



東北大学

**平成 23 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 2011
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 23 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、77 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 24 年 7 月

東北大学流体科学研究所長
早瀬 敏幸

目 次

1. 平成 23 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 | 公募共同研究報告書 | 2 |
| 1.5 | 公募共同研究実施状況 | 3 |
| 1.6 | 研究成果の発表件数 | 4 |

2. 研究成果報告書

< 一般公募共同研究 >

| | | |
|--------|--|----|
| J11001 | 微小生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) | 5 |
| J11002 | 磁石 - 磁性流体系における複雑界面流動の交流磁場特性 須藤 誠一(秋田県立大学)、西山 秀哉(東北大学) | 7 |
| J11003 | The Mechanism and the Control of the Unsteady Three-Dimensional Wake Structure of Road Vehicle Chenguang Lai(Chongqing University of Technology)、大林 茂(東北大学) | 9 |
| J11004 | ナノディスクアレイを用いた新規量子デバイスの特性評価技術開発 高橋 庸夫(北海道大学大学院)、寒川 誠二(東北大学) | 11 |
| J11005 | 精密なビームフラックス制御による高品質量子ドット超格子の作製 喜多 隆(神戸大学)、寒川 誠二(東北大学) | 13 |
| J11006 | 中性粒子ビームプロセスの最先端 MOS トランジスタに関する研究 遠藤 和彦(産業技術総合研究所)、寒川 誠二(東北大学) | 15 |
| J11007 | 高温予混合火炎の不安定性 門脇 敏(長岡技術科学大学)、小林 秀昭(東北大学) | 17 |
| J11008 | 末梢神経の磁気刺激に関する研究 八島 和美(株式会社 I F G)、高木 敏行(東北大学) | 19 |
| J11009 | レーザ誘起熱音響波を利用した超音速非定常気流の温度計測法の開発 水書 稔治(東海大学)、大林 茂(東北大学) | 21 |
| J11010 | サイレント超音速機の超音速飛行特性に関する研究 大林 茂(東北大学)、佐宗 章弘(名古屋大学) | 23 |
| J11011 | 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 藤村 茂(東北大学)、佐藤 岳彦(東北大学) | 25 |
| J11012 | 極低温気液二相流体の管内流動・伝熱特性に関する研究 大平 勝秀(東北大学)、小林 弘明(宇宙航空研究開発機構) | 27 |
| J11013 | 中性粒子ビームによるシリコンフォトニクス素子の低損傷加工 和田 一実(東京大学)、寒川 誠二(東北大学) | 29 |
| J11014 | 常温圧縮回転せん断法を用いた複合材料の開発 中山 昇(信州大学)、三木 寛之(東北大学) | 31 |
| J11015 | Background-Oriented Schlieren 法を用いた超音速飛しょう体の大視野可視化法の研究 水書 稔治(東海大学)、大林 茂(東北大学) | 33 |

| | | |
|--------|---|----|
| J11016 | Reconstruction of Wall Thinning from Pulsed ECT Signals | 35 |
| | Zhenmao Chen(Xi an Jiaotong University)、高木 敏行(東北大学) | |
| J11017 | プラズマエッチングプロセスにおけるナノスケール表面ダメージ解析..... | 37 |
| | 浜口 智志(大阪大学)、寒川 誠二(東北大学) | |
| J11018 | マイクロ噴霧微粒化プロセスの超並列融合計算..... | 39 |
| | 石本 淳(東北大学)、Kozo Saito(University of Kentucky) | |
| J11019 | シャトルコックの空力特性とインパクト時の動的挙動..... | 41 |
| | 長谷川 裕晃(秋田大学)、大林 茂(東北大学) | |
| J11020 | バイオテンプレート極限加工による構造制御マルチディスク単電子トランジスタの開発..... | 43 |
| | 山下一郎(奈良先端科学技術大学院大学)、寒川 誠二(東北大学) | |
| J11021 | 二段式軽ガス銃を用いたソニックブームの実験的研究..... | 45 |
| | 齋藤 務(室蘭工業大学)、大林 茂(東北大学) | |
| J11022 | 中性粒子ビーム酸化膜を用いた超高速歪み Ge チャネルデバイス開発 | 47 |
| | 澤野 憲太郎(東京都市大学)、寒川 誠二(東北大学) | |
| J11023 | スパイクニューロンデバイスの基礎検討..... | 49 |
| | 森江 隆(九州工業大学)、寒川 誠二(東北大学) | |
| J11024 | 中性粒子ビームエッチングによって作製した高密度規則配列量子ドット系における電子状態の解明 ... | 51 |
| | 斎木 敏治(慶應義塾大学)、寒川 誠二(東北大学) | |
| J11025 | Investigations of Reacting Flow in Micro Channels Directed to Development of Eco-Friendly Technologies of Energy Conversion | 53 |
| | Sergey Minaev(Siberian Branch of Russian Academy of Science)、丸田 薫(東北大学) | |
| J11026 | New Exact Solutions for Vortex Rings with Swirl and Magnetic Field | 55 |
| | Stefan G. Llewellyn Smith(University of California, San Diego)、服部 裕司(東北大学) | |
| J11027 | 胎仔脳出血メカニズムの流体力学的解析..... | 57 |
| | 伊藤 拓哉(東北大学)、船本 健一(東北大学) | |
| J11028 | Visualization, "Real Time" Algorithms and Parallel Computations of Reacting Flows | 59 |
| | Boris Mazurok(Siberian Branch of Russian Academy of Science)、丸田 薫(東北大学) | |
| J11029 | Parallel Computations on the Base of GPU for Modeling of Gas Combustion Processes | 61 |
| | Roman Fursenko(Siberian Branch of Russian Academy of Science)、丸田 薫(東北大学) | |
| J11030 | 翼端渦の大規模変形が崩壊過程へ及ぼす影響について..... | 63 |
| | 高橋 直也(東京電機大学)、服部 裕司(東北大学) | |
| J11031 | 実用的な船舶設計技術の開発..... | 65 |
| | 鄭 信圭(東北大学)、Hyunul Kim(George Mason University) | |
| J11032 | マイクロチャネル内での物質拡散場の高精度計測に関する研究..... | 67 |
| | 小宮 敦樹(東北大学)、Gary Rosengarten(The University of New South Wales) | |
| J11033 | 左心房における血流解析..... | 69 |
| | 柴田 宗一(宮城県立循環器・呼吸器病センター)、船本 健一(東北大学) | |
| J11034 | プラズマ気泡生成法の開発..... | 71 |
| | 佐藤 岳彦(東北大学)、中谷 達行(トーヨーエイトック株式会社) | |
| J11035 | 渦構造の安定性に対する軸流効果の研究..... | 73 |
| | 服部 裕司(東北大学)、福本 康秀(九州大学) | |
| J11036 | ふく射要素法を用いた生体内光伝播と伝熱現象に関する研究..... | 75 |
| | 圓山 重直(東北大学)、櫻井 篤(新潟大学) | |
| J11037 | 複雑媒体における非フーリエ伝熱解析..... | 77 |
| | 圓山 重直(東北大学)、Mishra Subhash Chandra(Indian Institute of Technology) | |

| | | |
|--------|---|-----|
| J11038 | マイクロ・ナノ構造体のふく射特性計測に関する研究..... | 79 |
| | 圓山 重直(東北大学)、Rodolphe Vaillon(INSA Lyon) | |
| J11039 | 大規模環境におけるエネルギー移動評価とその解析..... | 81 |
| | 圓山 重直(東北大学)、山田 昇(長岡技術科学大学) | |
| J11040 | MR 計測融合シミュレーションによる脳動脈瘤破裂予測 | 83 |
| | 杉山 慎一郎(広南病院)、船本 健一(東北大学) | |
| J11041 | 血行力学的解析を主眼とする脳動脈瘤データベースの構築..... | 85 |
| | 杉山 慎一郎(広南病院)、太田 信(東北大学) | |
| J11042 | ナノ粒子分散系 ER 流体の開発と流動特性評価 | 87 |
| | 田中 克史(京都工芸繊維大学)、中野 政身(東北大学) | |
| J11043 | Numerical and Experimental Research on Active Control of the Hole-Tone Feedback Problem | 89 |
| | Mikael A. Langthjem(山形大学)、中野 政身(東北大学) | |
| J11044 | 生体軟組織内の石灰化検出に関する研究..... | 91 |
| | 小笠原 正文(GE ヘルスケア・ジャパン)、船本 健一(東北大学) | |
| J11045 | Non-Destructive Detection of Cracks using Electromagnetic Phenomena..... | 93 |
| | Jinhao Qiu(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics)、高木 敏行(東北大学) | |
| J11046 | 摩擦試験機スライダの接触アライメント機構の研究..... | 95 |
| | 伊藤 耕祐(日本大学)、三木 寛之(東北大学) | |
| J11047 | Tribological Behavior and Electrical Contact Resistance of Metal-Containing DLC Coating for Electrically Conductive Tribo-Elements | 97 |
| | Julien Fontaine(Ecole Centrale de Lyon)、高木 敏行(東北大学) | |
| J11048 | Entropy Flow in Magnetically Ordered Heusler Alloys under Influence of Temperature or Magnetic Field | 99 |
| | Vladimir Khovaylo(National University of Science and Technology "MISIS")、三木 寛之(東北大学) | |
| J11049 | 流体力学的効果による CG 動画像のリアリティ向上 | 101 |
| | 石原 卓(名古屋大学)、服部 裕司(東北大学) | |
| J11050 | 反応性非平衡プラズマジェットの実時間数値解析..... | 103 |
| | 高奈 秀匡(東北大学)、田中 康規(金沢大学) | |
| J11051 | Numerical Studies of the Reacting Rarefied Flows in Tubes..... | 105 |
| | Mikhail Ivanov(Siberian Branch of Russian Academy of Science)、丸田 薫(東北大学) | |
| J11052 | 連続流方式インクジェットの液滴形成過程の最適化に関する研究..... | 107 |
| | 中野 政身(東北大学)、中西 為雄(山形大学) | |
| J11053 | Experimental Analysis of Droplet Impact Process onto Rough Substrate with Solidification (Chemical Reaction)..... | 109 |
| | Deivandren Sivakumar(Indian Institute of Science)、西山 秀哉(東北大学) | |
| J11054 | 力天秤の開発とその静粛性超音速航空機への適用..... | 111 |
| | 川添 博光(鳥取大学)、大林 茂(東北大学) | |
| J11055 | 衝撃波前方の電子が後方の熱化学過程にぼす影響..... | 113 |
| | 川添 博光(鳥取大学)、大林 茂(東北大学) | |
| J11056 | 次世代低騒音ロータ設計のための高信頼性数値解析コードの開発..... | 115 |
| | 鄭 信圭(東北大学)、李 菅中(釜山大学) | |
| J11057 | 水中におけるプラズマ熱流動機構..... | 117 |
| | 佐藤 岳彦(東北大学)、金澤 誠司(大分大学) | |
| J11058 | ナノ構造化界面における輸送現象..... | 119 |
| | 小原 拓(東北大学)、芝原 正彦(大阪大学) | |

| | | |
|-------------------------|---|-----|
| J11059 | Investigation of Supersonic Hybrid-Stabilized Argon-Water Arc for Biomass Gasification..... | 121 |
| | Jiří Jeništa(Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i.) 西山 秀哉(東北大学) | |
| J11060 | Blast Wave / 衝撃波による脳損傷機序解明..... | 123 |
| | 中川 敦寛(東北大学病院) 早瀬 敏幸(東北大学) | |
| J11061 | 鋭敏化した Alloy 600 の B-H 曲線形状の変化に関するシミュレーション解析 | 125 |
| | 山口 克彦(福島大学) 高木 敏行(東北大学) | |
| J11062 | 液体水素の熱・輸送物性に関する分子論的研究..... | 127 |
| | 徳増 崇(東北大学) 坪井 伸幸(九州工業大学) | |
| J11063 | Nano-Scale Modeling of Confined Liquid Films and Bridges | 129 |
| | 徳増 崇(東北大学) Philippe Vergne(INSA-Lyon) | |
| J11064 | 水分子ネットワーク構造におけるプロトン輸送特性の解明..... | 131 |
| | 徳増 崇(東北大学) 杵淵 郁也(東京大学) | |
| J11065 | Analysis of Plasma Flow at Gas-Liquid Interface for Biological Interaction | 133 |
| | 佐藤 岳彦(東北大学) Gregor E. Morfill(Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics) | |
| J11066 | Investigation of Hypersonic Flows about Leading Edges of Small Bluntness | 135 |
| | Mikhail Ivanov(Siberian Branch of Russian Academy of Science) 米村 茂(東北大学) | |
| J11067 | Cavity Formation Mechanism in a Cavitation Process | 137 |
| | 佐藤 岳彦(東北大学) Mohamed Farhat(Ecole Polytechnique Federale de Lausanne(EPFL)) | |
| J11068 | 脆弱性血球モデルの開発..... | 139 |
| | 太田 信(東北大学) Liviu Movileanu(Syracuse University) | |
| J11069 | Optimization of Stent Design based on Blood Flow Analysis using LBM Method | 141 |
| | 太田 信(東北大学) Bastien Chopard(Geneva University) | |
| J11070 | Study on Friction of Soft Tissue Biomodel by PVA..... | 143 |
| | 太田 信(東北大学) Philippe Kapsa(ECL) | |
| J11071 | Integrated Analysis by Kinetic Model and Fluid Model for Innovative Plasma Applications | 145 |
| | He-Ping Li(Tsinghua University) 高奈 秀匡(東北大学) | |
| J11072 | Advancement of Numerical Method for Unsteady Cavitating Flows | 147 |
| | 伊賀 由佳(東北大学) Wang Guoyu(Beijing Institute of Technology) | |
| J11073 | Quantitative Evaluation of Plastic Deformation of Structural Materials using EMAT-EC Dual Probe... .. | 149 |
| | Luming Li(Tsinghua University) 内一 哲哉(東北大学) | |
| J11074 | Development of Nondestructive Methods for Evaluation of Layered Materials | 151 |
| | Sung-Jin Song(Sungkyunkwan University) 高木 敏行(東北大学) | |
| J11075 | Development of Kinetic Force Method for Two-/Three-Dimensional Numerical Modeling Relaxation of Rarefied Gas flows | 153 |
| | Vladimir Saveliev(National Center of Space Researches and Technologies) 米村 茂(東北大学) | |
| J11076 | 次世代高温センサ研究会..... | 155 |
| | 高木 敏行(東北大学) 庄司 一夫((株) インテリジェント・コスモス研究機構) | |
| J11077 | 直接数値計算による中立・安定・不安定境界層乱流の構造に及ぼす境界層外乱れの影響の解明..... | 157 |
| | 酒井 康彦(名古屋大学) 早瀬 敏幸(東北大学) | |
| <分野横断型公募共同研究プロジェクト> | | |
| J10B01 | 次世代反応流体科学の創成..... | 159 |
| | 石本 淳(東北大学) | |

| | |
|--------------------|-----|
| 3. 主な発表論文の別刷 | 185 |
|--------------------|-----|

1. 平成 23 年度流体科学研究拠点活動のまとめ

1.1 概要

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

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

公募共同研究の募集や申請手続きの情報は、平成 22 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 23 年度の公募共同研究は、平成 23 年 4 月 15 日から平成 24 年 3 月 31 日まで実施された。途中、平成 23 年 11 月には、運営委員会、共同研究委員会、公募共同研究成果報告会が開催された。

1.2 公募共同研究成果報告会

平成 23 年 11 月 10 日に、公募共同研究成果報告会 (IFS Collaborative Research Forum) を流体科学研究所主催の国際シンポジウム AFI/TFI-2011 においてホテルメトロポリタン仙台にて開催した。本報告会では 70 件 (分野横断プロジェクト 1 件を含む) のプレゼンテーションとポスター発表が行われ、113 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 |
|--------------------|----------|----------|----------|
| 公募共同研究成果の登録数 | 16 | 32 | 42 |
| 登録済みデータ総数 | 458 | 478 | 488 |
| 流体科学データベースへのアクセス件数 | 10,040 | 12,123 | 10,815 |

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 23 年 10 月に、平成 22 年度の共同利用・共同研究拠点活動の成果を取りまとめた共同利用・共同研究拠点「流体科学研究拠点」活動報告書を作成し、関係機関、研究者に配布した。報告書の内容（著作権の都合により論文別刷りは除く）は流体科学研究拠点ホームページに掲載されている。

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

1.5 公募共同研究実施状況

1) 申請・採択状況

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

表 2：平成 23 年度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 |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 申請数 (件) | | 52 | 64 | 77 |
| 採択数 (件) | | 52 | 63* | 77 |
| 国内・国際 | 国内 | 32 | 35 | 47 |
| | 国際 | 20 | 28 | 30 |
| 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) |
| | エネルギー | 16 (8/8) | 14 (5/9) | 18 (6/12) |
| | ライフ サイエンス | 7 (5/2) | 13 (8/5) | 13 (9/4) |
| | ナノ・ マイクロ | 17 (10/7) | 17 (10/7) | 23 (17/6) |
| | 基盤 | 5 (4/1) | 12 (7/5) | 13 (8/5) |
| 採択率 (%) | | 100 | 98 | 100 |
| 採択率 (金額) (%) | | 26~100 | 77~95 | 59~97 |
| 申請金額 (千円) : a | | 20,177 | 29,303 | 35,405 |
| 採択金額 (千円) : b | | 16,639 | 24,637 | 25,657 |
| 平均採択率 (金額) (%) : b/a | | 82 | 84 | 72 |
| 平均採択金額 (千円) | | 320 | 391 | 333 |

*所内対応教員転出のため取り下げ

表 3：平成 23 年度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 |
|--------------------|----------|----------|
| 申請数 (件) | 1 | 1 |
| 採択数 (件) | 1 | 1 |
| 採択率 (%) | 100 | 100 |
| 申請金額 (千円) : a | 7,000 | 5,000 |
| 採択金額 (千円) : b | 7,000 | 4,650 |
| 採択率 (金額) (%) : b/a | 100 | 93 |
| 採択金額 (千円) | 7,000 | 4,650 |

2) 研究者の受け入れ状況

本研究所が公募共同研究を実施するために受け入れた研究者の人数（延べ人日）を表4に示す。対象は公募共同研究経費を使用して来仙した研究者とし、滞在日数を基に算出した。

表4：研究者の受け入れ状況

| | 平成21年度 | 平成22年度 | 平成23年度 |
|--------------|--------|--------|--------|
| 国内 | 165 | 210 | 262 |
| 国外 | 254 | 384 | 285 |
| 合計 (延べ人日) | 419 | 594 | 547 |

3) 研究費

本公募共同研究にて使用した研究費の内訳を表5に示す。

表5：研究費の内訳

| | 平成21年度 | 平成22年度 | 平成23年度 |
|---------|--------|--------|--------|
| 物件費（千円） | 8,136 | 22,343 | 22,837 |
| 旅費（千円） | 7,415 | 11,978 | 11,484 |
| 合計（千円） | 15,551 | 34,321 | 34,321 |

1.6 研究成果の発表件数

研究成果の発表件数を表6に示す。これらの成果の内、主要な論文の別刷り等が、本報告書の後半に掲載されている。

表6：研究成果の発表件数

| | 平成21年度 | 平成22年度 | 平成23年度 |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む） | 51 | 84 | 88 |
| 国際会議、国内会議、研究会、口頭発表等 | 152 | 198 | 291 |
| その他（特許・受賞・マスコミ発表等） | 5 | 19 | 11 |
| 合計（件） | 208 | 301 | 390 |

2. 研究成果報告書
<一般公募共同研究>

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11001 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

微小生物の運動器官と運動機能に関する工学的研究
Technological Research on Locomotive Rrgans and Functions of Minute Living Things

須藤 誠一*†, 塩野 正裕*, 北寺 幸平*, 貝沼 俊哉*
 白井 敦**, 早瀬 敏幸**††
 *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（アミやコペポーダ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ことを目的とする。

2. 研究成果の内容

生物進化は海から陸上へと生息領域を拡大することによって多様性を増したと考えられることから、動物のロコモーションにおける進化の過程を解明する目的をもって、水中を移動する微小水棲生物（コペポーダ、アミ）、海中で遊泳し海浜で歩行する等脚目（ヒメハマホリムシ）、海浜に生息し歩行移動と危機的状況で体長の数十倍もの距離を跳躍する端脚目（ヒメハマトビムシ）、水上と陸上を跳躍によって行き来する粘管目（トビムシ）を取り上げ、それらの移動様式を力学的な観点から調べた。特に、移動様式に密接に関連する遊泳器官・歩行器官・跳躍器官の形態や機能と移動機構の関係を調べた。その結果、体軸方向に、1対の付属肢を有する体節構造を連結して繰り返すような構造を有する節足動物は、付属肢をそ

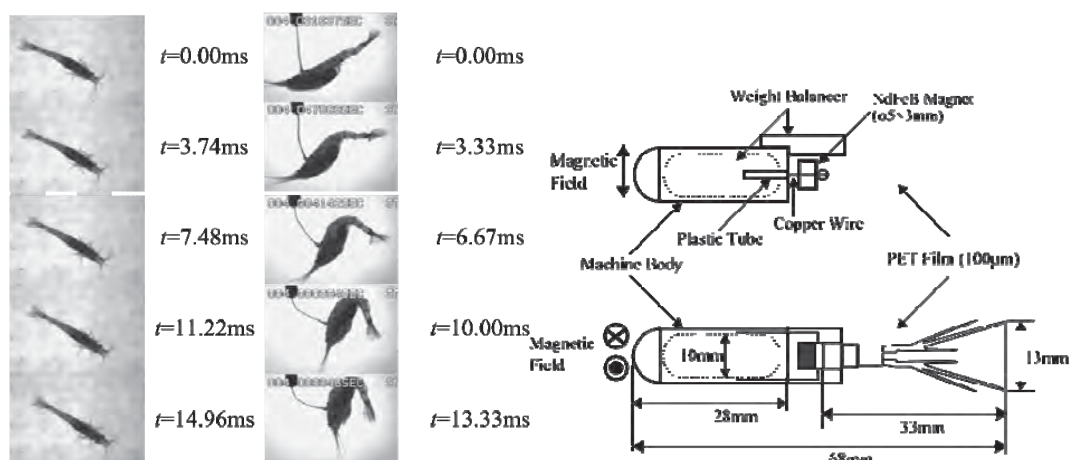


図1：アミの通常遊泳と突発遊泳

図2：非接触エネルギー供給型遊泳メカニズム

の動物の運動様式に合わせて合理的に進化させた異規的体節性によって優れた遊泳・歩行・跳躍機能を発現することが明らかとなった。特に、トビムシは、体長が 1mm と小さいにも関わらず、体長の 100 倍以上もの距離を空気抵抗に打ち勝ち、瞬時に跳躍移動する。また、逆に抗力を利用して数千 m もの上空まで飛行器官としての翅を持たずに移動することも行っている。そのため、粘管目昆虫のトビムシこそが飛行昆虫の原点であると考えられ、現在、翅を有しない微小昆虫の飛行メカニズムを明らかにする研究を継続している。

3. 研究目標の達成状況

微小な節足動物は付属肢を、センサとしての触覚、遊泳のための遊泳脚、歩行のための歩行脚、跳躍するための尾肢に進化させ、顕微鏡によって運動器官を観察すると、それぞれの器官の目的に合わせた合理的な形態構造を取っていることが明らかにされた。特に、コペポダの突発的な遊泳は尾肢によって、アミの突発的な遊泳も尾扇によって、ハマトビムシやトビムシの跳躍も腹部の付属肢によって可能であることが判明し、目的の達成度は高い。

4. まとめと今後の課題

生物の優れた機能に倣うマイクロロボットなどへの応用を考慮し、マイクロ遊泳メカニズムを試作し、特性を調べた。今後は、さらに優れた機能・機構の発見と応用が目的となる。

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] 須藤誠一, 星加恭平, 白井 敦, 早瀬敏幸: 微小な海浜生物のいくつかの移動様式, 実験力学, Vol. 11, No. 2 (2011), 91-100.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] M. Shiono, S. Sudo, A. Shirai and T. Hayase: Movement of Springtail in Air, *Proceedings of the Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2011), pp.152-153.

[3] K. Kitadera, S.Sudo, A. Shirai and T. Hayase: Observation of Fly Wings and Flight Behavior, *Proceedings of the Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2011), pp.154-155.

*[4] T. Kainuma, S.Sudo, A. Shirai and T. Hayase: Springtail Jump on Water Surface, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.104-105.

[5] 須藤誠一, 北寺幸平, 白井敦, 早瀬敏幸, 双翅目昆虫の翅特性, 日本実験力学学会 2011 年度年次講演会講演論文集, No.11 (2011), pp.53-55.

[6] 須藤誠一, 北寺幸平, 貝沼俊哉, 白井敦, 早瀬敏幸, 節足動物における飛行・跳躍・遊泳に関する研究, 第 27 回エアロ・アクアバイオメカニズム研究会講演資料集, (2011), pp.9-10.

[7] 貝沼俊哉, 須藤誠一, 白井敦, 早瀬敏幸, トビムシの水面上での跳躍, 日本機械学会東北支部第 47 期講演会講演論文集, No.2012-1 (2011), pp.16-17.

[8] 天野拓也, 須藤誠一, 白井敦, 早瀬敏幸, ハマトビムシのロコモーション・メカニズム, 日本機械学会東北支部第 47 期講演会講演論文集, No.2012-1 (2011), pp.18-19.

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 | J11002 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | 基盤研究分野 |
| 研究期間 | 2011.4～2012.3 |

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

須藤 誠一*†, 猪股 聡太*, 篠崎 成大*
 高奈 秀匡**, 西山 秀哉**††

*秋田県立大学システム科学技術学部, **東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本研究で提案する磁石—磁性流体系システム全体のサイズをマイクロ化するため、一定太さ部分が、直径 **0.5mm** の針を小さな永久磁石で磁化させた要素を使用し、針先端に微量の磁性流体を吸着させた系を構築した (図 1 参照: 図中の数字は寸法を表し、単位は **mm** である)。吸着磁性流体の量は、重力に打勝つ磁気力によって保持できる量とした。この微小な磁性液滴に外部からヘルムホルツコイルによって、交流磁場を印加し、その応答を外部磁場の周波数を変えることによって詳細に調べた。その結果の一例を図 2 に示す。図 2 は経過時間に対する磁性液滴系に定義した物理量の変化を示している。すなわち、磁性液滴は外部磁場の印加に対して伸長と縮小の応答を示している。基本的な磁性液滴応答は外部磁場に対するこのような伸縮形状変化であるが、使用する針が比較的太い場合は、特定の周波数において、液滴頂部に界面不安定性による幾つかのスパイクを伴うこともある。この形状振動応答は、数百 Hz の高周波数においても観察され、アクチュエータ等への応用も可能である。

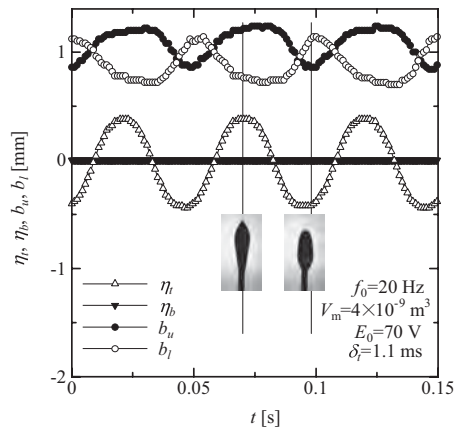
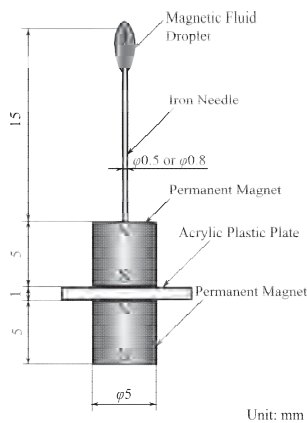


図 1 : 磁石—磁性流体系の概略図と寸法 図 2 : 磁化した針先端に吸着した液滴応答例

3. 研究目標の達成状況

外部から印加する磁場強さは数 mT の比較的弱い磁場においても磁性流体液滴の界面現象を制御できることが、明らかにされ、さらに磁石—磁性流体系を非常に小さなサイズにまで縮小しても、システムの応答は高周波数まで、優れた特性を示すことが判明したことから、目標達成の状況は高いといえる。

4. まとめと今後の課題

針を小さな永久磁石に接触させることによって磁化させ、その針先端に微量の磁性流体を吸着させた磁石—磁性流体系を構築し、外部交流磁場による磁性流体マイクロドロップの界面流動現象の周波数特性を調べた。次なる目標は、アクチュエータとしての応用である。

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)

In press

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] S. Sudo, T. Goto, M. Shinozaki, T. Kainuma, H. Takana and H. Nishiyama: The Dynamic Behavior of Magnetic Levitating Magnet-Magnetic Fluid Element in Alternating Magnetic Field, *Proceedings of the 15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Napoli, Italy, (2011), pp.101-102.
- [2] S. Sudo, T. Goto, T. Yano, M. Futamura, H. Takana and H. Nishiyama: Micro Reciprocating Actuator using Magnetic Fluid and Two Permanent magnets, *Proceedings of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011*, Kobe, CD-ROM, (2011), pp.1-10.
- [3] S. Sudo, H. Takayanagi, T. Yano and H. Nishiyama: The Cavity Generated with Water Entry of a Magnetic Fluid Coated Cylindrical Magnet, *Proceedings of the 12th International Conference on Electro-Rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspension*, Philadelphia, USA, pp.708-721(2011).
- *[4] M. Shinozaki, S. Sudo, H. Takana and H. Nishiyama: Oscillation Characteristics of Levitated Magnet-Magnetic Fluid System, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.142-143.
- [5] S. Inomata, S. Sudo, H. Takana and H. Nishiyama: Vibration Characteristics of Magnetic Fluid Droplet Adsorbed to Magnetized Needlepoint in Alternating Magnetic Field, *Book of Abstracts of Seventh Japanese-Mediterranean and Central European Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials*, Budapest, Hungary, (2011), pp.35-36.
- [6] S. Sudo, D. Asano, H. Takana and H. Nishiyama: Alternating Magnetic Field Responses of Magnetic Fluid Drop Adsorbed to a Small Permanent Magnet, *Book of Abstracts of Seventh Japanese-Mediterranean and Central European Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials*, Budapest, Hungary, (2011), pp.113-114.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11003 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Energy |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

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

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

* Chongqing Institute of Automobile, Chongqing University of Technology

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

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

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

The time-averaged wake structures of notchback and fastback models have been numerically and experimentally studied. As shown in Figure 1, at large rear diffuser angle, due to the low pressure in the separation area, the spanwise pressure gradient increases sharply in the middle part of the rear diffuser front edge. This large pressure gradient brings a spanwise flow on the rear diffuser plane, and drives the underflow moving from lateral to center. The left and right underflows converge into the center part of the model rear end, and form a vertical flow. When the underflow enters the wake region, the spanwise and vertical flows roll up into counterclockwise and clockwise lower trailing vortices on the left and right, respectively.

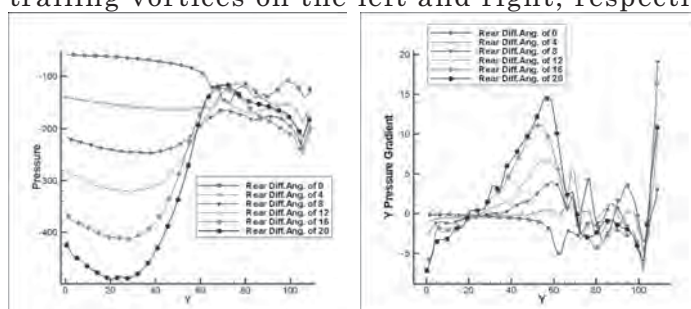


Figure 1: Pressure distributions and pressure gradient in spanwise direction at the front edge of the rear diffuser plant of passenger vehicle

To better understand the wake structure of two-wheel road vehicle, numerical simulations are performed on two detailed commercial motorcycles to observe the aerodynamic performance on unoccupied vehicle and rider-vehicle assembly system (Figure 2). The results show that the form and construction of the luggage rack largely influence the wake structure of the vehicle, proper design of the attack angle of the luggage rack and the opening in it can effectively reduce the drag and lift.

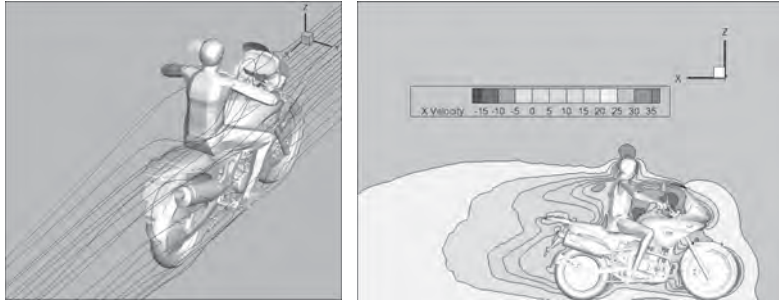


Figure2: Stream lines and velocity distribution in the longitudinal symmetry plane of a detailed commercial motorcycle

3. Achievements

This project is scheduled for completion in 3 years. The stage goal of the first year is achieved about the time-averaged simulation and experiment. In addition, numerical simulations of the aerodynamic characteristics on two detailed motorcycles were carried out to better understand the wake structure of two-wheel road vehicle.

4. Summaries and future plans

Summaries: Different rear diffuser angle and shape of passenger vehicles have significant influences on the wake structures. The flow separation on the rear diffuser may generate a pair of “Lower trailing vortices” in the wake, which largely alter the traditional wake structure constructed by Ahmed. For motorcycles, the form and construction of the luggage rack largely influence the wake structure of the vehicle, proper design of the attack angle of the luggage rack and the opening in it can effectively reduce the drag and lift.

Future plans: On the basis of the time-averaged results, the typical cases will be selected for the unsteady simulation and experiment to investigate the unsteady characteristics of the wake structures. The simulations will be mainly carried out in Chongqing University of Technology, and the experiments will be carried out in the Low-turbulence Wind Tunnel of IFS, Tohoku University.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] C. Lai, Y. Kohama, S. Obayashi, and S. Jeong: Experimental and Numerical Investigations on the Influence of Vehicle Rear Diffuser Angle on Aerodynamic Drag and Wake Structure, *Int. J. Automotive Engineering*, Vol. 2 (2011), pp.47-53.

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

*[2] C. Lai, S. Obayashi, Y. Zhou and H. Xing: Numerical Simulation of the Aerodynamic Characteristics on a Detailed Motorcycle, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.42-43.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11004 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

ナノディスクアレイを用いた新規量子デバイスの特性評価技術開発
Development of Analysis Techniques for Novel Quantum Devices using Nanodisk Array

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

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

半導体ナノディスクを用いたデバイスの特徴は、キャリアとして電子と正孔を用いることができることであるが、説教的に電子と正孔の両方のキャリアを用いる検討は少ない。これを積極的に利用法を検討するためには光を照射することで得られる光照射効果を調べることである。ここでは、トンネルバリアを介してナノディスクを連結した構造の最も簡単な構造である、単電子トランジスタ（SET）をシリコンのナノディスクを用いて作製し、光照射効果を評価した。

ここでは、基本的に電子をキャリアとする SET を用いて、2種類の実験を行った。一つは、SET のディスクの近くに正孔を励起し、これをトラップすることにより、見かけの電子数が1個ずらす操作である。すなわち、マイナス1個の電子状態が実現できる。

図1は、SET のゲート電圧 V_g を大きい方向にスキャンした際の、電流の変化を見ている。一番下のカーブは、光照射なしの状態でもスキャンした場合の結果で、電子0個（1.67V 付近）から電子1個（1.82V 付近）への変化を見ており、ゲート電圧のプラスに引かれて、電子1個と2個が双安定になったところで電流が流れる。中断のカーブは、スキャン前の $V_g=1.60V$ で光を照射し、暗状態にしてからスキャンした結果である。電子0個状態で電流が流れ始めるが、途中で消える。これは、正孔がディスク付近にトラップされたために、電子が1個、低い V_g で入り始めたことを示している。電子が入って、正孔と再結合したところで、電子は流れられなくなり、電流ピークは消える。すなわち、急激な電流の減少は、正孔1個と電子1個の再結合の瞬間を捉えている。光を当て続けた状態で V_g をスキャンすると、再結合で成功が消えても、再度正孔が励起されるため、電流ピークが復活する。

この特性を詳細に解析すると、正孔の再結合と光照射による励起は、確率的に起きていることが解明できた。ゲート電圧による再結合などの速度から、トラッ

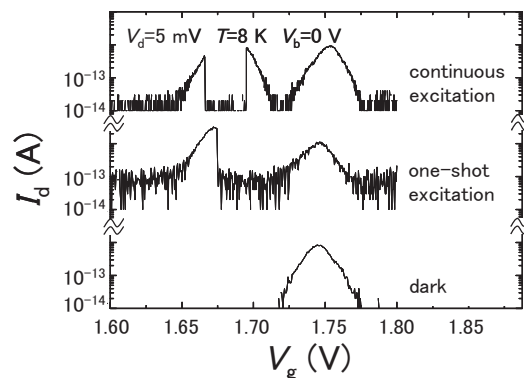


図1 I_d - V_g 特性. V_g は1.60 Vから1.80 Vへ走査した。

プの大まかな位置も推定できている。

二つ目は、光を照射することにより、単電子トランジスタ (SET) を単正孔トランジスタ (SHT) として動作

させることである。図 2 は、光を当てな

がら、 V_g をスキャンして評価した、クーロンダイヤモンド特性である。黒い部分が、電流が流れないクーロンブロック状態を示す。負側は SHT として動作している領域であり、コンタクトが取れにくいため、ノイズが多いが、正側の SET のダイヤモンドをほぼ折り返した特性になっており、正電荷である正孔をキャリアとしても動作することが示された。

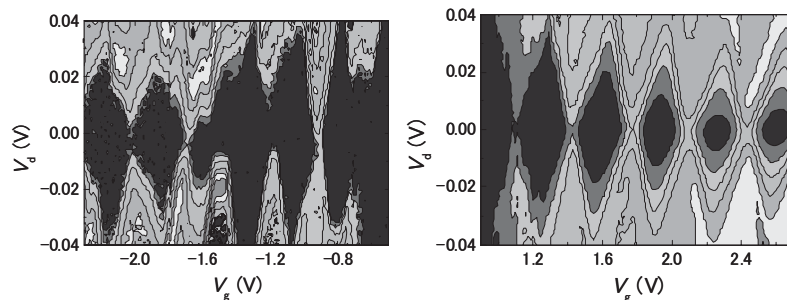


図 2 光照射時におけるクーロンダイヤモンド. (a) 負 V_g 領域. (b) 正 V_g 領域.

3. 研究目標の達成状況

今回は、ドットアレイの高機能応用を評価する前段階として、新たな機能を追加する目的で、光照射による正孔励起による、新たな特性を評価することとした。電子キャリアの SET に、正孔を導入することにより、ランダムな応答を出現させることに成功し、今後のニューロ的な応答に利用できることがわかった点は大きい。ここでは説明していないが、単純な正負のキャリアの足し算では説明できない効果も観測されており、新たな利用の可能性もある。

4. まとめと今後の課題

正孔・電子共存系を用いることで、新たな機能を発現させることができる可能性を示した。24年度に新たに提案する、ナノディスクアレイデバイスにおいては、高速動作性が問題になるので、今後は、単電子効果でどこまで高速動作可能かを評価していく。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] S. J. Shin, J. J. Lee, H. J. Kang, J. B. Choi, S.-R. Eric Yang, Y. Takahashi, and D. G. Hasko: Room-Temperature Charge Stability Modulated by Quantum Effects in a Nanoscale Silicon Island, *Nano Letters*, Vol. 11, (2011), pp.1591-1597.

[2] M. Shinohara, Y. Kato, M. Arita, A. Fujiwara, Y. Ono, K. Nishiguchi, H. Inokawa and Y. Takahashi: Observation of new current peaks of si single-electron transistor with single-hole trap during photo-irradiation, *2011 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW-11)*, Workshop Abstracts, pp.59-60 (2010.6, 13-14 @Kyoto, Japan).

他 合計 4 件

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[3] M. Sinohara, Y. Kato, M. Arita, A. Fujiwara, and Y. Takahashi: Si Single-Electron Transistor with Single-Hole Trap Formed by Photo-Irradiation, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, Sendai, (2011), pp. 106-107.

他 合計 11 件

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) 特願 2011-106960: 藤原聡, 小野行徳, 西口克彦, 高橋庸夫, 有田正志, 篠原迪人: 受光装置, 2011.5.12, 出願.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11005 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

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

喜多 隆*†, 寒川 誠二**††

*神戸大学大学院工学研究科, **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

InGaAs/GaAs 量子ドットは近赤外域で高感度に光応答するため、レーザー、光中継デバイス、太陽電池に最適な材料として注目されている。高品質な量子ドット結晶を作製するには、従来からのボトムアップ手法をトップダウンプロセスと融合した新しいアプローチによって結晶欠陥を抑制した量子構造の作製が不可欠である。本研究ではボトムアップで作製したナノ構造に対して中性粒子ビームプロセスを活用したトップダウンによるエッチングと不純物ドーピングを実施し、化合物半導体特有の荷電性欠陥準位を中性化して不活性化させた新しいタイプの高品質な量子ドット作製を実現してデバイス動作に必要な基礎物性を明らかにする。

2. 研究成果の内容

本研究では 3 次元的に空間配列した制御性の高い量子構造を実現するため、ボトムアップ手法と中性粒子ビームプロセスを活用したトップダウンプロセスを融合した新しいアプローチの確立を目指している。具体的には、GaAs(001)基板上に作製した InGaAs 系量子ドットの作製と光物性基礎特性を調べた。特に、不純物ドーピングによる化合物半導体特有の荷電性欠陥準位を不活性化する技術を確立するため、ボトムアップで作製した自己形成量子ドットの光学特性に対する不純物添加効果を明らかにする必要がある。

ボトムアップによる InGaAs/GaAs 自己形成量子ドット成長過程は (1) 核生成過程, (2) 自己形成過程, (3) 成長停止過程の 3 段階からなる。この自己形成過程を選択した精密な不純物のフラックス制御を実施すれば、化合物半導体特有の荷電性欠陥準位不活性化させた新しいタイプの結晶高品質化が期待できる。本研究ではこのような Si 不純物を精密に制御した InAs 量子ドットの電気伝導特性と発光特性を詳細に調べた。

図 1 に (1) ~ (3) の量子ドット成長過程で Si フラックスを精密に制御して供給した量子ドットの原子間力顕微鏡 (AFM) 像を電流像と比較した。Si の供給量は量子ドットの濃度とほぼ同じになるようにした。すなわち、量子ドット 1 つあたり 1 個程度のわずかな Si 不純物が光学特性にどのような影響を及ぼすかを調べた。図の上下には、対応した AFM 像と電流像を比較している。一番左の Si を添加していない量子ドットでは電流は流れていない。一方、Si 添加した量子ドットはいずれも量子ドットの部位のみが電流値が大きくなり、2 次元的に一樣に Si

フラックスを照射しているにもかかわらず、量子ドットに不純物を取り込まれていることがわかる。特に、自己形成過程で Si を供給すると、均一に不純物を取り込まれることを見出した。この試料のフォトルミネッセンスを測定したところ、バリア材料である GaAs のバンドギャップ以上の高エネルギーで励起した際に、大幅な発光特性の改善が確認できた。また、発光減衰特性の精密な解析より、無輻射過程が Si 添加によって顕著に抑制されることを明らかにした。

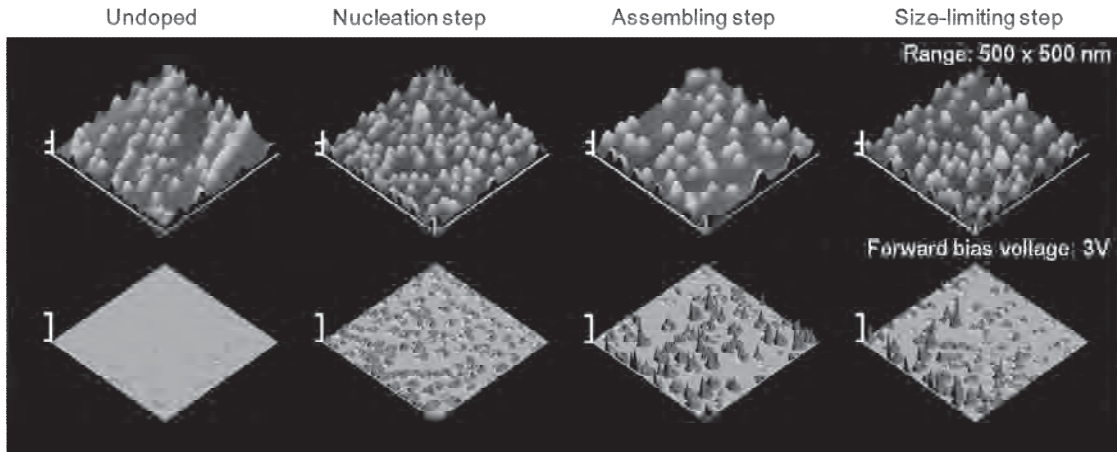


図 1：異なるタイミングで Si を添加した InAs 量子ドットの原子間力顕微鏡像と電流像の比較

3. 研究目標の達成状況

中性粒子ビームプロセスを活用したトップダウンプロセスで不純物ドーピング条件の最適化によってドットあたり数個程度の不純物を制御できるようになると、無輻射再結合中心が不活性化されて発光特性が劇的に改善できると同時に、太陽電池デバイスなどに利用した場合には再結合ロスを抑止することができる。本研究では量子ドットの濃度と同程度のわずかな Si 添加した InAs 量子ドットにおいて明瞭な無輻射過程の抑制効果を明らかにできた。このことは次のステップで実現したい量子ドット超格子の高品質化に不可欠な技術になると考えている。

4. まとめと今後の課題

InAs 量子ドットに Si を不純物添加することによって、電子捕獲中心を不活性化することがわかった。今後は、中性粒子ビームプロセスを活用したトップダウンプロセスによる量子構造の高品質化にこの知見を生かしていく。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] T. Kita, R. Hasegawa, and T. Inoue: Suppression of Nonradiative Recombination Process in Directly Si-doped InAs/GaAs Quantum Dots, *J. Appl. Phys.*, 110(2011),103511(4pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Takashi Kita, Osamu Kojima, and Yukihiko Honda: Optical Properties of Quantum Dot Superlattices, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 108-109.

[3] 長谷川隆一、井上知也、田中秀治、原田幸弘、小島磨、喜多隆: 不純物制御した InAs 量子ドットにおける発光再結合ダイナミクス, 第 72 回応用物理学関係連合講演会、山形大学 (2011)

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11006 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

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

遠藤和彦*†, 和田章良**, 寒川誠二**††

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

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

新規のダメージフリー加工技術である中性粒子ビーム技術をナノデバイス作製に適用し、特性を向上させる。特に Ge 基板の中性粒子ビーム酸化を試みる。

2. 研究成果の内容

これまで中性粒子ビームを用いた、立体チャネルデバイス用ゲート絶縁膜の形成技術の開発を行った。本研究においては、酸化膜の形成研究をさらに発展させ、Ge 基板の中性粒子ビーム酸化を検討した。初年度として、酸化条件の最適化および特性評価を行い、中性粒子ビーム酸化の有用性を Ge 基板で実証することを試みた。

Ge (100) 基板を用いて、中性粒子ビームを用いて酸化を行った。基板温度は 300℃とし、中性粒子ビームの照射エネルギーを可変して、GeO₂ 膜の膜質に与える影響を調査した。

図1に、形成した GeO₂ 膜の XPS スペクトルを示す。GeO₂ のピークと若干のサブオキシドのピークが検出されている。GeO₂ とサブオキシドの割合は、1eV で照射した場合 15.3 : 84.7%, 5 eV の場合は 7.7 : 92.3% となり、従来の報告例よりも非常に低いサブオキシドの構成比を達成した。すなわち、中性粒子ビーム酸化により、良好な GeO₂ 膜を 300℃という低温で形成することに成功した。またある程度の照射エネルギーで酸化を行う方が、良好な GeO₂ 膜を形成できることが分かった。

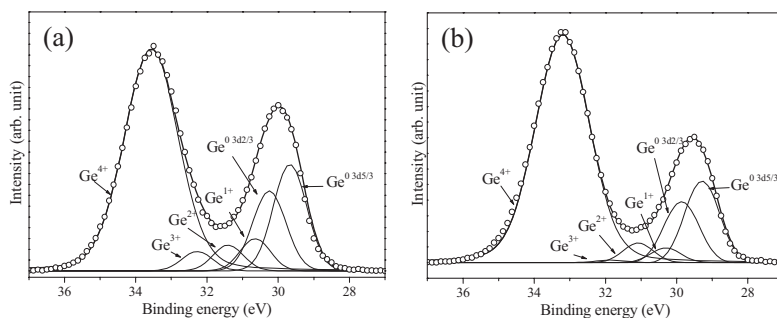


図1 : NBO により形成した GeO₂ 膜の XPS スペクトル(3d)領域
(a) エネルギー1 eV, (b)エネルギー5 eV

続いて、これらの条件で酸化した GeO₂ 膜の電気特性を図2に示す。界面準位に起因したピークは見られず、良好な CV および IV 特性が得られている。

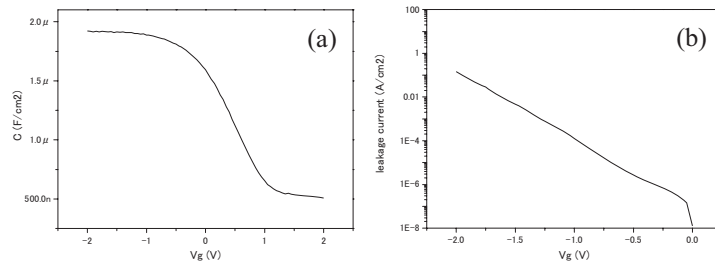


図2 :Ge MOS キャパシターの電気特性
(a) CV 特性, (b) IV 特性

3. 研究目標の達成状況

計画の通り、中性粒子ビーム酸化により、高品位のゲルマニウム酸化膜の形成に成功し、研究目標は達成された。これにより、Ge トランジスタの作製のためのキーププロセスである、金属—酸化膜—半導体界面の高品位化に成功した。

4. まとめと今後の課題

中性粒子ビームの最先端 MOS トランジスタへの応用に取り組み、Si の酸化はもとより Ge においても有力な高品位酸化プロセスとなり得ることを実証した。今後は MOS トランジスタを実際に試作し、トランジスタ特性の向上を実証することが課題である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] Akira Wada, Kazuhiko Endo, Meishoku Masahara, Chi-Hsien Huang, and Seiji Samukawa, Low activation energy, high-quality oxidation of Si and Ge using neutral beam, *Appl. Phys. Lett.* 98, 203111 (2011).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] Akira Wada, Kazuhiko Endo, Meishoku Masahara and Seiji Samukawa, *Extended Abstracts of the 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials*, Nagoya, (2011), pp. 8-9.
- [3] Akira Wada, Kazuhiko Endo, Meishoku Masahara, Chi-Hsien Huang, and Seiji Samukawa, The Mechanism of Thin SiO₂ and GeO₂ Film during Low-Temperature Neutral Beam Oxidation Process, *American Vacuum Society 58th International Symposium and Exhibition*, Nashville, TN USA, (2011), pp. 205.
- [4] 和田章良, 遠藤和彦, 昌原明植, 寒川誠二、「低温・超低損傷中性粒子ビーム酸化(NBO)を用いた高品質 GeO₂ 膜の形成(2)」, 第72回応用物理学会学術講演会 1a-Q-5.

- *[5] Kazuhiko Endo, Akira Wada, and Seiji Samukawa, Neutral Beam Fabrication Technology for the Double Gate MOSFET, *Proceedings of Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 110-111.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|------|----------------|
| 課題番号 | J11007 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | エネルギー分野 |
| 研究期間 | 2011.4 ~2012.3 |

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

門脇 敏*†, 小林 秀昭**††

*長岡技術科学大学技術経営研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

図1は、ルイス数 $Le = 0.5$ & 1.5 における分散関係（未燃ガス温度 $T_u = 1.0, 2.0, 3.0$ ）を示したものである。ルイス数が小さく（大きく）なると、増幅率は増大（減少）し不安定域は広く（狭く）なる。これは、拡散・熱的効果によるものである。また、未燃ガス温度が高くなると、増幅率は増大する。これは、燃焼速度が増加するからである。

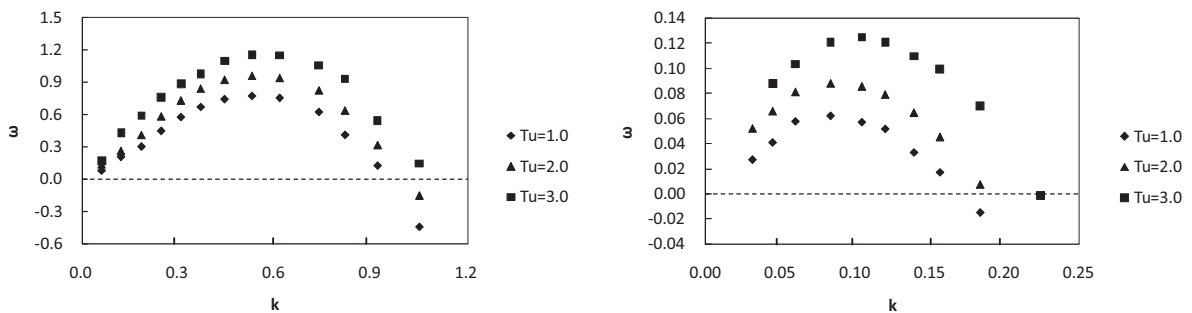


図1：分散関係 ($Le = 0.5$ & 1.5 , $T_u = 1.0, 2.0, 3.0$)

図2は、平面火炎とセル状火炎の燃焼速度の未燃ガス温度依存性を示したものである。未燃ガス温度が高くなると共に、両火炎の燃焼速度は大幅に増加する。これは、質量流束密度が大きくなること、並びに未燃ガスの密度が減少することによるものである。また、セル状火炎の燃焼速度と平面火炎の燃焼速度の比は、未燃ガス温度が高くなると共に単調に小さくなる。これは、火炎の不安定性における熱膨張の効果が弱くなるからである。加えて、この現象は $Le = 0.5$ において顕著である。これは、未燃ガス温度の上昇と共にゼルドヴィッチ数が小さくなり、拡散・熱的不安定性が弱くなるからである。

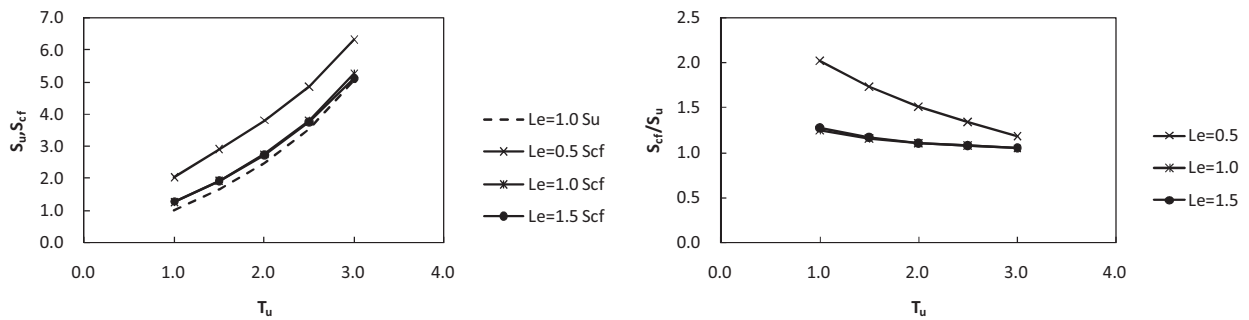


図2：平面火炎とセル状火炎の燃焼速度

3. 研究目標の達成状況

本研究により，高温予混合火炎の不安定性に及ぼす未燃ガス温度の影響や，その基本的なメカニズムが明らかになった．従って，高温予混合火炎の不安定性に着目した本研究は，十分な成果を得ている．

4. まとめと今後の課題

高温予混合火炎の不安定性に及ぼす未燃ガス温度の影響は，予混合燃焼研究において大きなインパクトがある．今後は，本研究で得られた結果をベースとして，予混合燃焼のモデリングに資することができるか否かを検討する予定である．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

- [1] Kadowaki, S., Yahata, M., and Kobayashi, H.: Effects of the unburned-gas temperature and Lewis number on the intrinsic instability of high-temperature premixed flames, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 6, No. 3, (2011), pp. 376-390.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] Kadowaki, S., Oshima, T., and Kobayashi, H.: Instability of high-temperature premixed flames, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 78-79.

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 | J11008 |
| 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 | 2011.4～2012.3 |

末梢神経の磁気刺激に関する研究
Study on the Magnetic Stimulation for the Peripheral Nerve

八島 和美*†, 高木 敏行**††, 出江 伸一***

*(株)IFG, **東北大学流体科学研究所

***東北大学大学院医工学研究科

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

脳機能障害による四肢麻痺は運動野の四肢に対応する領域に損傷を受けているために生じるもので、末梢神経と筋肉は正常な場合が多い。しかしながら長期間、麻痺状態が継続すると「廃用症候群」と称される筋肉の麻痺が生じる。従って早期のリハビリテーションが必要とされる。本共同研究では、末梢神経を磁気刺激することで電気刺激のような疼痛を伴うことなく四肢の筋運動を誘発可能なリハビリテーション用の装置開発を目指している。平成22年度に流体科学研究所、医工学研究科、(株)IFGの共同研究で実施した「脳深部磁気刺激の応用に関する研究」において、筋電位計の信号をトリガーとして磁気刺激装置から磁界を発生し目的部位の筋肉に大きな運動を誘発することに成功した。また、2連発磁気刺激が治療により有意であることも確認された。本年度は、磁気刺激の連発数が運動効果にあたる効果の評価、および連発磁気刺激用パルス電源の高効率化に取り組む。

2. 研究成果の内容

末梢神経に磁気パルスによる刺激を与えると、神経の内部に電流を誘起し、関連する筋肉を収縮する。その収縮の効果は筋肉に蓄積されると考えられるため、筋肉の収縮量は、磁気パルスの数が増えるに従って増えるものと考えられる。実際に図1のような機構に右手を固定し、ハイスピードカメラでこれを撮影しながら、複数の磁気パルスにて右手第三指の神経を刺激し、その効果について評価を行った。その結果、図2が示す通り、磁気パルスの数と筋肉の収縮量の間には、明白な相関があり、パルス数と指先に上昇距離（筋肉の収縮量）はほぼ比例関係にあることが判明した。

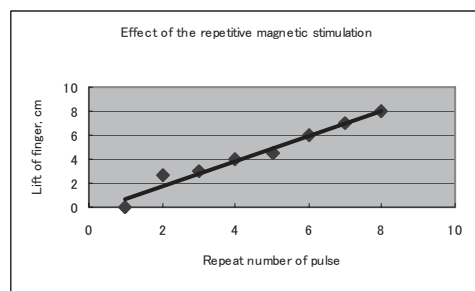


図1. 連続パルスによる指先上昇距離の測定 図2. 磁気パルス数に対する指先の上昇距離

本研究の目指すところである磁気刺激によるリハビリテーション装置の製品化のために

は、その技術の根幹をなす磁気パルス電源のさらなる高効率化が求められている。そこで今回我々は、「①使用する 3 つのコンデンサの充電を 1 つのトランスでまかない充電部の重量と容積を最小化する。②充電抵抗を充電電圧の変化にともない切り替えていくことで充電時間の短縮を図る。③充電部後段にリアクトルを設置してリップル電圧をカットし、無駄な電力消費を抑える。」以上 3 つの技術を使用して、パルス電源のさらなる小型化、高効率化を試みた。その結果、家庭用の 100V 電源でも使用できる連続磁気パルス電源の開発に成功した。図 3 に示す通り、この新たに開発された電源はパルス間隔 20ms の 3 連パルス列を 200ms 間隔で出し続けることが可能である。

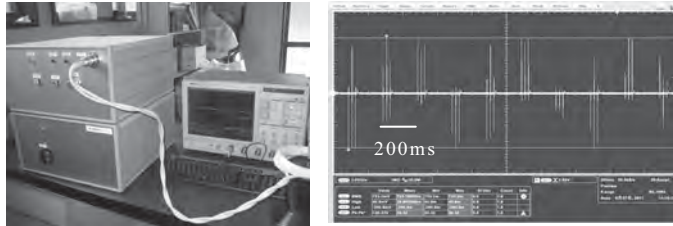


図 3. 製作した小型磁気パルス電源とその磁界波形

3. 研究目標の達成状況

本年度の研究により高頻度磁気刺激による運動効果の拡大が確認され、家庭用電源でも使用可能な程度に小型化された連続パルス用磁場電源の試作機が完成した。この成果と、患者の運動努力の検出技術についての研究成果を、組み合わせることにより、現在われわれが目指しているリハビリテーション装置は、技術上はほぼ完成するものと思われる。また、本研究の基本技術についての特許出願も本年度中に行っており、特許戦略的にも製品化までもう一歩という状況にある。

4. まとめと今後の課題

本年度の研究成果により、リハビリテーション装置に関するパルス磁界発生技術については、技術的課題がほぼ解決されたものと考えられる。今後は、患者の運動努力の検出技術についてより深い研究が求められる。また、実際の製品化にあたっては薬事法に定められた医療機器の許可申請を行う必要があり、この申請手続きに備えた準備を行う必要がある。

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）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] H. Mori, T. Takagi, S. Izumi, H. Kanetaka, E. Suzuki, and T. Abe: Study of Magnetic Stimulation for the Peripheral Nerve, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 102-103.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）

磁気刺激リハビリテーション装置 高木, 出江, 阿部他 2011/11/13 出願

| | |
|------|----------------|
| 課題番号 | J11009 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | 基盤研究分野 |
| 研究期間 | 2011.4 ~2012.3 |

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

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

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本年度の研究として、①衝撃波管を利用した高速非定常温度場発生装置 (以下、供試衝撃波管) の発生温度変化の基礎特性の把握、ならびに②熱音響波 (LITA) 計測用光学系の再設計を実施した。具体的内容について以下に示す。

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

予備実験の結果から供試衝撃波管内の測定部への計測光の導入および測定位置の調整方法に改善の余地があることが判明した。そこで、光学系の反射鏡の一部を波長選択反射鏡 (ダイクロイック・ミラー) に変更し、励起光とプローブ光路の一部を共通化した。このことで光学系全体を小型化し、効率的な光学部品配置とした (Fig. 2)。また、光学系全体を可搬とするため、ブレッド・ボード上に光学系をまとめ、供試衝撃波管測定部への光路の自由度を改善した。

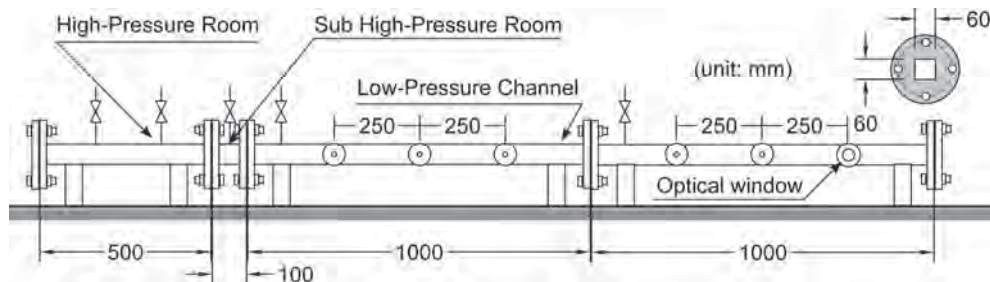


Fig. 1 Schematic diagram of shock tube for LITA measurement.

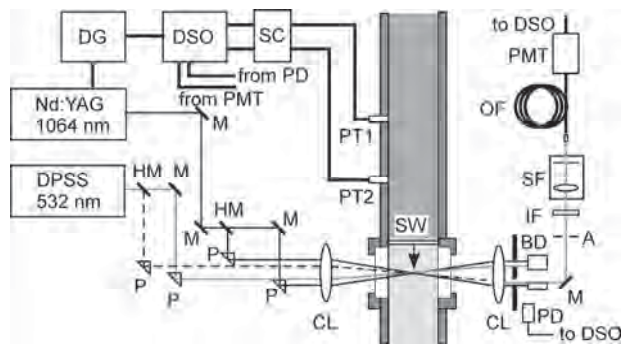


Fig. 2 Schematic diagram of shock tube for LITA measurement.

3. 研究目標の達成状況

衝撃波管により発生させた平面衝撃波を利用することで、放電によるものより数値解析結果と比較・評価が容易な基礎実験を行い、本手法の精度評価を行う予定だったが、上記2項に記したように、光学系の再設計が必要となったため、未実施となった。

4. まとめと今後の課題

供試衝撃波管の特使の把握、および発生する温度場の予測が可能となった。また、光学系の問題点が明らかとなり、その改善が図られた。今後の課題として、測定光学系の再設計後、特性を把握した供試衝撃波管による平面衝撃波背後の非定常高速温度場の計測結果と数値解析による推定値との比較、考察が課題である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] T. Mizukaki and S. Obayashi: Shock Induced Temperature Measurement using Laser-Induced Thermal Acoustics, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.58-59.

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 | J11010 |
| 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 | 2011.4～2012.3 |

サイレント超音速機の超音速飛行特性に関する研究

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

大林 茂†, 佐宗 章弘**††

酒井 武治**, 鈴木 角栄**, 山下 博**, 小川 俊広***, 鶴飼 孝博***

*東北大学流体科学研究所, **名古屋大学工学研究科, ***融合流体情報学研究分野

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

バリスティックレンジ装置を用いた近傍場圧力計測実験では、平板に圧力変換器を埋め込んで圧力波形を計測している。この場合、飛行体から発生した衝撃波が平板で反射した衝撃波と干渉し、測定圧力に影響を及ぼすと考えられる。また、バリスティックレンジ装置で射出した飛行体は、自由飛行するため安定した水平飛行が困難であり、波形計測時の飛行体姿勢を計測しなければならない。さらに、ソニックブーム現象は圧力波が起因して生じるため、飛行体周りの流れ場の光学可視化も重要である。したがって、近傍場圧力の高精度計測には、衝撃波干渉が測定圧に影響を及ぼさない計測システムの構築と近傍場圧力波形、飛行姿勢および流れ場の光学可視化の同時計測が要求される。そこで、本研究では、衝撃波干渉が測定圧に及ぼす影響の解明と対策を行い、流れ場可視化と飛行姿勢の同時計測手法を確立した。さらに、圧力波形を既存の風洞試験結果と比較し、圧力計測精度の検証を行った。

球状飛行体を用いて影写真法で流れ場の可視化と圧力変換器で近傍場圧力波形を同時に計測し、平板での衝撃波反射と飛行体の衝撃波との干渉が測定圧力に及ぼす影響を明らかにした。その結果、反射波と衝撃波が干渉することで持続時間が増加し、大気圧回復部分の波形が乱れることが分かった。また、衝撃波の反射により平板のエッジから発生する膨張波は測定圧のピーク値に影響を及ぼし、平板のエッジから距離を置いた位置で圧力波形を計測することで、この膨張波の影響を無視できることが分かった。

図1に球状飛行体の流れ場の光学可視化と直接撮影の同時撮影画像を示す。流れ場の光学可視化と飛行姿勢を同時に計測するため、影写真光学系にストロボ光源を加えて、飛行体表面に照射した。直接撮影から模型表面に施されたマーキングの変位量を計測し、幾何学的に飛行姿勢を算出できることを確認した。また、ストロボ光が流れ場の光学可視化に影響を及ぼさないことを確認した。さらに、流れ場の光学可視化、飛行体の飛行姿勢および近傍場圧力が同時に計測できることを確認し、同時可視化手法を確立した。

図2に本実験で得られた圧力波形と既存の風洞試験計測波形の比較結果を示す。比較した波形は軸対称形状から得られた波形である。圧力波形は非常によい一致を得た。したがって、

本装置の圧力計測システムは、高精度に圧力波形を計測できる。

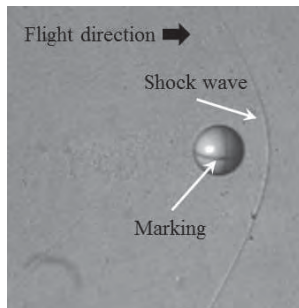


図 1：流れ場と飛行体表面の同時可視化

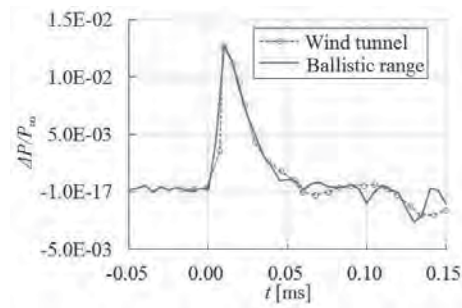


図 2：近傍場圧力波形の比較

3. 研究目標の達成状況

流れ場の光学可視化，飛行体の飛行姿勢および近傍場圧力の同時計測法を開発し，計測精度を検証した．研究目標は順調に達成されている．

4. まとめと今後の課題

東北大学流体科学研究所のバリスティックレンジ装置において高精度な近傍場圧力計測実験を実現するため，衝撃波干渉を考慮した計測方法を構築した．また，流れ場の光学可視化，飛行体の飛行姿勢および近傍場圧力が同時計測できる手法を確立した．さらに，本実験の近傍場圧力波形を既存の風洞試験結果と比較し，よい一致を得たことで圧力計測システムの精度を確認した．今後は，複雑形状の飛行体を安定して水平飛行に射出できるサボ形状およびサボ分離法の研究を行う予定である．

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] Atsushi Matsuda, Katsuya Shimizu, Kakuei Suzuki, Akihiro Sasoh, Keiichi Murakami, & Takashi Aoyama, Experimental-Numerical Combination Diagnostics for Near-Field Flow over Supersonic Flight Model, *Transactions of JSASS Space Technology of Japan*, Vol.9, (2011), pp. 37-41.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] T. Ukai, K. Ohtani, T. Kikuchi, S. Obayashi: Development of Measuring Technique on Near-Field Pressure for Supersonic Projectiles Using Ballistic Range, *International Conference on Flow Dynamics 8*, Sendai, (2011), pp. 280-281.
- [3] T. Ukai, K. Ohtani, S. Obayashi: Evaluation of Shock Wave above Pressure Instrument for Supersonic Spherical Projectile Using Ballistic Range, *The 6th SUN-Tohoku University Joint Workshop on Next Generation Aero Vehicle*, Korea, (2011), pp. 65-68.
- [4] 鵜飼孝博：超音速飛行する模型表面と衝撃波の同時可視化手法の確立，第 49 回飛行機シンポジウム，金沢，(2011)，pp. 782-786.

*[5] 大林茂，大谷清伸，菊池崇将，小川俊広，鵜飼孝博：東北大学流体科学研究所バリスティックレンジ装置について，平成 23 年度航空宇宙空力班シンポジウム，仙台，(2012)．

- [6] 鵜飼孝博，大谷清伸，大林茂：バリスティックレンジ装置を用いた超音速飛行体の近傍場圧力計測における衝撃波反射と回折の影響，平成 23 年度衝撃波シンポジウム，東京，(2012)，pp. 111-114.

- [7] 鵜飼孝博：超音速飛行する模型表面と衝撃波の同時可視化手法の確立に向けた研究，グローバル COE 航空宇宙流体科学サマースクール，鳥取，(2011)．

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

| | |
|------|----------------|
| 課題番号 | J11011 |
| 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 | 2011.4 ~2012.3 |

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*†, 中野禎久*, 佐藤岳彦**††
 *東北大学加齢医学研究所, **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

Pseudomonas aeruginosa や *Acinetobacter baumannii* の院内感染では、水廻り等の院内環境の汚染から医療従事者の手指を介して伝播することが多い。院内環境中の細菌を除去する場合、一般に消毒薬が用いられるが、biofilm 産生菌に対して現在使用されている消毒薬では完全に殺菌できない。また、消毒薬の使用量の増加は、金属腐食や水質汚濁といった環境への影響ならびにコストの増加等にも繋がる。そのため、我々は消毒薬に代わる殺菌方法として、熱水の有効性を報告したが、浴室など広範囲の殺菌には多量の熱水が必要となり、こうした場面での臨床応用は困難である。

プラズマは半導体の加工などに不可欠な技術であるが、近年、その技術が医療分野にも応用され、プラズマ医療として浸透しつつある。プラズマ医療の研究として、主に医療材料の表面改質、表面処理や生体組織の直接的な処理、そして滅菌等があげられる。超音波や過酸化水素ガスプラズマ滅菌器（STERRAD）は臨床使用されているが、biofilm 産生菌に対する効果は確認されていない。今回我々は、院内環境中の biofilm 産生菌の殺菌として、プラズマを用いた新規殺菌システムの構築を検討した。

2. 研究成果の内容

Biofilm 産生モデルと非産生ノーマルモデルを作成し、超音波法およびプラズマを用いた誘電体バリア放電法、水中放電法、ガス発生法における殺菌効果を培養法および走査型電子顕微鏡を用いて観察した。超音波法ではノーマルモデルに対し 5 分以内の殺菌を認めたが、Biofilm 産生モデルは両菌に対し 30 分でも殺菌されなかった。

表 1 誘電体バリア放電法による殺菌効果

| irradiation time (min) | <i>P. aeruginosa</i> | | <i>A. baumannii</i> | |
|--------------------------|----------------------|----------|---------------------|----------|
| | normal | biofilm | normal | biofilm |
| 1 | survival | survival | survival | survival |
| 3 | survival | survival | survival | survival |
| 5 | survival | survival | × | survival |
| 7 | × | survival | × | survival |
| 10 | × | × | × | × |

表 2 水中放電法およびガス発生法による殺菌効果

| irradiation time (min) | <i>P. aeruginosa</i> | | <i>A. baumannii</i> | |
|--------------------------|----------------------|-------|---------------------|-------|
| | ガス発生法 | 水中放電法 | ガス発生法 | 水中放電法 |
| 5 | + | - | + | + |
| 10 | + | - | + | + |
| 15 | + | - | + | + |
| 30 | - | - | - | - |
| 60 | - | - | - | - |

+, survival ; -, extinction of bacteria

誘電体バリア放電法では、ノーマルモデルに対し 5 分以内、biofilm 産生モデルで 10 分以内

の短時間殺菌効果が認められた（表 1）.水中放電法およびガス発生法は、菌種によるややばらつきがみられたが、両モデルの殺菌が確認されるまで 30 分の時間を要した（表 2）.

3. 研究目標の達成状況

誘電体バリア放電法は、短時間で殺菌が可能であり、そのメカニズムはプラズマ放電による菌体の直接破壊である（図 1）. この作用は biofilm 産生菌に対しても有効であった. しかし病院内浴槽や水道蛇口などの広範囲かつ複雑形状の環境表面を殺菌する場合、その発生装置が大きくなり、臨床使用では困難となる可能性がある.

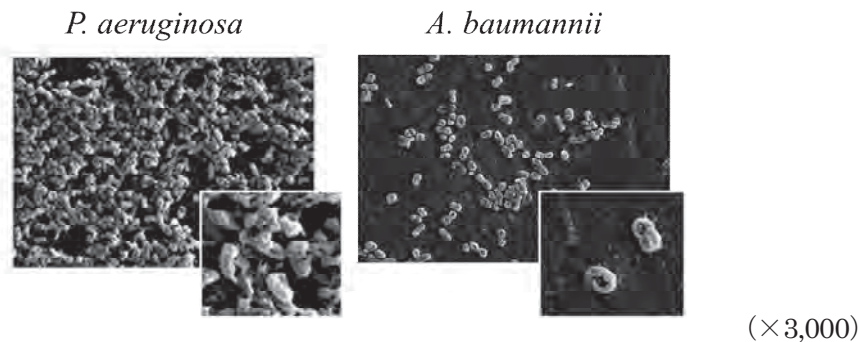


図 1 誘電体バリア放電法による Biofilm 産生 *P.aeruginosa* と *A.baumannii* の菌体破壊

4. まとめと今後の課題

プラズマを用いた上記 3 法は、biofilm 産生グラム陰性桿菌に対し、30 分以内の短時間殺菌効果を示したが、水中放電法により作られた酸性水の廃液、およびガス発生法においてプラズマ発生に伴う NO_x などの有害ガスの処理が必要になり、いずれも臨床応用に課題を残した. 本 3 法のうち、誘電体バリア放電法が最も優れた短時間殺菌効果を示し、副産物の生成も少ないことから、本法の有用性が高いと考えられた. しかし、プラズマ発生装置の大型化が懸念され、殺菌対象を医療材料など小型のもので検討する必要がある、その場合に限り臨床応用の可能性が高いと考えられた.

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Nakano Y, Fujimura S, Sato T: Anti-bacterial Effect of a Dielectric Barrier Discharge Plasma against Biofilm-producing Gram Negative Bacilli, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 70-71.

[2] Nakano Y, Fujimura S, Sato T, Takane H, and Watanabe A.: The comparison of the sterilisation effect against *Pseudomonas aeruginosa* and *Acinetobacter baumannii* using the supersonic wave and plasma irradiation, *27th International Congress of Chemotherapy & 21th ECCMID*, 7-10th May, Milan, (2011).

[3] 中野禎久、藤村 茂、佐藤岳彦、布施克浩、高根秀成、渡辺 彰: *Acinetobacter baumannii* と *Pseudomonas aeruginosa* に対する超音波法とプラズマ照射法の殺菌効果, 第 60 回日本感染症学会東日本地方会, 山形, (2011).

他 合計 5 件

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11012 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

極低温気液二相流体の管内流動・伝熱特性に関する研究

Flow and Heat Transfer Characteristics of Cryogenic Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Pipe

大平 勝秀*†, 小林 弘明**††

田口 秀之**, 小島 孝之**, 本郷 素之**, 中山 忠***

*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、飛行速度 Mach 5 の極超音速旅客機を実現するために、液体水素を燃料とする極超音速予冷ターボジェットエンジン技術の開発を進めている。エンジン始動時において配管系は常温であるため、液体水素は気液二相流動状態となる。また、高速飛行時の空気予冷器では高温空気と液体水素が熱交換を行うので強制対流沸騰熱伝達状態となり、圧力損失と伝熱性能の関係を把握することが特に高ボイド率において重要となる。本研究では水平伝熱管内を流動する液体窒素沸騰気液二相流の流動パターンの可視化観察と共に、静電容量型ボイド率計でボイド率を測定し、流動パターンと圧力損失、熱伝達特性の関係を明らかにする。これまでの研究は、伝熱管が円管(直径 15 mm)であったが、正方形管(一辺 12 mm)についても実験を行い、断面形状による違いも明らかにする。

2. 研究成果の内容

正方形管においても気泡流、プラグ流、スラグ流、環状流、波状流の基本的な沸騰流動パターンが観察された。円管の流動パターンは低クオリティ領域において液単相流・気泡流・プラグ流が混在した結果が得られた。円管の場合、正方形管と比べ気泡が管頂部に集中して気泡が合体しやすく、クオリティが一定でも流動パターンが複雑に変化すると考えられる。圧力損失の評価式として、均質流モデル(スリップ比 1) および分離流モデルを使用して、加速損失と摩擦損失を考慮した。分離流モデルでは、測定したボイド率とクオリティが良い一致を示す Khalil, Winterton, Butterworth の 3 種類の式を用いて評価を行った。図 1 に Butterworth の式による正方形管の計算結果と実験結果の比較を示す。すべての流動パターンにおいて実験値の大部分を±30%で評価可能である。Khalil, Winterton の式でも同様な結果が得られた。一方、均質流モデルでは液単相流・気泡流・プラグ流が評価可能であるが、高ボイド率の流動パターンでは実験値との乖離が大きい。円管についても同様な結果を得た。図 2 は正方形管の上面部、側面部、底面部で測定した熱伝達係数 h を常温流体で使用されている Dittus-Boelter (液単相流), Gungor-Winterton, Liu-Winterton, Stephan-Abdelsalam の式(図中の線は概略値)と比較した結果である。液単相流・気泡流・プラグ流の低クオリティ領域では液単相流の式で評価可能であり、高ボイド率の流動パターンでは正方形管の周方向位置に拘わらず、Gungor-Winterton の式が実験値を-20%~30%で評価可能である。円管についても昨年度報告したように同様な結果が得られた。

「JAXA—流体研 研究成果報告会」平成 24 年 2 月 6 日(流体研)出席者 8 名

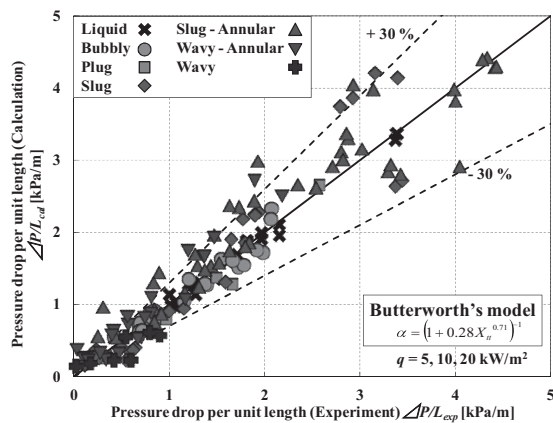


図 1：圧力損失の実験値と計算値の比較

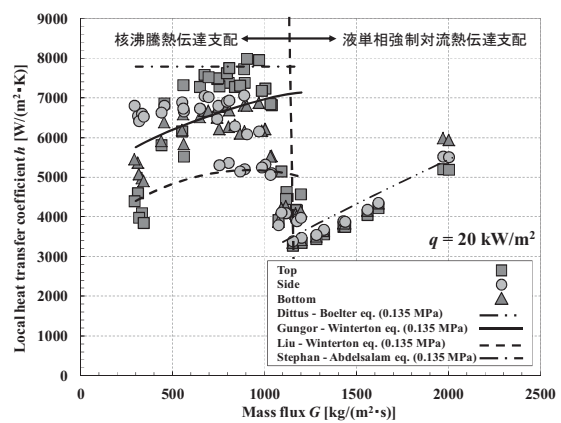


図 2：熱伝達係数の実験値と実験式の比較

3. 研究目標の達成状況

2 種類の水平伝熱管(円管および正方形管)を流動する液体窒素気液二相流において、ボイド率とクオリティの関係、流動パターンと圧力損失、熱伝達係数の関係が明らかになった。その結果、円管および正方形管の沸騰二相流の流動パターンの差異、高ボイド率(スラグ流、環状流、波状流)における圧力損失評価式、熱伝達係数評価式が明らかとなった。

4. まとめと今後の課題

得られた成果を JAXA にて実施中の液体水素沸騰気液二相流の結果と比較し、エンジン設計データに反映する。本実験で発生した Ledinegg 型流動不安定現象の解明が必要である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] K. Ohira, R. Shimizu, K. Takahashi, H. Kobayashi, H. Taguchi: Pressure Drop and Heat Transfer Characteristics of Boiling Liquid Nitrogen in a Horizontal Pipe Flow, *Proceedings of the Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference*, Poland, (2011), pp.445-452.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] T. Nakayama, T. Nagai, K. Ohira, K. Takahashi, H. Kobayashi, H. Taguchi, T. Kojima and M. Hongo: Pressure Drop and Heat Transfer for Boiling Two-phase Flow of Liquid Nitrogen in a Horizontal Pipe, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 32-33.

[3] H. Kobayashi, H. Taguchi, K. Kajikawa, T. Sato and K. Ohira: Development of Advanced Propellant System for Liquid Hydrogen Aircraft, *Proceedings of Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2012*, China, (2012), AJCPP2012-025.

[4] 中山忠, 永井孝佳, 太平勝秀, 高橋幸一, 小林弘明, 田口秀之: 水平円管内を流れる液体窒素沸騰流の流動特性およびボイド率計測, 第 84 回 2011 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, (2011), p.176.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|------|----------------|
| 課題番号 | J11013 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4 ~2012.3 |

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

Jingnan Cai*, 寒川 誠二**††, 和田 一実*†

*東京大学工学系研究科マテリアル工学専攻, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

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

Vertical sidewall of waveguide is preferred in practice of photonic devices. In this work, the Neutral Beam Etching (NBE) condition was investigated for the silicon waveguide fabrication. Fig. 1 shows the typical SEM images of silicon waveguide's cross-section under different NBE conditions. Cl_2 is used for reactive ion etching and it was selected as the main etchant in this experiment as well. The ICP power with bottom connecting to ground can etch the 260nm silicon layer and form the strip shape of waveguide in 23 minutes. The sidewall is only about 80 degree. In order to obtain vertical sidewall, a higher ICP power of 1000W and additional bottom potential of 10W were applied. The result shown in Fig. 1(b) indicates that this optimized NBE condition creates a close to 90 degree sidewall of silicon waveguide, which is ideal for optical propagation. The etching rate of silicon using the optimized condition is 14 nm/min.

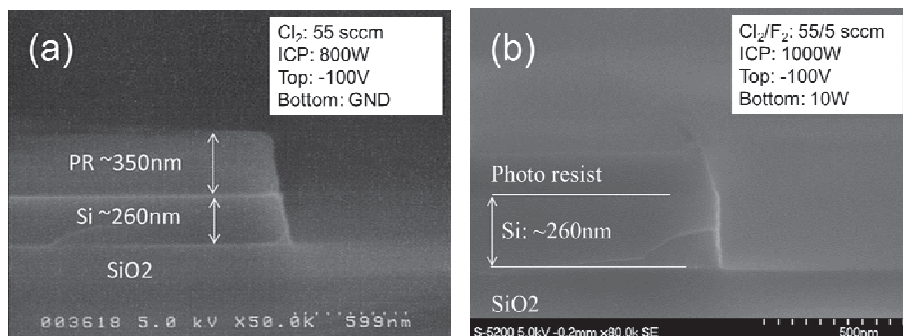


Fig.1 Cross-section SEM photos of fabricated Si waveguides under different etching conditions. (a): unoptimized; (b): optimized.

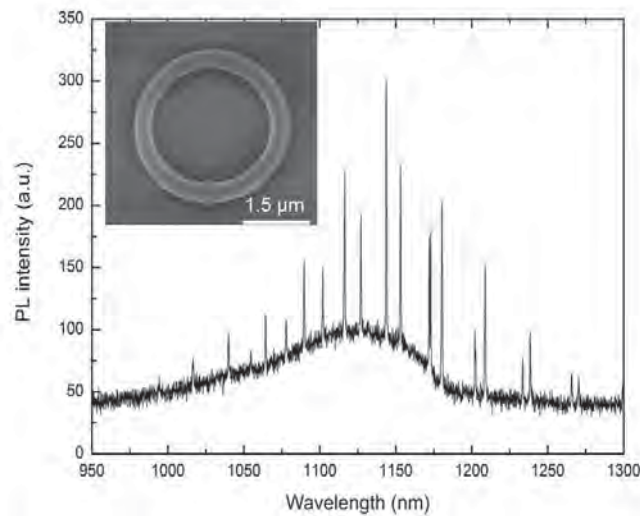


Fig.2 Typical photoluminescence spectrum of the silicon ring resonators fabricated by neutral beam etching process. Inset is SEM photo of the silicon microring.

(2) Fabrication of silicon microring resonators using neutral beam etching

Using such an optimized condition, we fabricated silicon microring resonators and characterized the photoluminescence (PL) of the as-fabricated samples. Theoretically, narrow resonant peaks due to Purcell effect should be observed for a silicon microring resonator. Fig. 2 shows the typical PL spectrum of NBE formed silicon ring resonators. Clear and sharp resonant peaks with quality factor of $\sim 10^3$ can be obtained, indicating that the ring waveguide etched by the neutral beam technology can be available for the processing of silicon photonic devices.

3. 研究目標の達成状況

The neutral beam etching condition for silicon waveguide fabrication was optimized. The SEM observation shows an ideal vertical sidewall of waveguide. The trial of silicon microring resonators fabrication was successfully performed.

4. まとめと今後の課題

The neutral beam technology can be introduced to the fabrication of silicon photonic devices. Since this technology is a low damage process and can be available for silicon and germanium materials, application of quantum effects in low damage Si/Ge photonic devices could be a possible way for novel photonic/optoelectronic devices.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Jingnan Cai, Seiji Samukawa and Kazumi Wada: Low Damage Fabrication of Si Photonic Devices by Neutral Beam Technology, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 112-113.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11014 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

常温圧縮回転せん断法を用いた複合材料の開発
Fabrication of Composite Material by Compression Revolution Shearing Method under Room Temperature

中山 昇*†, 三木 寛之**††
加藤 聡***, 堀田 将臣***, 武石 洋征****
*信州大学工学部, **東北大学流体科学研究所
信州大学大学院, *千葉工業大学工学部
†申請者, ††所内対応教員

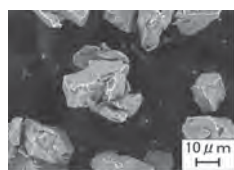
1. 研究目的

金属粉末を強制的に攪拌することで外部から加熱することなく金属粉末を固化成形することができる新しい成形プロセス「常温圧縮回転せん断法」を考案した。この成形プロセスを開発することで、低温成形が可能であり、金属が再結晶せず、圧縮荷重とせん断荷重と塑性流動により強固な酸化膜を破壊して、金属粉末を固化成形できるのではないかと考えられる。また、粉末冶金を利用した成形加工なのでニアネットシェイプ化が望まれる。さらに材料の複合化および強度向上とニアネットシェイプを同時に行う成形プロセスであると考えられる。

本研究では、室温で金属粉末を固化成形する新しい成形方法「常温圧縮回転せん断法」のメカニズム解明と本法を用いた複合材料の開発を目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究で使用したチタン粉末の走査型電子顕微鏡図(SEM)を図1(a)に示す。平均粒径 $45 \mu\text{m}$ の純度 99.456%、非球形である水素化脱水素法により作製された純チタン粉末を使用した。使用した粉末の透過型電子顕微鏡図(TEM)を図1(b)に示す。透過型電子顕微鏡図から使用したチタン粉末は単結晶であることがわかる。



(a) SEM image



(b) TEM image

図1：使用したTi粉末

図2に本研究で用いた常温圧縮回転せん断装置の概略図を示す。装置は、攪拌ツール、コンテナ、アンダーパンチから構成されている。攪拌ツールの材質はダイス鋼であり、ツール先端部はねじ形状で M8、ねじ長さ 5mm である。成形後の試料のは $\phi 12$ の円筒形状のコンテナの中で、試料の形状が $\phi 12 \times 6 \text{ mm}$ となるように成形した。また機械的性質測定の際には、ツール先端のネジ形状の根元を原点とし、ツールの半径方向を r 、長手方向を L として測定箇所を表記する。本研究の成形条件は、圧縮荷重 P を $P=5\text{kN}$ 、回転時間 t を $t=15\text{sec}$

と一定とし、回転数 R を $R=720, 935, 1350, 1800\text{r/min}$ と変化させた。本研究は、常温、大気雰囲気中で試料作製を行った。代表的な実験結果の例として回転数 $R=1800\text{r/min}$ で成形した試料の長手方向断面図を図 3 に示す。また、 $r=5\text{mm}$ における $L=0, 5\text{mm}$ を図 3 中の○、□の箇所を示し。それぞれの透過型電子顕微鏡図を図 4 (a), (b) に示す。図 3, 4 より常温圧縮回転せん断法を用いることで室温でもチタン粉末を固化成形できることがわかる。透過型電子顕微鏡図より、成形前は単結晶であったチタン粉末同士が圧縮力とせん断力が負荷されることで酸化被膜が破壊され、原子同士の移動と拡散により粉末同士が結合し、その後、結晶内のすべり面が滑ることにより、すべての箇所では結晶粒径が微細化されている。

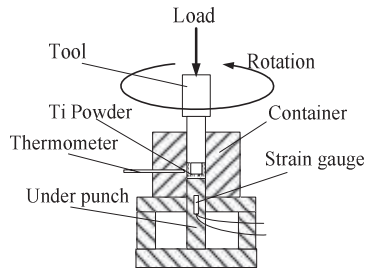


図 2 : 実験装置概略図

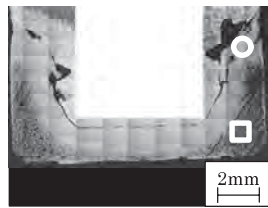
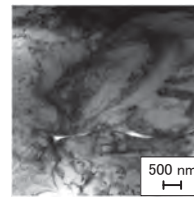
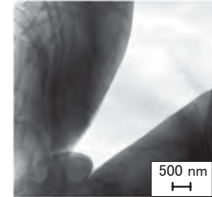


図 3 : 長手方向断面図



(a) 上部($L=0\text{mm}$)



(b) 下部($L=6\text{mm}$)

図 4 : TEM 像 ($R=1800\text{r/min}$, $r=5\text{mm}$)

3. 研究目標の達成状況

外部から加熱せず、高融点材料でも室温で固化成形が可能であることがわかった。さらに材料の強度向上とニアネットシェイプが同時にできる新しい成形法を確立することができた。結晶粒径が超微細なアトマイズ粉末を使用し、室温で固化成形するため、結晶粒の粗大化がおこらないことを確認した。粉末を用いているので、複合材料を容易に作製可能であることを確認した。従って、研究の達成度は大であり、学術的・工学的な波及効果は大である。

4. まとめと今後の課題

本研究では、室温で金属粉末を固化成形する新しい成形方法「常温圧縮回転せん断法」のメカニズム解明と本法を用いた複合材料の開発を行うことができた。今後は、他の複合材料に対する成形メカニズムの解明を行う必要がある。

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] N. Nakayama, S. Kato, H. Takeishi, and H. Miki: CONSOLIDATION OF Ti POWDER BY A COMPRESSION ROTATION SHEARING SYSTEM AT ROOM TEMPERATURE -Effect of pivot rotation speed on consolidation-, *Advanced Materials Research*, Vol. 4091, (2012-1), pp. 3-8.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Sou Kato, Noboru Nakayama, Hiroyuki Miki, Hiroyuku Takeishi : Consolidation of Ti-6Al-4V Powder by a Compression Rotation Shearing Method at Room Temperature, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 114-115.

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 | J11015 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

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

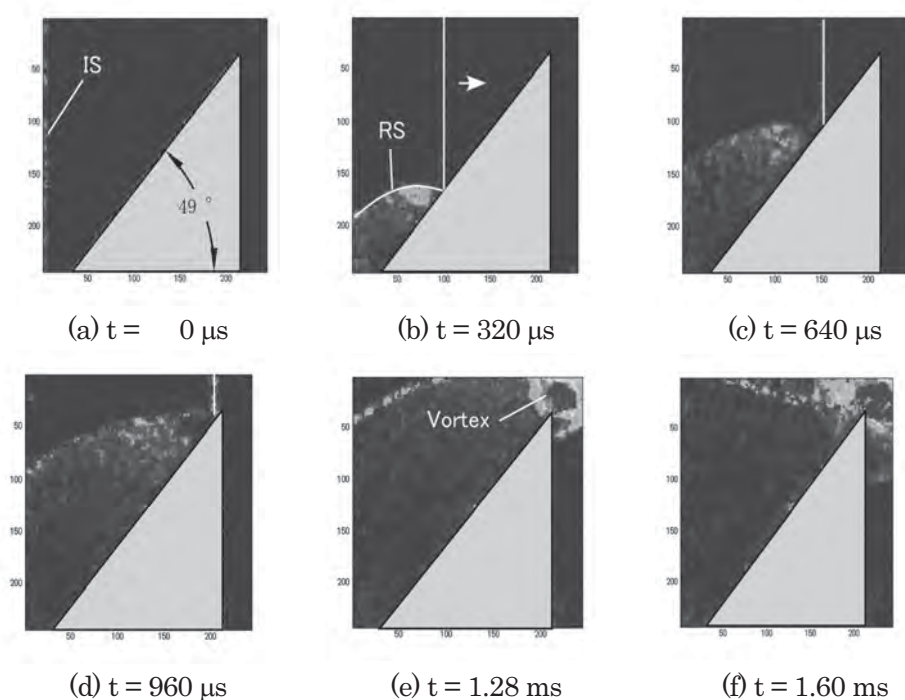
水書 稔治*†, 大林 茂**††
*東海大学工学部, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

BOS 法による高速流体现象ならびに高速飛しょう体周囲に発生する衝撃波の定量的可視化計測の初期的実験として、1) 衝撃波管測定部に設置したくさび模型（角度 49 度）に入射した衝撃波（伝播 Mach 数 1.3）によって発生した反射衝撃波の伝播、に 2) 弾道飛行装置によって飛行 Mach 数 1.3 に加速された球形模型周囲に発生する離脱衝撃波の可視化を行った。その結果を Fig.1 および Fig.2 に示す。



**Fig. 1 Visualization of reflected shock waves on a 49 degree wedge at 340 us time interval
Incident shock Mach number is 1.3.**

Fig.1 では、画像左側から入射した衝撃波が、くさび模型で反射したのち、反射衝撃波背後に圧縮領域を発生させながら伝播する様態が明瞭に可視化された。

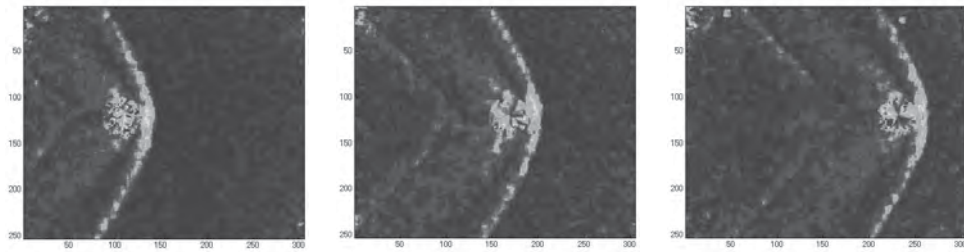


Fig. 2 Visualization of shock waves around a spherical model flying at Mach 1.3.

Fig.2 では、画像左から右に飛行 Mach 数 1.3 の球形模型前方に発生する離脱衝撃波、模型後方に生じる後流、さらに後流から発生する弾底衝撃波が明瞭に可視化された。

これらの結果から、BOS 法による高速流体现象および高速飛しょう体周囲の衝撃波様態を航空空間・高時間分解能で可視化計測可能であることが評価できた。

3. 研究目標の達成状況

本研究の目的は、自由飛行する超音速飛しょう体模型周囲の衝撃波発生状態を飛行経路の広い範囲で定量的な可視化計測を行うことであった。飛しょう体加速装置の改造計画の変更のため、超音速機を想定した飛しょう体模型の自由飛行実験が行われなかったものの、球形模型を用いた初期的実験では BOS 法による十分な結果が得られた。

4. まとめと今後の課題

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

5. 研究成果（*は別刷あり）学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

1) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] T. Mizukaki and S. Obayashi: Quantitative Visualization by using Background-Oriented Schlieren, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.36-37.

2) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）なし、（受賞）なし、（マスコミ発表）なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11016 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Energy |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Reconstruction of Wall Thinning from Pulsed ECT Signals

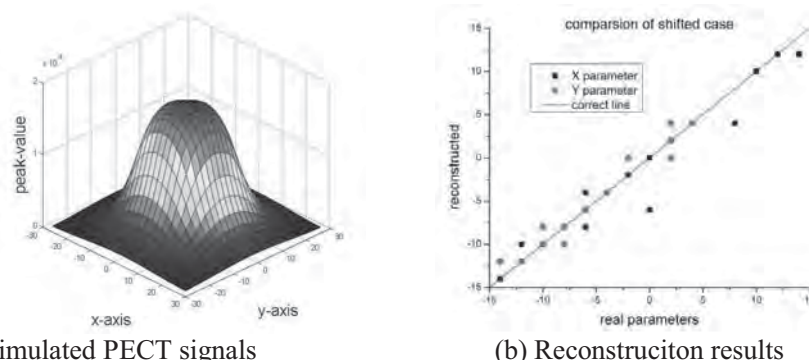
Zhenmao Chen*†, Toshiyuki Takagi**††
 Shejuan Xie**, Tetsuya Uchimoto**, Yong Li*, Li Wang*
 *School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China
 **Institute of Fluid Science, Tohoku University
 †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The aims of the project is to bridge the gap between theoretical modeling and experiments of PECT in an effort to realize: (1) Fast and accurate computation of forward problems of Pulsed Eddy Current Testing (PECT) via analytical modeling and Finite Element (FE) modeling; (2) Analytical/FE model based inverse analysis of PECT for wall thinning reconstruction; (3) Smart PECT systems in conjunction with sensor arrays etc for real time evaluation of critical components and structures in industries particularly Nuclear Power Plants (NPP).

2. Details of program implement

Sizing of wall thinning defect is very important for the safety guarantee of key structural components of nuclear power plant. As one of the works of the project, a neural network approach was developed for the reconstruction of wall thinning defect from Pulsed PECT signals. A code of frequency domain summation method was adopted to generate PECT signals necessary for network training, and a principal component analysis procedure was used for signals pre-processing to improve reconstruction results. The validity of the proposed scheme was demonstrated through wall thinning reconstruction from simulated PECT signals.



(a) Simulated PECT signals (b) Reconstructiton results
 Figure 1: Numerical results of Neural network for wall thinning reconstructiton

As the second work, the signal of PECT is applied to the reconstruction of deep Stress Corrosion Cracks (SCC) based on the multilayer reconstruction strategy in order to improve the sizing accuracy of SCC. The shape profiles and conductivity of the crack at different depth are reconstructed step by step by using harmonic components of different order of the PECT signals. The profiles of several cracks are reconstructed from simulated signals of conductive notches of an artificial SCC. It is demonstrated that the PECT signals are applicable for the reconstruction of SCC.

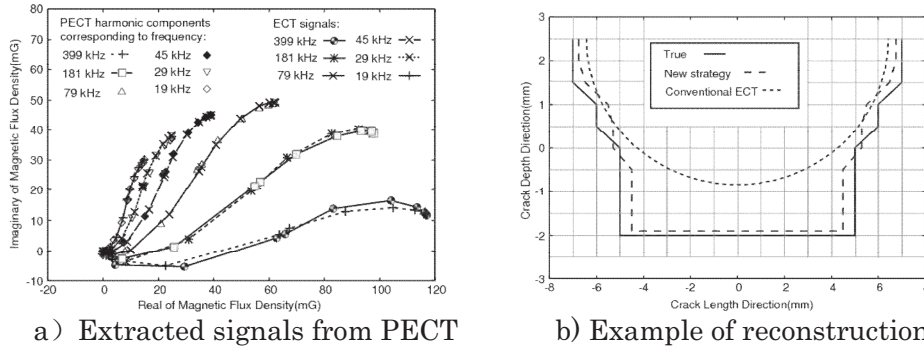


Figure 2: Comparison of extracted ECT signals from PECT response and an example of reconstruction results with used of multi-frequency inverse analysis strategy

3. Achievements

A fast numerical code for efficient simulation of PECT signals has been developed in the first year project, and it was used for the wall thinning defect reconstruction with neural network method and a deterministic method – conjugate gradient method. Experimental setups of PECT systems have also established in both Xi'an Jiaotong University and Tohoku University, and are both ready for PECT signal measurement.

4. Summaries and future plans

Based on the researches in the first year, the aims of the second year project is to evaluate the efficiency of several inverse analysis methods, both deterministic and stochastic, for the reconstruction of wall thinning defect from pulsed eddy current testing signals in view of the practical application to the in-service inspection of pipes in the nuclear power plants.

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] Zhenmao Chen, Shejuan Xie, Xiaowei Wang, Yong Li, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Reconstruction of Wall thinning from pulsed eddy current signals, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.158-159.
- [2] Zhenmao Chen, Shejuan Xie, Li Wang, Tetsuya Uchimoto and Toshiyuki Takagi, Reconstruction of Stress Corrosion Crack with multifrequency ECT signals, presented in *8th ICFD*, OS8-12, (2011).
- [3] Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Xiaowei Wang, Li Wang, Toshiyuki Takagi and Tetsuya Uchimoto, Three Dimensional Wall Thinning Defect Reconstruction from Pulsed Eddy Current Testing Signals, *8th ICFD*, OS8-14, (2011).
- [4] Li Wang, Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Yong Li, Xiaowei Wang, Toshiyuki Takagi, Reconstruction of Deep Stress Corrosion Cracks Using Signals of the Pulsed Eddy Current Testing, *COMPUMAG'2011*, Sydney, Australia, July, (2011), CD-ROM.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11017 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

プラズマエッチングプロセスにおけるナノスケール表面ダメージ解析
Analyses of Nano-Scale Surface Damages Generated during Plasma Etching Processes

浜口 智志*†, 寒川 誠二**††

*大阪大学工学研究科, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

半導体デバイスは現在微細化がその限界である原子分子スケールに近付いており、より高性能のデバイスを作成するために、既存のプレーナー型とは異なる新しい形状を持つデバイスの開発がすすめられている。本研究では、FinFETのような縦型半導体デバイスの超微細加工に必要な新しいプラズマプロセス技術を開発するためのプラズマ表面相互作用に関する基礎的知見を得ることを目的とする。特に、イオンの斜め入射にともなう Si や酸化膜表面のダメージを、各種プラズマパラメータの関数と解明する。

2. 研究成果の内容

半導体デバイスの微細化の進行にともない、プラズマエッチングプロセスにおいて、プラズマから照射されるイオンや紫外線などによる加工表面から数 nm の領域に対するダメージがデバイスの性能に直接的に影響するようになってきている。本研究では、その一例である HBr/O₂ 等のガスを用いたゲートエッチングプロセスにおけるシリコンリセスの生成機構を解明することを目的に、分子動力学シミュレーションを進めた。Si, O, H 原子の古典的モデルポテンシャルを用い、自然酸化膜を有する結晶シリコンのモデル基板へ低エネルギー (0.05eV) の O 原子と、高エネルギー (たとえば、500eV) の水素イオンを同数入射したときの表面反応を調べている。例として、図 1 に、シミュレーションで用いた初期基板表面、図 2 に、500eV 水素と 0.05eV 酸素の同時入射を、それぞれ、約 $2.3 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-2}$ となるように入射した後の表面の様子を示した。これらの研究により、高い入射エネルギーをもつ水素イオンがゲート酸化膜を透過して下地のシリコンにダメージを与えることで、ゲート酸化膜を透過した下地のシリコンが酸化されること (シリコン中の酸素の増速拡散の可能性) を明らかになった。さらに、シリコン中で移動する酸素原子の拡散係数も評価した。本研究により、水素イオン入射による酸化が熱拡散よりも急速であること、酸素原子の移動が、拡散による移動と似ている (移動距離の二乗が時間にほぼ比例する) ことが明らかとなった。

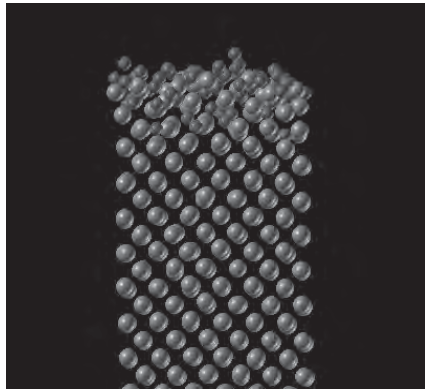


図1: シリコン基板における表面酸化の分子動力学シミュレーションモデル.

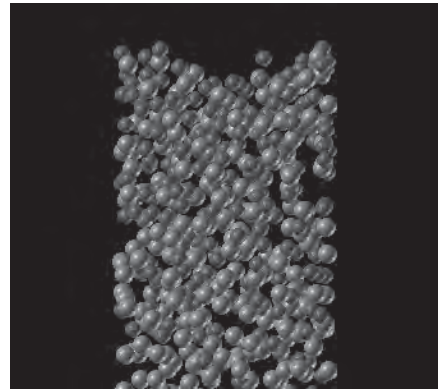


図2: 500eVの水素イオンと低エネルギー酸素原子の同時照射による増速酸化後の表面状態(シミュレーション結果).

3. 研究目標の達成状況

初年度の研究において、シリコンや酸化膜に対する各種イオンビームの低エネルギー照射による表面ダメージ形成過程が、イオン種やエネルギーの関数として分類でき、また、それらの表面ダメージ形成の物理機構を解明することにより、FinFETのような従来型とは異なる先端デバイス製造におけるプラズマエッチングの問題点とその解決方法が明らかにすることを目的とした。シリコンゲートエッチングで問題となっているシリコンリセスに関する増速酸化による酸化膜形成、および、シリコン表面への水素の斜め入射によるダメージ形成のプロセスについて明らかにすることができたため、当初の目的は、100%達成した。

4. まとめと今後の課題

今後の課題は、このように形成されたダメージの物理機構をより明確にすることである。具体的には、流体研究所寒川研究室で現在おこなれてる中性ビーム入射装置による表面ダメージの実験結果と大阪大学のシミュレーション結果を比較することにより、表面ダメージ形成の物理機構を解明する。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] “Experimental evaluation of CaO, SrO, and BaO sputtering yields by Ne or Xe ions,” S. Yoshimura, K. Hine, M. Kiuchi, J. Hashimoto, M. Terauchi, Y. Honda, M. Nishitani, and S. Hamaguchi, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** (25) 255203 (5pp) (2011).
 - [2] “Plasma Microchannel and Jet Enhanced by an Array of Ellipsoidal Microcavities,” D.-S. Lee, O. Sakai, S.-J. Park, J.G. Eden, and S. Hamaguchi, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **39**(11) 2690-2691 (2011).
- 他 合計 4 件

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

合計 24 件

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) American Vacuum Society, Fellow: 浜口智志 2011. 10.31

(マスコミ発表) なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11018 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | エネルギー分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

マイクロ噴霧微粒化プロセスの超並列融合計算
Massively Parallel Integrated Computation of Micro-Atomizing Spray Mechanism

石本 淳*†, 王 宇*, Kozo Saito**††, Kenneth G. Kreafler**
 *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、「マイクロ噴霧微粒化プロセスの超並列融合計算」の実施を行う。ノズル内における高速現象を伴う微粒化現象に対し、新型バロトロピック LES-VOF 法を用いることにより統一的に数値シミュレーションすることが可能な専用ソルバーを開発し、超並列融合計算手法により噴霧マイクロ微粒化機構に及ぼすキャビテーション等の高速現象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

ノズル内マイクロ微粒化メカニズムに関し、液柱形成から液膜形成・分裂を経て小液滴形成に至るまで一連の高速現象を伴う微粒化現象に関し、コンピューテーションと実験からなる最新の一体型融合シミュレーションが可能なソルバーを開発した。これにより、ガソリン用インジェクターのみならず、噴霧を利用する自動車塗装、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。

今年度は、マイクロ固体窒素噴霧流の熱流束冷却特性に関する融合計算を行い、粒子が加熱平板に衝突すると同時に急激な温度降下が生じ、マイクロ固体粒子噴霧による超高熱流束冷却特性が得られ、特に、基板表面の粒子数密度が大きい領域においては噴霧冷却が効果的に行われていることを明らかにした。

3. 研究目標の達成状況

ノズル内マイクロ微粒化メカニズムに関し、液柱形成から液膜形成・分裂を経て小液滴形成に至るまで一連の高速現象を伴う微粒化現象に関し、複雑形状に対応するコンピューテーションと実験からなる最新の一体型融合シミュレーションが可能なソルバーを開発した。特に、マイクロキャビテーション生成と微小乱流渦形成の相互作用に関する知見を得た。

達成度は60%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、噴霧を利用する自動車塗装、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。

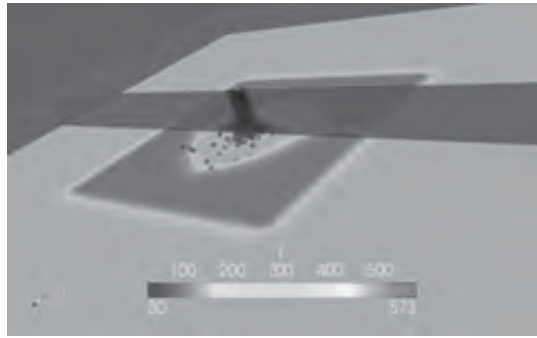


図1 マイクロソリッド噴霧流による超高熱流束効果に関する超並列融合計算

4. まとめと今後の課題

ノズル内微粒化機構解析用ソルバーに関し、固体窒素粒子凝固のモデリングと新型 LES-VOF 数値スキームの開発を行った。さらに測定結果を計算情報として CFD 計算過程に導入する融合計算手法の基本方針を確立した。今後は、ベルカップモデルを用いた自動車塗装に関するシミュレーション、スーパーコンと PC クラスタを用いたスワール微粒化モデル数値計算の実施と数値計算手法の最適化に関しては来年度に継続して研究の遂行を行う。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- * [1] Kozo SAITO, Abraham J. SALAZAR, Kenneth G. KREAFLE and Eric A. GRULKE, Hitozukuri and Monozukuri: Centuries' Old Eastern Philosophy to Seek Harmony with Nature, *Interdisciplinary Information Sciences*, Vol.17, No.1 (2011), pp.1-9.
DOI: 10.4036/iis.2011.1.
- [2] Kenneth G. KREAFLE, Lean Product Development, *Interdisciplinary Information Sciences*, Vol.17, No.1 (2011), pp.11-13.
- [3] Takehiro HIMENO, Chihiro INOUE and Toshinori WATANABE, Study on Free-surface Flows in Aerospace Propulsion Systems, *Interdisciplinary Information Sciences*, Vol.17, No.1 (2011), pp.15-17.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- * [4] U Oh, Jun Ishimoto and Kozo Saito, Measurement Coupled Computation of Cooling and Wafer Cleaning Performance Using Micro-Solid Nitrogen, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 34-35.
- [5] 王 宇, 丹 大輔, 石本 淳, マイクロ固体窒素噴霧流を用いた超高熱流束冷却と新型半導体洗浄法の開発, 日本混相流学会年会講演会 2011 オーガナイズドセッション (OS-6 サステナブル異分野融合型混相流), 2011 年 8 月 6-8 日, 京都工芸繊維大学 (京都市).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

- (受賞) 2011 年度日本混相流学会学生優秀講演賞, マイクロ固体窒素噴霧流を用いた超高熱流束冷却と新型半導体洗浄法の開発, 王 宇 (M1, 指導学生の受賞), 2011 年 8 月 6-8 日, 日本混相流学会年会講演会 2011.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11019 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

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

長谷川裕晃*†, 橋田征吾*

大林茂**††, 村上正秀***

*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

***筑波大学

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

バドミントンシャトルコック（シャトル）におけるインパクト直後の初速は、300km/h を超え、急激に減速する非常に抵抗の大きい飛翔体である。さらに、ラケットにあたった瞬間に空力モーメントが働き、回転し方向転換する。特に高速飛翔時は羽根の開きが狭まり抵抗が小さくなるが、飛翔中に羽根が開いていくと共に急速に抵抗も増加するという興味深い特性を有している。シャトルは主軸周りに回転（スピン回転）しながら飛翔している。これらシャトルの空力特性やシャトルの高い抵抗が発生するメカニズムは不明なため、高レイノルズ数におけるシャトルのダイナミクスを考慮した状態などで飛翔の空力的研究を実施する。

2. 研究成果の内容

本研究では、シャトルの空力特性を明らかにするために、シャトルを風洞内に設置し、流体力の測定や流れ場の可視化実験を行った。通常シャトル(with gap)とシャトルスカート部スロットを塞いだシャトル(without gap)を比較すると、いずれのレイノルズ数でも塞いだシャトルの抗力係数 C_d は三割程度減少する。こうした隙間の有無による抗力係数の値に大きな違いが出た理由を調べるため、シャトル後方および内部の流れ場について調べた。図 1 には $Re=2.1 \times 10^5$ (50m/s) における回転のある通常シャトルと隙間を塞いだシャトル後方の流れ場の PIV 計測した渦度および速度ベクトルを示す。本研究の測定では、15Hz で撮影を行い、150 回の平均値で示す。通常シャトルでは、シャトル後流中央において、下流方向に速度が速い領域が確認できる。内部を流れて後方に流れ出した流体がシャトル後端から発達した剥離せん断層内の渦に引き込まれる。その結果、シャトル後流 ($X/D=3.0$ 以降) においても渦度が維持される。一方、隙間を塞いだシャトルでは、内部からの流れがないために、シャトル

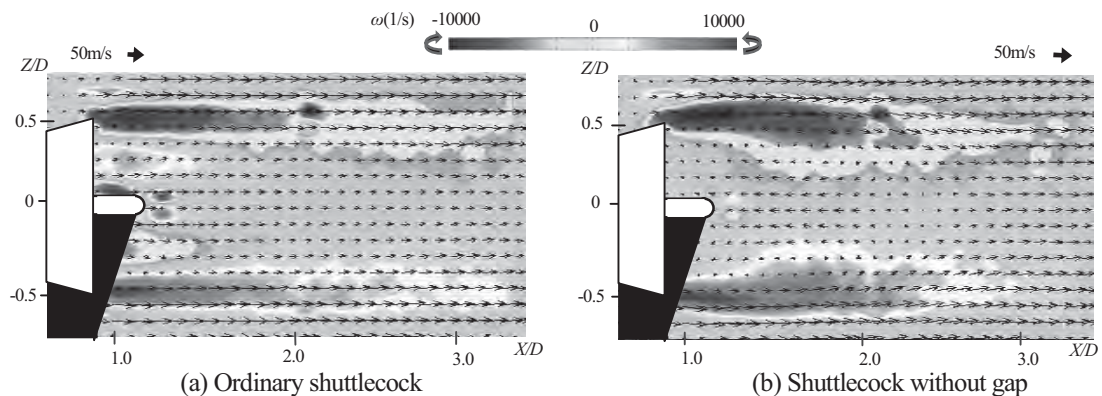


Fig.1 Density map of vorticity for the shuttlecock with rotation ($Re=2.1 \times 10^5$)

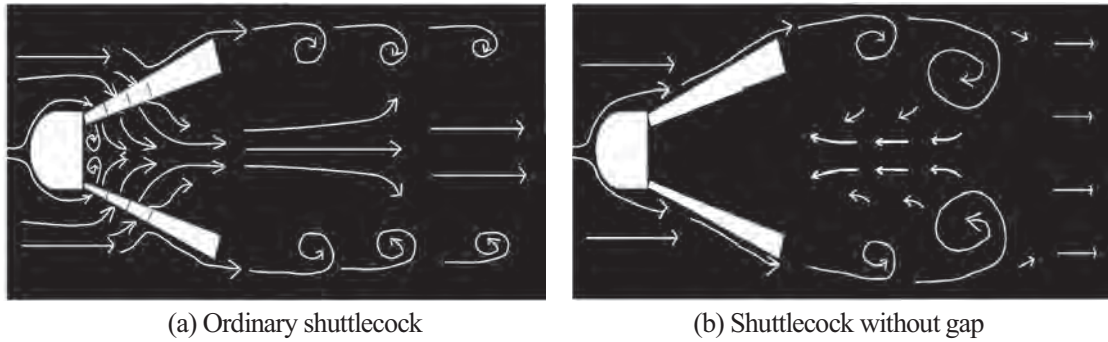


Fig.2 Schematic representation of flow field.

後端から剥がれた渦は巻き込みが大きくなって拡散していく。その結果、シャトル後方の離れた位置では渦度が弱まる。

内部および後方の流れ場の概略図を図 2 に示す。隙間を塞いだシャトルでは、内部に流れが流れず、シャトル内部に目立った流れは存在しない。一方、通常シャトルではコルク部下流側に渦が存在する。この渦の存在で、コルク部下流側で低圧部が存在することになる。さらに、スリット部から入った下流側に向かう流れは、羽根の開き角があるため、羽根に沿いきれないで剥離する。つまり、シャトル内部では羽根が拡大流路を形成する。拡大流路の開き角が大きい場合、流れは上下の壁からはく離し、流路の有効断面積が減少することで噴流挙動を示す。つまり、通常シャトルでは、内部に流れを導く構造と、スカート部の開き角が流れのはく離を生む適切な角度となっていることから、高い抵抗を生み出すことになる。さらに、スリット部から入り込む流れにより後端からの剥離渦に後流中央に存在する下流方向の速い流れの影響をうけて、後方まで渦を輸送することで高い抵抗を生み出すことになる。

3. まとめと今後の課題

シャトルの大きい抗力は、内部に流れを導く構造と、シャトルスカート部の羽根の広がり角が大きく、内部の流れが高速で下流方向へ流れる。その結果、シャトル後端から剥がれた渦が、より下流の広い範囲で低圧部を発生することで、高い抵抗を発生する。今後は今年度の実験で内部の測定を失敗した PSP(Pressure Sensitive Paint)測定を再度修正し、実施する。また、クルリと回転し方向転換するなどのシャトルのダイナミクスを考慮した状態での空力特性についても解明していく。

4. 研究成果 (*は別刷あり)

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

*[1] S. Kitta, H. Hasegawa, S. Obayashi, M. Murakami S. Obayashi: Aerodynamic Properties of a Shuttlecock with Spin at High Reynolds Number, *5th Asia-Pacific Congress on Sports Technology, AUS*, (2011), pp. 271-277.

[2] 橋田征吾, 長谷川裕晃, 村上 正秀, 大林 茂: シャトルコック羽根付け根部隙間が引起す高い減速特性, 日本流体力学会年会, 東京, (2011), pp. 216.

*[3] S. Kitta, H. Hasegawa, S. Obayashi, M. Murakami, H. Nagai: Aerodynamic Characteristics of a Badminton Shuttlecock at High Reynolds Numbers, *Proceedings of Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 40-41.

[4] 和田謙治, 長谷川裕晃, 村上 正秀: シャトルコック高速飛行時の流体力特性と流れ挙動, *スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011*, 京都, (2011), pp.18-24.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11020 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

バイオテンプレート極限加工による構造制御マルチディスク単電子トランジスタの開発
Development of Structure-Controllable Multi-Disk Single-Electron Transistors by
Ultimate Etching Technique with Bio-Templating

山下 一郎*†, 寒川誠二**††

*奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

微細化によるデバイス性能向上のために量井戸となるシリコンナノディスクの作製が行われており、量子閉じ込めの機能を利用したデバイスが注目されてきている。本研究では、バイオ分子の自己組織能、バイオミネラリゼーション能を用い、これに中性粒子ビームによる超低損傷ナノ加工を組みあわせることで、量子井戸配列を作製する。すなわち球殻状タンパク質フェリチンにより合成され自己組織化能により二次元に規則配置された金属微粒子をマスクとして、中性粒子ビームエッチングによる厚さ数 nm のナノディスクの損傷フリー超高精度加工を実現する。そのために、マスクとなる２次元のナノドットアレイを実現する。

2. 研究成果の内容

マスクとなる２次元ナノドット配列を作るため、球殻状タンパク質フェリチンの空孔内でナノ粒子を合成しこの２次元配列を作製した。また緩衝液の残滓が半導体プロセスにおいて問題となることが前年度までの研究で明らかになっており、タンパク質の塗布後速やかに揮発する酢酸アンモニウム緩衝液を採用した。またフェリチンタンパク質には4回対称部位に疎水性領域があり、この疎水性領域間の不要な疎水性結合を除外するために、疎水性領域を縮小させた新規ミュータントフェリチンを開発した。

２次元結晶化には基板表面とフェリチン外表面の相互作用の制御が極めて重要であるため、基板表面を各種ポリマー塗布により改質し、最適表面改質を探索した。ポリマーは、プラス電荷を持つ0.5-2 mg/mL ポリリジン (PLL) と無電荷ポリマーの50-1000 μ Mポリエチレングリコール (PEG) を用いた。ポリマー塗布は処理が簡便なスピncerターを用いて行い、洗浄・親水化処理したSiO₂ 基板へポリマー溶液を滴下後乾燥させて固定した。乾燥固定が確認された後、フェリチン溶液を同じくスピncerコートにより塗布した。その結果PLL 塗布基板へのフェリチンの吸着は、フェリチンがマイナス電荷をもつため静電相互作用による引力で高密度に基板に吸着されたが、最密充填配列は見られなかった。一方、PEG 塗布基板でのフェリチン吸着では、一辺が100~200 nm 程度の六方最密充填配列ドメインが高密度吸着した様子が確認できた(図1)。

この２次元配列から内部のコアのナノドット配列を得るために、PEG 層とフェリチンタンパク質部分を500°C, 1 時間の熱処理を施して除去した。XPS 測定データのデータより、基板に残存PEG, タンパク質が存在しないことが確認できた(図2)。これにより得られた２次元規則配列がナノエッチングのマスクとして使用できることが示された。

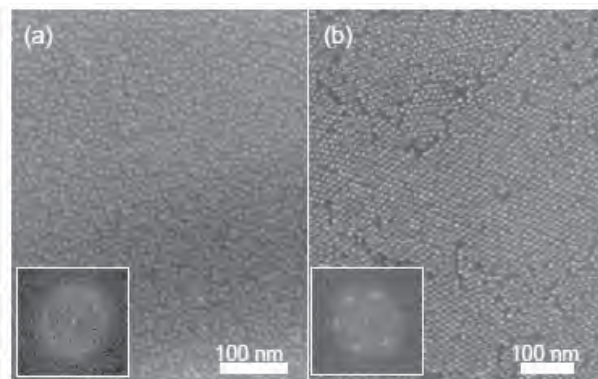


図1： フェリチン2次元結晶 SEM 像
(a) Si 基板 (b) PEG 処理基板

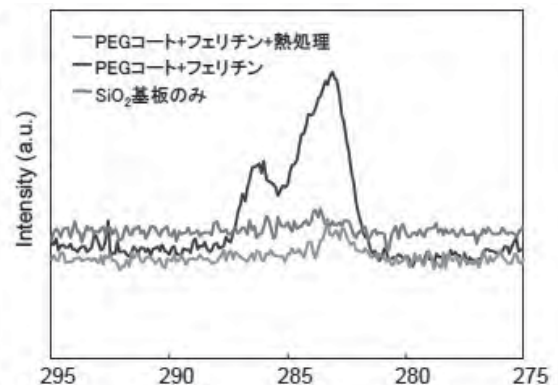


図2. C1s XPS スペクトル

3. 研究目標の達成状況

これまで、スピコートによる2次元規則配列の実現は難しかったが、今回初めて、揮発性緩衝液の採用と、フェリチンミュータントの新規開発、基板表面の改質によりスピコートを用いて簡便に2次元規則配列が作製可能となった。

4. まとめと今後の課題

半導体プロセスに投入可能なナノドット配列の簡便な作製方法が今年度確立した。次年度はこれを用いたエッチングを行いミニバンドの形成を行う予定である。

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] Hanasaki, Y. Isono, B. Zheng, Y. Uraoka, and I. Yamashita: Adsorption Density Control of Ferritin Molecules by Multistep Alternate Coating, *Jpn. J. of Appl. Phys.* 50 (2011) 065201.
- [2] I. Yamashita: Protein-based nano-structure fabrication method: Bio Nano Process, *12th International International Union of Materials Research Societies International Conference in Asia (IUMRS-ICA)*, Taipei, Taiwan, 19-22 September, (2011).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] I. Yamashita: Nanostructure fabrication by protein supramolecules for surface-Plasmon and photovoltaic devices, *The International Symposium on Advanced Nanomaterials and Nanosystems (ANN2011) Joint with 4th International Photonics and Opto Electronics Meetings (POEM 2011)*, Wuhan, China, 1-4 November, (2011).

*[4] I. Yamashita, S. Samukawa: Development of Structure-controllable Multi-disk Single-electron Transistors by Ultimate Etching Technique with Bio-templating, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 116-117.

- [5] 塚本里加子, 山下一郎, 岡本尚文, 五十嵐誠, 寒川誠二、「ポリマー修飾 SiO₂ 基板を用いたフェリチン二次元結晶化」2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会、東京 3/16 (2012) .

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

(特許) なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11021 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

二段式軽ガス銃を用いたソニックブームの実験的研究
Experimental Studies of Sonic Boom using a Two-Stage Light Gas Gun

齋藤 務*†, 大林 茂**††
 畠中和明*, 大谷清伸**, 小川俊弘**
 *室蘭工業大学工学部, **東北大学流体科学研究所
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

輸送量増加と飛行時間の短縮を目的として超音速旅客機の研究開発が行われているが、最大の技術課題のひとつにソニックブームの低減に関する技術開発がある。流体研では超音速旅客機の静粛性向上を目指して、ソニックブームの発生、伝播ならびに減衰過程について研究するための実験設備として、大口径のバリスティックレンジを製作する計画が進行している。本研究では、数値解析によるバリスティックレンジの設計支援を行うとともに、実験の数値模擬を行う。

2. 研究成果の内容

研究成果については、2011年11月 2~4日開催の IFS Collaborative Research Forum (AFI/TFI-2011)にて発表を行ったが、その主な内容は以下のとおりである。

既存のバリスティックレンジの加速管直径 51mmを 100mmに拡張し、射出速度マッハ2を目標仕様としてドライバーおよび加速管を設計する為、AUTODYN ver.6による、性能予測計算を行った。計算精度の検証をするため、始めに既存装置の性能計算を行い、その予測結果と実験データの比較を行った。その結果が図1であるが、AUTODYNによる性能予測が極めて正確である事をしめす事が出来た。

次に直径 100mm の場合について、性能予測を行ったところ、図2の結果を得た。飛翔体は直径 100mm、長さ 100mm の中実円柱とした場合と、中空にして質量を 1/2 にした場合について駆動気体を空気と仮定して計算を行った。図2では駆動気体圧力が 10気圧のとき加速距離 6 m で飛翔体速度が、マッハ数 1 に到達する事がしめされている。

3. 研究目標の達成状況

“バリスティックレンジの加速管直径を 51mmから 100mmに拡大する事で、より詳細な形状を模擬した飛翔体モデルを亜音速から超音速までの速度域で射出する事ができ、簡単な球形モデルでは得る事の出来なかった、ソニックブームの発生に関する詳しいデータを収集する事ができる。“との最終的な成果に対して、本研究では装置の開発までを目標とした。AUTODYNによる性能予測に基づき、装置の設計および組み立てが行われ、試験運転が行える段階まで来ているので、当初の目標はほぼ達成できたと考える。

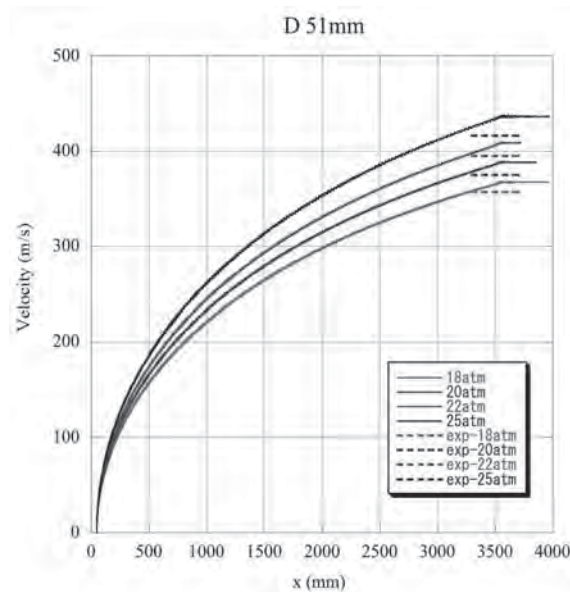


Fig. 1 Numerical and experimental result
(acceleration tube length: 3500mm)

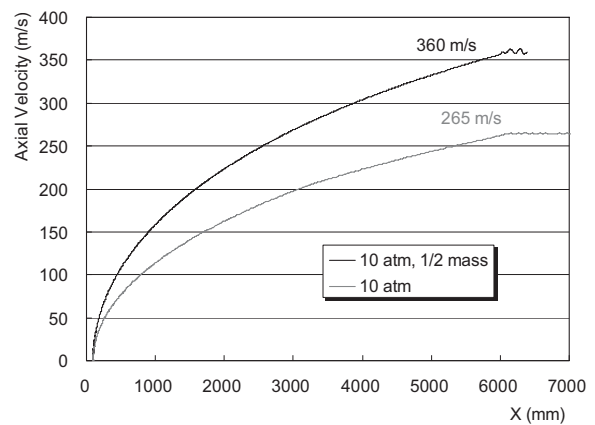


Fig. 2 Numerical result under the condition that
acceleration tube diameter is 10.0cm

4. まとめと今後の課題

複雑な形状を模擬した飛翔体モデルをマッハ2程度まで加速する性能を目標として、バリスティックレンジの加速管直径を51mmから100mmに拡大する作業を行った。

AUTODYNによる性能予測を基に加速管の設計および製作を行った。

今後、装置の性能評価を経て、飛翔体の発生する圧力波の挙動を研究し、ソニックブームの低減に向けた研究を行ってゆく。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] T. Saito, K. Hatanaka, H. Yamashita, T. Ogawa, S. Obayashi, K. Takayama: *Shock Waves*, Vol.21, No.5, pp. 483-489, (2011).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] K. Hatanaka, T. Saito, T. Ogawa, S. Obayashi, and M. Katayama: Experimental Studies of Sonic Boom Using a Two-stage Light Gas Gun, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 52-53.

[3] K. Hatanaka and T. Saito: Numerical analysis of weak shock attenuation resulting from molecular vibrational relaxation, *Proceedings of the Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2011), pp. 276-277.

[4] T. Saito, K. Hatanaka, H. Yamashita, T. Ogawa, S. Obayashi, and K. Takayama: Computations of flow field around an object decelerating from supersonic to subsonic velocity, *28th International Symposium on Shock Waves*, Manchester, (2011), USB, (6pages).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11022 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

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

澤野 憲太郎*†, 寒川 誠二**††

樽林 徹*, 星 裕介*, 和田 章良**

*東京都市大学総合研究所, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

分子線エピタキシー法(MBE)を駆使し, Si 基板上へ高移動度歪み Ge チャンネル構造の結晶成長を進めた. その上に, 中性粒子ビームによって酸化膜を形成し(NBO), 表面構造の評価を進めた. Si 上への NBO 膜形成についてはこれまでに条件の最適化がなされているが, 歪み Ge 上ではまだ確立されておらず, NBO の形成条件を探索した.

図 1 に作製した試料構造を示す. 通常, Si 基板上へ直接良質な 2 次元 Ge 層を形成することは困難であり, SiGe バッファ層の挿入が必須であるとともに, SiGe 層の欠陥密度の低減が高品質歪み Ge チャンネルを実現する上で重要である. 本研究では 2 段階低温バッファ法を用いて, Ge 組成 50% の SiGe バッファ層を形成し, その上に歪み Ge チャンネル層を成長した. これにより, 低欠陥密度かつ平坦な歪み Ge チャンネル層が得られた. さらに, 本研究では歪み Ge 上への Si キャップ層形成の効果を調べた. バルク Ge を用いた GeMOS チャンネル構造では, 大きな格子不整合のため, Si パッシベーション層形成は非常に難しい. 一方, 本構造では, SiGe バッファ層の挿入によって格子不整合が小さくなるため, Si 層の形成が容易である. これにより, 歪み Ge 上に Si キャップ層を成長させ, Ge に代わり Si を酸化させることが可能である. 本研究では, NBO 膜特性への Si キャップ層の効果を調べるため, キャップ層を成長した構造としない構造のそれぞれを作製し, その上に膜厚 3-4nm の NBO 膜を形成した.

図2に両構造でNBO膜形成後の表面AFM像を示す。両構造で非常に平坦な酸化膜が得られている。ラフネス値は0.3~0.4 nmであり、歪みGe層がもともと有するラフネスと同等であり、NBO膜形成プロセスによるラフネスの発生はないと言える。また、低温プロセスにより、Geチャンネル層の歪み(~2%)が完全に維持されていることも確認された。通常歪みGeは熱酸化が不可能であることから、NBOが非常に有望な手法であることが示された。さらにGeチャンネル上にSiキャップ層を挟むことで、電気特性の向上も確認されている。

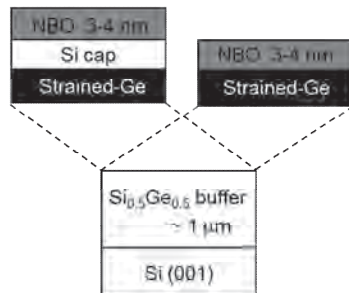


図1：歪みGe試料構造

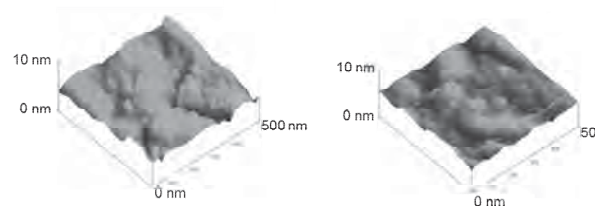


図2：NBO膜/歪みGe試料のAFM像。

(左:Siキャップ層あり 右:Siキャップ層なし)

3. 研究目標の達成状況

NBOによるダメージフリーの酸化膜形成により、従来法より低い界面準位密度を目標としているが、現在周波数可変CV測定系のセットアップを終え、界面準位密度の定量評価を鋭意進めているところである。また、移動度評価として、まずはMOS形成前のチャンネルの移動度評価を進めた結果、バンド間フォノン散乱低減化、チャンネル平坦性の効果により、 $2000\text{cm}^2/\text{Vs}$ を超える高移動度が得られている。この結果と、上で得られた酸化膜の平坦性を考慮すれば、pMOSデバイス構造においても $1000\text{cm}^2/\text{Vs}$ を超える高移動度の実現が十分に見込める。

4. まとめと今後の課題

MBEによる高品質Geチャンネル結晶成長、NBOによるダメージフリーかつ、低温での酸化膜形成を試み、良質な酸化膜/歪みGe構造を得た。今後は、界面準位密度、リーク電流の定量評価と低減化を進め、高移動度MOSデバイスへとつなげる。またX線光電子分光法(XPS)により、形成された酸化膜界面における、原子結合状態、元素分布を評価し、界面準位密度等の膜特性との相関を議論する。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

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

*[1] T. Kurebayashi, Y. Hoshi, K. Sawano, Y. Shiraki, A. Wada, S. Samukawa: Development of High Performance Strained-Ge Channel Device Utilizing Neutral-beam Oxidized Film, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 118-119.

- 3) その他(特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11023 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

スパイクニューロンデバイスの基礎検討
Basic Investigation of Spike Neuron Devices

森江 隆*†, 寒川 誠二**††

梁 海超*, 孫 意来*, 五十嵐 誠**

*九州工業大学生命体工学研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

既存のコンピュータでは難しい脳型情報処理を実現するため、発火タイミングで情報処理を行う積分発火型スパイクニューロン (IFN) のデバイス化が望まれる。このモデルでは、ニューロン数に比べてニューロン間を結合するシナプスの数が膨大であり、シナプス回路の面積縮小が課題である。本研究では、ナノディスクアレイ構造と CMOS 集積回路と組み合わせた新しいシナプスデバイスを提案し、トンネル効果を利用した究極の低消費電力・省サイズなスパイクニューロンデバイスを開発することを目的とする。

2. 研究成果の内容

IFN モデルを実現するために、本研究ではナノディスクアレイ構造を用いたシナプス後電位 (PSP) 生成機能の実現を目指した。PSP 信号のゆらぎが脳型処理に有効に働くことから、ノイズを伴うスパイクニューロンモデルの実現を検討した[1-4]。入力電圧 (V_{in}) の振幅を変えることにより、相対的にゆらぎ量を調整できることを既に昨年度で報告したが、今年度で制御電圧 (V_c) を変えることにより、ゆらぎ量にほぼ影響を与えずにシナプス荷重値を制御できることを新たに見いだした (図 1 (a))。さらに、電圧変化に応じた静電エネルギー分布の変化を解析し、ゆらぎ量と静電エネルギー分布の関係を調べた (図 1 (b))。処理モデルにおけるノイズ項とシナプス荷重項をそれぞれ V_{in} と V_c で個別に制御できるため、目標とするノイズを伴うスパイクニューロンモデルを実現できると考える。2次元アレイでは平均化効果によってゆらぎが小さくなる問題があるが、ナノディスクアレイのパターンを工夫して電子の1次元的流れが主になるようにすることでゆらぎ量を大きくできると予想される。以上の結果をまとめて、試作用のデバイス構造を考案した。

ナノディスク構造と結合する CMOS デバイスとしては、チップ表面面積に対してゲート容量の割合を小さくできることから、立体構造のフィン型トランジスタ (FinFET) が適切であることを確認した。トランジスタ寸法および入力電極・制御電極の配置案を検討し、デバイス試作の一部までを行った。

3. 研究目標の達成状況

回路シミュレーションによって、ノイズを伴うスパイクニューロンモデルを実現するデバイス構造を提案し、電圧変化に応じた電子輸送のゆらぎの変化を調べ、スパイクニューロンデバイス設計のための知見を蓄積できた。また、トランジスタ寸法および入力電極・制御電極の配置案を検討し、デバイス作製プロセスを設計した。デバイスの完成には至っていないが、引き続き試作を進める予定である。

4. まとめと今後の課題

ノイズを伴うスパイクニューロンモデルを実現するデバイス構造を提案し、デバイス作製プロセスを設計した。今後は試作を行い、実デバイスの実現を目指す。

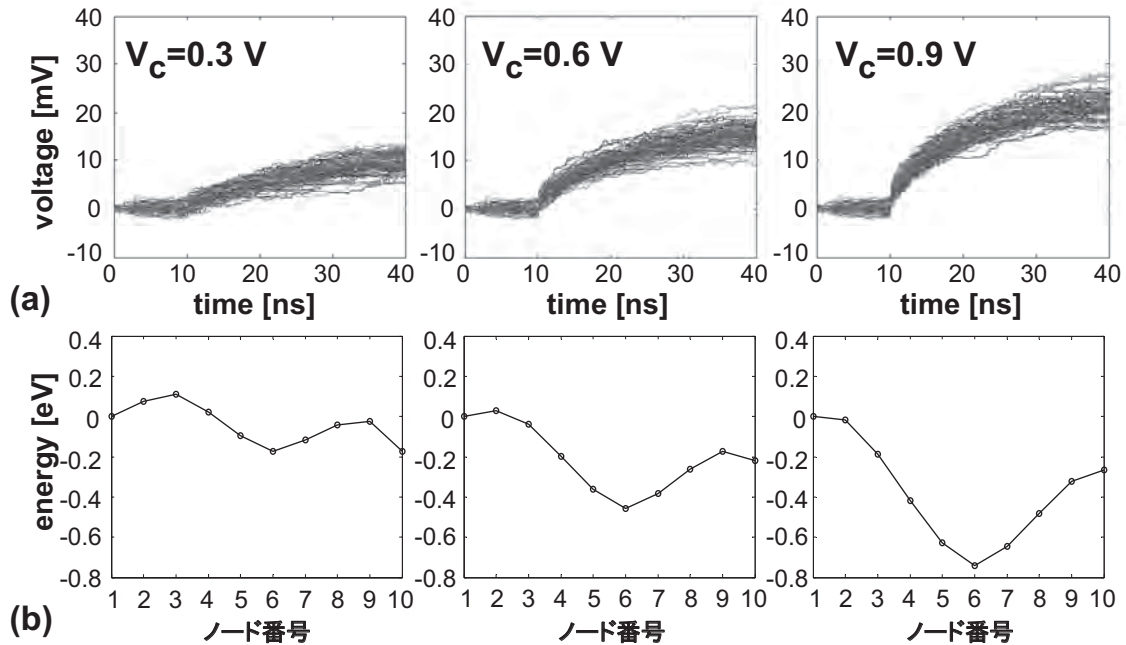


図 1 : シミュレーションで得られた PSP 立ち上がりのゆらぎ量と静電エネルギー分布

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] T. Morie, H. Liang, Y. Sun, M. Igarashi, and S. Samukawa: Fundamental Study on Spiking Neuron Devices, *Proc. of the Eleventh Int. Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 120-121.

[2] 森江 隆, 梁 海超, 孫 意来, 田中 秀樹, 五十嵐 誠, 寒川 誠二: 脳型情報処理デバイスの現状と今後の展開, 応用物理学会シリコンテクノロジー分科会第 140 回研究集会, 仙台, (2011), pp.28-32.

[3] 梁 海超, 孫 意来, 森江 隆, 五十嵐 誠, 寒川 誠二: ノイズを伴うスパイクニューロンモデルを実現するナノディスクアレイ構造, 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, (2011), 講演番号 1p-ZQ-11, p.09-047.

[4] 梁 海超, 森江 隆, 孫 意来, 五十嵐 誠, 寒川 誠二: ナノディスクアレイ構造と CMOS 回路を結合したスパイクニューロンデバイス, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 福岡, (2011), NC2011-66, Vol. 111, No. 241, pp. 125-129.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11024 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

中性粒子ビームエッチングによって作製した
高密度規則配列量子ドット系における電子状態の解明
Study on the Electronic States in High-Density and Regularly-Arrayed Quantum Dot Systems
Fabricated by Neutral Beam Etching

齋木 敏治*†, 寒川 誠二**††

*慶應義塾大学理工学部, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

中性粒子ビームエッチングによって作製された高密度規則配列量子ドット系は、レーザや太陽電池などへの応用が期待されている。このようなデバイス実現のためには、個々の量子ドットが3次元閉じ込めに固有の優れた光学特性を有し、かつ隣接する量子ドット間の電子的な結合が良く制御されている必要がある。本研究は、高密度量子ドット系に対する電子状態の計算機シミュレーションを通して、量子ドット成長と配列設計に対する有用な情報を提供し、デバイス志向の理想的な量子ドット系を実現することを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究では、2次元配列量子ドット系に対して FDTD 法 (Finite-difference time-domain method) を用いて、シュレディンガー方程式を解き、固有状態のエネルギーと波動関数の計算をおこなった。特に伝導特性を左右する波動関数の局在性やミニバンドの幅に着目し、ドット間隔やドットサイズの不均一性がどのような影響を与えるかを考察した。

計算モデルは以下のように設定した。実際に作製された量子ドットを参考に、ドットサイズは 9~11 nm とし、計算領域内に $10 \times 10 = 100$ 個の量子ドットを配列した。バリア層に対する伝導帯のオフセットエネルギー (閉じ込めポテンシャル) は 50 meV と仮定した。量子ドットに閉じ込められた電子の波動関数がお互いに重なり、系全体に広がった波動関数を形成する。100 個の量子ドットに対して計算をおこなうと、100 個の固有エネルギーと波動関数が得られる。ここでは、ミニバンドの幅は固有エネルギーの最大値と最小値の差として定義する。

図1にドット間隔を 0.5~2.0 nm の範囲で変化させた際のミニバンド幅の変化を計算した。ドットサイズは 10 nm に固定した。ドット間隔が小さいほど、波動関数の重なりが大きくなり、それに応じてミニバンドも広がる。また、伝導帯のオフセットを大きくすると、波動関数の浸みだしが小さくなり、ミニバンドが狭まることも確認した。

次にドットサイズを 10 nm に固定し、ドット間隔を 1~2 nm (平均値 1.5 nm) の範囲で不均一に分布させた系に対して計算をおこなった。図2に波動関数を示す (左が最小エネルギー、右が最大エネルギー)。この系のミニバンド幅は 16.3 meV で、間隔が 1.5 nm で一定の場合と同程度であった。このモデルに対し、さらにドットサイズに不均一性 (9~11 nm, 平均値は 10 nm) を与えたときの波動関数を図3に示す。最小エネルギーの波動関数に局在が見られる。また、ミニバンド幅は 8.6 meV と大きく減少した。これは、ドット間隔の広い領域、ならびにドットサイズの大きな領域がミニバンドの最大エネルギーを押し下げたためと考えられる。

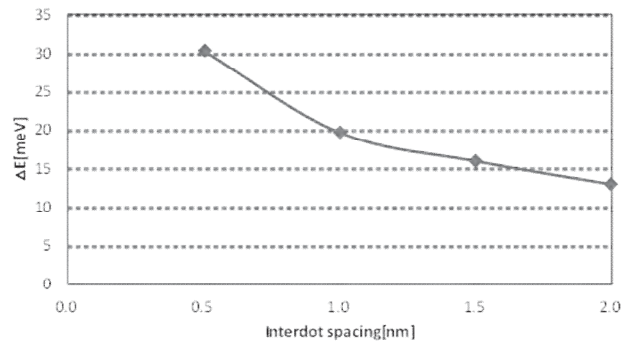


図1：ミニバンド幅のドット間隔依存性

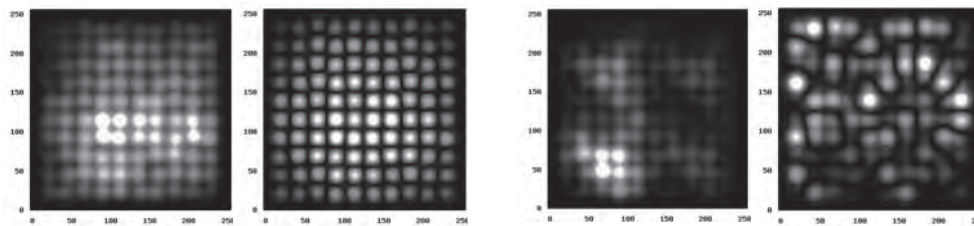


図2：ドット間隔が揺らいだ場合の波動関数

図3：ドットサイズに揺らいだ場合の波動関数

3. 研究目標の達成状況

ドットサイズ，間隔，閉じ込めポテンシャルの揺らぎ存在する系に対し，波動関数ならびにバンド両端のエネルギーに関する議論を可能とする一連の計算手法を確立した．定量的な結論を得るにはさらに検討が必要であるが，ドット間隔の揺らぎは相対的に影響が小さい等，大まかな傾向を得ることができた．

4. まとめと今後の課題

FDTD法を用いたシミュレーションにより，規則配列量子ドット系に対して，電子の波動関数ならびにエネルギーを計算した．各種パラメータの揺らぎに対して，電子状態がどの程度局在するか，ミニバンドはどのように変化するかを考察した．今後はさらに伝導過程のシミュレーションや実験結果との対比をおこなう必要がある．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Nurrul Syafawati Binti Humam, Nobuhiro Tsumori, Motoki Takahashi, Toshiharu Saiki, and Seiji Samukawa, “Numerical Simulation of Electronic States of Regularly Arrayed Si Quantum Dot System”, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 122-123.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11025 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Energy |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Investigations of Reacting Flow in Micro Channels Directed to Development of Eco-Friendly Technologies of Energy Conversion

Sergey Minaev*†, Kaoru Maruta**††
Hisashi Nakamura**, Roman Fursenko*, Evgeniy Sereshchenko*,

*ITAM SB RAS,

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective of the project is to work on the models of non stationary flame propagation, ignition and extinction in micro channels with elevated walls temperature within an universal approach. Solution of this problem will promote development of eco-friendly technologies of gas burning, energy saving and conversion on the basis of micro channel technologies.

2. Details of program implement

In the course of project implementation Russian project members (R.Fursenko, S.Minaev, E. Sereshchenko) visited Institute of Fluid Science, Tohoku University. During the visits project participants had fruitful discussions on the formulation of the problems, methods of solutions and experimental results. Project results were presented at the 11th International Symposiums on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration.

3. Achievements

The basic mechanisms of gas combustion in a micro systems can be elucidated from study of gas combustion in a narrow channel with controlled walls temperature. Experiments on gas combustion in a radial channel with a streamwise temperature gradient in the walls have revealed a plurality of flame structures: stable and unstable cylindrical flame; structures that remind the Pelton turbine with one, two, or many blades; rotating spiral flame and other structures. The allocation of the regions of instability responsible for formation flame repetitive extinction/ignition (FREI) in straight micro channel and rotating flame patterns in radial channel was found by stability analysis and numerical simulations (Figure 1). In particular, a gas flow rate interval corresponding to rotating spiral patterns (HD instability) was found by 3D numerical simulations. Spiral patterns have long been observed in excitable media, such as the Belousov–Zhabotinsky reaction, however, only a few experimental observations of such patterns have been reported before for gaseous combustion. A new formulation of the flame front evolution inclusive extinction, ignition and the conventional flame propagation was proposed. The model takes into account inertial effects in the combustion wave and it can yields principal new possibility for simulations of the combustion wave in complex flows and confined systems.

4. Summaries and future plans

The main result of project implementation is creation of verified by experiments and by numerical simulations of general model of flame instabilities allowing the description of

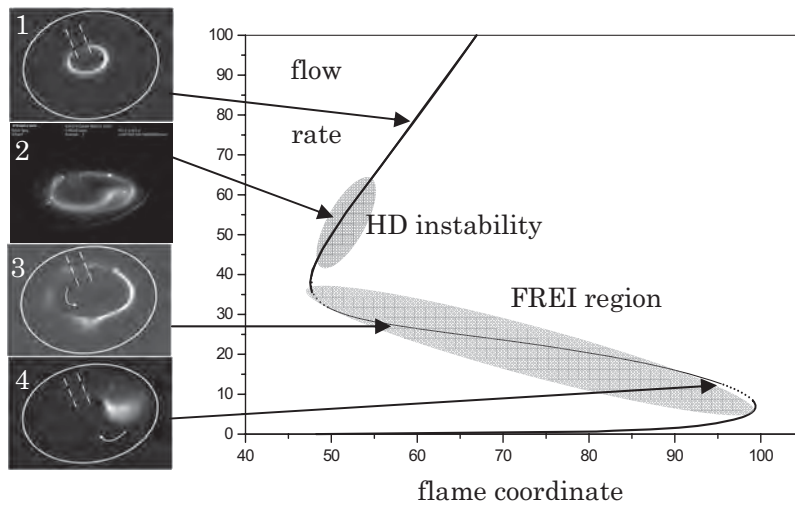


Figure 1. Regions of flame instability at the diagram of stationary solutions expressed in nondimensional variables. 1-stable circular flame, 2-spiral flame, 3-travelling waves, 4-turbine like flame.

big variety of flame patterns observed in micro channels. These investigations will facilitates development of effective micro channel based energy conversion technologies with stable gas combustion. Experimental data about limits of existence of different combustion regimes were obtained and the physical mechanisms responsible for formation of these regimes were distinguished. It is planned to continue developed forms of scientific cooperation between Russian and Japanese research teams in future.

5. Research results (* reprint included)

Experimental data about regions of existence of different combustion regimes occurring in micro channels were obtained and the physical mechanisms responsible for formation of these regimes were distinguished. The effective parallel algorithms adapted for GPU have been created for simulation of gas combustion within frame of reaction-diffusion models.

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - [1]S.S.Minaev and R.V.Fursenko, Inertial effects in nonlinear models of flame evolution, *Combustion Explosion Shock Waves*, Vol. 47 , No.4, (2011), (9 pages).
 - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[2] S. Minaev , R. Fursenko, E. Sereschenko, A. Fan, S. Kumar , K. Maruta, Oscillating and rotating flame patterns in microchannels, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.20-21.
- [3] S.Minaev, Modeling of flame instability and flame patterns in microchannels, *Proceedings of Thirteenth International Conference on Numerical Combustion*, Corfu, Greece, (2011), p.132.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11026 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Fundamentals |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

New Exact Solutions for Vortex Rings with Swirl and Magnetic Field

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

*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, UCSD

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

Professor Llewellyn Smith visited the Institute of Fluid Science during the period March 12-March 16, 2012. During this visit, Professors Llewellyn Smith and Hattori collaborated on extending the results published in Llewellyn Smith and Hattori (2012).

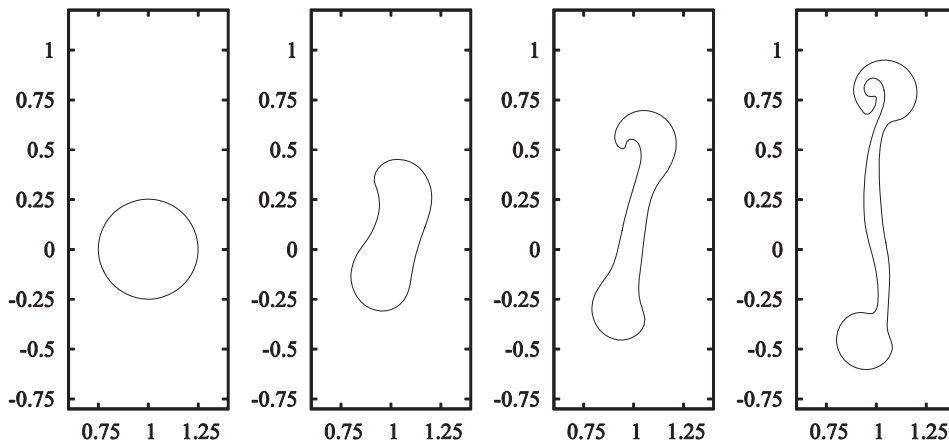


Figure 1: Motion of a magnetic eddy with uniform vorticity.

3. Achievements

Results from Year 1 were published in Llewellyn Smith and Hattori (2012). These included calculations for thin-core vortex rings and spherical vortices, as well as

contour dynamics simulations. We have since continued the numerical simulations and included the effect of vorticity inside the eddy. Without swirl and magnetic field, these solutions propagate as vortex rings, but we see again that they can split into dipoles that move away from each other (Fig. 1). The dipoles are well described by an analytical solution obtained by perturbation expansion. For strong vorticity inside the eddy, however, the eddies move as single vortex rings.

A formulation based on previous work on vortex patches has been developed to obtain steadily-propagating structures (V-states). These should reduce to Norbury's family in the absence of magnetic field

Bibliographic research has revealed some older papers on steady solutions in the presence of poloidal field and we have compared these results with ours. The formulation of Vladimirov, Moffatt and Ilin (1997) has proved useful in obtaining conserved quantities for the flows under investigation and in starting to examine their stability.

Finally the effect of stratification has been studied. The Boussinesq limit (small density differences essentially) leads to a simple formulation. It is particularly interesting because the conservation properties of the system are changed.

4. Summaries and future plans

V-states will be found using a combination of previous algorithms and the contour dynamics code. The possibility of bifurcations from that family will be investigated. The stability of these states will be examined, using geometric optics methods and contour dynamics to access the nonlinear regime.

The effect of more general density differences will be examined. It is not clear yet whether this will lead to tractable calculations. If time permits, an implementation of contour dynamics with helical symmetry will be developed. This has possible implications for the calculation of wakes behind rotating propellers, which is of great interest in the field of wind energy.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] Llewellyn Smith, S. G. and Hattori, Y: Axisymmetric magnetic vortices with swirl, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17(2012), pp. 2101-2107.

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

*[2] Yuji Hattori and Stefan G. Llewellyn Smith: New Exact Solutions for Vortex Rings with Swirl and Magnetic Field, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 144-145.

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

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11027 |
| 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 | 2011.4～2012.3 |

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

伊藤 拓哉*†, 船本 健一**††, 木村 芳孝***
 船本 聖絵***, 田邊 香***, 中村 愛***, 早瀬 敏幸**
 *東北大学未来医工学治療開発センター, **東北大学流体科学研究所
 ***東北大学国際高等研究教育機構
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

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

昨年度までの研究により、高輝度部位と脳出血の発症部位が一致することを確認された。本年度は得られた超音波Bモード画像中の輝度の変化の定量評価を行った。すなわち、脳出血の発症が予測される領域である側脳室近傍(R-LV, L-LV)、血流変動の小ささが期待される領域(ACA, 3V)の4箇所に関心領域を設定し、その位置の輝度値を各計測時刻において求めた。また、それらの輝度値の変化を指標に、脳出血発症のタイミングを検出することを試みた。

図1に各関心領域における輝度値の変化を示す。母体栄養制限群の胎仔の脳の超音波Bモード画像において、側脳室近傍における輝度の変動が2回目の血管の開放以降大きくなることが分かった。すなわち、2回目の開放以降に脳血管が破綻し、出血が生じている可能性が示唆された。

3. 研究目標の達成状況

小動物用超音波高解像度イメージングシステムを用いた脳断面の超音波Bモード計測により、脳出血のタイミングを捕えることに成功した。これにより、いどこで胎仔の脳出血が発生するかが明らかになった。

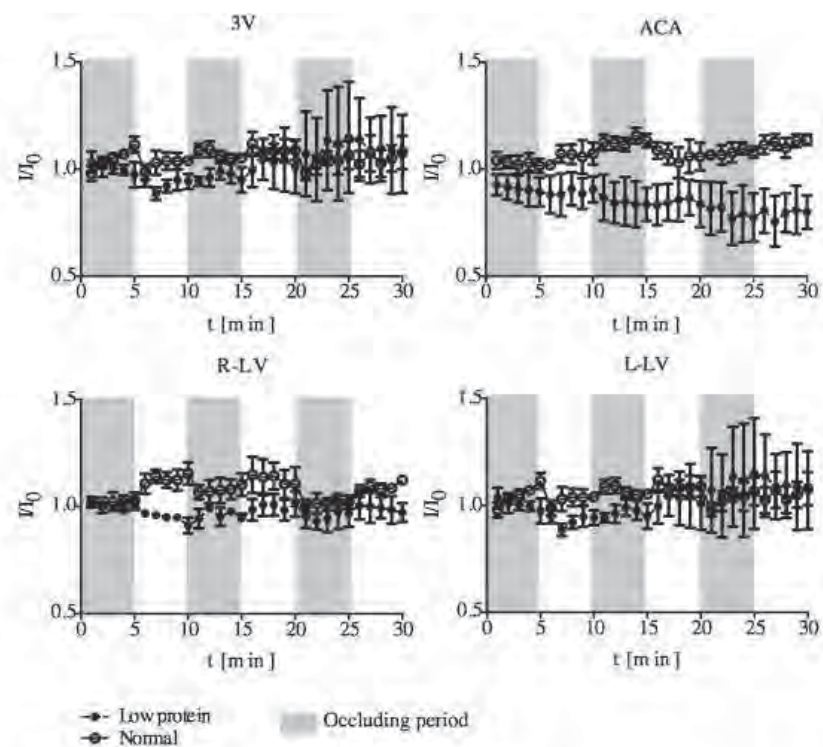


図1：胎仔脳の超音波 B モード画像中の各関心領域における輝度値の変化

4. まとめと今後の課題

脳の関心領域の輝度変化に適切な閾値を設定することで脳出血発症のタイミングを検出できた。今後は、従来実施してきた B モードによる計測に加えてドップラーモードを併用することにより、脳血流をより直接的に把握し、胎児脳出血発症機構の一層の解明に取り組む。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Takuya Ito, Kenichi Funamoto, Kiyoe Funamoto, Kaori Tanabe, Ai Nakamura, Toshiyuki Hayase and Yoshitaka Kimura: Rheological Analysis of the Mechanism of Fetal Brain Hemorrhage, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 86-87.

[2] Takuya Ito, Yoshitaka Kimura, Kaori Tanabe, Ai Nakamura, Kiyoe Funamoto, Kazuyo Sato, Tetsuro Hoshiai, Kaori Suenaga, Junichi Sugawara, Satoru Nagase, Kunihiko Okamura and Nobuo Yaegashi: *the 7th World Congress on the Developmental Origins of Health and Disease*, Portland, (2011).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11028 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Energy |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

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

Boris Mazurok*††, Sergey Minaev**, Aleksandr Menshchikov*, Kaoru Maruta***††
Hisashi Nakamura***

* IAE SB RAS, Russia

** ITAM SB RAS, Russia

***Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The project is oriented to development of effective “particle method” based numerical codes for simulations, visualization and control of reactive flows to promote development of advanced combustion technologies.

2. Details of program implement

Project results were presented at the 11th International Symposiums on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration.

3. Achievements

Nowadays the simulations of the premixed flame evolution in the practical devices having complex geometry and nonstationary gas flows is issue of the day. This project dealt with creation of effective parallel algorithms of simulations of gas combustion on the base of “particle method”. This method dealt with representation of the continuous medium by set of discrete particles. It was assumed that flow characteristics could be obtained from “on line” data acquisition equipment or from preliminary conducted simulations of complex flow field. The algorithm of real time simulations of flame evolution within frame of “flamelet” approach was created to model shape of flame front propagating in the given non stationary gas flow fields appearing in the combustion chambers with complex geometry [1]. The algorithms of visualization of temperature, concentration, flow field and 3D flame interface were developed as applied to facilitate representation of numerical simulations of complex structure of stretched flames. (Figure 1.)

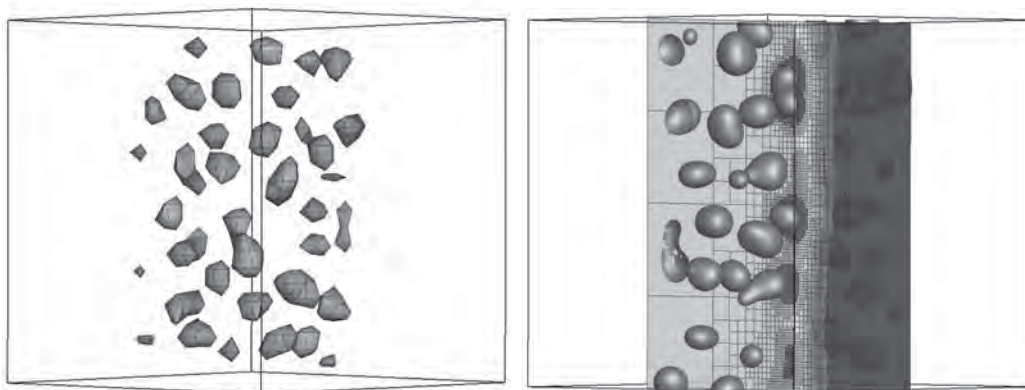


Figure 1. Counterflow flame shapes plotted by different data compression algorithms. Low resolution sampling (left) and adaptive grid algorithm (right).

4. Summaries and future plans

An effective parallel algorithm of numerical simulations based of “particle method” was developed for real time simulations of flame front propagation in prescribed flow field. The visualization of temperature, concentration, flow field and flame interface in 3D case was performed. Future plans include continuation of investigation on improvement of algorithms of visualization of temperature, concentration, flow field and 3D flame interface to facilitate representation of numerical simulations of noncontiguous combustion waves. Comparative assessment of application of multiunit processor with programmable logic to increase computation speed of numerical simulations of combustion problems will be considered. It is planned to continue developed forms of scientific cooperation between Russian and Japanese research teams in future.

5. Research results (* reprint included)

The effective numerical codes have been created for simulations, visualization of reactive flows on the base of GPU to promote advanced combustion technologies.

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

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

*[1] B. Mazurok, A. Menschikov, B. Dolgovesov, R. Fursenko, S. Minaev, K. Maruta, Real Time Modeling of Flame Front Evolution by Kinematical Model, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.80-81.

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

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11029 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Energy |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

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

Roman Fursenko*†, Kaoru Maruta**††

Sergey Minaev*, Fedor Palessky *, Hisashi Nakamura**

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

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

Increasing interest for clean and effective combustion technologies encourages investigations of lean premixed flames due to less pollutant emission and higher efficiency. Difficulties arising in the fundamental investigations of near-limit lean premixed flames are attributed not only to complex interaction of transport, chemical processes and radiative heat losses, but also to complicated spatial structure of combustion wave. Therefore the effective and fast numerical codes are necessary for both fundamental investigations and engineering calculations. The parallelism provided by Graphics Processing Unit (GPU) is modern and powerful tool to speed up numerical computations. In the course of project implementation the effective GPU-based algorithms for 3D simulations of low-Lewis-number premixed flames were elaborated and their performance was studied. It was shown that speedup of the GPU implementation over the conventional CPU version is about 40 times in

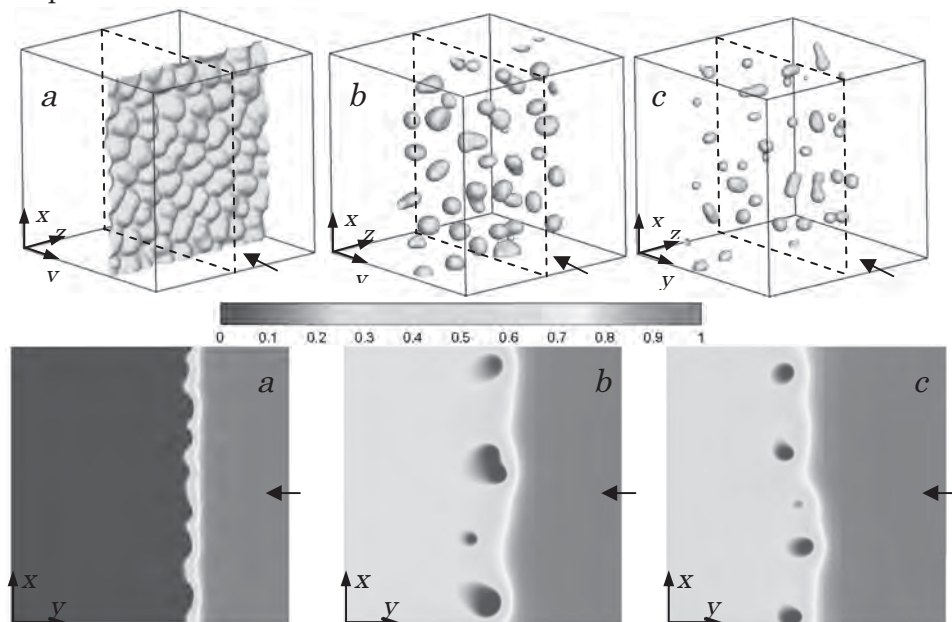


Figure 1. Equiscalar surfaces $C=0.15$ (top) and concentration distributions in $z=0$ plane (bottom) calculated for $Le=0.3$ and $h=0$ (a); $h=0.6$ (b); $h=0.8$ (c). Flow direction is shown by arrows.

average. General recommendations of effective use of GPU for simulations of combustion problems have been formulated. The numerical results on dynamical behavior of low-Lewis-number stretched premixed flames were compared with results of microgravity experiments performed by Prof. K. Maruta group (Tohoku University). The experiments and the numerical simulations coincide with conclusion that decreasing of equivalence ratio results in decreasing of average distance between flames. Another coincidence displays in shrinking of separate flame cells constituting flames with decreasing of equivalence ratio. Numerical and experimental results demonstrated possibility of entering concept on flame front of sporadic combustion wave even in the case when the combustion wave is constituted of separate ball-like flames being in the state of chaotic motion (see Fig.1b,c).

In the course of project implementation Russian project members (R.Fursenko and S.Minaev) visited Institute of Fluid Science, Tohoku University. During the visit Japanese and Russian groups had discussions on the results obtained in the frame of the project and formulated plans of the future research. Project members took part in the 11th International AFI/TFI conference and presented the results of the project.

3. Achievements

All results which have been expected in the submitted project were achieved. The fulfillment of the project allows decreasing of computation cost and computation time of simulations of some combustion processes. On the base of numerical simulations and microgravity experiments new knowledge on dynamical behavior of lean low-Lewis-number premixed flames have been obtained.

4. Summaries and future plans

Dynamical behavior of the low-Lewis-number lean premixed flames with radiative heat losses propagating in stagnation-plane flow has been investigated numerically. In order to speed up numerical computations the GPU-based parallel numerical code has been developed.

Dependencies of the flame structure, flame position, flame speed and concentration of unconsumed reactant on the heat losses intensity, mixture contents and stretch rate were obtained.

The future research will be directed towards the detailed numerical and experimental investigations of different combustion regimes of counterflow low-Lewis-number premixed flame. The further developments of GPU-based effective algorithms to simulate complex structure combustion waves are planed.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
[1] R. Fursenko, S. Minaev: Flame balls dynamics in divergent channel. *Combustion Theory and Modelling* (2011), Vol. 15, Issue 6, pp. 817-825.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
*[2] R. Fursenko, S. Minaev, K. Maruta, H. Nakamura: GPU-based Parallel Computations of Low Lewis Number Stretched Premixed Flames, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 82-83.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11030 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | 基盤研究分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

翼端渦の大規模変形が崩壊過程へ及ぼす影響について

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

高橋 直也^{*,†}, 宮寄 武^{**}

畠山 望^{***}, 服部 裕司^{****,††}

*東京電機大学工学部, **電気通信大学大学院情報理工学研究科

東北大学大学院工学研究科, *東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

翼端渦のモデルであるバチェラー渦を一様等方性乱流場に重ねあわせ、ナビエ・ストークス方程式の直接数値シミュレーションを行なった。計算は離散フーリエ変換に基いたスペクトル法を用い、解像度 512 の 3 乗で行なった。バチェラー渦の任意パラメータである旋回パラメータ $q=-1.5$ の臨界安定な場合について解析を行なった。その結果、相互作用によって特徴的な渦構造が発生すること、屈曲波がバチェラー渦に励起されること、旋回パラメータ q が減少することを捉えた。

エンストロフィーの等値面を用いた可視化解析から、特徴的な渦構造としてバチェラー渦本体の大規模変形、表面の筋状の渦構造、巻き取られた微細な渦構造の形成(図 1a)が観察された。これらの渦構造は時間の経過とともに複雑になる傾向が見られた(図 1b)。また統計解析から、屈曲波に対応する波数 $m=1$ の攪乱が最も大きな振幅を持つことがわかった(図 2)。

さらに速度・温度の軸流方向成分の半径方向分布から、実効的な旋回パラメータ q_{eff} を見積ったところ、時間とともに減少することがわかった。これは線形解析の見地からはバチェラー渦の安定化に対応する。この現象を理解するため、渦の変形や統計量の変化から相互作用の概念モデルを提案し、バチェラー渦が安定化する過程の 1 つを理解することができた。

3. 研究目標の達成状況

バチェラー渦の崩壊を促進する非線形過程、可視化および統計解析を行い、臨界安定の旋回パラメータを持つ場合について、その安定化過程の 1 つを明らかにすることができた。

4. まとめと今後の課題

バチェラー渦と乱流場との非線形相互作用を直接数値シミュレーションにて再現することができた。その流れ場に対し、可視化および統計解析を行なった。臨界安定のバチェラー渦は乱流場との相互作用によって安定化することがわかった。安定化過程の理解のため、相互作用のモデルを提案した。

今後の課題としては、バチェラー渦が線形不安定の場合における数値シミュレーションを行ない、大変形と渦崩壊との関連を明らかにすることが必要である。特に崩壊過程においては微細構造を生じることから、解像度を512の3乗から1024の3乗に上げる必要がある。

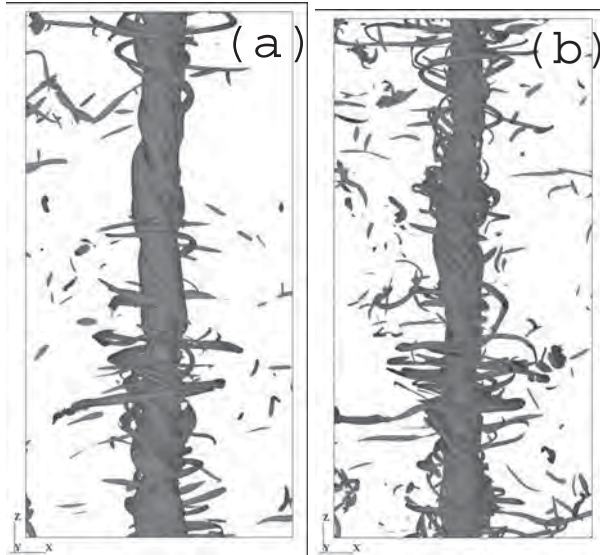


図 1 : エンストロフィーの等値面による渦構造の可視化. (a) $t=3.3$, (b) 6.7 .

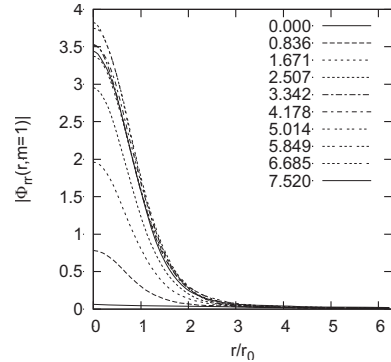


図 2 : 2 点スペクトルエネルギーテンソルの半径方向分布の時間変化. 屈曲波成分($m=1$).

5. 研究成果 (*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

国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] N. Takahashi, T. Miyazaki, N. Hatakeyama and Y. Hattori: A Numerical Study of the Effect of Large Deformations of a Trailing Vortex on Its Breakdown, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.146-147.

2) 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 | J11031 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

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

鄭 信圭*†, Hyunyul Kim**††

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

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本研究では流体研で開発した近似局面を利用する設計手法と George Mason 大学で開発した船舶にかかる力を計算する解析ツールを融合して効率のよい設計システムを開発した。図 1 と図 2 にはそれぞれ開発した設計システムを用いて行った設計結果とその性能比較を行っている。得られた解群は既存の船舶より広い範囲の速度領域で優れた性能を持っていることが確認できる。また、設計にかかる計算時間は 1/1000 に短縮できている。また、設計知識の獲得のため、データマイニングを行い、高速と低速性能を支配する形状パラメータの検討も行った。

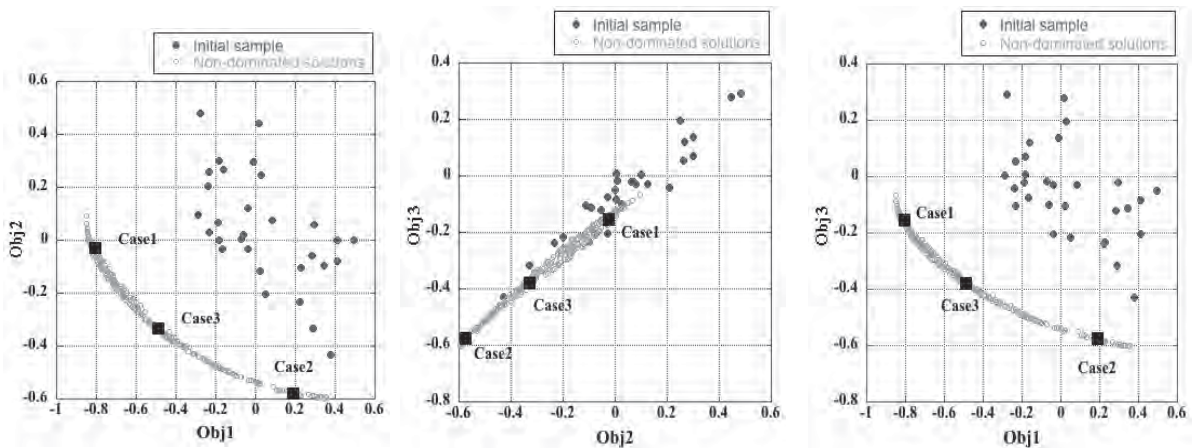


図 1 設計性能の比較

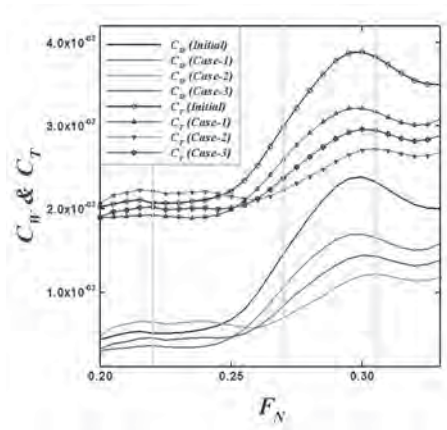


図2 設計性能の比較

3. まとめと今後の課題

船舶の設計に利用できる効率の高い設計手法の開発とその有効性の検証を行った。設計結果から本研究で開発した設計システムは既存の手法より設計時間を1/1000に短縮することができた。今後は、船舶の設計の重要な課題である seakeeping や推進系を含む設計問題への適用を考えている。

4. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] S. Jeong, H. Kim: Analysis and Optimization for Multi-Hull Ship, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 44-45.

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 | J11032 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | エネルギー分野 |
| 研究期間 | 2011.4 ~2012.3 |

マイクロチャネル内での物質拡散場の高精度計測に関する研究
A Study of Precise Measurement Method of Diffusion Field in Micro Channel

小宮 敦樹*†, Gary Rosengarten**††

*東北大学流体科学研究所, ** The University of New South Wales

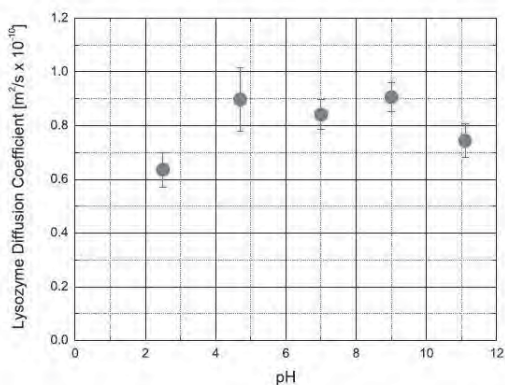
†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

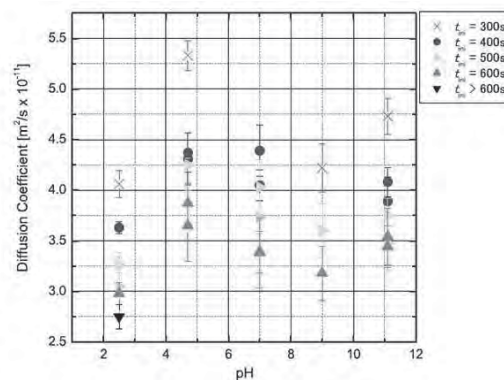
本研究は、狭チャネル内における物質拡散現象を実験的に明らかにするものである。流体科学研究所に既存のマッハツェンダー型位相シフト干渉計を用いてサブミリスケール狭チャネル内での液相内物質輸送現象を高精度可視化し、物質の自由拡散現象に対する周囲環境の影響およびチャネル幅の影響を評価するものである。複数種の無機塩およびタンパク質を用いて実験を行い、個々の分子が有する構造的特徴が物質拡散現象に及ぼす影響等を評価し、熱工学のみならず、医学・薬学分野等にも貢献できるデータを取得する。

2. 研究成果の内容

年度内に打ち合わせを数回行い、マイクロチャネルを有するセルの製作を共同研究者側で行った。共同研究者側は、これまでにチャネル幅をパラメータとしたマイクロオーダースケールの観察場観察セルを製作し、計測を行ってきた。このセルに研究代表者側で開発を行ってきた干渉計を用いて微小非定常拡散場の高精度可視化を行う予定であったが、共同研究者の所属大学変更により、セルの移管が不可能となり、本年度はサブミリスケールの拡散セルのみで、周囲環境が物質拡散現象に及ぼす影響および分子構造が拡散現象に与える影響について定性的な評価を行うこととなった。図1に実験結果から得られたタンパク質物質拡散係数のpH依存性を示す。Lysozyme, BSAともに等電点付近における環境で物質拡散係数が極大値を示していることがわかる。これは、電気的な相互作用が物質移動現象に十分に影響を及ぼしていることを意味している。



(a) Lysozyme



(b) BSA

図1：タンパク質物質拡散係数と pH の関係

また、図 2 に分子量と物質拡散係数の関係を示す。分子の形状を球状と仮定した場合、Stokes-Einstein の式より物質拡散係数は分子量の $1/3$ 乗に比例する。そこで、測定した物質の密度がほぼ同程度と仮定し、

$$D = \beta M^{1/3} \quad (M : \text{molecular mass})$$

の関係式を図 2 に併記すると、各物質の拡散係数は $\beta = 5.0 \times 10^{-9}$ のときにこの関係をほぼ満足していることがわかる。しかしながら、Lysozyme や BSA, Sucrose のような構造的特徴を有する物質等はこの関係式よりはずれ、構造的特徴が物質拡散に影響を及ぼしていることが示唆される。

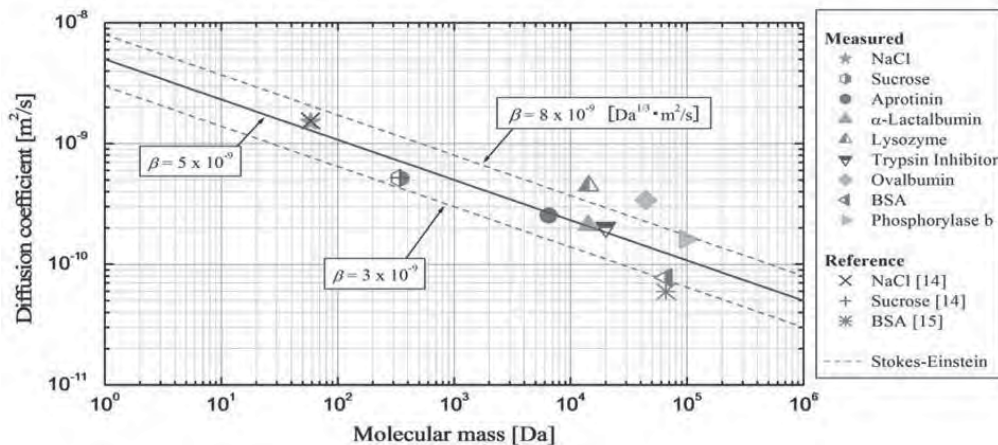


図 2 : 分子量と物質拡散係数の関係

3. 研究目標の達成状況

マイクロデバイス内の物質移動現象およびそのチャネル幅の影響評価に関しては、セルの移管ができなかったため実行できなかったが、もう一方の物質拡散現象に及ぼす諸因子の影響については、定性的な関係を得ることができ、全体として 70%の達成度と評価することができる。チャネル幅の評価は H24 年度に実施予定である。

4. まとめと今後の課題

今年度は物質拡散場の環境が拡散現象に及ぼす影響について検討した。その結果、電気的な相互作用、分子構造が大きく影響を及ぼすことが分かった。今後は、チャネル幅についての実験を実施し、得られる成果をまとめ上げ、雑誌発表を行っていく。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし (投稿準備中)

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] J.F. Torres, A. Komiya, J. Okajima and S. Maruyama: Evaluation of the Concentration Dependency of Mass Diffusion Coefficients in Aqueous Binary Solutions, *Proceedings of the 7th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids*, Algarve, (2011), CD-ROM DSL315.

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 | J11033 |
| 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 | 2011.4～2012.3 |

左心房における血流解析
Blood Flow Analysis in the Left Atrium

柴田 宗一^{*,***†}, 船本 健一^{**††}, 早瀬 敏幸^{**}, 白石 泰之^{***}, 山家 智之^{***},
*宮城県立循環器・呼吸器病センター 循環器科, **東北大学流体科学研究所,
***東北大学加齢医学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

左心房内に形成される渦流の臨床的意義を明らかにする。

2. 研究成果の内容

(1) 心房細動発生による可逆的な左心房内血流変化

実験動物を用いて、正常洞調律時と心房細動時で左心房内における血液の流れ方に変化が生じることを確認した。正常洞調律時では僧帽弁閉鎖時に左心房内で明瞭な渦を形成するのに対し、心房細動時には渦はハッキリせず、局所的な血流うっ滞を左心房壁周囲に認めた。しかしその流れ変化は可逆的で、正常洞調律へ戻る再び左心房内で渦を巻く流れに変化した(図1)。

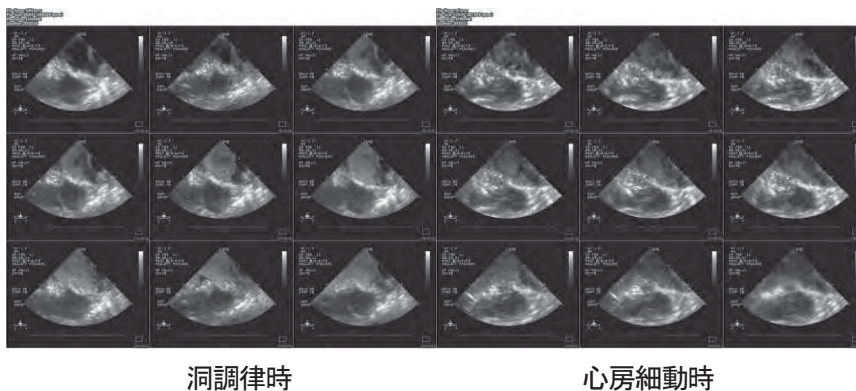


図1. 正常洞調律時と心房細動時で左心房内における流れの変化

| | SR | AF | p-value |
|---------------------|-----------|-----------|----------|
| Age | 66.4±6.6 | 66.4±7.4 | 1.000 |
| Diastolic dimension | | | |
| Length | 38.14±5.2 | 43.16±6.2 | 0.205 |
| Width | 31.92±8.8 | 32±8.9 | 0.989 |
| Thickness | 18.2±5.4 | 21.34±3.7 | 0.320 |
| Systolic dimension | | | |
| Length | 25.3±2.7 | 38.2±2.3 | <0.001†† |
| Width | 17.7±2.9 | 27.2±12.3 | 0.131 |
| Thickness | 10.8±1.5 | 18.1±4.3 | 0.016† |
| Shortening ratio | | | |
| Length | 33.4±3.9 | 10.2±12.6 | 0.012† |
| Width | 42.4±13.6 | 16.8±23.1 | 0.074 |
| Thickness | 36.7±18.9 | 14.2±19.2 | 0.099 |
| Volume | 85.8±6.7 | 54.6±23.8 | 0.041† |

表1. 正常洞調律時と心房細動時における左心耳径の比較

(2) 心房細動による左心耳の収縮能低下

年齢をマッチングさせた正常洞調律患者群5例と心房細動患者群5例にて左心耳の長さ、幅、厚さの3方向を計測し、2群間での比較を行った。造影剤を用いたCTにて左心耳の4Dイメージを作成し（1心拍9時相）、上記3方向の長さを収縮期および拡張期で計測し、それぞれの短縮率と容積短縮率も併せて比較した。その結果、①収縮期における長さ、②収縮期における厚さ、③長さの短縮率、④容積変化率に有意差を認めた。拡張期においては3次元的な変化がないことから、流れのうっ滞による容積負荷は少なく、心房細動により左心耳自体の収縮能が低下していることが分かった（表1）。

3. 研究目標の達成状況

- (1) 今回最大の目標としていた residence time (RT)に関する検証実験を完遂することができなかった。震災後の影響により臨床業務が多忙となり、実験を頻回に行える環境ではなかったことが一番の原因である。しかし、これまでシミュレーションおよび臨床データから得ていた心房細動による左心房内血流変化を、実験動物を用いて再現性をもって確認できたことはこれまでの研究の妥当性検証につながった。
- (2) MRIによる左心房内血流データは3例の臨床例を追加した。一方で当初予定していなかった臨床データの収集も行った。当院で年間350例行われている造影心臓CTの中から、年齢をマッチングさせた正常洞調律患者5例と心房細動患者5例の左心耳の挙動を比較した。その相違は左心耳の能動的収縮能低下にあった。

4. まとめと今後の課題

- (1) これまでシミュレーションおよび臨床データから得ていた心房細動による左心房内血流変化を、実験動物を用いて再現性をもって確認できたことで、これまでの研究の妥当性検証につながった。しかし、エコー画像の連続静止画では視認性に劣るため、流線表記を試みる予定である。また residence time (RT)に関する検証実験も併せて行う予定である。
- (2) これまでの研究により、心房細動時には左心房内での血流動態に変化が生じるが、CTの解析結果より左心耳の拡張期径に変化が乏しいことから、すぐに左心耳内の容量負荷を来す可能性は低いと考えられた。その結果、左心房内血栓の90%が左心耳内で形成される要因としては、心房細動時に左心耳の能動的収縮低下による血流うっ滞と、微弱な高頻度収縮によって左心耳内で低せん断の血流振動が発生し relative residence time (RRT)が増加するため、心房細動時には左心耳内に血栓が形成されやすいと考えられた。
- (3) 心房細動は持続すればするほど心房細動を維持しやすいと言われている。心房内部の血流変化が左心房心筋のリモデリングにどう関与しているか、マクロレベルでの解析も検討する必要がある。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 柴田宗一，山家智之，船本健一，早瀬敏幸，左心耳切除による左心房内血流動態への影響，第14回日本栓子検出と治療学会，仙台，(2011)。

*[2] M. Shibata, T. Yambe, T. Yamaguchi, R. Koizumi, K. Funamoto, T. Hayase: Left Atrial Vortex, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 88-89.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11034 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | 基盤研究分野 |
| 研究期間 | 2011.4～2012.3 |

プラズマ気泡生成法の開発
Development of Bubble Generation Method by Plasma

佐藤 岳彦*†, 中谷 達行**††
宮原 高志***

*東北大学流体科学研究所, **トーヨーエイトック株式会社

***静岡大学工学部

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

水中で放電させることにより、気泡が生成されるが、この時どのような気泡が生成されるのかは十分に解明されていない。また、電極近傍から流れが発生するが、この機構についても十分に解明されていない。そこで、本研究ではプラズマ条件の最適化により任意の気泡を生成する手法の開発や電極近傍の流動機構の解明を行う。

2. 研究成果の内容

本研究では気泡発生装置を作製した。この装置は、絶縁したワイヤ電極（エナメル線）を水中に挿入し、高電圧を印加することで、気泡をワイヤ電極先端から発生させ液体中に噴出することが可能である。数秒後には容器内が白濁するなど、大量の気泡を短時間で生成することに成功した。この液体を 10 分程度静置すると、大きな気泡は上昇し無色透明の液体となる。この静置後の液体を、レーザ回折式粒子径分布測定装置（Sympatec GmbH 製 HELOS システム）で気泡径を測定した。測定結果を図 1 に示す。概ね 0.1 μm から 7 μm の気泡径を有する分布を示し、0.9 μm 近傍にピークを示した。

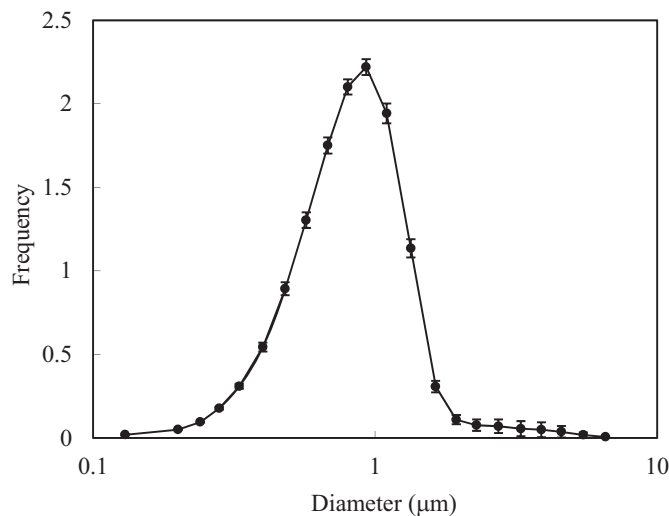


図 1：レーザ回折法による気泡径分布

3. 研究目標の達成状況

本研究ではプラズマ条件の最適化により任意の気泡を生成する手法の開発や電極近傍の流動機構の解明を行うことを目的にしている。本年度は、微細な気泡を発生させる装置の開発に成功した。また、気泡径分布を計測することに成功した。

4. まとめと今後の課題

本年度は、気泡発生装置の作製とその気泡径分布の計測に成功した。今後は、より狭い粒径分布にする手法やより微細な気泡の生成についての研究を進めるとともに、放電部における流動場解析を進める。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

該当なし。

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] T. Sato, T. Miyahara and T. Natanani: Observation of Bubble Formation and Collapse Process by Generating a Plasma, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.66-67.

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 | J11035 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | 基盤研究分野 |
| 研究期間 | 2011.4 ~2012.3 |

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

服部 裕司*†, 福本 康秀**††

*東北大学流体科学研究所, **九州大学マス・フォア・インダストリ研究所

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

渦構造の安定性として引き続き曲率不安定性に着目した。曲率不安定性は曲がりに直接の起源をもつパラメタ共鳴型の不安定性であり、曲がりをもつ最も単純な渦構造である渦輪について初めて存在が示された (Fukumoto & Hattori, 2005; Hattori & Fukumoto, 2003)。曲がりに加えて振りをもつらせん渦については短波長安定性解析による結果 (Hattori & Fukumoto, 2009) は得られているが、モード安定性解析による結果は限定的にしか知られていない。さらに、回転翼にともなう翼端渦は一般に軸流をもつ。そこでまず、昨年度に引き続き一般に軸流をもつらせん渦の短波長安定性解析を進めた。昨年度得られた不安定成長率の解析的な表式を用いて、軸流と振りの効果について考察を行った。その結果、軸流の効果は $O(\epsilon)$ (ϵ =渦核半径/曲率半径) ではコリオリ力による不安定性として、曲率不安定性と同じ共鳴条件であらわれることがわかった。これにより、最大不安定成長率は大きくなる。また $O(\epsilon^2)$ において軸流とらせんの振りの結合効果があらわれることもわかった。

次に、モード安定性解析により、一般に軸流をもつらせん渦について、曲率不安定性に対する振りの効果を調べた。不安定成長率の内積による表式を求め、これを利用して不安定性が $O(\epsilon)$ においては曲率不安定性とコリオリ不安定性の線形的な重ね合わせになることを示した。さらに、 $O(\epsilon^2)$ において不安定成長率の修正として軸流と振りの結合効果があらわれることを明らかにした。実際に不安定成長率の変化を数値的に求め、短波長極限で短波長安定性解析による結果と一致することを確認した。

図1に軸流が存在する場合の不安定成長率を示す。不安定性は波数が1異なる2個の Kelvin 波が共存するとき(すなわち分散曲線の交点において)おこる。左図は無制限個ある交点の中で、成長率が一般に大きい principal mode について不安定成長率の $O(\epsilon)$ および $O(\epsilon^2)$ の項を示したものである。 $O(\epsilon)$, $O(\epsilon^2)$ ともに実線で示された短波長安定性解析による値に収束するのが確認できる。

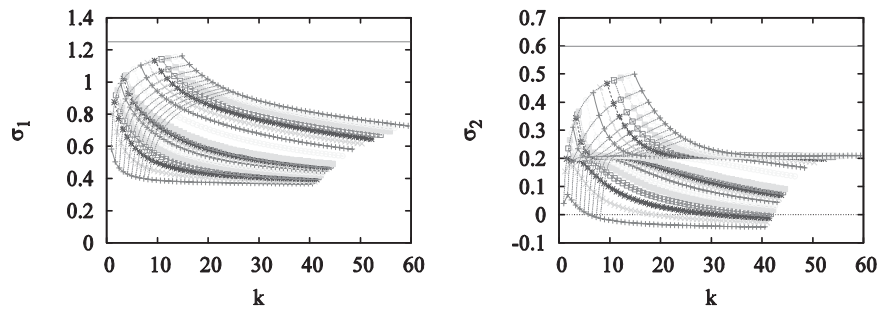


図1：モード安定性解析による不安定成長率. 左： $O(\epsilon)$, 右： $O(\epsilon^2)$

3. 研究目標の達成状況

本研究は、軸流効果の一般論を確立し、その応用として流体機械・風車などの回転翼から放出される翼端渦の安定性に対する軸流の効果を定量的に明らかにすること、特に、不安定化現象とその後の流れの状態が、流れの条件にどのように依存するかを解明することにより、流体機械や風車の効率向上、騒音低減の指針を与えることを目標としている。今年度の研究により、回転翼端渦のモデルであるらせん渦について、軸流をもつ場合の安定性解析の結果を得ることができた。短波長安定性解析の結果は現在投稿中であり、モード安定性解析の結果も投稿準備中である。

総じて十分な結果を得たと考える。

4. まとめと今後の課題

回転翼渦のモデルであるらせん渦の曲率不安定性について振りの効果と軸流の効果を調べた。一般に軸流をもつ場合に、短波長安定性解析とモード安定性解析により、軸流の効果および軸流の振りの結合効果を解明した。今後は、モード安定性解析における境界条件の変更と直接数値シミュレーションにより非線形性が強くなった場合の挙動を明らかにすることが課題である。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

*[1] 服部 裕司, 福本 康秀: らせん渦の線形安定性解析：ノーマルモード解析と短波長解析の関係 京都大学数理解析研究所講究録 No. 1749 (2011), pp. 205-216.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Yasuhide Fukumoto and Yuji Hattori: The Instability of a Helical Vortex Tube with Axial Flow, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.144-145.

[3] 服部 裕司, 福本 康秀: 軸流をもつらせん渦の短波長安定性解析, 日本流体力学会年会 2011, (2011).

[4] 服部 裕司, 福本 康秀: 軸流をもつらせん渦のモード安定性解析, 日本物理学会 2011 年秋季大会, (2011).

[5] Yuji Hattori and Yasuhide Fukumoto: Stability of a helical vortex tube with axial flow, *APS 64th Annual DFD Meeting*, (2011).

[6] Yuji Hattori: Instability of a Helical Vortex Tube with Axial Flow, *Hot Topic Workshop on Fluid Dynamics : Vortex Dynamics, Biofluids and Related Fields* (招待講演), (2011).

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11036 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | エネルギー分野 |
| 研究期間 | 2011.4～2012.3 |

ふく射要素法を用いた生体内光伝播と伝熱現象に関する研究

A Study of Light Transport and Heat Transfer in Biological Tissue using Radiation Element Method

圓山 重直*†, 櫻井 篤**††, 小宮 敦樹*, 佐藤 善幸

*東北大学流体科学研究所, **新潟大学工学部

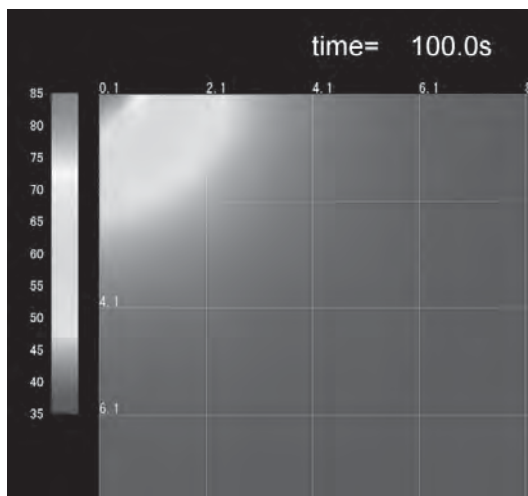
†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、レーザー治療時における生体内の光伝播とそれに伴い生じる伝熱現象の定量的評価を行う。当研究グループで開発したふく射要素法により、生体内の光伝播を詳細に解明し、生体伝熱方程式とカップリングを行い、レーザーによる生体加熱機構を評価する。さらに、生体組織表面冷却により生体組織内に生じる温度分布形状を制御する手法について、数値解析により評価する。

2. 研究成果の内容

本研究ではまず、ふく射要素法を二次元軸対称座標系へ適用させ、その妥当性を検証した。その後、流体研側で開発を行ってきた二次元軸対称生体伝熱解析コードへ二次元軸対称ふく射要素法を適用し、レーザー治療解析コードを構築した。図1に本解析コードにより得られた結果を示す。図1(A)は生体組織へレーザーを照射した際に組織内に生じる温度分布を表している。一方、図1(B)はレーザー照射時に生体組織表面を冷却した際の温度分布を示している。これらの結果から生体組織内に局所的に温度ピークを形成できる可能性が示された。この治療法により、組織表面を傷付けることなく内部を破壊する新たなレーザー治療の可能性が示された。



(A)レーザー照射のみ



(B)表面冷却とレーザー照射

図1：二次元軸対称座標系での生体組織へのレーザー照射の数値解析結果

3. 研究目標の達成状況

本研究で構築したコードを用いれば、レーザーの波長の違いによる生体内光伝播の様相の変化や、レーザー光の浸透深さなどを定量的に評価でき、それらを踏まえた治療方針を提供することができる。レーザー治療において熱のみを計算する手法はあるが、光伝播と伝熱を連成させて解析する手法は例がなく、ユニークである。以上を踏まえて、本年度の研究は100%達成できたといえる。

4. まとめと今後の課題

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

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

該当なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] A.Sakurai, Y.Sato, S.Maruyama, J.Okajima, A.Komiya, Heat Transfer Analysis in a Biological Tissue Exposed o Laser Irradiation, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 162-163.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

該当なし

| | |
|------|----------------|
| 課題番号 | J11037 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | エネルギー分野 |
| 研究期間 | 2011.4 ~2012.3 |

複雑媒体における非フーリエ伝熱解析
Non-Fourier Heat Transfer in Complex Materials

圓山 重直*†, Mishra Subhash Chandra**††, 小宮 敦樹*
 *東北大学流体科学研究所, **Indian Institute of Technology, Guwahati
 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、生体組織に代表される複雑系非等方性媒体中の熱移動について、非フーリエ伝熱解析を行うものとする。YAG レーザーによる照射実験で得られる生体皮下組織での深度方向非定常温度分布を、非フーリエ方程式による解析解と比較することにより、複雑系媒質内における伝熱形態を把握する。

2. 研究成果の内容

これまで流体研と IIT で行ってきた計算結果を検証するため、波長 1064nm の近赤外レーザーを用いて生体組織の加熱実験を行った。本実験では生体組織として豚肉を用いた。また生体組織内に特異な温度分布を形成するためにサファイヤガラスを用いた冷却器を新たに作成した。この冷却器は図 1(A)に示すように近赤外レーザーを透過すると同時に生体組織表面を冷却することが可能である。実験結果の一例を図 1(B)に示す。得られた赤外線カメラで撮影された温度分布は、これまで本共同研究で計算により得られた温度分布とある程度定量的に一致していた。

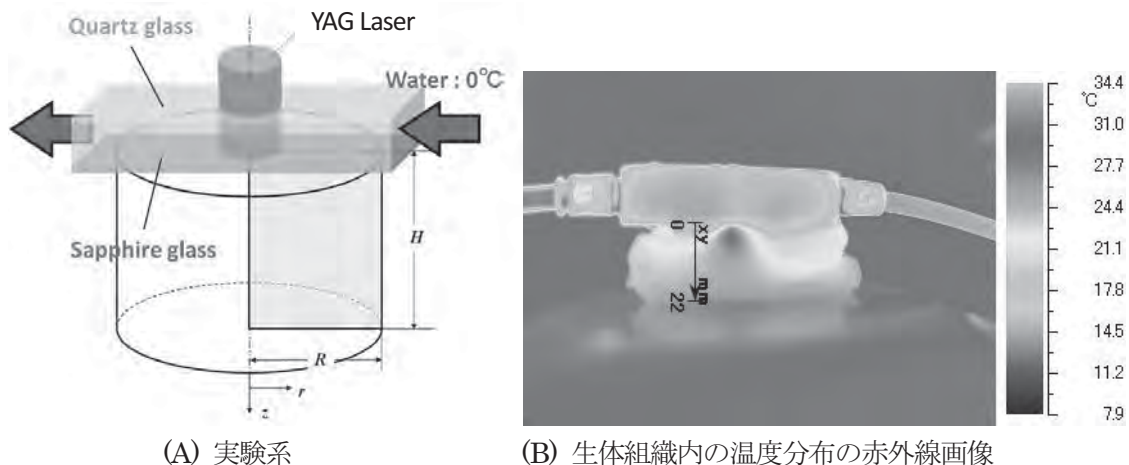


図 1：生体組織への YAG レーザー照射実験

3. 研究目標の達成状況

生体組織内の非定常温度分布を実験的に評価できた。本年度の成果とこれまでの成果を合わせると生体組織内のふく射・熱伝導複合伝熱現象を数値解析と実験という二つの側面で評価することができた。本共同研究で得られた成果は熱を利用した医療において基礎的かつ定量的な知見を提供することに繋がる。また基礎的な知見の他に、新たなレーザー治療の実証もできた。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

近赤外レーザーを用いたレーザー治療に関する複雑媒体の伝熱解析結果に基づく実証実験を行った。生体組織表面を局所冷却しつつ、近赤外レーザーで加熱することにより生体組織内で温度のピークを作り出すことができた。今後は、本共同研究で得られた知見を活用し、複雑媒体として生体組織のみならず、複合材料や断熱材などの内部に生じる複合伝熱現象の解明と一般化を目指す。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

- [1] R.P. Chopade, S.C. Mishra and P. Mahanta and S. Maruyama, Effects of locations of a 3-D design object in a 3-D radiant furnace for prescribed uniform thermal conditions, *Applied Thermal Engineering*, vol.31, Issue 16, (2011), pp. 3262-3274.
- [2] R.P. Chopade, S.C. Mishra, P. Mahanta, S. Maruyama, Uniform thermal conditions on 3-D object: optimal power estimation of panel heaters in a 3-D radiant enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, (2012), pp. 63-76.
- [3] S.C. Mishra, R. Muthukumar and S. Maruyama, The finite volume method approach to the collapsed dimension method in analyzing steady/transient radiative transfer problems in participating media, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 3, (2011), pp. 291-297.
- [4] R. Muthukumar, S.C. Mishra, S. Maruyama and K. Mitra, Assessment of signals from a tissue phantom subjected to radiation sources of temporal spans of the order of a nano-, a pico- and a femto-second - a numerical study, *Numerical Heat Transfer, Part A* Vol. 60, Issue 2(2011), pp154-170.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[5] Subhash C. Mishra, Rohan Ranganath Vernekar, Usage of the Lattice Boltzmann Method Applied to the Analysis of Radiative Transfer in a Participating Medium Subjected to Collimated Loading, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 164-165.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

該当なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11038 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | エネルギー分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

マイクロ・ナノ構造体のふく射特性計測に関する研究
Measurement of Radiative Properties in Micro-Nano Structure

圓山 重直*†, Rodolphe Vaillon**††
Mehdi Baneshi*, 江目 宏樹***, 小宮 敦樹*
*東北大学流体科学研究所, **CETHIL, INSA-Lyon
***東北大学大学院工学研究科
†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、マイクロ粒子群を用いて波長選択性を有する機能性膜を製作し、可視域から近赤外領域に至るふく射特性、特に反射特性に関する実験的・解析的知見を得ることを目的とする。これまでに開発されたふく射解析コードで、マイクロ粒子群が存在する薄膜の反射特性を評価し、同時に赤外分光光度計を用いて薄膜のふく射特性を評価する。

2. 研究成果の内容

流体研側が既有的に持っているマイクロ粒子群に関する高精度ふく射解析コードを用いて、金属ナノ粒子群を含んだ薄膜コーティング剤の太陽光に関する反射特性を評価した。薄膜厚さ、粒子の種類、粒径分布、粒子数をパラメータとした解析を行った。可視領域においては低反射を、近赤外領域においては高反射を実現すべく金属粒子の評価・選定を行った。流体科学研究所側では主として解析的知見を得る研究を遂行し、各金属のふく射特性から、本研究の目的とする機能膜生成に適した金属の選定を行った。併せて膜の製作・反射測定実験を実施し、それらの反射特性を評価した。図1に示すように、可視-近赤外における波長領域で評価を行い、解析手法の妥当性を示すとともに、機能性膜生成の最適金属粒子の提案をした。

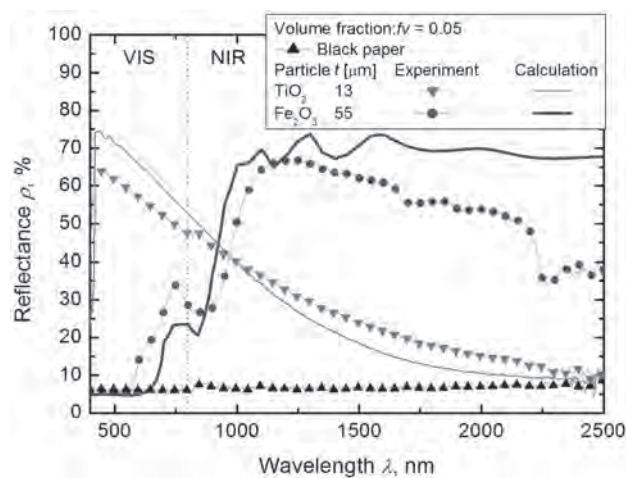


図1：冷却機能性膜塗布時の各波長における反射率の変化

3. 研究目標の達成状況

本年度に実施した実験では、各種パラメータの中で、マイクロ粒子にどのような金属を用いるかで、ふく射特性が大きく異なってくることを実験的・解析的に評価することができた。この知見は、今後の高機能な低反射高断熱機能膜のデザインに向けた指標を示すことができ、本年度の研究目標達成度としては100%の達成度として位置付けることができる。

4. まとめと今後の課題

高精度ふく射解析コードを用いて、金属ナノ粒子群を含んだ薄膜コーティングの太陽光に関する反射特性を評価し、最適金属の提案を行った。今後は本解析手法を用いるとともに、これまでの知見を総括して、工業的見地からも利用可能であり、かつ安価で安定した最適金属の選定・提案を行う。併せて評価実験も行う。

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] M. Baneshi, S. Maruyama and A. Komiya, Comparison between aesthetic thermal performances of copper oxide and titanium dioxide nano-particulate coatings, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol.112-7 (2011), pp.1197-1204.
- [2] M. Baneshi, S. Maruyama and A. Komiya, The effects of TiO₂ pigmented coatings characteristics on temperature and brightness of a coated black substrate, *Solar Energy*, Vol.86-1 (2012), pp.200-207.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] H. Gonome, M. Baneshi, J. Okajima, A. Komiya and S. Maruyama, The Effect of Dispersed State to Control of Radiative Properties of Coatings Pigmented with Nanoparticles, *Proceedings of the Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2011), pp.508-509.
- [4] M. Baneshi, H. Gonome, S. Maruyama and A. Komiya, Heat Shield Performance of Fe₂O₃ Pigmented Coatings by Inverse Analysis of Full Spectral Reflectivity Measurements, *Proceedings of the 48th National Heat Transfer Symposium of Japan*, Okayama, Vol.II+III, (2011), pp.675-676.
- [5] H. Gonome, M. Baneshi, R. Vaillon, J. Okajima, A. Komiya and S. Maruyama, Controlling the radiative properties of coatings pigmented with submicron particles, *ELyT Lab workshop*, Presqu'île de Giens, (2012), pp.56-57.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) ICFD Best Award, The Effect of Dispersed State to Control of Radiative Properties of Coatings Pigmented with Nanoparticles, H. Gonome, 10 November 2011, Global COE Program“ World Center of Education and Research for Trans-disciplinary Flow Dynamics”, Tohoku University

(マスコミ発表) なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11039 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | エネルギー分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

大規模環境におけるエネルギー移動評価とその解析
Evaluation and Analysis of Mega-Scale 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、メガスケールにおけるふく射伝熱解析を行い、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解析モデル構築を目指す。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と GPS ラジオゾンデによるふく射観測を行い、それらの結果を解析モデルにフィードバックする。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ことを最終目標とする。本年度の目的は圓山らが開発した高速ふく射伝熱解析コード REM² による大気ふく射収支解析手法の確立に必要な支援実測データを取得すること。実測データ取得のために新たな観測手法を構築すること。

2. 研究成果の内容

シミュレーションモデルの確度向上と妥当性検証などに必須となるふく射熱流束の大気中での鉛直プロファイル取得を行うため、GPS ラジオゾンデを用いた観測手法を共同で開発した。図1に観測手法の概要を示す。市街地でゾンデを打ち上げ、海上に落とす間にゾンデに搭載したふく射熱流束センサーのデータを位置情報と合わせてリモート受信することができる。2011年3月末頃に流体研付近からの複数打ち上げを予定していた。図1に完成した試作ゾンデの外観を示す。ゾンデ筐体の上部および下部にそれぞれ下向きおよび上向きにふく射熱流束センサーを貼り付け、送信基盤に改造接続した。復興の状況を鑑みて、H23年度は仙台市街地上空でのゾンデ打ち上げを見送り、代わりに関東地域にて打ち上げ試験を行った。結果として、図2に示すように試作ゾンデによりふく射収支の鉛直プロファイルを実測できることが確認された。これら成果を ICFD (AFI/TFI2011) にて成果報告した。

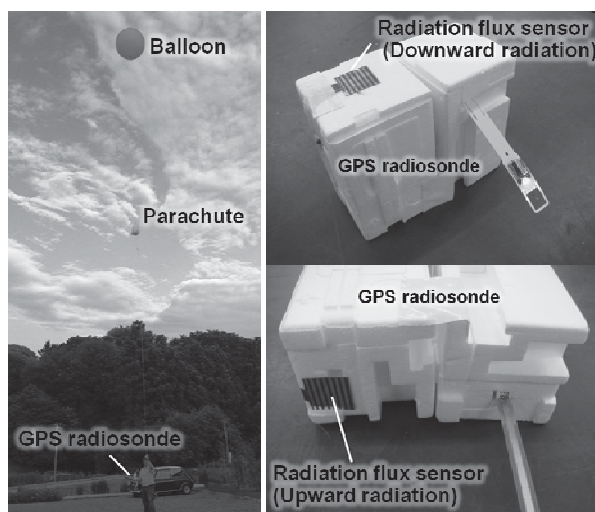


図1: 試作した大気ふく射測定用 GPS ラジオゾンデ

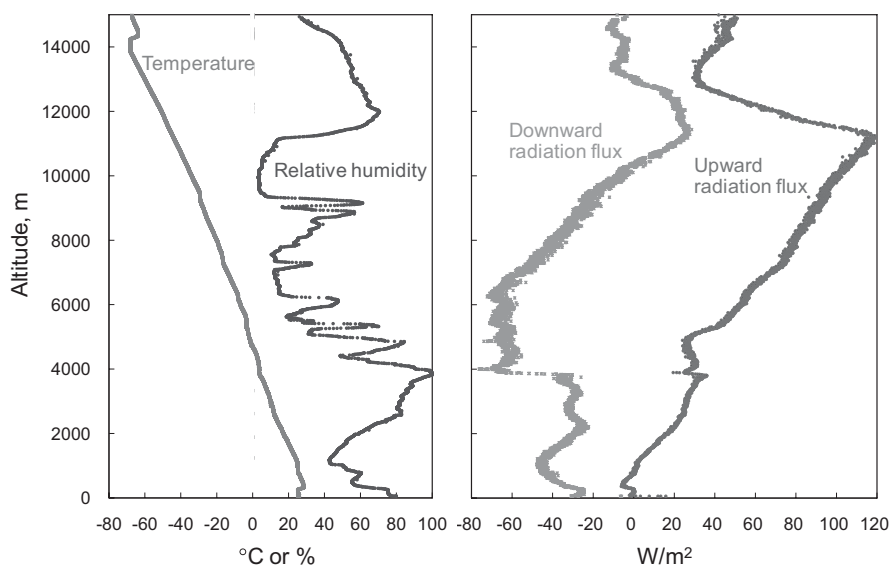


図2：試作ゾンデによって取得された大気ふく射熱流束データの例

3. 研究目標の達成状況

試作 GPS ラジオゾンデによる観測実現性の確認を行うことができたという点では、80%の達成度と言える。H23年度中に仙台市上空にて複数回の観測を行う予定であったが、震災の復興状況を鑑みてやむなく延期した。H24年度中に鋭意実施する予定である。

4. まとめと今後の課題

今年度は大気ふく射収支解析手法の確立に必要となる支援実測データの観測手法の開発を押し進めた。今後は、上記のゾンデ観測を実施してデータを取得し、解析結果との摺り合わせを通じて、解析モデルおよび手法の精査を進めていく。一連の成果の論文投稿も行いたい。

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）

なし（準備中）

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] N. Yamada, A. Sakurai, A. Komiya, S. Maruyama, Energy Transfer Simulation and Analysis on Mega-scale Environment, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 160-161.

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 | J11040 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

MR 計測融合シミュレーションによる脳動脈瘤破裂予測
Evaluation of Intracranial Aneurysm Rupture by MR-Measurement-Integrated Simulation

杉山慎一郎*†, 船本健一**††
清水宏明*, 富永悌二***, 早瀬敏幸**
*広南病院脳神経外科, **東北大学流体科学研究所
***東北大学大学院医学系研究科神経外科学分野
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

MR 計測融合シミュレーションによる非侵襲的な脳動脈瘤の血行動態解析方法を開発し、それを利用した未破裂脳動脈瘤の破裂リスクを算定する。

2. 研究成果の内容

脳動脈瘤患者 30 例において、3D 脳血管撮影によって取得した形状と phase contrast MRI によって得られた血流量の情報を流入・流出境界条件として用いた数値流体力学による血流解析を行った。脳動脈瘤の形状と血行動態の経時的な変化を比較したところ、生理的条件を逸脱したせん断応力が成長に関与している可能性が示唆された。

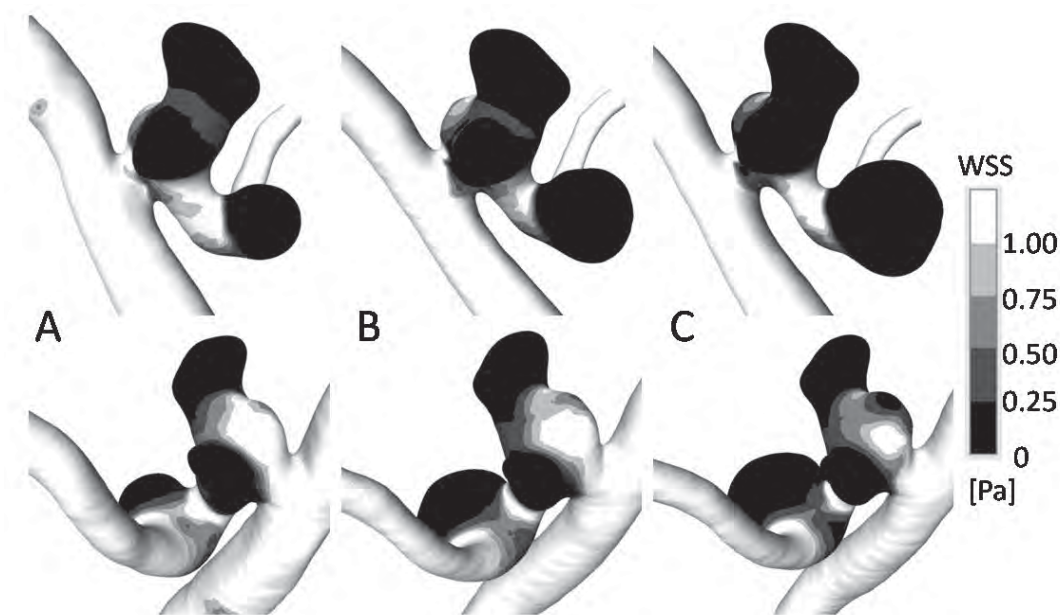


図 1：脳動脈瘤の増大と壁せん断応力（WSS）の経時的変化（2つの異なる角度から見る）

A, 初診時 B, 6ヶ月後 C, 12ヶ月後

3. 研究目標の達成状況

脳動脈瘤における血行力学 (hemodynamics) と脳動脈瘤の形状変化 (biology) との関連性を部分的に明らかにした。また、MR 計測融合シミュレーションの実行に必要な脳動脈瘤内の血流の 4 次元データを収集するソフトウェアを広南病院の MR 装置に導入し、臨床データの収集を開始した。

4. まとめと今後の課題

本研究では、数値流体力学による脳動脈瘤内の血行力学の解析結果と脳動脈瘤の形状の経時的な変化との比較から、生理的条件を逸脱したせん断応力が成長に関与していることが示唆された。

脳動脈瘤内の血流を数値流体力学によって解析する場合、我々は 3D 脳血管撮影によって可能な限り正確な形状を取得し、phase contrast MRI によって測定された患者固有の血液流入・流出条件を用いている。しかし、観血的検査である 3D 脳血管撮影は、限られた症例にしか施行できない。また、多くの仮定的条件下に行われる血流解析結果について、その妥当性を検証することは生体内の血流に対しては容易ではない。今後は、MR 計測融合シミュレーションによって非観血的に脳動脈瘤内の血流の速度ベクトルを解析にフィードバックしながら解析を行うことで血行力学を再現し、その妥当性の評価を行う予定である。さらに、脳動脈瘤の破裂リスクと血行力学の関係を、現在までに我々が得た基礎的知見と比較しながら検証する。

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] S. Sugiyama, H. Meng, K. Funamoto, T. Tominaga, et al: Hemodynamic Analysis of Growing Intracranial Aneurysms Arising from a Posterior Inferior Cerebellar Artery, *World Neurosurg*, (2011), DOI: 10.1016/j.wneu.2011.09.023

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] S. Sugiyama, K. Funamoto, T. Hayase and T. Tominaga: Computational Simulation of Blood Flow in Intracranial Aneurysms under Patient-Specific Pulsatile Inlet Condition, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.90-91.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11041 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

血行力学的解析を主眼とする脳動脈瘤データベースの構築
Database of Intracranial Aneurysms with Hemodynamic Analysis

杉山慎一郎*†, 太田信**††, 中山敏男***,
 清水宏明*, 富永悌二****

*広南病院脳神経外科, **東北大学流体科学研究所

***東北大学大学院医工学分野

****東北大学医学部医学系大学院神経外科学分野

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

近年、脳動脈瘤の血行動態を数値流体力学的に解析し、病態との関連を明らかにしようとする試みがさかんになされているが、いまだ臨床に役立つような知見は得られていない。本研究は、脳動脈瘤患者から得られる実際の形状および血流量をもとにした血行力学的解析を多数の症例に行い、大規模なデータベースを構築しようと企図するものである。構築したデータベースは、脳動脈瘤の自然史とその血行動態との関連を調査するための貴重な医学的資源となりうる。

2. 研究成果の内容

初年度は、脳動脈瘤患者 19 例を対象に血行力学的解析を行いつつ、その標準的な方法論を確立した。すなわち、3D 脳血管撮影によって脳動脈瘤の実形状を取得し、位相差 magnetic resonance imaging によって血液の流入・流出量を測定する。両者を用いて数値流体計算を行い、計算結果から脳動脈瘤壁における時間平均 wall shear stress (WSS) および WSS の時間的方向変化を表す無次元パラメータの oscillatory shear index (OSI) を算出する。

$$WSS = \frac{1}{T} \int_0^T |\vec{\tau}_w| dt$$

$$OSI = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\left| \int_0^T \vec{\tau}_w dt \right|}{\int_0^T |\vec{\tau}_w| dt} \right]$$

ここで、 $\vec{\tau}$ はある時間の WSS ベクトル [Pa]、 T は拍動周期 [s] である。

WSS の値は、未破裂脳動脈瘤が将来、破裂に至るリスクと負の相関を、OSI は正の相関を示す血行力学的パラメータであることが報告されている。一方で、脳動脈瘤の形態学的特徴を表すパラメータの一つである size ratio は脳動脈瘤破裂と正の相関を示す (Xiang, et al: Hemodynamic-morphologic discriminants for intracranial aneurysm rupture, Stroke (2011), pp.144-152.)。

我々は、対象とした全 19 例の脳動脈瘤において OSI 分布を可視化し、OSI 高値を呈する

瘤内血行動態の不均一な点の個数が、size ratio と正の相関を示すことを見出した。図は、脳動脈瘤壁において OSI が 0.016 以上の高値を呈する点のカウント数 と size ratio との関係を表す。Spearman rank correlation において、両者には有意な正の相関関係があった（相関係数 0.716 ($p < 0.001$)). ここで OSI の閾値として用いた 0.016 は、未破裂脳動脈瘤における OSI の平均値として先に報告されているものである。

以上より、ある形態学的特徴を有する脳動脈瘤においては、血流の時間的方向変化の大きい、不安定な瘤内血流動態が生じており、このことが将来の破裂に関与している可能性が示唆された。

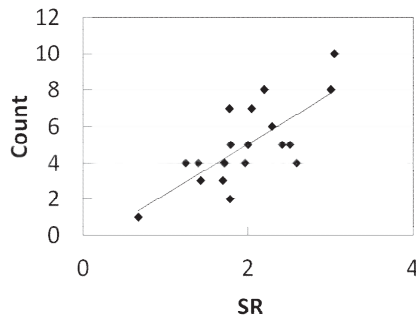


図 : Size ratio (SR) と oscillatory shear index 高値を呈する点の個数 (Count) との関係

3. 研究目標の達成状況

データベース構築に用いる標準的方法を確立した。また、いまだ少数例の検討であるにもかかわらず、脳動脈瘤の形状・血行動態との関連について新たな知見を得た。これは、臨床現場から得られる実際の医学データを工学的手法で解析する本研究の方法論の有用性を示すものと考えられる。

4. まとめと今後の課題

次年度は、データベースへの登録症例数として 200~300 例を予測している。相当数の症例数が蓄積した段階で、個人情報完全に削除したうえで、データベースを国内・国外の研究者へと公開する。本研究の最終目的は、脳動脈瘤患者の診療に役立つような医学的知見の発見であり、データベース構築はその方法論にすぎない。データベースへの症例登録を進めると同時に、新たな医学的知見が得られるよう、さらなる解析を行っていく必要がある。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1]S. Sugiyama, T. Tominaga: Oscillation of Wall Shear Stress in Growing Intracranial Aneurysms: A Case Study, *ASME 2011 Summer Bioengineering Conference*, Farmington, Pennsylvania, USA, (2011).

*[2]S. Sugiyama, T. Nakayama, M. Ohta and T. Tominaga: Local Blood Flow Instability and Oscillatory Shear in Intracranial Aneurysms, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.92-93.

[3]杉山慎一郎, 清水宏明, 富永悌二: 脳動脈瘤-親血管サイズ比と血行動態との関係, 日本脳神経外科学会第 70 回学術総会, 横浜, (2011).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11042 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

ナノ粒子分散系 ER 流体の開発と流動特性評価
Development and Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions

田中 克史*†, 比良 臣伸*, 福井 隆一*, 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粒子(ナノ粒子)を用いた分散系ER流体を開発し、流体の微細構造及び微細間隙における流動特性の評価を行うとともに、流体の安定性の評価を行うことを目的とする。

2. 研究成果の内容

粒径300 nm程度の二酸化チタンナノ粒子を用いて分散系を調製した。分散媒は、シリコンオイル、炭化水素オイル、化学変成したシリコンオイル等を用いて比較検討した。粒子体積分率は8.8 vol%とした。調製したER流体について、流動特性の評価を行い、流体の微細構造の評価を合わせて行った。具体的には、調製したER流体の無電場における流動特性、電場応答性、及び、時間安定性を評価した。流動特性の評価は、電場印加が可能な平行平板型回転粘度計を用い、平板の間隙 h は、50 μm とした。

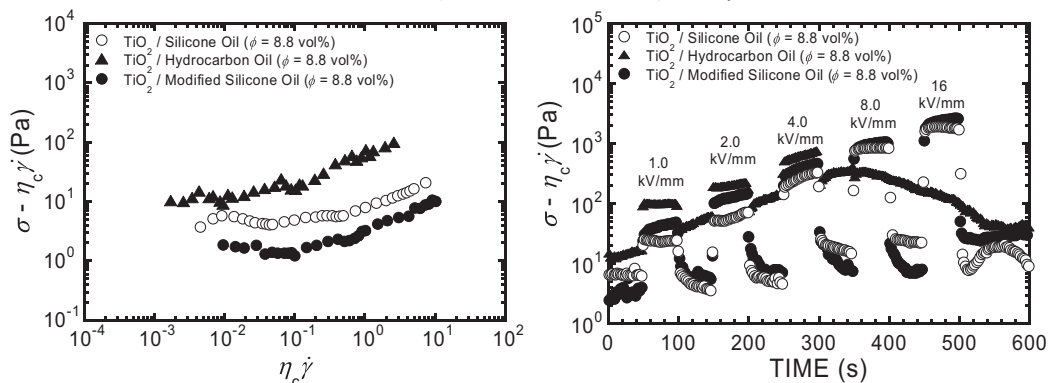


図1：異なる分散媒を用いて調製した試料の無電場における流動特性(左)、
及び電場応答特性(右)。粒子体積分率 $\phi = 8.8 \text{ vol}\%$ 。

図1(左)に、無電場におけるせん断応力($\sigma - \eta_c \dot{\gamma}$)を、分散媒粘度とせん断速度の積($\eta_c \dot{\gamma}$)に対して示す。(○)はシリコンオイル系試料、(▲)は炭化水素オイル系試料、(●)は変性シリコンオ

イル系試料の結果である。炭化水素オイル系試料における低せん断速度側の結果に注目すると、応力値 10 Pa 程度の平坦部が見られる。この値は、シリコンオイル系試料における平坦部の応力値より高い。一方、変性シリコンオイル系試料は、シリコンオイル系試料における平坦部の応力値より低い値を示した。また、炭化水素オイル系試料では、シリコンオイル系試料に比べて、大きなサイズの 2 次粒子によって形成された微細構造が観察された。一方、変性シリコンオイル系試料では、シリコンオイル系試料の 2 次粒子のサイズに比べて、小さな 2 次粒子による微細構造が観察された。このような微細構造が、無電場での応力値と密接に関係していると考えられる。図 1 (右) に、これらの試料における電場応答の測定結果を示す。炭化水素オイル系試料は、低電場側における電場応答では比較的大きな応力値が得られたが、電場除去後の応力値の回復には長時間を要した。一方、変性シリコンオイル系試料では、シリコンオイル系試料に比べて、特に、低電場強度において高い応力値、及び、良好な可逆性を示す結果が得られた。

3. 研究目標の達成状況

分散安定性、無電場におけるせん断応力、ER 特性において比較的良好な ER 流体が得られた。

4. まとめと今後の課題

分散剤を用いずに調製した変性シリコンオイル系試料において、分散安定性、無電場におけるせん断応力、ER 特性において比較的良好な結果が得られた。本研究においては、粒子体積分率は 8.8 vol%として調製したが、さらに高充填率化した試料の調製も可能であると期待され、検討が望まれる。

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)

- [1] K. Tanaka, T. Hira, R. Fukui, N. Nakagawa, R. Akiyama, M. Nakano, K. Yoshida and T. Tsujita: Development and Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Colloid Polym. Sci.*, **289**, (2011), pp.855-862.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] K. Tanaka, T. Hira, R. Fukui, H. Kobayashi, R. Akiyama, M. Nakano, and S. Enami, Development and Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proc. of the 11th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.124-125.
- *[3] K. Tanaka, R. Akiyama, and M. Nakano, Electro-Rheological Effect of Nano-Suspensions based on Titanium Dioxide Nano-Particles, *Proc. of the 8th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2011), pp.212-213.
- [4] 比良臣伸, 福井隆一, 中川のぞみ, 田中克史, 秋山隆一, 中野政身, 吉田圭佑, 辻田哲平, ナノ粒子分散系 ER 流体の流動及び微細構造の評価 - 粒子体積分率の効果, 日本レオロジー学会第 38 年会講演予稿集, (2011), pp.77-78.
- [5] 榎並 祥太, 中野 政身, 吉田 圭佑, 戸塚 厚, 田中 克史, 可視化情報 (可視化情報学会全国講演会 (富山 2011) 講演論文集), Vol.31, Suppl. No.2, (2011), pp.79-80.
- [6] 比良臣伸, 福井隆一, 田中克史, 小林治樹, 秋山隆一, 中野政身, 吉田圭佑, 辻田哲平, ナノ粒子分散系 ER 流体の流動及び微細構造の評価, 第 59 回レオロジー討論会要旨集, (2011), pp.126-127.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11043 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Fundamentals |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Numerical and Experimental Research on Active Control of the Hole-Tone Feedback Problem

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

*Graduate School of Engineering, Yamagata University,

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

With the fundamental hole-tone problem as reference, the purpose is to investigate how the sound generation is influenced by (i) a cavity (expansion chamber) enclosing the jet, (ii) a tailpipe, and (iii) a combination of (i) and (ii).

2. Details of program implement

A mathematical/numerical model for analysis of flow-sound interaction in a simple silencer model has been developed. A sketch of the basic configuration is given in Fig. 1(a). The unstable shear layer is modeled via a discrete vortex approach, based on axisymmetric vortex rings, as depicted in Fig 1(b). The aeroacoustic model is based on the Powell-Howe theory of vortex sound. The boundary integrals, which represent the scattering by the cavity and tailpipe inner surfaces, are discretized via the boundary element method.

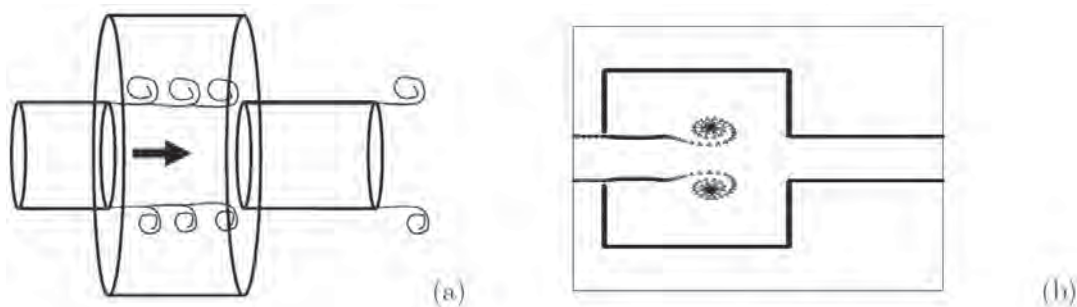


Figure 1 : (a) The silencer model with a closed cavity and a tailpipe. The arrow indicates the direction of the flow. (b) Illustration of the discrete vortex model, showing a 'slice' of the startup vortex.

The simulations in the examples to follow have been carried out with a closed cavity of length (gap length) d_0 (i.e., equal to the nozzle diameter) and diameter $4d_0$. The fundamental (hole-tone) frequency is $f_0 = 158$ Hz.

Figure 2 shows sound pressure spectra at a position $(r, z) = (10d_0, 10d_0)$, measured from the end pipe exit, for the case with end-pipe length $31d_0$. This gives resonance frequencies of $f_n = 110n$ Hz, where n is the mode number. Mode number $n = 1$ corresponds to a half wave, while $n = 2$ corresponds to a full wave. Part (a) is for the case without acoustic feedback from the end-pipe, while part (b) is with acoustic

feedback. Resonant end-pipe oscillations are recognized in the spectra. These are too weak to alter the fundamental (hole-tone) frequency; yet the acoustic particle velocity field they generate has a clear influence on the power spectrum (Fig. 2 (b)).

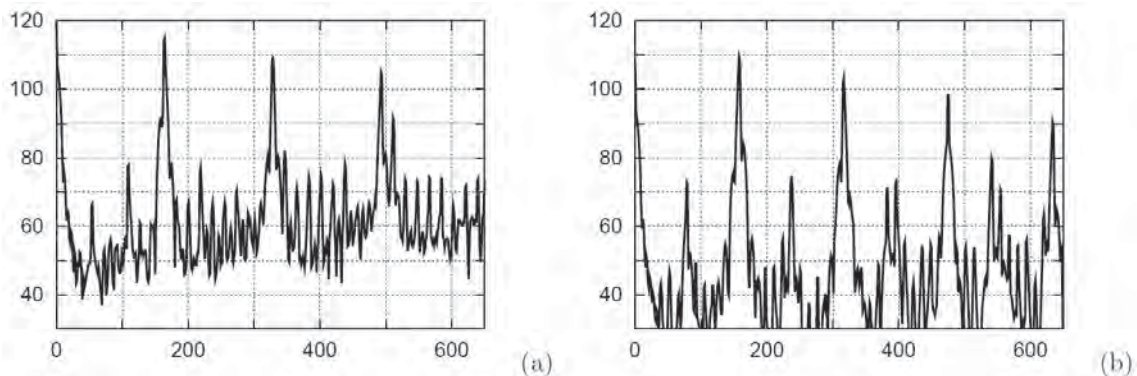


Figure 2 : Sound pressure spectrum at a position $(r, z) = (10d_0, 10d_0)$. (a) Without acoustic velocity feedback from the end-pipe. (b) With acoustic velocity feedback.

3. Achievements

We have developed a computationally efficient method for the time-domain analysis of flow-sound interaction in axisymmetric geometries. Scattering from the solid surfaces is accounted for via the boundary element method (BEM). Time-domain BEM is known to suffer often from poor stability properties. Numerical stability has been a real challenge in the present project too; but we have succeeded in developing a stable methodology. Another challenge (related to the BEM) has been the evaluation of singular boundary integrals. We have succeeded in deriving compact (approximate) analytical results which retain the most important retarded time properties of the original equations.

4. Summaries and future plans

A journal paper summing up the results is being written up at present. In the next step we wish to follow the original plan to extend the model to a full three-dimensional one that can account for non-axisymmetric flows and sound fields. A previously developed three-dimensional hole-tone feedback model will serve as basis.

5. Research results

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - [1] M. A. Langthjem & M. Nakano: Self-sustained flow oscillations and sound generation in a simple silencer model, *Proceedings of the Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2011), pp.232-233.
 - *[2] M. A. Langthjem & M. Nakano: Numerical and experimental research on active control of the hole-tone feedback problem, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.150-151.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11044 |
| 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 | 2011.4～2012.3 |

生体軟組織内の石灰化検出に関する研究
Research on Detection Method of Calcification in Soft Tissue

劉 磊*, 小笠原 正文*†, 船本 健一**††, 小澤 桂**, 太田 信**, 早瀬 敏幸**

*GEヘルスケア・ジャパン株式会社, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

乳がんによる死亡率は約 20%であることが知られており, 世界的な医療問題として認識されている。欧米諸国では女性の約 10%が一生に乳がんを罹患する可能性があり, 日本においてもその罹患率は 4%弱である。

乳がんの初期形態として乳房組織の微細石灰化がある。平均粒径が数百マイクロメートルの微細石灰化の早期発見は早い段階からの治療を可能とする。

従来の研究において, 生体軟組織内の微細石灰化が超音波計測に対して特異的に反応する **Twinkling sign** 現象が報告されている。この現象は乳がんの早期診断に有用であると示唆されているが, そのメカニズムが十分に解明されていない。本研究では乳房内微細石灰化検出を研究対象とし, **Twinkling sign** のメカニズムを解明し, 同現象を応用した微細石灰化検出手法を開発する。研究の遂行には実験的手法を主として取り組み, 生体模擬ファントムを用いた *in vitro* 実験を行う。また実験と並行して乳房を模擬した粘弾性体の超音波波動伝搬数値シミュレーションも計画している。

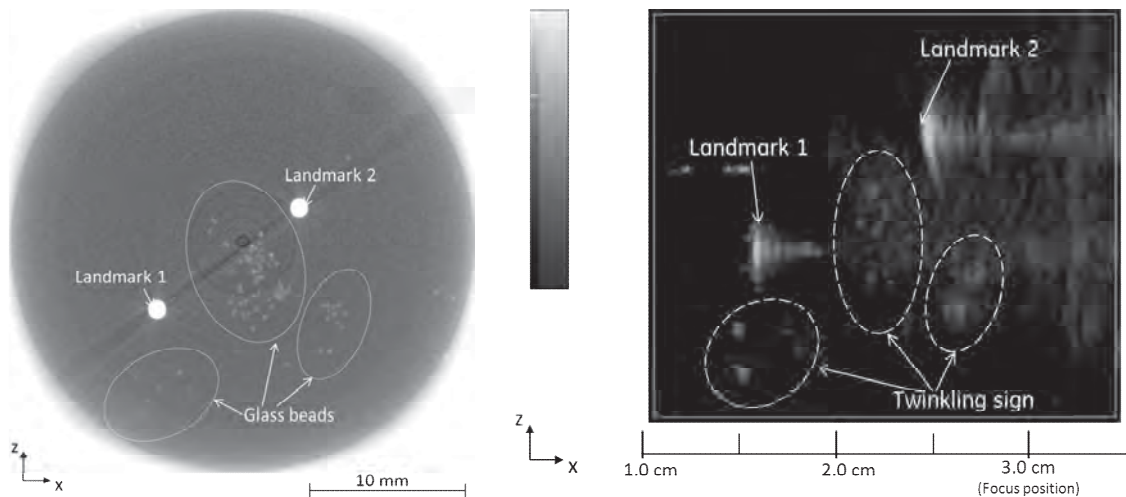
2. 研究成果の内容

流体科学研究所においては 2011 年 4 月～2012 年 3 月の間に GE 研究担当者が計 5 回訪問し, 共同研究集会および共同実験を行った。2011 年度は申請書の計画通り, 生体を模擬したファントムの制作およびファントムを用いた *in vitro* 実験を中心に遂行した。Poly (vinyl alcohol) hydro (PVA-H) ゲルにガラス微粒子 (平均粒径 200 μm) を混入した生体模擬ファントムを制作し, ファントムに対する X 線 CT 撮像実験と超音波照射実験を遂行した (図 1)。これら実験ではファントム内のガラスビーズの位置を確認し, 超音波照射時の **Twinkling sign** がガラスビーズ起因であることを確認した (図 1)。

また, 超音波照射有/無それぞれの条件下でレーザーシートと高速度カメラを用いたガラスビーズの挙動観察実験も遂行した。本実験ではガラスビーズから発生したレーザー散乱光を高速度カメラで記録し, その時間的変動を解析した。実験結果は超音波照射時および照射停止時のガラスビーズ散乱光に有意差を示し, 超音波照射音圧によるガラス微粒子の振動を示唆した。

本年度での主な研究成果としては, **Twinkling sign** の発生と超音波音圧照射によるガラス微粒子振動の因果関係を提示したことである。

研究計画で予定していた数値モデルによる超音波波動伝搬シミュレーション研究に関しては, 熊本大学等の研究グループと共同でオリジナル Finite Difference Time Domain method (FDTD) 計算コードおよび市販解析アプリケーションを用いた予備調査を行った。



(a) PVA-H 生体模擬ファントム X線 CT イメージ (b) PVA-H 生体模擬ファントム 超音波照射実験結果
 図 1. PVA-H 生体模擬ファントム実験結果

3. 研究目標の達成状況

本研究は年度計画に記載された研究内容を計画通り遂行した。

研究結果の一部は ICFD2011 (研究成果[1]) および日本超音波医学会第 84 回学術集会 (研究成果[2]) にて発表された。また、2012 年 5 月に開催される日本超音波医学会第 85 回学術集会に奨励賞演題として応募し、一次選考である書類選考を通過し、口頭発表による二次選考を控えているところである。

4. まとめと今後の課題

本研究は乳がんの早期発見のための検査法開発を目的とし、2010-2011 年度にわたり基礎的研究を遂行してきた。今後は引き続き基礎的研究を中心に遂行し、Twinkling sign 発生時の超音波照射音圧による微細石灰化の振動特性を解明する。研究手法は引き続き実験的手法と数値シミュレーションを用いたアプローチを用いて行う。研究成果に基づく送信受信アルゴリズムを臨床検査用超音波画像診断装置へ導入することを目指す予定である。

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] L. Liu, K. Ozawa, K. Funamoto, M. Ohta, T. Hayase and M. Ogasawara: Detection of Microcalcification in Soft Tissue Employing B-Flow "Twinkling" Sign, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 94-95.

[2] 劉 磊, 小澤 桂, 船本 健一, 太田 信, 早瀬 敏幸, 小笠原 正文: "Twinkling Sign" を応用した軟組織内微細石灰化検出に関する基礎的研究 Fundamental Study of Microcalcification Detection in Soft Tissue Based on "Twinkling Sign", 日本超音波医学会 第84回学術集会、Supplement (2011), S324.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11045 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Nano/micro technology |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Non-Destructive Detection of Cracks using Electromagnetic Phenomena

Jinhao Qiu*†, Toshiyuki Takagi**††
Tetsuya Uchimoto**, Jun Cheng*

*College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In the recent years, aeronautical and other applications of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) are on the increase. CFRP is a very strong and light laminated composite material which is very effective in weight saving in aeronautical components. This project aims to develop effective strategies for nondestructive evaluation of CFRP structures by using eddy currents.

2. Details of program implement

Chinese project member Jun Cheng visited Institute of Fluid Science during the period July 10-20, 2011. He prepared a piece of CFRP specimen and carried out some experimental investigations with the help of the staff members of Professor Takagi's lab. During the visit Chinese member and Professor Takagi discussed about the achievements already made and future plans. Project member attended the 11th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration and presented the research results.

3. Achievements

The electrical properties of CFRP were investigated. CFRP naturally shows very low and strongly anisotropic conductivity. The conductivity of each ply depends on the type, the volume fraction, and the orientation of the fibers in the lamina.

A piece of impact-damaged CFRP plate was prepared for detection. The fibre volume fraction in the plate was measured to be about 49.5%. The fibre orientation can be detected by revolving eddy current probes. Fig. 1(a) shows signal amplitude as a function of the angular position of the probe. From the figure we found that the plate was made from layers of CFRP prepregs with $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]$ sequence.

We used several different types of eddy current probes to inspect the impact damage in the CFRP specimen. The eddy current image characterizes the shape of damaged zone, as shown in Fig. 1(b). The detection sensitivity of eddy current probes was compared by analyzing the testing signals.

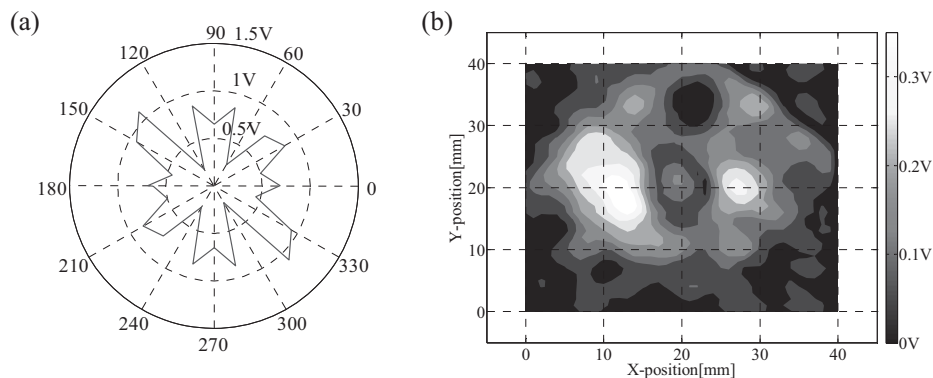


Fig.1 Results of the air-cored pancake coil probe: (a) fibre orientation detection, (b) eddy current image of an impact-damaged specimen

Additionally, we also conducted eddy current testing simulations for CFRP using an edge-element FEM software. The coil impedance variations due to the fibre orientation and cracks in CFRP plate with unidirectional ply are computed. Fig. 2 shows the calculated eddy currents in CFRP plies with fibre orientations.

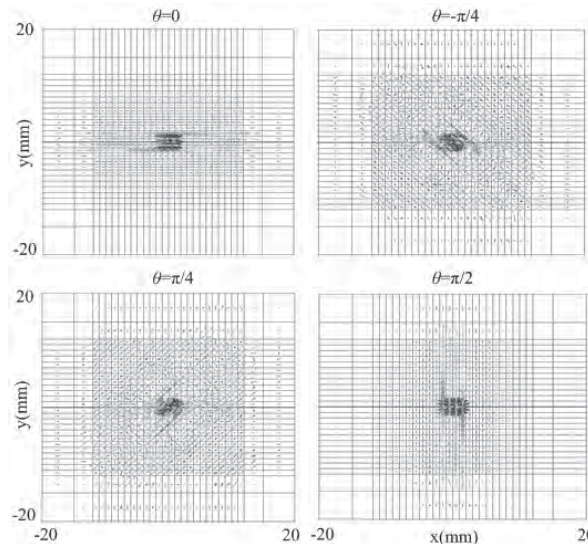


Fig.2 Eddy currents path in the CFRP plies with different fibre orientations

4. Summaries and future plans

We set up an experiment system for CFRP inspection. The electrical properties of CFRP were studied and crack detection signals were obtained. We are aiming to analyze the damage modes in the CFRP composites qualitatively and quantitatively, but the multilayer structure and high electrical anisotropy of CFRP make eddy current evaluation very difficult. The next step is to perform enhanced study of ECT technique for CFRP components by signal processing and probe optimization. The rapid FEM computation code will also be developed.

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] Jun Cheng, Jinhao Qiu, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Ning Hu: Numerical Evaluation of Carbon-fibre Reinforced Polymer by Finite Element Method, *Proceedings of The 15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Naples, Italy, (2011), pp.307-309.

*[2] Jun Cheng, Jinhao Qiu, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Fuqiang Wu, Ning Hu: Detection Accuracy Analysis of Several Eddy Current Probes on the Impact Damage of Carbon-Fibre Plastic Composite, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.166-167.

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

| | |
|------|-------------------|
| 課題番号 | J11046 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011. 4 ~ 2012. 3 |

摩擦試験機スライダの接触アライメント機構の研究
Study of Contact Alignment for the Slider Specimen of Tribometer

伊藤 耕祐*†, 三木 寛之**††
 後藤 実***, 竹野 貴法****

*日本大学工学部, **東北大学流体科学研究所
 宇部工業高等専門学校, *東北大学国際高等教育機構
 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

ボールオンプレート型摩擦・摩耗試験機による摩擦試験では、摩擦試験後の各種分析・解析は接触アライメントの再現しやすさからプレート側を中心に行われており、特に外力の大きな機械的性質の測定などにおいてその傾向は顕著である。しかし、接触状態はプレート側とスライダ側双方の機械的性質および物性に大きく依存するため、トライボロジー現象の正確な理解のためには双方の諸特性変化を明らかにすることが必要である。摩擦試験後のスライダ表面における諸特性の変化を明らかにするためには、摩擦試験後の解析作業時に摩擦時の接触アライメントを再現する機構が必要となる。そこで、接触面と平行な基準面をもつスライダ側試料保持機構と、摩擦試験時の接触アライメント変化を抑制する補助機構を新たに開発し、東北大学流体科学研究所所有の摩擦・摩耗試験機を使用してその効果を明らかにする。

2. 研究成果の内容

Ecole Centrale de Lyon の技術提供により流体科学研究所内に設置された往復動式ピンオンプレート型摩擦・摩耗試験機の動作機構を考慮し、試料凹凸や傾斜による摩擦試験中の接触面の上下動に伴うスライダ側接触点の移動や、それに伴う垂直荷重変動を最小にする機構を検討した。実際の摩擦試験中は3方向の力およびモーメントを受けるため、垂直荷重方向には十分なしなやかさを有する反面、それ以外の方向には十分な剛性を有する構造でなければならない

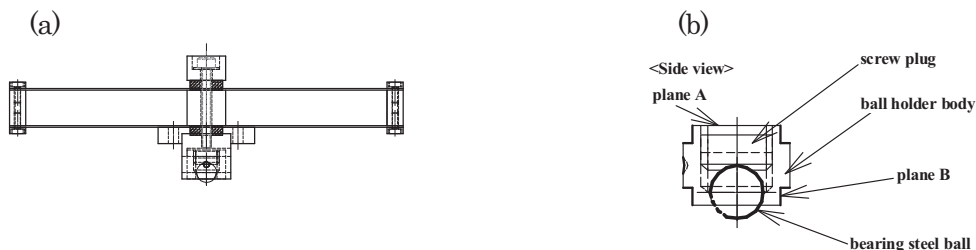


図1：二重平行二枚バネ機構による補助機構(a)とスライダ側試料保持機構(b)

検討の結果、構造的な剛性の異方性をもつ二重平行二枚バネ機構による接触アライメント変化を抑制する補助機構と、スライダとして用いるベアリング用軸受鋼球の接触部に対す

る基準面を与えるスライダ側試料保持機構を設計し、それぞれプロトタイプを作成と動作確認を行った(図1参照)。その結果、摩擦試験後のスライダ側摩擦面は光学顕微鏡観察の範囲で基準面とほぼ平行であり、スライダ側摩擦面の解析に十分な性能を持つことが確認された。

3. 研究目標の達成状況

平成23年度における本研究課題の成果により、知的流動評価研究分野に設置されている摩擦・摩耗試験機を用いた薄膜材料のトライボロジー特性評価の精度を飛躍的に向上させることが可能になり、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資する知見を得た。また、本研究を ELYT Lab. の枠組みにおける流動ダイナミクス国際融合ジョイントラボラトリー (FLOWJOY) 研究プロジェクトと連携して実施したことで、高精度計測技術の開発を中心とした国内外の研究機関との連携を強めることができた。

4. まとめと今後の課題

基準面を備えたスライダ側試料保持機構および摩擦試験時の接触アライメント安定化機構の両方についての機構検討を実施し、その基本設計およびプロトタイプによる動作確認を終了した。次年度は、前年度の研究成果を反映したアライメント機構を作成して流体研所有の往復動式摩擦・摩耗試験機 (Ecole Centrale de Lyon の技術提供) に実装し、金属含有 DLC (高木研究室開発) に安定した動的導電性と低摩擦摺動をもたらすトライボフィルム形成条件並びにその諸物性を明らかにする。

5. 研究成果 (*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, Julien Fontaine, Sandrine Bec, Kosuke Ito, Takanori Takeno, Maxime Ruet, Hiroyuki Miki, Michel Belin, Thierry Le Mogne: The role of tribofilm growth on the frictional behavior of copper-diamond-like carbon nanocomposite coating, *Proceedings of 38th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon France, (2011), SESSION XXVIII : MECHANICAL PROPERTIES - T3(USB)*.

[2] Minoru GOTO, Natacha RUTY, Vincent DE CHILLAZ, Julien FONTAINE, Takanori TAKENO, Hiroyuki MIKI, Michel BELIN: Silver-diamond-like carbon nanocomposite coatings: tribological behavior and electrical capabilities, *Proc. ITC Hiroshima 2011, Hiroshima (2011), E1-01 (USB)*.

*[3] Minoru Goto, Kosuke Ito, Hiroyuki Miki, Takanori Takeno: Study of Contact Alignment for The Slider Specimen of Tribometer, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2011), pp. 126-127*.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11047 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Nano/micro technology |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Tribological Behavior and Electrical Contact Resistance of Metal-Containing DLC Coating for Electrically Conductive Tribo-Elements

Julien Fontaine*†, Toshiyuki Takagi**††
 Hiroyuki Miki**, Takanori Takeno***,
 Koshi Adachi****, Sandrine Bec*,
 Michel Belin*, Thierry Le Mogne*

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

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***International Advanced Research and Education Organization, Tohoku University

****Faculty of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Electrically conductive hard carbon films, Me-DLCs, will be indispensable smart materials for innovative mechanical elements thanks to their mechanical and electrical properties, which can be controlled by the type and quantity of additional elements. In this study, innovative Me-DLC films having good electrical conductivity, exhibiting low friction and wear characteristics, and high durability under extreme environment – such as that for space applications – will be developed and characterized.

2. Details of program implement

Me-DLC nanocomposite coatings are deposited at Tohoku University by a hybrid process, combining RF-PECVD for the DLC matrix and magnetron sputtering for the metal inclusions. Several metals are considered in this joint project: tungsten, copper, iridium, platinum, silver... Tribological behavior of these coatings is characterized at Ecole Centrale de Lyon with ambient air and ultra-high vacuum ($<10^{-6}$ Pa) pin-on-flat reciprocating tribometers. The rubbed surfaces are further investigated by means of surface analysis (XPS or AES) and of nanoindentation.

For example, the deposition of Cu-DLC coating has been performed with a power of 50 W on sputtering target, and a flow rate of 0.7 sccm for C_2H_2 precursor gas. This Cu-DLC coating was then studied with above-mentioned tribometers, with reciprocating motion of 3 mm at a sliding speed of 2 mm/s, during 2000 cycles. For ambient air experiments, 52100 bearing steel balls (diameter: 6 mm) were used under normal load of 0.5 N and 10 N. The theoretical maximum contact pressure is then respectively about 0.5 GPa and 1.4 GPa. For ultra-high vacuum experiments, hemispherical 52100 bearing steel pins were used under a load of 3 N, with radii of 8 and 1.5 mm, in order to achieve similar contact pressures of respectively 0.5 and 1.4 GPa. (Fig. 1)

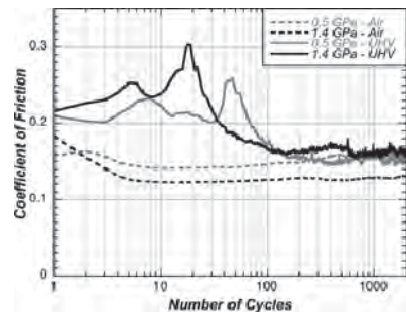


Fig.1 : Evolutions of coefficient of friction for optimized Cu-DLC coating sliding under different contact pressures and different environments.

3. Achievements

Among the metal studied in this joint project, Cu-DLC coatings are today the most well known. Although they don't exhibit much lower friction coefficients compared to pure DLC, they seem to be relatively insensitive to contact pressure and environment, two drawbacks of pure DLC coatings for tribological applications.

4. Summaries and future plans

The friction appears to be controlled by metal-rich tribofilm grown on the steel counterface, thanks to a selective transfer process. The flowing abilities of these tribofilms are thus critical, and are now at the focus of our joint project. The nature of the metal and its mechanical behavior could then allow to control the tribological behavior of Me-DLC coatings.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] Takeshi Ohno, Takenori Takeno, Hiroyuki MIKI, Toshiyuki Takagi: Microstructural design for fabrication of strain sensor utilizing tungsten-doped amorphous carbon coatings, *Diamond & Related Materials*, 20 (2011), pp. 651–654.

[2] Toshiyuki Takagi, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Yun Luo: Metal-containing DLC: toward a smart coating on smart materials, *Materials Science Forum*, 706-709 (2012), pp. 2014-2019.

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

[3] T. Takeno, J. Fontaine, M. Goto, K. Ito, H. Miki, K. Adachi, M. Belin, T. Takagi (INVITED): Design and Deposition of Amorphous Carbon Nanocomposite Coatings for Tribological Application, *International Conference on Metallurgical Coatings & Thin Films 38th ICMCTF*, San Diego, USA (2011. 5.2), p. 5.113.

[4] Toshiyuki Takagi, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Yun Luo (INVITED): Metal-containing DLC: toward a smart coating on smart materials, *International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS Processing, Fabrication, Properties, Applications*, Quebec, CANADA (2011.8.1-5).

[5] Minoru Goto, Julien Fontaine, Sandrine Bec, Kosuke Ito, Takanori Takeno, Maxime Ruet, Hiroyuki Miki, Michel Belin, T. Le Mogne: The role of tribofilm growth on the frictional behavior of copper-diamond-like carbon nanocomposite coating, *38th LEEDS-LYON SYMPOSIUM ON TRIBOLOGY*, Lyon, FRANCE (2011.9.6-9) 118.

[6] Takanori Takeno, Takeshi Ohno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi: Evaluation of metal-containing diamond-like carbon coatings as a vibrating sensor, *15th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Napoli, ITALY (2011.9.7-9).

[7] Minoru Goto, Natacha Ruty, Vincent de Chillaz, Julien Fontaine, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Michel Belin: Silver-Diamond-Like Carbon Nanocomposite Coatings: Tribological Behavior and Electrical Capabilities, *International Tribology Conference Hiroshima 2011*, (2011.10.30-11.3).

*[8] Julien Fontaine, Michel Belin, Sandrine Bec, Thierry Le Mogne, Toshiyuki Takagi, Takanori Takeno, Koshi Adachi, Hiroyuki Miki: Tribological Behavior and Electrical Contact Resistance of Metal-containing DLC Coating for Electrically-Conductive Tribo-elements, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 128-129.

[9] Minoru Goto, Julien Fontaine, Sandrine Bec, Michel Belin, Thierry Le Mogne, Kosuke Ito, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki: Tribological Properties of Me-DLC Containing Ag and Cu, *8th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2011.11.11), pp. 644-645.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11048 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Fundamentals |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

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

Vladimir Khovaylo*†, Hiroyuki Miki**††, Toshiyuki Takagi**,
Ekaterina Avilova*, Makoto Ohtsuka***, Vasilii Buchelnikov****

*National University of Science and Technology "MISiS"

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

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

****Faculty of Physics, Chelyabinsk State University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

Critical analysis available in the literature experimental results on magnetocaloric effect in ferromagnetic shape memory alloys Ni–Mn–X (X = Ga, In, Sn, Sb) was performed. Based on a model developed by Pecharsky et al. [Phys. Rev. B 64 (2001) 144406], it was shown that the isothermal magnetic field-induced entropy change in the Ni–Mn–X alloys should not greatly exceed 30 J/kg K (Fig. 1). This implies that Maxwell relation frequently used for the estimation of magnetocaloric effect is not sufficient to

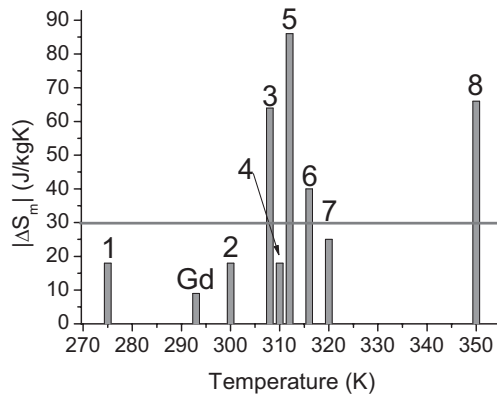


Fig. 1. Reported values of isothermal magnetic entropy change ΔS_m (for a magnetic field change $\mu_0(\Delta H) = 5$ T) in materials undergoing first order magnetic phase transitions: 1 – Gd₅(Si₂Ge₂), 2 – Gd, 3 – Ni₅₀Mn₃₇Sn₁₃ (at.%), 4 – Ni₂Mn_{0.75}Cu_{0.25}Ga, 5 – MnFeP_{0.45}As_{0.55}, 6 – Ni_{55.4}Mn₂₀Ga_{24.6} (at.%), 7 – MnAs, 8 – La(Fe_{0.88}Si_{0.12})₁₃H_{1.5}, 9 – Ni_{2.19}Mn_{0.18}Ga. Horizontal line marks maximal value of the total entropy change at first order magnetic phase transitions in ferromagnetic shape memory alloys Ni–Mn–X (X = Ga, In, Sn, Sb).

evaluate magnetocaloric properties of Ni–Mn–X and that the main tool for studying magnetocaloric effect should be a method based on the direct measurement of adiabatic temperature change.

Considering thermodynamics of temperature- and magnetic field-induced martensitic transformations, it was demonstrated that a contribution of the structural subsystem to the magnetocaloric effect in the Ni–Mn–X alloys studied so far is irreversible in magnetic fields below 5 T. In order to make the magnetocaloric effect reversible, alloys having sharp martensitic transformation with a narrow temperature hysteresis.

Performed direct measurements of magnetocaloric effect in magnetic field up to 1.85 T in a series of $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ Heusler alloys undergoing first-order magnetostructural phase transition and the estimation of magnetic exchange interactions in low-temperature martensitic and high-temperature austenitic phase of these alloys allowed us to obtain a solid experimental evidence that the adiabatic temperature change is generally smaller than expected because magnetic field has a weak influence on the magnetic order parameter in the vicinity of the magnetostructural transition temperature. Manuscript devoted to this study is under preparation.

3. Achievements

The main achievements are as follow

- Critical analysis of the available experimental results on isothermal magnetic entropy change in ferromagnetic shape memory alloys Ni-Mn-X (X = Ga, In, Sn, Sb) is given.
- Based on available in literature experimental data on total entropy change at martensitic transformation it is shown that the isothermal magnetic entropy change in Ni-Mn-X (X = Ga, In, Sn, Sb) should not greatly exceed 30 J/kgK.
- Considering thermodynamics of temperature- and magnetic field-induced martensitic transformations it is demonstrated that a contribution of the structural subsystem to the magnetic field-induced total entropy change in Ni-Mn-X (X = Ga, In, Sn, Sb) is irreversible in magnetic fields below 5 T.

4. Summaries and future plans

In summary, it was shown that there is a fundamental limit for magnetic field induced entropy change in magnetically ordered Heusler alloys NiMnX (X = Ga, In, Sn). It is determined by the total entropy change at the phase transition. Solid experimental evidence that temperature of the magnetostructural transition, T_{MS} , is located (considering Ni-Mn-Ga alloys as an example) in such a way that $T_{\text{C}}^{\text{A}} < T_{\text{MS}} < T_{\text{C}}^{\text{M}}$, where T_{C}^{A} and T_{C}^{M} are Curie temperature of austenitic and martensitic phase respectively. Future plan is to study entropy change under adiabatic conditions in novel ferromagnetic shape memory alloys Ni-Mn(Cu)-Ga and Ni(Co)-Mn-Al and the development of a model that allows one to predict reversible and irreversible features of the adiabatic temperature change in a variety of materials undergoing first-order magnetostructural phase transitions

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
*[1] V. V. Khovaylo “Inconvenient magnetocaloric effect in ferromagnetic shape memory alloys” *J. Alloys Comp.* (2012) doi: 10.1016/j.jallcom.2012.03.035.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
[2] V.V. Khovaylo, K.P. Skokov, Yu.S. Koshkid'ko, V.D. Buchelnikov, K.I. Kostromitin, V.V. Sokolovskiy, M.A. Zagrebina, I. Dubenko, H. Miki: Adiabatic temperature change in ferromagnetic shape memory alloys, *Book of Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2011)*, (2011.8.21-25), Moscow, p. 293. (invited talk)
*[3] V.V. Khovaylo, E. Avilova, H. Miki, T. Takagi, M. Ohtsuka, V.D. Buchelnikov, K. P. Skokov, O. Gutfleisch: Entropy Flow in Magnetically Ordered Heusler Alloys under Influence of Temperature or Magnetic Field, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 152-153.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

| | |
|------|----------------|
| 課題番号 | J11049 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | 基盤研究分野 |
| 研究期間 | 2011.4 ~2012.3 |

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

石原 卓*†, 服部裕司**††

*名古屋大学工学研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

2.1 流動する媒質の物性の変動を考慮したCG画像の変動の定式化

本年度は、流動する媒質の物性（密度や温度のゆらぎ）や媒質中の微粒子や分子による散乱・反射等の効果を考慮するにあたり、特に、乱流によって引き起こされる屈折率の変動に注目し、その影響の定式化を行った。

一般に、大気の屈折率は温度と圧力に依存する。屈折率の空間的な変動が光線の曲率を決定するため、光線のトレースには幾何光学の方法を用いる。 \vec{v} を光線の主法線方向の単位ベクトル、 n を空間位置と時間の両方に依存する空気の屈折率とすると、光線の曲率は、 $\kappa = (1/n)\vec{v} \cdot \nabla n$ によって与えられ、多くの場合、 $n-1$ はゼロに近い。したがって、光線が近似的に x 軸と平行な場合、光線の方程式は近似的に

$$\frac{d^2 y}{ds^2} = \frac{\partial n}{\partial y}, \quad \frac{d^2 z}{ds^2} = \frac{\partial n}{\partial z}$$

で与えられ、実際の物体の位置(Y, Z)とその像の位置(Y', Z')の関係は

$$Y = \int_0^L \left[\int_0^x \frac{\partial n}{\partial y}(x', y(x'), z(x'), t) dx' + \frac{Y'}{L} \right] dx, \quad Z = \int_0^L \left[\int_0^x \frac{\partial n}{\partial z}(x', y(x'), z(x'), t) dx' + \frac{Z'}{L} \right] dx$$

で与えられる（図1参照）。流動する媒質を通して見た像の空間的変形はこの式により評価することができる。屈折率 n は温度と圧力に依存するが、温度が一定の場合、 n は主に圧力に比例する。そのため、圧力の横微分の光線の方向に沿った空間積分の評価が鍵となる。本研究では、今後、まずは、非圧縮ナビエーストークス方程式の直接数値計算によって得られた乱流の圧力データを用いて、像の変動を評価するとともに、その統計的性質を明らかにする予定である。

2.2 高レイノルズ数乱流直接数値計算データの整備

陽炎等、我々が日常目にする像は、非常に高レイノルズ数の流れ場（乱流）を通してみていることが多い。したがって、様々なシーンでよりリアルなCG画像を得るためには、特に、流れに

よって影響を受ける像の変動のレイノルズ数依存性についての知識が不可欠であると考えられる。そこで本研究では、今年度、一様等方性乱流の大規模直接数値計算（最大格子点数 4096 の 3 乗、テラー長に基づくレイノルズ数 1131）のデータの整備を行い、様々なレイノルズ数の乱流における圧力変動（図 2 参照）等の解析を実施できる体制を整えた。

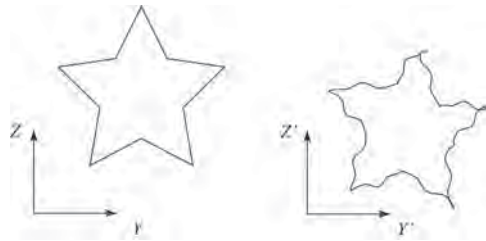


図 1：実際の図形（左）と乱流を通して
みた像（右）

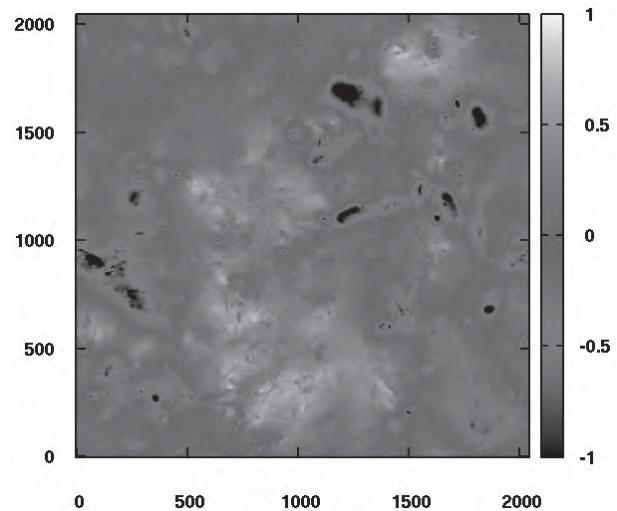


図 2：格子点数 2048 の 3 乗の DNS によって得られた乱流場 ($Re=429$) のある断面における圧力分布
における圧力の変動

3. 研究目標の達成状況

CG 動画像のリアリティを格段に向上させるといった、本研究の最終目標にむけ、本年度は、問題の具体的な定式化と解析のためのデータの整備、及び予備的数値計算が実施できた。研究の方向性も定まり、準備段階としての達成度は 80% である。

4. まとめと今後の課題

流動する媒質の物性の変動を考慮した CG 画像の変動の定式化と解析に用いるデータの整備が実施できた。具体的かつ詳細なデータ解析を実施し、乱流による画像の変動の統計的性質、およびそのレイノルズ依存性について明らかにすることが今後の仮題である。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Takashi Ishihara, Yuji Hattori: Improvement of Reality of CG Motion Pictures by Hydrodynamic Effects, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 48-49.

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 | J11050 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | エネルギー分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

反応性非平衡プラズマジェットの実時間数値解析
Real-Time Numerical Simulation of Reactive Non-Equilibrium Plasma Jet

高奈 秀匡*†, 田中 康規**††
 西山 秀哉*

*東北大学流体科学研究所, **金沢大学 理工研究域電子情報学系
 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

今日の自動車産業においては、内燃機関の環境負荷低減が求められており、そのためには、希薄燃焼による燃料消費率の向上が不可欠である。しかしながら、既存技術による希薄燃焼は、ほぼ限界に達しており、技術革新が求められている。このような背景のもとで、非平衡プラズマによる燃焼促進が希薄燃焼限界にブレークスルーをもたらす新技術として期待されており、現在、国際的にその基礎研究が精力的に行われている。これまでの研究の多くは、大気圧・室温での実験が多く、実際の応用で想定される高温・高圧下でのラジカルの生成過程やストリーマの進展過程などの基礎現象は明らかになっていない。

そこで本研究では、数値計算により、高温・高圧下における空気・メタン混合気中における非平衡プラズマおよびラジカル種の生成過程を明らかにし、非平衡プラズマ燃焼促進による内燃機関の高性能化のための基礎資料を提供することを目的とする。

2. 研究成果の内容

図1に3気圧、300 Kにおいて - 18 kV の直流電圧を印加した際の正ストリーマの進展および高活性化学種の生成過程を示す。電圧印加により、陰極近傍に存在する電子は、電離を伴って陽極へと移動する。電子数密度が 10^{13} cm^{-3} 程度となる 5.4 ns 後には、陽極から陰極へ向かう正ストリーマが生じる。ストリーマ先端部における高い電界強度によって加速された高エネルギー電子の衝突により、酸素分子やメタンが解離するため、ストリーマ先端部において酸素ラジカルおよび CH_3 ラジカルが急速に生成される。さらに酸素ラジカルおよび CH_3 ラジカルはストリーマチャンネル内に入射する電子の衝突解離により徐々に増加する。一方、オゾンは、酸素ラジカルと酸素との三体衝突反応より生成されるため、ストリーマ先端の背後において主に生成されることが明らかとなった。

図2に初期の換算電界強度に対する体積平均された酸素ラジカルのモル分率を示す。図より、初期換算電界強度が一定の条件の下では、全粒子数密度が高い高圧かつ低温条件下において、より高濃度の高活性化学種が生成されることが分かる。これは、全粒子数密度が高いほど電子衝突による電離周波数が高くなり、ストリーマヘッドにおいて高い換算電界強度が得られるためである。

3. 研究目標の達成状況

高温・高圧下におけるストリーマ放電の進展過程、ならびに高活性化学種の生成過程を数値計算により解明することに成功し、本研究目的はおおむね達成されたと考えられる。

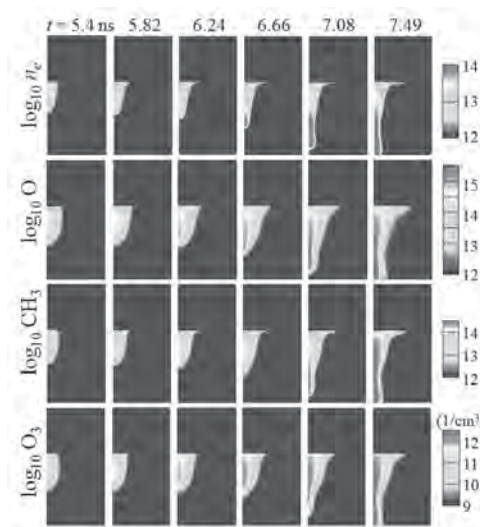


図 1: 3 気圧, 300 K におけるストリーマの進展とラジカル生成過程 (−18 kV)

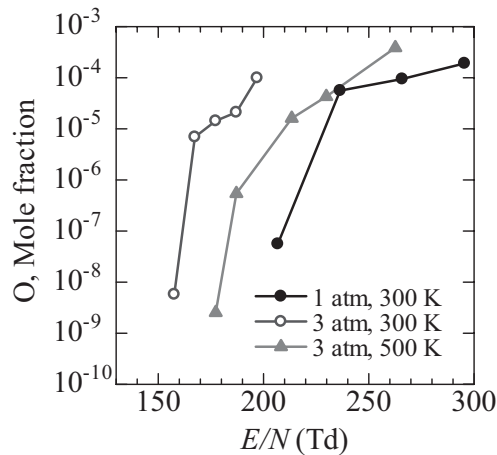


図 2: 換算電界強度に対する酸素ラジカルの生成特性

4. まとめと今後の課題

空気・メタン混合気を作動気体とした誘電体バリア放電中でのストリーマシミュレーションにより、ストリーマ進展に伴う高活性化学種の生成過程を解明し、様々な圧力および温度における高活性化学種の生成特性を明らかにした。今後は、ストリーマ放電による気体加熱効果や流動による高活性化学種の輸送過程を明らかにす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)

*[1] T. Takana, Y. Tanaka and H. Nishiyama: Computational simulation of reactive species production by methane-air DBD at high pressure and high temperature, *Europhysics Letters*, Vol. 97, (2012), 25001 (4 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] T. Takana, Y. Tanaka and H. Nishiyama: Physicochemical Characteristics of Methane-Air Dielectric Barrier Discharge at High Pressure, *Proceedings of the 20th Int. Symp. on Plasma Chemistry, Philadelphia, USA*, (2011), (4 pages).

*[3] T. Takana, Y. Tanaka and H. Nishiyama: Radical Generation During Streamer Propagation in Methane/Air DBD Under High Pressure and High Temperature Conditions, *Proceedings of the Eleventh Int. Symp. on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.74-75.

[4] 高奈秀匡, 田中康規, 西山秀哉: 高温・高圧下における空気・メタン混合気中のストリーマ進展過程, 日本混相流学会年会講演会 2011, (2011), pp.328-329.

[5] 高奈秀匡: 高温・高圧下における空気・メタン混合気中のストリーマ進展過程とラジカル生成特性, 第 10 回応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会新領域研究会, (2011), pp.8-11.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11051 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Nano/micro technology |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Numerical Studies of the Reacting Rarefied Flows in Tubes

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

*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 present project is to study numerically the shock, detonation and deflagration waves in narrow tubes and channels mainly for low Reynolds number when kinetic description of the flow is required. The simulations are performed mainly by the Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method, which can be considered as the method of the numerical solution of kinetic Boltzmann equation. This problem requires the further development and numerical implementation of collision models and algorithms for the description of the non-equilibrium chemical reactions in the DSMC method. Additionally the conventional CFD methods based on the solution of Navier-Stokes and Euler equations are used.

2. Details of program implement

The study of the shock wave entry into a microchannel was continued. The viscous and rarefaction effects were investigated by comparing the results obtained at different Knudsen numbers. It was demonstrated that increasing the Knudsen number leads to vanishing of the amplification stage. At high Knudsen numbers the shock starts to attenuate just after entry in the microchannel due to the losses on the side walls.

Propagation of a detonation wave over an H₂/O₂ mixture in a 1-mm channel was simulated in a two-dimensional formulation by the DSMC method. Conditions of specular reflection were imposed on the both closed ends of the channel (left and right boundaries of the computational domain). The detonation wave was initiated by the breakdown of a diaphragm (discontinuity decay) at the point $X=0$ between the channels of high ($-0.001 \text{ m} < X < 0$) and low ($0 < X < 0.0225 \text{ m}$) pressure. At the initial time, both channels were filled with the H₂/O₂ = 2/1 mixture under the following conditions: $P=100 \text{ kPa}$ and $T=300 \text{ K}$ in the low-pressure channel; $P=3335 \text{ kPa}$ and $T=2000 \text{ K}$ in the high-pressure channel. Two types of boundary conditions for interaction of molecules with the channel side walls were used: *diffuse reflection* with full accommodation of translational, rotational, and vibrational energy (i.e., with allowance for viscous and heat losses on the walls) for the wall temperature $T_w=300 \text{ K}$ and *specular reflection* (without viscous and heat losses).

After the diaphragm breakdown, a shock wave starts propagating in the low-pressure channel; this shock wave compresses and ignites the gas. In about $1 \mu\text{s}$ after the breakdown, an unsupported detonation wave is formed. Propagation of the detonation wave along the 1-mm channel in the 2D case with diffuse boundary conditions is illustrated by the pressure flowfields at different time instants shown the left part of Fig. 1. The detonation wave becomes weaker during its propagation due to heat and viscous losses on the channel walls. It is also seen that the detonation-wave front becomes curved near the channel walls. Note that the computation predicts no unsteady structures behind the wave front.

The wave-front position as a function of time for the one-dimensional and two-dimensional cases with different boundary conditions is shown in the right part of Fig. 1. The detonation wave propagates exactly with the Chapman-Jouguet velocity (2841 m/s) both in the one-dimensional case and two-dimensional case with specular walls. For the two-dimensional case with diffuse boundary conditions, the wave propagation velocity is noticeably lower due to viscous and heat losses on the walls.

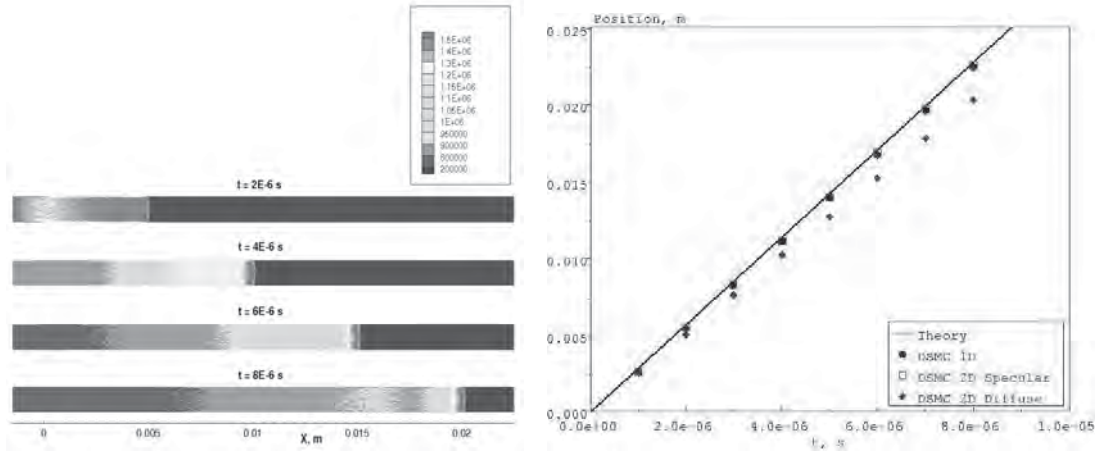


Figure 1. Pressure flowfields for different time instants (left). Time dependence of the detonation-wave-front position (right). *Theory* – wave with the CJ velocity (2841 m/s). *DSMC 1D* – 1D DSMC computations, *DSMC 2D Specular* – 2D DSMC computations with specular reflection conditions, *DSMC 2D Diffuse* – 2D DSMC computations with diffuse reflection conditions.

3. Achievements

The expected results were achieved completely.

4. Summaries and future plans

The propagation of the detonation wave in the narrow channel was simulated by the DSMC method and the effect of the viscous and heat losses on the walls was investigated. For the problem of the shock-wave entry into the microchannel it was demonstrated that the viscous and rarefaction effects lead to qualitative differences in the process of entry and propagation. At the next stage of the project numerical study of the shock wave amplification in a microchannel via entrance geometry variations is planned as well as comparison of computational results with the quasi-one-dimensional model of Salas.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - *[1] Ye.A. Bondar, K. Maruta and M.S. Ivanov: Numerical Study of Gas Detonation by Direct Simulation Monte Carlo Method, *Proceedings of 15th International Conference on Methods of Aerophysical Research*, Novosibirsk, Russia (2010), CD-ROM, Paper No. 161 (This paper was actually published in March 2012).
 - [2] G.V. Shoev, Ye.A. Bondar, D.V. Khotyanovsky, A.N. Kudryavtsev, K. Maruta, M.S. Ivanov: Numerical study of shock wave entry and propagation in a microchannel, *Teplofiz. Aeromekh.* 2012, Vol.19, No.1, pp.19-34 (In Russian).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - *[3] Ye. Bondar, G. Shoev, K. Maruta, and M. Ivanov: Numerical Studies of the Reacting Rarefied Flows in Tubes, *Proceedings of the Eleventh International Symposium of the Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 84-85.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11052 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

連続流方式インクジェットの液滴形成過程の最適化に関する研究
Optimization of Droplet Formation of Continuous Ink Jet

中野 政身*†, 中西 為雄**††, 角掛 裕樹**

*東北大学流体科学研究所, **山形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

連続流型インクジェットプリンタは主に工業生産物に文字や図柄等を印刷する目的で使用される。この方式では超音波振動を与えたノズルから加圧したインクを連続的に噴出させ、ジェットの流体力学的不安定性によって形成される液滴を印字に利用している。その際、印字に用いる主粒子間にサテライトと呼ばれる小径の粒子が発生する場合があります。印字乱れの原因となっている。本研究はノズル形状、インク初期平均流速、インク粘度が液滴生成距離、パターンに与える影響を実験及び数値解析により解明し、広範な環境条件下でサテライトの発生しないノズル形状の最適化を図る。

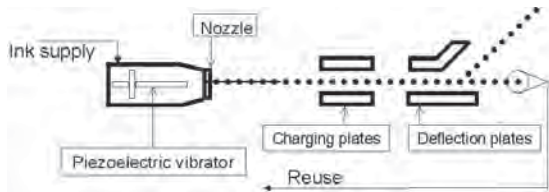


図1：連続型インクジェットプリンタ

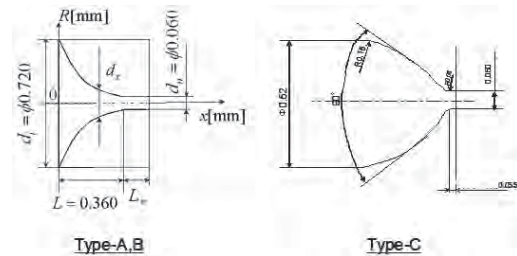


図2：ノズル形状

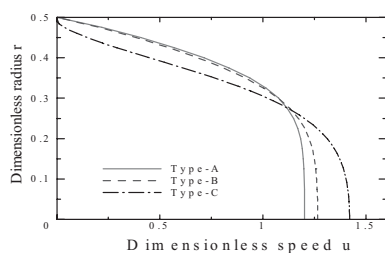


図3：異なるノズルの出口の速度分布

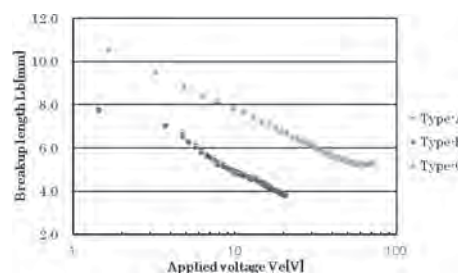


図4：ピエゾ素子印加電圧と切断距離との関係

2. 研究成果の内容

インクジェットに擾乱を与えるピエゾ素子への印加電圧、ノズル形状、粒子化定数、インク動粘度が切断距離と粒子化パターンに与える影響を実験と数値解析により調べ、パラメーターの最適化を行った。具体的に、直線部の長さが異なる Type A, B のノズル 2 通りと、形状が異なる Type-C のノズルを使用した。動粘度は4段階に変化させて実験した。数値解析では実験で調整できる最大動粘度の2倍の値までの解析を行った。その結果、以下のことを明らかにした。

①インク動粘度の減少に伴い、切断距離も減少するが、ある値を境目に再び上昇に転じる。実験機ではその値は概ね $2.5[\text{mm}^2/\text{s}] \sim 3.0[\text{mm}^2/\text{s}]$ の間にある。② ①の現象は Weber の理論では

説明できず、非線形性が関連する特有の現象であると考える。③数値解析では②の現象が確認された。④ノズル出口の流速分布の解析結果から、流れが発達しやすい形状であるほど切断距離が長くなることが確認できた。⑤動粘度よりもノズル形状が粒子化パターンに与える影響は大きい。⑥実験の最大動粘度の2倍での数値解析では、主粒子間にサテライトが2つ発生した。⑦粒子化定数、印加電圧が増加するとサテライトは発生しなくなる。

以上より、連続流型インクジェットの液滴生成過程を最適化する条件を特定することができた。インク動粘度は、 $2.5[\text{mm}^2/\text{s}] \sim 3.0[\text{mm}^2/\text{s}]$ の範囲で最適値を選定する。ノズル形状は流れの発達のし易さを考慮したうえで選択する。サテライト抑止のためには高粒子化定数及び高印加電圧を与えることが有効である。

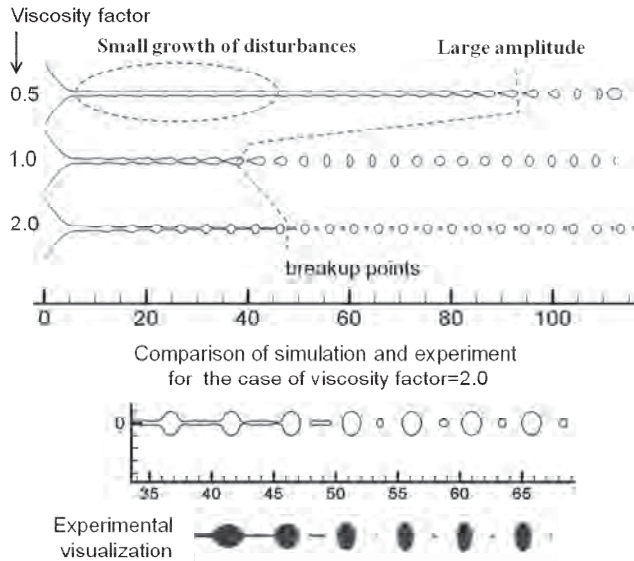


図5：インク粘度による液滴生成パターンの違い

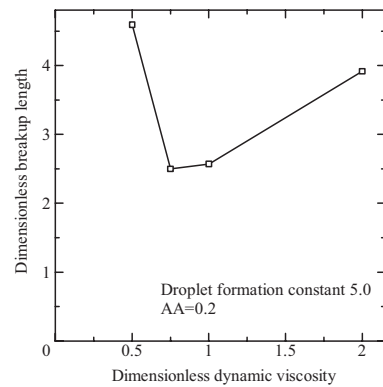


図6：インク粘度による切断距離の違い

3. 研究目標の達成状況

以上より、連続流型インクジェットの液滴生成過程を最適化する条件を特定することができた。研究目標をおおむね達成できたと考える。

4. まとめと今後の課題

数値解析は切断距離や粒子化パターンの変化の傾向を知るには有効であったが、計算格子の最適化や気液界面の計算法の改良等でさらに精度を高めていく必要がある。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] M.NAKANO, T.NAKANISHI and H.TUNOKAKE: Optimization of Ink Viscosity of a Continuous Inkjet by Experiment and Numerical Simulation, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.130-131.

[2] T.NAKANISHI, M.NAKANO and H.TUNOKAKE: Droplet Formation of a Continuous Inkjet with Different Viscosities: A Comparison of Experiment and Numerical Simulation, *Proceedings of the Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2011), pp.236-237.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11053 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Aerospace |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Experimental Analysis of Droplet Impact Process onto Rough Substrates with Solidification (Chemical Reaction)

D. Sivakumar*†, H. Takana**, H. Nishiyama**††

*Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Science,

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The project investigates the splats formed from the impact of molten tin drops on the stainless steel surfaces comprising micro grooves. The role of surface temperature on the splat solidification needs to be examined.

2. Details of program implement

The experimental setup was modified to examine the role of surface temperature on liquid drop impact process. In the start, the role of surface temperature of grooved surfaces on the impact dynamics of water drops was examined. A high-speed video imaging system was used to capture the dynamics of drop impact on three heated grooved surfaces (*GR1*, *GR2*, and *GR3*). The Weber number of impacting water drop was kept in the range of 6-10 and the target surface temperature was varied in the range 30-224 °C. Figure 3 shows high-speed image sequences of the impact of water drops on the smooth and grooved surfaces with surface temperature, $T_{sub} \approx 130$ °C. The parameter t is the time lapse from the start of impact process. Owing to higher T_{sub} , as seen in Fig. 1, the impacting liquid drop boils for all the impact cases. However, the surface topography of the grooved surfaces significantly influences the impact dynamics. On the grooved surface *GR1*, as seen in Fig. 1(b), the impacting drop liquid boils much earlier than that on the smooth surface.

Figure 2 shows the temporal variation of D_{\perp} (drop contact diameter in the direction perpendicular to the grooves) and D_{\parallel} (drop contact diameter in the direction parallel to the grooves) obtained for the impact of water drops on the grooved surface *GR3* with different T_{sub} . In the regime of kinematic drop spreading, *i.e.*, $\tau < 1$, the impacting drop on the grooved surface does not show any influence of T_{sub} as seen in Fig. 2. Nevertheless, as seen in Fig. 2(a), the substrate temperature

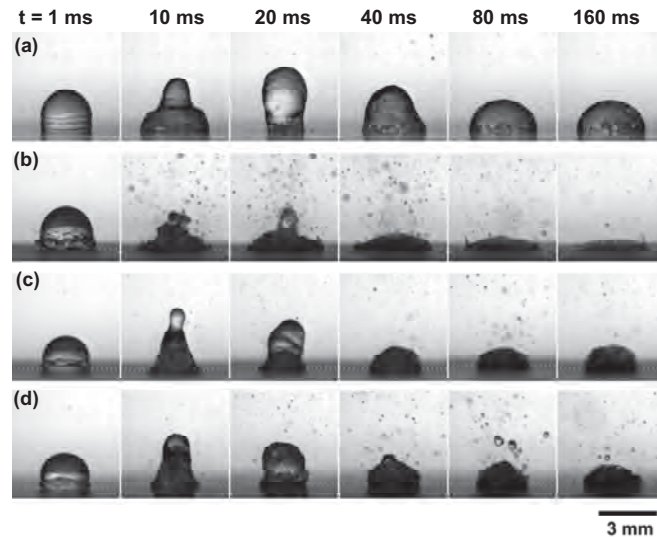


Figure 1 : Image sequences showing the impact of water drops on the grooved surfaces with $T_{sub} \approx 130$ °C, $D_o = 2.6$ mm, and $U_o = 0.47$ m/s. (a) Smooth surface, (b) *GR1*, (c) *GR2*, and (d) *GR3*.

influences the drop receding process in \perp . At lower T_{sub} , the drop liquid spreading in \perp reaches the maximum spreading diameter and pins with the posts of the grooved surface. The impacting drop on the grooved surface with $T_{sub} = 175$ °C does not exhibit any contact line pinning and freely recedes on the surface as seen in Fig. 2(a).

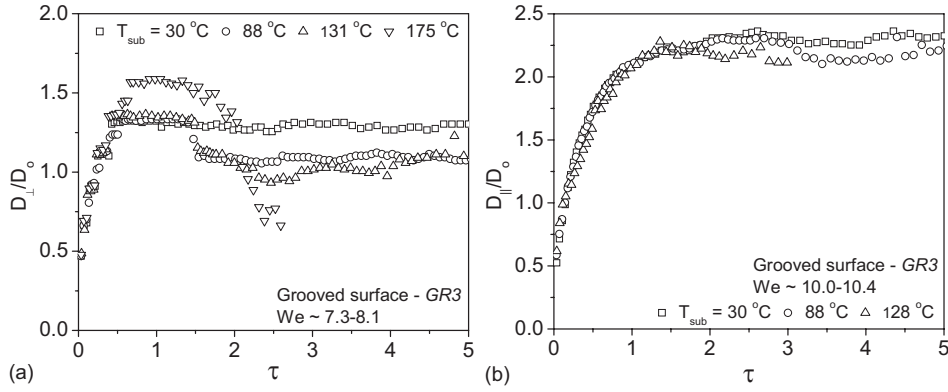


Figure 2 : Effect of T_{sub} on the temporal variation of D_{\perp} and D_{\parallel} for the impact of water drops on the grooved surface *GR3*.

An increase in T_{sub} may be relaxing the pinning of drop contact line at the pillar posts of the grooved surface, thereby allowing the impacting drop liquid to recede on the grooved surface. From the available measurements, it is observed from Fig. 2(b) that the variation of D_{\parallel} is not influenced by T_{sub} .

3. Achievements

Experimental data on drop impact dynamics were collected for impacting liquid (water) drops with varying speed on target surfaces (smooth and grooved surfaces) kept at surface temperature in the range 30-224 °C. The approach can be adopted to carry out the works on the impact of molten tin drop at varying surface temperatures.

4. Summaries and future plans

It is observed from the experimental data that the impacting drop on the grooved surface undergoes liquid boiling much earlier compared to that on a smooth surface. Data suggests that the dynamic Leidenfrost phenomenon observed at higher target surface temperature is also influenced by the groove texture. The impact of molten tin drops with varying T_{sub} will be carried out soon in the laboratory.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
 - 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] D. Sivakumar, K. Katagiri, T. Nakajima, H. Takana, and H. Nishiyama: Impact of liquid drops on heated grooved surfaces, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 132-133.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11054 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

力天秤の開発とその静粛性超音速航空機への適用
Development of a Force Balance and its Application to a Silent Supersonic Biplane Model in the Low Speed Wind Tunnel

川添 博光*†, 大林 茂**††
末村 紘志*, 竹本 和真*
山田 剛治*, 松野 隆*
*鳥取大学工学部, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

揚力 L と抗力 D の検出感度の調性が可能かつ天秤梁部の厚さを考慮した、測定精度の高精度化を目指した力天秤の開発法を研究した。基本的な方針は、天秤の梁形状を楕円形とし、測定される L と D の予測値に応じて、その長軸と短軸の位置とその長さ、および梁の厚みを変える構造である。有限要素法による天秤表面の歪み解析を行い、 L と D の検出において測定誤差の少ないひずみゲージ位置を決定する。円形（長軸/短軸 = 1）天秤における表面ひずみの分布を図 1 に示す。 F_x 方向に力を加えたときのひずみが小さい、すなわち F_x の干渉を受けない位置を θ_y 、逆に F_y の干渉を受けない位置を θ_x として歪みゲージ位置を決定する。

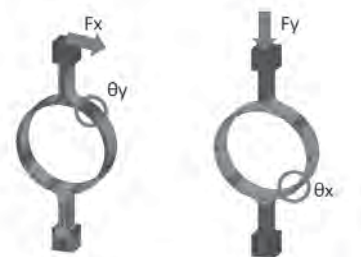


図 1 : リング天秤における表面ひずみ分布の構造解析例（抗力 F_x 、揚力 F_y ）

測定対象に応じ力の検出感度を変えることができる楕円天秤の長軸と短軸の比を変化させた場合の揚力と抗力の感度を解析した結果を図 2 に示す。検出感度が大きく変化している。図 2 の赤丸で示すような L/D 特性の横楕円、真円、縦楕円の天秤を製作し（図 3）、その特性を調べた結果を図 4 に示す。 F_y （揚力）感度は(b), (a), (c) の順に大きく、 F_x （抗力）の感度はその逆の順となり、楕円天秤の検出感度を可変にすることを実験的に確認した。

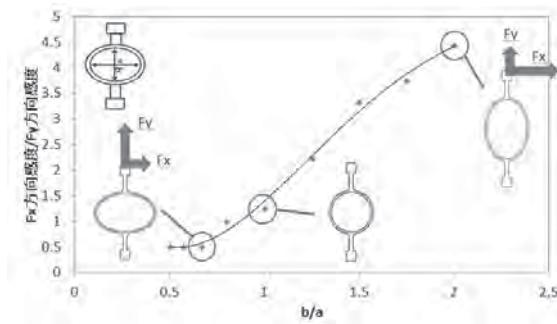


図2：楕円天秤の形状と検出感度の変化（数値解析）

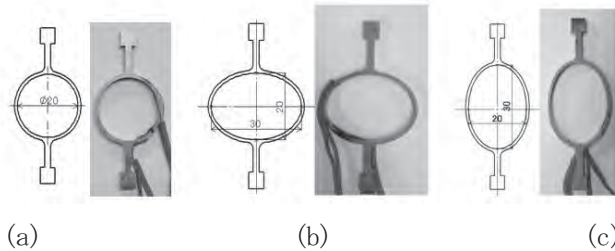


図3：試作した楕円天秤（図2中の○印天秤）

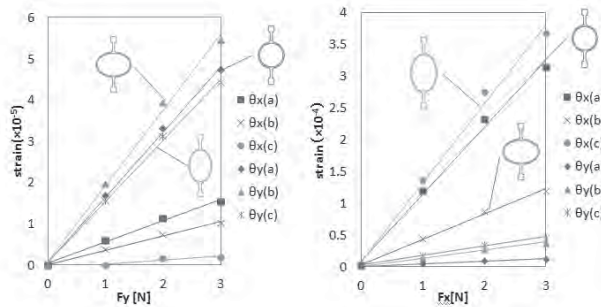


図4：揚力と抗力の感度変化（実験）

3. 研究目標の達成状況

研究初年度としての目標は十分に達成した。

4. まとめと今後の課題

測定対象に応じ揚力と抗力の検出感度を自由に変化できる楕円天秤の設計法を研究し、実験によりその効果を確認した。今後この天秤を風洞試験に活用し航空機の空力解析を行う。

5. 研究成果（*は別刷あり）

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

*[1] Hiromitsu Kawazoe, Hiroshi Suemura, Gouji Yamada, Takashi Matsuno, Sigeru Obayashi: Development of Force Balance for Its Application to a Silent Supersonic Biplane Model in the Low Speed Wind Tunnel, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 56-57.

[2] 末村紘志, 竹本和真, 山田剛治, 松野隆, 大林茂, 川添博光, 小型・軽量・安価な縦3分力天秤の開発, 日本機械学会中国四国支部第50期総会・講演会論文CD-ROM, (2012), No. 1118, pp. 1-2.

- 3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11055 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

衝撃波前方の電子が後方の熱化学過程に及ぼす影響

Effect of Electron Behavior front of Shock Wave on Thermal and Chemical Reaction Process after the Shock Wave

川添 博光^{*†}, 大林 茂^{**††}

山田 剛治^{*}, 吾郷祥太^{*}

^{*}鳥取大学, ^{**}東北大学流体科学研究所

[†]申請者, ^{††}所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本年度は再突入飛行環境を模擬する極超音速衝撃波管の開発と特性試験を実施した。図1に開発した極超音速衝撃波管の概要図を示す。本衝撃波管は自由ピストン駆動型の衝撃波管であり、高圧貯気槽、圧縮管、低圧管、真空タンクから構成されている。高圧貯気槽は高圧ポンプから供給される窒素が充填される。貯気槽内の急開弁が開くことにより、高圧窒素が圧縮管内に設置された自由ピストンの背面に作用する。高圧窒素により駆動された自由ピストンは圧縮管内を走行し、圧縮管内に充填されたヘリウムを圧縮する。圧縮管と高圧管は鉄鋼製の隔膜によって仕切られており、自由ピストンによる圧縮により破膜する。破膜の不規則性による気流再現性の低下を避けるために、隔膜片側表面には十字型の溝が設けられており、破膜の際は溝に沿って短時間に破膜する。試験部である低圧管には試験気体が充填され、隔膜の破膜により衝撃波が生成する。また低圧管は44×44mmの矩形断面であり、不純物からの発光を減らすためにアルミニウム合金製となっている。低圧管の下流側には石英窓が設置された観測部があり、隔膜から2300mm下流に設置されている。この位置は平面衝撃波の形成距離が管直径の40倍程度であることを考慮して決定している。隔膜の破膜圧力を計測するために圧縮管下流側には圧力変換器が取り付けられている。また観測部には二つのアバランシェフォトダイオードを設置して、衝撃波背後の発光を計測することにより衝撃波速度を取得する。

図2に様々な厚さの隔膜を用いて計測した衝撃波速度の計測値と実際の再突入飛行環境とを比較した結果を示す。これより開発した衝撃波管は軌道速度の再突入飛行環境に対応した衝撃層を十分に作り出せる性能を有していることが確認できる。

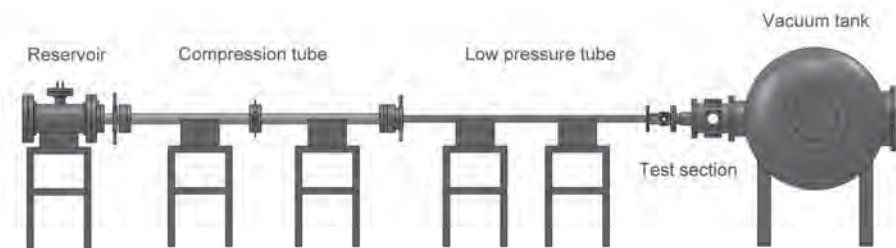


図 1 : 極超音速衝撃波管の概要図

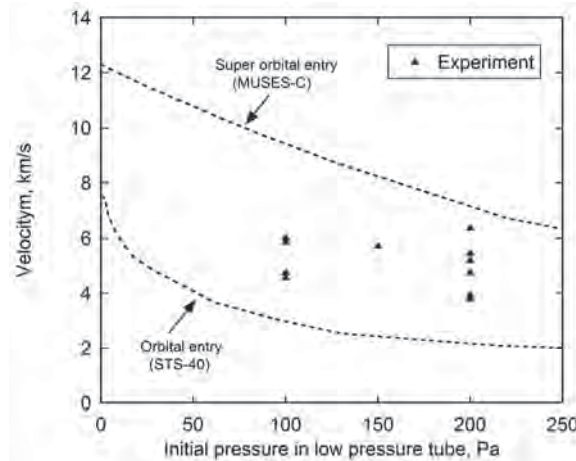


図 2 : 衝撃波管性能試験結果

3. 研究目標の達成状況

本年度は準備段階として再突入飛行環境を模擬するために極超音速衝撃波管の開発を実施した。そのため申請書に記載した二波長マッハツェンダー法を用いて衝撃波前後の電離状態の計測は来年度以降に実施する予定である。

4. まとめと今後の課題

本年度は再突入飛行環境を模擬するための極超音速衝撃波管を開発して性能試験を実施した。開発した衝撃波管は軌道速度からの再突入飛行として代表的なスペースシャトルの飛行環境を十分に再現できる性能を有していることが確認できた。今後開発した衝撃波管を用いて衝撃波前後領域における電離状態の計測を実施する。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

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

*[1] Gouji Yamada, Shota Ago, Singo Otsuta, Takashi Matsuno, Hiromitsu Kawazoe, Sigeru Obayashi: Effect of Electron Behavior in front of Shock Wave on Thermo-Chemical Process Behind the Shock Wave, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 54-55.

[2] 吾郷祥太, 山田剛治, 川添博光, 松野隆: 惑星大気突入飛行技術向上を目的とした極超音速衝撃波管の開発, 第 42 回学生員卒業研究発表講演会, (2012), S1308-pp.1-2.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11056 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

次世代低騒音ロータ設計のための高信頼性数値解析コードの開発
Development of High Reliability Numerical Simulation Code for Next Generation Low Noise Rotor Design

鄭 信圭*†, 李 菅中**††, 蔡 相賢**
*東北大学流体科学研究所, **釜山大学工学部
†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

優れた低騒音特性を持つヘリコプタロータの設計には様々な革新的形状を評価するため重合格子法の適用が必修である. 本研究の目的は様々な形状の回転ロータの性能を効率よく評価するために新たな格子移動アルゴリズムを開発することである.

2. 研究成果の内容

本研究で開発したアルゴリズムは以下ようになる.

- (1) Generation of X-ray (Fig. 1(a))
- (2) Search of pierce points
- (3) Generation of virtual surface (Fig. 1(b))
- (4) Search of virtual pierce points (Fig. 1(c))
- (5) Search of hole points (Fig. 1(d))

この手法は virtual surface と virtual pierce point に関連した部分以外は既存の object X-rays 手法と同じである. Virtual surface は X-rays に交差する pierce point を利用して生成する. 物体形状をなるべく少ない X-rays の数で表現するため早い hole searching が可能である. また, 相対運動の場合は既に生成された virtual surface だけを移動させて hole searching を行うため (4) と (5) 操作だけ繰り返すことで計算時間が短縮される. 本研究では, 論理的に hole point を判別することで hole searching 速度を向上した.

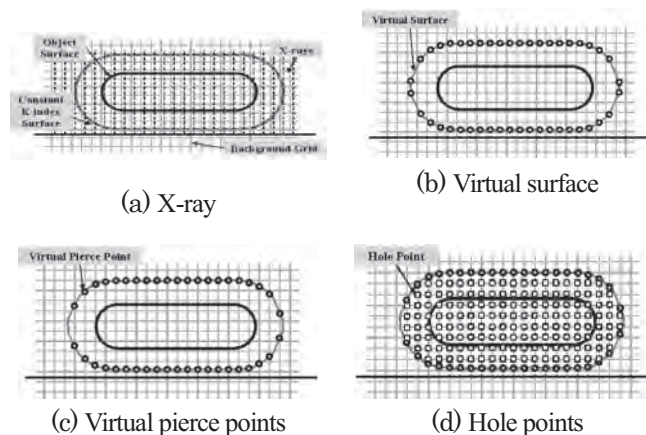


Fig. 1 Procedure of novel hole searching algorithm.

3. 研究目標の達成状況

2次元翼型格子の場合，本アルゴリズムは既存の object X-rays 手法より 36.8%改善された探索性能を得ることができた(Fig. 2). また，ヘリコプタロータ形状に適用した結果，Fig. 3 のようにロータ格子内部の hole points 多くの反復を繰り返しても維持できるのが確認できる．これによって hole searching アルゴリズムの探索精度が確認できた．

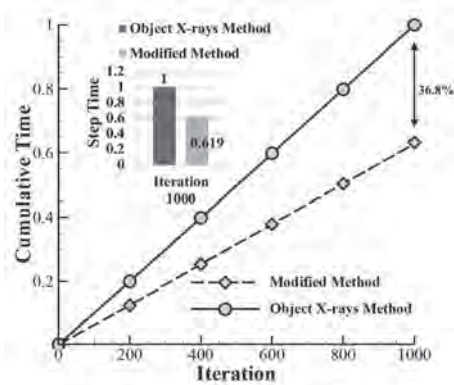
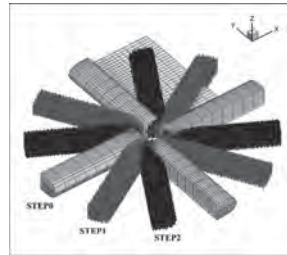
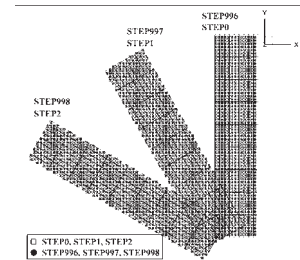


Fig. 2 Hole searching time comparison between the present algorithm and object X-ray method.



(a) Results of hole search



(b) Hole points comparison between initial steps and last steps

Fig. 3 Hole searching on the 4 bladed rotor system.

4. まとめと今後の課題

様々な革新的ロータ形状を効率よく扱うことができる重合格子手法の開発を行った．今後は，開発したアルゴリズムを用いてヘリコプタの前進およびハーバリング飛行の解析を行う予定である．

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] S. Lee, S. Chae, S. Jeong, K. Yee: Development of Efficient Hole Searching Algorithm of Overset Grid System for Helicopter Rotor Analysis and Design Framework, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 46-47.

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 | J11057 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

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

佐藤 岳彦*†, 金澤 誠司**††
藤田 英理***

*東北大学流体科学研究所, **大分大学工学部

***東北大学大学院工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

水中プラズマ流における放電現象は、相変化や熱流動場、電場、化学反応場を含む現象が重畳する複雑流動場を形成している。特に、放電形態の一つであるストリーマが、水中をどのように進展するかについては十分に解明されていない。水中プラズマ流の産業分野への応用において、化学種生成の鍵を握るストリーマの進展機構を明らかにすることは大変重要な課題である。そこで、本研究ではストリーマの進展機構について明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果の内容

ストリーマ放電は極短時間現象なため、観察のために特殊な実験系を組んだ。共同研究者(金澤)が開発したナノパルス放電装置を利用し、超高速カメラ(200 Mfps)、長ワーキングディスタンス顕微鏡レンズ(500x)、遅延信号発生器、位相シフト型マハツェンダー干渉計を利用して実験系の組み上げを行った。その結果、視野角 2 mm 以下で、撮影時間 700 ns と微小空間かつ極短時間の現象を捕らえることに成功した。図 1 にコマ間 100 ns で (a)プライマリーストリーマが進展する様子ならびに (b)プライマリーストリーマから 2 次ストリーマが進展する様子を示す。これより、プライマリーストリーマの外側に 2 次ストリーマが進展する場合としない場合があることが明らかになった。一般に報告されていた現象は、

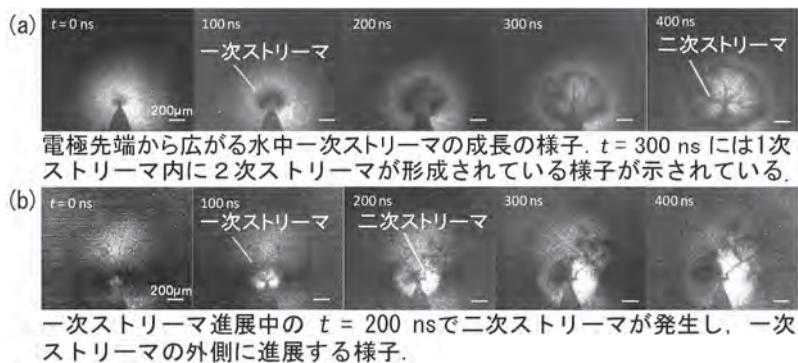


図1 一次ストリーマと二次ストリーマの進展の様子

2次ストリーマが発生する場合であり、プライマリーストリーマのみのプラズマの生成が可能であることが示された。

3. 研究目標の達成状況

本研究の目標は、(1) 水中におけるストリーマ進展過程の観察が可能になる、(2) ストリーマ進展において、気泡生成後にストリーマが進展するのか、ストリーマ進展後に気泡が生成されるのかを明らかにする、(3) 上記成果は、世界でもまだ結論が出ていない現象であり、明らかにすることができれば、世界的にも大きなインパクトを与えることができる、であるが、(1) については、水中ストリーマの観察に成功しているため目標は達成している。(2)(3) については、観察結果を解析中であり、より詳細な実験をする必要がある状況である。

4. まとめと今後の課題

本研究では、微小空間かつ極短時間で発生する水中ストリーマの進展の様子を連続写真で可視化することに成功した。1つのストリーマを時系列で可視化したのは世界でも初めてであり、本共同研究の大きな成果である。今後は、ストリーマ生成が気泡発生後に進展するのか、気泡発生の前に進展するのかについて、より詳細な実験を通して解明していく予定である。

なお、本研究の遂行において、流体科学研究所小宮敦樹准教授に位相シフトマッハツェンダー干渉計による観察を、大谷清伸助教に超高速カメラ(IMACON200)による撮影の支援を得た。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

該当なし。

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] H. Fujita, S. Kanazawa and T. Sato: Streamer Propagation Mechanism in Water, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.60-61.

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 | J11058 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

ナノ構造化界面における輸送現象
Transport Phenomena at Nano-Structured Interfaces

小原 拓*†, 芝原 正彦**††, 菊川 豪太*

*東北大学流体科学研究所, **大阪大学大学院工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

固液界面における輸送現象, とりわけ, 熱エネルギーが界面を通過する特性は, MEMS/ NEMS, 微粒子が懸濁された液体, 生体内の構造など, ナノスケールの液体-固体系が示す特性を理解し設計するための重要な問題である. 従来のマクロな熱流体力学においては, 界面における熱輸送特性を理解するための概念として, 界面における温度ジャンプと熱流束との比として与えられる熱抵抗が広く用いられてきた. 固体-固体界面においては表面粗さを主な支配因子として熱抵抗がよく観察され, また, 近年では固体-液体界面においても熱抵抗が様々な検討の対象となり, その重要性が広く認識されつつある. この場合は, 固体-固体界面とは異なり, 固体-液体間で何らかの熱輸送メカニズムにミスマッチを生じることが因子となると考えられているが, その分子動力学レベルのメカニズムは未だ詳細な検討が行われていない. 本研究においては, ナノスケールの構造をもつ固体壁表面-液体間の熱エネルギー輸送を解析するため, (1)ナノメートルスケールの構造をもつ界面, (2)分子スケール=結晶格子スケールの構造をもつ界面, の両面からこの問題にアプローチを試みた. (1)では, ナノ加工による溝構造とその間隔が界面近傍のエネルギー輸送機構に及ぼす影響を調べるために, 非平衡分子動力学シミュレーション (NEMD) を用いて, 界面近傍のエネルギー伝播割合を調べた. また, ナノ加工面に表面処理を行った場合を想定して, 固体原子と液体分子間の相互作用強さが変化した場合の影響についても調べた. (2)では, 面心立方格子の固体結晶における各表面が様々な鎖長をもつアルカンに接して摺動する系について熱・運動量輸送を再現する NEMD を実施し, 固液界面におけるスリップや界面熱抵抗の値を計測すると共に, アルカン鎖長や固体表面の違いが熱抵抗に及ぼす影響を解析した.

2. 研究成果の内容

(1)ナノ構造化界面 液体分子, 壁面および構造物の構成原子には, それぞれ水分子, 鉄原子の質量を有する 12-6 Lennard-Jones 粒子を仮定し, 平行に配置された固体層で液体領域を挟んだ計算モデルを用いた. 表面ナノ構造間隔 L と界面近傍におけるエネルギー伝播割合の関係の一例を図 1 に示す. この図より, 表面ナノ構造間隔 L によって, 界面近傍のエネルギー輸送機構が変化する場合があります, その輸送機構の変化は表面ナノ構造の原子間エネルギー輸送量の変化に主に起因していると考えられることが分かる.

(2)結晶格子界面 FCC(111)面 (Wall A), (100)面 (Wall B) 及び(110)面が 4 種の直鎖アルカン液体に接した系において 2 つの固体壁面をそれぞれ反対方向に摺動させ, その間の界面を通過する熱及び運動量を計測した. (110)面については摺動特性の異なる 2 方向が存在する (平滑面側: Wall C, 粗面側: Wall D). 図 2 は固体壁面と液膜における速度分布を示したものであるが, FCC で最も粗い表面である Wall D においても一定のスリップが発生し, その

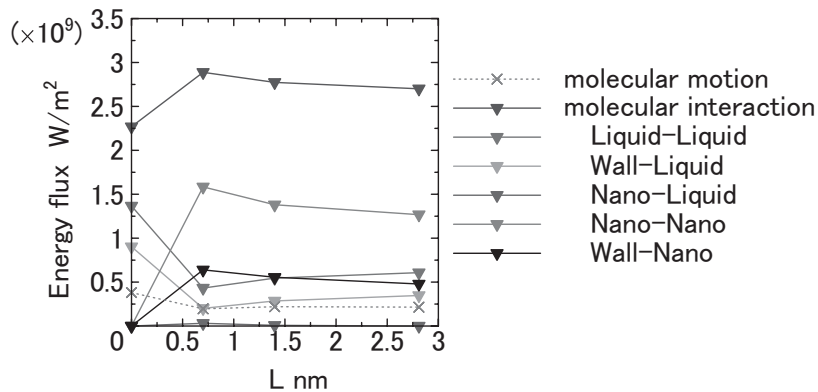


図 1: 表面ナノ構造間隔 L と界面近傍のエネルギー伝播割合の関係

大きさは分子の鎖長が大きいほど大きくなる
ことがわかる。これは、(110)面に存在する結晶
格子スケールの溝に収まった液体分子が液膜
に引き出される確率が、鎖長の増大と共に大き
くなることによるものと考えられる。

3. 研究目標の達成状況

固液界面ナノ構造が熱輸送特性に及ぼす影
響について、東北大学・大阪大学の連携の下そ
れぞれの機関において大小2つのスケールから
解析を進め、それぞれのスケールにおける支配
因子と特性を明らかにして、本研究の目標を達
成しつつある。

4. まとめと今後の課題

今後は固体表面構造と熱抵抗をつなぐメカ
ニズムを明らかにすると共に、スケールの変化
に伴う支配メカニズムの変移について理解を深めたい。

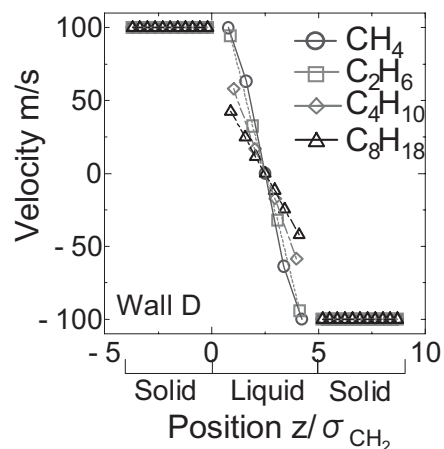


図 2: 固体各表面と各種アルカンの組み
合わせに対する固液界面抵抗

5. 研究成果 (*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. Shibahara and T. Ohara, Effects of the Nanostructural Geometry at a Liquid-Solid Interface on the Interfacial Thermal Resistance and the Liquid Molecular Non-Equilibrium Behaviors, *Journal of Thermal Science & Technology*, Vol. 6, No. 2, (2011), pp.247-255.
- [2] S. Murakami, M. Shibahara and T. Ohara, Molecular Dynamics Study on the Influences of Nanostructure Geometry on the Energy Transport and the Local Non-equilibrium Behaviors at the Liquid-Solid Interface, *Proceedings of The 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, (2012), USB-Memory.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[3] M. Shibahara, T. Ohara and G. Kikugawa: Transport Phenomena at Nano-Structured Interfaces, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 134-135.
- [4] 芝原正彦, 小原拓, 村上翔, 微細構造によって誘起された局所非平衡性が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響, 第 48 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2011), pp.261-262.
- [5] 村上翔, 芝原正彦, 小原拓, 微細構造によって誘起された局所非平衡性が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響, 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集, (2011), J054051.
- [6] 村上翔, 芝原正彦, 小原拓, 微細構造によって誘起された局所非平衡性が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響, 第 25 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2011), B10-3.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11059 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Energy |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Investigation of Supersonic Hybrid-Stabilized Argon-Water Arc for Biomass Gasification

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

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

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

Further calculations of processes in the hybrid-stabilized electric arc and interpretation of the obtained results for currents 300-600 A and for 22.5-40 standard liters per minute (slm) of argon have been focused on the influence of reabsorption of radiation in colder arc regions (arc fringes) on arc performance. Results omitting reabsorption in arc fringes (net emission coefficients – Method1) and taking it into account (partial characteristics - Method2) have been compared.

3. Achievements

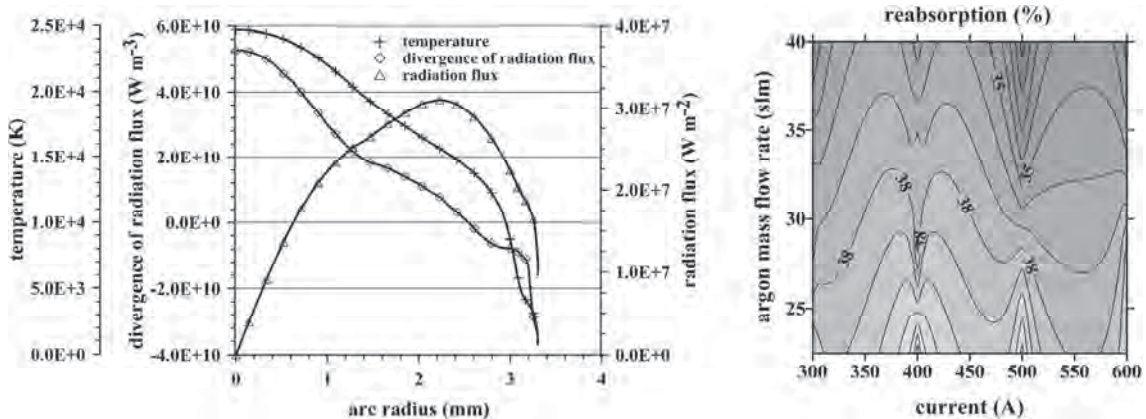


Figure 1. Left: Radial profiles of temperature, divergence of radiation flux and radiation flux for 600 A and argon mass flow rate of 40 slm inside the discharge chamber at the axial position of 4 cm; partial characteristics (Method2). Right: Reabsorption of radiation for different currents and argon mass flow rates.

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

(a) Method2 gives lower temperatures at the arc axis near the outlet nozzle, but in most cases higher outlet velocities and the Mach numbers, compared to Method1.

(b) The results for fluid, thermal and electrical characteristics exhibit the relative difference below 15% for the two radiation methods.

(c) Radiation losses obtained by Method1 is, compared to Method2, higher in major part of the discharge volume for 500 and 600 A, for other currents it is lower in the axial region and higher in arc fringes.

(d) Reabsorption of radiation in arc fringes (Method2) ranges between 31-45 %; it decreases with current and slightly decreases with argon mass flow rate.

(e) Method1 provides somewhat better agreement with experiments for the average relative difference of temperature (i.e. the arithmetic mean of the difference over the radius) 2 mm downstream from the nozzle exit - maximum relative difference between the calculated and experimental temperature profiles is below 5 % for Method1 and below 10 % for Method2. The partial characteristics (Method2) give on the other hand somewhat better agreement for the velocity profiles.

4. Summaries and future plans

The results of the project demonstrated impact of reabsorption of radiation in colder arc regions on the hybrid-stabilized arc parameters.

Future plans include:

- (a) Mixing of plasma species (hydrogen, argon, oxygen) within the discharge region of the hybrid arc by the combined diffusion coefficients method.
- (b) Clarification of small differences between turbulent and laminar flow regimes.

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, M. Hrabovský, T. Kavka, V. Sember and A. Mašláni: Numerical Investigation of Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc Used for Biomass Gasification, in: *Progress in Biomass and Bioenergy Production*, July 2011, Editor: Syed Shahid Shaukat, INTECH, ISBN 978-953-307-491-7, pp. 63-88.

[2] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, P. Křenek, M. Bartlová and V. Aubrecht: Computer Modeling of Radiative Transfer in Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc, *IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue - Images in Plasma Science 2011*, Vol. 39, No. 11 (Part 1), (November 2011), pp. 2892-2893.

*[3] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlová, V. Aubrecht, P. Křenek, M. Hrabovský, T. Kavka, V. Sember and A. Mašláni: Integrated parametric study of hybrid-stabilized argon-water arc under subsonic and supersonic plasma flow regimes, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 43, (November 2, 2011), 435204 (20 pages).

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

*[4] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama and M. Hrabovský: Investigation of Supersonic Hybrid-Stabilized Argon-Water Arc for Biomass Gasification: The Role of Radiation Transfer Method Used in Computer Simulation, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, Japan, (2011), pp. 76-77.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11060 |
| 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 | 2011.4~2012.3 |

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

中川 敦寛*†, 大谷 清伸**, 早瀬 敏幸**††
荒船 龍彦***, 鷺尾 利克****, 富永 悌二*

*東北大学大学院医学系研究科神経外科学分野, **東北大学流体科学研究所

東京大学大学院工学系研究科 *産業技術総合研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

米国ではイラク・アフガニスタンで blast による外傷性脳損傷 (blast-induced traumatic brain injury: bTBI) が損傷後の高次脳機能障害と相まって社会問題となり, 多額の研究資金が投入されている. また, 高エネルギー外傷においても頭蓋内に衝撃波が伝播し, 対側損傷などに寄与する可能性については長年指摘されている. 臨床的には骨折, 出血 (性挫傷), 対側損傷などが認められるが, その発生機序に関しては不明である. 本研究では模擬モデル実験を用いて上記臨床所見の機序解明を行うことが目的である.

2. 研究成果の内容

本年度は, 多層生体模擬物質中衝撃波伝播実験装置を用いて, 可視化と圧測定による検討を行った. 両側に可視化用のアクリル窓のついたステンレス製水槽 (200mm×200mm×200mm) 内を精製水で満たし, 多層の生体模擬物質を設置した. 生体模擬物質は, ゼラチン, 水, アクリルを用いて空気-アクリル-水-ゼラチンで各層 1mm 間隔の多層状態とし, 比較のため空気-ゼラチンだけの条件でも実験を行った. 衝撃波発生には, 微小爆薬アジ化銀ペレット (AgN₃) 10mg を細粒化し, 電子マイクロ天秤で計量したものを使用した. 光ファイバ (コア径 0.4mm) 先端に接着した状態でゼラチン中に設置, 光ファイバを介しパルス Nd:YAG レーザ光を照射, 起爆して衝撃波を発生させた. 多層生体模擬物質中を伝播する衝撃波現象を, フラッシュランプを光源とした影写真法で可視化し, 高速度カメラ (IMACON 200, DRS Technologies, Inc., 解像度 1200pixel×980pixel) で記録した. また, PVDF ニードルハイドロフォン (Platte Needle Probe, Muller Instruments, 測定圧力レンジ -10~200MPa, 受圧面直径 0.5mm, 立ち上がり時間 50ns) を用いて, 多層生体模擬物質中における圧力変動を測定した.

多層生体模擬物質中衝撃波伝播挙動の高速度連続影写真 (ゼラチン-空気, ゼラチン-水-アクリル-空気) では, 微小爆薬起爆後 300ns から 1μs 間隔の空気界面近傍の生体模擬物質中の衝撃波伝播挙動を検討したところ, 前者では, 空気界面近くのゼラチン中を伝播する衝撃波は, 微小爆薬起爆によって発生した球状衝撃波がゼラチン中を伝播し, 空気界面で反射し, 膨張波として下方へ伝播, 空気界面では圧力が負圧となって気泡が発生している. 後者では, 空気界面近くのゼラチン-水-アクリル中を伝播する衝撃波は, ゼラチン中で発生した球状衝撃波が, 各層界面で反射, 透過を繰り返し起こし, ゼラチン中に戻ってきた波は複数の波を伴う反射波になっている. 空気界面近傍におけるゼラチン中の圧力の時間履歴では, 圧力の

立ち上がり時間は異なるが、微小爆薬起爆による衝撃波が到達し、急激な圧力上昇の後、膨張波が到達し負圧になるのが認められた。微小爆薬の薬量の差が大きい点もあるが、圧力センサによって反射波が阻害されているため、圧力センサではゼラチン-水-アクリル-空気中を伝播、反射して発生した複数の波による圧力変動を捉えることはできなかった。

3. 研究目標の達成状況

本研究では、Blast Injury 発生に寄与する生体内の衝撃波伝播現象を明らかにするため、生体模擬物質を用いたモデル衝撃波実験を行った。多層にした生体模擬物質中で微小爆薬による衝撃波を伝播させ、各層との干渉現象および負圧発生、そして気泡発生を影写真法による光学可視化計測と圧力測定の時計測を行った。今回行った解析モデルを用いた検討結果は、動物実験結果に relevant なものであり、本年度の課題は概ね達成したものと考えられる。

4. まとめと今後の課題

本年度の検討結果では動物実験で認められた bTBI の特異な画像所見 (BW 照射反対側における損傷所見 (核の紡錘化, 出血)) には頭蓋骨経由で伝播した衝撃波の関与が示唆された。次年度は、さらに、脳損傷 (二次侵襲による二次損傷の発生) において重要な役割を果たす脳自動調節能に注目する予定である。今年度得た知見を生かして bTBI の特異な臨床像を解明し、今後の予防、治療研究に展開したい。

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] 大谷清伸, 中川敦寛, 早瀬敏幸, 荒船龍彦, 鷺尾利克, 合田圭介. 生体模擬物質中を伝播する衝撃波現象. 平成 23 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (2011), pp.125-126.

他 合計 10 件

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] A. Nakagawa, K. Ohtani, K. Goda, T. Arafune, T. Washio, T. Hayase, T. Tominaga: Preliminary Experiments for Investigation on Mechanism of Contra-Coup Injury in Blast-Induced Traumatic Brain Injury. *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 96-97.

[3] 中川敦寛, 富永悌二: blast-induced traumatic brain injury (bTBI) と外傷性脳損傷のトランスレーショナルリサーチ. 第 31 回日本脳神経外科コンgres 横浜 2011. 5. 6

他 合計 28 件 (うち国内招待 4 件, 海外招待 7 件)

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

特記すべきことなし.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11061 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | エネルギー分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

鋭敏化した Alloy 600 の B-H 曲線形状の変化に関するシミュレーション解析
Simulation Analysis on the Change of B-H Curve Pattern for Sensitized Alloy 600

山口 克彦*†, 高木 敏行**††
内一 哲哉**, 鈴木 健司*

*福島大学共生システム理工学研究科, **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

Alloy 600 は高強度・耐腐食性に優れる Ni 基合金であり, 原子力プラントなどの構造材に用いられるが鋭敏化の進行に伴う耐腐食性の低下が問題となっている. 本研究では特に初期段階における鋭敏化によって生じる Cr 欠乏領域の磁気特性をモンテカルロ(MC)法を用いたシミュレーションにより解析し, その進行度合いを定量的に評価する手法の開発を行う.

2. 研究成果の内容

一定温度条件下において熱時効処理を保持時間を変えて施すことで得られる鋭敏化度の異なる Alloy 600 を用いて, 走査型電子顕微鏡(SEM)による表面観察とエネルギー分散型 X 線分光法(EDX)による Cr 炭化物周辺における Cr 濃度の測定結果を図 1 に示す. これにより鋭敏化によって Cr 欠乏領域が生じ, 鋭敏化度合いによって Cr 欠乏量が異なることが確認された. さらにこの欠乏領域に対して磁性サイトが分散したモデルを構築し, 図 2 に示すように磁性粒子が分散したクラスターを対象にモンテカルロ法によりヒステリシス曲線のシミュレーションを行った. さらにこれらのヒステリシス曲線のシミュレーション結果と SQUID 磁力計により測定された結果を比較しその磁気特性の変化について検証を行った. これによりその磁気特性変化が Cr 欠乏によって生じる磁性サイトの分散に依存していることを明らかにした.

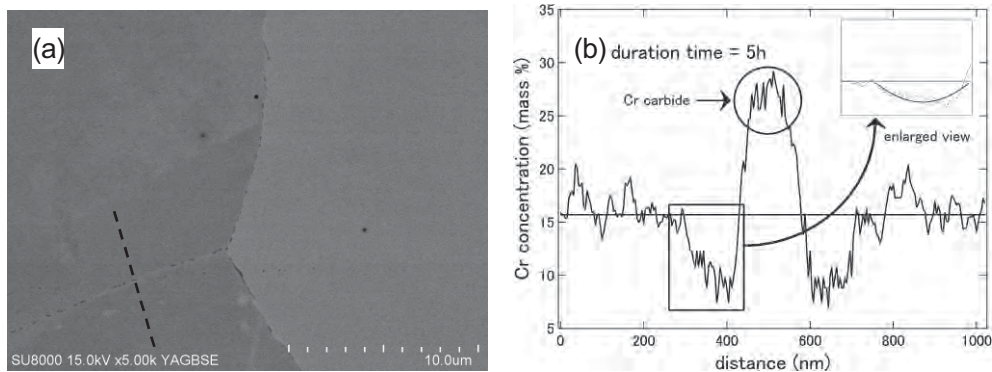


図 1 : (a)鋭敏化した Alloy 600 の SEM 画像と (b)Cr 炭化物周辺の Cr 濃度

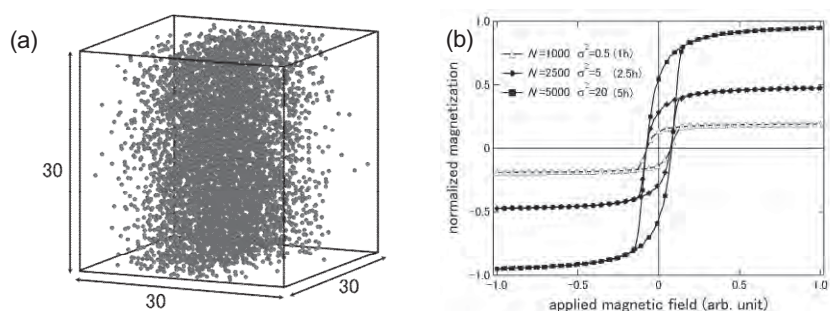


図 2 : (a) 構築したクラスター内部図と (b) シミュレーションによるヒステリシス曲線

3. 研究目標の達成状況

Alloy 600 の鋭敏化の進行に伴う磁気特性の変化について、磁性サイトが分散したモデルを用いてシミュレーション計算を行い実験結果と比較することで、鋭敏化度合いによるヒステリシス曲線の形状変化について検証し、鋭敏化度合いの評価につなげることができた。

4. まとめと今後の課題

鋭敏化度が異なる Alloy 600 の Cr 欠乏領域に対して、磁性サイトが分散したモデルを用いてモンテカルロ法によりシミュレーション計算を行い、鋭敏化度による磁気特性の変化は Cr 欠乏領域における磁性サイトが分散したモデルで説明できることを明らかにした。今後の課題は、鋭敏化による Cr 濃度の分散過程のシミュレーションも行うことで、今までのヒステリシス曲線の計算と合わせて、鋭敏化が起こり Cr 濃度の変化により磁化特性が変わるまでの一連の流れをシミュレートすることである。これらの計算結果は μ 磁気カー効果などを用いた局所的な磁化測定結果と比較し、実験的な裏づけとともに検証していく予定である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] Katsuhiko Yamaguchi, Kenji Suzuki, Tsugiko Takase, Osamu Nittono, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi: Hysteresis properties for local magnetic sites distribution on grain boundary, *Physica B: Condensed Matter*, Volume 407, Issues 9, (2012), pp.1420–1423.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] K. Suzuki, K. Yamaguchi, T. Takase, O. Nittono, T. Uchimoto, and T. Takagi: Temperature dependence of magnetic properties for sensitized Alloy 600, *Proceedings of 18th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, Sydney, Australia, (2011), PD7.1(ID649), p.81.

[3] 鈴木健司, 山口克彦, 高瀬つぎ子, 入野野修: 局所的磁性粒子分散系クラスターの磁気特性シミュレーション, 第 35 回日本磁気学会学術講演概要集, (2011), 30aC-6, p.350.

*[4] K. Yamaguchi, K. Suzuki, T. Uchimoto and T. Takagi: Simulation Analysis on the Change of B-H Curve Pattern for Sensitized Alloy 600, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.154-155.

3) その他その他 (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 | J11062 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

液体水素の熱・輸送物性に関する分子論的研究

Molecular Study of Thermodynamic/Transport Properties of Liquid Hydrogen

徳増 崇^{*†}, 坪井 伸幸^{**††}

津田 伸一^{***}, 永島 浩樹^{****}, 富 正人^{**}

^{*}東北大学流体科学研究所, ^{**}九州工業大学工学研究院

^{***}信州大学工学部, ^{****}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

近年水素は次世代のエネルギー源として注目されており、特に液体水素の熱流動特性の把握は工学的にも重要である。しかし水素は低温において量子効果の影響が現れるため、液体水素の熱流動解析ではこの影響を考慮して解析を行う必要がある。さらに、水素の工学的応用で重要となる酸水素混合系の熱物性データについても、特に臨界点近傍を中心として不明確なものが多い。そこで本研究では、量子効果が液体水素の熱・輸送物性に与える影響の解明、および臨界点近傍における酸水素混合系の物性評価を目的としている。

2. 研究成果の内容

水素の量子効果はナノメートルオーダーの現象であるが、マクロな熱流動特性にまで影響を及ぼすため、マイクロ・マクロ両方の面から液体水素の熱流動特性解析を行った。まず、四つの分子間ポテンシャルモデルを用いて、古典 MD により低温水素の熱物性評価を行い、対応状態原理を用いて比較を行った。その結果、どのポテンシャルモデルも同じ傾向を示し、液体領域では低温水素の熱物性を定性的に再現出来ないことが明らかとなった。これは量子効果によって水素分子の分子間距離が短くなり、斥力がより大きくなるためと考えられる。このことを検証するため、Centroid Molecular Dynamics 法により液体水素の状態を計算し、古典論の計算結果との比較を行った。図 1 にそのシミュレーションの様子と CMD 法、MD 法による動径分布関数(RDF)の比較を示す。この図より量子効果を考慮すると、水素分子の分子間の距離が短まっている事が分かる。これにより斥力が大きくなり、分子の中心位置を表す RDF(黒線)の第一ピークの位置は、古典 MD(破線)より離れることが明らかとなった。また、酸水素混合系の解析では、超臨界および臨界点近傍における熱物性評価を古典 MD により実施した。その結果、超臨界での P - V - T 関係と比熱は、数密度および温度一定においては水素濃度に

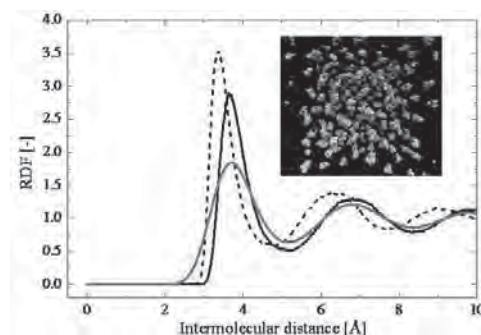


図 1 : CMD 及び古典 MD より得られた水素の三重点近傍における動径分布関数の比較

対する単調増加（もしくは減少）を示すことがわかった。一方、密度揺らぎが顕在化する臨界点近傍では、現在適用している酸素ポテンシャルの限界が顕著に表れ、熱物性に対する水素濃度依存性を確認するには至らなかった。

3. 研究目標の達成状況

まず、低温水素の熱物性に対する分子間ポテンシャルモデルの定性的影響が明らかとなり、さらに CMD 法との流体構造の比較より、実験値を再現できない要因も明確となった事より、液体水素の熱流動現象に対する古典的手法の適用限界が示された。一方、酸水素混合系の解析については、超臨界では熱物性値に対する水素濃度依存性を定性的に理解できたものの、揺らぎが顕在化する臨界点近傍では現在適用している酸素ポテンシャルの限界が明示された。

4. まとめと今後の課題

昨年度の研究により、分子間ポテンシャルの定性的影響が明らかとなり、CMD 法との比較より実験値を再現できない要因も明確となったが、量子効果が液体水素の熱物性に与える定量的な影響まではまだ明らかとなっていない。したがって、圧力や内部エネルギー、自由エネルギーに対する量子効果の定量的な影響と古典的な場合との相違を明確にする必要がある。一方、酸水素混合系の解析では、超臨界での熱物性評価は可能であるものの、臨界点近傍では現在の酸素ポテンシャルの適用限界が明示された。今後は、分子間ポテンシャルを修正したうえで、その臨界点近傍における熱・輸送物性や静的・動的構造を理解する必要がある。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

*[1] H. Nagashima, T. Tokumasu, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi and A. K. Hayashi: An Estimation of Thermodynamic and Transport Properties of Cryogenic Hydrogen using Classical Molecular Simulation, *ASME-JSME-KSME Joint Fluid Engineering 2011*, AJK2011-36005. (11 pages)

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Shin-ichi Tsuda, Masato Tomi, Nobuyuki Tsuboi, Hiroki Nagashima, Takashi Tokumasu and Mitsuo Koshi: A Classical Molecular Dynamics Study on Thermodynamic Properties of Cryogenic Hydrogen/Oxygen System, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 136-137.

[3] 永島浩樹, 徳増崇, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一: 古典分子動力学法を用いた低温水素の熱輸送物性評価, 第48回日本伝熱シンポジウム, (2011), pp. 503-504.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

（特許）

なし

（受賞）

なし

（マスコミ発表）

なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11063 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Nano/micro Technology |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Nano-Scale Modeling of Confined Liquid Films and Bridges

Takashi Tokumasu*†, Philippe Vergne**††
 Nicolas Fillot**, Marie-Hélène Meurisse **

* Institute of Fluid Science, Tohoku University

** LaMCoS, INSA-Lyon

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

In lubricated contacts, when the lubricant supply can be insufficient to fill the gap between the solid surfaces, or when the wettability conditions are poor, the film can fractionate into disjointed liquid bridges. This phenomenon occurs at many places in practical applications. The analysis of the liquid bridge behavior is thus very important. Especially, if its width or the gap between surfaces is of nanometer scale, interfacial effects cannot be neglected and therefore its response cannot be analyzed from a macroscopic basis. Similarly in molecular lubrication problems, lubricants are confined to molecular scale thicknesses. Experiments have shown that in such confinements the structure and dynamics of lubricants are greatly influenced by the nature of the confining surfaces. The well-organized surface structure is reflected, through the interfacial interactions, by a set of potential valleys that lubricant molecules are attracted to occupy. Any surface, no matter how geometrically smooth, manifests a sort of a foot-print over the neighboring lubricant layers. The aim of our research is to investigate the dynamic behavior of liquid bridges and to analyze the effect of surface interaction on the confined thin films by the MD method.

2. Details of program implement

In this year, the flow phenomena of nanoscale liquid bridges were investigated by Molecular Dynamics simulations without surfaces. Water was used as lubricant. Lees-Edwards method was introduced to calculate Coulomb potential. The viscosity coefficient was estimated from the shear stress and the cross section obtained by the density distribution. The results are shown in Fig. 1. As shown in this figure, the viscosity coefficient is constant at larger width but decreases when the width of liquid bridge was decreased. Moreover, the momentum flux was divided into two parts. One is the momentum flux through boundary region and the other is through bulk region. In this analysis we found out that the momentum flux in boundary region is from one-fourth to one-third of that in bulk region.

To go further in analyzing the surface interaction on the behavior of lubricant thin films by the MD method, we derived a new methodology to quantify as accurately as

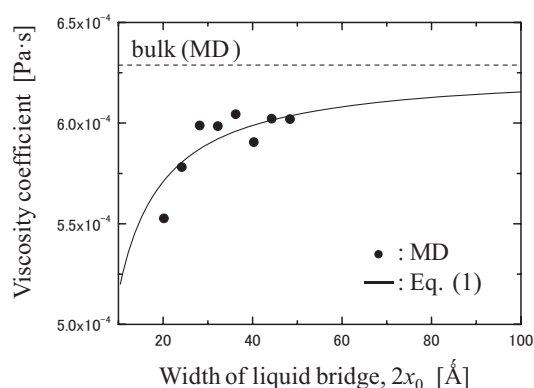


Fig. 1 : Schematic Diagram of Simulation

possible its effect. The competition between the effective viscosity of the lubricant and the tangential momentum transfer capability of the surface leads to two possible states. In the first one, the maximum shear stress that the wall can transfer is not sufficient to overcome the internal cohesion of the lubricant. Hence, the fluid is not fully sheared and wall slip occurs. On the other hand low viscosity fluids or surfaces with high momentum transfer capability lead to a reduction or to the absence of interfacial slip. The shear stress, i.e., the stress that a given wall can transfer to a lubricant molecule must be characterized: it is linked to a surface interaction parameter, which is representative of the wall-fluid interaction energy and commensurability, and is obtained through a scanning technique as shown in Fig. 2. This method could be useful in predicting wall slip in MD simulations and thus to estimate friction at the interface.

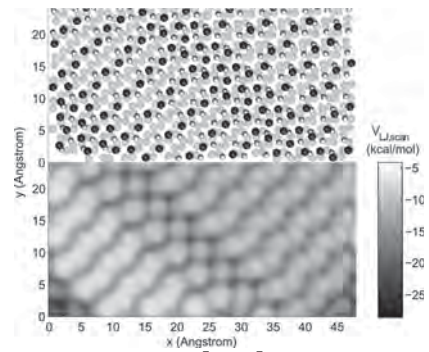


Fig. 2 Fe₂O₃ [001] surface and the corresponding Lennard-Jones potential from the scanning technique

3. Achievements

In this year we made a model of momentum transport of liquid bridge of water and analyzed the difference of momentum transport between bulk and boundary region quantitatively. We developed an original technique that allows an accurate quantification of the wall/molecules interaction. We think the goal of this year was achieved.

4. Summaries and future plans

As for the research of liquid bridges, we will perform the simulation using very simple (L-J) model and compare the simulation results with macroscopic theory of momentum transport. As for the confined lubricant thin films, our goal is propose a model to predict wall slip and thus to extend it to different molecular and solid wall materials.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] H. Berro, N. Fillot, P. Vergne, T. Tokumasu, T. Ohara and G. Kikugawa: Energy dissipation in non-isothermal molecular dynamics simulations of confined liquids under shear, *J. Chem. Phys.*, 135(2011), 134708 (10 pages).

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

*[2] T. Tokumasu, M.-H. Meurisse, N. Fillot and P. Vergne: A Molecular Dynamics Study of Momentum Transport in a Nanoscale Liquid Bridge, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.138-139.

[3] T. Tokumasu, M.-H. Meurisse, N. Fillot and P. Vergne: A Molecular Dynamics Study of a Nanoscale Liquid Bridge under Shear, *38th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, Lyon, France (2011)

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11064 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | ナノ・マイクロ分野 |
| 研究期間 | 2011.4~2012.3 |

水分子ネットワーク構造におけるプロトン輸送特性の解明
Investigation of Proton Transport in Liquid Water Network

徳増 崇^{*†}, 杵淵 郁也^{**††}, 三好 信哉^{**}

^{*}東北大学流体科学研究所, ^{**}東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻

[†]申請者, ^{††}所外対応研究者

1. 研究目的

ミクロスケールの熱流動, 反応等の現象は, 固体壁面や膜近傍など界面近傍における分子の挙動の影響を強く受ける. したがって分子レベルの挙動を制御することでバルクでは実現できない流体, イオン輸送特性を発現する新たなデバイスの創成が期待されている. ナノスケールの空間におけるイオン輸送現象の一例として, 固体高分子型燃料電池に用いる電極・膜接合体 (MEA: Membrane Electrode Assembly) でのプロトン輸送が挙げられる. またプロトン輸送は電気二重層型キャパシタや生体内のエネルギー生成過程まで幅広い分野に関連した現象である.

水溶液中におけるプロトンは通常の拡散機構に加え, 隣り合う水分子の水素結合の間でプロトンを受け渡しする Grotthuss 機構 (プロトンホッピング) によって輸送されることから, 他のイオンと比較し高い輸送特性を示すことが知られている. 特に, 界面近傍でのプロトン輸送に関しては, シリカ表面近傍に構造化された水分子のネットワークにおいて, プロトンがバルクを上回る高い輸送特性を示すことが報告されている (Tsukahara et al., 2009, Duan et al., 2010). しかし, 界面近傍のプロトン輸送現象を実験によって十分な時空間分解能で計測することは困難が多く, 分子スケールの解明すべき点が数多く残されている. そこで本研究は, 分子動力学法を用いて, 界面近傍で構造化された水分子ネットワークにおけるプロトン輸送特性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, シリカ表面(α -quartz (001)面)に挟まれたナノ空間におけるプロトン輸送を分子動力学シミュレーションにより解析した(図 1a). Grotthuss 機構を扱うために, EVB (Empirical Valence Bond)法に基づいて構築されたポテンシャルモデルを用いた. 昨年度, シリカ表面近傍のプロトンホッピング頻度がバルクと比較して増加する結果が確認されたことを踏まえ, 本年度は, Grotthuss 機構が促進されるメカニズムについて界面近傍に存在する液体の構造に着目して解析を進めた.

シリカ表面近傍の液体は, 構造化に起因して振動的な密度分布をとり (図 1b), オキソニウム (H_3O^+)イオンが界面近傍に局在化することが確認された. さらに, オキソニウムイオン周りの酸素原子の二次元動径分布を界面からの距離毎に測定した (図 1c,d). 両者とも第一ピーク位置についてはバルクの場合と差異がみられないことから, Zundel クラスタ($H_5O_2^+$)内の酸素原子間距離は, 界面からの距離にはほぼ依存せず一定であることが分かる. 一方, 第一ピーク強度および裾の部分の構造はバルクと界面近傍で大きく異なる. これらの差異は, オキソニウムイオン-水分子間に加えて, オキソニウムイオン-シリカ表面 OH 基の相互作用に起因しており, 界面に近づくほど顕著になることが確認された. この界面近傍に特有な構造が Grotthuss 機構促進に寄与

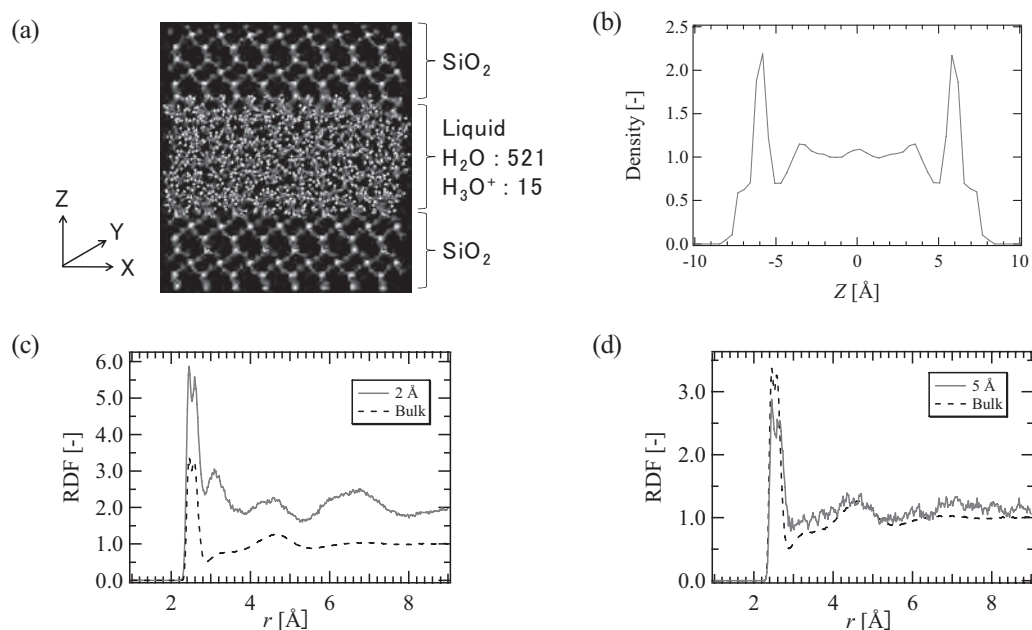


図1：シリカ表面に挟まれたナノ空間におけるプロトン輸送の分子動力学シミュレーション。
 (a)計算系, (b)液体分子の数密度分布, (c,d) H_3O^+ イオン周囲の酸素原子の二次元動径分布。

している可能性が示唆された。

3. 研究目標の達成状況

昨年度、実験で報告されている界面近傍でのプロトンホッピング促進を分子シミュレーションで再現できたことを踏まえ、今年度はメカニズムの解明に焦点を当てて研究を進めた。その結果、界面近傍の液体の構造化とプロトンホッピング促進の関係について、一定の知見を得ることができた。反応経路の詳細な評価や、用いているポテンシャルモデルの精度について、今後更に検討を進めていく必要がある。

4. まとめと今後の課題

界面近傍における水中のプロトン輸送について、分子動力学シミュレーションによる解析を行い、液体の構造化とプロトン輸送促進の関係について明らかにした。現状では輸送特性を定量的に再現するには至っていないことから、ポテンシャルモデルの改良にも取り組む必要がある。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Nobuya Miyoshi, Ikuya Kinefuchi, Takashi Tokumasu, Shu Takagi and Yoichiro Matsumoto: Proton Transport in Hydrogen Bond Network of Confined Water, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 140-141.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11065 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Life science |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Analysis of Plasma Flow at Gas-Liquid Interface for Biological Interaction

Takehiko Sato*†, Gregor E. Morfill**††
Tetsuji Shimizu**, Naoya Kishimoto ***

*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

**Max-Planck Institute for extraterrestrial physics

***Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

In order to apply and optimize cold atmospheric plasmas for biological applications, it is necessary to understand the generation and production mechanisms of relevant chemically reactive species from the plasma source to the objects. Since the biological materials are often covered by liquid, we applied the plasma discharge onto water for observing the transport of reactive species at the gas-liquid interface.

2. Details of program implement

We have reported the transport of reactive species in water using a pin electrode (see reference [1,2]). In this case, by the discharge there was a gas flow produced and this flow induced a circulating flow in the plasma-treated water. This water flow was found to be a main mechanism of the reactive species transport in the water. Since a large area treatment is often required in biomedical applications, a cold atmospheric plasma electrode with a much larger surface area was prepared in this program. Figure 1 shows the photos of the used electrode and a plasma discharge on the electrode. On this electrode a plasma discharge was produced by applying 5.5 kV with 5 kHz in frequency.

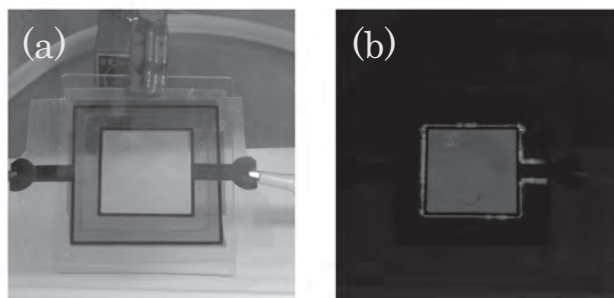


Figure 1 : Plasma electrode in this project and the produced discharge on the electrode.

A glass cell was placed below this plasma discharge. The cell has a volume of 1.6 ml and the water surface (10 mm × 20 mm) was completely covered by the electrode. For observing the chemically reactive species transport in liquid phase, a methyl red solution was poured in the glass cell. Moreover, one of the reactive species, NO₂⁻ concentration in the treated water was measured by a digital water analyzer.

Figure 2 shows a time evolution of the plasma-treated methyl red solution. With 30 s of plasma irradiation (t is plasma-on time), the color at the upper layer of the solution was changed to red, becoming acidic. This color change was propagated to lower part of the cell almost homogeneously. At $t = 210$ s, the whole solution was most red. This color propagation profile is different from that using the pin electrode. With the pin electrode,

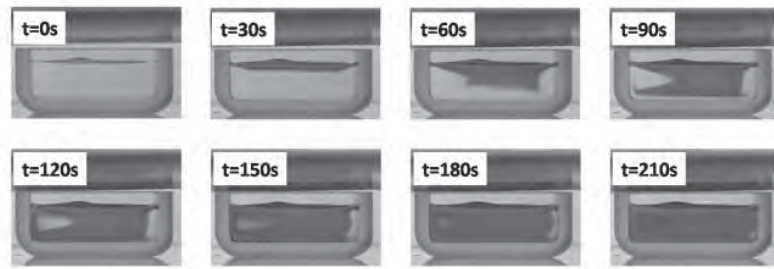


Figure 2 : Temporal change of methyl red solution treated by the plasma discharge.

a circulating flow was generated in the liquid and by this flow the reactive species were transported. The electrode in this study gives the transport in more diffusive way. This is due to the discharge mechanism. With the pin electrode, the discharge was produced between the electrode and water surface, while on the electrode in this study. The measurement with the digital water analyzer showed that nitrous acid was produced in the plasma treated water. This is an evidence that the plasma could produce chemically reactive species in the water.

3. Achievements

By the measurement in Institute of Fluid Science, Tohoku University, we could observe the transport of chemically reactive species in the water using the flat planar electrode. This electrode design with larger surface is important for many biomedical applications. Furthermore, one of the relevant reactive species in the water, nitrous acid could be measured in the plasma-treated water.

4. Summaries and future plans

In order to optimize the cold atmospheric plasma depending on purpose, the transport of reactive species was monitored. The used plasma electrode system is simple and scalable, so that it is possible to apply for many kinds of biomedical applications. The measurement of nitrous acid in the water showed that the plasma treatment could generate the reactive species in the liquid.

In the next step, the plasma discharge is modified to have a stronger effect onto liquid. The discharge will be produced between the electrode and water surface with a large area. Using this electrode design, more reactive species concentrations are expected and the charged particles can also play a role in physics as well as chemistry in the liquid.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] T. Shimizu, Y. Iwafuchi, G. E. Morfill and T. Sato: Formation of thermal flow fields and chemical transport in air and water by atmospheric plasma, *New J. Phys.*, Vol.13, No.5, (2011), 053025 (10 pages).

[2] T. Shimizu, Y. Iwafuchi, G. E. Morfill and T. Sato: Transport mechanism of chemical species in a pin-water atmospheric discharge driven by negative voltage, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, Vol.24, No.4, (2011), pp.421-427.

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

*[3] N. Kishimoto, T. Shimizu, G. E. Morfill and T. Sato: Analysis of Plasma Flow at Gas-Liquid Interface for Biological Interaction, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.68-69.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11066 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Aerospace |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Investigation of Hypersonic Flows about Leading Edges of Small Bluntness

Mikhail Ivanov*†, Shigeru Yonemura**††, Keisuke Sawada***,
Yousuke Ogino***, Yevgeniy Bondar*, Pavel Vashchenkov*

*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Department of Aerospace Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In the framework of the present project the phenomena of hypersonic flow about the leading edges of the small bluntness are studied. Such leading edges are the elements of the advanced hypersonic air-/spacecraft design. Feature of the high-speed flow about such edges is significant effect of the rarefaction and thermal non-equilibrium even for such parts of the flight trajectory where the flow about the air-/spacecraft is continuum as a whole. The main objective of the present project is to establish the limits of applicability of continuum models and assess the effects of thermal non-equilibrium for such flows. In the present project the extensive numerical studies based on the kinetic (Direct Simulation Monte Carlo method, DSMC) and continuum (Navier-Stokes equations, NS) approaches are conducted. The use of such combined numerical strategy allows the detailed investigation of the rarefaction and thermal non-equilibrium effects on the thermal loads on the leading edge.

2. Details of program implement

Effects associated with leading edge bluntness in a hypersonic laminar separated flow around a cylindrical body with a conical flare were studied by means of the numerical solution of the Navier-Stokes (NS) equations with slip and temperature jump boundary conditions on the surface and by means of the Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method. The DSMC and NS results were found to be in qualitative agreement with each other. The influence of leading edge bluntness on thermal nonequilibrium of the flow around this model was studied. In particular, DSMC computations revealed a noticeable difference of the translational and rotational temperatures behind the shock wave up to the cylinder/flare junction. It was demonstrated that an increase in the leading edge bluntness radius leads to a noticeable decrease in the separation region size, which is caused both by the downstream shift of the point of incidence of the bow shock wave onto the cylinder flare and by the appreciable change in flow parameters in the entropy layer. The difference in the flowfields and the size of separation region for cases of sharp and blunted leading edge is demonstrated in Figure 1.

The numerical study of the 3D flow with Mach number $M=10$ about a delta wing with blunted leading edge was performed and the rarefaction effects on the flow structure were studied. In the range of Reynolds number from 250 to 62000 no separation was observed.

The computation of the chemically reacting non-equilibrium flow about a cylinder with blunted edges was performed by continuum and kinetic approach for the conditions of the Martian entry in the wide range of Knudsen numbers. It was shown that continuum

approach significantly underpredict the heat flux of the surface for Knudsen numbers higher than 0.01 due to thermal non-equilibrium of the flow.

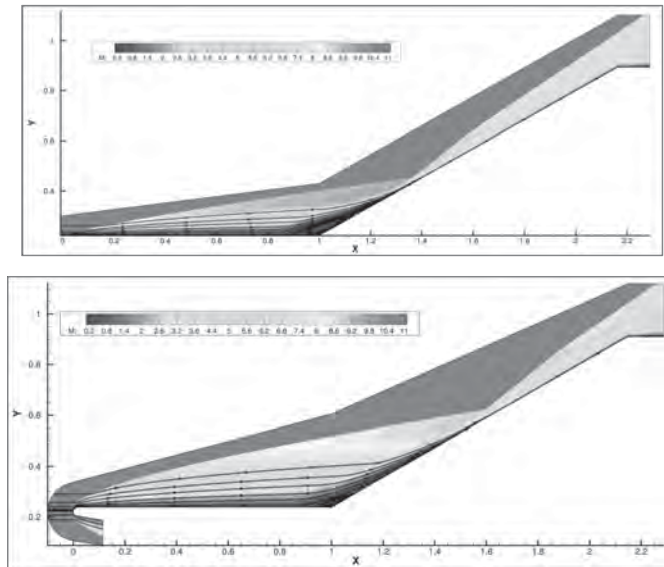


Figure 1: Hypersonic flow about hollow cylinder, cases of sharp (upper) and blunted (lower) leading edge. Mach number flowfields and selected streamlines.

3. Achievements

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

4. Summaries and future plans

The structure of the rarefied hypersonic three-dimensional flow about a delta wing was studied in detail with the DSMC method. The rarefaction effects for the flow with translation-vibration nonequilibrium and chemical reactions were analyzed by the comparison of the DSMC and NS results. The hypersonic laminar flow about a hollow cylinder with flare was numerically studied and the effects of the leading edge bluntness on the flow structure were assessed.

Future research plans:

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

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] M.S. Ivanov *et al.*, *Proc. 15th ICMAR*, Novosibirsk, Russia (2010), CD-ROM, Paper No. 68 (This paper was actually published in March 2012).

[2] M.S. Ivanov *et al.*, *Teplofiz. Aeromekh.*, (2011), Vol.18, No.4, pp.543-551 (Russian).

[3] Ye.A. Bondar *et al.*, *Shock Waves*, Springer, (2012), Vol. 1, pp. 215-220.

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

*[4] M.S. Ivanov *et al.*, *Proc. 11th AFI/TFI*, Sendai, (2011), pp. 50-51.

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

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11067 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Nano/micro technology |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Cavity Formation Mechanism in a Cavitation Process

Takehiko Sato*†, Mohamed Farhat**††

Marc Tinguely**, Hidemasa Fujita***

*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

**Lab. of Hydraulic Machines, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL),

***Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

A cavity formation mechanism in an initial stage of a cavitation process has not clarified yet, although there are several established hypothesis. Prof. Farhat from the LHM group has many experiences about the research and Prof. Sato from the Tohoku University group has developed a microscopic observation system. The aim of this project is to clarify the mechanism how the cavity appear and grow in a cavitation process. In this year, we aimed at clarifying the wall effect of a neighboring solid wall on generation of residual microbubbles after collapse of a laser-induced bubble.

2. Details of program implement

Figure 1 shows the bubble generation and collapse process near the rod. When the initiation point was far enough from the tip of the rod, the cavitation bubble behaves like in infinite water volume. As the initiation point gets closer to the tip of the rod, the expanded bubble attached to the rod and the volume of the microbubble cloud increased. The amount of the residual microbubbles was roughly proportional to the surface area of the steel rod in the bubble at its maximum radius. We believe that this is due to the gas trapped within the rod roughness, which migrates in the liquid bulk as the bubble cavitation shrinks. This observation suggests that the wettability of the solid surface must play a key role in this process. Further tests with different physical and chemical properties of the solid wall are required.

3. Achievements

Aims of this project are that (1) describe how the micro jet induced by bubble deformation increases the residual microbubbles and (2) validate a new measurement technique. As we clarified the increase of the residual microbubbles by the effect of neighboring solid wall, we achieved the term of (1).

4. Summaries and future plans

The amount of the residual microbubbles was roughly proportional to the surface area of the steel rod in the bubble at its maximum radius when the laser-induced bubble generated near the steel rod. We also tried to observe an initiation process of cavitation formation at the edge of an airfoil in the cavitation tunnel of EPFL. To observe the process more precisely, we have a plan to prepare a new air foil model and to use a high speed camera.

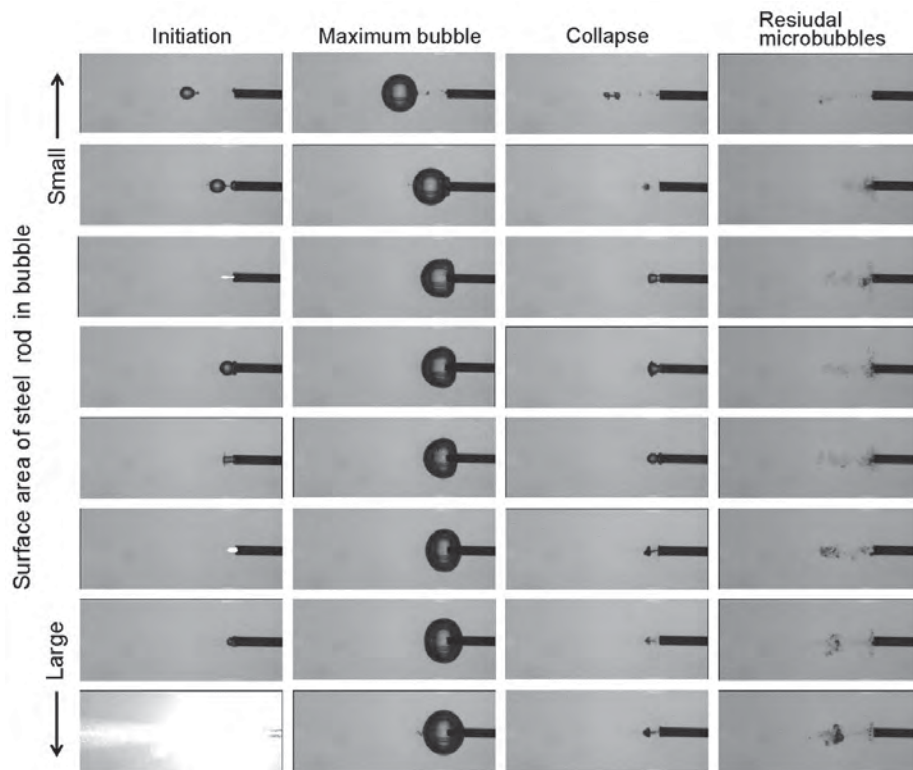


Figure 1: Visualization of bubble generation and collapse processes near the steel rod.

5. Research results (* reprint included)

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

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

*[1] T. Sato, M. Tinguely, M. Oizumi and M. Farhat: Effect of Neighboring Solid Wall on Generation of Residual Microbubbles after Collapse of Laser-Induced Bubble, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 64-65.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11068 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Life science |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

脆弱性血球モデルの開発
Development of Biomodel for Blood Cell

Noriko Tomita*, Liviu Movileanu**††
Makoto Ohta*†,

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Syracuse University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

膜タンパク質を利用して脆弱化血球モデルを開発する。

2. Details of program implement

虚血性心疾患や動脈瘤などの循環器系疾患は、多くの国において最も死亡者数の高い重大な疾患であり、画期的な診断・治療法の開発が必要とされている。循環器系疾患の低侵襲的な治療法としてカテーテルや薬剤溶出ステントを用いた血管内治療の導入が増加しているが、高度な医療技術が求められる一方で、血管内治療の訓練と技術評価は十分ではなく、また、デバイスの接触、留置による血管細胞の傷害、血栓形成、血球の凝集、溶血など、血管細胞が受ける影響が問題となっている。これらの問題を解決するために、生体外で血管の形状や挙動、また生体反応を再現できるバイオモデルの開発が急務となっている。

医療デバイスが血球に与える影響については、これまでに高せん断力マイクロ流路を使用して血球の変形能を電氣的に計測する研究などが行われてきたが、そこで用いられる血球モデルは、正常の血球やグルタルアルデヒドで硬化させた血球のみであり、血管・血液疾患患者を想定すれば、より多様な力学的強度をもつ血球モデルを必要としていると考えられた。本研究員はこれまでに、赤血球膜に特異的に作用して、ナノメートルサイズの孔を開ける膜孔形成タンパク質の構造と作用機序に関する研究を行っており、本タンパク質を利用することで、血球膜全体の物性を硬化・脆弱化させた、膜強度多様化血球モデルの開発が可能であると考えた。

今年度は、本研究で注目している膜タンパク質の一つとしてヘテロで構成されることで注目されている γ ヘモリジンの構造について、研究を行った。特に、他のタンパク質では見られないクラスターの形成について発表した。さらに、ヘプタマー構造とオクタマー構

Table 1 Probability of the subunit locating on the position of “adjacent”, “opposite” and “other” from the negative TEM images of the Hlg pore

| A | location against S1 | subunit No. | | | | | |
|----------|---------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|
| | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| adjacent | | 27 * | 21 * | 24 * | 20 Δ | 10 Δ | 18 Δ |
| | | (22.5) | (17.5) | (20.0) | (16.7) | (8.3) | (15.0) |
| opposite | | 13 Δ | 14 Δ | 19 * (Δ) | 19 * (Δ) | 34 * | 21 * |
| | | (10.8) | (11.7) | (15.8) | (15.8) | (28.3) | (17.5) |
| other | | 20 Δ | 25 * | 17 Δ | 21 * | 16 Δ | 21 * |
| | | (16.7) | (20.8) | (14.2) | (17.5) | (13.3) | (17.5) |

造についてそれぞれ研究を行った。そして、ヘプタマー構造では、形成しうる形状について統計的にまとめた。表 1 は、その統計処理によってサブユニット同士が配置される確率を示したものである。

3. Achievements

目標は十分達成された。

4. Summaries and future plans

タンパク質の同定過程をまとめることができた。共同研究者から別のタンパク質を紹介されたので、そのタンパク質についても調べる予定である。

5. Research results (* reprint included)

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

- [1] Noriko Tomita, Kazuyo Abe, Yoshiyuki kamio and Makoto Ohta, Cluster-forming property correlated with hemolytic activity by staphylococcal γ -hemolysin transmembrane pore, *FEBS Letters*, Vol.585, (2011), pp.3452-3456.
- [2] Noriko TOMITA, Kazuyo ABE, Jun KANEKO, Yoshiyuki KAMIO and Makoto OHTA, Probabilistic Study on Subunit Mismatch Arrangement in Staphylococcal γ -hemolysin Heteroheptameric Transmembrane Pore, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.6, (2011), pp.286-298.
- [3] Keitaro Yamashita, Yuka Kawai, Yoshikazu Tanaka, Nagisa Hirano, Jun Kaneko, Noriko Tomita, Makoto Ohta, Yoshiyuki Kamio, Min Yao, and Isao Tanaka, Crystal structure of the octameric pore of staphylococcal γ -hemolysin reveals the β -barrel pore formation mechanism by two components, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol.108, No.42, (2011), pp.17314-17319.
- [4] Noriko TOMITA, Kazuyo ABE, and Makoto OHTA, Quantitative analsis of subunit mismatch arrangement in staphylococcal gamma-hemolysin heteroheptameric transmembrane pore, *International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Vol.IMECE2011, (2011), pp.63645-.

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

- [5] Noriko Tomita and Makoto Ohta, Analysis of cell adhesion on PVA-H for developing vessel bio-model with dynamical and biological responses, *24th European Conference on Biomaterials The Annual Conference of the European Society for Biomaterials*, Dublin, Ireland, Sep.4-8, 2011
- [6] Yoshikazu Tanaka, Keitaro Yamashita, Yuka Kawai, Nagisa Hirano, Jun Kaneko, Noriko Tomita, Makoto Ohta, Yoshiyuki Kamio, Min Yao and Isao Tanaka, Crystal Structure of the Octameric Pore of Staphylococcal γ -hemolysin, *Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, 2011.11.9-11
- [7] Noriko Tomita, Kazuyo Abe, Jun Kaneko, Yoshiyuki Kamio and Makoto Ohta, Characterization and image analysis of heteroheptameric structure on staphylococcal gamma-hemolysin transmembarne pore, *Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, 2011.11.9-11, Invited

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11069 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Life science |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Optimization of Stent Design based on Blood Flow Analysis using LBM Method

Makoto Ohta*†, Hitomi Anzai**

Bastien Chopard***††, Toshio Nakayama****

Daniel A. Ruefenacht*****, K. Srinivas*****

*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

**School of Engineering, Tohoku University

***Geneva University

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

*****Hirslanden Hospital

*****University of Sydney

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Development of computational simulations for optimization of intracranial stent design based on Lattice Boltzmann Method.

2. Details of program implement

A modern technique to treat cerebral aneurysms is to insert a flow diverter in the parent artery. In order to produce an optimal design of such devices, we consider a methodology combining simulated annealing optimization and lattice Boltzmann simulations. Our results surpass, in terms of stent efficiency, those obtained in the recent literature with an other optimization method. Although our approach is still in 2D, it demonstrates the potential of the method. We give some hint on how the 3D cases

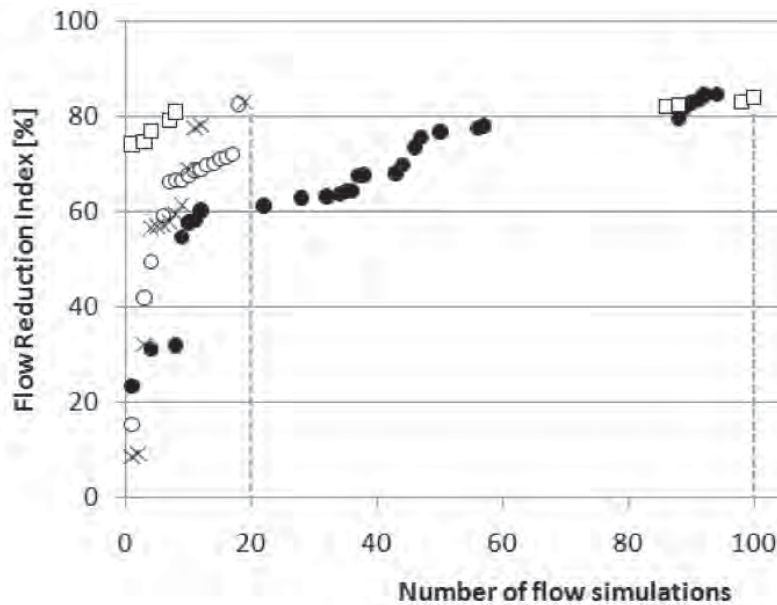


Figure 1 : Evolution of the flow reduction index as number of flow simulations

can be investigated.

3. Achievements

Excellent progress

4. Summaries and future plans

We achieved the development of program for optimization of stent under 2-D, and find that BOI we introduced before is one of the key factors for reducing flow.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] Hitomi Anzai, Makoto Ohta, Jean-Luc Falcone, Bastien Chopard, Optimization of flow diverters for cerebral aneurysms, *Journal of Computational Science*, 3, (2012), pp. 1-7.

[2] H. Hayase, K. Tokunaga, T. Nakayama, K. Sugiu, A. Nishida, S. Arimitsu, T. Hishikawa, S. Ono, M. Ohta, Date I., Computational Fluid Dynamics of Carotid Arteries after Carotid Endarterectomy or Carotid Artery Stenting Based on Postoperative Patient-Specific CT Angiography and Ultrasound Flow Data, *Neurosurgery*, 68(2011) pp.1096-1101, Jan.6 2011.

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

[3] Toshio NAKAYAMA, Shinkyu Jeong, Karkenahalli Srinivas, Makoto OHTA, Optimization of Stent Strut Pattern for Cerebral Aneurysm, *8th International Interdisciplinary cerebrovascular Symposium and 11th Oriental Conference of Interventional Neuroradiology and 6th East Asian Conference of Neurointervention*, Shanghai 2011.9.8-11, pp. 132.

[4] Hitomi ANZAI, Makoto OHTA, Jean-Luc Falcone, Bastien Chopard, Development of the design of flow diverters using automated optimization based on lattice boltzmann method, *8th International Interdisciplinary cerebrovascular Symposium and 11th Oriental Conference of Interventional Neuroradiology and 6th East Asian Conference of Neurointervention*, Shanghai 2011.9.8-11, pp. 135

[5] Yukihiisa MIURA, Toshio NAKAYAMA, Hitomi ANZAI, Makoto OHTA, Study on Effect of Blood Flow Reducing by Stent, *8th International Interdisciplinary cerebrovascular Symposium and 11th Oriental Conference of Interventional Neuroradiology and 6th East Asian Conference of Neurointervention*, Shanghai 2011.9.8-11, pp. 206-211.

*[6] Hitomi Anzai, Jean-Luc Falzone, Bastien Chopard, Makoto Ohta: Effect of Initial Conditions of Stent Geometry on Optimized Design of Flow Diverters, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 98-99.

[7] 中山 敏男, 鄭 信圭, Srinivas Karkenahalli, 太田 信, 脳動脈瘤の形状による分類とステントの最適化, 日本機械学会第 24 回バイオエンジニアリング講演会, 大阪, 2012 年 1 月 7-8 日.

[8] 安西 眸, Jean-Luc FALCONE, Bastien CHOPARD, 太田 信, 格子ボルツマン法を用いた脳動脈瘤治療用ステントの形状最適化プログラムの開発, 日本機械学会第 24 回バイオエンジニアリング講演会, 大阪, 2012 年 1 月 7-8 日.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) Not applicable.

(Press release) Not applicable.

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11070 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Life science |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Study on Friction of Soft Tissue Biomodel by PVA

Makoto Ohta*†, Hiroyuki Kosukegawa*,**
 Vincent Fridrici**, Philippe Kapsa**††
 *Institute of Fluid Science, Tohoku University,
 **LTDS, Ecole Centrale de Lyon
 †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Study on friction behavior with soft tissues and medical metal materials using Poly (vinyl alcohol) hydrogel.

2. Details of program implement

Various medical metallic alloys directly contact with living soft tissues in medical fields. There are sometimes frictional problems; e.g. stents are moved from the targeted site during early implantation. This phenomenon indicates that the friction study of medical metallic alloys under the condition of in vivo is important for the development and design of medical devices.

In order to investigate the friction properties of medical alloys, it is useful to use an in vitro model with mechanical properties similar to those of real soft tissue. In this study, ball-on-disc friction tests have been performed with medical alloys sliding on poly (vinyl alcohol) hydrogel (PVA-H), which has the mechanical properties similar to those of soft tissue [1]. In addition, for investigating the relationship with friction properties, the wettability of the medical alloys was measured.

Table 1. Mean surface free energy of alloys. The unit is mN/m (n = 5).

| | 316L | CoCr | NiTi | TiMoSn |
|--------------|------|------|------|--------|
| γ_s^d | 38.4 | 37.6 | 34.6 | 34.9 |
| γ_s^p | 8.5 | 10.3 | 21.1 | 17.2 |

3. Achievements

Excellent progress

4. Summaries and future plans

Two characteristics phenomena (hydrodynamic lubrication and elastic friction) were observed in the Stribeck curves. Previous studies considered that elastic friction is governed by the adsorption of polymer chain on the surface of alloys. Especially in the elastic friction, 316L and CoCr alloys show higher friction coefficients than NiTi and TiMoSn alloys, while they show similar values in hydrodynamic lubrication. On the other hand, NiTi and TiMoSn show higher polar component of SFE than 316L and CoCr, while there is no large difference in dispersive component in the results of wettability tests.

Considering these results together, the difference of friction coefficient in the elastic friction may be derived from the wettability of alloys and the adsorption of PVA chains on metallic alloys surfaces: in the case of NiTi and TiMoSn, the hydrophilic lubricant can easily intrude the gap between the alloys and PVA-H because of the high polar component of SFE. That may reduce the adsorption points of polymer and consequently the friction coefficient. We can conclude that the surface characteristics of alloys can affect the friction behavior of medical devices.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] Hiroyuki Kosukegawa, Chihaya Kiyomitsu, Makoto Ohta, Control of wallthickness of blood vessel biomodel made of poly (vinyl alcohol) hydrogel by a three-dimensional rotating spin DIP-coating method, *IMECE2011*, pp. 64619.

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

[2] H.Kosukegawa, V. Fridrici and Makoto Ohta, Friction Behavior of Medical Metallic Alloys against Biomimetic Poly (vinyl alcohol) Hydrogel, *24th European Conference on Biomaterials The Annual Conference of the European Society for Biomaterials*, Dublin, Ireland, Sep.4-8, 2011.

*[3] Hiroyuki Kosukegawa, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Boyko Stoimenov, Koshi Adachi, Makoto Ohta, Friction Analysis of Biometal on PVA Biomodel, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.100-101.

[4] Hiroyuki Kosukegawa, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Boyko Stoimenov, Koshi Adachi, Makoto Ohta, Friction of Medical Metallic Alloys on Soft Tissue Biomodel, *International Tribology Conference*, Hiroshima, Japan, 2011.10.30-11.3.

[5] Hiroyuki Kosukegawa, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Boyko Stoimenov, Koshi Adachi, Makoto Ohta, Relationship between Surface Characteristics and Friction Behavior of Medical Metallic Alloys on Soft-tissue-like Hydrogel, *ElyT workshop*, 2012, Mar.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent) Not applicable.

(Award) エドモンドオプティクスジャパン 2011 年度教育助成金プログラムアジア地区 1 位

(Press release) Not applicable.

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11071 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Fundamentals |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

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

Pei-Si Le*, Zhi-Bin Wang*, He-Ping Li*†, Cheng-Yu Bao*, H. Takana**††, and
H. Nishiyama**

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

** Institute of Fluid Science, Tohoku University,

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

In this research, the innovative discharge modeling of the RF APGD with the integration of kinetic model and fluid model has been developed in order to reveal the complex physical-chemical processes in an APGD plasma source.

For a radio-frequency, atmospheric-pressure glow discharge produced by a planar-type plasma generator, the discharge region can be divided into two sub-regions along the direction normal to the electrode, i.e., the sheath (Reg. #1) and the quasi-charge-neutrality (Reg. #2) sub-regions, as shown in Fig. 1.

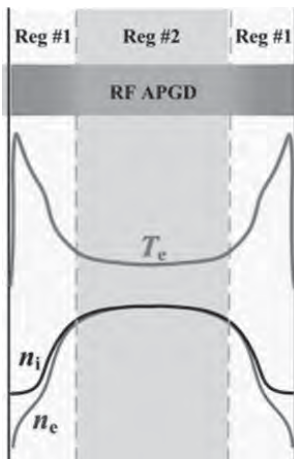


Figure 1: Schematic diagram of a RF APGD.

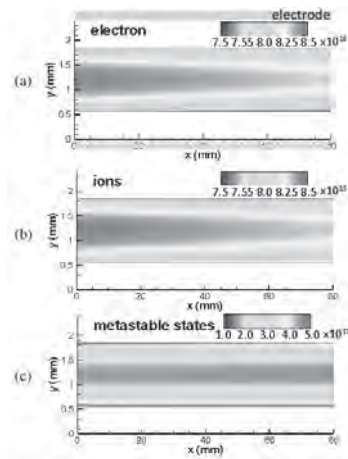


Figure 2: Distribution of (a) electron, (b) ions and (c) metastable species in Reg. #2.

The assumptions used in this hybrid model are as follows: (1) although macroscopic gas flow exists in the discharge region, the influence of the gas flow on the sheath behavior can be neglected, i.e., the coupling between the sheath and the

quasi-charge-neutrality sub-regions is one-way; (2) inside the sheath (Reg. #1), all the chemical reactions [1] are considered, and the plasma is in non-local chemical and thermodynamic equilibrium (Non-LCE/LTE) state with deviations from charge neutrality condition; (3) in the quasi-charge-neutrality sub-region (Reg. #2), only three species (electrons, ions and atoms) are involved, and the plasma is in LCE state but deviates from LTE state with the consideration of the gas flows.

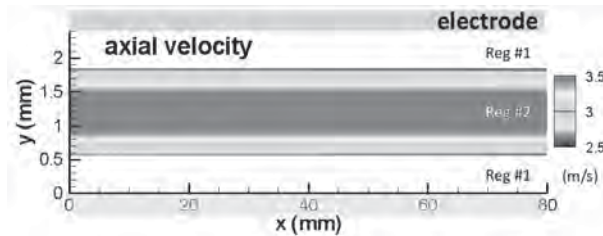


Fig. 3 Distribution of axial flow velocity in Reg. #2.

In order to decide the axial velocity at the inlet and sheath edges, the fluid flow simulation was conducted without chemical reactions. The 2-D simulations in the quasi-charge-neutrality sub-region were conducted by employing the values obtained from 1-D kinetic simulation at sheath edge. Figure 2 shows the distributions of (a) electron, (b) ions and (c) metastable species in Reg. #2. It can be seen that all the species slightly decrease along the flow direction because of decrease in flow density in downstream by gas heating. Figure 3 shows the axial flow velocity distribution in Reg. #2. The thickness of boundary layer is ~ 0.8 mm and velocity gradients appear in Reg. #2.

3. Achievements

Establishing a simplified kinetic-fluid model for simulating the time-averaged, thermodynamic and chemical non-equilibrium features occurring in an atmospheric-pressure glow discharge system.

4. Summaries and future plans

We have established the physical-mathematical models, including the governing equations and the boundary conditions, for the kinetic and fluid simulations in the plasma sheath and flow-affected regions. We are now coupling the energy transfer between electrons and heavy species and the Laplace equation for electric potential in the flow affected region, and comparing the modeling results with measured 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] Z-B. Wang, P-S. Le, H-P. Li, C-Y. Bao, H. Takana and H. Nishiyama: Computational Study on Atmospheric RF Discharge with Kinetic-Fluid Integrated Model, *Proc. of the 11th Int. Symp. on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 72-73.

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

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11072 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Fundamentals |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Advancement of Numerical Method for Unsteady Cavitating Flows

Yuka Iga *†, Wang Guoyu **††
Naoya Ochiai*
Zhang Mindi **, Huang Biao **
* Institute of Fluid Science, Tohoku University,
** Beijing Institute of Technology
†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

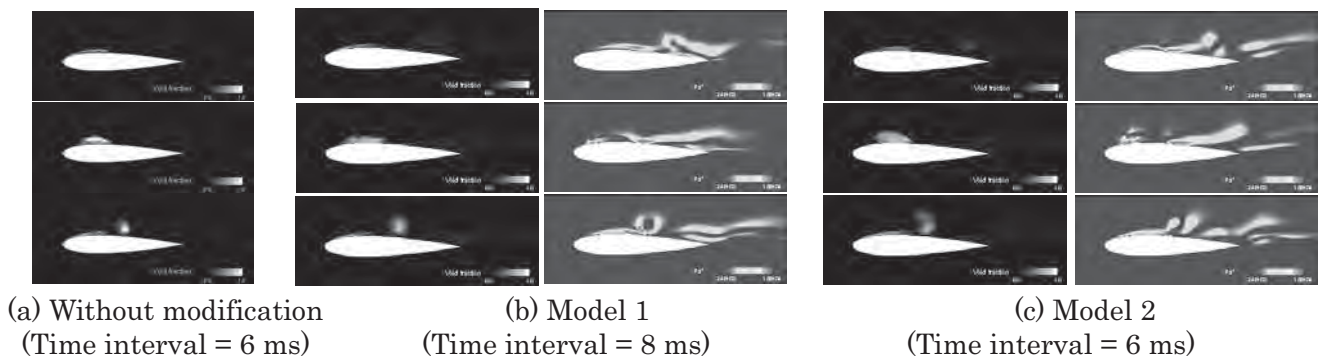
Although some numerical method for cavitating flow field has been developed in the world, all of those cannot predict even a time-averaged lift and drag of a single hydrofoil in a condition of unsteady cavitation. In the present collaborate research, applicants and IFS members will perform benchmark simulation of cavitating flows around a same single hydrofoil. A experimental date obtained by applicant will be used for the evaluation of the benchmark simulation. Through the comparison between each result, we clarify the problem of the numerical method and the model and aim to advance the numerical method for cavitation.

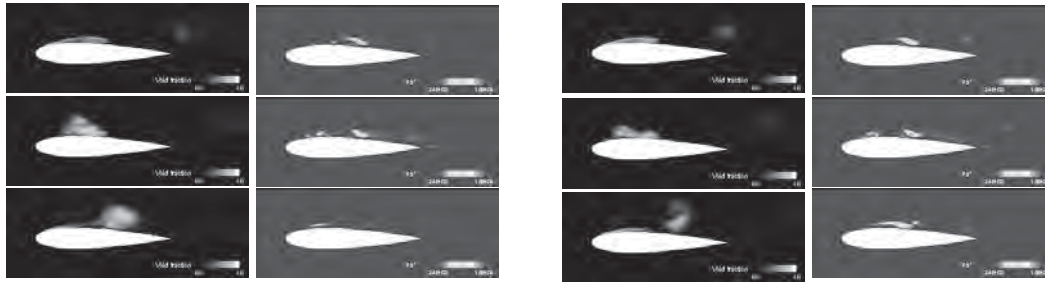
2. Details of program implement

In order to modify the Shinghal's modification, apparent phase equilibrium was assumed macroscopically in phase change in cavitating flow field. The results are shown in Fig.1 by void fraction and apparent phase equilibrium pressure distributions. The result, sheet and cloud cavity volumes are comparatively enlarged and the cloud cavity is kept on the hydrofoil surface in Model 3-1.

Time averaged pressure distributions on the hydrofoil surface in the four cases in Fig. 1 are shown in Fig. 2. Because the model constants are adjusted to the apparent phase equilibrium pressure takes almost same value in each model, the distribution of the four cases are almost same. In all cases, the pressure increase inside the sheet cavity is successfully suppressed. Among the four distributions, the pressure inside the cavity takes lowest value and that decreases in the wake region in Model 3-1. As shown in Fig. 1(d), the apparent phase equilibrium pressure distributes in cavity surface region and that does not exist on the surface inside the sheet cavity.

In the consequence, results are improved in a certain degree, but it is not sufficient. In the future work, another model constant or another configuration of apparent phase change model will be considered.





(d) Model 3-1 (Time interval = 8 ms)

(e) Model 3-2 (Time interval = 8 ms)

Figure 1: Numerical results of the aspect of cavitation by the present four type modifications (NACA0015, $Re = 1.2 \times 10^6$, $\alpha_{in} = 8\text{deg}$, $\sigma = 1.4$)

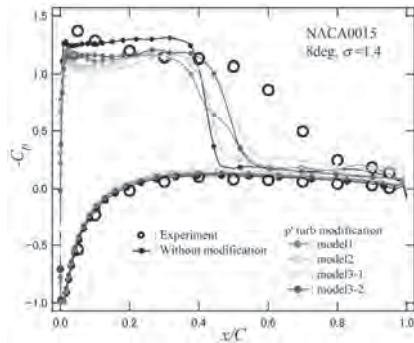


Figure 2: Time averaged pressure distribution on the hydrofoil surface with the present four modifications (NACA0015, $Re = 1.2 \times 10^6$, $\alpha_{in} = 8\text{deg}$, $\sigma = 1.4$)

3. Achievements

In the present study, numerical simulations of cavitating flows around single hydrofoils which are well known for benchmark simulation were performed. Through the comparison between numerical and experimental results, directionality of modification of numerical method was considered although it is still insufficient. And advancement of prediction accuracy of numerical method is discussed by adopting a modification which is based on the idea of apparent phase equilibrium in unsteady flowfield. The result was presented in two times in international conference and is scheduled to be presented in an international conference. I think that the expected outcome has been achieved.

4. Summaries and future plans

We are planning to perform additional experiment about velocity variation around sheet cavitation on a hydrofoil in order to modify the present phase change model.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] Yuka IGA, Naoya OCHIAI, Wang GUOYU, Zhang MINDI, Huang BIAO, "Advancement of Numerical Method for Cavitating Flow Around A Hydrofoil," *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 62-63.

[2] Yuka IGA, "Advancement of Prediction Accuracy of Transient Cavitating Flow around a Hydrofoil," *The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, Incheon Korea, (2012), in CD-ROM.

[3] Yuka IGA, "Phase Change Model based on the Idea of Apparent Phase Equilibrium in Unsteady Cavitating Flow," *The 8th International Symposium on Cavitation (CAV2012)*, Singapore, (2012).

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

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11073 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Energy Research |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Quantitative Evaluation of Plastic Deformation of Structural Materials using EMAT-EC Dual Probe

Liqiang Zhong*, Tetsuya Uchimoto**††

Toshiyuki Takagi**, Luming Li*†

*Aerospace School, Tsinghua University

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Evaluation of plastic deformation is one important issues of the seismic safety evaluation of structures such as nuclear power plants and social infrastructures. The purpose of this project is to study the performance of the EMAT-EC (Electromagnetic Acoustic Transducer and Eddy Current) dual probe in plastic deformation evaluation and develop the advantage of its ability to test ultrasonic velocity and inductive reactance at the same time.

2. Details of program implement

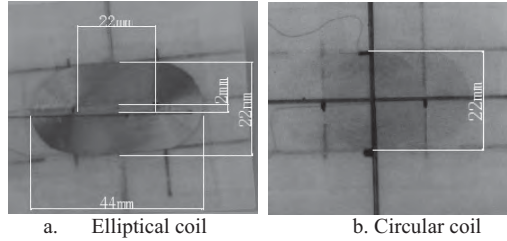


Fig.1 Dual probe of EMAT and ECT

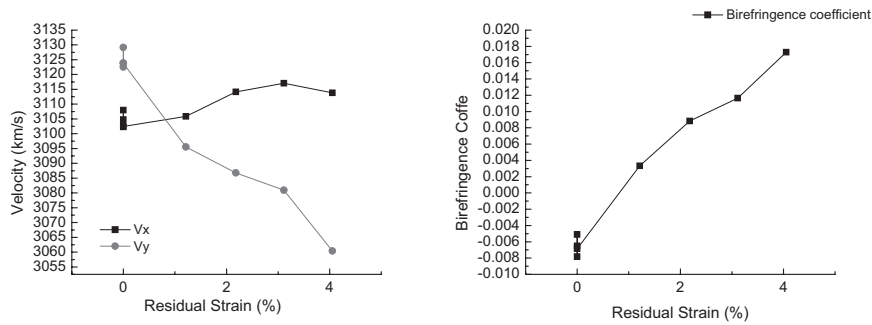
Velocity of ultrasonic waves and inductance of eddy current probe are both available to evaluate plastic deformation. The dual probe in Fig.1 has the abilities to test these two values together. In this project, the EMAT and EC performance of the probe in plastic deformation testing was firstly studied by experiments independently.

The velocity variation due to plastic deformation is small and easily be covered by the testing errors of thickness and time. So EMAR (electromagnetic acoustic resonance) is used to improve time testing, and the birefringence coefficient is used to avoid the errors caused by thickness testing. As shown in formula (1), it is independent to the thickness and the testing accuracy of t is improved by EMAR.

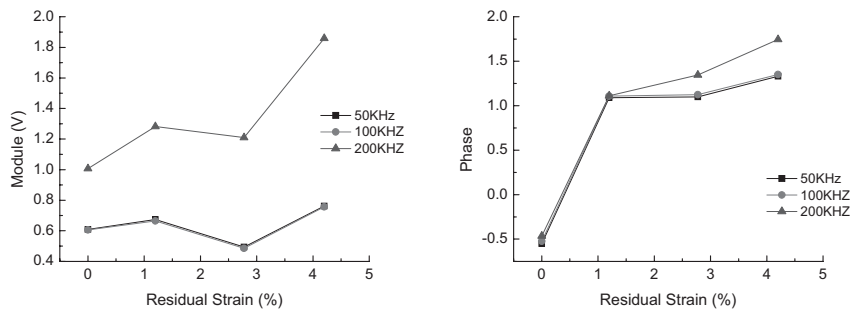
$$B = \frac{(v_x - v_y)}{((v_x + v_y)/2)} = 2 \frac{\frac{d}{t_x} - \frac{d}{t_y}}{\frac{d}{t_x} + \frac{d}{t_y}} = 2 \frac{t_y - t_x}{t_x + t_y} \quad (1)$$

Figure 2 shows the velocities and the birefringence coefficient of ultrasonic shear waves in different polarization orientations. The material is 304 austenitic stainless steel after solution heat treatment. The results show that the birefringence coefficient is generally proportional to the magnitude of residual strain.

However, the results of ECT using the dual probe are unstable, as shown in Fig.3, one reason is that the coils of the dual probe is still too weak and the variation of inductive reactance due to plastic deformation is small.



a. Velocity
b. Birefringence Coefficient
Fig.2. Ultrasonic Velocities Variation Due to Plastic Deformation



a. Modules of ECT signals
b. Phases of ECT signals
Fig.3. Eddy Current Signals Variation Due to Plastic Deformation

3. Achievements

The main achievements are as follows:

- ✓ The changes of ultrasonic velocity and eddy current signals due to plastic deformation tested by the dual probe are studied independently.
- ✓ EMAR and birefringence coefficient are used to improve the EMAT testing.
- ✓ It is verified by experiments that the birefringence coefficient of ultrasonic velocities is basically linear to plastic deformation in 304 austenitic stainless steel after solution heat treatment.

4. Summaries and future plans

In summary, this project studied the change of ultrasonic velocity and eddy current signals due to residual strain. The EMAT performance of this dual probe is good, but the EC performance still need to improve so these two methods are not perform at the same time using the dual probe.

In future plans, first, the EC performance needs to be strengthened, so the coil structure is investigated to increase the sensitivity to plastic deformation. Second, the plastic deformation evaluation with the new dual probe should be studied. Third, a new testing program should be developed, so the advantage of the dual probe, which can test the ultrasonic velocity and inductive reactance together, can make the plastic deformation evaluation better.

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] Liqiang Zhong, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Naoki Chigusa and Luming Li. Nondestructive Evaluation of Austenitic Stainless Steel Residual Strain with EMAT. *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 156-157.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11074 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Energy |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Development of Nondestructive Methods for Evaluation of Layered Materials

Sung-Jin Song*†, Toshiyuki Takagi**††,
Hak-Joon Kim*, Sung Duk Kwon***, Dae-Kwang Kim*,
Tetsuya Uchimoto**, Hiroyuki Miki**
* School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
*** Department of Physics, Andong National University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Detection and characterization of surface/sub-surface degradation caused by environmental factors using ultrasound and eddy current were studied in the previous research. But, evaluations of degraded materials in the layered structures are not easy at all using the developed methods in the previous research. So, nondestructive methods that can evaluate degraded materials in the layered structure are needed.

Thus major objective of this project is development of nondestructive methods including sensors, signal interpretation techniques, and etc using EMAR (Electromagnetic Acoustic Resonance) method and PEC (Pulsed Eddy Current) method, since EMAR and PEC were claimed that those methods have strong potential for evaluation of CUI, coating, and so on.

2. Details of program implement

When incident angle reaches at Rayleigh angle on a liquid-solid interface, various phenomena is shown such as minimum reflection, schoch displacement, leaky wave etc. At Rayleigh incident angle of the specimen, energy is concentrated in surface area and propagated through the surface. During the propagating along the surface area, some energy of the waves leaking to the fluid, it called leaky waves. And, there is null field, because of interaction between reflected waves and leaky waves. Also, we have shifted reflecting waves from the on-axis, it called as schoch displacement. In this paper, we used to the two phenomena such as minimum reflection and schoch displacement of various phenomena at Rayleigh angle to evaluate thin coting layers.

For measuring off-axes profile of the reflected Rayeigh waves, we have modified the experimental system as shown in Figure 1. For verifying the proposed method, CVD diamond coating specimens with different deposition time (2.25hr, 45hr and 6hr) as shown in table 1.

Figure 2 (a) shows measured off- axis profiles of the reflected Rayleigh wave for the CVD diamond coating specimen. As shown Figure 2 (a), peak amplitude and position and null position are changed as increasing deposition time of the CVD diamond coating specimen.

Figure 2 (b) shows relation between peak position of the off-axis profiles (as shown in Figure 2 (a)) and deposition time of the specimen. As shown in Figure 2 (b), Peak position at the off-axis profile increase as increasing deposition time.

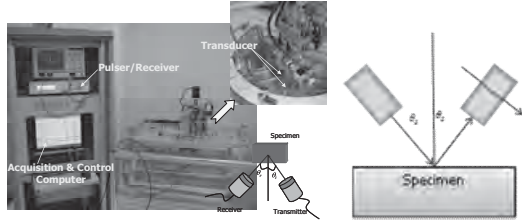
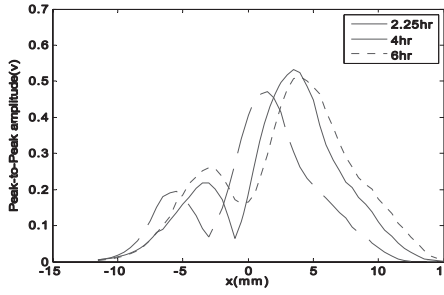


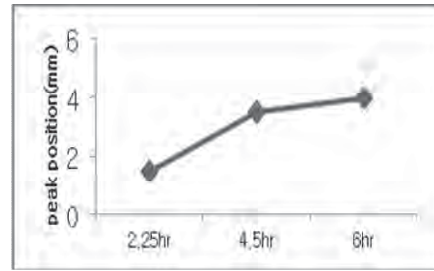
Figure 1: Modified system for measuring off-axis profiles of reflected signals in a pitch-catch immersion setup.

Table 1: Specification of CVD diamond specimens

| Deposit Time (hr) | Diamond Thickness (μm) |
|-------------------|-------------------------------------|
| 2.25 hr | 1.17 |
| 4.5 hr | 3.82 |
| 6 hr | 6.63 |



(a)



(b)

Figure 2: (a) Measured off-axis amplitude profiles of the CVD diamond specimens and (b) relation between peak position of the profiles and deposition time.

3. Achievements

Using Non-specular reflection phenomena of Rayleigh waves, quality of thin coating layer (bonding strength, thickness and etc) can be evaluated. Especially, schoch displacement shows proportional relation to the coating thickness. So, using non-specular reflection phenomena can be evaluate for thin coating layer and grain degree also coating thickness.

4. Summaries and future plans

Rayleigh waves (or surface waves) technique is one of promising method among various nondestructive evaluation methods to evaluate very thin coating layers. At Rayleigh angle for a fluid-solid interface, unique phenomena, such as schoch displacement, leaky Rayleigh waves, null filed in reflected waves, can be observed. Using these phenomena, we can evaluate bonding quality and thickness of thin coating layers. So, in this paper, we propose an evaluation technique of thin coating layers using non-specular reflection of Rayleigh waves.

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] Hak-Joon Kim, Sung-Jin Song, Sung-Duk Kwon, Toshiyuki Takagi, Hiroyuki Miki and Tetsuya Uchimoto: Evaluation of Thin Coating Layers using non-specular reflection of Rayleigh waves, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 168-169.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not Applicable.

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Project code | J11075 |
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Fundamentals |
| Research period | April 2011 ~ March 2012 |

Development of Kinetic Force Method for Two-/Three-Dimensional
Numerical Modeling Relaxation of Rarefied Gas Flows

Vladimir Saveliev**†, Shigeru Yonemura**††
Tomoya Oshima***

*Institute of Ionosphere, National Center of Space Research and Technology

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

One of the members of this project, Vladimir Saveliev, suggested the way to present the Boltzmann collision integral in various divergence forms in exact manner. Therefore, the collision integral can be treated as a force term with collision force \mathbf{F}_{coll} (Kinetic Force). This allows considering a distribution function $f(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t)$ as a density of quasiparticles which are moving under influence of the sum of external force \mathbf{F} and kinetic force \mathbf{F}_{coll} along smooth trajectories in the phase space (Kinetic Force Method).

The DSMC method has been dominant numerical method for solution of the Boltzmann equation for the last 40 years. But, the DSMC method requires a huge number of simulation particles to decrease fluctuations and a very small time step to treat molecular collisions. In Kinetic Force Method, the number of quasiparticles and time step can be significantly reduced to have smooth distribution functions.

The problem is how to calculate effectively the kinetic force on each time step. For that, it is useful to understand the way effect of kinetic force appeared on the bases of two particles dynamics.

2. Details of program implement

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 before collision. As is well known, Ludwig Boltzmann presented it as a product of two one-particle functions and wrote his famous kinetic equation with a collision integral in its right part. In paper [1], 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 in its right part. The Boltzmann equation then follows from this equation without any additional assumptions after a simple integration over velocity and position of the second particle. The scattering operator is simpler than the Boltzmann collision integral and this equation opens new opportunities for mathematical description of gas dynamics. The scattering operator $\hat{\chi}$ acts only on angular components of relative velocity and its main property is the symmetry under the group of rotations. By using this property, it is possible to represent the scattering operator in many equivalent forms. In particular, we exactly transform Boltzmann collision integral to the following Landau-Fokker-Plank like form:

$$I(f, \psi) = \frac{1}{(1+m)^2} \frac{\partial}{\partial v_i} \int du (v^2 \delta_{ik} - v_i v_k) \left(\frac{\partial}{\partial v_k} - m \frac{\partial}{\partial u_k} \right) \hat{\chi}_- f(v) \psi(u) \quad (1)$$

For “grazing” collisions $\hat{\chi}_- \approx \frac{1}{2} \langle 1 - \mu \rangle$ and exact equation (1) reduces to approximate Landau-Fokker-Plank collision integral. In eq.(1) we used the following notations:

$$\hat{\chi}_- F(v) = \int b_-(\mu) F(v') d\Omega_{v'}, \quad b_-(\mu) = \frac{1}{2} \int_{-1}^{\mu} d\mu_2 b(\mu_2) \ln \frac{(1+\mu)(1-\mu_2)}{(1-\mu)(1+\mu_2)},$$

$$\langle 1 - \mu \rangle = 2\pi \int_{-1}^1 b(\mu) (1 - \mu) d\mu \quad (2)$$

$$v = v - u, \quad \mu = \frac{v \cdot v'}{v^2}, \quad m = \frac{m_1}{m_2}, \quad b(v, \mu) = v \frac{d\sigma}{d\Omega}, \quad \int_{-1}^1 b_-(\mu) d\mu = \int_{-1}^1 \ln \left(\frac{2}{1+\mu} \right) b(\mu) d\mu$$

3. Achievements

In the first variant of Kinetic Force method, energy and momentum of quasiparticles representing real molecules were not conserved automatically. In the second variant, we introduced the kinetic equation for auxiliary two-particle distribution function of quasiparticle pairs. The use of quasiparticle pairs guarantees energy and momentum conservation in the system. The agreement between the result for the second variant and the exact solution is rather good but not perfect. And the computational speed of the second variant is rather slow. There is still plenty room for improvement.

4. Summaries and future plans

The improvement of Kinetic Force Method on the bases of a new two particles kinetic equation have been developed. In the future we will do:

1. Further theoretical substantiation of the Kinetic Force Method for 2D/3D numerical simulations of rarefied gas flows.
2. The further development and testing of the algorithm.
3. We will perform the DSMC simulations of the same problems to compare with the Kinetic Force Method. We will feedback results and improve the Kinetic Force Method.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] V.L. Saveliev, Kinetic Equation for Two-Particle Distribution Function in Boltzmann Gas Mixtures and Equation of Motion for Quasiparticle Pairs, Proc. of the 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics. Pacific Grove, Ca, USA, 10-15 July 2010, AIP Conference Proceedings (2011), Vol. 1333, pp.134-139.

*[2] V.L. Saveliev, S.A. Filko, K. Tomarikawa and S. Yonemura, Kinetic Force Method with Quasiparticle Pairs for Numerical Modeling 3D Rarefied Gas Flows, Proc. of the 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics. Pacific Grove, Ca, USA, 10-15 July 2010, AIP Conference Proceedings (2011), Vol. 1333, pp.974-979.

- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
Not applicable
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable

| | |
|------|----------------|
| 課題番号 | J11076 |
| 区分 | 共同研究集会 |
| 課題分野 | エネルギー分野 |
| 研究期間 | 2011.4 ~2012.3 |

次世代高温センサ研究会

Seminar for Next Generation Sensors for Super-High Temperature Environment

高木 敏行*†, 庄司 一夫**††

三木 寛之*, 内一 哲哉*, 田村 仁**, 安住 洋人**, 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

***経済産業省東北経済産業局

†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

大型の各種エネルギープラント、鉄鋼プラント等では、500℃を超える高温域で連続運転され、安全、安心に直結する重要機器が多数存在する。また、温度管理が製品の質に直結する場合もある。しかしながら、これらの温度領域でセンシングの要望がありながら、これらのセンサに対しては、あまり研究開発対象として注目されてこなかった。その理由として、1) シーズ側がニーズを知らないために研究開発を進めていない、2) ニーズ側は計測は困難であるがノウハウにより生産管理しているか、あるいは計測をあきらめている、3) 標準化がされていないので使用をためらう、などが考えられる。しかしながら、温度のみでなく、圧力、変位、厚さなどの計測が可能になれば、製品や設備の管理合理化による産業上のインパクトは非常に大きい。

本研究会では上記の議論を行うために講演会を開催するのみでなく、将来の大型プロジェクト提案に向けた提言を行うことも視野に入れた。

具体的には下記について研究会を開催して調査した。

1. 高温センサ研究開発状況

- 1.1 構造物の常態計測に向けての産総研開発の非破壊検査技術およびセンサ
- 1.2 高温超音波センサの開発と適用
- 1.3 電磁超音波共鳴法による配管減肉オンラインモニタリング
- 1.4 高温用温度センサ
- 1.5 機能性分子センサを用いた表面温度計測
- 1.6 光計測を用いたセンサの内部ノイズと外部ノイズの除去に関する一考察
- 1.7 LTGA圧電単結晶 温度センサ

- 1.8 構造管理・設備管理を担う光ファイバセンシング
- 2. 電力業界での高温センサの必要性
 - 2.1 開口合成3次元UT法と高温用マトリックスアレイセンサ
 - 2.2 火力発電における高温センサ利用状況とニーズ
 - 2.3 高速炉の実用化に向けた検査技術の開発
- 2.4 情報収集・監視システム
- 3. 鉄鋼/金属業界での高温センサの必要性
 - 3.1 鉄鋼プロセスにおける高温センサのニーズと開発事例
 - 3.2 ダイカストの品質向上のための高温計測技術
- 4. 化学業界での高温センサの必要性
 - 4.1 高温センサに利用可能な膜材料の開発動向
 - 4.2 ガラス製造における高温センシングのニーズと課題
- 5. 移動体での高温センサの必要性
 - 5.1 ロケットエンジン用高温センサ
- 6. 海外調査報告
 - 6.1 高温環境モニタリングの研究開発調査

3. 研究目標の達成状況

本研究会では成果を報告書にまとめた。報告書は平成23年度に開催された3回の次世代高温センサ研究会の講演会(表1)、4回の幹事会、13回の研究会事務局打ち合わせ、さらに研究者、企業へのアンケートや訪問の成果をまとめたものである。これまで500℃を超える領域での様々なセンサのシーズ、ニーズについて議論した場はないと思われる。本研究会は、高温領域でのセンサが新たな学問分野、研究開発分野、そしてビジネスの対象となることに寄与できるものと考えている。

表1 次世代高温センサ研究会 講演会開催状況

| 回 | 開催日時 | 開催場所 | 参加者数(人) |
|---|------------|--------------|---------|
| 1 | 2011/08/08 | 東北大学 流体科学研究所 | 52 |
| 2 | 2011/11/18 | 〃 | 43 |
| 3 | 2012/02/13 | 〃 | 36 |

4. まとめと今後の課題

今年度は現状の現場ニーズと現場で使用されているセンサに係るシーズの探索が主であったが、今後は大学の先端的又は画期的な高温対応センサに係るソリューションの糸口となるシーズを材料～実装までの領域を探索することで、産学の個別具体的なコンソーシアムの形成が行われ、プロジェクト創出に繋がっていくものとする。

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
なし
- 3) その他(特許、受賞、マスコミ発表等)
高木敏行編、次世代高温センサ研究会報告書、流体科学研究所、平成24年3月26日、全158ページ。

| | |
|------|---------------|
| 課題番号 | J11077 |
| 区分 | 一般共同研究 |
| 課題分野 | 基盤研究分野 |
| 研究期間 | 2011.4～2012.3 |

直接数値計算による中立・安定・不安定境界層乱流の構造に及ぼす境界層外乱れの影響の解明
 Direct Numerical Simulation on the Effects of Free-Stream Turbulence on Neutral, Stably
 and Unstably Stratified Turbulent Boundary Layers

酒井 康彦*†, 早瀬 敏幸**††

長田 孝二*, 鈴木 博貴***

*名古屋大学工学研究科, **東北大学流体科学研究所, ***名古屋工業大学工学研究科

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

境界層外の乱れが壁面境界層の乱流特性とそこでの熱輸送に大きな影響を及ぼすことが国内外の室内実験によって指摘されている。ところが、そのメカニズムについては、壁面のごく近傍での乱流計測や瞬間変動圧力場等の測定が非常に困難であることから、実験的解明が極めて難しい。そこで、本公募共同研究では、実験と同じ乱流格子や他の乱流プロモータによって一様流中に作られる乱れを高精度に再現できる三次元直接数値計算 (DNS) コードを独自開発し、中立および安定・不安定成層境界層乱流に及ぼす境界層外の乱れの影響を数值的に明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果の内容

まず、粘性項の時間積分に関するサブルーチンの開発を行った。本解析において、乱流境界層が解析対象となることから、壁面近傍においては壁に垂直な方向の粘性項の時間積分に陰解法が導入されている。陰解法の導入は計算コストを増加させることからその計算コストの低減は重要である。そこで、陰解法としてクランクニコルソン法を用いている点に着目し、対角行列解法との組み合わせによって少ない計算コストの下で解析的に時間積分を行うサブルーチンを構築した。テスト計算を平行平板間乱流によって行い、計算量が 3/4 に程度に減少していることを確認した。その後、境界層外乱れとして用いられる格子乱流およびインペリアルカレッジロンドンの Prof. J. C. Vassilicos によって提唱されたフラクタル格子乱流の計算を、また格子乱流の影響を受けた乱流境界層に関する計算を実行した。格子乱流に関しては、速度変動勾配の高次統計量の全成分の主流方向変化を示した。この量は乱流の本質に関わる重要な量であるが、全成分を計測することは困難であり既往計測例が極めて少ない。本研究では格子乱流という実験解析において最も基本的な乱流場において上記の量を解析した。この結果は重要であるので、速報として Journal of Physics: Conference Series において発表を行った。また近年、格子乱流について指摘されている乱流エネルギーと積分スケールの三乗の積が保存量となる性質について、次元解析によって乱流のレイノルズ数が低い場合においてもその性質が保たれる可能性を指摘したのち、豊橋技科大学の蒔田教授のグループによって提案された減衰指数を厳密に算出する方法を導入することによって、低乱流レイノルズ数においてもその性質が保たれることを示した。また、フラクタル格子乱流に関しては、実験計測が困難な量の一つとして認識されている静圧変動の主流方向変化を示し、それ

が速度変動と同様に指数関数で良く近似できることを示した。両格子乱流についてのこれらの結果はこれまでに示されていない重要な結果であり、近日中に投稿の予定である。格子乱流の影響を受けた乱流境界層に関しては、その影響における格子乱流の積分スケールの影響を調べるため、積分スケールの変化を乱流格子の間隔を変えることによって設定し、計算を実行した。計算は終了し現在考察を進めており、近く海外学術誌に投稿予定となっている。

3. 研究目標の達成状況

まず乱流境界層を高効率で計算を行うことを目的としてサブルーチンを新たに構築した。その後、独自開発したコードを用いて境界層外の格子乱流(格子乱流およびフラクタル格子乱流)、および境界層外乱れ(格子乱流)の影響を受けた乱流境界層の直接数値計算を実行した。まず格子乱流に関しては、速度変動勾配の高次統計量を格子乱流という実験解析において最も基本的な乱流を対象として算出し、この成果は速報として発表された。また、格子乱流の本質に関わる性質が低乱流レイノルズ数においても保たれることを示した。フラクタル格子乱流に関しては静圧変動という実験解析困難な量を解析した。境界層外乱れの影響を受けた乱流境界層に関しては、境界層外の格子乱流の積分スケールを変えることを意図して異なる格子間隔を設定し、解析を進めた。以上に示すこれらの成果により、当初の研究目標を達成できたものと評価される。

4. まとめと今後の課題

高効率な計算を実現するサブルーチンを新たに構築し、その導入効果を平行平板間乱流において示した。その後、独自開発したコードを用いて境界層外の格子乱流、および境界層外乱れの影響を受けた乱流境界層の直接数値計算を行った。これらの成果は速報として国外において発表され、さらに多くの成果を得た。境界層外乱れによる乱流境界層の構造の変化については国内外で強い関心をもたれており、一刻も早い数値的解明が必要である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai and T. Hayase: DNS on a Spatially Developing Grid Turbulence, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.318, (2011), 032043.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai and T. Hayase: DNS on a Spatially Developing Grid Turbulence, *Proc. of the 13th European Turbulence Conference (ETC13)*, (2011), No. 092-ETC13.

[3] H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, H. Toshiyuki and Y. Hasegawa: Numerical Simulation of Turbulence Generated by the Multiscale Grid, *Bulletin of the 2nd UK-Japan Bilateral Workshop and 1st ERCOFTAC Workshop on Turbulent Flows Generated/Designed in Multiscale/fractal Ways*, (2012), p.11.

*[4] Y. Sakai, K. Nagata, H. Suzuki and T. Hayase: Direct Numerical Simulation on the Effects of Free-stream Turbulence on a Turbulent Boundary Layer with Heat Transfer, *Proc. of the 11th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI-2011)*, Sendai, (2011), pp. 38-39.

[5] 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸: 乱流境界層中の熱輸送に及ぼす主流乱れの影響, 熱工学コンファレンス 2011, (2011), Paper No.C124.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) なし (受賞) なし (マスコミ発表) なし

2. 研究成果報告書

<分野横断型公募共同研究プロジェクト>

| | |
|------------|---------------|
| 分野横断プロジェクト | |
| 課題番号 | J10B01 |
| 課題分野 | 次世代反応流体科学 |
| 研究期間 | 2011.4～2012.3 |

[全体概要]

次世代反応流体科学の創成
Frontier Science of Next Generation Reactive Fluid

研究代表者 石本 淳
サブリーダー1 佐藤 岳彦
サブリーダー2 丸田 薫
サブリーダー3 石本 淳

1. 研究目的

ライフサイエンス、燃焼科学、高応答性流体科学の三つの研究領域からなるプロジェクト推進し、生物・化学・高応答流体の各種反応性流動に関する異分野融合型の学理創成を行う。近い将来、反応を伴う流動科学領域は次世代流体科学の主要学問領域として重要な地位を占めることは確実視されていると考えられるが、物理化学的プロセスや熱流動の素過程に多くの未解明な部分を残しているのが現状であり、工学的に十分な検討が行われているとはいえない。本プロジェクトにおいて次世代反応性流体科学の学理構築を推進するためには、既存の単一領域の発展型研究から脱却し異分野融合型の新しい発想からなる研究を推進する必要がある。そこで本研究においては、現在の先進流体科学をベースとした上記3研究領域の異分野融合の発想から成る先進的アプローチを行い、次世代反応性流体科学の創成を目指すものである。

2. 研究成果の内容

本年度は研究から2年目に当たり、徐々にではあるが各研究分野間の融合研究成果が形成されつつある。さらに次世代反応性流動に関わる3研究プロジェクトの融合研究の指針と各研究グループによる進捗状況の確認を行った。

特に本年度は高応答性流体プロジェクトの石本研究グループと寒川研究グループの融合研究により新型のナノデバイス洗浄方式の開発に進展が見られたので、この研究成果概要を紹介する。混相流体工学とナノデバイス工学という異分野を専門とするグループが相互連携を行うことにより、新型の反応性混相流体工学応用機器の創成が進展し、異分野融合による新発想の研究成果が得られつつある。なお、本研究成果に関しては、日経産業新聞にその内容が掲載され産業界からの注目を集めている(2011年10月7日掲載)。

本研究においては過冷却液体窒素と極低温ヘリウムガス(寒剤)の高速衝突により連続生成される微細固体窒素粒子から成るマイクロ・ナノスラッシュ噴霧流の有する超高熱流束冷却特性とそれに伴うレジスト熱収縮効果を有効活用した新型半導体洗浄法に関する検討を行う。マイクロスラッシュ噴霧を高温加熱ウエハー面上のレジストに高速衝突させ、粒子の慣性力と噴霧の熱流体力学的効果、超高熱流束急冷によるレジスト熱収縮効果の相互作用により、アッシングプロセスを経ずにレジストをウエハー面上からはく離・除去、洗浄するという、レジスト除去・洗浄同時プロセス機構から成るドライ型アッシングレス洗浄システム

マイクロ固体窒素噴霧を用いたナノデバイス洗浄に関する融合研究

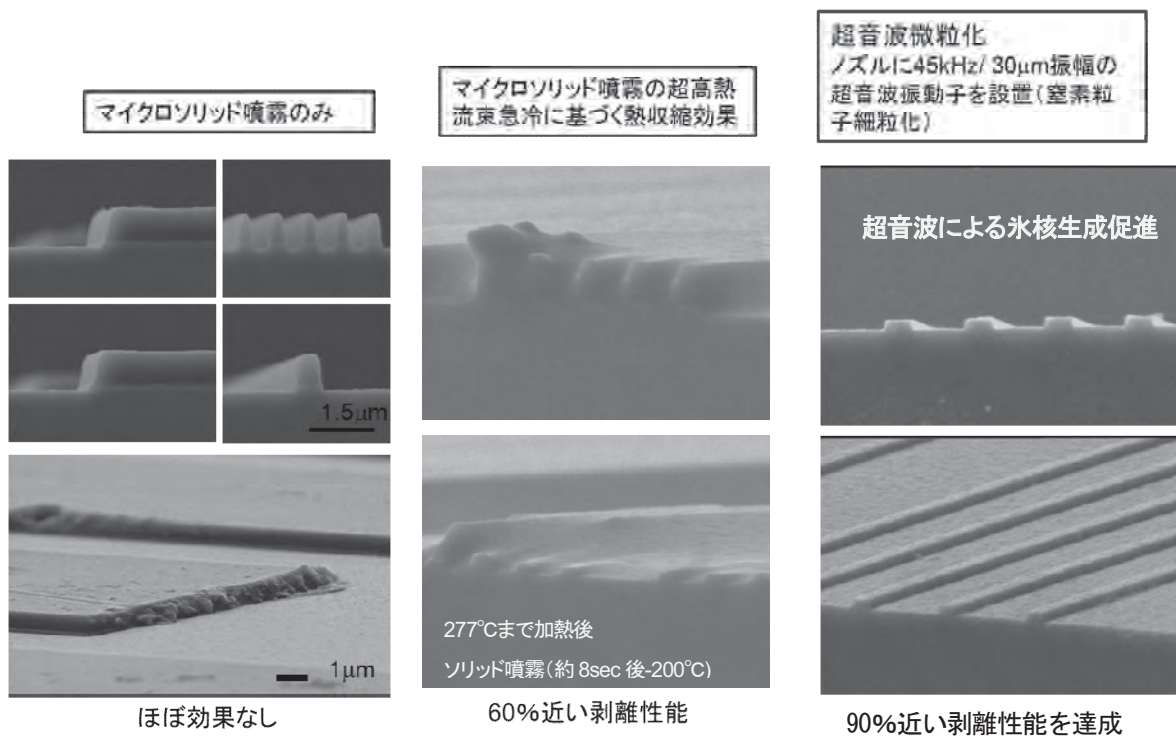
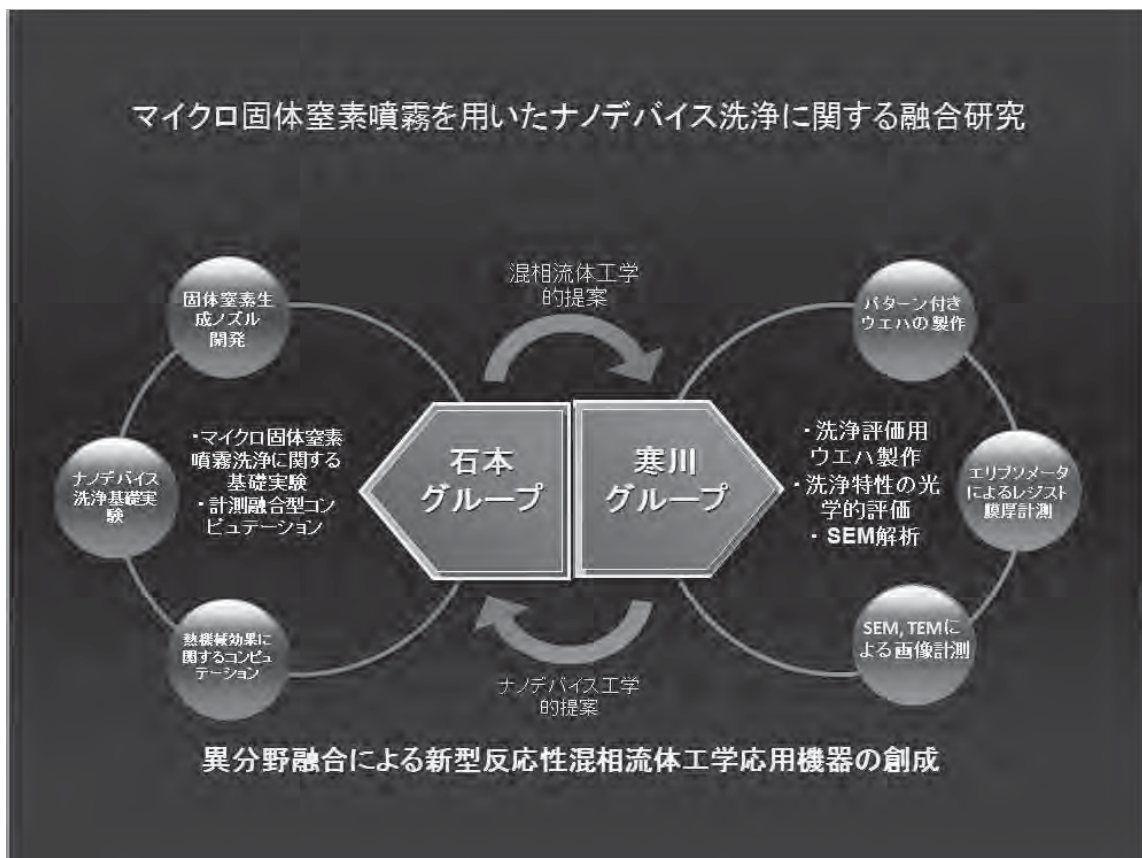


図1 マイクロ・ナノソリッド噴霧によるレジスト剥離・洗浄性能

を開発する。その結果、マイクロ・ナノスラッシュジェットの衝突による物理的レジストはく離と超高熱流束急冷による熱収縮の相乗効果を利用し、フォトレジストの一部をはく離することに成功した。加熱無しの場合、レジストはく離には至らないことから、レジストはく離に及ぼす熱収縮効果の影響はかなり大きいことを明らかにした。

実験は以下の2種の条件下によって行った。1) マイクロソリッド噴霧単体でその慣性力によりレジストのはく離・洗浄を行ったもの、2) ウエハーレジストをあらかじめ高温加熱した後、マイクロソリッド噴霧を吹き付け熱収縮の効果でレジストのはく離・洗浄を行ったものである。以下にそれぞれの結果を示す。

1) **マイクロソリッド噴霧のみによる洗浄** マイクロソリッド噴霧における SN_2 粒子が有する慣性力によるレジストのはく離・洗浄性能を確認するため、非加熱のウエハーレジストに対し、そのままマイクロソリッド噴霧を照射して、ウエハーレジストのはく離性能を評価する。その結果、照射する前との変化が見られず、マイクロソリッド噴霧によるレジストのはく離・洗浄性能を確認することができなかった。本結果より、洗浄の際には、熱力学的あるいは流体力学的に何らかの付加効果を併用する必要があることが判明した。

2) **超高熱流束冷却に基づく熱収縮効果洗浄** マイクロソリッド噴霧の超高熱流束急冷に基づく熱収縮効果を利用したウエハーレジストはく離・洗浄特性に関し検討を行う。まず、ウエハーに密着している基盤をヒーターで加熱後、マイクロソリッド噴霧を照射することにより超高熱流束急冷に基づく熱収縮効果利用による、ウエハーレジストのはく離・洗浄特性を評価する。噴霧照射時間 t_e を変化させてSEM観察を行った結果を図1に示す。それぞれ、 $t_e = 5 \text{ min}$, 10 min , 15 min の照射を行った場合の結果である。熱収縮の効果を高めるために、マイクロソリッド噴霧を照射する直前に、ヒーターを用いてウエハーを550 Kまで急加熱した。急加熱の後マイクロソリッド噴霧を照射させ急冷させると、わずか8秒後に200 Kの温度降下を確認した。最もはく離特性の高い、 $t_e = 15 \text{ min}$ の結果に着目すると、マイクロソリッド噴霧の粒子が持つ慣性力と超高熱流束急冷による熱収縮の効果で60%近いはく離・洗浄性能が達成されていることが分かる。本研究より、ウエハーの初期加熱無しの場合、レジストはく離には至らないことから、レジストはく離に及ぼす熱収縮効果の影響はかなり大きいと言える。従来型のレジストはく離・洗浄システムにおいては、熱収縮効果を積極的に活用しようとする発想は存在しなかったが、本研究により初めてレジストの急速熱収縮効果に基づく SiO_2 膜からのはく離と除去が可能であることを明らかにした点は本研究の大きな成果であると考えている。

3) **超音波振動子を用いた固体窒素微粒化促進効果による洗浄特性** 上述のウエハー超高熱流束冷却条件に付加して、マイクロ・ナノ固体窒素粒子生成用二流体ノズルに超音波振動子を設置し、氷核生成の促進と固体窒素粒子の微粒化促進を行い、洗浄特性の評価を行った。その結果マイクロ固体窒素噴霧による洗浄メカニズムは、1) マイクロソリッド噴霧の慣性力の効果、2) 基盤加熱後に照射するマイクロソリッド噴霧の持つ超高熱流束急冷によるレジスト熱収縮の効果、3) 超音波振動子設置による氷核生成促進と固体窒素粒子の微粒化促進の相乗効果により、良好な洗浄特性を得られることが判明し、90%程度のウエハーレジストはく離・洗浄性能を達成しうるということが明らかとなった [1]。

(代表的研究成果)

- [1] Jun Ishimoto, Daisuke Tan, U Oh, Tomohiro Kubota and Seiji Samukawa
Integrated Experimental and Numerical Study of Thermomechanical Resist Removal-Cleaning
Performance Using Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Spray
ECS Transactions, Vol. 41, No.5, pp. 83-90 (2011).

【各研究グループの融合研究指針】

ライフサイエンスグループにおいては、細胞・生体組織にかかわる反応・輸送現象をマルチスケールで明らかにし、細胞と流動場の相互作用に関する研究、燃焼グループにおいては利用技術が高度化する燃焼・反応現象の解明・モデル化・制御を通じて、持続可能な社会構築に貢献する環境負荷の低い次世代反応流体科学技術の創出に関する研究、高応答性流体グループにおいては、外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体・熱流動を対象とし、その異分野融合型研究開発を開始するための基盤構築を行った。詳しい内容に関しては次ページ以降の各研究プロジェクト（研究小グループ）の報告内容を参照のこと。

3. 研究目標の達成状況

ライフサイエンス、燃焼科学、高応答性流体科学の3プロジェクトにおいて次世代反応性流動に関連するテーマ設定と研究基盤の整備ならびに導入的研究を実施した。震災のため研究の実施が一時的に中断されたが、徐々に復旧しつつある。詳しい内容に関しては次ページ以降の各研究プロジェクト（研究小グループ）の報告内容を参照のこと。

4. まとめと今後の課題

現在のところ、徐々にではあるが各研究分野間の融合研究成果が形成されつつあり次世代反応性流動に関連する先進的成果を得るに必要な研究体制が整ってきていると言える。現在の研究体制に付加して3プロジェクト間の相互連携を行うことが分野横断型研究としての有効性を外部発信することにつながると考えられる。そこで次年度からはプロジェクト間の相互連携研究テーマとして、高応答性流体プロジェクトを基幹とした、1. ナノ固体窒素粒子噴霧を用いたヒト iPS 細胞の超高熱流束ガラス凍結（ライフと連携）、2. バイオ燃料の微粒化と噴霧燃焼特性（燃焼と連携）に関する融合研究を推進することを計画している。

[サブテーマ 1]

細胞・生体組織における反応・輸送現象に関する研究
Research on Reaction and Transport Phenomena with Cell/Living Tissue

佐藤 岳彦^{1)†}, 小原 拓¹⁾, 太田 信¹⁾,
白井 敦¹⁾, 小宮 敦樹¹⁾, 富田 典子¹⁾
¹⁾東北大学流体科学研究所
†サブリーダー

1. 研究目的

細胞・生体組織にかかわる反応・輸送現象をマルチスケールで明らかにし、細胞と流動場の相互作用に関する基礎学理を構築する。本目的を達成するために、①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応（佐藤）、②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究（小原）、③生体適合材料と細胞の相互作用（太田、富田）、④血管内皮細胞上における好中球の挙動に対する fMLP 刺激の影響（白井）、⑤物質・熱の細胞膜輸送現象の実験的研究（小宮）の各研究課題について取り組む。

2. 研究成果の内容

本年度は、上記研究課題に対応して下記研究成果を得た。

①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応（佐藤）

プラズマ流により生成された化学種の細胞に与える影響について、DNA マイクロアレイにより網羅的遺伝子発現解析を行った。図 1 に網羅的遺伝子発現解析による各暴露条件に対する遺伝子発現数の変化を示した。プラズマ処理培地 (210 s 照射:P210s と 40 s 照射:P40s) と過酸化水素添加培地 (304 μ M:H304 μ M と 51 μ M:H51 μ M) を準備し、P210s と H304 μ M は 20s, P40s と H51 μ M は 60s 暴露した。図中の C はコントロールで、各条件の比を取り、発現量が 2 倍以上増えたときと 1/2 倍以下に減少した時の遺伝子発現数を縦軸に示している。これより、P40s と H51 μ M では、コントロールに比べて遺伝子発現量が 2 倍以上に増大している遺伝子数が減少した数に比べて 1000 以上増えていることが明らかになった。また、照射時間が長い P210s と過酸化水素濃度が高い H304 μ M は、P40s や H51 μ M よりも発現量が 1/2 倍以下になる遺伝子数が大きく増大することが明らかになった。

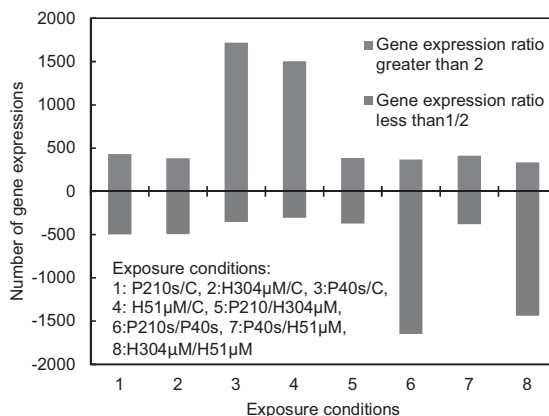


図 1：網羅的遺伝子発現解析による各暴露条件に対する遺伝子発現数の変化

②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究（小原）

水中に自己組織化的に形成される各種の脂質二重膜について、その膜面平行／垂直方向の熱輸送特性を計測し、脂質種の違いが輸送特性に与える影響を解析した。二重膜の膜面垂直方向熱抵抗において大きな部分を占める単層膜間の熱抵抗は、脂質分子尾部の2本のアルカン鎖の長さが異なる SMPC において顕著に減少すること、膜面垂直方向の熱伝導率は、アルカン鎖長が長くなるほど大きくなることなどを見出した。

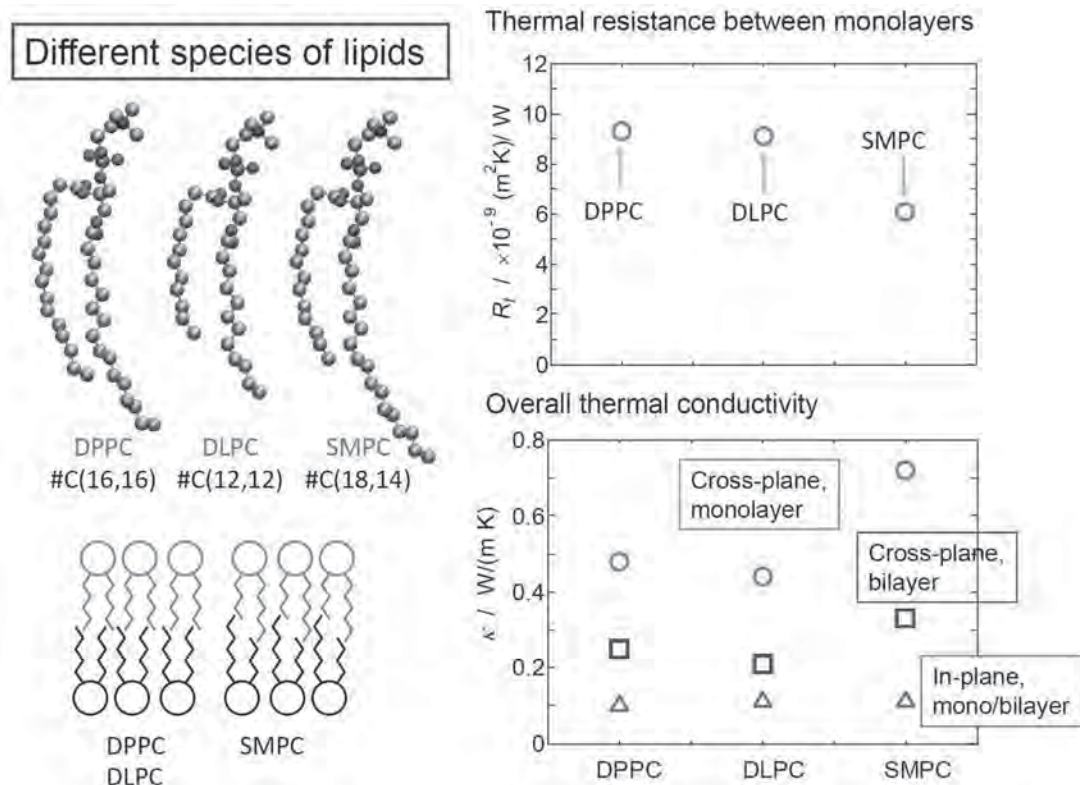


図2：脂質二重膜を形成する各種脂質分子と熱輸送特性。（右上）単層膜間の熱抵抗，（右下）単層膜・二重膜の膜面平行／垂直方向熱伝導率。

③生体適合材料と細胞の相互作用（太田，富田）

生体適合性材料を用いた生体軟組織の生体外循環システムモデル開発のため、今年度は血球モデルの要素技術の研究を行った。特に、血球モデルは脂質膜と膜孔タンパク質で構成されるので、膜孔タンパクの形成が脂質膜に及ぼす影響について、クラスター形成とシングル膜孔形成が溶血活性に及ぼす影響を調べた。経過時間毎に溶血活性（ヘモグロビンの流出量）および、血球内のカリウムイオンの流出量を計測し、同時間における膜上のクラスターを構成する膜孔数と、シングルで存在する膜孔数の割合を計測した。その結果、膜孔の内径（2nm）より小さいカリウムイオンは5分でほぼ完全に溶出し、遅れてヘモグロビンの溶出が100%に達した。シングル膜孔数の割合は5分後が最も多く、その後減少した。一方、クラスターを構成する膜孔数の割合は、経過時間とともに上昇した。

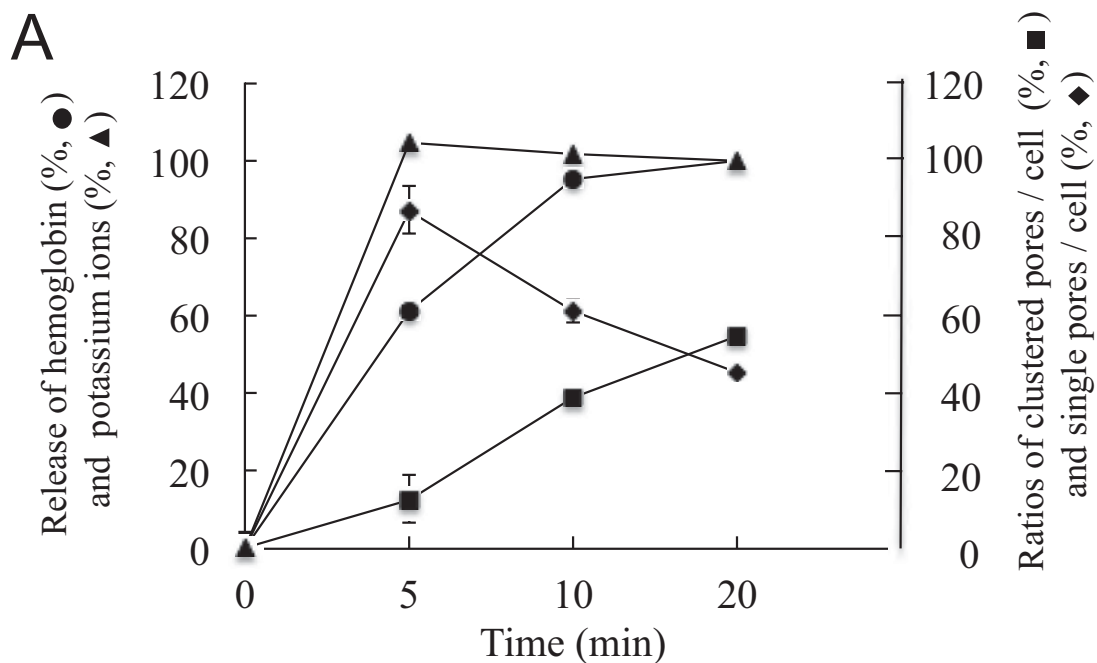


図 3 : クラスタ形成とシングル膜孔形成が溶血活性に及ぼす影響

④血管内皮細胞上における好中球の挙動に対する fMLP 刺激の影響 (白井)

傾斜遠心顕微鏡を用いて、ガラス平板上に培養したヒト臍帯静脈内皮細胞(HUVEC)に押しつけられながら移動する HL60 細胞(好中球のモデル細胞)の挙動を観察した。ここで、好中球の走化因子の一つである N-formyl-methionyl-leucyl-phenylalanine (fMLP)を用いて HL60 を刺激し、この刺激が挙動に与える影響を解析した。47pN で HUVEC に押しつけながら 10, 30 および 50pN で HL60 細胞を駆動した場合の平均移動速度を比較した結果、図 4 に示すように、HL60 細胞は、fMLP の刺激により平均移動速度が上昇した。そして、これは HUVEC 基板に対する付着率の減少に起因することが確認された。好中球は fMLP 刺激により固さを増すことから、押しつけ力下における HL60 の接触面積が fMLP 刺激により減少し、接着分子の結合量が減少することに起因すると考えられる。

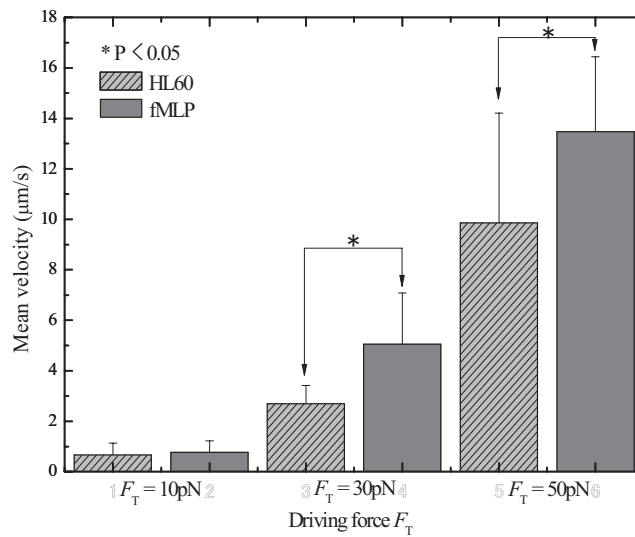


図4：各駆動力 F_T における，fMLP 刺激が HL60 細胞の HUVEC 基板上における平均移動速度に与える影響

⑤物質・熱の細胞膜輸送現象の実験的研究（小宮）

流体研既有的の干渉計を用いて微小非定常拡散場の可視化を行い，タンパク質が特異に有する構造が拡散現象に与える影響について評価をした．試料として Lysozyme, BSA を用い，各タンパク質の物質拡散係数濃度依存性を評価した．BSA の分子量は Lysozyme の分子量よりも大きいので，溶媒による抵抗力が大きくなり，図5に示すように，BSA の拡散現象は Lysozyme よりも遅くなることがわかる．また，Lysozyme と BSA では，濃度依存の傾向が異なり，これは現在理論的に研究が進められているタンパク質の分子構造が hard sphere か soft sphere かによる違いと定性的に一致している．

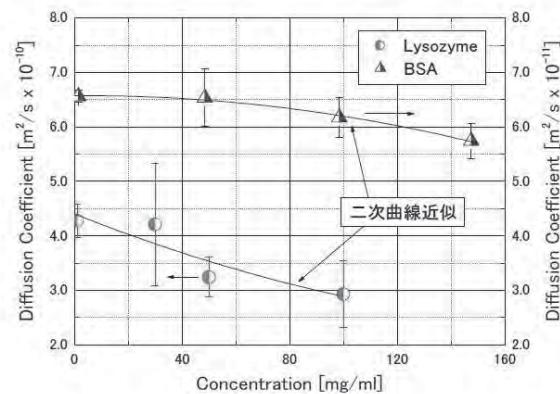


図5：Lysozyme と BSA の物質拡散係数濃度依存性

3. 研究目標の達成状況

本年度の研究目標は概ね達成し，順調に研究を遂行している．各研究課題に対する個別の達成状況は下記の通りである．

①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応（佐藤）

本年度は，プラズマ流の刺激に対する遺伝子群発現解析を進め，プラズマ流の照射条件により，遺伝子群の発現パターンが変化することを明らかにすることに成功し，細胞反応を可

る遺伝子群発現機構の解明に向けて大きく前進した。

②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究 (小原)

脂質二重膜の熱輸送に関して解析をほぼ完了し、各種脂質分子に対して界面の性状と熱抵抗を計測するなど成果を得た。

③生体適合材料と細胞の相互作用 (太田, 富田)

細胞表面に存在するタンパク質の形成について解明したことによって、本相互作用について大きく進展させることができた。

④血管内皮細胞上における好中球の挙動に対する fMLP 刺激の影響 (白井)

fMLP 刺激した HL60 細胞を用いた実験により、当初の目標通りに、走化因子による刺激が HL60 の移動速度に影響を与えることが示された。

⑤物質・熱の細胞膜輸送現象の実験的研究 (小宮)

本年度の予定では、狭チャンネル内でのタンパク質拡散を評価することも挙げられていたが、分子構造が拡散現象に及ぼす影響評価について集中的に実験観察を行い、生体高分子物質移動現象に関して有用な知見が得られたと考えられる。全体としては目標に対して 80%の達成度とすることができる。

4. まとめと今後の課題

今後の課題については、下記の通りである。

①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応 (佐藤)

網羅的遺伝子解析から Gene Ontology 解析を進め、細胞の各機能がどのように応答しているか解析する。また、リアルタイム PCR による遺伝子群発現の再現性について検証する。

②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究 (小原)

今後は運動量の伝搬メカニズムと脂質二重膜の摩擦特性の解明が大きな課題である。

③生体適合材料と細胞の相互作用 (太田, 富田)

今後、細胞膜の大部分を占める脂質膜が本作用に与える影響を調べる。

④血管内皮細胞上における好中球の挙動に対する fMLP 刺激の影響 (白井)

従来の研究では、血球の活性化により血管内皮細胞への付着率が増加することが報告されており、本結果と逆である。その原因の一つとして、HL60 細胞と好中球に、走化因子に対する反応に差があることが挙げられる。そこで、HL60 細胞を分化して好中球様細胞にする必要がある。また、走化因子による刺激は、血球だけではなく血管内皮細胞にも作用する。そのため、血管内皮細胞の刺激による血球挙動の影響を解析する。

⑤物質・熱の細胞膜輸送現象の実験的研究 (小宮)

光学干渉計を用いてタンパク質の分子構造が拡散現象に与える影響について定性的に評価をした。今後は生体組織内環境を模擬した状態でのマイクロチャンネル内の物質移動現象を取り扱っていく。

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

[1] Tetsuji Shimizu, Yutaka Iwafuchi, Gregor E. Morfill and Takehiko Sato: Formation of thermal flow fields and chemical transport in air and water by atmospheric plasma, *New Journal of Physics*, Vol.13, No.5, (2011), 053025 (10 pages).

[2] Tetsuji Shimizu, Yutaka Iwafuchi, Gregor E. Morfill and Takehiko Sato: Transport mechanism of chemical species in a pin-water atmospheric discharge driven by negative voltage, *Journal of Photopolymer Science and Technology*, Vol.24, No.4, (2011), pp.421-427.

- [3] Takehiko Sato, Mayo Yokoyama and Kohei Johkura: A key inactivation factor of HeLa cell viability by a plasma flow, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.44, No.37, (2011), 372001 (5 pages).
- [4] Noriko Tomita, Kazuyo Abe, and Makoto Ohta: Quantitative analysis of subunit mismatch arrangement in staphylococcal gamma-hemolysin heteroheptameric transmembrane pore, *Proceedings of ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition 2011*, (2011), IMECE2011-63645.
- [5] Noriko Tomita, Kazuyo Abe, Jun Kaneko, Yoshiyuki Kamio and Makoto Ohta: Probabilistic Study on Subunit Mismatch Arrangement in Staphylococcal γ -hemolysin Heteroheptameric Transmembrane Pore, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.6, No.4, (2011), pp.286-298.
- [6] Noriko Tomita, Kazuyo Abe, Yoshiyuki kamio and Makoto Ohta: Cluster-forming property correlated with hemolytic activity by staphylococcal γ -hemolysin transmembrane pore, *FEBS Letters*, Vol.585, No.21, (2011), pp.3452-3456.
- [7] Keitaro Yamashita, Yuka Kawai, Yoshikazu Tanaka, Nagisa Hirano, Jun Kaneko, Noriko Tomita, Makoto Ohta, Yoshiyuki Kamio, Min Yao, and Isao Tanaka: Crystal structure of the octameric pore of staphylococcal γ -hemolysin reveals the β -barrel pore formation mechanism by two components, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Vol.108, No.42, (2011), pp.17314-17319.
- [8] Keisuke Mamada, Hiroyuki Kosukegawa, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Makoto Ohta: Friction properties of PVA-H/steel ball contact under water lubrication conditions, *Tribology International*, Vol.44, Issues 7-8, (2011) pp.757-763.
- [9] Keisuke Mamada, Vincent Fridrici, Hiroyuki Kosukegawa, Philippe Kapsa, Makoto Ohta: Friction Properties of Poly(vinyl alcohol) Hydrogel: Effects of Degree of Polymerization and Saponification Value, *Tribology Letters*, Vol.42, Issue 2, (2011) pp.241-251.
- [10] J.F. Torres, A. Komiya, J. Okajima and S. Maruyama: Evaluation of the Concentration Dependency of Mass Diffusion Coefficients in Aqueous Binary Solutions, *Proceedings of the 7th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids*, Algarve, (2011), CD-ROM DSL315.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [11] Takehiko Sato, Mayo Yokoyama, Kohei Johkura: Inactivation process of HeLa cell by exposure to a plasma-treated medium, *Proceedings of the 20th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC-20)*, Philadelphia, USA, (2011), presentation no. 287.
- [12] Naoya Kishimoto, Tetsuji Shimizu, Gregor E. Morfill and Takehiko Sato: Analysis of Plasma Flow at Gas-Liquid Interface for Biological Interaction, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.68-69.
- [13] Yoshihisa Nakano, Shigeru Fujimura and Takehiko Sato: Anti-bacterial Effect of a Dielectric Barrier Discharge Plasma against Biofilm-producing Gram Negative Bacilli, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.70-71.
- [14] Takehiko Sato, Marc Tinguely, Masanobu Oizumi and Mohamed Farhat: Effect of Neighboring Solid Wall on Generation of Residual Microbubbles after Collapse of Laser-Induced Bubble, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on*

- Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.64-65.
- [15] Takehiko Sato, Takashi Miyahara and Tatsuyuki Nakatani: Observation of Bubble Formation and Collapse Process by Generating a Plasma, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.66-67.
- [16] Hidemasa Fujita, Seiji Kanazawa and Takehiko Sato: Streamer Propagation Mechanism in Water, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.60-61.
- [17] Takehiko Sato, Mayo Yokoyama and Kohei Johkura: Effect of Chemical Species Generated by a Plasma Flow on Inactivation of HeLa Cell Viability, *Proceedings of the 8th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2011), pp.690-691.
- [18] Seiji Kanazawa, Yuki Ichihashi, Satoshi Watanabe, Shuichi Akamine, Ryuta Ichiki, Toshikazu Ohkubo, Takehiko Sato, Marek Kocik, Jerzy Mizeraczyk: Observation of Liquid-Gas Phase Dynamics from Pre-breakdown to Post-discharge in a Single-shot Underwater Pulsed Discharge, *The 2nd ISNPEDADM-2011 (New electrical technologies for environment)*, New Caledonia, (2011).
- [19] Tetsuji Shimizu, Yutaka Iwafuchi, Gregor E. Morfill and Takehiko Sato: Plasma Induced Flow and Chemical Transport in a Plasma-Water System, *Abstracts - 21st Academic Symposium of MRS-Japan 2011*, Yokohama, (2011), abstract no. A-08.
- [20] Tetsuji Shimizu, Yutaka Iwafuchi, Gregor E. Morfill and Takehiko Sato: Flow formation and chemical species transport in a pin-water surface atmospheric plasma, *The 8th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing (JSPP2012) Book of Abstracts*, Nara, (2012), O05 (2 pages).
- [21] 佐藤岳彦, 岩渕豊, 清水鉄司, Gregor Morfill : 水面上に形成するプラズマ流による気液中の化学輸送機構, 第23回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 名古屋, (2011).
- [22] 佐藤岳彦, 岩渕豊, 清水鉄司, Gregor Morfill : 大気圧プラズマ流の気中・液中における化学輸送機構, 第28回国際フォトポリマーコンファレンス, 千葉, (2011).
- [23] 佐藤岳彦: 大気圧プラズマ流の化学種生成輸送機構と滅菌特性, 学術振興会「プラズマ照射による医療用品の滅菌, エンドトキシンならびにプリオン不活化法と応用」に関する研究開発専門委員会, 平成23年度第4回合同委員会, 大阪, (2011).
- [24] 石田将之, 佐藤岳彦: 大気放電による滅菌法の開発, 第21回環境工学総合シンポジウム2011, 東京, (2011).
- [25] 佐藤岳彦, 岩渕豊, 清水鉄司, Gregor Morfill : 大気圧プラズマ流の気液中における熱流動解析, 第21回環境工学総合シンポジウム2011, 東京, (2011).
- [26] 佐藤岳彦: プラズマ滅菌, 第2回プラズマ・バイオ融合若手研究会, 山形, (2011).
- [27] 佐藤岳彦, 横山茉代, 城倉浩平: プラズマ照射培地による細胞不活性化, 第35回静電気学会全国大会, 東京, (2011).
- [28] 佐藤岳彦: プラズマ処理培地への暴露による細胞不活性化における過酸化水素の役割, プラズマコンファレンス2011 (PLASMA2011), 金沢, (2011).
- [29] 佐藤岳彦: 流体力学的視点からみたプラズマ医療, プラズマ核融合学会専門委員会「プラズマ科学の医療応用」第2回会合, 東京, (2011).
- [30] 佐藤岳彦: 大気圧プラズマ流による生体への干渉機構—プラズマ医療への展開—, 第1回流体科学におけるバイオ・医療に関する講演会, 仙台, (2011).
- [31] 佐藤岳彦: プラズマ流と生体の相互作用解明に向けた流体工学的取組, 日本機械学会環境工

- 学部門第3技術委員会講演会，東京，(2011).
- [32] 佐藤岳彦，横山茉代，城倉浩平：プラズマ処理培地への暴露における HeLa 細胞不活性化因子，日本機械学会第24回バイオエンジニアリング部門講演会，大阪，(2012).
- [33] Noriko Tomita, Makoto Ohta: Analysis of cell adhesion on PVA-H for developing vessels bio-model with dynamical and biological response” *24th European Conference on Biomaterials*, Dublin, Ireland, Sep. 4-8, 2011, Abstract Book (CD-ROM), pp. n3484-n3484, Oral and Poster presentations.
- [34] Makoto Ohta, Shuya Shida, Chang-ho Yu, Kei Ozawa, Xiaobo Han, Noriko Tomita, Hiroyuki Kosukegawa, Daniel A. Ruefenacht: Assessment of stent using in vitro/silico biomodelling, *8th International Interdisciplinary cerebrovascular Symposium and 11th Oriental Conference of Interventional Neuroradiology and 6th East Asian Conference of Neurointervention*, Shanghai, China, Sep. 8-11, 2011, Abstracts, pp.130-130, Oral presentation, (Invited)
- [35] Noriko Tomita, Kazuyo Abe, Jun Kaneko, Yoshiyuki Kamio and Makoto Ohta: Characterization and image analysis of heteroheptameric structure on staphylococcal γ -hemolysin transmembrane pore, *Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, Nov. 9-11, 2011, Proceedings pp.468-469, Oral presentation, (Invited)
- [36] Noriko Tomita, Kazuyo Abe, and Makoto Ohta: Quantitative analysis of subunit mismatch arrangement in staphylococcal gamma-hemolysin heteroheptameric transmembrane pore, *ASME2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Denver, USA, Nov. 11-17, Proceedings of ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE63645, pp.1-8, Oral presentation
- [37] Noriko Tomita: Membrane protein for preparation of application for nano-micro channel, *Japan-China Joint Workshop on Bio, Material and Flow Dynamics*, Sendai, Japan, Feb. 21-23, 2012, Oral presentation
- [38] H.Kosukegawa, V. Fridrici and Makoto Ohta: Friction Behavior of Medical Metallic Alloys against Biomimetic Poly (vinyl alcohol) Hydrogel, *24th European Conference on Biomaterials The Annual Conference of the European Society for Biomaterials*, Dublin, Ireland, Sep.4-8, 2011
- [39] Hiroyuki Kosukegawa, Chihaya Kiyomitsu, Makoto Ohta: Control of wallthickness of blood vessel biomodel made of poly (vinyl alcohol) hydrogel by a three-dimensional rotating spin DIP-coating method, *ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION*, Colorado, USA, 2011.11.11-17
- [40] Yasutomo Shimizu, Shuya Shida, Makoto Ohta: Influence of Plaque Movement on Blood Flow and Blood Vessel around Stenosis Area, *Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, 2011.11.9-11
- [41] Xiaobo Han, Naoya Sakamoto, Naoki Saito, Masaaki Sato, Makoto Ohta: Involvement of ERK in Morphological Response of Endothelial Cells to Spatial Gradient of Shear Stress, *Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, 2011.11.9-11
- [42] Hiroyuki Kosukegawa, Vincent Fridrici, Philippe Kasper, Boyko Stoimenov, Koshi Adachi, Makoto Ohta: Friction Analysis of Biometal on PVA Biomodel, *Eighth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, Japan, 2011.11.9-11
- [43] Yoshikazu Tanaka, Keitaro Yamashita, Yuka Kawai, Nagisa Hirano, Jun Kaneko, Noriko Tomita, Makoto Ohta, Yoshiyuki Kamio, Min Yao and Isao Tanaka: Crystal Structure of the Octameric Pore of Staphylococcal γ -hemolysin, *Eighth International Conference on*

Flow Dynamics, Sendai, Japan, 2011.11.9-11

- [44] Hiroyuki Kosukegawa, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Boyko Stoimenov, Koshi Adachi, Makoto Ohta: Friction of Medical Metallic Alloys on Soft Tissue Biomodel, *International Tribology Conference*, Hiroshima, Japan, 2011.10.30-11.3
- [45] A. Shirai, T. Umimoto, H. Uranuma and T. Hayase: Behavior of HL60 cells on HUVEC substrate under inclined centrifugal forces, *2012 Annual ELyT Workshop Abstract Book (2012/3/11-14)*, USB-memory.
- [46] 白井, 浦沼, 早瀬: HUVEC 基板上を移動する HL60 に対する押しつけ力の影響, 日本機械学会第 24 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集 (2012/1/7-8), CD-ROM.
- [47] 佐藤, 白井, 早瀬: ガラス平板上における HL60 の挙動に与える fMLP 刺激の影響に関する傾斜遠心顕微鏡を用いた実験的研究, 日本機械学会第 24 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集 (2012/1/7-8), CD-ROM.
- [48] J.F. Torres, 小宮敦樹, 岡島淳之介, 円山重直: 高分子化合物の水溶液内物質拡散係数の濃度依存性測定, 第 48 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 岡山, (2011), pp.27-28.
- [49] 小宮敦樹, 円山重直, J.F. Torres, 庄司衛太: 光学干渉計による物質拡散場および温度境界層の高精度可視化, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011 講演論文集, 浜松, (2011), 熱工学ギャラリーコレクション A137.
- [50] A. Komiya, S. Live, S. PRUVOST and J. Chevalier: Active Mass Transfer Control in Diffusion Field by Smart Materials, *ELyT Lab workshop 2012*, Gien, (2012), pp.58-59.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) 該当なし

(受賞) 該当なし

(マスコミ発表) 該当なし

燃焼・反応現象の解明と制御に関する研究
Research on Combustion and Chemical Kinetics

丸田 薫^{1)†}, 小林 秀昭¹⁾, 大上 泰寛^{1,2)}, 中村 寿¹⁾,
店橋 護³⁾, Sergey Minaev⁴⁾, Yiguang Ju⁵⁾
¹⁾東北大学流体科学研究所, ²⁾秋田県立大学, ³⁾東京工業大学,
⁴⁾SB RAS, ITAM, ⁵⁾Princeton University, MAE,
†サブリーダー

1. 研究目的

燃料が多様化し利用技術が高度化する燃焼・反応現象の解明・モデル化・制御を通じて、持続可能な社会構築に貢献する環境負荷の低い次世代反応流体科学技術の創出を図る。

2. 研究成果の内容

燃焼・反応現象のさらなる高度利用を実現するため、本サブテーマは①独自の実験手法による燃焼・反応現象の理解、②スーパーコンピューターを用いた詳細数値計算による燃焼・反応現象のモデル化、③融合研究による三次元燃焼現象リアルタイム解析技術を三本の柱として進めている。これら3つの研究項目について、平成23年度は所内および所外共同研究者と準備作業を中心に以下を実施した。

①燃焼・反応現象の理解（乱流燃焼特性）

- 直接数値解析(DNS)と実験結果の比較検討を可能にする標準乱流燃焼バーナを完成（図1）。
- 同バーナを用いバイオ燃料であるプロパノール異性体の高圧乱流燃焼実験を実施（図2）。
- バイオエタノールの詳細反応経路解析と高圧燃焼実験による検証を実施（図3）
- 種々燃料改質装置に用いられる多孔体内に形成される高圧伝播火炎のレーザー可視化計測を実施（図4）
- CCSを想定した石炭改質模擬ガスと純酸素ならびに高濃度二酸化炭素予混合気に対する高圧乱流燃焼実験を実施。
- 高温予混合気における火炎の不安定挙動解析を実施。

② 燃焼・反応現象の理解（燃料の着火特性）

- 燃料の着火特性を計測するためのマイクロリアクタについて、高級炭化水素燃料の多段階酸化反応の圧力依存性およびオクタン価依存性につづき、トルエン添加効果、セタン価依存性を解明。
- マイクロリアクタ内の化学種計測の高度化に向けて、分光計測に用いる装置を導入。
- 低級炭化水素における顕著な着火性の差異に注目し、天然ガス成分の影響を調査。
- マイクロリアクタにおける壁の化学的消炎作用について実験および数値計算により検討。

③詳細数値計算による燃焼・反応現象のモデル化

- 大規模炭化水素燃料であるイソセタン、nセタンにおける詳細化学反応を含む数値計算を行い、既存の低温酸化反応機構の問題点を抽出。

④融合研究による三次元燃焼現象リアルタイム解析技術

- 燃焼現象のリアルタイム三次元描画に関する結果を発表。

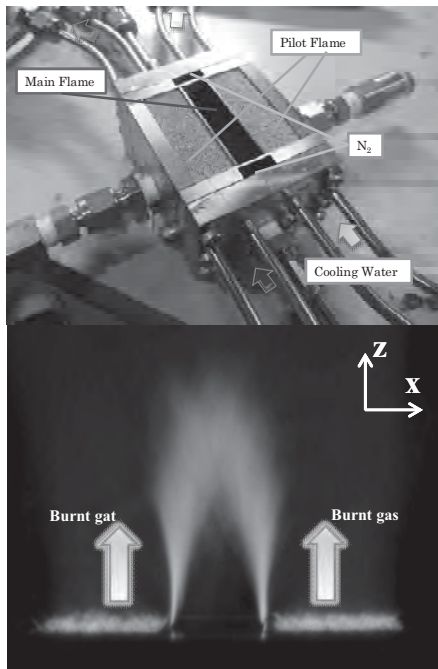


図1：標準乱流燃焼バーナと火炎写真

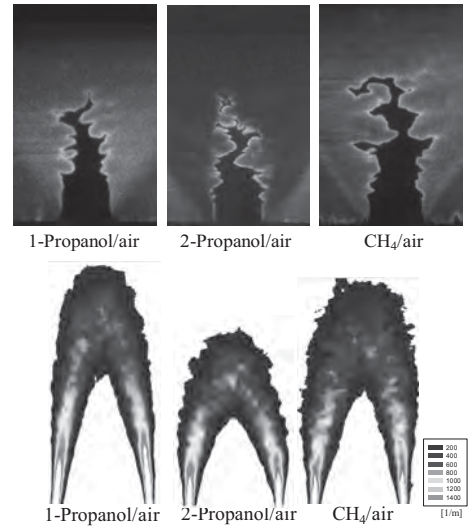


図2 プロパノール異性体高圧乱流火炎の OH-PLIF と火炎面密度分布 (0.5 MPa)

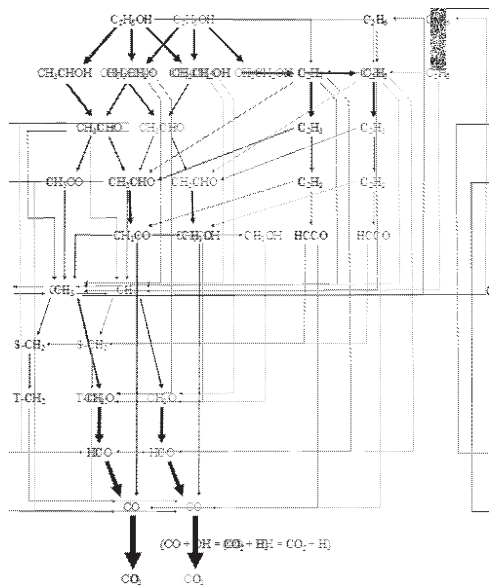


図3 エタノール燃焼の反応経路

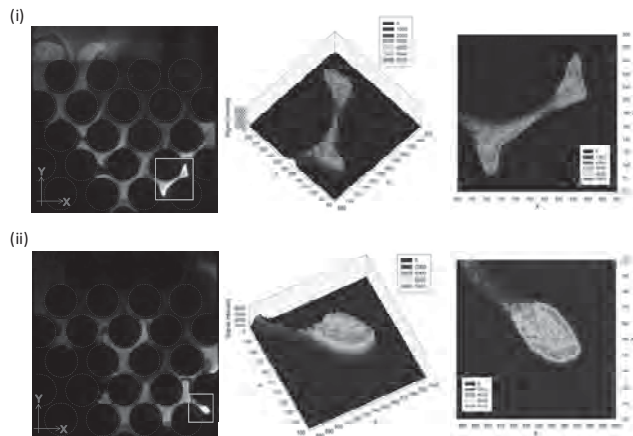


図4 高圧充填層内を伝播する予混合火炎前縁部のエッジフレーム構造 (OH-PLIF, 0.5 MPa)

3. 研究目標の達成状況

計画に基づき、平成 23 年度も順調に推移している。

4. まとめと今後の課題

平成 23 年度までに各サブトピックの基盤技術や装置の構築を実施した。平成 24 年度はさらに

押し進め、実験から素反応計算までを通じた総合研究を実施することが課題である。

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] S. Kadowaki, M. Yahata, H. Kobayashi: Effects of the Unburned-Gas Temperature and Lewis Number on the Intrinsic Instability of High-Temperature Premixed Flames, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.6, pp. 376-390, (2011).
- [2] M. Okuyama, T. Suzuki, Jinhua Wang, Y. Ogami, H. Kobayashi: Flame Structure and Propagation Mechanism through Meso-Scale Flow Channel Network in a Packed Bed at High Pressure, *The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, GST04-017 (2012).
- [3] J. Wang, F. Matsuno, Y. Ichikawa, M. Okuyama, Y. Ogami, H. Kobayashi: Flame Front Structure Characteristics of Turbulent Premixed Flames Diluted with CO₂ and H₂O at High Pressure and High Temperature, *The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, GST04-016 (2012).
- [4] Yiguang Ju, Kaoru Maruta Microscale combustion: Technology development and fundamental research, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.37, Issue 6:669-715 (2011.12). doi:10.1016/j.pecs.2011.03.001.
- [5] Mikito Hori, Akira Yamamoto, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: Study on octane number dependence of PRF/air weak flames at 1-5 atm in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Combustion and Flame*, Vol.159, Issue 3 : 959-967.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] H. Kobayashi, Y. Ogami: Turbulent Combustion of Model Coal-gasification Syngas at High Pressure, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.10-11.
- [2] F. Matsuno, J. Wang, Y. Otawara, Y. Ogami, H. Kobayashi: A Study on Turbulent Premixed Combustion for CO/H₂/CO₂/O₂ Mixture at High Pressure, *The Eighth International Conference on Flow Dynamics (8th ICFD 2011)*, (2011), pp.572-573.
- [3] S. Kadowaki, T. Oshima, H. Kobayashi: Instability of High-Temperature Premixed Flames, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp.78-79.
- [4] Sereschenko EV, SS Minaev, RV Fursenko, Maruta K.: Modeling of unsteady combustion waves in gas mixtures of small systems, *FAPMCP Fundamental and Applied Problems in Mechanics and Control Processes*, (Vladivostok, Sep., 2011).
- [5] Taiki Kamada, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Study on weak flame behavior of lower alkane fuels in micro flow reactor with controlled temperature profile, *Eighth International Conference on Flow Dynamics Proceedings*, Sendai, (2011), pp. 548-549.
- [6] Satoshi SUZUKI, Mikito HORI, Akira YAMAMOTO, Takuya TEZUKA, Susumu HASEGAWA, Hisashi NAKAMURA, Kaoru MARUTA: Cetane number and weak flames of diesel PRF in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Eighth International Conference on Flow Dynamics Proceedings*, Sendai, (2011), pp. 542-543.

- [7] Sergey Minaev, Roman Fursenko, Evgeniy Sereschenko, Aiwu Fan, Sudarshan Kumar and Kaoru Maruta: Oscillating and Rotating Flame Patterns in Microchannels, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 20-21.
- [8] Boris Mazurok, Alex Menschikov, Boris Dolgovesov, Roman Fursenko, Sergey Minaev and Kaoru Maruta: Real Time Modeling of Flame Front Evolution by Kinematical Model, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 80-81.
- [9] Roman Fursenko, Sergey, Kaoru Maruta and Hisashi Nakamura: GPU-based Parallel Computations of Low Lewis Number Stretched Premixed Flames, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 82-83.
- [10] 門脇敏, 小林秀昭, 大島卓也: 高温予混合火炎の固有不安定性に関する数値解析: 未燃ガス密度一定条件下における温度の影響, 第48回日本伝熱シンポジウム2011 講演論文集, (2011), pp.97-98.
- [11] 大上泰寛, 小関雅人, 奥山昌紀, 鈴木拓朗, 小林秀昭: 高温高圧下におけるエタノール予混合火炎の燃焼メカニズムに関する研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011 講演論文集, (2011), pp.133-134.
- [12] Jinhua Wang, 大田原佑樹, 松野太, 小林秀昭, 大上泰寛, 工藤琢, 奥山昌紀: 高圧下における石炭改質模擬ガスの純酸素乱流燃焼特性に関する研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2011 講演論文集, (2011), pp.135-136.
- [13] 大上泰寛, 小関雅人, 奥山昌紀, 鈴木拓朗, 小林秀昭: 高温高圧下におけるエタノール/空気予混合火炎の燃焼反応機構の解析, 第49回燃焼シンポジウム講演論文集, (2011), pp.4-5.
- [14] 門脇敏, 大島卓也, 小林秀昭: 高温予混合火炎の数値解析: 未燃ガス密度一定条件下における火炎面の不安定性, 第49回燃焼シンポジウム講演論文集, (2011), pp.20-21.
- [15] Jinhua Wang, 市川泰久, 松野太, 奥山昌紀, 大上泰寛, 小林秀昭: 高圧下における乱流予混合火炎の火炎面構造解析に関する研究, 第49回燃焼シンポジウム講演論文集, (2011), pp.234-235.
- [16] 大田原佑樹, Jinhua Wang, 松野太, 工藤琢, 大上泰寛, 奥山昌紀, 小林秀昭: 高圧下における石炭改質模擬ガスに対する純酸素予混合乱流燃焼特性, 第49回燃焼シンポジウム講演論文集, (2011), pp.236-237.
- [17] 堀 幹人, 山本 晃, 手塚卓也, 長谷川進, 中村 寿, 丸田 薫: 温度分布制御型マイクロフローリアクタにおける PRF/空気 weak flame の圧力およびオクタン価依存性, 自動車技術会 2011 年春季大会学術講演会, 20115399, (2011.5).
- [18] 鎌田 大輝, 手塚 卓也, 長谷川 進, 中村 寿, 丸田 薫: 温度分布制御型マイクロフローリアクタによる低級アルカン燃料の着火特性に関する研究, 日本機械学会東北支部第47期秋季講演会, (2011.9).
- [19] 猿渡 堅一郎, 中村 寿, 手塚 卓也, 長谷川 進, 丸田 薫: 温度分布制御型マイクロフローリアクタによる水素の燃焼特性および表面反応の影響, 第49回燃焼シンポジウム講演論文集, 378-379, (2011.11).
- [20] 鈴木 聡史, 堀 幹人, 中村 寿, 手塚 卓也, 長谷川 進, 丸田 薫: 温度分布制御型マイクロフローリアクタを用いたディーゼル基準燃料のセタン価と燃焼特性, 第49回燃焼シンポジウム講演論文集, 356-357, (2011.11).

高応答性流体の異分野融合展開

Development of the Different Academic Field Integration of High Responsible Fluid

石本 淳^{1†}, 西山 秀哉¹, 高奈 秀匡¹, 徳増 崇¹, 寒川 誠二¹, 久保田 智広¹
Kozo Saito², 姫野 武洋³, 新城 淳史⁴, 岡村 崇弘⁵, 松浦 一雄⁶, 井上 元⁷

¹東北大流体研, ²IR4TD, University of Kentucky, USA, ³東京大大学院,
⁴JAXA 研究開発本部, ⁵KEK 素核研低温, ⁶東北大学国際高等, ⁷九州大工学研究院
†サブリーダー

1. 研究目的

外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体・熱流動を対象とし、その異分野融合型研究開発手法を通して、ナノ機能性創出、反応性界面物理、環境調和型エネルギー、低炭素社会構築、リサイクル科学、流体-固体材料連成科学への学術的貢献と先端応用展開を目指す。各小研究グループにおける研究目標は以下となる。

① サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する研究 (石本 G)

外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体の微粒化・界面現象に関して、その異分野融合型研究開発手法を通して、新エネルギー循環科学への学術的貢献と先端応用展開を目指す。

② プラズマチューブによる管内微粒子流動制御 (西山・高奈 G)

近年、自動車の排気ガスや工場から発する煤煙などによる大気汚染は深刻化しており、環境への配慮が責務である産業界にとっては環境汚染対策が急務の課題になっている。そこで本研究では、大気汚染微粒子の除去ならびに高効率微粒子搬送技術の確立を目指し、空気を誘電体バリア放電(Dielectric Barrier Discharge)を用いて活性化させた管内において、微粒子の攪拌・搬送及び浄化を可能とするプラズマチューブを提案するとともに、その特性を明らかにすることを目的とする。

③ PEFC 触媒層の酸素、プロトン輸送性能の評価シミュレータの構築 (徳増 G)

固体高分子形燃料電池(PEFC)は化石燃料に代わる次世代電源として期待が大いに高まっているが、その利用効率を増加させるには触媒層で十分な反応を生じさせる必要がある。現在、分極が大きいのはカソード側の触媒層であり、この分極を低下させるにはカソード側触媒層で触媒表面に十分な量のプロトン、酸素を供給する必要がある。触媒層内では触媒表面や担持カーボンはアイオノマーと呼ばれる厚さ数 nm の高分子超薄膜で覆われており、プロトンはこのアイオノマー内を移動して触媒表面に到達し、酸素分子はこのアイオノマーを透過して触媒表面に到達する。このアイオノマーは厚すぎると酸素透過を阻害し、薄すぎるとプロトン輸送を阻害するため、触媒層で効率よく反応を起こすためには、このアイオノマー内部におけるプロトンおよび酸素のナノスケール輸送現象を解明し、その知見を元に触媒層の最適設計を行う必要がある。このような理由から、本研究では東北大学側が分子動力学法を用いてアイオノマー内のプロトン輸送現象、酸素透過現象を解明する。また九州大学側では触媒層の多孔体構造を数値的に再現してその内部の輸送現象をマクロ方程式により解析するシミュレータを開発し、最終的にはこのマクロシミュレータに分子動力学法より得られたプロトン輸送、酸素透過モデルを組み込むことにより PEFC 触媒層の包括的な性能を予測できるマルチスケールシミュレータを確立することを目的とする。

- ④ 計算と実験の融合によるプラズマとナノ構造表面界面相互作用に関する研究 (寒川 G)
 プラズマ固体相互作用の解明とナノ界面制御のため、計算と実験の融合によるプラズマとナノ構造表面界面相互作用を明らかにし、将来のナノデバイス開発に貢献する。

2. 研究成果の内容

外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体・熱流動を対象とし、その異分野融合研究を推進する。具体的には、1) サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する研究 (石本グループ)、2) 環境浄化・エネルギー促進用反応性混相プラズマ流動システムの構築 (西山・高奈グループ)、3) プラズマ固体相互作用の解明とナノ界面制御(寒川・Huangグループ)、4) 燃料電池内部の反応流動現象のマルチスケール解析 (徳増グループ) の4グループにより研究を実施した。本年度は、上記研究課題に対して以下の研究成果を得た。

① サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する研究(石本 G)

研究成果に関しては、全体の研究概要を参考のこと。

② プラズマチューブによる管内微粒粒子流動制御 (西山・高奈 G)

図 1(a)に実験装置の概略図を、図 1(b)にプラズマチューブの断面図をそれぞれ示す。表裏に幅 5 mm の一対の螺旋状の銅電極を有する内径 12 mm 及び 20 mm のテフロン製の長さ 100 mm のプラズマチューブを製作し、大気圧・室温の下で放電を行った。なお、プラズマチューブの外壁及び内壁には幅 5 mm の銅電極が 3 mm 及び 4 mm の間隔で交互に螺旋状に巻きつけられており、電極角度は 45° である。入力電圧波形は 1 kHz の正弦波とし、印加電圧を変化させて流れのない状態で管中央底部にアルミナ微粒子を静置して実験を行った。

図 2(a)(b) に PIV 計測によって得られたチューブ出口近傍での管軸平行面及び垂直面における誘起流の平均速度ベクトル分布を示す。これらの図より、管出口においては斜め上向きに最大で 56 cm/s の流れが放電により誘起され、誘起流は管出口断面から見て左方向に旋回することが分かる。

図 3 に数値計算により得られたプラズマチューブ内の電位分布を示す。なお、印加電圧は 7.5 kV である。高電圧印加電極から半径方向及び軸方向に電位勾配が大きく、高電圧印加電極近傍に強い電界が形成される。高電圧印加電極では交流電圧が印加されるため、電界の向きは交互に反転する。したがって、粒子は静電気力により図中に矢印で示したように激しく半径方向に振動し、壁面上の粒子は電極間を軸方向に振動することが明らかとなった。

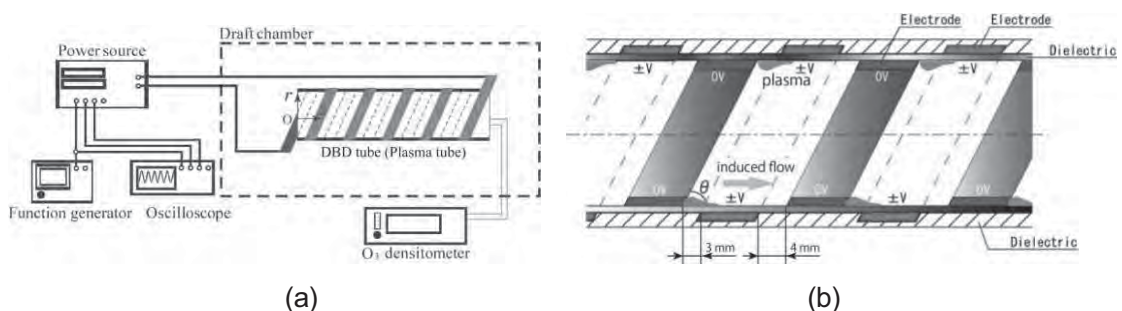


図 1 : (a) 実験装置の概略図, (b) プラズマチューブの断面図

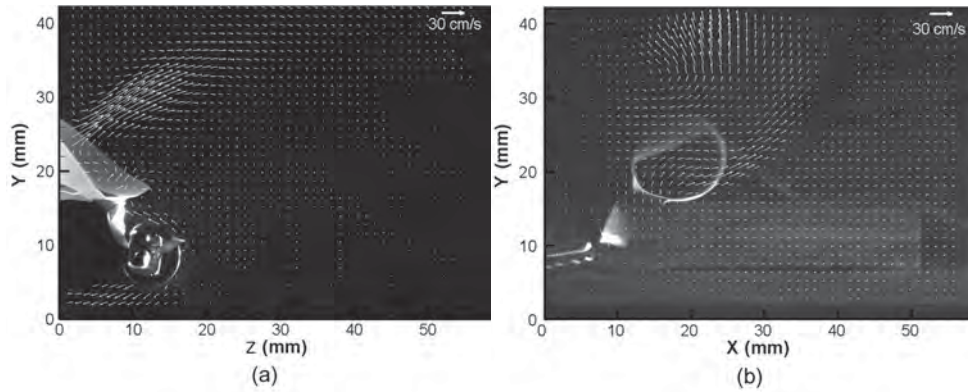


図 2 : PIV 計測によるプラズマチューブ出口近傍における時間平均速度場
(a) 管軸に対して平行断面, (b) 垂直断面

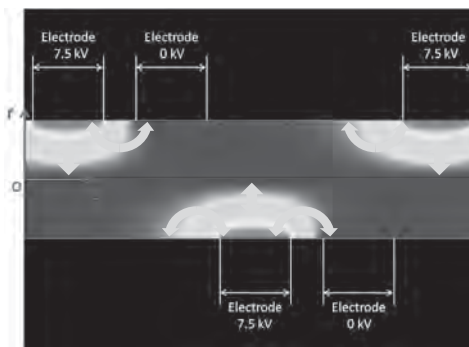


図 3 : 数値計算によるプラズマチューブ内の電位分布

③ PEFC 触媒層の酸素, プロトン輸送性能の評価シミュレータの構築 (徳増 G)

東北大学側では, 今年度は白金表面上の酸素透過をシミュレートし, その含水率依存性について解析を行った(図 4). 含水率は $\lambda=3,7,11$ と設定した. その結果, 含水率が増加するにつれてアイオノマーの酸素透過係数が減少するという, バルク薄膜の実験結果とは異なる結果が得られた. この結果を詳細に解析するために, バルク薄膜の酸素透過係数を, 溶解度係数と拡散係数の積から算出した. その結果, 確かに計算でもバルク薄膜では含水率が相加するにつれて酸素透過係数が増加し, これは溶解度係数の減少よりも拡散係数の増加が卓越しているために起こることが確認され, アイオノマーとバルク薄膜の性質の違いを数値計算で求めることに成功した.

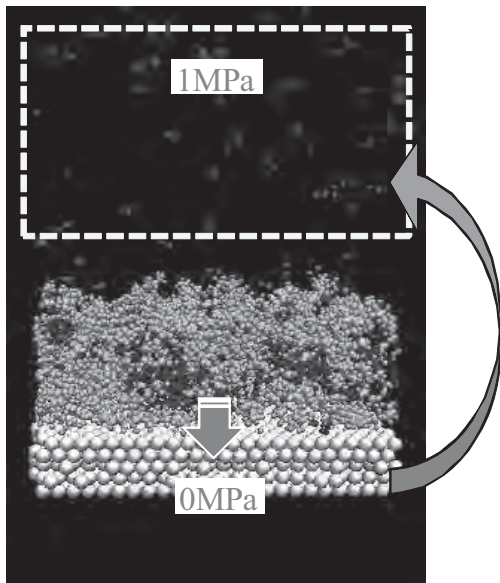


図 4: 分子動力学法によるアイオノマーの酸素透過現象のシミュレーションの概念図

京都大学側では昨年度作成した触媒層構造の妥当性評価のために SEM, TEM 像との比較およびこれら画像解析からの再構築を行った (図 5). また電解質であるアイオノマーの被覆モデルを開発し, 前年度開発した解析コードに更に改良を加え, 担持カーボンとアイオノマーから成る複雑多孔質体内部の電気化学反応と物質輸送の連成解析を行った. 図 6 にその一例を示す. さらに電極触媒である各白金点の反応量分布を評価し, 電極構造と白金有効利用率の相関から, 低白金化への指針提案が可能なシミュレータを開発した. なお本計算で用いる各種パラメータには実測が困難なため不明確なものも多く存在し, 特に Pt 表面近傍の酸素拡散, アイオノマーへの酸素の溶解・拡散係数に関して, 今後は上述の分子動力学の知見を用いて検証を行う予定である.

- ④ 計算と実験の融合によるプラズマとナノ構造表面界面相互作用に関する研究 (寒川 G)
- 固体表面におけるプラズマ-固体相互作用を直接観測するため, 固体表面にセンサを組み込んだオンウェハセンサを開発した. 特に, プラズマエッチングにおいて, 加工対象の表面凹凸のサイズがイオンシースの厚さと同程度またはそれ以上であると, イオンシース電界が表面凹凸を感じて曲がり, イオンはその曲がった電界によって加速され加工対象表面に傾いて入射するため, 加工形状の異常が生じる. 加工形状の異常 (エッチング側壁の傾き) はイオンの入射角度を反映し, イオンの入射角度はシース電位分布に依存し, シース電位分布はシース厚さ・シース電位・表面形状に依存する. そこで, シース厚さ・シース電位をオンウェハセンサで測定し, 得られた測定値と表面形状の情報からエッチング形状を予測する方法を確立した.

今年度は, シース厚さ・シース電位を測定できるセンサを開発した (図 7). このセンサは, シース電位及びイオン飽和電流密度を測定可能であり, これらの情報からシース厚さを計算できる. 開発したセンサを用いて塩素ガスの誘導結合プラズマを測定した例が図 8 である. この例ではエッチング装置のステージに印加する RF バイアスの出力値を横軸に, 測定したシース電位とシース厚さを縦軸にとっている. ステージバイアスの増加とともにシース電位及びシース厚さが増加する結果となっており, 測定に成功したと言える. このような測定を,

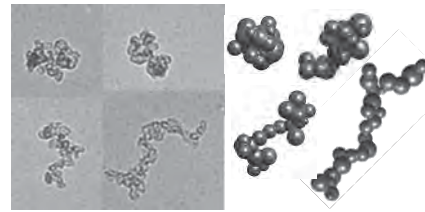


図 5: カーボン凝集構造の数値構造化

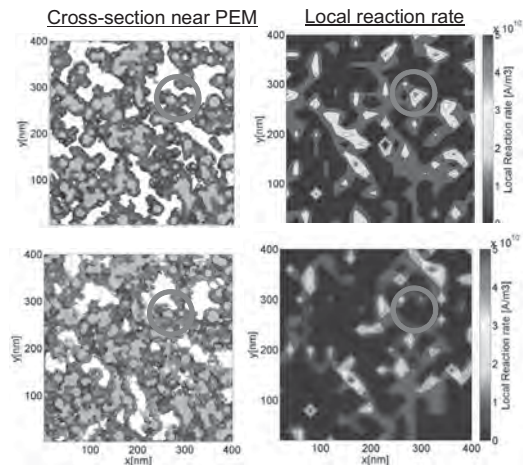


図 6: 触媒層構造と反応量分布の相関

各種プラズマ条件（ソースパワー依存性、バイアスパワー依存性、圧力依存性）において行った。

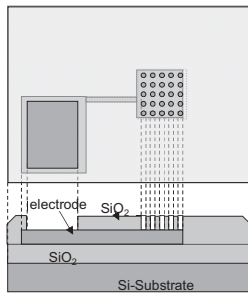


図7. シース形状センサ

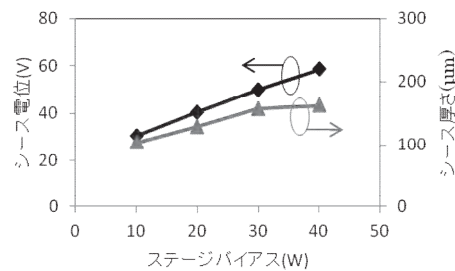


図8. シース形状センサ測定結果

さらに、エッチング形状の検討を行った。高さ数百 μm の垂直段差の底にフォトレジストのライン&スペースパターンを持つサンプルを用意し、このサンプルをプラズマでエッチングした。その結果、段差に近いところではエッチング形状が傾くことが分かった。これは、段差付近ではシース形状が傾き、イオン軌道が傾くためであると考えられる。形状は、段差からの距離の増大に伴い垂直なものとなった。この側壁角度（エッチング形状側壁角度）を段差からの距離の関数として読み取った結果が図9である。このようなデータを、センサ測定を行った各種プラズマ条件において取得した。

取得したセンサ測定（シース電圧・シース厚さ）およびエッチング形状側壁角度のデータを、ニューラルネットワークを用いて関連づけた。まず、入力としてはセンサ測定値であるシース電位とシース厚さ及び実験パラメータである段差高さ、出力としては段差からの距離0~2200 μm におけるエッチング形状側壁角度を採用し、蓄積したデータを学習させた。学習済みのニューラルネットワークを用いると、センサ測定結果からエッチング形状を予測することができる。予測の例を図10に示す。予測は実測によく一致していることが分かる。

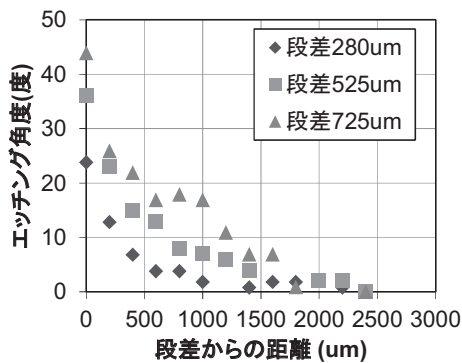


図9 エッチング形状側壁角度の実測結果

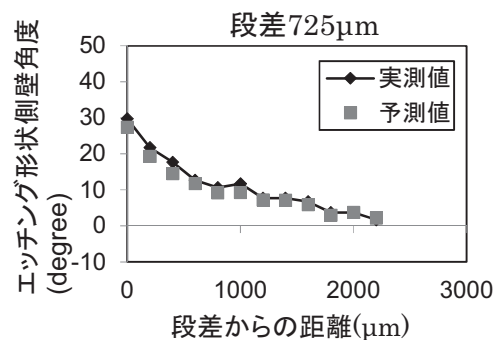


図10 エッチング形状側壁角度の予測結果

これらのシミュレーション技術を実用的で使いやすいシステムとするため、みずほ情報総研と共同で、システムの開発を行った。

さらに、アドバンテスト・原田産業株式会社と共同で、ワイヤレス測定システムの試作品も作製した（図11）。制御用マイコン・メモリ・赤外線通信部・電源接続部・センサ接続部を備え、接続したセンサの測定値をメモリに蓄え、赤外線通信によって取り出すことが可能である。

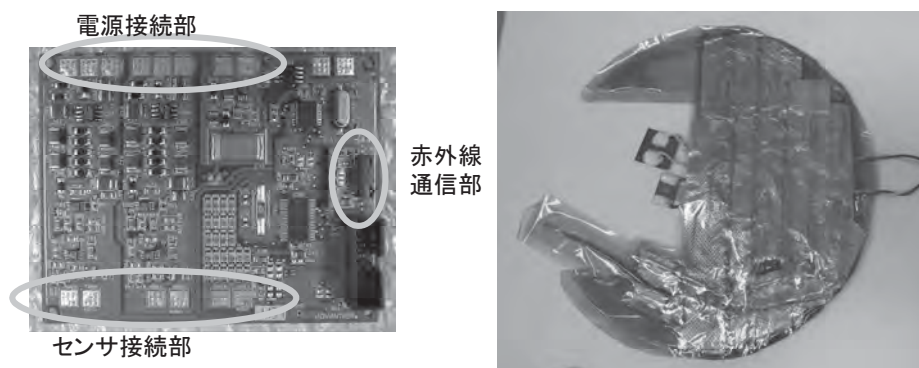


図 11 ワイヤレス測定用制御回路およびセンサ接続セッティング例

3. 研究目標の達成状況

- ① サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する研究(石本 G)
 マイクロ固体窒素噴霧による洗浄メカニズムに関する検討を行い、1) マイクロソリッド噴霧の慣性力の効果、2) 基盤加熱後に照射するマイクロソリッド噴霧の持つ超高温熱流束急冷によるレジスト熱収縮の効果、3) 超音波振動子設置による氷核生成促進と固体窒素粒子の微粒化促進の相乗効果により、良好な洗浄特性を得られることが判明し、90 %程度のウエハーレジストはく離・洗浄性能を達成しうることが明らかとなった
- ② プラズマチューブによる管内微粒子流動制御 (西山・高奈 G)
 静電効果を活用した管内微粒子の革新的攪拌・搬送方式を提案し、PIV 計測及び数値計算から管内微粒子の複雑挙動を明らかにすることに成功したことから、本研究目的は概ね達成されたと考えられる。
- ③ PEFC 触媒層の酸素、プロトン輸送性能の評価シミュレータの構築 (徳増 G)
 今年度は昨年度の成果をさらに各研究室単位で発展させ、より詳細な現象の理解を行うことができ、さらにお互いの計算の融合を測る上で必要な課題の抽出ができたため、十分に目標は達成されたと考えている。
- ④ 計算と実験の融合によるプラズマとナノ構造表面界面相互作用に関する研究 (寒川 G)
 プラズマ-固体相互作用において重要なシースによるイオンの起動及びエッチング形状への影響を解明するため、実験と計算を融合し、シース形状センサおよびセンサ測定値からのエッチング形状予測を行った。このことは、将来のナノデバイス開発におけるエッチング形状制御において重要な意味を持つ。さらに今年度は、オンウェハモニタリングの実用性を高めるためのワイヤレス化の検討を行った。従って、目標を十分に達成することができたと言える。

4. まとめと今後の課題

- ① サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する研究(石本 G)
 本ウルトラクリーンナノデバイス洗浄システムの実用化には、マイクロ固体窒素粒子の有するレジストはく離メカニズムに関するシミュレーション科学的検討を行う必要があることが判明した。すなわち固体窒素粒子界面の有する高機能性に対し流体力学的アプローチと熱力学的アプローチの両面から成る検討を行い、粒子界面と洗浄対象物間の相互作用を解明する必要がある。
- ② プラズマチューブによる管内微粒子流動制御 (西山・高奈 G)

管内に誘電体バリア放電(DBD)発生機構を有するプラズマチューブを製作し、DBD プラズマによる誘起流及び微粒子の攪拌・搬送挙動を PIV 計測及び数値計算により明らかにした。今後は、管内微粒子の 3 次元数値解析により管内での微粒子や液滴の複雑挙動を詳細に解明し、微粒子の攪拌・搬送のための最適条件を明らかにするとともに、微粒子の浄化効果についても検討する必要がある。

③ PEFC 触媒層の酸素、プロトン輸送性能の評価シミュレータの構築 (徳増 G)

今後はナノスケール(分子動力学法)のシミュレーションで得られた酸素透過現象に関する知見のモデリングを行い、メゾスケールのシミュレータに組み込むことが最大の課題であり、これに向けて議論を深めていく予定である。またプロトン輸送についても計算を行っていく予定である。

④ 計算と実験の融合によるプラズマとナノ構造表面界面相互作用に関する研究 (寒川 G)

今後、ワイヤレス測定システムを実証し、測定適用可能範囲を明らかにする。さらに、ダメージ・エッチング形状予測のためのデータベースを拡充する。これらを測定システムへと統合する。これらのことから、実用的なシステムへと完成度を高める。一方で、開発したセンサを用いてプラズマ-固体表面相互作用の解明を進める。

5. 研究成果 (*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, Shinji Akiba, Kazuhiro Tanji and Kazuo Matsuura: Integrated Super Computational Prediction of Liquid Droplet Impingement Erosion, *Progress in Nuclear Science and Technology*, Vol. 2, (2011), pp. 498-502.
- *[2] Jun Ishimoto, Daisuke Tan, U Oh, Tomohiro Kubota and Seiji Samukawa: Integrated Experimental and Numerical Study of Thermomechanical Resist Removal-Cleaning Performance Using Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Spray, *ECS Transactions*, Vol. 41, No.5, (2011), pp. 83-90.
- *[3] Takehiro HIMENO, Chihiro INOUE and Toshinori WATANABE: Study on Free-surface Flows in Aerospace Propulsion Systems, *Interdisciplinary Information Sciences*, Vol.17, No.1, (2011) pp.15-17.
- [4] Kozo SAITO, Abraham J. SALAZAR, Kenneth G. KREAFLE and Eric A. GRULKE: Hitozukuri and Monozukuri: Centuries' Old Eastern Philosophy to Seek Harmony with Nature, *Interdisciplinary Information Sciences*, Vol.17, No.1, (2011), pp. 1-9.
- [5] Kenneth G. KREAFLE: Lean Product Development, *Interdisciplinary Information Sciences*, Vol.17, No.1, (2011), pp. 11-13.
- *[6] 篠原圭介, 高奈秀匡, 西山秀哉: プラズマチューブ内における微粒子の攪拌及び搬送特性, 混相流, Vol. 25, No. 5, (2011), pp. 495-500.
- [7] Kiminori Sakai and Takashi Tokumasu: Molecular Dynamics Simulation of Oxygen Permeation through the Ionomer of PEFC Cathode Side Catalyst Layer, *Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011*, (2011), AJK2011-36020.
- [8] Kiminori Sakai, Takashi Tokumasu: Molecular Dynamics Study of Oxygen Permeation in the PFSA Ionomer on Pt Catalyst Surface, *ECS Transactions*, Vol.41, No.1, (2011), pp.2105-2113.
- [9] G. Inoue, Y.P. Fan, T. Matsuoka, Y. Matsukuma, M.Minemoto: Modeling Carbon Black Aggregate Structure and Ionomer Coat for Optimum Design of PEFC Catalyst Layer, *Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011*, (2011), AJK2011-17014.

- [10] Michio Sato, Hiroto Ohtake, and Seiji Samukawa: Reduction in Number of Sparks Generated in High-Density Plasma Process by Fixing the Wall Potential, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 50 (2011), pp. 036204.
- [11] Noriaki Matsunaga, Hirokatsu Okumura, Butsurin Jinnai, and Seiji Samukawa: Measurement and simulation of spreading current in interlayer dielectric film deposition by plasma-enhanced chemical vapor deposition, *Journal of Vacuum and Science and Technology A*, Vol. 29 (2011), pp. 041302.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Jun Ishimoto, Shinji Akiba, Kazuhiro Tanji and Kazuo Matsuura: Computational Study of Liquid Droplet Impingement Erosion in Nuclear Power Plant, *Eighth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2011)*, Sendai, Miyagi, Japan, Nov. 9-11 (2011). **(Invited)**
- [2] Jun Ishimoto: Thermomechanical Resist Removal-Cleaning Technology Using Cryogenic Micro-Solid Nitrogen Spray, *The 14th Surface Cleaning Users Group Meeting, Cleaning Technology Symposium (KSCUGM)*, November 24 (2011) Hanyang University, ERICA Campus, Ansan, Korea. **(Invited)**
- [3] Kazuo Matsuura, Masami Nakano and Jun ISHIMOTO: Visualization of Leaking and Accumulating Hydrogen Under a Sensing-Based Ventilation Control in a Partially Open Space, *Proceedings of The 11th Asian Symposium on Visualization*, Niigata, Japan, June 5-9, 2011 [in CD-ROM].
- [4] Jun Ishimoto: Progress in Transdisciplinary Collaborative Research Project, *The Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011).
- [5] U Oh, Jun Ishimoto and Kozo Saito: Measurement Coupled Computation of Cooling and Wafer Cleaning Performance Using Micro-Solid Nitrogen, *Proceedings of the Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2011), pp. 34-35.
- [6] 王 宇 (東北大), 丹 大輔 (東燃化学), 石本 淳 (東北大): マイクロ固体窒素噴霧流を用いた超高熱流束冷却と新型半導体洗浄法の開発, 日本混相流学会年会講演会 2011 オーガナイズドセッション (OS-6 サステナブル異分野融合型混相流). [2011年 8月 6-8日, 京都工芸繊維大学 (京都市)].
- [7] 松浦一雄 (東北大), 中野政身 (東北大), 石本 淳 (東北大): 低開口部を有する部分開放空間におけるセンシングに基づく水素漏洩のリスク緩和制御, 日本混相流学会年会講演会 2011 オーガナイズドセッション (OS-6 サステナブル異分野融合型混相流). [2011年 8月 6-8日, 京都工芸繊維大学 (京都市)].
- [8] 松浦一雄 (東北大), 中野政身 (東北大), 石本 淳 (東北大): センシングに基づく水素漏洩のリスク緩和制御アルゴリズムの構築.
- [9] 篠原圭介, 高奈秀匡, 西山秀哉: プラズマチューブ内における微粒子の攪拌及び搬送, 日本混相流学会年会講演会 2011, (2011), pp.396-397.
- [10] 坂井公則, 徳増崇, PEFC 触媒層内 ionomer における酸素分子透過に関する分子論的研究, 第 48 回日本伝熱シンポジウム, 2011.
- [11] 坂井公則, 徳増崇, PEFC 触媒層の ionomer 内における酸素拡散に関する分子論的研究, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011.
- [12] 松岡孝洋, 井上元, 松隈洋介, 峯元雅樹: PEFC 触媒層内の多成分反応種輸送の解明と Pt 利用率向上の検討, 化学工学会 第 43 回秋季大会, 2011.

- [13] 井上元, 松岡孝洋, 松隈洋介, 峯元雅樹: PEFC 触媒層内のカーボン凝集および電解質被覆モデリングと反応分布評価, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011.
- [14] (招待) 寒川誠二, プラズマ誘起損傷のモニタリングと超低損傷・微細加工技術, 日本真空協会 スパッタリングおよびプラズマプロセス技術部会 (SP 部会) 第 124 回定例研究会 (2011/7/26).
- [15] 荒木良亮, 久保田智広, 三輪和弘, 岩崎拓也, 小野耕平, 寒川 誠二, オンウエハーモニタリングとシミュレーションの融合による立体形状エッチングにおけるシース形状およびイオン軌道予測, 2011 年秋季 第 72 回 応用物理学会学術講演会 (2011/8/31).
- [16] Ryosuke Araki, Kazuhiro Miwa, Tomohiro Kubota, Takuya Iwasaki, Kohei Ono, and Seiji Samukawa: Prediction of ion sheath shape and ion trajectory during plasma etching processing using on-wafer monitoring technique, *American Vacuum Society 58th International Symposium & Exhibition*, PS2-TuA1 (Nashville, 2011/11/1).
- [17] Ryosuke Araki, Tomohiro Kubota, and Seiji Samukawa: Prediction of ion sheath shape and ion trajectory during plasma etching processing using on-wafer monitoring technique and simulation, *The 8th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing* (Nara, 2012/1/16).
- [18] 荒木良亮, 久保田智広, 岩崎拓也, 小野耕平, 寒川誠二, オンウエハーモニタリングとシミュレーションの融合によるプラズマプロセス中の表面イオンシース形状と入射イオン軌道予測, 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会 (2012/3/17).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(マスコミ発表)

- * [1] 原発配管の劣化箇所予測 新システムで画像化 (日経産業新聞 2011 年 6 月 21 日掲載)
- * [2] 半導体洗浄, 人体に害無く ー東北大が新技術 固体窒素を利用ー (日経産業新聞 2011 年 10 月 7 日掲載)
- [3] 2011 年 12 月 2 日: 日刊工業新聞ニュースリリース「みずほ情報総研, ワイヤレス化オンウエハセンサ活用のプラズマプロセス解析システムを開発」

