Society) March Meeting 2015*, Invited Session Q18, San Antonio, Texas, USA, (2015), p. 1 (Invited Lecture)

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J14091
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	1st year

### Numerical Simulation for Reducing Future Tsunami Damage

Shigeru Obayashi\*†, Fumiya Togashi\*\*††  
 Rainald Lohner\*\*\*, Masuhiro Beppu\*\*\*\*, Hiroshi Tatesawa\*\*\*\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

\*\*Applied Simulations Inc.

\*\*\*College of Science, George Mason University

\*\*\*\*National Defense Academy of Japan

\*\*\*\*\*Bousai Consultant Co. Ltd.

†Applicant, ††non-IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

To develop a computational fluid dynamics code to simulate a huge tsunami and also to develop protecting objects to protect people and buildings from future huge tsunami by the developed code.

#### 2. Details of program implement

IFS and Applied Simulations Inc. conducted the numerical simulation of tsunami at Taro-cho, Iwate prefecture. The real geographical data was provided by Bousai Consultant Co. Ltd. The generated computational domain was shown in Fig. 1. The computed result agreed very well with the measured data as shown in Fig. 2. The result was presented at International Symposium on Advanced Fluid Information 2014 in Sendai.

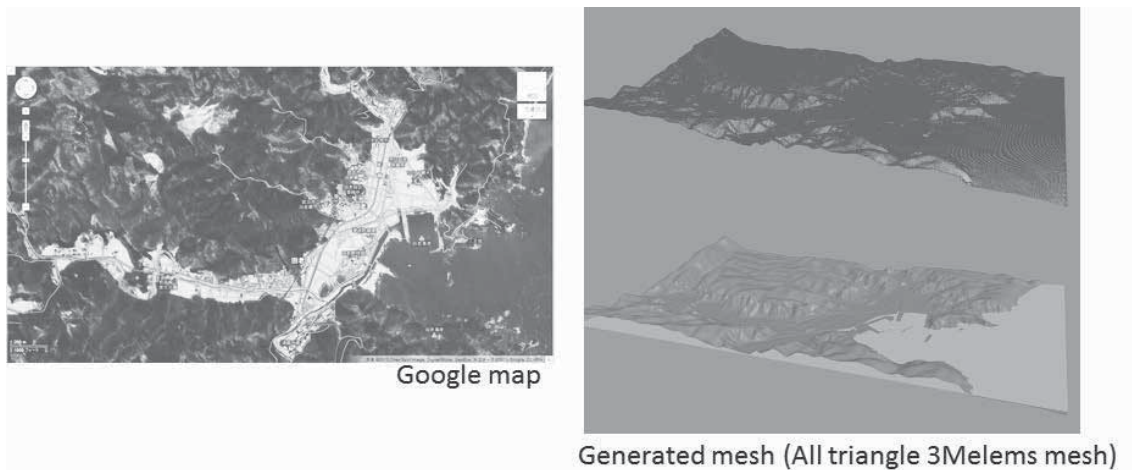


Figure 1: Generated computational domain of Taro-cho, Iwate. The geographic data was provided by Bausai Consultant Co. Ltd.

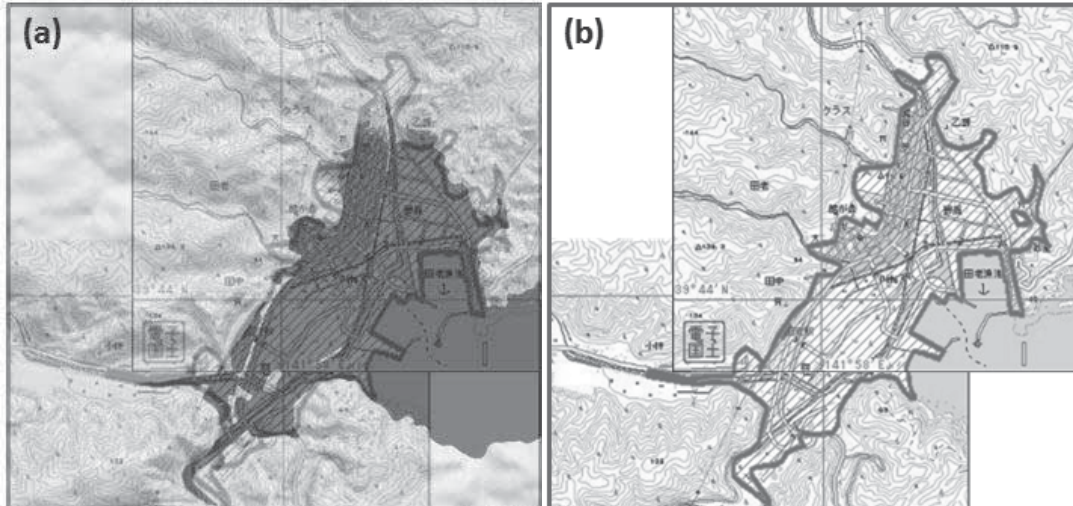


Figure 2: Flooded area comparison between a) the calculation: dark colored area and b) the measured data: slashed line area. The measured data was obtained from the geospatial information authority of Japan website. Please note that the calculated result is superposed on the measured data.

### 3. Achievements

We developed a computational fluid dynamics code using the shallow water equations. We demonstrated the code by reproducing the 2011 Tsunami of Taro-cho, Iwate prefecture area. The computed result agreed very well with the measured flooded area. We believe that the developed code can help the future tsunami prediction.

### 4. Sumaries and future plans

We developed the code using the shallow water equations, which was very effective to simulate flooded area of Tsunami as described in section 2. However, the shallow water equations don't consider the fluid mass, hence it can't handle building collapse or floating wreckages. As a future plan, we are planning to develop the computational fluid dynamics code using the volume-of-fluid methodology. The new code with the volume-of-fluid methodology has the capability of handling the building collapse, floating wreckages, and infrastructure damage with coupling a computational structured dynamics code. The new code will be very effective to estimate real local damage by Tsunami.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable.
  - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- \*[1] F. Togashi, R. Lohner, M. Beppu, H. Terasawa, and S. Obayashi: Development of CFD code for Tsunami Simulation using Shallow Water Equations, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 188-189.
- 3) Patent, award, press release etc.  
Not applicable.

課題番号	J14092
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	2年目

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

杉林 里佳\*†, 伊藤 拓哉\*\*, 船本 健一\*\*\*††

早瀬 敏幸\*\*\*, 木村 芳孝\*\*

\*国立成育医療研究センター 周産期・母性診療センター 胎児診療科,

\*\*東北大学医学系研究科, \*\*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

S/N が非常に小さい胎児心電位をノイズから抽出するには始めに R 波を検出することが必要である。しかし、ヒトでは特定の妊娠週数（妊娠 30 週前後）で一時的に R 波の振幅が低下し、R 波の検出が困難となることが知られている。一時的な R 波振幅低下は哺乳動物に共通した現象といわれているが実態は不明である。

本研究の目的はマウスを対象に一時的に R 波の振幅が低下する機序を解明することである。R 波振幅の低下が予想される胎齢 15.5 日目の胎仔を中心に生理学的手法（心筋収縮力、心電図）による評価系に外的因子（母獣薬物投与）による R 波振幅の変化から、振幅低下の機序を解明し、ヒト胎児で安全に R 波を増加する手段開発の基礎研究とする。

## 2. 研究成果の内容

**①R 波振幅修飾実験**（超音波検査：流体科学研究所 早瀬研究室，心電位計測：医学系研究科 木村研究室にて実施）

交配日確定マウスを作成し、胎齢 15.5 と 18.5 のマウスを用いてケタミンとイソフルランによる麻酔下で母獣を開腹、胎仔の心電位を直接誘導で計測した。母獣腹腔内に硫酸マグネシウム 500mg/kg を投与し、R 波振幅の変化を算出した。また胎仔の循環動態の変化について早瀬研究室が所有する超音波画像診断装置(VEVO-2100)を用いて計測を行った。

胎齢 15.5 のマウス（4 母獣、7 胎仔）を用いた計測結果を図 1 に示す。硫酸マグネシウム投与後、約 20 分後に母獣の心拍数の減少が見られ、続いて 40~60 分を最下点とする胎仔の心拍数減少を認めた。いずれも心拍数は徐々に回復を認めた。心拍数減少については硫酸マグネシウムには刺激伝導障害によるものであり、母獣腹膜から吸収されて母体血中濃度の上昇を認めたのち、胎盤循環に入り胎仔へ効果が現れるまでの時間差と考えられた。胎仔の心拍数変化が見られたにも関わらず、R 波電位は著明な変化を認めずほぼ一定の値を示した。胎齢 18.5 のマウスでも同様の実験を行ったが同様の結果が得られた。

胎齢 15.5 のマウスに硫酸マグネシウムを腹腔内投与後に超音波診断装置を用いて胎仔の Fractional shortening の計測を試みた。現時点では胎仔心電図との同時計測や継続的な評価は技術的な問題から困難であった。

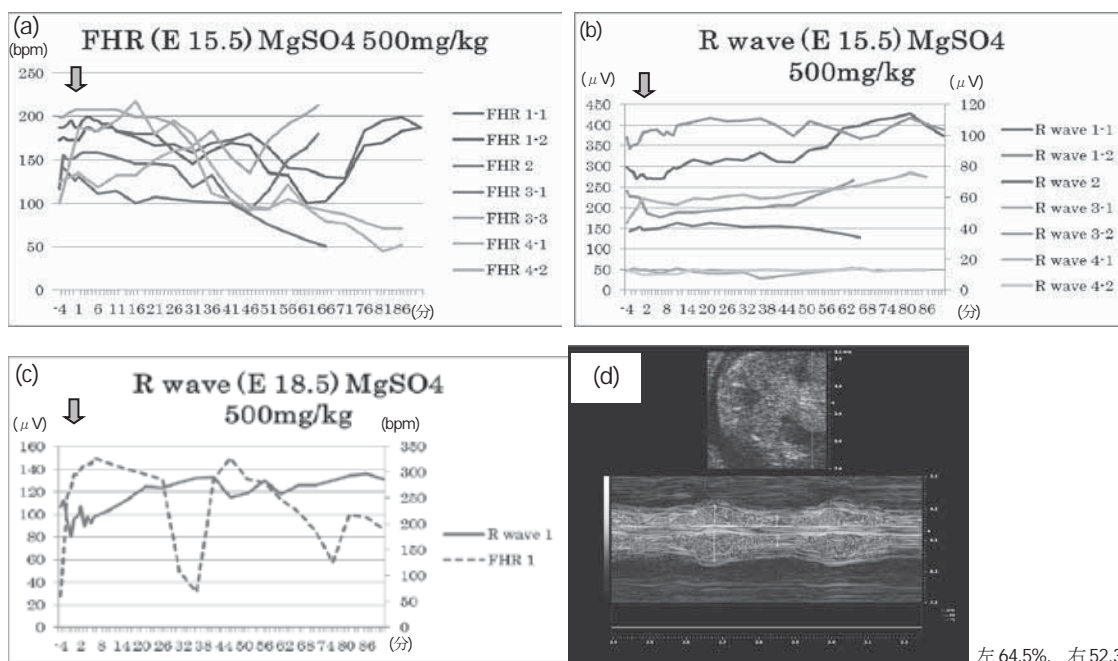


図 1：硫酸マグネシウム投与時の胎仔心拍数と R 波電位の変化  
 (a)胎仔心拍数変化(胎齢 15.5) (b)胎仔 R 波電位変化(胎齢 15.5) (c)胎仔心拍数、R 波電位変化(胎齢 18.5)  
 (d)胎仔 Fractional shortening(胎齢 15.5)

### 3. 研究目標の達成状況

母獣へ薬物投与を行い安定した状態で 90 分間の胎仔心電図計測が可能であったが、選択した薬剤では予想された R 波電位の変化が得られなかった。

### 4. まとめと今後の課題

母獣への硫酸マグネシウム投与により母獣、胎仔の心拍数変化を認めたが R 波電位については明らかではなく、胎齢の異なるマウスを使用しても差異は認められなかった。

胎仔のみに発現している T 型 Ca チャネル刺激薬を用いて R 波電位の変化、胎齢による違いを明らかにし、特定の胎令で観察される一過性の R 波振幅低下の生理学的機序の解明に努めることを課題とする。

### 5. 研究成果 (\*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)  
なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] R. Sugibayashi, T. Ito, K. Funamoto, T. Hayase and Y. Kimura: Cardiac Evaluation of Fetal Mice by ECG and Ultrasound, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 94-95.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)  
なし

課題番号	J14093
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4～2015.3
継続年数	2年目

**SiC 基板成膜プロセスの量子・分子論的解析**  
**Quantum Molecular Analysis for the Deposition Process of SiC Substrate**

金子 智\*, 安原 重雄\*\*

須藤 理枝子\*\*\*††, 徳増 崇\*\*\*\*†

\*神奈川県産業技術センター, \*\*㈱ジャパン・アドバンスド・ケミカルズ

\*\*\*㈱さがみはら産業創造センター, \*\*\*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所外対応研究者

### 1. 研究目的

環境対策・省エネ社会の本格到来により、次世代自動車・鉄道等に搭載するパワーデバイスでは更なる高効率・低コスト化が必要である。一般にパワーデバイス用 SiC 基板は 1,500°C を超え 2,000°C 近い温度での成膜が必要であり、その高温においても装置としての強度や不純物拡散等を生じない工夫が必要であるために、部材に係る費用は非常に大きい。さらに高温を維持するための熱源としての電力はもとより、長時間の成膜では高温下の真空維持等その他の製造コストが高価となる。そこで本研究では独自手法による成膜試験に加えて、材料ガスの開発と成膜条件の最適化についてより高効率・低エネルギーで行なえるよう、シミュレーションソフトを活用した計算機実験を行う。

今年度は、各種基板上でのカーボン系薄膜の成長過程を理論的に考察することで、グラフェンを含むカーボン系薄膜の成長過程を理論的に考察し、グラフェンを含むカーボン系薄膜の成長過程の把握を目的とする。具体的には、シリコン基板をはじめとする各種基板上でのカーボン系薄膜の成長プロセスを密度汎関数法や分子動力学法などの数値シミュレーションにより解析し、そのナノスケールのメカニズムを把握する。

### 2. 研究成果の内容

各種基板上でのカーボン系材料の安定性を量子化学的手法を用いて評価した。図 1 にはシリコン(001)基板上の炭素系分子の初期条件を図示した。その他、表面が六回対称となるシリコン(111)面、サファイア C 面などを含む酸化物基板での安定性の評価を行った。また SiC を含むワイドバンドギャップ半導体のギャップの評価も行った。図 2 として窒化アルミのバンドギャップ図を示す。

### 3. 研究目標の達成状況

申請時において、ワイドバンドギャップ半導体 GaN への応用を目指していた。現段階では GaN を含め、窒化アルミのバンドギャップ評価も行っている。製膜に関しては酸化物基板上での炭素系薄膜の成長を確認している。

### 4. まとめと今後の課題

今回は炭素系薄膜としてグラフェンなどの成長過程について計算による考察を行った。今後は製膜に関する実験結果との比較を行い、考察を深めていく予定である。

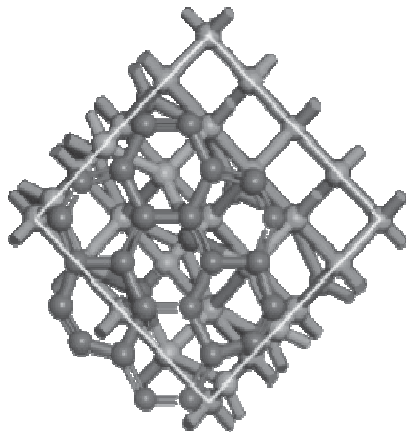


図1: シリコン(001)基板上の炭素系分子の初期条件配置

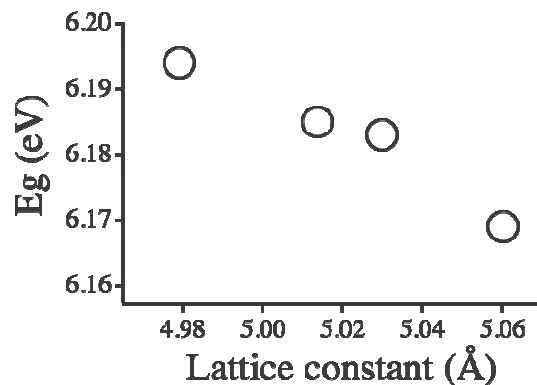


図2:窒化アルミの格子定数によるバンドギャップ変化

## 5. 研究成果 (\*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. Kaneko, H. Torii, T. Ito, M. Yasui, M. Kurouchi, A. Fukushima, T. Tokumasu, S. Lee, S. Park, H. Takikawa, and M. Yoshimoto: Expansion of Lattice Constants of Aluminum Nitride Thin Film Prepared on Sapphire Substrate by ECR Plasma Sputtering Method, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 53, (2014), 11RA11 (4 pages).
- [2] S. Kaneko, T. Ito, M. Yasui, M. Kurouchi, H. Torii, T. Amazawa, T. Tokumasu, T. Nagano, S. Lee, S. Park, and H. Takikawa: Properties of Epitaxial AlN Thin Film Deposited on Sapphire Substrate by ECR Plasma, *IEEE/International Conference on Advanced Infocomm Technology*, (2014), ISBN: 978-1-4799-0464-8, pp. 69-70.

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[3] S. Kaneko, H. Torii, M. Yasui, T. Ito, S. Yasuhara, R. Sudo, and T. Tokumasu: Construction of Lattice Constant in Aluminum Nitride Prepared by ECR Sputtering, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp.136-137.
- [4] S. Kaneko, Y. Shimizu, T. Rachi, C. Kato, S. Tanaka, T. Katakura, H. Takikawa, A. Matsuda and M. Yoshimoto: Multi Graphene Grown by Irradiated Graphite on Printing Paper using Femtosecond Laser, *7th International Symposium on Advanced Plasma Science and Its Applications for Nitrides and Nanomaterials*, Nagoya, (2015), B3-P-01.

### 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	J14094
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	3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

杵淵 郁也\*††, 徳増 崇\*\*†

\*東京大学大学院工学系研究科, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所外対応研究者

## 1. 研究目的

本研究では粗視化シミュレーションを様々な系に対して統一的な手法に基づいて行うことを目指して、全原子を陽に考慮した分子動力学 (molecular dynamics: MD) 系から粗視化粒子間の相互作用モデルをボトムアップに構築する手法の構築を行う。今年度は、粗視化粒子を構成する原子の入れ替えを考慮した定式化を導入するための検討を行った。原子の入れ替えを考慮することにより、水や有機溶媒等の実用上重要な系のモデリングが可能となることが期待される。

## 2. 研究成果の内容

これまでに筆者らは、系の時間発展に対して履歴効果を考慮に入れた非マルコフ散逸粒子動力学(non-Markovian dissipative particle dynamics: NMDPD)の運動方程式を定式化し、MD シミュレーションの統計量に基づいて粗視化粒子間にはたらく力をモデリングする方法を提案した [Y. Yoshimoto et al., Phys. Rev. E 88, 043305 (2013)]. 図 1 に示すように、原子をグループ分けしてクラスタを定義し、その重心運動を粗視化粒子の運動とみなす。昨年度までは、クラスタの慣性半径  $R_g$  を一定とする拘束条件を課した Lennard-Jones 流体の MD 系を対象として粗視化手法の定式化と検証を進めてきたが、今年度は拘束条件を課さない系を対象とし、粗視化粒子を構成する原子の入れ替わりを考慮した定式化を導入するための検討を行った。

図 2 に異なる慣性半径に対するクラスタの平均二乗変位を示す。MD 系で平均二乗変位を評価する際には、クラスタ位置が不連続に変化することを避けるために、構成原子の入れ替えを行わずにサンプリングを行った。原子の拡散的な挙動により、10 ps の間に慣性半径は 1.5 – 1.8 Å ほど増加した。設定した慣性半径が 3.9 Å のときには、粗視化モデルは初期の 5 ps の範囲で MD の平均二乗変位を良く再現していることが確認された。ただし、拡散時間が長くなると(例えば 10 ps 以降)、MD 系においては慣性半径が増加するため、粗視化モデルと MD の結果の差異が顕著になる。一方、設定した慣性半径が 4.9 Å のときは、ごく短い拡散時間においても粗視化モデルは MD よりも低い平均二乗変位を示した。これは、クラスタを構成する原子の分布の広がりが大きくなり、クラスタ同士の重なりが大きくなったことに起因すると考えられるが、詳細な理解のためには今後の検討が必要である。

また、MD 系と粗視化系に Poiseuille 流を発生させて粘性を評価した結果、慣性半径の大小によらず、粗視化モデルは粘性を過大評価していることがわかった。これは、現状の粗視化モデルの定式化では、全ての構成原子が入れ替わらずにまとまって動くことを仮定しているため、運動量輸送が過大に評価されているためである。



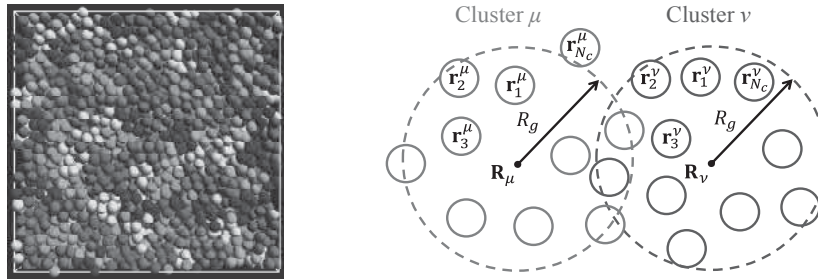


図1：MD系（左）と粗視化粒子の定義（右）

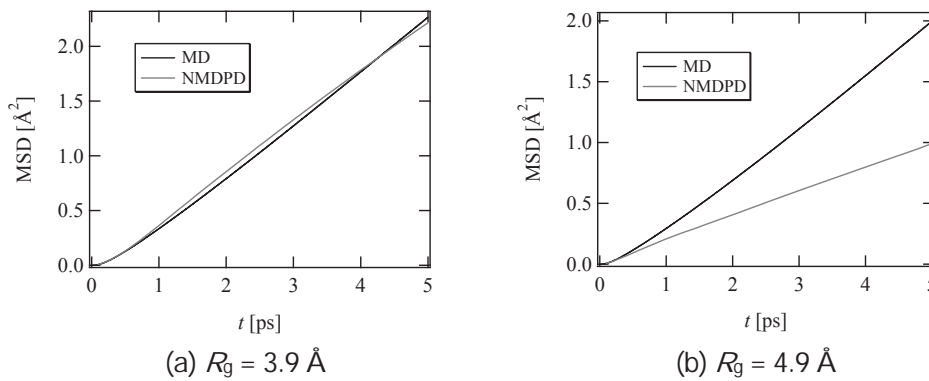


図2：MD系と粗視化系における平均自乗変位の比較

### 3. 研究目標の達成状況

本年度の共同研究により、申請者らが提案した粗視化シミュレーション手法を拡張するための問題点を明確化することができた。得られた知見に基づいたモデル構築手法の改良は今後の課題である。

### 4. まとめと今後の課題

MDシミュレーションの統計量に基づいて粗視化モデルをボトムアップに構築する手法について検討を行った。特に本年度は、粗視化粒子を構成する原子の入れ替えが粗視化系の振る舞いに与える影響について検討を行い、今後の手法拡張のための知見を抽出した。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[1] I. Kinefuchi, Y. Yoshimoto, T. Mima, A. Fukushima, T. Tokumasu, and S. Takagi: Bottom-up Construction of Coarse-grained Interaction Models from Molecular Dynamics Simulations, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 150-151.

\*[2] 杵淵郁也, 吉本勇太, 美馬俊喜, 福島啓悟, 徳増崇, 高木周: 非マルコフ性を考慮した散逸粒子動力学法, 第28回数値流体力学シンポジウム, (2014), D07-2.

#### 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

Project code	J14095
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano micro technology
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	1st year

### Transport Phenomena of Nanoscale Water Droplet in a Nano Pore

Akinori Fukushima\*, Takashi Tokumasu\*\*†, Vergne Philippe\*\*\*††

\*Graduate school of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

\*\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*\*LaMCoS, Université de Lyon

†Applicant, ††non-IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

Recently, new functional materials can be utilized in many scientific fields. Some of such new materials realize useful mechanical and energy devices that have small structures in nm-order. One of important factors to determine the efficiency of these small devices is the momentum transport. Therefore, we have focused on nanoscale droplet shearing, which is a situation that can be seen between solids that do not have enough lubricant between them. When the channel size is in nm-order scale, the ratio of the liquid-vapor interface domain to the droplet volume is much larger than that for a macroscopic droplet. Hence, the momentum transport through the liquid-vapor interface affects on the total momentum transport, and cannot be ignored. At this scale momentum transport cannot be predicted by continuum theory. When a water droplet is confined between two flat walls that move along opposite directions, momentum is transported through the water droplet from a wall to the other one. Solid walls highly affect the shape of the water droplet. They may also affect on the momentum transport through the liquid-vapor interface. However the details of its effect are not known in detail. In this study, we focus on the effect of the solid walls onto the momentum transport seen in the interfacial region. Especially when walls move along the normal direction to the liquid-vapor interface, the shape of the interface changes drastically and this effect will be discussed.

#### 2. Details of program implement

We evaluated forces between a water droplet and solid walls using channel models shown in figure 1(a). At first, we calculated the  $yz$  component of stress tensor distribution on  $yz$  plane. Figure 1(b) shows the shear stress distribution along the  $y$  direction on the lower wall in the case that the wall velocity is 40 m/s. The shear stress at the center region of the panel is almost constant. This region can be recognized as the bulk region. Moreover the region where the magnitude of the shear stress is different from that of the bulk region can be seen, and it can be recognized as the liquid-vapor interface region. Using this definition, the integrated value of the shear stress on each region is defined as the friction force, and the friction forces dependence on velocity is discussed. Figure 1(c) shows the friction force dependence on velocity on each region. At both liquid-vapor interfaces, the slope of the force against the wall velocity can be calculated as  $4.4 \times 10^{-13}$  N/(m/s). This means that there is no difference between the dynamics along the advancing direction and that along the receding direction in terms of the increasing rate of the shear force at the liquid-vapor interface.

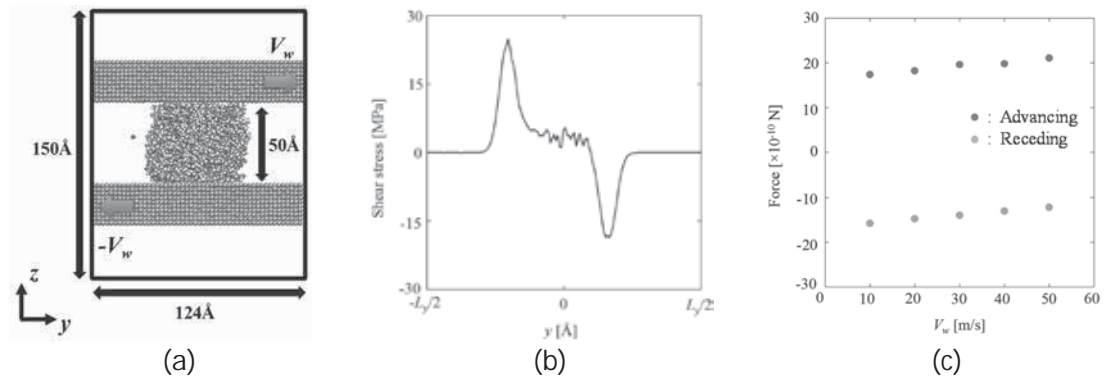


Figure 1 : Simulation model and simulation results of shear force. Panel (a) shows the snap shot of the simulation model, panel (b) shows the shear force distribution, and panel (c) shows the velocity dependence of the shear force on the interface.

### 3. Achievements

In this project, we expected to clarify the momentum transport phenomena on the liquid-vapor interface. Considering that we can write the full paper if we obtain some results, it can be said that we have obtained the important and sufficient results.

### 4. Summaries and future plans

In this study, we have clarified that the shear force is not different between the receding direction and the forward direction. Accordingly, this result indicates that the momentum transport at the forward liquid-vapor interface is the same as that at the receding liquid-vapor interface. In future work, we focus on the wettability dependence of the shear force. In addition, we also focus on the shear force dependence on the shearing direction. The shear force in the case that the droplet is sheared along parallel direction of the contact line will be evaluated and compared with results in this year. Thereafter, we will summarize the obtained results.

### 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] Akinori Fukushima, Nicolas Fillot, Marie-Hélène Meurisse, Takashi Tokumasu, Philippe Vergne : Molecular Dynamics Study of the Droplet Shearing by Solid Walls, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 140-141.

[2] Takashi Tokumasu, Philippe Vergne : Nanoscale droplet shearing by molecular dynamics method, 2015 ElyT lab Workshop, Matsushima, (2015).

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

(Patent)

Not applicable.

(Award)

Not applicable.

(Press release)

Not applicable.

Project code	J14096
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

## Transport Phenomena of Substances in Electrolyte of Solid Oxide Fuel Cell

Takashi Tokumasu\*†, Jeongmin Ahn\*\*††

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

As the solid oxide fuel cell (SOFC) shows high efficiency electric power generation compared to the other fuel cells, it has been attracted attention. It is imperative to improve the oxygen ion conductivity in a solid oxide membrane for a high efficiency SOFC. Therefore the aim of this research is to analyze the transport phenomena of  $O^{2-}$  ion in the electrolyte of SOFC by both experiment and simulation (quantum calculation and molecular dynamics simulation). From these results, we suggest a new concept of electrolyte which has high ion conductivity and hardness.

### 2. Details of program implement

In regard to the simulation analysis, a Molecular Dynamics (MD) simulator was constructed for analyzing  $O^{2-}$  ion transport phenomena in an electrolyte membrane. The interatomic potential model was derived on the basis of quantum calculation in the electrolyte membrane of  $SrSc_xCo_{1-x}O_{3-\delta}$  and  $La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_{3-\delta}$  which have perovskite-type structure. The structures of electrolyte membrane and temperature dependence of diffusion coefficient were compared with those of experimental data (simulation result of diffusion coefficient is shown in Figure 1). From these results, we have confirmed that the MD simulator is able to well reproduce the structure of electrolyte membrane and diffusion coefficient of  $O^{2-}$  ion.

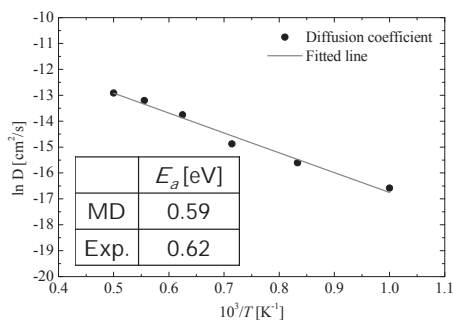


Figure 1: Temperature dependence of diffusion coefficient of oxygen ion in the  $LaSrCoO_{3.61}$  membrane. The inserted table is a comparison of activation energy,  $E_a$ .

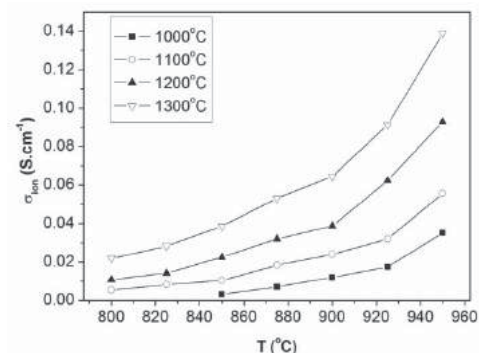


Figure 2: The average conductivity of the  $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-\delta}$  membranes sintered at different temperatures.

Impedance spectroscopy method was used to measure the oxygen ion conductivity and four-probe D.C. method was applied to obtain the oxygen ion diffusion coefficients of the selected materials. The typical result is shown in Fig. 2.

### 3. Achievements

As for the simulation analysis, the objectives which are derivation of intermolecular potential on the basis of quantum calculation and construction of MD simulator for analyzing transport properties of oxygen ion in an electrolyte have been achieved. It has been demonstrated by experimental study that the test temperature has a significant effect on the oxygen ion conductivity of  $\text{SrSc}_{0.1}\text{Co}_{0.9}\text{O}_{3-\delta}$  oxide [1].

### 4. Summaries and future plans

An MD simulator for analyzing transport phenomena of oxygen ion has been constructed. As a future plan, the diffusion coefficient of  $\text{O}^{2-}$  ion and its temperature dependence will be calculated in various conditions by changing parameters, and we characterize a relation between each parameter and  $\text{O}^{2-}$  ion phenomena. To verify the simulation result, experimental study will be implemented to test the  $\text{O}^{2-}$  ion conductivity and diffusion coefficient through the selected electrolyte materials. The effect of test temperature on the  $\text{O}^{2-}$  ion transport process through each material will be also revealed by experimental study.

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

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)  
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
  - [1] R. Falkenstein-Smith, K. Wang, P. Zeng, and J. Ahn: A Ceramic Membrane Based Methane Combustion Reactor with Tailored Function of Simultaneous Separation of Carbon-dioxide from Nitrogen, *ASME Conference Proceedings, IMECE2014-38283*, (2014), pp. V08BT10A029, DOI: 10.1115.
  - [2] R. Falkenstein-Smith, P. Zeng, and J. Ahn: A Ceramic Membrane Based on Oxy-Fuel Combustion Processes, *1000 Island Energy Research Forum (TIERF)*, Ottawa, Canada, (2014).
  - \*[3] H. Nagashima, T. Tokumasu, and J. Ahn: Oxygen Ion Transport Phenomena in a Ceramic Membrane, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 74-75.
  - [4] P. Zeng, K. Wang, R. Falkenstein-Smith, and J. Ahn: A Ceramic-Membrane-Based Methane Combustion Reactor with Tailored Function of Simultaneous Separation of Carbon Dioxide from Nitrogen, *ASME Conference Proceedings, FuelCell2014-6510*, (2014), pp. V001T01A001, DOI: 10.1115.
- 3) Patent, award, press release etc.  
(Patent) Not applicable.  
(Award) Not applicable.  
(Press release) Not applicable.

課題番号	J14097
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	1 年目 (発展)

## 分子動力学法を用いた水素の相転移現象に対する量子効果の影響解析

### An Analysis of Effect of Quantum nature on the Phase Transition Phenomena of Hydrogen Using Molecular Dynamics Method

徳増 崇\*†, 坪井 伸幸\*\*††

津田 伸一\*\*\*, 井川 祥平\*\*\*\*

\*東北大学流体科学研究所, \*\*九州工業大学工学研究院

\*\*\*九州大学大学院工学研究院, \*\*\*\*信州大学大学院

†申請者, ††所外対応研究者

#### 1. 研究目的

水素のナノスケールにおける熱流動現象の解明は、水素の安全かつ効率の良い利用につながるため非常に重要である。しかし、ナノスケールの熱流動特性の解析は、実験により全て把握することは難しいため、分子動力学(MD)法を用いた解析が有効であるが、水素は分子量が小さいため、原子核の不確実性が大きくなり、通常の古典 MD 法による解析が難しい。そこで本研究では、セントロイド分子動力学(CMD)法を用いて、水素分子の量子効果とその熱流動特性に与える影響と分子論的メカニズムを解明することを目的としている。平成 26 年度は、特に水素の相転移における量子効果の影響とその分子論的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

量子効果が水素の相転移現象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状態方程式(EOS)を構築し、構築した EOS より飽和線を導出し比較を行った。各 MD 法を用いて作成した飽和線の比較を図 1 に示す。この図より、CMD 法により作成した飽和線は良く実験値と一致しているが、古典 MD 法により作成した飽和線は実験値と大きな差異を生じていることが分かる。この結果より、水素分子の量子効果とその相転

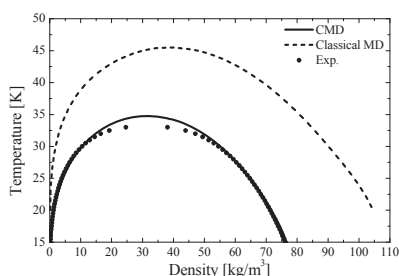


図 1 : 各 MD 法を用いて作成した飽和線と実験値の比較。実験値は NIST のデータベースより参照。

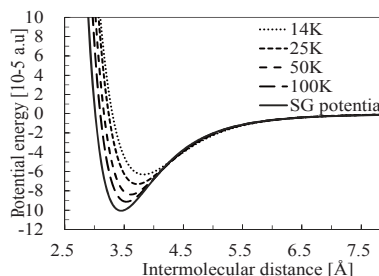


図 2 : Force matching 法を用いて作成した各温度における水素分子間ポテンシャルの比較。

移に及ぼす影響は大きく、また水素分子の量子効果により相転移の領域が狭くなることが明らかとなった。この量子効果による相転移現象の変化の分子論的メカニズムを調べるために、Force matching 法を用いて水素分子間ポテンシャルを作成した。この結果を図2に示す。図2より、100K以上ではセントロイドのポテンシャル(破線)は古典的なポテンシャル(実線)と一致するが、低温領域では水素分子の量子効果を考慮することで、水素分子間相互が変化し、斥力範囲が広くなり、井戸の深さが浅くなることが分かった。これは、量子効果により水素分子間の相互作用が古典力学の場合よりも小さくなることを意味している。この分子間相互作用の変化により、古典MDの場合よりもビリアル圧力が大きくなる。つまり量子効果により相転移しにくくなるため、CMD法の飽和線は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26年度の目標であった、水素の相転移に対する量子効果の影響とその分子論的メカニズムは、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26年度の研究により、水素分子の量子効果とその相転移に与える影響は大きく、量子効果により相転移の領域が変化することが明らかとなった。今後の課題としては、現在の解析では水素分子の回転運動を取り扱っていないため、この回転運動を考慮した水素の熱・輸送物性評価が必要である。さらに、水素の回転特性温度は高く、回転運動エネルギーにおいても量子効果の影響が現れると考えられるため、水素分子の回転運動における量子効果が、水素の相転移現象や熱・輸送物性に及ぼす影響についても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, S. Tsuda, N. Tsuboi, A. K. Hayashi, and T. Tokumasu: A Molecular Dynamic Study of Nuclear Quantum Effect on the Diffusion of Hydrogen in Condensed Phase, *10TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF COMPUTATIONAL METHODS IN SCIENCES AND ENGINEERING, AIP Conf. Proc.* 1618 (2014), 950 (4 pages).

[2] H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi, A. K. Hayashi, and T. Tokumasu: A Molecular Dynamics Study of the Nuclear Quantum Effect on the Transport Properties of Liquid Hydrogen, *5th International Conference on HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW IN MICROSCALE*, O-37, (2014), (6 pages).

他 合計4件

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[3] S. Ikawa, T. Tokumasu, N. Tsuboi, S. Tsuda: Molecular Dynamics Study of Static and Dynamics Density Fluctuation of Diatomic Fluids around the Critical Points, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 112-113.

[4] H. Nagashima, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi, A. K. Hayashi, and T. Tokumasu: An analysis of nuclear quantum effect on thermodynamic and transport properties of hydrogen using molecular dynamics method, *20TH EUROPEAN CONFERENCE ON THERMOPHYSICAL PROPERTIES*, Portugal, (2014), O\_C3.15.

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	J14098
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	1年目 (発展)

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

佐藤 岳彦<sup>\*†</sup>, 金澤 誠司<sup>\*\*††</sup>, 金子 俊郎<sup>\*\*\*</sup>  
 大谷 清伸<sup>\*</sup>, 小宮 敦樹<sup>\*</sup>, 藤田 英理<sup>\*\*\*</sup>  
<sup>\*</sup>東北大学流体科学研究所, <sup>\*\*</sup>大分大学工学部  
<sup>\*\*\*</sup>東北大学大学院工学研究科  
<sup>†</sup>申請者, <sup>††</sup>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**

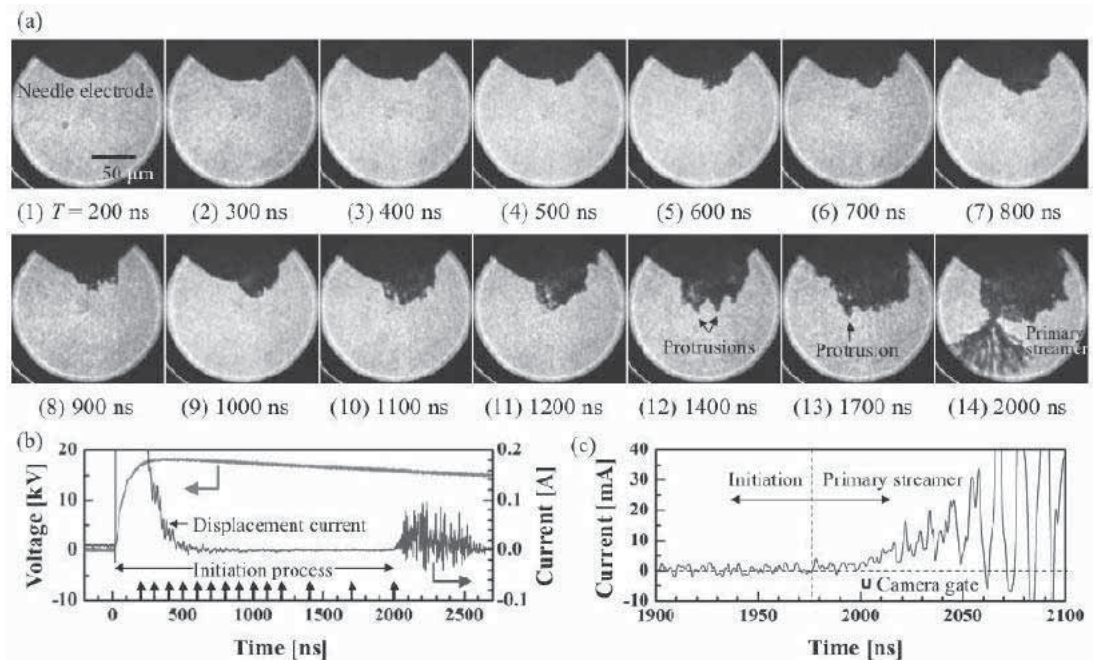


図1: (a)1次ストリーマ開始前段階に形成される気泡群の様子, (b)放電電流波形とカメラ露光タイミング, (c)1次ストリーマ開始時の放電電流波形とカメラ露光タイミング。

図1に示すように, 1次ストリーマが発生する前1-2  $\mu$ sに電極先端に気泡が形成され,



先端部に突起状の気泡が発生すると、その先端からストリーマが進展することが示されている。本研究により、ストリーマ発生までに電荷が気泡内蓄積し、針状気泡の先端に集中することで、10 MV/cm の電界が発生し、ストリーマの開始に至ることを明らかにした。

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、ストリーマ発生前のプレストリーマ現象について高時空間分解能可視化法により、実験的に明らかにした。特に、形成された気泡は気泡群を成していることも示し、気泡群の生成機構の考察から、今まで知見されていない放電現象があることを示唆することができた。

### 4. まとめと今後の課題

本年度は、ストリーマ発生前のプレストリーマ現象について明らかにした。今後は、1次ストリーマの進展機構の解明を目的とする。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- \*[1] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, Toshiro Kaneko and Takehiko Sato: Highly Temporal Visualization of Generation Process of Underwater Secondary Streamer From Developed Primary Streamer, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 42, No. 10, (2014), pp. 2398-2399.
- [2] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, Toshiro Kaneko and Takehiko Sato: Initiation process and propagation mechanism of positive streamer discharge in water, *Journal of Applied Physics*, Vol. 116, No. 21, (2014), 213301 (12 pages).
- [3] 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 金子俊郎, 佐藤岳彦: 水中正ストリーマの進展開始電圧に及ぼす放電パラメータの影響, 静電気学会誌, Vol. 39, No. 1, (2015), pp. 21-26.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [4] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, Toshiro Kaneko and Takehiko Sato: Role of continuous discharge current for secondary streamer in water, *International Symposium on Electrohydrodynamics 2014 (ISEHD2014)*, Okinawa, (2014), paper no. P24.
- \*[5] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, Toshiro Kaneko and Takehiko Sato: Propagation Processes of Primary and Secondary Streamers by Pulsed Discharge in Water, *14th International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2014)*, Sendai, (2014), pp. 126-127.

他 合計 6 件（国際学会 3 件, 国内学会 3 件）

#### 3) 受賞

- 1. Best Paper Award, Role of continuous discharge current for secondary streamer in water, Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani, Atsuki Komiya, Toshiro Kaneko and Takehiko Sato, 2014.6.25, *International Symposium on Electrohydrodynamics 2014 (ISEHD2014)*.
- 2. 優秀論文賞, 水中正ストリーマの進展開始電圧に及ぼす放電パラメータの影響, 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 金子俊郎, 佐藤岳彦, 2014.9.8, 静電気学会.

他 合計 5 件

Project code	J14099
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2nd year

## Development of a Program for Blood Flow and Cell Behaviors Based on LBM Method

Makoto Ohta\*†, Bastien Chopard\*\*††  
 Daniel Rufenacht\*\*\*, Toshio Nakayama\*\*\*\*  
 K. Srinivas\*\*\*\*\*, Hitomi Anzai\*\*\*\*\*  
 Guy Courbebaisse\*\*\*\*\*, Yuuki Yoshida\*\*\*\*\*, Sho Matsumoto\*\*\*\*\*

\* Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Geneva University

\*\*\*Hirslanden Hospital

\*\*\*\*Graduate School of Biomedical Science, Tohoku University

\*\*\*\*\*University of Sydney

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

\*\*\*\*\*INSA-Lyon

†Applicant, ††non-IFS responsible member

### 1. Purpose of the project

To develop a program for analyzing the relation of blood flow to cell behaviors using LBM method.

### 2. Details of program implement

The conventional flow diverter stents (FD) have a risk to thrombus formation in a parent artery. This may be because the stents have lower porosity in comparison with the conventional stents. Then we introduced and developed an optimization method for stent design with high porosity. The purpose of this year is to evaluate the effect of optimization method on flow reduction.

The program of optimization we developed can construct the design semi-automatically to avoid the hard work of engineers based on Lattice Boltzmann Method (LBM) with a optimization method called as simulated annealing(SA). The porosity of stent was changed from 60-90%. The computational simulation of flow in aneurysm was performed with changing position of struts. The flow reduction in aneurysm using the optimized struts was compared with that using a symmetric strut design.

The flow reduction of optimized struts is always higher than the symmetric strut under the same porosity. The optimized stent has 88-95% flow reduction whereas the symmetric stent has 85-90% flow reduction. This results suggest the optimization has a potential to improve the flow reduction when comparison with the stent with the symmetric struts and the same porosity. In conclusion, we confirm the effect of optimization method to improve the stent design for reducing the flow.

In this year, we applied this method under a manufacture oriented. And we confirm a stent of helix type has a possibility of reduction flow. In another topics, the program was performed using another objective function such as thrombus formation. Then the stent geometry follows the objective function.

### 3. Achievements

Expected Result

#### 4. Summaries and future plans

Several objective functions will be applied.

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

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

\*[1] Hitomi Anzai, Jean-Luc Falcone, Bastien Chopard, Toshiyuki Hayase, Makoto Ohta: Optimization of Strut Placement in Flow Diverter Stents for Four Different Aneurysm Configurations, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 136, Issue 6, (2014), p. 061006.

[2] Yu Chang Ho, Makoto Ohta, Kwon Tae Kyu: Study of Parameters for Evaluating the Pushability of Interventional Devices Using Box-shaped Blood Vessel Biomodels Made of PVA-H or Silicone, *Bio-Medical Materials and Engineering*, Vol. 24, No. 1, (2014), pp. 961-968.

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

[3] Hitomi Anzai, Yuuki Yoshida, Makoto Ohta: Optimization of stent design for intracranial aneurysm, *The Fourth Japan-Switzerland Workshop on Biomechanics (JSB2014)*, Shima, (2014), p. 62.

[4] Mingzi Zhang, Hitomi Anzai, Bastien Chopard, Makoto Ohta: An Optimization Method of FD Stent for Cerebral Aneurysm facing the Stent Design and Manufacturing Needs, *The Fourth Japan-Switzerland Workshop on Biomechanics (JSB2014)*, Shima, (2014), p. 64.

[5] Mingzi Zhang, Hitomi Anzai, Makoto Ohta: Manufacture-oriented Struts Structure Optimization of Flow Diverter for Intracranial Aneurysm, *7th World Congress of Biomechanics (WCB2014)*, Boston, (2014).

[6] Mingzi Zhang, Hitomi Anzai, Bastien Chopard, Makoto Ohta: A Development of Manufactureoriented Optimization Strategy for Flow Diverter Stent based on Cylindrical Spirals, *11th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2014)*, Sendai, (2014).

\*[7] Makoto Ohta, Sho Matsumoto, Xiaobo Han, Bastien Chopard, Mingzi, Zhang, Yujie Li, Yuuki Yoshida, Hitomi Anzai: Development of a Program for Blood flow and Cell Behaviors Based on LBM Method (Second report), *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 38-39.

[8] Makoto Ohta, Guy courbebaisse, Hitomi Anzai, Mingzi Zhang, Bastien Chopard, Yue Zhang: Optimization of endovascular prosthesis for the treatment of cerebral aneurysms, *2015 ELYT lab Workshop*, Matsushima, (2015).

[9] Mingzi Zhang, Hitomi Anzai, Makoto Ohta: Introduction of Three Strut Optimization Strategies towards the Design of Efficient Flow-Diverter Stents, *2015 ELYT lab Workshop*, Matsushima, (2015).

[10] Yujie Li, Makoto Ohta: Comparison of intra-aneurysmal velocity magnitude in a patient-specific model among PIV, CFD and MRI, *2015 ELYT lab Workshop*, Matsushima, (2015).

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

Not Applicable.

Project code	J14100
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	1st year

### Development of a Smart Material with Cellulose

Makoto Ohta\*†, Fredrik Lundell\*\*††  
Tetsuya Uchimoto\*, Hidemasa Takana\*  
\* Institute of Fluid Science, Tohoku University  
\*\*KTH  
†Applicant, ††non-IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

We will develop a new smart material based on mixture with cellulose and magnetic fluid or polymer. The cellulose is developed by KTH

#### 2. Details of program implement

Cellulose nano fiber (CNF) is now widely attracting researchers who work for materials and mechanical engineering. CNF enhances the mechanical properties as an additive, and will develop a smart material.

Ohta et al. put CNF into MMA and performed polymerization. It is the first time to establish the polymerization with MMA and CNF (Fig. 1). In orthodontic surgery, drilling technique for insertion of bone screw is one of the important skills for doctors. Although a plastic or porcine bone is often used as a training model, it is difficult to simulate realistic situations with conventional bones because the mechanical properties of the models are too different from those of human bones. Therefore, it is necessary to develop a bone model with realistic mechanical properties under drilling. Not a few research works have been done about mechanical properties of bone model under drilling, but there are few reports mentioning the relationship between materials of bone model and mechanical properties. Understanding the relationship between materials and mechanical properties is expected to clear the direction for development of bone model. The mechanical properties, such as the maximum torque of bone drill, increase in case of PMMA with CNF.

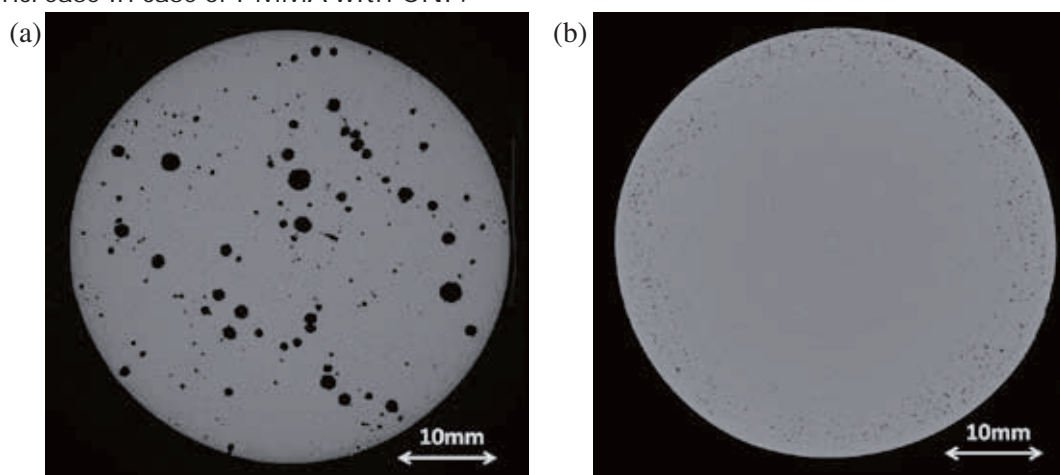


Figure 1: CT images of the samples (a) first production method, (b) improved production method

Firstly, we improved the method of mixture. Apparent bubbles are observed over the first sample. Bubbles should be removed in order to get accurate measurements. Then, production method is changed to have samples defoamed. Three changes have been applied. As a first change, the mixture of powder and liquid is vacuumed in a dry oven. As a second, the weight ratio between powder and liquid is changed to 1:1 in order to earn the time to be vacuumed. It must be noted that mechanical properties such as hardness and strength is also changed along the changes of polymerization degree. As a result, the mixture is vacuumed for about 2 minutes. As a third, acrylic materials are cooled down during all the time of production. Before production, acrylic materials are stored in a refrigerant at -20°C. While materials are being mixed and vacuumed, the cup containing the acrylic mixture is put in a bowl filled with ice water. After vacuumed, the cup is put in a refrigerant at -20°C and polymerization is completed in a refrigerant.

X-ray (Micro-CT) scanning is carried out to see inner structure of samples. As the CT image shows, quite less bubbles are observed with the sample produced in the improved method compared with the first sample.

Kosukegawa et al. discussed the plan for the evaluation of mechanical properties using environmental SEM.

Takana et al. performed the following research. In order to enhance the strength of the cellulose nanofibers, the innovative method of aligning the fibers by electrostatic force has been proposed.

### 3. Achievements

(Ohta) Expected Result.

(Uchimoto) Gradually progressed

(Takana) The fundamental experimental setup for generation and control of liquid jet by electric field has been established. The characteristic of the electrostatic liquid jet has been experimentally clarified.

### 4. Summaries and future plans

(Ohta) The production method of acrylic resin is confirmed. Then, additives such as wood powder and cellulose nanofiber, micro beads will be added to the acrylic resin. Mechanical properties such as hardness and elasticity, insertion friction torque under drilling will be measured to find out the characteristics of each additive.

(Uchimoto) Performing SEM.

(Takana) Experiments on the electrostatic jet generation with cellulose suspension and the evaluation of the processed cellulose fibers will be conducted.

### 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] Yuta MURAMOTO, Gaëtan BOUVARD, Vincent FRIDRICI, Philippe KAPSA, Makoto OHTA: Production and characterization of composite materials for bones-biomodeling, *2015 ElyT Lab Workshop*, Matsushima, (2015).

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

Project code	J14101
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	3rd year

### Research of Friction and Drilling on Bio-Composite Model

Makoto Ohta\*†, Vincent Fridrici\*\*††  
Philippe Kapsa\*\*, Hiroyuki Kosukegawa\*  
Kaihong Yu\*\*\*

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University

\*\*Ecole Centrale de Lyon

\*\*\*Graduate School of Biomedical Science, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

#### 1. Purpose of the project

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

Radio-frequency (RF) catheter ablation is a highly effective treatment for many tachycardias. During catheter ablation, a catheter with an electrode on the tip is inserted into the heart through blood vessels and placed at the target place which causing the heart rhythm disorder. RF energy is introduced through the electrode to destroy the abnormal heart tissue. High output power is necessary for ventricle muscle; however the high power may cause complications such as thrombus because of the excessive temperature on the electrode-tissue interface. We have proposed a new electrode cooling by making the catheter vibrating to increase the convective cooling from blood flow which called vibration ablation catheter. Contact force between electrode-tissue is a major factor which may affect the electrode cooling by vibration. In this study, we investigated the effect of contact force on electrode cooling and tissue heating during ablation with vibration by measuring electrode temperature under different contact forces and various vibration frequencies without flow condition.

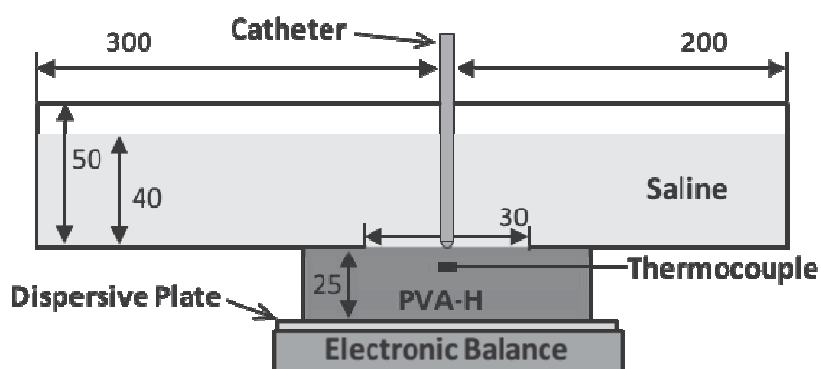


Figure 1: Schematic diagram of in-vitro test for measurement of temperature and movement of ablation catheter

The temperature at 60 s is the highest temperature during the perform time. Except the ablation under 30 gf with 0 Hz vibration, no significant change with increasing contact force can be seen. The result of no difference suggests that the electrode cooling by vibration could be maintained under the increasing contact force from 10 gf to 30 gf. The electrode cooling by vibration is happened, because the vibrations increase the convective cooling from blood flow. Under high contact force, the vibration may still disturb the flow around the catheter and increase the convective cooling. This means that the friction between the ablation catheter and the PVA-H may change the vibration mode and the flow around the catheter will be affected.

### 3. Achievements

Expected Result.

### 4. Summaries and future plans

Fretting friction will be applied. Measurement of friction coefficient will be performed.

### 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] Kaihong Yu, Tetsui Yamashita, Shigeaki Shingyochi, Makoto Ohta: The Effect of Contact Force on Electrode Temperature and Internal Tissue Temperature during Ablation with a Vibrating Catheter, *11th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2014)*, Sendai, (2014).

\*[2] Makoto Ohta, Kei Ozawa, Vincent Fridrici, Kaihong Yu, Philippe Kapsa:, Research of Friction and Drilling on Bio-composite Model (Second report), *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 36-37.

[3] Kaihong Yu, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Makoto Ohta: The Effect of Vibration Ablation Catheter on the Temperature of the Electrode under 30 gf, *2015 ELYT lab Workshop*, Matsushima, (2015).

[4] Makoto Ohta: Introduction of invitro and insilico analyses for medical equipment, *1st International symposium for collaborative research between Tohoku University and Technische Universität Braunschweig*, Germany, (2014).

[5] Makoto Ohta: In-vitro and In-silico analyses/Developments for medical equipment, *Tohoku – Syracuse Bilateral Net-symposium*, (2014).

[6] 于 凱鴻, 太田 信: アブレーションカテーテル評価, 東北大学—信州大学共催シンポジウム 2014, 信州大学繊維学部, (2014).

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Best poster Award, "The Effect of Vibration Ablation Catheter on the Temperature of the Electrode under 30 gf", Kaihong Yu, Feb. 20, 2015, *The ElyT workshop*.

(Press release) Not applicable.

課題番号	J14103
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	2014.4 ~2015.3
継続年数	3年目

**大気圧プラズマ流によるウィルスの不活化特性**  
**Inactivation of Virus by a Plasma Flow at Atmospheric Pressure**

佐藤 岳彦\*†, 押谷 仁\*\*††  
鈴木 陽\*\*, 岡本 道子\*\*, 吉野 大輔\*, 岡崎 和貴\*\*\*  
\*東北大学流体科学研究所, \*\*東北大学大学院医学系研究科  
\*\*\*東北大学大学院工学研究科  
†申請者, ††所外対応研究者

**1. 研究目的**

新型インフルエンザを始めとした新興感染症の発生や、医療機関におけるウイルスによる感染事故などは、健康を脅かす大きな社会問題となっている。近年、低温で発生するプラズマを利用した空気清浄機などが製品化されているが、これらの効果は未だ学術的に証明されているとは言えない。そこで、本研究では、低温プラズマ流によるウイルスの不活性化の効果について検証を行い、ウイルスへの感染リスク低減の可能性について明らかにすることを目的とする。

**2. 研究成果の内容**

平成26年度は、平板電極を利用したプラズマ照射装置の開発を継続して進めた。平板電極下に水を満たしたガラスセルを設置しガラスセル内の化学種輸送を検証した。pH試薬として、pH4.4以下で赤色に変色するメチルレッドを利用した。平板電極表面に生成されたプラズマにより窒素酸化物が生成され、水面から溶解し、亜硝酸や硝酸となることでpHが低下し図1に示すように水面近傍が赤色に

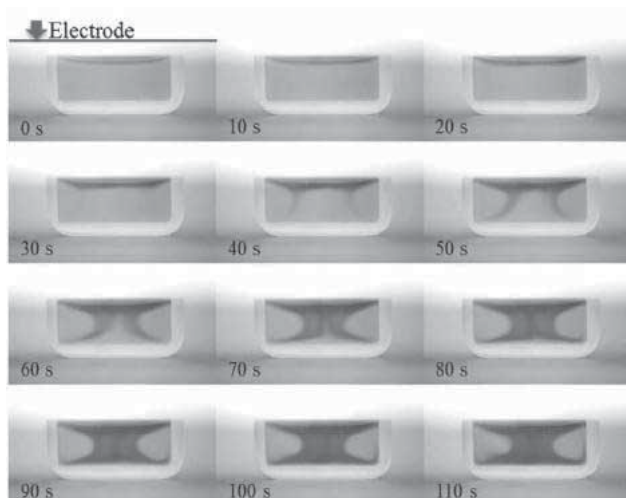


図1 平板電極プラズマ下方に設置したガラスセル内の窒素酸化物輸送の様子。

変化する。表面からの拡散によりゆっくりと下方向に拡散をするが、30s後には循環流により赤色の低pH溶液が下方向に移送され始め、50s後にはガラスセル底面に到達する。80s後には底面全体に広がり、壁面に沿って上昇を始める様子が示されている。この流れは、ガラスセル側壁外面の温度がプラズマの生成により上昇し、両端の壁面近傍の溶液が浮力で上昇することで形成されると考えられる。

図2に平板電極プラズマの下に平板を設置した時の流れの様子



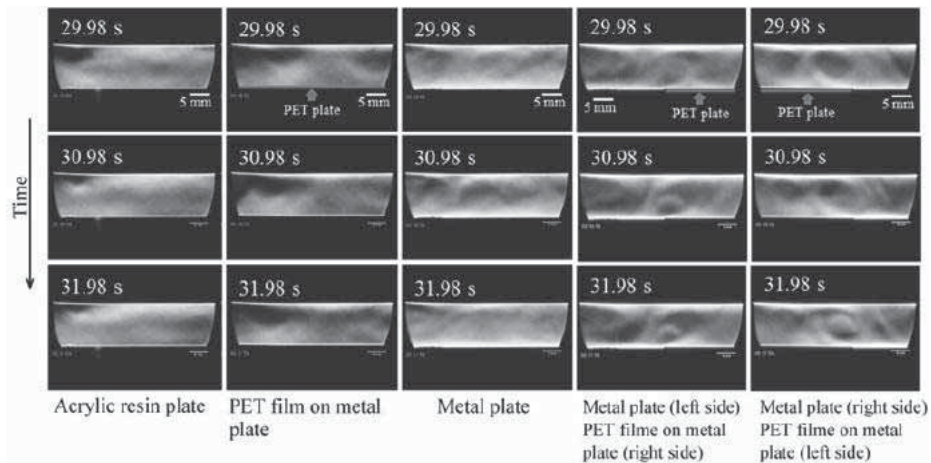


図2 平板電極プラズマ流への下部接地平板の条件による影響の様子。

子を示す。平板は、左からアクリル樹脂、PETフィルム被覆金属平板、金属平板、右側のみPETフィルムで被覆した金属平板、

左側のみPETフィルムで被覆した金属平板である。接地した金属平板が露出している場合（右側の3ケース）では、流れが誘起されている様子が示されている。これは、電極と接地金属平板との間に電界が形成され、空中の電荷が静電気力により加速されることによると考えられる。このような流れを照射対象物上で形成できれば、格段に早く化学種を輸送することが期待できる。

### 3. 研究目標の達成状況

プラズマ生成後できるだけ短時間で生成した化学種をウイルスに暴露することが、ウイルス不活化効果を向上させるために重要である。本年度は、電極下部に設置した平板の状態を変化させることで、効率的に流れを誘起する方法を開発することができた。

### 4. まとめと今後の課題

ウイルス不活化に向けて直接照射を行うためのプラズマ発生装置の開発とそのプラズマ特性の検証を行い、効率よく流れを生成する手法を開発した。ウイルスに直接照射する場合には、照射方法についてより高濃度の化学種を短時間で暴露できる方法を今後詳細に検討し実施する予定である。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

- 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）  
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: Characteristics of a Plasma-induced Flow using a Mesh Electrode for Viral Inactivation, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2014)*, Sendai, (2014), pp. 106-107.

- 3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）  
該当なし

## 2. 研究成果報告書 ＜萌芽公募共同研究＞



課題番号	J14H001
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

羽ばたき飛行実用化に向けた影響因子の最適化  
Optimization of Influential Factors for Practical Application of an Ornithopter

石出 忠輝\*†, 大林 茂\*\*††, 下山 幸治\*\*

\*木更津工業高等専門学校機械工学科, \*\*東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

## 1. 研究目的

本研究ではバイオミメティクスの着想を取り入れ、従来の固定翼では得ることのできない優れた空力特性を有する羽ばたき翼を開発する。具体的には、低速飛行時において良好な空力特性を有する翼形状、翼構造及び羽ばたき条件を見出す。

## 2. 研究成果の内容

### (1) 模型装置の製作

本共同研究の第一段階として、図1に示すような羽ばたき翼模型を設計製作した。本模型は振幅(Flapping Amplitude: FA)を羽ばたき無し(固定翼)から $\pm 30^\circ$ まで任意に可変できる機構を有している。具体的には、DC モーターRS-540SH (マブチモーター)の回転がハイポイドギヤを介して、翼の羽ばたき運動に変換されている。また、モーターの回転数をPWM制御によって調節することができ、ヒービング周波数は0~5Hzの範囲で任意に設定できる。さらにヒービング角度検出のため、インクリメンタル式ロータリーエンコーダ(MES-9-900P, マイクロテック・ラボラトリー)を取り付けている。



図1 模型概観

### (2) 流体力測定システム及び測定結果

本測定で使用したロードセルは、昭和測器製ひずみゲージ式6分カロードセルである。この6分カロードセルに、2チャンネルDCストレインアンプユニット3台を内蔵したデータ記録装置

(オムニエースRA2300, NEC Avio)を接続し、16ビットデジタルデータを取得している。サンプリング周波数1kHz, サンプリング時間20secである。実験条件は $U=10\text{m/s}$ とし、幾何学的平均翼弦長 $L_{\text{mean}}=47.1\text{mm}$ を代表長さとするレイノルズ数 $Re=3.1 \times 10^4$ である。模型迎角 $\alpha$ は、 $\alpha=0^\circ$ から $\alpha=40^\circ$ まで $1^\circ$ おきに測定を行った。本研究では羽ばたき周波数 $f$ を5Hzに固定し、翼厚 $t$ , アスペクト比 $AR$ , 羽ばたき振幅 $FA$ を変化させ、空力特性に与える影響を調査した。図2に揚力曲線を示す。固定翼(Case1)と比較して、特に $C_L$ が増加する傾

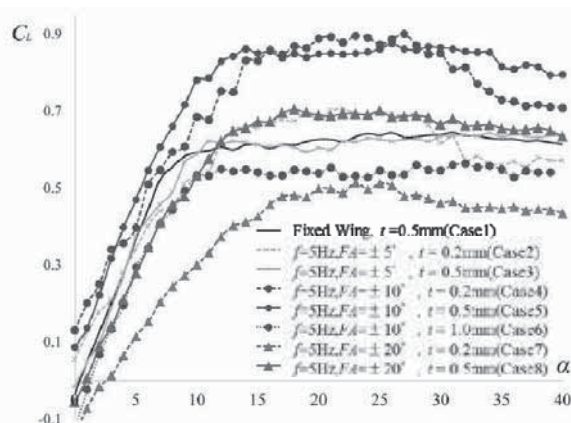


図2 揚力曲線

向が見られたのは、羽ばたき周波数 5Hz, 羽ばたき振幅  $FA=\pm 10^\circ$ , 翼厚  $t=0.2\text{mm}$  (Case4) 及び羽ばたき周波数 5Hz, 羽ばたき振幅  $FA=\pm 10^\circ$ , 翼厚  $t=0.5\text{mm}$  (Case5) の 2 条件であった. それぞれの条件における最大揚力係数  $C_{L\text{max}}$  を Case1 と比較すると, Case4 では 1.40 倍 ( $\alpha=27^\circ$ ) に, Case5 では 1.36 倍 ( $\alpha=26^\circ$ ) となっている. さらに本揚力曲線において, 優れた特性を示した羽ばたき条件の中で, Case4 が固定翼より高い揚抗比を示し, 良好な空力特性を有している事が確認できた. Case4 における最大揚抗比  $(C_L/C_D)_{\text{max}}$  は  $6.7(\alpha=5^\circ)$  であり, 固定翼の 1.77 倍になっている.

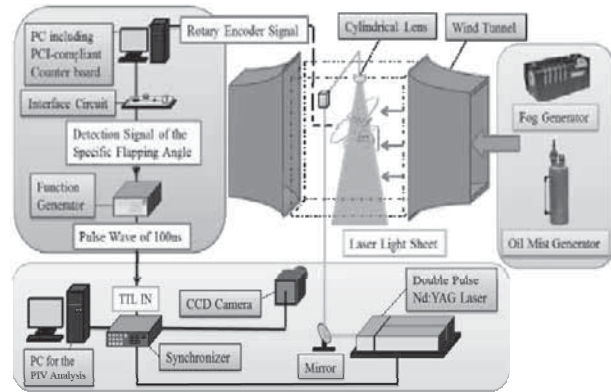


図3 PIV トリガー計測システム

### (3) PIV トリガー計測システム及び PIV 解析結果

本研究では, 羽ばたき一周期内における固定された任意の羽ばたき角度での PIV 計測を試みた. 図3に計測システム概要を示す. 羽ばたき翼模型に取り付けられているロータリーエンコーダのデジタル出力を, パルスカウンタボード (PCI-6204, インターフェース) を介して PC プログラム上でカウントし, 羽ばたき角度を検出する. 指定した羽ばたき角度  $\theta$  が検出された時に, カウンタボードからデジタル出力を行い (トリガー-OUT1), ファンクションジェネレータ (WF1974, エヌエフ回路設計ブロック) に外部トリガー信号として入力する (トリガー-IN1). ファンクションジェネレータは外部トリガー入力信号を検出すると, 100ns のパルス波をシンクロナイザに出力し (トリガー-OUT2), レーザがテストセクションに照射され PIV 計測開始となる. 図4に Case1 における PIV 解析結果を示す. この図を見ると, 前縁で剥離した流れが, そのまま WAKE として流れ去り, 翼表面に再付着していない事が確認できる. 図5に Case4 ダウンストローク時の PIV 解析結果で得られた剥離渦パターンを示す. 翼後縁において下面からの流れが上面にまき込み形成される剥離渦  $V_1$  に引き寄せられるように, 前縁剥離渦  $V_2$  が形成されている様子が確認できる. このように, ヒービング運動ダウンストローク時の中間点付近において, 大規模な前縁剥離渦が翼上面近傍にとどまっている事が確認でき, 揚力増加に寄与しているものと考えられる.

### 3. 研究目標の達成状況

ヒービング振幅, 板厚を変化させると, 空力特性が変化し, 固定翼と比較し良好な特性を示す組合せが存在する事が見出せたが, マイラー等のフィルム材を用いた弾性翼の有効性を証明するには至らなかった. 原因として, ステンレス製翅脈の形状, 本数等が適切でなかったものと考えられる.

### 4. まとめと今後の課題

模型に組み込んだエンコーダ出力を基に, PIV トリガー計測システムを構築し, 羽ばたき条件の流体现象への影響を定量的に評価する事ができた. 今後はより特性の良い弾性翼形状を見出し, 流体力と PIV の同時測定を行い, 空力特性改善に影響を与える流体现象について詳細に考察していく.

### 5. 研究成果

\*[1] T. Ishide et al, *Proc. of the AFI-2014*, pp. 6-7.

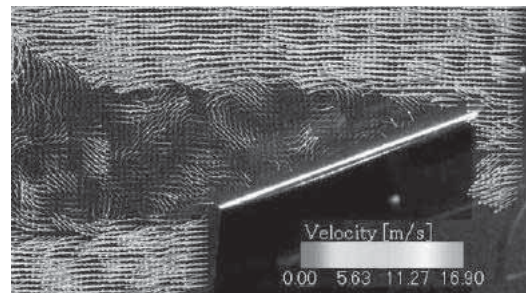


図4 PIV 解析結果 (Case1,  $\alpha=20^\circ$ )

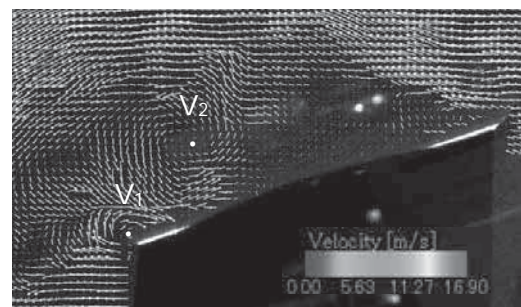


図5 PIV 解析結果 (Case4,  $\alpha=20^\circ$ )

課題番号	J14H002
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2014.4～2015.3
継続年数	1年目

**極低温微細固体窒素粒子を用いた環境にやさしいレジスト除去技術**  
**Eco-Friendly Resist Removal-Cleaning Technology Using Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Spray**

堀邊 英夫\*†, 石本 淳\*\*††  
 \*大阪市立大学工学部, \*\*東北大学流体科学研究所  
 †申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

半導体、LCD 等の電子デバイス製造では、微細素子のパターンニングに用いられる感光性高分子（レジスト）の除去プロセスに硫酸過酸化水素、アミン系有機溶剤など環境負荷の大きい薬液を使用している。これら有害な薬液を使用せずにレジストを除去できれば、環境負荷低減となりグリーンケミストリーの実現が可能となる。今回、「極低温微細固体窒素粒子」に着目し、環境調和型半導体洗浄システムの確立を目的に研究開発を行う。レジスト除去の課題は、従来の薬液に匹敵する高い除去速度の確立、デバイス製造工程上必ず含まれる高ドーズ量のイオン注入されたレジストの除去であり、これを上記「極低温微細固体窒素粒子」を用いてトライする。本提案の半導体洗浄システムは、ラバルノズル方式による超音速加速とメガソニック微粒化・氷核生成促進の融合技術により生成される極低温微細固体粒子を用いた運動力学的高速衝突と超高熱流束冷却の相乗効果を利用するものである。

**2. 研究成果の内容**

化学組成の異なるレジストに対する「極低温微細固体窒素粒子」の除去性により、極低温微細固体窒素粒子と高分子化合物との反応メカニズムの解明を行った。また、半導体製造工程において非常に困難である高ドーズ量のイオン注入レジストの除去も試みた。申請者らは、これまで三菱電機や大学において 10 年以上にわたり、レジスト除去に関して「水素ラジカル」や「湿潤オゾン」を用いた環境にやさしい除去技術を研究開発してきた。水素ラジカルは、水素ガスを 2,000℃に加熱した金属触媒表面で接触分解させることにより発生させレジストを還元分解するものである。湿潤オゾン方式はオゾンとレジストとの酸化反応（オゾニド生成）後、新たに微量の水分を供給することによりレジストを加水分解させカルボン酸に変換し水に溶解させるものである。今回の「極低温微細固体窒素粒子」によるレジスト技術との比較を行い、それぞれの技術の長所・短所を明確にした。

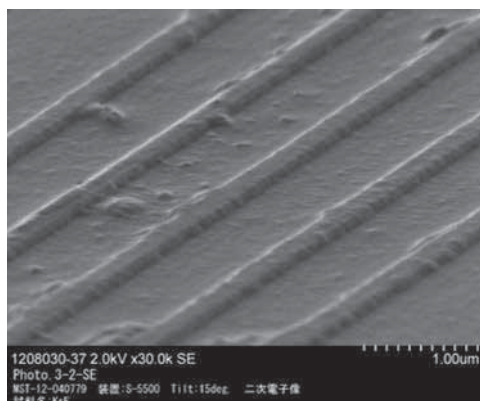


図1：固体窒素粒子噴霧流を用いた半導体ウエハのレジストはく離実験結果

### 3. 研究目標の達成状況

達成度は90%である。これにより、半導体ウエハ洗浄プロセスにおける、完全ケミカルフリー・純水フリータイプ・極低温微細固体粒子の超高速噴霧流を用いたドライ型のアッシングレスによる洗浄システムの開発に貢献するものと考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

極低温微細固体窒素粒子と高分子化合物との反応メカニズムに関する検討を行った。その結果、「極低温微細固体窒素粒子」によるレジスト技術と弊研究室でこれまで行ってきた「水素ラジカル」や「湿潤オゾン」を用いたレジスト除去技術との差異が明らかとなった。今後は、極低温微細固体窒素粒子の熱力学的効果が化学組成の異なるレジストはく離現象に及ぼす影響に関する検討を行う。

### 5. 研究成果（\*は別刷あり）

#### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

- [1] Jun Ishimoto, U. Oh, Tomoki Koike and Naoya Ochiai: Photoresist Removal-Cleaning Technology Using Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Spray, *ECS Journal of Solid State Science and Technology (JSS Focus Issue on Semiconductor Surface Cleaning and Conditioning)*, Vol. 3, No. 1, (2014), pp. N3046-N3053, doi:10.1149/2.009401jss.

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[2] Jun Ishimoto and Hideo Horibe: Development of Thermomechanical Resist Removal-Cleaning Technology using Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Spray, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 130-131.

#### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J14H003
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

**2次元キャビティ流れのホップ分岐**  
Hopf Bifurcation of 2D Driven Cavity Flows

岩津 玲磨\*†, 服部 祐司\*\*††

\*東京電機大学工学部, \*\*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**

摺動する壁によって閉じた領域内にひき起こされるキャビティ流れは、ベンチマーク問題としてよく計算されるが、高レイノルズ数でどのような流れになるかはあまり良くわかっていない。POD 法をもちいた既往の研究によれば、定常流れから非定常流れに遷移するホップ分岐がキャビティのアスペクト比  $A$  によってその種類を変えるという。しかし、アスペクト比を変えた場合の臨界レイノルズ数は、限られた範囲  $1 \leq A \leq 2$  でしか値が知られていない。また、別の計算によれば同じアスペクト比( $A=1$ )のキャビティで 2 種類のホップ分岐が観察されたことが報告されている。そこで、本課題ではアスペクト比を変えて浅いキャビティ( $A < 1$ )と深いキャビティ( $A > 1$ )についてホップ分岐の様子を調べることにしたい。

**2. 研究成果の内容**

流れの様子を、高精度差分法をもちいた直接計算によって調べた。計算法の詳細は、不等間隔格子の(4次精度)コンパクト差分法、マルチグリッド(FMV)法と4位(5段)の最適化低容量ルンゲ・クッタ法によっている。格子解像度を変えた粗密の格子状において、初期値から長時間積分した解を求め、それらを解析した。もちいた粗格子と密格子のあいだで、格子依存性が分岐の種類におよぼす影響はないことが確認された。アスペクト比  $A=0.8$  と  $1.5$  の場合について、2次ホップ分岐までの様子が調べられた( $A=1.5$  の場合を図1に示す)。

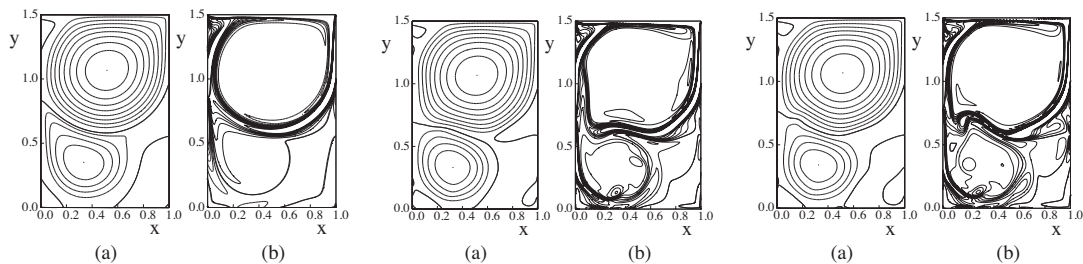


図1: 流線と渦度 ( $t=10000$ ).  $A=1.5$ ,  $Re=5250, 7200, 8400$ . それぞれ1次ホップ分岐直後の周期解, 2次ホップ分岐後の準周期解, 2回目の2次ホップ分岐後のほぼ周期解.

**3. 研究目標の達成状況**

「予想される成果」 1)  $A=0.8$  の場合に観察された分岐が超臨界だったので、ホップ分岐



が  $A=1$  を境に種類を変えるという過去の文献については、少なくとも部分的にはそうならないことが分かった。2) 高レイノルズ数で周期解に回帰する現象については、 $A=0.8$  の場合にはみられなかった。また  $A=1.5$  の場合にはほぼ周期解ではあるが、基本振動数以外の振動数が励起される流れになり、 $A=1.0$  の場合とは様子が異なった( 図 2)。

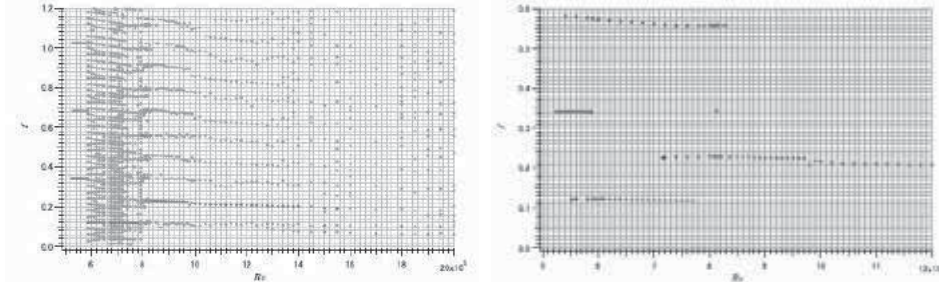


図 2 : (左) 卓越振動数と  $Re$  の関係。(右) 履歴の観察された振動数.  $A=1.5$ .

#### 4. まとめと今後の課題

- 1) 浅いキャビティ( $A=0.8$ )と深いキャビティ( $A=1.5$ )の両方で1次ホップ分岐は超臨界だった。他のアスペクト比、とくに文献の少ない浅いキャビティ( $A<1$ )の場合について調査を進める。
- 2) 準周期解がさらに  $Re$  を増加させると周期解に戻る現象は  $A=0.8$  で観察されなかったのので、 $A=1.0$  の近辺で探索する。

#### 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] R. Iwatsu and K. Itoi: Hopf bifurcation of 2D driven cavity flows, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 184-185.

[2] 岩津 玲磨: 2次元キャビティ高レイノルズ数流れのアスペクト比依存性, 第63回理論応用力学講演会(NCTAM2014)講演論文集, (2014), GS02-09, 2pages.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J14H004
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2014.4~2015.3
継続年数	1年目

**タンパク質の糖鎖修飾における糖転移酵素の空間的認識に関する研究**  
**Study of 3D Recognition by Glycosyltransferase in Protein Sugar Modification**

池田 (向井) 有理<sup>††</sup>, 越中谷 賢治<sup>\*</sup>, 太田 信<sup>\*\*††</sup>  
<sup>\*</sup>明治大学理工学部, <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**

糖鎖は核酸やタンパク質に次ぐ第三の生命鎖として知られており、タンパク質の機能を制御する糖鎖修飾は生体内の多くの生化学反応に必要不可欠である。糖鎖を形成する糖の種類には多くのバリエーションがあり、それぞれ特異的な生化学反応と密接に関連している。これらは発生・分化、シグナル伝達などの生命現象をはじめ、免疫不全、感染症やガンなど、ヒトの疾患とも深く関わっていることから、糖鎖修飾を利用してタンパク質の機能をコントロールすることにより、医薬分野への応用も期待できる。適切な種類の糖鎖を標的のタンパク質へ効果的に導入するためには、糖鎖修飾の分子機構の解明が必須である。

本研究では、O結合型糖鎖修飾を受けるタンパク質の立体構造情報を基に、糖鎖修飾位置付近の空間的アミノ酸出現傾向の調査を通して、糖転移酵素による認識を中心とした糖鎖修飾の分子機構の理解を目指すとともに、O結合型糖鎖修飾予測法開発のための基盤を整えることを目的としている。

**2. 研究成果の内容**

本研究では O 結合型糖鎖を修飾する糖転移酵素の空間的認識機構を明らかにする目的で、O結合型糖鎖修飾残基周辺の立体構造や、空間的アミノ酸出現傾向を調査した。

まず、立体構造回折像に O 結合型糖鎖修飾を含むタンパク質を対象とし、糖鎖分子を中心とした単位球内に出現するアミノ酸の種類や物理化学的性質を解析することにより、糖鎖と相互作用しているアミノ酸残基の特定を試みた (図 1)。その結果、糖鎖分子を中心とした半径 5.0 Å 内に糖種依存的に特異的なアミノ酸の出現傾向が見られることを明らかにした。また、芳香族アミノ酸の出現傾向が糖鎖修飾部位近傍に顕著に見られることを示した。さらに、糖種に応じて、異なる芳香族アミノ酸が出現していることを明らかにした (図 2)。また、糖種ごとに O 結合型糖鎖修飾残基周辺の二次構造の出現傾向を調査し、それぞれの糖種を修飾する糖転移酵素が好む二次構造の特徴を明らかにできた。本研究を通して、新規の糖鎖修飾予測法や糖種判別法を構築するためのパラメータが抽出できた。

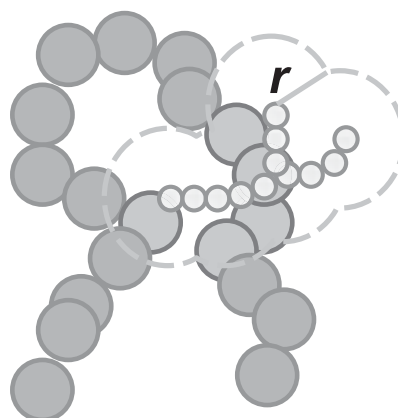


図 1 : 計算領域

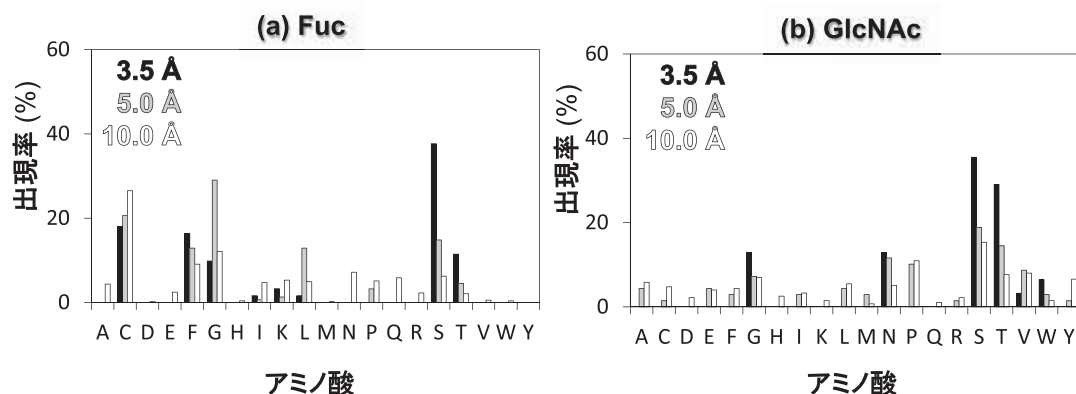


図2：糖鎖修飾部位を中心とした単位球内のアミノ酸出現傾向

### 3. 研究目標の達成状況

本研究は 2014 年度で最終となる。研究成果は、学術論文へ投稿した。投稿原稿は修正の後受理され、現在は先行的に最終レイアウト前の原稿を Web 公開中である。また、国内外学会で発表を行った。特許申請に関しては、予測方法確立後直ちに出願できるよう準備中である。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では、糖鎖修飾の分子機構を糖の種類ごとに理解する目的で、O結合型糖鎖修飾位置周辺の空間的アミノ酸出現傾向解析を行った。その結果、糖種ごとの空間的アミノ酸出現傾向と構造的特徴の抽出に成功した。今後は空間的位置特異的アミノ酸出現傾向を用いて糖鎖修飾予測、糖種判別の方法を確立し、それらに関する特許出願、論文発表、国内外学会発表を予定している。

### 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] Kenji ETCHUYA, Yuri MUKAI: Structural Characteristics around O-glycosylation Sites in Mammalian Proteins, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 10, No.1, (2015).

#### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

\*[2] Kenji ETCHUYA, Makoto OHTA, Yuri MUKAI: Study of 3D Recognition by Glycosyltransferase in Protein Sugar Modification, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 92-93.

[3] 越中谷賢治, 向井有理: O型糖鎖修飾を受ける哺乳類タンパク質の構造的解析, 第37回日本分子生物学会年会, 横浜, (2014).

[4] Kenji ETCHUYA, Yuri MUKAI: Structural Characteristics of Fuc Modification Sites in Mammalian Proteins, *13th European Conference on Computational Biology*, Strasbourg, Sep., (2014).

#### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

課題番号	J14H005
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4 ~ 2015.3
継続年数	1年目

**旋回流プラズマジェットによる熱プラズマ微粒子形成プロセスの最適化**  
**Optimization of the Thermal Plasma Fine Particle Synthesis Process Using Vortex Plasma Jet**

安藤 康高\*†, 野田 佳雅\*\*  
 上原 聡司\*\*\*, 中嶋 智樹\*\*\*, 西山 秀哉\*\*\*††  
 \*足利工業大学工学部, \*\*足利工業大学総合研究センター  
 \*\*\*東北大学流体科学研究所  
 †申請者, ††所内対応教員

**1. 研究目的**

液相プリカーサ溶射 (SPPS) は、熱プラズマを用いる気相合成プロセスであり、高温場でのプラズマ化学反応が利用できることから、高速微粒子合成法への応用が期待されている。しかしながら、DC アークにより形成される熱プラズマジェットは、温度や密度の軸方向、半径方向分布が急峻であるため、均質な微粒子合成が困難とされている。一方、RF やマイクロ波を用いた熱プラズマの場合には、均一な空間分布を持つプラズマの形成は可能であるが、電磁波の遮へい等が必要になり設備コストが高いという問題を抱えている。そこで、安価な設備で均質性の高い微粒子を高速に合成するプロセスの開発を目的として、液相プリカーサの均一加熱が可能な旋回流プラズマジェット発生装置を試作し、本装置を用いた SPPS による酸化チタン微粒子の形成を試みた。

**2. 研究成果の内容**

本研究で使用した SPPS 装置の模式図を図 1 に示す。本装置は、旋回流ノズル付 Ar プラズマトーチ、直流電源、Ar 作動ガス供給系、出発原料供給系より構成されており、出発原料供給装置として市販のエアブラシを用いている。酸化チタン微粒子は、表 1 の条件で合成され、旋回流ノズル出口より 10mm 下流に設置された SUS304 平板にて捕集される。

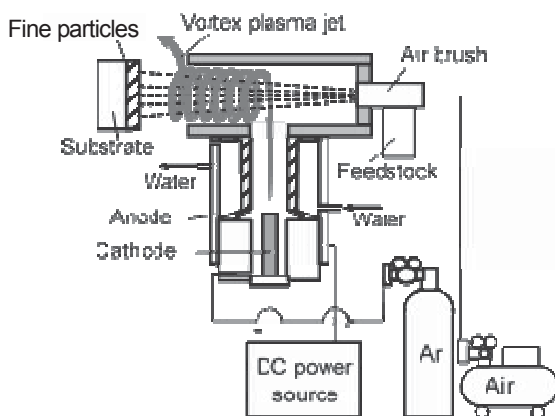


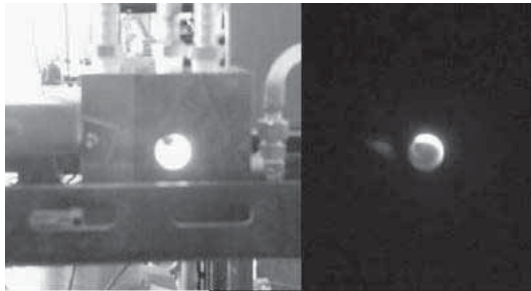
表 1 : 微粒子合成条件

Working gas (Flow rate)	Ar (20 l/min.)
Carrier gas (Flow rate)	Air (2 l/min.)
Discharge power	200 A, 30 V
Deposition distance	10 mm
Feedstock	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH diluted TTIB* solution
Feedstock quantity	20 ml
Substrate	304 stainless steel

\*TTIB: Titanium tetra iso butoxide

図 1 : 旋回流 SPPS 装置の模式図

図2にプラズマジェット発生時（原料供給前）の旋回流ノズル正面の外観写真を示す。プラズマトーチより発生したプラズマジェット（自由噴流）が、旋回流ノズル内壁に沿って移動し旋回流プラズマジェットが形成されていることがわかる。図3に、形成された微粒子のX線回折結果を示す。X線回折の結果から微粒子の主成分はアナターゼ主体の酸化チタンであり、光触媒微粒子製造プロセスとしての有用性を示唆する結果が得られた。また、中心部より半径10mmの領域内ではいずれもほぼ同一の結晶構造を有する微粒子が形成されており、本プロセスにより形成された微粒子の均質性を確認することができた。



a) 遮光フィルタ未装着 b) 遮光フィルタ装着

図2：旋回流ノズル正面の外観写真

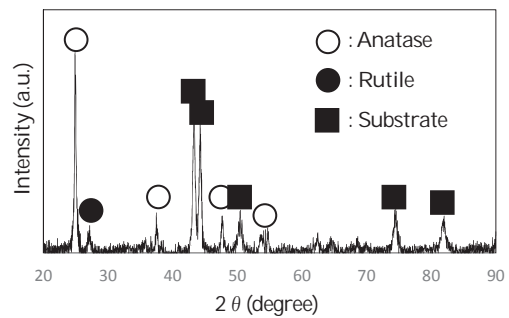


図3：微粒子のXRDパターン

### 3. 研究目標の達成状況

本年度は、旋回流プラズマジェットの形成、酸化チタン微粒子の形成については研究目標を達成した。また、従来と同一の冷却水流量であるにもかかわらず、本研究で開発した旋回流ノズルの排水温度上昇速度は従来のものより低いことから、熱損失の低減（熱効率の向上）も確認することができた。

### 4. まとめと今後の課題

本研究にて開発した旋回流ノズルの旋回流プラズマジェット形成能及び、本プロセスの酸化チタン微粒子系性能を確認することができ、定性的であるが熱損失の低減も確認できたことから、今後は本ノズルの熱効率の定量評価を行うとともに、微粒子のみならず薄膜形成条件の確立も図る予定である。

### 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] Y. Ando, Y. Noda, S. Uehara and H. Nishiyama: Titanium Oxide Film Deposition by SPPS using Vortex Ar/N<sub>2</sub> Plasma Jet, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 54-55.

#### 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

<連携公募共同研究プロジェクト>



課題番号	J14R01
区分	連携公募共同研究プロジェクト
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4～2015.3
継続年数	2年目

**漂流物混入型津波に関するスーパーコンピューティングとスケールモデリング**  
**Supercomputing and Scale Modeling of Flotsam Mixed Tsunami**

石本 淳\*†, 今村 文彦\*\*††, Kozo Saito\*\*\*††, Jean-Yves Cavaille\*\*\*\*††  
 \*東北大学流体科学研究所, \*\*東北大学災害科学国際研究所  
 \*\*\*IR4TD, University of Kentucky, USA  
 \*\*\*\*MATEIS, INSA-Lyon, France  
 †申請者, ††所外対応研究者

## 1 研究目的

現在、海洋学者等により行われている津波シミュレーションは数 100 km に渡る広領域を対象とするものが主であり、解析に用いられる方程式も長波近似等の何らかの近似を施した方程式を用いるのが慣例となっている。このような従来型シミュレーション手法によっては津波高さや浸水域の広域予測に対してある程度の成果を得られてはいるものの、長波近似（鉛直方向流速分布は一樣と仮定）を用いているため津波が構造物体に及ぼす力の影響に関しては正確な予測が行われているとは言えず、工業プラント等の比較的狭い領域における土地や建造物のダメージ予測に対しては適用が不可能であるのが現状である。さらに今回の震災で非常に大きな問題となった、第二波・第三波の津波すなわち震災がれき・漂流物が引き波によって混入した場合の津波は破壊力が通常の津波に比較して非常に増大すると考えられるが、従来型の海水単相のみの津波シミュレーション手法のみはダメージ予測が困難であると言える。

そこで本研究では、漂流物・震災がれきが混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い、スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価を行う。本シミュレーションによる津波衝撃力評価に関する定量予測精度高度化のため、沿岸海域の模型化と津波スケールモデリングの概念を用いた基礎実験を行い、シミュレーション結果との比較検討を行う。

また、陸上構造物の津波衝撃緩和を可能にする配置最適化・形状最適化シミュレーション、沖合に建造する津波緩衝用構造物の形状や配置に関するシミュレーション予測を行う。

## 2 研究成果の内容

漂流物・震災がれきが混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い、スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価を行った。本シミュレーションによる津波衝撃力評価に関する定量予測精度高度化のため、沿岸海域の模型化と津波スケールモデリングの概念を用いた基礎実験を行い、シミュレーション結果との比較検討を行った。

混相津波シミュレーションのベースとなる専用コードを開発しており、1) 自動車の漂流、2) 漂流木が混入した津波が水門に衝突する場合、3) 漂流小タンクが固定された大タンクに衝突



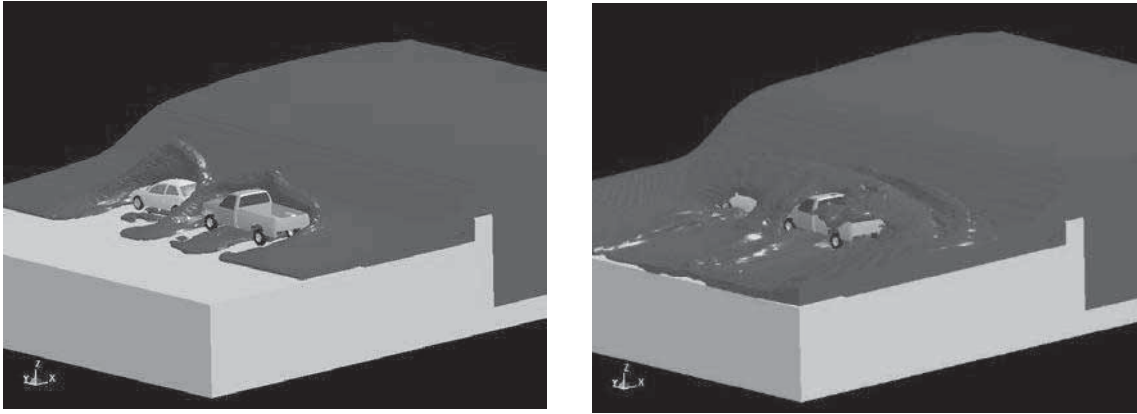


図1 津波による自動車漂流に関する融合数値計算結果

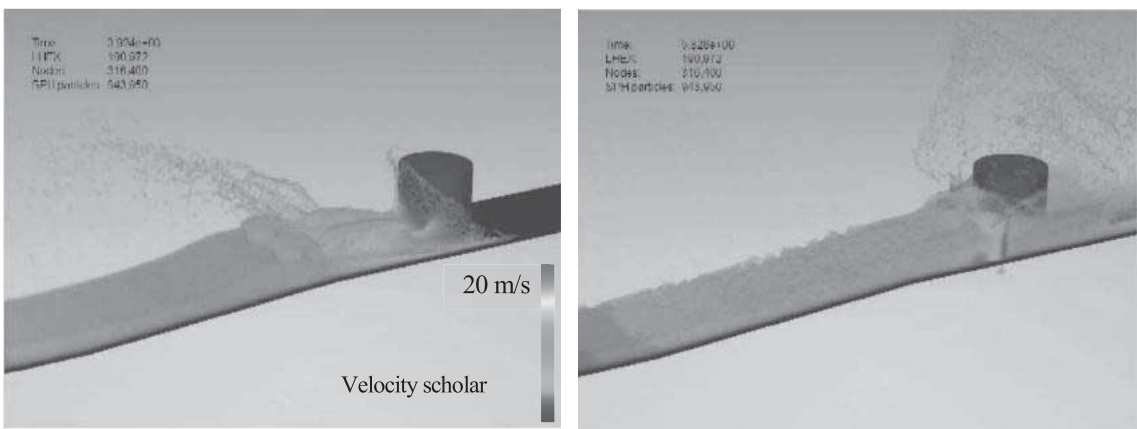
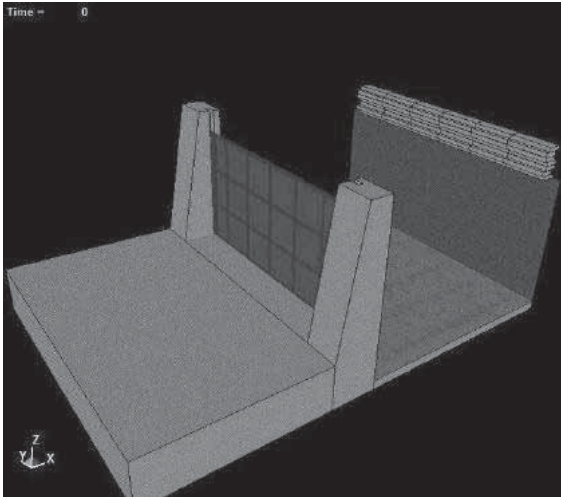


図2 津波による小型タンク漂流と陸上構造物への衝突現象に関する融合数値計算結果

する場合のシミュレーションを行った。その結果、流木が混入した津波の場合は水門に対し衝撃力が2倍以上に増加することが判明した。

また、重量の重いオイルタンクが津波に混入した場合、混相津波が陸上構造物に与える衝撃力は単相津波の場合よりも10倍以上に増加することが判明した。



#### Specifications for numerical model

- Tsunami: Euler element (260,288 elements)
- Water gate and prop : Lagrange element (22,728 elements) [Concrete section : Rigid body, Water gate : Elastic-plastic body]
- Flotsam: Lagrange elements (Rigid body, Specific weight: 0.9, Total mass 1.1 ton) (1,260 el elements)
- Initial velocity of tsunami: 3.0 m/s
- Size of water gate: width: 5.0 m, height: 2.5 m

Fig. 3. Computational geometry for lumber mixed tsunami impacting a water gate.

#### The lumber mixed tsunami's hydrodynamic impact behavior for a water gate

Next, the effect of flotsam mixing on the impact force of the tsunami was numerically predicted. In the present computation, the lumber mixed tsunami's hydrodynamic impact behavior for a water gate was performed. Figure 3 shows the computational geometry for lumber mixed tsunami impacting a water gate, and the specifications of computational model items including the initial numerical conditions. For the dynamic material characteristics, it was assumed that the concrete section had a rigid body and the water gate had an elastic-plastic body.

Figure 4 shows the numerical results of the lumber mixed tsunami's hydrodynamic impact behavior on the water gate. The computation was performed with lumber and without lumber to study differences of tsunami impact behaviors. In Figure 4, the color contours in the water gate represent different magnitudes of stress. Interestingly, the change in flexibility and impact stress of the water gate by the impact of lumber mixed tsunami was numerically reproduced. Figure 5 shows the effect of flotsam (lumber) in the tsunami on the impact force to the water gate. It was found that the impact force of lumber mixed with a tsunami was two times greater than that of single phase tsunami (without flotsam case).

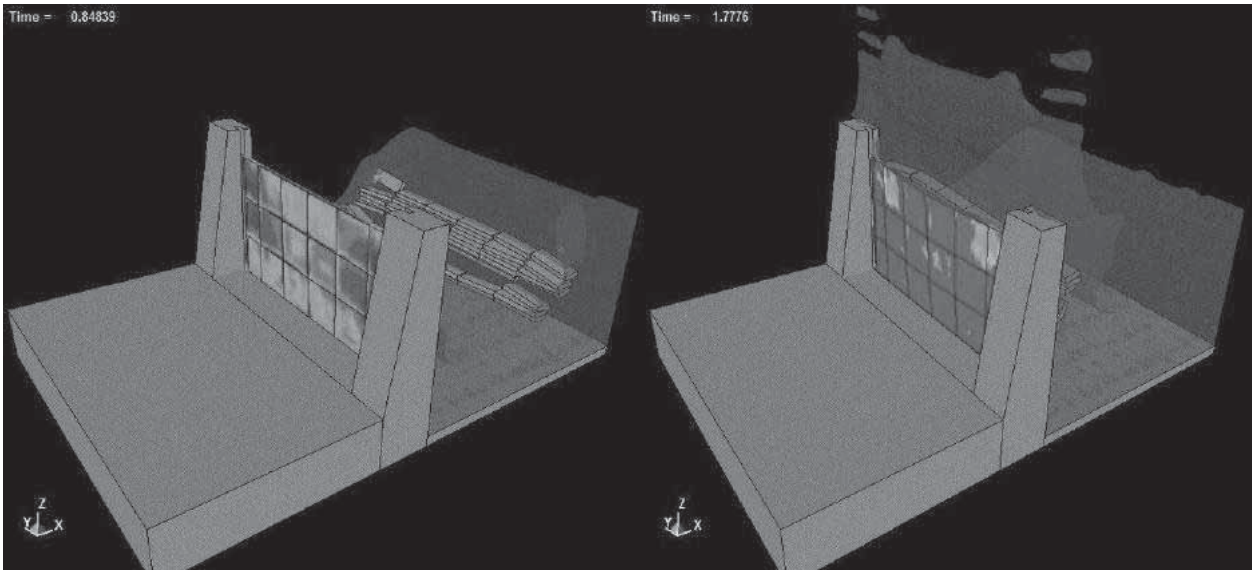


Fig. 4. Lumber mixed tsunami's hydrodynamic impact behavior on the water gate.

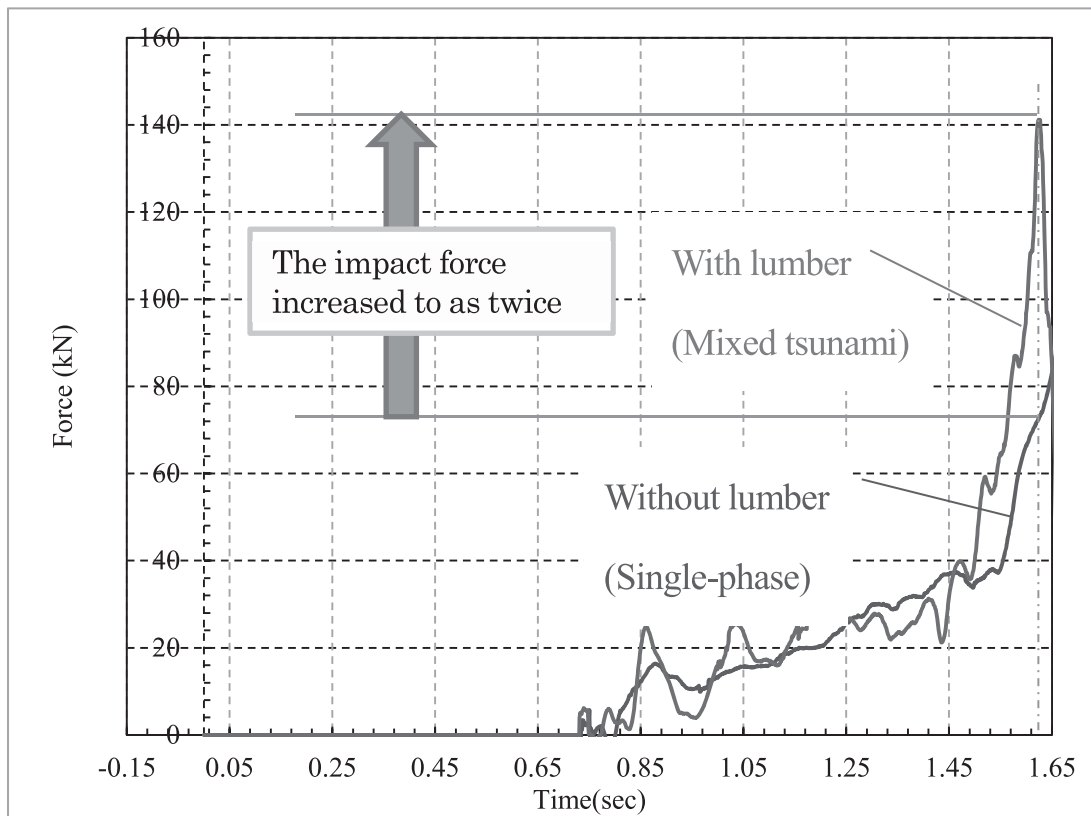


Fig. 5. Effect of flotsam (lumber) mixing with tsunami on impact force for the water gate.

### Computation of a flotsam mixed tsunami behavior by SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) method

In the final computation, we constructed the SPH method to investigate the interaction between a tsunami and structures, and also to investigate the damage of a flotsam mixed tsunami on land structures. For the numerical modeling, we assumed the following mixed tsunami flow conditions.

- A flotsam or obstacle was carried away by the backwash of the first wave of the tsunami, and then pushed by a second wave of the tsunami.
- The flotsam went onto the shore and collided with the land structure.

To analyze these phenomena, we used the computational geometry which demonstrates two small tanks impacting a large tank, as shown in Fig. 6. The tsunami wave was assumed to break down within collapsing rectangular water column as it collided with the small tank and began to move the small tank because of the impact force of the tsunami. These small tanks in the tsunami wave then collide with the large tank which is fixed to the ground. The small cylindrical tanks were assumed to be filled with oil, and were regarded as obstacles or

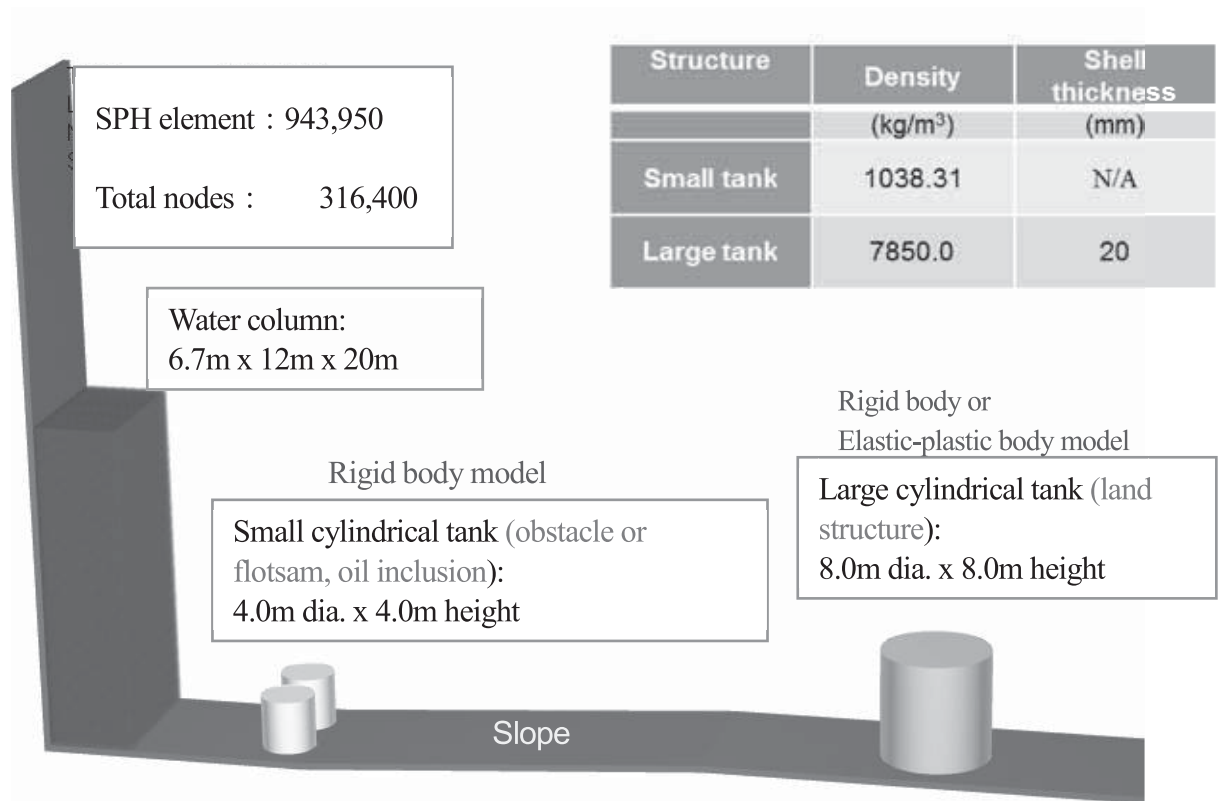
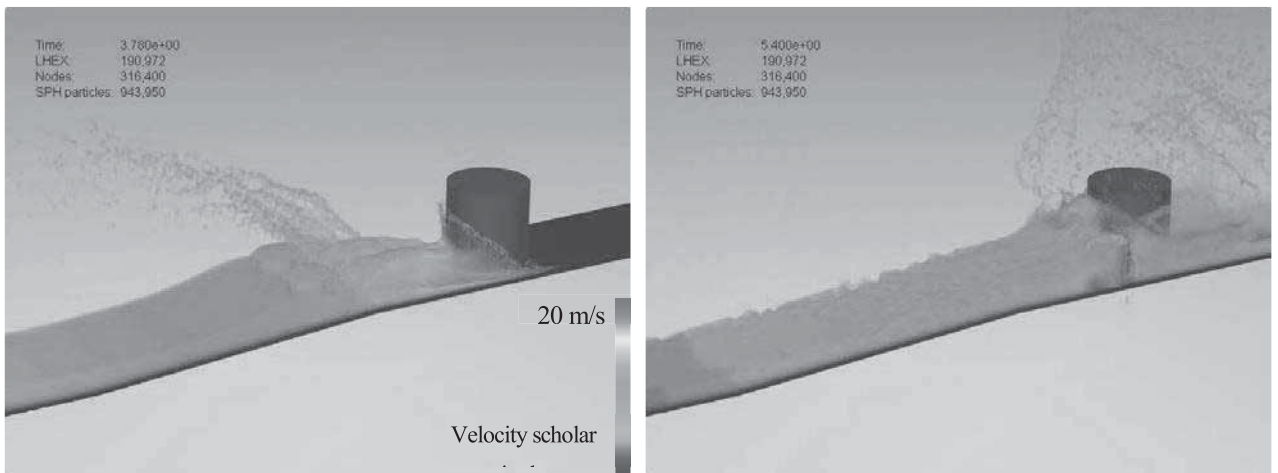


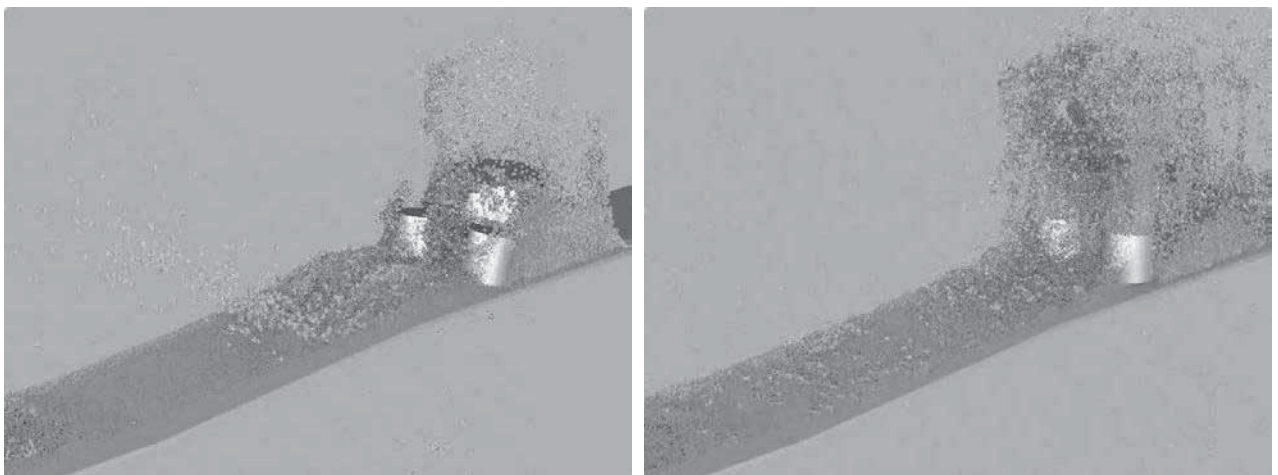
Fig. 6. Computational geometry for small tank mixed tsunami impacting a land structure.

flotsam within the tsunami with a slip boundary condition relative to the ground. The large cylindrical tank was fixed to the ground, and was assumed to be hollow (empty) with a shell thickness of 20 mm.

Figure 7 shows the SPH numerical results of the flotsam mixed tsunami. The flow characteristics and behavior of its interface deformation and collision with the land structures were clearly simulated.



(a) Small tank mixed tsunami flow characteristics and its impact behavior on a land structure



(b) Pov-RAY rendering result

Fig. 7. Flotsam mixed tsunami flow characteristics and behavior of its interface deformation and collision with a land structure by SPH method.

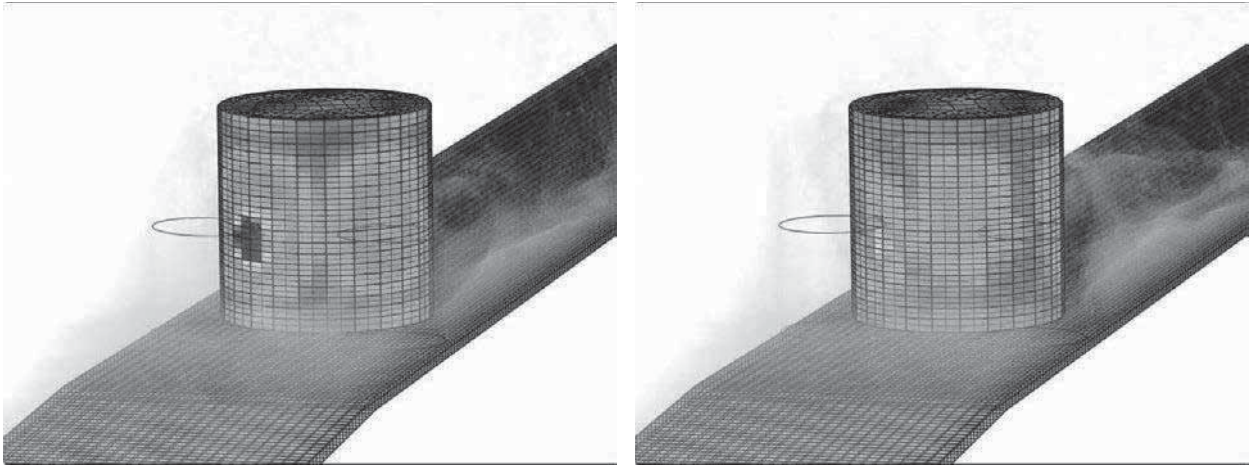


Fig. 8. Impact stress profile of land structure while flotsam mixed tsunami impingement by SPH method (Color contour denotes the scalar magnitude of stress in land structure).

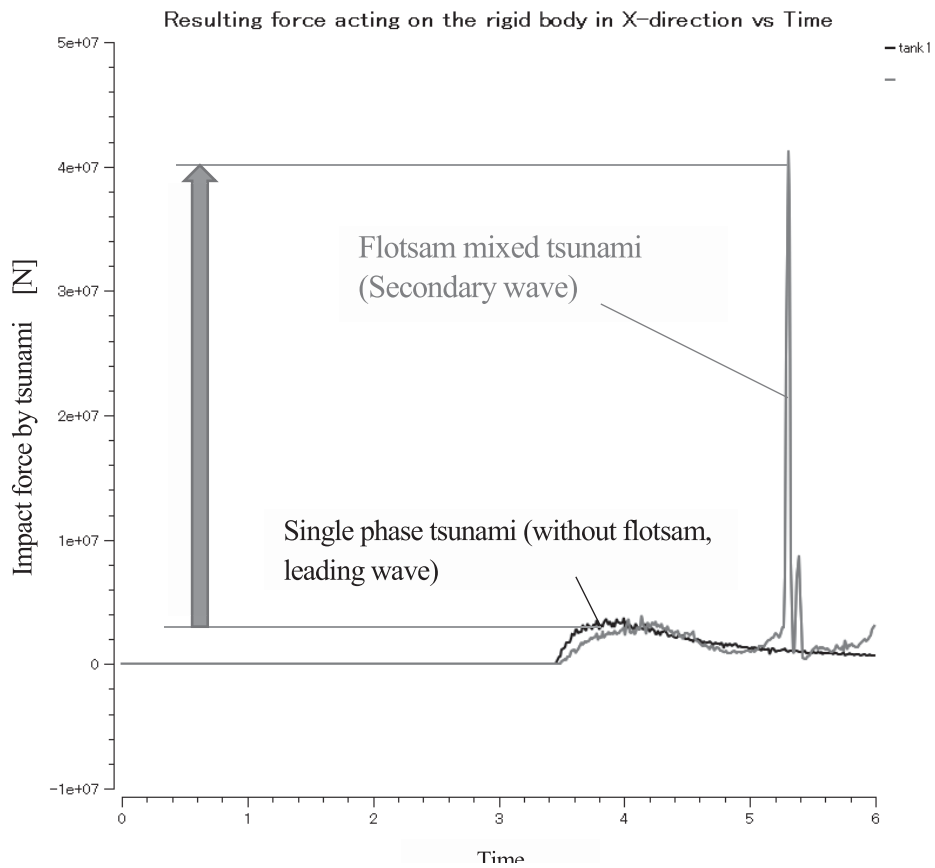


Fig. 9. Effect of flotsam mixing with tsunami on the impact force with a land structure.

Figure 8 shows the impact stress profile of the land structure with flotsam mixed tsunami impingement; an elastic-plastic body assumption was applied for the land structure. When the two small tanks impinge the larger tank land structure the maximum impact stress was 100MPa, and a corresponding maximum plastic strain of 0.0015 was numerically obtained.

Figure 9 shows the effect of flotsam mixing with the tsunami on the impact force to the land structure. In the case of a single phase tsunami (without flotsam, regarded as a leading wave), the maximum impact force was 3.5MN. In the case of a flotsam mixed tsunami (regarded as secondary wave), the maximum impact force reached 42MN. In other words, it was found that the impact force magnitude of flotsam (small tank) mixed with the tsunami was over 10 times than that of single phase (without flotsam case) tsunami.

### Scale modeling the effect of flotsam mixing on tsunami damage

The flotsam is accelerated by the water flow caused by the tsunami, with its motion and hydrodynamic force dominated by the inertia of the water and flotsam and by the force of gravity acting on the water and flotsam. The dominant physical law and similarity law for this computational system are introduced by following formula.

Dominant physical law:

Buoyancy:  $F_b = \Delta\rho gl^3$

Inertia:  $F_i = \rho_m l^3 \frac{l}{t^2}$

$$v = \frac{l}{t}$$

$$\xrightarrow{\downarrow} \rho_m l^2 v^2$$

Similarity law:

$$\pi_1 = \frac{F_i}{F_b} \rightarrow \frac{\rho_m v^2}{\Delta\rho gl} \quad (\text{Froude number of flotsam mixed tsunami})$$

$$\pi_2 = \frac{v^2}{gl} \rightarrow (\text{Froude number of single-phase tsunami})$$

$$\frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{\rho_m}{\Delta\rho} \rightarrow (\text{Effect of flotsam mixing on tsunami damage})$$

where  $\Delta\rho$  is the density difference between flotsam and seawater,  $\rho_m$  is the mixture density of tsunami,  $g$  is the gravitational acceleration,  $v$  is the velocity,  $l$  is the characteristic length, and  $t$  is the time. According to the above analysis, it was found that Froude number was suitable to evaluate the effect of mixing of flotsam on the tsunami impact damage. As the mixture density increased, namely, the amount of flotsam became larger and the density difference between flotsam and seawater became smaller, the damage of the mixed tsunami to the land structure increased. The scale effect of the mixture density and the density difference between flotsam and seawater became the dominant factors for tsunami impact force and damage prediction.

Therefore, quite reasonable results have been obtained by the present computations in which

the land structure received much greater damage by the impingement of a small tank mixed tsunami as compared to that of the lumber mixing case.

### Experimental approach for tsunami scale modeling

To validate the numerical results on the height and traveling velocity of a tsunami wave, University of Kentucky students conducted the 1/1000<sup>th</sup> and 1/2000<sup>th</sup> scale model during the ME 565 course for the Great East Coast Earthquake generated tsunami in March 2011. A commercially available detergent was added to water to reduce the surface tension force for the scale model to approximately satisfy the Weber number, a ratio of the inertia and the surface tension forces. A series of color photographs including Figure 10 were taken during the experiments, which showed the scale model tsunami shape and behavior surprisingly similar to the full scale tsunami reported by a Japanese TV news. The moving speed of



Fig. 10. A color photo taken from side for the 1/1000<sup>th</sup> scale model generated tsunami.

tsunami was roughly correlated by the  $Fr$  number scaling although the source term was not scaled, since the full scale data was not available at that time. This is another surprise for validity of this simple scale model experiment.

### 3 研究目標の達成状況

漂流物混入型津波に関する混相流体力学的扱いを考慮した数値計算モデルを開発した。粒子法の一つである SPH 法(Smoothed Particle Hydrodynamics Method)と衝突解析用 FEM のカップリングによる混相津波シミュレーション法を開発した。

達成度は 80%である。これにより、がれき・漂流物が混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い、スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価が可能となる。

### 4 まとめと今後の課題

SPH 法による漂流物・震災がれきが混入した津波ダメージや衝撃力を評価するコンピューターシミュレーション (模擬実験) 技術を開発した。さらにスケールモデリングに基づくモデル実験結果を計算情報として CFD 計算過程に導入する融合計算手法の基本方針を確立した。

今後の方針として、粒子法を用いた混相津波と陸上構造物の衝撃相互作用が解析可能となるシミュレーション法を開発する。

広域に渡る津波挙動と衝撃力評価が実験室レベルで解明可能となるスケールモデリング手法の開発と模型実験を行う。構造物に漂流物混入型津波が衝突した際の弾塑性変形を考慮したシミ



ュレーション法を開発し、沿岸部構造物のダメージ予測を行う。

また、漂流物・震災がれきが混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い、スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価を行う。本シミュレーションによる津波衝撃力評価に関する定量予測精度高度化のため、沿岸海域のモデル化と津波スケールモデリングの概念を用いた基礎実験を行い、シミュレーション結果との比較検討を行う。また、陸上構造物の津波衝撃緩和を可能にする配置最適化・形状最適化シミュレーション、沖合に建造する津波緩衝用構造物の形状や配置に関するシミュレーション予測を行う。

## 5 研究成果（\*は別刷あり）

### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] Jun Ishimoto: Coupled Supercomputing of Fluid and Structure Interaction Caused by Flotsam Mixed Tsunami, *Proceedings of the 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2014)*, Sendai International Center, April, (2014).

### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] Jun Ishimoto: Development of disaster damage prediction system for flotsam mixed tsunami and tsunami damage mitigation using offshore Mega-floating Structures, *The UN World Conference on Disaster Risk Reduction (Public Forum)*, Sendai, March, (2015).
- [3] Jun Ishimoto: Supercomputing of tsunami damage mitigation by offshore mega floating structures, *International Innovation Workshop on Tsunami, Snow Avalanche and Flash Flood Energy Dissipation*, Chamonix, France, October., (2014). [Invited]
- \*[4] Jun Ishimoto and Kozo Saito: Numerical Study of Flotsam Mixed Tsunami and Tsunami Scale Modeling, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 190-191.
- [5] 石本 淳：先端産業における混相流動のスーパーコンピューティングと高度化，日本機械学会 産業界における CFD 利用の高度化に関する研究分科会，東京理科大学・神楽坂キャンパス，(2014)．[招待講演]
- [6] 石本 淳：先端混相流に関する融合型スーパーコンピューティング，第4回 DADiSP 利用技術研究会，ベルサール九段，(2014)．[招待講演]
- [7] 石本 淳：混相流動のスーパーコンピューティングと先端産業応用，日立研究所技術研究会，日立研究所機械研究センター，(2014)．[招待講演]

### 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J14R02
区分	連携公募共同研究プロジェクト
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	1年目

**先進的医用超音波イメージングに関する研究**  
Investigation on Advanced Medical Ultrasound Imaging Technology

橋本 浩\*†, 船本 健一\*\*††, 田邊 将之\*\*\*††, 島崎 正\*, 地挽 隆夫\*,  
千葉 吉規\*\*, 井上 浩介\*\*, 早瀬 敏幸\*\*

\*GE ヘルスケア・ジャパン株式会社 超音波製品開発部

\*\*東北大学流体科学研究所

\*\*\*熊本大学大学院自然科学研究科

†申請者, ††所内対応教員または所外対応研究者

## 1. 研究目的

超音波を用いた医療検査技術は成熟期にある反面, その新たな応用にはまだ多くの潜在的可能性(シーズ)がある. 本研究では, 1) 超音波による軟組織の物理特性の評価, 2) 超音波を用いた微細石灰化の検出, 3) 超音波とマイクロ・ナノ粒子のインタラクション解明の3つのシーズについて検討を行う.

## 2. 研究成果の内容

本研究では, 超音波照射に関する条件を変えた時, 軟組織中の微細石灰化からのエコーがどのような変化をするか非生体実験を行った. 生体模擬ファントムには, 直径 1.2mm のガラスビーズを微細石灰化に見立て, 濃度 7 %wt の PVA-H ゲルファントムに内包した(図1). 医用超音波診断装置にはGE社製 LOGIQ S8を使用し, リニアプローブのGE社製 ML6-15を使用した. その他の超音波診断装置の条件を表1に示す. Color Doppler Modeで超音波照射の繰り返し周波数(Pulse Repetition Frequency: PRF)を変えながら, ガラスビーズからのエコー信号を1フレームあたりパケットサイズ(Packet Size: PS)分取得した. 取得した複数のエコー信号 $r_i$ ( $i=1, 2, \dots, PS$ )を直交検波したI/Q信号を用い, エコー信号のゆらぎ解析を行った. ゆらぎ $\sigma$ の算出式は,

$$\sigma^2 = \frac{1}{PS} \sum_{i=1}^{PS} \{\tilde{r} - r_i\}^2,$$

$$r_i = I_i + jQ_i,$$

$$\tilde{r} = \frac{1}{PS} \sum_{i=1}^{PS} r_i$$

とする. なお, 本実験ではPSを8とした.



図 1 : (a)生体模擬ファントムと(b)ガラスビーズ

表 1 : 超音波診断装置の実験条件

Scan mode	Color Doppler (CD)
Frequency of CD	5.0 MHz
Image depth	4.5 cm
ROI depth	2.5 cm
PRF	300 – 3200 Hz
Packet size (PS)	8
Acoustic output	100 % (displayed)

ガラスビーズ近傍のエコー信号例を図 2 に示す. エコー信号のゆらぎ量を図 3 に示す. PRF が 0.5 kHz 以上において, PRF が高くなるにつれてゆらぎ量が減少していくことがわかった. さらに Twinkling sign の出現頻度を調べるために, 最終的に表示されるカラードプラ画像を解析し, Twinkling Sign のピクセル総量をフレームごとに測定した. 観測結果を図 2 および 3 に示す. 全 PRF においてピクセル量は常に変動しつつも, PRF が高くなるにつれてその平均ピクセル量が減少していく傾向が確認された.

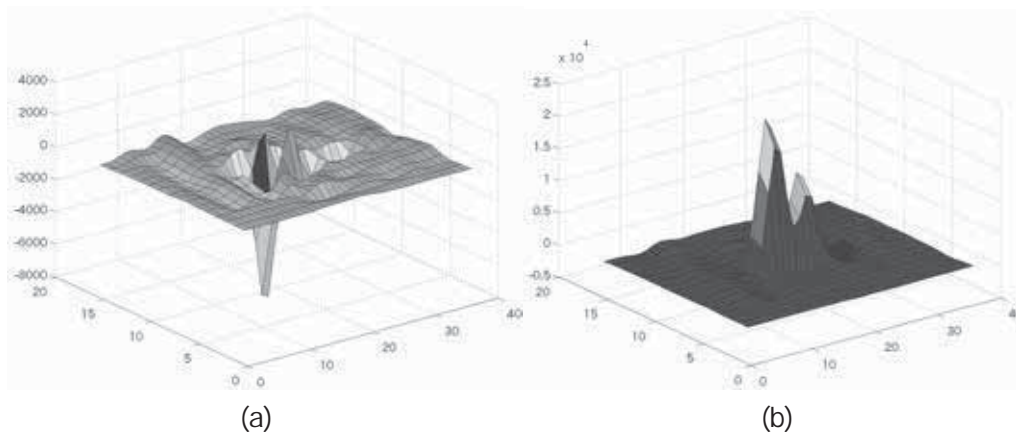


図 1 : ビーズ近傍の I/Q 信号例. (a) I and (b) Q-component.

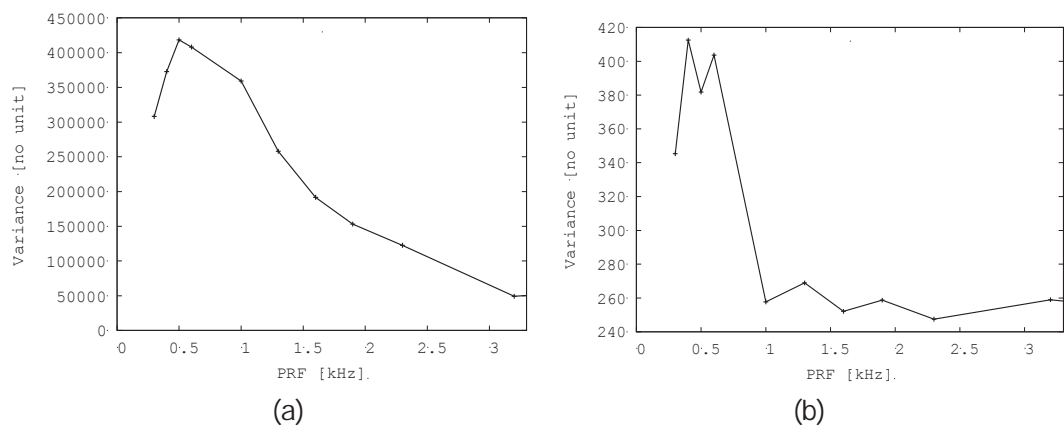


図2 : PRF とエコーのゆらぎの関係. (a) ビーズ部位 (b) 無エコー部位

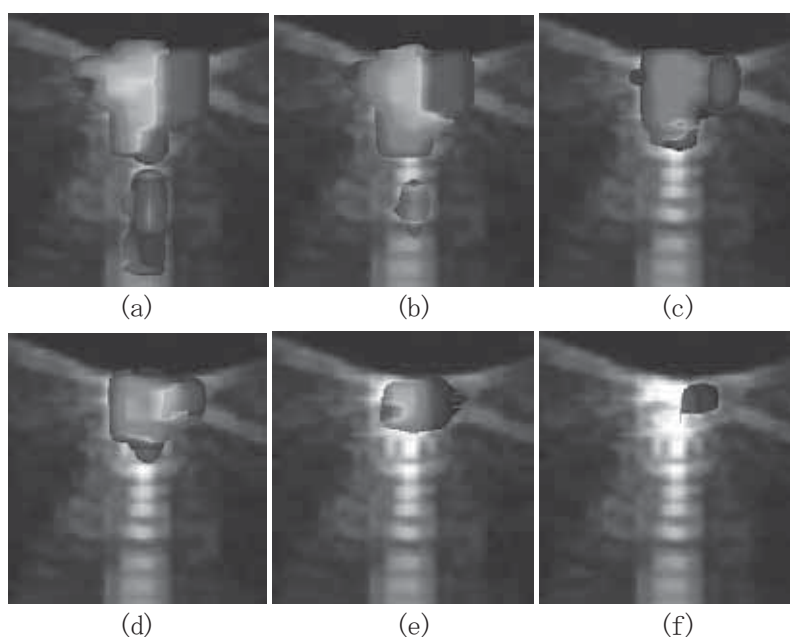


図3 : TS の様子. PRF: (a) 300 Hz, (b) 400 Hz, (c) 500 Hz, (d) 600 Hz, (e) 1000 Hz, (f) 1300 Hz.

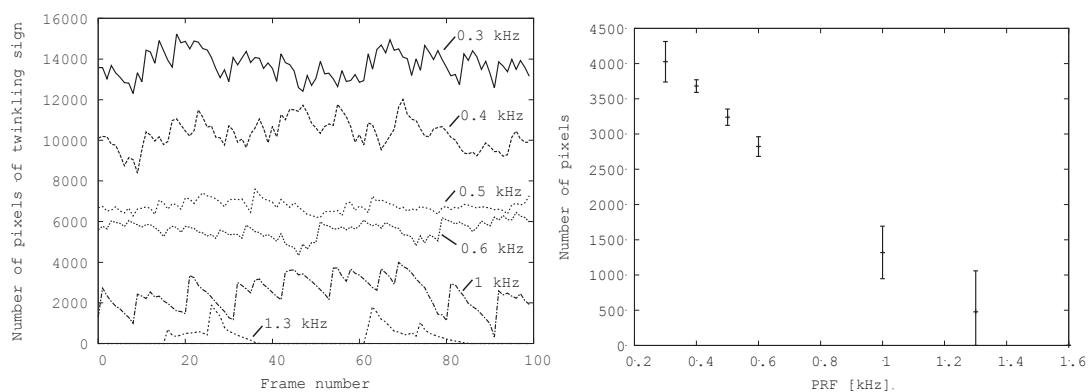


図4 : (a) TS の出現頻度の時間遷移および(b)TS と PRF の関係

### 3. 研究目標の達成状況

本年度設定した目標のうち、実験的検討については目標を達成し、その結果新しい課題が判明

した。一方、非生体実験と並行してシミュレーションを行う予定であったが、解析を行うのに十分なシミュレーション実行環境を整えることができず、期待する成果が得られなかった。

#### 4. まとめと今後の課題

2014年度は、超音波による軟組織の物理特性の評価および、超音波とマイクロ・ナノ粒子のインタラクション解明について研究を行い、その複雑な音響物理現象を観察することができた。今後は、非生体実験で得られた結果をより詳細に解析し、twinkling artifactの解明を行う予定である。

#### 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] M. Tanabe, L. Liu, N. Tagawa, M. Nishimoto: Fundamental Study of Numerical Simulation of Ultrasound Wave Propagation in Microcalcification for Analysis of Twinkling Sign, *Acoust. Sci. & Tech.*, 36, 2 (2015), pp.164-166.
- [2] M. Tanabe, Y. Naito, M. Nishimoto, L. Liu: Effect of Pulse Repetition Frequency on Microcalcification Detection in Color Flow Imaging, *Jap. J. Appl. Phys.*, 53(2014), pp. 07KF15-1 - 07KF15-5.
- [3] L. Liu, K. Funamoto, M. Tanabe, T. Hayase: Microscopic observation of glass bead movement in soft tissue-mimicking phantom under ultrasound PW mode scanning, *J. Med. Ultrason.*, DOI:10.1007/s10396-014-0565-5,(2014), 5 pages.

##### 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- \*[4] M. Tanabe, H. Hashimoto, K. Funamoto, Y. Chiba, T. Hayase: Investigation on Advanced Medical Ultrasound Imaging Technology, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2014), pp. 192-193.
- [5] 劉磊, 船本健一, 田邊将之, 早瀬敏幸: Twinkling Sign 機序解明のための超音波照射による微粒子挙動の光学観察, 日本超音波医学会 第87回学術集会, (2014), S449.
- [6] 田邊将之, 内藤優, 西本昌彦, 劉磊: Twinkling Sign の実験解析: CF モードにおける PRF の影響, 日本超音波医学会 第87回学術集会, (2014), S450.
- [7] Y. Naito, M. Tanabe, H. Hashimoto, T. Shimazaki, T. Jibiki, M. Nishimoto: Effect of PRF on Microcalcification Detection in Color Flow Imaging (part2), 第35回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, (2014), 3P5-7.

##### 3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

課題番号	J14R03
区分	連携公募共同研究プロジェクト
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2014.4 ~2015.3
継続年数	2年目

省エネルギーのための知的層材料・層構造に関する国際共同研究  
International Collaborative Research on Smart Layered  
Materials and Structures for Energy Saving

Toshiyuki Takagi\*†, Tetsuya Uchimoto\*  
Jean-Yves Cavaille\*\*††  
Christian Boller\*\*\*††, Jinhao Qiu\*\*\*\*††  
Julien Fontaine\*\*\*\*\*††, Manfred Kohl\*\*\*\*\*††  
Henrik Alfredsson\*\*\*\*\*††

\*Institute of Fluid Science, Tohoku University  
\*\*INSA de Lyon, \*\*\*Fraunhofer Institute for NDT  
\*\*\*\*Nanjing University of Aeronautics and Astronautics  
\*\*\*\*\*EC Lyon, \*\*\*\*\*Karlsruhe Institute of Technology  
\*\*\*\*\*KTH Royal Institute of Technology

†Applicant, ††non-IFS responsible member

## 1. 研究目的

本研究は、東北大学とリヨンとの大学との過去10年以上にわたる研究交流を通して開拓された「知的構造材料」に関する研究分野の発展形として位置づけられ、近年進展の目覚ましいマルチマテリアル多機能性材料とセンシング技術との融合により、新たな知的構造体の創成を目指す。特に、知的構造体と流体との相互作用に着目した新しい省エネルギー機能を実現するための学理基盤を構築する。このために、東北大学科学研究所を中心とする日本とリヨン、グルノーブルを中心とするフランスの研究チームに加え、センシング技術の産業応用について実績のあるドイツ・フラウンホーファ研究機構、中国における知的材料構造研究の重点拠点である中国・南京航空航天大学が加わり、研究を加速させる。

上記の研究分野を構築するための研究として、主に以下のテーマについて取り組む。

- 1) センシング機能と境界層の制御機能を有するスマート構造炭素繊維複合材料
- 2) スマート伝熱、制振、潤滑機能を有する知的層構造材料の開発
- 3) 耐食性を有する受動傾斜フィルムによる新しいエネルギープラント材料システム

これらの共同研究について、情報を共有するとともに学理を抽出するために、交流期間中に毎年セミナーを開催する。また、若手研究者の発掘と育成のために、サマースクールの開催、国際大学院の連携、を積極的に推進するとともに、若手研究者の回遊研究を通じた研究者交流を図る。本研究の全体の構想図を図1に示す。

## 2. 研究成果の内容

先進的輸送機械のための知的層材料・層構造研究及びエネルギープラント保全のための知的層材料・層構造研究に関する共同研究テーマのそれぞれに対して、構築した研究協力体制

を活用して、それぞれのテーマに関連する要素研究と応用研究について推進した。また、平成26年度より拠点機関としてスウェーデン王立工科大学が加わり、拠点機関である東北大学・流体科学研究所との長年にわたる流動制御に関する共同研究体制を活用する体制を整えた。

平成25年度に行った研究の準備に基づいて、若手研究者が海外において滞在し共同実験を行うことにより、モデル化や設計を進めた。界面流体現象のモニタリングと数値解析を融合した「計測融合シミュレーション」による乱流モニタリングと、乱流制御技術についての要素研究を東北大学、フランス ECL、中国南京航空航天大学、KTH により行った。炭素系コーティングによる超低摩擦潤滑についての研究について、そのメカニズム解明に向けた東北大学とECLとの共同実験、モデルの検討を進めており、応用研究への移行の見通しを得た。知的層構造を用いたスマートセンサについて、東北大学、INSA-Lyon、IZFP、中国南京航空航天大学の間で基盤研究についての共同研究を実施した。耐食性を有する受動傾斜フィルムによる研究を行い、その基礎特性とモデル化について東北大学とフランス INSA-Lyon の共同実験を実施し、フィルムの設計のための基盤データを取得した。以下に具体的な成果について記述する。

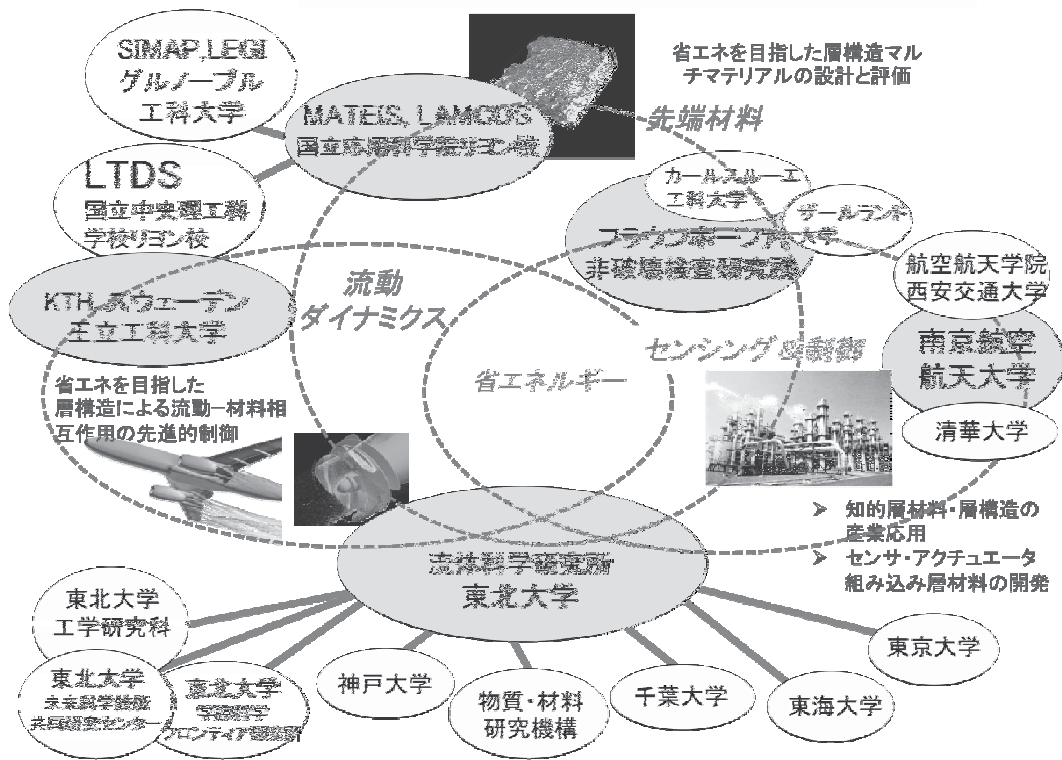


図1：本研究の構想

### 1) Fundamental criterion determination for metallic cold spray coatings

The cold spray technique allows high deposition rate coating which is based to kinetic energy rather than thermal energy. Because the powder feedstock remains below its melting point, the thermal oxidation and phase transition for the powder and metallurgical transformation for the substrate are minimized compared with high temperature deposition method. The suitability of materials depends on their mechanical properties like their deformation ability that depends on the

dislocation system. Empirical approaches have been developed to determine the eligibility of materials. Thus, materials with low melting point and low mechanical strength are ideal because they exhibit significant softening at low temperatures. Even if the success of cold spray depends on the correct choice of the process velocity among others, deep knowledge must involve better coating characterizations of their microstructures and mechanical properties.

These requirements need to focus on (i) the coating homogeneities in volumes and surfaces, the porosity and defects from the surface to the interface with the substrate with the presence of initial cracks (orientation, length, size); (ii) the chemical composition linked to the powder purity, the reactivity of the powder along the projection process, its role on the local chemistry distribution at the substrate coating interface and also between deformed particle in the coating; (iii) the microstructure, with the phase modifications from the powder to the coating (mechanical deformation and/or phase modifications induced by the kinetic energy of the impact), the preferential crystallographic orientation gradient among the coating and the interface at the local scale between all the coating component. If experimental studies are already focused on the initial stage of coating deposition (particle to substrate), mechanism of the coating built-up (particles to particles) should be well described to control the coating volume characteristic for a better resistance to aggressive environment. The modeling of the process, which should account for particle plastic deformation, substrate - particle and particle - particle adhesion, etc., is developed to provide objective and fundamental criterion to select experimental condition. This is also an opportunity to design more complex metallic coating where mechanical and/or chemical properties gradient need to be improved.

## **2) High power MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems):**

Vibration energy harvesters are usually resonant mechanical systems working at resonance. The subsequent mechanical amplification results in output powers multiplied by the mechanical quality factor when compared to non-resonant systems. The main drawback is the difficulty of matching a given vibration frequency range to the energy harvester's resonance frequency. Among several techniques, the use of nonlinear mechanical resonators may enlarge energy harvester power bandwidth. When integrated to a system, smart materials are strongly influenced by the surrounding system that may bring its own nonlinearities, such as in MEMS. Indeed, their small size, combined with the need for sufficient output electrical power, implies large stresses in the materials bringing them into highly nonlinear regimes. Up to now, when restraining their use in the linear regime, their limited output power makes them hardly suitable for self-powering embedded electronics. In order to utilize MEMS devices in their full range of excitation levels, it is of primary importance to understand their nonlinearities and to propose a model for fine prediction of their performances.

In addition, a new concept for electrostatic energy harvesting developed at TU utilizes ferroelectric materials for creating dipole electrets thanks to their remnant polarization. Compared to usual high performances electret materials, a dipole electret exhibits unusual high stored charge density on its surfaces leading to high power energy harvesting devices. However, the high level of electric field



induced by the polarization has a strong depolarizing effect leading to limited performance.

### **3) Multi-physics couplings for materials durability**

When subjected to severe environments, the health monitoring of structural materials is necessary, and smart materials and systems can provide with health monitoring capabilities. For example, the electrical impedance of a system involving structural and smart materials depends on structural material mechanical properties. This phenomenon is the basic principle of electromechanical impedance spectroscopy. This emerging technology allows the definition of damage indexes based on pure electrical measurements.

SHM techniques are usually based on additional sensors and actuators systems for evaluating the damaging of a structure. In this subtopic, we better want to investigate the intrinsic coupling in structural materials.

Eddy-Current Testing (ECT) is a method of locating surface or subsurface flaws in electrically conductive materials, and evaluating such material characteristics as hardness, heat-treat condition, and other metallurgical conditions, and also defects and remaining lifetime. In order to extend the detecting capabilities of ECT, electromechanically induced stresses (Lorentz force and magnetostriction) generate to acoustics waves used to further defects detection (Electro-Magnetic Acoustic Transducers or EMAT). In order to better interpret received signals, a fine modeling of tested materials is necessary, and should include conductivity, ferromagnetism and magnetostriction properties, including frequency dependent properties (such as domain wall motion in ferromagnetic structural materials). Based on such models, stresses and acoustic waves induced by EMAT would be better interpreted over a very large frequency range.

On the other hand, all materials are fundamentally magnetostrictive and electrostrictive. Their (little) coupling may be used as an indicator of the health or microstructure of the material. In case of CFRP, as a long-term research topic, we aim at searching different multi-physics couplings such as electrostriction as an indicator of their damaging complementary to their both dielectric and conductivity properties. It may bring insights on both fibers and matrix damaging.

### **3. 研究目標の達成状況**

マルチマテリアルを用いた知的層材料・構造に関する共同研究について、流動と材料の相互作用とそのセンシングという新しい観点から研究を進め、省エネルギー機能を有する多機能材料システムについての学問領域を開拓する。また得られた研究成果を、知的層構造材料と流動との熱、化学、機械的相互作用の観点から整理し、体系化をはかる。平成26年度は、これらの一連の研究において、要素基盤研究について取り組み、来年度以降の応用研究への展開に有用な成果を挙げた。また、未到エネルギー研究センターの国際展開にも貢献したと考えられる。

### **4. まとめと今後の課題**

昨年度に引き続き、輸送システムへの応用のための、マルチマテリアルの設計・最適化研究と流動との相互作用による機能発現のモデル化を行うことにより、航空機、自動車、鉄道などの輸送システムの超低摩擦を実現するための知的基盤の構築に向けた取り組みがなされた。また、保全の高度化につながる、検査・モニタリングのためのセンサ材料研究、耐食性を有し、かつモニ

タリングの用意な材料システムを、マルチマテリアルの概念、知的層構造の概念を適用することにより研究を行った。今後、広範囲にわたる本研究を総括するにあたり、研究テーマの選択と集中を行い、応用への展開を図るとともに、ICFD2015等の国際会議を通じて、世界に成果を発信する。

## 5. 研究成果学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

### 1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] Gabor Vertesy, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi and Ivan Tomas: Flake Graphite Cast Iron Investigated by a Magnetic Method, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 4, April, (2014), pp. 1-4.
- [2] Pengfei Wang, Takanori Takeno, Julien Fontaine, Masami Aono, Koshi Adachi, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi: Effects of substrate bias voltage and target sputtering power on the structural and tribological properties of carbon nitride coatings, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 145, Issue 3, June, (2014), pp. 434-440.
- [3] Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Haiqiang Zhou, Wenlu Cai, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Gerd Dobmann: Evaluation of Wall Thinning in Carbon Steel Piping Based on Magnetic Saturation Pulsed Eddy Current Testing Method, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVII)*, Vol. 17, June, (2014), pp. 296-303.
- [4] Oleksandr Stupakov, Toshiyuki Takagi, Kamil Kolařík: Barkhausen Noise Testing of Residual Stresses Introduced by Surface Hardening Techniques, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVII)*, Vol. 17, June, (2014), pp. 288-295.
- [5] Jingfu ZHANG, Huajie HAN, Kazuhiro OGAWA, Yuji ICHIKAWA, Alain COMBESURE: Deposition mechanism based on numerical simulation for the cold-sprayed Ag coatings on Al and AISI304 substrates, *Proceedings of the JSME/ASME 2014 International Conference on Material and Processing*, Detroit, June, (2014).
- [6] Yoichiro Tsurimaki, Pierre-Olivier Chapuis, Rodolphe Vaillon, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama: Reducing Thermal Radiation between Parallel Plates in the Far-to-near Field Transition Regime, *IDL of International Heat Transfer Conference 15*, (2014), USB\_IHTC15-9188.
- [7] Yoshitake Nishi, Réda Ourahmoune, Masae Kanda, Junhua Quan, Michael C. Faudree, Michelle Salvia: Improvement of Bending Modulus and Impact Value in Injection-Molded Short Carbon Fiber Reinforced Polyetheretherketone with Homogeneous Low-Voltage Electron Beam Irradiation, *Materials Transactions*, Vol. 55, No. 8, (2014), pp. 1304-1310.
- [8] Shigeru Yonemura, Susumu Isono, Masashi Yamaguchi, Yoshiaki Kawagoe, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi: Mechanism of Levitation of a Slider with a Micro/Nanoscale Surface Structure on a Rotating Disk, *Tribology Letters*, Vol. 55, Issue 3, September, (2014), pp. 437-454.
- [9] Hong-En Chen, Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto and Kensuke Yoshihara: Quantitative Nondestructive Evaluation of Plastic Deformation in Carbon Steel Based on Electromagnetic Methods, *Materials Transactions*, Vol. 55, No. 12, December, (2014), pp. 1806-1815.

- [10] Marcel Gueltig, Hinnerk Ossmer, Makoto Ohtsuka, Hiroyuki Miki, Koki Tsuchiya, Toshiyuki Takagi and Manfred Kohl: High Frequency Thermal Energy Harvesting Using Magnetic Shape Memory Films, *Advanced Energy Materials*, Vol. 4, Issue 17, December, (2014), DOI: 10.1002/aenm.201400751.
- [11] Jun Cheng, Hongli Ji, Jinhao Qiu, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Ning Hu: Role of interlaminar interface on bulk conductivity and electrical anisotropy of CFRP laminates measured by eddy current method, *NDT&E International*, Vol. 68, December, (2014), pp. 1-12.
- [12] T. Okabe, H. Imamura, Y. Sato, R. Higuchi, J. Koyanagi, R. Talreja: Experimental and numerical studies of initial cracking in CFRP cross-ply laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 68, January, (2015), pp. 81-89.
- [13] Hiroyuki Kosukegawa, Vincent Fridrici, Emmanuelle Laurenceau, Philippe Kapsa, Makoto Ohta: Friction of 316L stainless steel on soft-tissue-like poly(vinyl alcohol) hydrogel in physiological liquid, *Tribology International*, Vol. 82, Part B, February, (2015), pp. 407-414.
- [14] Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Yohei Takahashi, Hiroshi Naganuma, Kazufumi Sugawara, Yoriaki Sasaki, Thierry Douillard, Karine Masenelli-Varlot, Joel Courbon: Thickness evaluation of thermally sprayed coatings after exposure to boiler tube environments by eddy current testing, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 1875-8800 (Online), March, (2015), DOI:10.3233/JAE-140050.
- [15] Akinori Furusawa, Fumio Kojima, Atsushi Morikawa: Mode control of guided wave in magnetic hollow cylinder using electromagnetic acoustic transducer array, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 47, Issue 2, March, (2015), pp. 196-203.
- [16] FETHI HAMDANI, HIROSHI ABE, BENOIT TER-OVANESEAN, BERNARD NORMAND, and YUTAKA WATANABE: Effect of Chromium Content on the Oxidation Behavior of Ni-Cr Model Alloys in Superheated Steam, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 46, Issue 5, May, (2015), pp. 2285-2293.
- [17] TetsuyaUchimoto, ToshiyukiTakagi, Toshiaki Ichihara, GerdDobmann: Evaluation of fatigue cracks by an angle beam EMAT–ET dual probe, *NDT&E International*, Vol. 72, June, (2015), pp. 10-16.
- [18] N. Azeggagh, L. Joy-Pottuz, D. Nelias, J. Chevalier, M. Omori, T. Hashida: Hertzian contact damage in silicon nitride ceramics with different porosity contents, *Journal of the European Ceramics Society*, Vol. 35, Issue 8, August, (2015), pp. 2269-2276.
- [19] 内一哲哉, 高木敏行: 電磁超音波–渦電流複合プローブによる高温環境オンラインモニタリング, 一般社団法人日本非破壊検査協会機関誌「非破壊検査」, 平成27年2月号, 解説, pp. 67-73.

## 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Shigeru Yonemura, Susumu Isono, Masashi Yamaguchi, Yoshiaki Kawagoe, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki and Toshiyuki Takagi: A Study of Floating of a Slider with Micro/Nanoscale Surface Structure on a Rotating Disk, *29th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Xi'an, S10-33, July, (2014).

- [2] Yoshiaki Kawagoe, Shigeru Yonemura, Susumu Isono, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi: Numerical Analysis of Micro-/Nanoscale Gas-Film Lubrication of Sliding S+B126:B169urface with Complicated Structure, *29th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Xi'an, S10-20, July, (2014).
- [3] Yoichiro Tsurimaki, Pierre-Olivier Chapuis, Rodolphe Vaillon, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama: Reducing Thermal Radiation between Parallel Plates in the Far-to-near Field Transition Regime, *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference*, Kyoto, August, (2014).
- [4] Akinori Furusawa, Fumio Kojima, and Atsushi Morikawa: Mode control of guided wave in magnetic hollow cylinder using electromagnetic acoustic transducer array, *International Symposium on Future I & C for Nuclear Power Plants and International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems*, Jeju Island, August, (2014). (韓国原子力学会最優秀論文賞受賞)
- [5] Makoto Ohta, Wataru Sakuma, Yuta Muramoto, Hitomi Anzai, Toshio Nakayama: Modeling of Cortical Bone and Bone Marrow, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, CS1-8, October, (2014).
- [6] Karl Håkansson, Fredrik Lundell, Lisa Prah-Wittberg, Daniel Söderberg: Flow Manipulation of Nano-Fibrillated Cellulose: a Key Technology for New Bio-Based Materials, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, CS1-9, October, (2014).
- [7] Hidemasa Takana, Akira Tanida: Fundamental Characteristics on Electromagnetic Energy Conversion Device for Efficient Wind Energy Utilization, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, CS1-10, October, (2014).
- [8] Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Zhenmao Chen, Kensuke Yoshihara, Gerd Dobmann: Evaluation of Residual Strain in the Structural Materials of Nuclear Power Plants, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-1, October, (2014).
- [9] Kazuhisa Sato, Nacer Azeggagh, Toshiyuki Hashida: Assessment of Mechanical Reliability for Development of Electrochemical Devices, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-2, October, (2014).
- [10] Satoshi Atobe, Hisao Fukunaga: Impact Force Identification and Damage Monitoring of Laminated Structures, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-3, October, (2014).
- [11] Mitsuharu Shiwa, Dongfeng He, Masao Hayakawa, Sinich Moriya, Teiu Kobayashi: Damage Evaluation of Cu-Alloy Combustion Chamber of Liquid Rocket Using ECT, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-4, October, (2014).
- [12] Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Kensuke Yoshihara: Nondestructive Evaluation of Plastic Deformation in Biaxial Specimen using Pulsed ECT Method, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-6, October, (2014).

- [13] Akinori Furusawa, Atsushi Morikawa, Fumio Kojima: Development of Guided Wave Testing System Using Electromagnetic Acoustic Transducer Array, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-7, October, (2014).
- [14] Samir Chandra Roy, Marc Fivel, Jean-Pierre Franc, Christian Pellone: Cavitation Induced Damage: FEM Inverse Modeling of the Flow Aggressiveness, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-8, October, (2014).
- [15] Kesavan Ravi, Kazuhiro Ogawa, J. Y. Cavaille, Tiana Deplancke: Development of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Coatings by Cold Spray, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-9, October, (2014).
- [16] Jumpei Okutani, Toshiyuki Hayase, Kosuke Inoue, Shusaku Sone, Kenichi Funamoto: Analysis of High Reynolds Number Flow Behind a Square Cylinder by Hybrid Wind Tunnel (Improvement of Critical Gain of Instability for Pressure Feedback), *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-10, October, (2014).
- [17] Xiong Ke, Bian Kan, Zhu Kongjun, Liu Hongguang: Experimental Study on BaTiO<sub>3</sub>/Ionic Polymer Metal Composite, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-12, October, (2014).
- [18] Chongcong Tao, Jinhao Qiu, Tomonaga Okabe, Hongli Ji, Toshiyuki Takagi: Effects of Delamination in Strength of Drilled CFRP Laminates, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-13, October, (2014).
- [19] Yuta Yamamoto, Kenji Yoshimizu, Kanjuro Makihara: Smart Energy-Harvesting from Various Vibrations with Digital Regulation Approach, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-14, October, (2014).
- [20] Marcel Gueltig, Makoto Ohtsuka, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, Manfred Kohl: Development of Energy Harvesting Devices based on Magnetic Shape Memory Alloy Thin Films, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-15, October, (2014).
- [21] Kongjun Zhu, Jianzhou Du, Jinhao Qiu: Fabrication of Lead-based Relaxor Piezoelectric Ceramics with High Performance, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-16, October, (2014).
- [22] Hiroyuki Kosukegawa, Mami Takahashi, Julien Fontaine, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi: Development of Smart Fatigue Sensor using Metal-containing Amorphous Carbon Coatings, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-17, October, (2014).
- [23] Takanori Takeno, Kazuki Ikoma, Toshiyuki Takagi, Koshi Adachi: MoS<sub>2</sub>-DLC Nanocomposite Coating for Low Friction Systems, *Second International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving*, Sendai, OS4-19, October, (2014).

- [24] Akira Miyamoto, Nozomu Hatakeyama, Ai Suzuki and Ryuji Miura: Multiscale, Multiphysics Computational Chemistry Methods: Interface Design for Energy and Mass Transport, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [25] Toshiyuki Takagi and Tetsuya Uchimoto: International Research Core on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [26] Jun Ishimoto: FSI computational study of offshore tsunami and mega-floating structures, International Research Core on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [27] Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Shohei Ogata, Gerd Dobman and Joel Courbon: Development and evaluation of high temperature EMAT, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [28] Fumio Kojima: Stochastic inverse analysis of QNDE using generalized polynomial chaos, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [29] Koji Shimoyama, Renata Trojan, Frederic Gillot and Sebastien Besset: Determination of optimal shape cavity under uncertain vibroacoustic criteria affected by absorption coefficients, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [30] Seiichiro Izawa, Tatsuya Oku, Yu Nishio and Yu Fukunishi: Suitable operating mode of actuators for instability wave control, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [31] Takashi Tokumasu, Akinori Fukushima, Philippe Vergne, Nicolas Fillot and Marie Helene Meurisse: Nanoscale droplet shearing by molecular dynamics method, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [32] Jumpei Okutani, Toshiyuki Hayase, Kosuke Inoue, Shusaku Sone and Kenichi Funamoto: Analysis of High Reynolds Number Flow Behind a Square Cylinder by Hybrid Wind Tunnel (Reproduction of Turbulent Velocity Fluctuations), *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [33] Atsuki Komiya, Jerome Chevalier, Sebastien Provost and Sebastien Livi: Mass Transfer Control of Protein by Hindered Diffusion Process, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [34] Damien Fabregue, JA Chafino, D Hartmann, P Rivory, S Balvay, A Chiba, Y Kozumi, K Sato, Y Li: Influence of the microstructure on the mechanical properties of TA6V alloys containing martensite for biomedical applications, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [35] Michael C. Faudree and Yoshitake Nishi: Strengthening Methods of Short Glass Fiber Reinforced Polymer-Bulk Molding Compounds (SGFRP-BMC), *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [36] Yoshitake Nishi, Masayuki Takeshiri, Michael C. Faudree and Masae Kanda: Improved Properties of Smart & Intelligent Materials by Homogeneous 100keV class Low Potential EB-irradiation, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [37] Lucile Joly-Pottuz, Yuji Higuchi and Momoji Kubo: Contribution of simulation works to a better understanding of ceramic materials, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [38] Hidemi Kato, Takeshi Wada and Eric Maire: Porous metals fabricated by de-alloying in a metallic melt, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).

- [39] Masae Kanda, Kaori Yuse, Yoshitake Nishi and Daniel Guyomar: Controllable Electrostriction of Polyurethane Homogeneously Dispersed with Carbon Nano-Particles, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [40] Masami Nakano: Micro-Motor of Electro-Active Polymer Composite Rotor in Dielectric Liquid, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [41] Thierry Epicier, Yang Liu, Florent Dalmas, Jean Yves Cavaille, Toyohiko Konno and Masami Nakano: 3D microstructural characterization of polymer matrix nanocomposites, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [42] Gael Sebald, Benjamin Ducharne and Daniel Guyomar: Materials for energy conversion, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [43] J.C. Qiao, S. Cardinal, J.M. Pelletier and H. Kato: Mechanical properties of bulk metallic glasses: Information on the processability of bulk metallic glasses by using thermomechanical analysis and dynamic mechanical analysis, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [44] Tetsuo Shoji: Materials durability and life time prediction under severe environmental condition in service, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [45] Hiroyuki Miki and Michel Belin: Low-friction behavior of microcrystalline diamond coatings, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [46] Momoji Kubo, Shandra Bai, Akira Miyamoto, Manuel Cobian: Maria Isabel De Barros Bouchet, Jean Michel Martin, Clotilde Minfray and Sophie Loehle: Green Lubrication: Experiments and Computer Simulations, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [47] Sophia Berkani, Akira Miyamoto and Sophie Loehle: Meso scale approach to understand tribological behavior of lubricants, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [48] Julien Fontaine, Sandrine Bec, Michel Belin, Thierry Le Mogne, Ryoichi Hombo, Hiroyuki Miki, Takanori Takeno, Koichi Ito, Koshi Adachi, Toshiyuki Takagi and M. Goto: CarbonCoat: Tribologically-based design strategies for advanced carbon coatings, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [49] Yuta Muramoto, Makoto Ohta, Vincent Fridrici, Gaetan Bouvard and Philippe Kapsa: Production and characterization of composite materials for bones-biomodeling, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [50] Makoto Ohta, Hitomi Anzai, Mingzi Zhang, Guy Courbebaisse, Bastien Chopard and Yue Zhang: Optimization of endovascular prosthesis for the treatment of cerebral aneurysms, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [51] Jean-Paul Rieu and Atsushi Shirai: Rolling characteristics of neutrophils on PDMS surfaces mimicking the endothelium topography, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [52] M. Gallo, S.Tadier, S. Meille and J. Chevalier: Investigation of the resorption process of calcium phosphate bone substitutes, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [53] Eric Maire, Antoine Ferre, Sylvain Dancette, Takeshi Wada and Hidemi Kato: Aluminum reinforced with amorphous metal spheres, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).

- [54] Patrick Bonnaud, Akira Miyamoto, Van Vliet Krystyn: Concrete durability under freezing conditions, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [55] Yuji Higuchi, Momoji Kubo, Tetsuo Shoji, Laurent Chazeau, Jean Yves Cavaille: Experiments and Simulation Studies on Degradation of Polymer under Gamma Irradiation, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [56] Hiroyuki Kosukegawa, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi and Julien Fontaine: Development of fatigue sensor made of metal-containing diamond like carbon, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [57] Daniel Nelias, Jing Xie, Helene Walter-le-Berre, Alain Combescure, Kazuhiro Ogawa: Finite Element Modeling of Erosion Damage Caused by the Oblique Impact of Solid Particle, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [58] Kazuhisa Sato and Toshiyuki Hashida: Stress Variations of Solid Oxide Fuel Cells under Operating Conditions, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [59] F. Hamdani, B. Normand and B. Ter-Ovanesian, Y. Watanabe and H. Abe: Design of Nickel based alloys dedicated for severe environments, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [60] E. Abe, M. Gueltig, H. Ossmer, H. Miki, M. Ohtsuka, M. Kohl, and T. Takagi: Ni-Mn-In Based Shape Memory Alloy Thin Plate for Energy Harvesting Devices, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [61] N. Azeggagh, L. Joly-Pottuz, D. Nélias, J. Chevalier, M. Omori, T. Hashida: Indentation strength of silicon nitride ceramics, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [62] Juan A. Chafinoa, Damien Fabreguea, Akihiko Chiba: Martensite fraction effect in duplex  $\alpha + \alpha'$  Ti-6AL-4V (ELI) microstructure on mechanical properties, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [63] F. Hamdani, H. Abe, Y. Watanabe, B. Ter-Ovanesian, B. Normand: Effect of chromium content on the oxidation behavior of Ni-base alloys in superheated steam, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [64] Hiroki Iwakane, T. Sekiguchi, H. Abe, Y. Watanabe: A new method of determining the repassivation potential for crevice corrosion of Alloy 600 in chloride-containing environment, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [65] Asuka Konno, Hiroyuki Kosukegawa, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi: Improvement of mechanical properties of CFRP by adding nano-sized TiO<sub>2</sub> particles in matrix, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [66] Guillaume Lacaille, Jun Sasaki, Hiroki Gonome, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama: Mass transfer in porous media for an energy system utilizing methane hydrate, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [67] Yujie LI, Yuuya YONEYAMA, Haruo ISODA, Takafumi KOSUGI, Takashi KOSUGI, Makoto OHTA: Comparison of intra-aneurysmal velocity magnitude in a patient-specific model among PIV, CFD and MRI, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [68] Daisuke Oshiyama, Daiju Numata, Keisuke Asai: Lift-enhancing effects of mini flaps at low Reynolds number, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [69] PROFIZI Paul, COMBESCURE Alain, OGAWA Kazuhiro: Particle Impact Model With Adhesion For Cold Spray, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).



- [70] Kesavan Ravi, Kazuhiro Ogawa, Yuji Ichikawa, Jean-Yves Cavaille, TianaDeplanke, Olivier Lame: Ultra high molecular weight polyethylene coatings by cold spray technique, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [71] Renaud Rinaldi, Laurent Chazeau: Polymer-based architected materials: Complexity yet versatility brought to material solutions, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [72] Wataru Sakuma, Makoto Ohta, Hitomi Anzai, Toshio Nakayama: Flow in cancellous bone, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [73] Michiyoshi Sato, Tadashi Sakamoto, Kazuhisa Sato, Toshiyuki Hashida: Comparison between effects of aerial oxidation and electrochemical oxidation of Ni for Ni-YSZ cermets, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [74] Toshinori SATO, Jun ISHIMOTO, Alain Combescure: Hybrid MPS and Eulerian computational approach for high-density hydrogen leakage with crack propagation in pressure vessel, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [75] Koji SHIMOYAMA, Renata TROIAN, Frédéric GILLOT, Sébastien BESSET: Shape optimization under vibroacoustic criteria in the mid-high frequency range, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [76] KeiichiShirasu, Go Yamamoto, Yo Nozaka, Weili Wang and Toshiyuki Hashida: Microstructure and Mechanical Properties of Acid-Treated Carbon Nanotube Reinforced Alumina Composites, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [77] S. Takeda, H. Miki, T. Miyazaki, N. Nakayama, H. Takeishi, and T. Takagi: Development of Self-lubricating MoS<sub>2</sub> Dispersed Metal-based Composite Materials Formed by Compression Shearing Method at Room Temperature, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [78] Y. Tsurimaki, T. Kobari, J. Okajima, A. Komiya, P-O. Chapuis, R. Vaillon, and S. Maruyama: Development of a Precise Measurement System for Radiative Heat Transfer between Parallel Plates Separated by Close Distances, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [79] Wallisky Nicolas, DaijuNumata, Keisuke Asai: Application of Biomimetic Concepts for Low-Reynolds Flights, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).
- [80] WANG Yingying, ADRIEN Jérôme, Nicolas Mary, NORMAND Bernard: Microstructure and electrochemical behavior of cold sprayed stainless steel 316L coating for corrosion protection of aluminum, *ELyT Workshop 2015*, Matsushima, February, (2015).

他 合計 119 件

### 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

