東北大学

平成27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 2015
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

Institute of Fluid Science
Tohoku University
IFS

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 27 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、102 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ると共に、本報告書について、忌憚のないご意見を頂ければ幸甚である。

平成 28 年 11 月

東北大学流体科学研究所長
大林　茂

目　次

1. 平成 27 年度流体科学研究拠点活動のまとめ

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

2. 研究成果報告書

＜一般公募共同研究＞

J15001　Development of novel multi-layer magnetorheological elastomer isolators …… 7
Weihua Li（University of Wollongong）、中野 政身（東北大学）

J15002　Numerical simulation for reducing future tsunami damage …… 9
大林　茂（東北大学）、Fumiya Togashi（Applied Simulations Inc.）

J15003　Tornado Formation Research with Wind Tunnel …… 11
Rongjia Tao（Temple University）、中野 政身（東北大学）

J15004　ターボジャブの空力特性に関する研究 …… 13
関　眞佐子（関西大学）、大林　茂（東北大学）

J15005　予混合火炎の固有不安定性に及ぼす中間生成物の影響 …… 15
門脇　敏（長岡技術科学大学）、小林 秀昭（東北大学）

J15006　熱遷移流に対する分子動力学解析 …… 17
山口 浩樹（名古屋大学）、菊川 豪太（東北大学）

J15007　Control of thermal transport across a solid-liquid interface by using self-assembled monolayer …… 19
塩見 淳一郎（東京大学）、菊川 豪太（東北大学）

J15008　常温圧縮せん断法を用いたマイクロ成形技術の開発 …… 21
中山　昇（信州大学）、高木 敏行（東北大学）

J15009　空隙媒体による水中爆発の減衰と軽減効果について …… 23
北川 一敬（愛知工業大学）、大谷 清伸（東北大学）

J15010　飛行船および索が有する空力性能の係留式高層プラットフォームシステム挙動に対する影響性 …… 25
千葉 一永（北海道工業大学）、大林　茂（東北大学）

J15011　メカノクロミズム金属錯体を用いたスペースデブリ空気漏れ穴の表示システムの検討 …… 27
槙原 幹十朗（東北大学）、大谷 清伸（東北大学）

J15012　低騒音翼のための翼後縁形状の最適化に関する研究 …… 29
山縣 貴幸（新潟大学）、早瀬 敏幸（東北大学）

J15013　水および液体窒素の高圧環境下における噴霧特性の研究 …… 31
渡邉 力夫（東京都市大学）、小林 秀昭（東北大学）

J15014　磁性流体の界面現象の実験解析およびマイクロデバイスの開発 …… 33
須藤 誠一（秋田県立大学）、西山 秀哉（東北大学）

J15015　空間的せん断応力勾配環境下における血管内皮細胞の力学応答 …… 35
吉野 大輔（東北大学）、坂元 尚哉（川崎医療福祉大学）

J15016　準地衡風乱流における高エネルギー（負温度）領域での渦の動力学 …… 37
高橋 直也（東京電機大学）、服部 裕司（東北大学）

J15017 海洋細菌に対する衝撃波殺菌効果の向上に関する研究……………………………………………………………39
阿部 晃久（神戸大学）、孫　明宇（東北大学）
J15018 しゅう動面における Me-DLC 由来軟質金属層の諸物性と摩擦・摩耗特性に関する研究　………………41
後藤　実（宇部工業高等専門学校）、高木 敏行（東北大学）
J15019 微分位相構造に基づく後方乱気流の多感覚呈示………………………………………………………………43
竹島 由里子（東京工科大学）、大林　茂（東北大学）
J15020 高密度水素安全管理に関する連成解析…………………………………………………………………………45
石本　淳（東北大学）、Combescure Alain（INSA de Lyon）
J15021 バリスティックレンジへ適用可能な感圧塗料技術の開発……………………………………………………47
沼田 大樹（東北大学）、大谷 清伸（東北大学）
J15022 カルマン渦列の周波数選択機構の究明と渦列形成の抑制……………………………………………………49
髙木 正平（首都大学東京）、大林　茂（東北大学）
J15023 自然環境中の大規模非定常高速流体現象の定量的可視化計測法………………………………………………51
水書 稔治（東海大学）、大林　茂（東北大学）
J15024 翼端漏れ渦キャビテーションの熱力学的効果…………………………………………………………………53
姜　東赫（青山学院大学）、伊賀 由佳（東北大学）
J15025 新力天秤を用いたサイレント超音速複葉翼モデルの空力特性………………………………………………55
川添 博光（鳥取大学）、大林　茂（東北大学）
J15026 マッハ１近傍の流れの非正常性の研究　………………………………………………………………………57
菊池 崇将（日本大学）、大谷 清伸（東北大学）
J15027 風力エネルギー高度利用のための電磁エネルギー変換装置の開発……………………………………………59
岩本 悠宏（同志社大学）、高奈 秀匡（東北大学）
J15028 波のエネルギーに基づく軸流を持つ渦の安定性解析とその応用………………………………………………61
服部 裕司（東北大学）、福本 康秀（九州大学）
J15029 Rolling characteristics of neutrophils on PDMS surface mimicking the endothelial topography ……………63
白井　敦（東北大学）、Jean-Paul Rieu（リヨン第一大学）
J15030 衝撃波の細胞内伝播動態の解析…………………………………………………………………………………65
中川 敦寛（東北大学病院）、大谷 清伸（東北大学）
J15031 微細加工を施した伝熱面を流れる液膜流の熱流動特性…………………………………………………………67
足立 高弘（秋田大学）、岡島 淳之介（東北大学）
J15032 大規模環境でのふく射および対流によるエネルギー輸送に関する研究………………………………………69
山田　昇（長岡技術科学大学）、圓山 重直（東北大学）
J15033 膨張波照射による気泡運動と生体組織への影響…………………………………………………………………71
橋本 時忠（佐賀大学）、大谷 清伸（東北大学）
J15034 ＭＲ流体流動場中における微粒子挙動の解明……………………………………………………………………73
井門 康司（名古屋工業大学）、中野 政身（東北大学）
J15035 小型航空機の空力性能向上に関する研究…………………………………………………………………………75
佐々木 大輔（金沢工業大学）、下山 幸治（東北大学）
J15036 腹足類這行運動の粘液の特性解析とその壁面移動ロボットへの応用…………………………………………77
塚越 秀行（東京工業大学）、中野 政身（東北大学）
J15037 柔いフィンの流体励起振動に関する研究…………………………………………………………………………79
李鹿　輝（山形大学）、中野 政身（東北大学）
J15038 超高効率太陽電池用量子ドット構造のバンド構造と光学的性質………………………………………………81
福山 敦彦（宮崎大学）、寒川 誠二（東北大学）
J15039 末梢神経刺激用磁気刺激コイルの開発……………………………………………………………………………83
加茂 慎哉（株式会社 IFG）、高木 敏行（東北大学）

J15040 溶射用外部磁界印加型プラズマスジェット内の飛行粒子の数値解析……85
藤野 貴康（筑波大学）、高奈 秀匡（東北大学）
J15041 旋回流プラズマジェット微粒子形成プロセス用高熱効率プラズマトーチの開発……87
安藤 康高（足利工業大学）、西山 秀哉（東北大学）
J15042 ナノ粒子ＥＲ流体の高機能化とマイクロチャンネル内での流動評価……89
田中 克史（京都工芸繊維大学）、中野 政身（東北大学）
J15043 乱流中の渦の複雑な時空間構造の解析……91
石原　卓（名古屋大学）、服部 裕司（東北大学）
J15044 中性粒子ビームプロセスによる高性能高移動度 MOS トランジスタに関する研究……93
遠藤 和彦（産業技術総合研究所）、寒川 誠二（東北大学）
J15045 ホールトーン現象のアクティブ制御に関する研究……95
松浦 一雄（愛媛大学）、中野 政身（東北大学）
J15046 飛翔体の空力性能改善に関する研究……97
長谷川 裕晃（秋田大学）、大林　茂（東北大学）
J15047 非平衡乱流現象の解明と制御……99
酒井 康彦（名古屋大学）、早瀬 敏幸（東北大学）
J15048 Characteristic simulation of neutral beam etching fabricated nanodisks for new material applications … 101
Yiming Li（National Chiao-Tung University）、寒川 誠二（東北大学）
J15050 水中におけるストリーマ進展機構……103
佐藤 岳彦（東北大学）、金澤 誠司（大分大学）
J15051 プラズマ流による気泡生成機構に関する研究……105
佐藤 岳彦（東北大学）、中谷 達行（岡山理科大学）
J15052 移動物体周りの非定常流体現象予測の高度化のための研究……107
大林　茂（東北大学）、高橋　俊（東海大学）
J15054 高繰返しレーザーパルスを用いた超音速流体制御の数値解析……109
岩川　輝（名古屋大学）、大林　茂（東北大学）
J15055 Ignition Studies of Gaseous Pre-mixtures in Turbulent Flow …… 111
Roman Fursenko（Far-Eastern Federal University）、丸田　薫（東北大学）
J15056 Cavity formation mechanism in a cavitation process …… 113
佐藤 岳彦（東北大学）、Mohamed Farhat（Ecole Polytechnique Federale de Lausanne（EPFL））
J15057 Characterization of Plastic Deformation using Electromagnetic NDT Methods …… 115
陳　振茂（西安交通大学）、高木 敏行（東北大学）
J15058 Numerical and experimental research on active control of self-sustained flow oscillations with sound interaction … 117
Mikael A. Langthjem（山形大学）、中野 政身（東北大学）
J15059 Investigation of inhomogeneous mixing of plasma species in the hybrid-stabilized
argon-water arc discharge for subsonic-supersonic quasi-laminar plasma flow regimes …… 119
Jiri Jenista（Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i.）、西山 秀哉（東北大学）
J15060 Energy release dynamics in porous media …… 121
Nickolay Lutsenko（Far Eastern Federal University）、丸田　薫（東北大学）
J15061 Flammability limits of Low-Lewis-number premixed flames …… 123
Sergey Minaev（Far Eastern Federal University）、丸田　薫（東北大学）
J15062 Development of Conservative Kinetic Force Method…… 125
Vladimir Saveliev（National Center of Space Researches and Technologies）、米村　茂（東北大学）
J15063 Application of Magneto-Rheological Elastomers to energy harvesting …… 127
SEBALD Gael（INSA de Lyon）、中野 政身（東北大学）

J15064 The continuous spectrum in the Moore–Saffman–Tsai–Widnall instability …… 129
Stefan, Llewellyn Smith (University of California, San Diego)、服部 裕司 (東北大学)
J15065 Predictive kinetic modeling of energy thermalization, chemical reactions, and compression wave formation in non-equilibrium nanosecond pulse discharges in air and fuel-air mixtures…… 131
高奈 秀匡 (東北大学)、Adamovich Igor (The Ohio State University)
J15066 Generation and transport of chemical species in low-temperature atmospheric plasma for sanitization device … 133
Tetsuji Shimizu (terraplasma GmbH)、佐藤 岳彦 (東北大学)
J15067 Numerical study on gas lubrication of a textured surface in micro/nanoscale…… 135
米村　茂 (東北大学)、Yevgeniy Bondar (Siberian Branch of Russian Academy of Science)
J15068 Application of Data Assimilation to Aviation Safety System …… 137
大林　茂 (東北大学)、鄭　信圭 (Kyunghee University)
J15069 Aerodynamic Design and Optimization of High Speed Transport Aircraft …… 139
大林　茂 (東北大学)、Bura Romie Oktovianus (Bandung Institute of Technology)
J15070 Development and applications of micro-motors consisting of smart polymer rotor and dielectric liquid … 141
中野 政身 (東北大学)、Miklos Zrinyi (Semmelweis University)
J15071 Numerical study of thermal and chemical non-equilibrium effects in near-continuum hypersonic flows … 143
Shoev Georgy (Novosibirsk State University)、米村　茂 (東北大学)
J15072 傾斜キャビティ内流れの不安定性評価…… 145
小宮 敦樹 (東北大学)、Daniel Henry (Ecole Centorale Lyon)
J15073 Investigation of nozzle flows at low Reynolds numbers …… 147
Yevgeniy Bondar (Novosibirsk State University)、丸田　薫 (東北大学)
J15074 Investigation of flame inhibition through radical scavenging mechanisms …… 149
Vladimir Gubernov (Far Eastern Federal University)、丸田　薫 (東北大学)
J15075 バイオテンプレート法による大面積２次元高密度および分散型ナノ粒子エッチングマスクの実現… 151
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)
J15076 プラズマ流による密閉小型容器内のウイルス不活化法の開発…… 153
佐藤 岳彦 (東北大学)、押谷　仁 (東北大学)
J15077 ふく射要素法を用いたレーザー温熱治療に関する研究…… 155
櫻井　篤 (新潟大学)、圓山 重直 (東北大学)
J15078 固液界面熱抵抗の分子動力学的研究…… 157
小原　拓 (東北大学)、芝原 正彦 (大阪大学)
J15079 Study of thin films and ribbons of Heusler alloys for the use in energy saving magnetic refrigeration technology … 159
Vladimir Khovaylo (National University of Science and Technology "MISiS")、高木 敏行 (東北大学)
J15080 Measurement-integrated analysis methodology for complex flow systems …… 161
早瀬 敏幸 (東北大学)、Brandt Luca (KTH)
J15081 温熱治療における局所加熱法の理論的・実験的研究…… 163
圓山 重直 (東北大学)、Victoria Timchenko (The University of New South Wales)
J15082 ナノ・マイクロ構造によるふく射制御に関する研究…… 165
圓山 重直 (東北大学)、Rodolphe Vaillon (INSA de Lyon)
J15083 がん治療および診断のための生体伝熱解析…… 167
圓山 重直 (東北大学)、Subhash Chandra Mishra (IIT)
J15085 Analysis of transport phenomena of oxygen ion in solid oxide fuel cell materials …… 169
徳増　崇 (東北大学)、Jeongmin Ahn (Syracuse University)
J15089 各種基板上のカーボン系薄膜成長における量子・分子論的解析…… 171
徳増　崇 (東北大学)、須藤 理枝子 (㈱さがみはら産業創造センター)

J15090　腸骨内の骨髄流れの数値流体モデルの構築…… 173
中山 敏男（鶴岡工業高等専門学校）、太田　信（東北大学）
J15091　遷臨界 / 超臨界状態における酸水素混合系に対する熱物性解析…… 175
徳増　崇（東北大学）、津田 伸一（九州大学）
J15092　触媒層内酸素輸送抵抗に対する表面散乱の影響…… 177
徳増　崇（東北大学）、杵淵 郁也（東京大学）
J15093　次世代高温センサ研究会 (フェーズ２）…… 179
内一 哲哉（東北大学）、坂本 敏昭（(株) インテリジェント・コスモス研究機構）
J15094　タンパク質のシグナル配列の物理化学的性質と細胞内小器官への輸送に関する研究…… 181
池田（向井）有理（明治大学）、太田　信（東北大学）
J15095　The Theoretical Modes of the Wake Flow of Road Vehicles…… 183
Chenguang Lai（Chongqing University of Technology）、大林　茂（東北大学）
J15097　炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の検査、補修、リサイクルに関わる研究会…… 185
高木 敏行（東北大学）、伊藤 浩志（山形大学）
J15107　Measurement of diffusion coefficient through artificial micro and nanopores…… 187
Gary Rosengarten（RMIT University）、小宮 敦樹（東北大学）
J15108　Transport phenomena of nanoscale water droplet in a nano pore…… 189
徳増　崇（東北大学）、Philippe Vergne（INSA de Lyon）

＜萌芽公募共同研究＞
J15H001 羽ばたき飛行実用化に向けた影響因子の最適化…… 191
石出 忠輝（木更津工業高等専門学校）、大林　茂（東北大学）
J15H002 ２次元キャビティ流れのホップ分岐…… 193
岩津 玲磨（東京電機大学）、服部 裕司（東北大学）
J15H003 アルミニウム合金のイメージベース解析…… 195
鈴木 克幸（東京大学）、大林　茂（東北大学）

＜連携公募共同研究プロジェクト＞
J15R001 心電計と超音波を融合したマウス胎仔心機能評価…… 197
杉林 里佳（国立成育医療研究センター）、早瀬 敏幸（東北大学）、
船本 健一（東北大学学際科学フロンティア研究所）、伊藤 拓哉（東北大学医学系研究科）
J15R002 漂流物混入型津波に関するスーパーコンピューティングとスケールモデリング…… 199
石本　淳（東北大学）、今村 文彦（東北大学災害科学国際研究所）、
Kozo Saito（University of Kentucky）、Jean-Yves Cavaillé（INSA de Lyon）
J15R003 先進的医用超音波イメージングに関する研究…… 211
田邉 将之（熊本大学）、早瀬 敏幸（東北大学）、橋本　浩（GE ヘルスケアジャパン）
J15R004 省エネルギーのための知的層材料・層構造に関する国際共同研究…… 215
高木 敏行（東北大学）、Jean-Yves Cavaille（INSA de Lyon）、
Christian Boller（Fraunhofer Institute for NDT）、Jinhao Qiu（南京航空航天大学）、
Julien Fontaine（Ecole Centrale de Lyon）、Kohl Manfred（Karlsruhe Institute of Technology）、
Henrik Alfredsson（KTH）
J15R005 Physical insight into Mach reflection transition and its hysteresis in axisymmetric intakes in continuum and rarefied flow conditions for high-speed airbreathing propulsion…… 227
Hideaki Ogawa（RMIT University）、大谷 清伸（東北大学）、Sannu Mölder（Ryerson University）、
Evgeny Timofeev（McGill University）、Georgy Shoev（Novosibirsk State University）

J15R007 超並列脳型ＬＳＩのためのナノ構造アナログメモリ素子の開発…………………………………………… 235
森江　隆（九州工業大学）、寒川 誠二（東北大学）、高橋 庸夫（北海道大学）

1. 平成 27 年度流体科学研究拠点活動のまとめ

1.1 概要

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

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

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

平成 27 年度の公募共同研究は、平成 27 年 4 月 1 日から平成 28 年 3 月 31 日まで実施された。公募共同研究の募集や申請手続きの情報は、平成 26 年 12 月から翌年 1 月末にかけて、本研究所のホームページで日本語と英語で広く国内外に公開するとともに、関連学会および本研究所の関連研究者メーリングリストを利用して電子メールで広く国内外に通知した。公募共同研究の採択は、共同研究委員会に過半数が外部委員の審査委員会を結成して行った。採択された研究課題には、評価結果に基づき研究経費を措置した。

平成 27 年 11 月には、運営委員会、共同研究委員会、同年 10 月に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 27 年 10 月 28 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-2015 において仙台国際センターにて開催した。本報告会では 94 件（連携公募共同研究プロジェクト 5 件、萌芽公募共同研究 3 件を含む）のプレゼンテーションとポスター発表が行われ、159 人の出席者

があった（写真 1、2）。
　発表は全て英語で行われ、海外からの共同研究者も交えて活発な議論が行われた。

写真 1：ショートプレゼンテーションの様子

写真 2：ポスターセッションの様子

1.3　流体科学データベース

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

表 1：流体科学データベースへの登録件数とアクセス数

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
公募共同研究成果の登録数	16	32	42	47	54	60	63
登録済みデータ総数	458	478	488	493	500	516	532
流体科学データベースへのアクセス件数	10,040	12,123	10,815	8,591	7,587	6,818	7546

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

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

1.5　公募共同研究実施状況

1）申請・採択状況

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

表 2：一般公募共同研究の申請・採択状況

		平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
申請数（件）		52	64	77	85	94	98	98
採択数（件）		52	63*	77	85	93*	96*	97
国内・国際	国内	32	35	47	51	59	60	58
	国際	20	28	30	34	34	36	39
分野別件数(国内/国際)	エアロスペース	7 (5/2)	7 (5/2)	10 (7/3)	12 (9/3)	13 (10/3)	16 (12/4)	16 (3/13)
	エネルギー	16 (8/8)	14 (5/9)	18 (6/12)	20 (7/13)	21 (7/14)	21 (7/14)	21 (7/14)
	ライフサイエンス	7 (5/2)	13 (8/5)	13 (9/4)	14 (8/6)	19 (12/7)	17 (12/5)	15 (8/7)
	ナノ・マイクロ	17 (10/7)	17 (10/7)	23 (17/6)	24 (17/7)	24 (18/6)	24 (17/7)	22 (14/8)
	基盤	5 (4/1)	12 (7/5)	13 (8/5)	15 (10/5)	16 (12/4)	18 (12/6)	23 (16/7)
採択率（%）		100	98	100	100	99	98	99
充足率（金額）（%）		26～100	77～95	59～97	49～83	44～73	19～70	21~67
申請金額（千円）：a		20,177	29,303	35,405	38,895	41,349	43,359	44,091
採択金額（千円）：b		16,639	24,637	25,657	25,550	23,079	22,004	21,563
平均充足率（金額）（%）：b/a		82	84	72	66	56	51	49
平均採択金額（千円）		320	391	333	301	248	229	222

*取り下げ

表 3：分野横断プロジェクト申請・採択状況

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

表 4：連携公募共同研究プロジェクトおよび萌芽公募共同研究の申請・採択状況

	連携公募共同研究プロジェクト			萌芽公募共同研究	
	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
申請数（件）	3	3	7	5	3
採択数（件）	3	3	7	5	3
採択率（%）	100	100	100	100	100
申請金額（千円）：a	4,700	4,600	7,900	911	450
採択金額（千円）：b	2,977	2,627	4,572	393	257
充足率（金額）（%）：b/a	63	57	58	43	57
一件あたりの採択金額（千円）	992	876	653	79	86

2）研究者の受け入れ状況

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

表 5：研究者の受け入れ状況

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
国内	165	210	262	350	345	347	430
国外	254	384	285	340	347	473	498
合計（延べ人日）	419	594	547	690	692	820	928

3） 研究費

本公募共同研究にて使用した研究費の内訳を表 6 に示す。

表 6：研究費の内訳

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度
物件費（千円）	8,136	22,343	22,837	18,739	16,796	16,649	12,417
旅費（千円）	7,415	11,978	11,484	13,866	15,809	15,611	18,688
合計（千円）	15,551	34,321	34,321	32,605	32,605	32,260	31,105

1.6 研究成果の発表件数

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

表 7：研究成果の発表件数

	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度
学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）	51	84	88	88	139	109
国際会議、国内会議、研究会、口頭発表等	152	198	291	304	457	371
その他（特許・受賞・マスコミ発表等）	5	19	11	22	28	14
合計（件）	208	301	390	414	624	494

2. 研究成果報告書
＜一般公募共同研究＞

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

Project code	J15001
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamental
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	1st year

Development of Novel Multi-Layer Magnetorheological Elastomer Isolators

Weihua Li*†, Masami Nakano**††
*Faculty of Engineering, University of Wollongong, Australia
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The project aims to develop innovative multi-layer magnetorheological elastomer (MRE) isolators in order to effectively control and suppress vibrations due to earthquakes. Major research tasks include: (a) fabrication and characterization of MREs; (b) optimal design and development of adaptive MRE isolators with novel multi-layer structures; and (c) implementation and evaluation of MRE isolators for structural control.

2. Details of program implement

We designed and fabricated four MRE isolators with multi-layer structures. Each isolator consists of 10 MRE sheets boned onto 11 layers of steel sheets. A permanent magnet was placed at each end of the laminated structure, which was placed along the central axis of the solenoid with an appropriate gap between them. The transmissibility of the isolator under various coil currents is shown in Figure 1, which indicates that increasing the applied current decreases the natural frequency and the lateral stiffness of the isolator. Specifically, the natural frequency decreased from 16.8Hz to 5 Hz with a change percent of 70% when the current was changed from 0A to 3A.

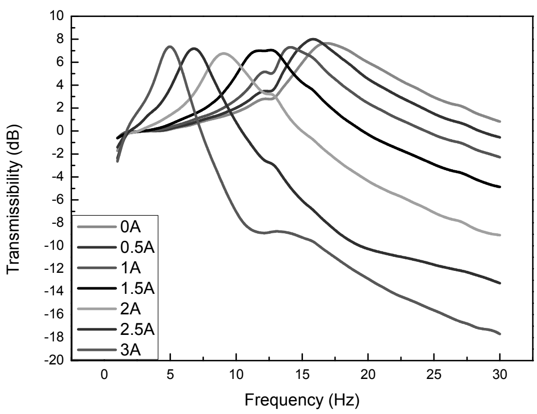


Figure 1: Transmissibility of the MRE isolator.

A three storey building was built to verify the MRE isolators with implementing a fuzzy logic controller. The reductions in acceleration of the third floor and second floor and relative displacement between the third floor and first floor demonstrated that the developed MRE isolators have better performance than passive ones.

3. Achievements

Novel MRE isolators were prototyped and their performance was experimentally evaluated. The research collaboration has resulted in 4 journal articles and 4 conference papers. One research staff and two PhD students have got excellent joint-supervision through this collaborative research project.

4. Summaries and future plans

Summaries: We have extended our successful research collaboration to a new topic on the development of novel MRE isolators for structural control, which has resulted in excellent results.

Future plans: In the second year of the collaborative research, the following two major tasks will be conducted: (1) development of MRE isolators with enhanced performance; and (2) joint-supervision of research students and junior research staff.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] J. Yang, S.S. Sun, T.F. Tian, W.H. Li, H. Du, G. Alici and M. Nakano: Development of a novel multi-layer MRE isolator for suppression of building vibrations under seismic events, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.70-71, (2016), pp.811-820 (10 pages).

[2] J. Yang, S. Sun, W.H. Li, H. Du, G. Alici, and M. Nakano: Development of a linear damper working with magnetorheological shear thickening fluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.26, No.14, (2015), pp.1811-1817 (7 pages).

*[3] S.S. Sun, H. Deng, J. Yan, W.H. Li, H. Du, G. Alici, and M. Nakano: An adaptive tuned vibration absorber based on multilayered MR elastomers, *Smart Materials and Structures*, Vol.24, No.4, (2015), 045045 (13 pages).

[4] S.S. Sun, J. Yang, H. Du, W.H. Li, G. Alici, H.X. Deng and M. Nakano: Horizontal vibration reduction of a seat suspension using negative changing stiffness magnetorheological elastomer isolators, *International Journal of Vehicle Design*, Vol.68, No.1-3, (2015), 104-118 (15 pages).

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

[5] T.F. Tian, G.R. Peng, W.H. Li, A. Moriana and M. Nakano: A Rotational Brake with Shear Thickening Fluids, *Proc. of the 12th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2015), (Oct. 27-29, 2015)*, Sendai, Miyagi, Japan, Paper ID: OS12-12, pp.520-521.

[6] S.S. Sun, J. Yang, W.H. Li and M. Nakano: Development of a Tuned Mass Damper Working with MR Elastomers, *Proc. of the 12th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2015), (Oct. 27-29, 2015)*, Sendai, Miyagi, Japan, Paper ID: OS12-15, pp.526-527.

[7] J. Yang, S.S. Sun, T.F. Tian, W.H. Li and M. Nakano: Building Protection from Earthquakes using Stiffness Softening MRE Isolators, *Proc. of the 12th Int. Conf. on Flow Dynamics (ICFD2015), (Oct. 27-29, 2015)*, Sendai, Miyagi, Japan, Paper ID: OS12-15, pp.532-533.

[8] S.S. Sun, J. Yang, W.H. Li and M. Nakano: Development of a Compact Variable Stiffness and Damping Isolator, *Proc. of the 15th Int. Symp. on Advanced Fluid Information (AFI-2015), (Oct. 28, 2015)*, Sendai Japan , CRF-72.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J15002
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	2nd year

Numerical Simulation for Reducing Future Tsunami Damage

Shigeru Obayashi*†, Fumiya Togashi**††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University,
**Applied Simulations Inc.
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

To develop effective protecting objects (*e.g.* sea walls) to protect people and buildings from a future huge tsunami using a state-of-art computational code integrating a computational fluid dynamics, computational structured dynamics, and a multi-objective genetic optimization code.

2. Details of program implement

We are developing the code to handle the object damage using the coupling methodology of fluid dynamics and structured dynamics. The developed code will have the capability of handling the building collapse, floating wreckages, and infrastructure damage, which will be very effective tool to estimate real local damage by Tsunami. We have been discussing the need from the society, future plan of the code development with professors at Tohoku University during the ICFD conference.

3. Achievements

We developed a computational fluid dynamics code using the volume of fluid methodology. We demonstrated the code by simulating the bridge washout by flood water. The developed code considers a contact surface friction, hence we could successfully simulate the realistic bridge washout, which was presented at a poster-session of ICFD2015. We also presented our result at 3rd international conference on Violent Flows in Osaka. Figure 1 is a sample snapshot of a car washout by flood water.

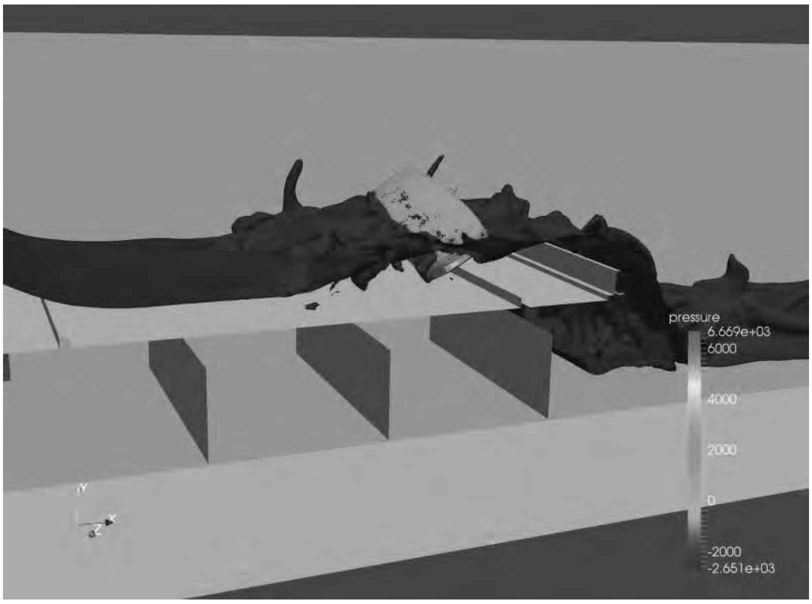


Figure 1：Car washout by floodwater

4. Summaries and future plans

A state-of-art coupled code of computational fluid dynamics and structured dynamics to handle tsunami simulation is being developed. The developed code will be applied to assess the future tsunami damage and to develop protective objects to protect people and buildings from a future tsunami disaster.

5. Research results (* reprint included)

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

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

*[1] F. Togashi, O. A. Soto, R. Lohner, M. Beppu, S. Obayashi, "Numerical Simulation of an Object Washout by Floodwater", Proceedings of 3rd International Conference on Violent Flows, 9-11, March 2016, Osaka, Japan.
[2] F. Togashi, R. Lohner, O. A. Soto, M. Beppu, S. Obayashi, "Numerical Simulation of an Object Washout by Tsunami," AFI-2015, 27-29, Oct., 2015, Sendai, Japan

3) Patent, award, press release etc.
N/A

Project code	J15003
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamental
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	1st year

Tornado Formation Research with Wind Tunnel Applicant

Rongjia Tao*†, Masami Nakano**††
*Department of Physics, Temple University,
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Tornado is one of the most serious natural disasters. Especially in Tornado Alley of USA, tornadoes are the most violent annually recurring threat. Recently, Dr. Tao published a theoretical paper, indicating that violent tornadoes in Tornado Alley start from the clash between northbound warm air flow and southbound cold air flow. As there is no mountain in Tornado Alley ranging from west to east to weaken or block the air flows, some clashes are violent, creating vortex turbulence, supercells. These supercells are initially in horizontal spinning motion at the lower atmosphere, and then tilt as the air turns to rise in the storm's updraft, creating a component of spin around a vertical axis. About 30% of supercells develop into tornadoes, causing tremendous damages. Dr. Tao proposes that if we build east-west walls, 300m high and 50m wide, we will weaken or block such air mass clashes and diminish the major tornado threat in the Tornado Alley forever. This project will utilize the wind tunnel, carrying out experiments to verify the above basic mechanism of tornado formation and investigate how we can prevent tornadoes from occurring.

2. Details of program implement

We will first use the wind tunnel at Tohoku University to carry out experiments to examine the interaction between a vertical wall and air flow. The flow pattern indicated in Fig.1 is from some theoretical estimation. We need to use the wind tunnel to check if it is correct. If it is true, high walls will effectively reduce the wind speed and eventually eliminate major tornado threats.

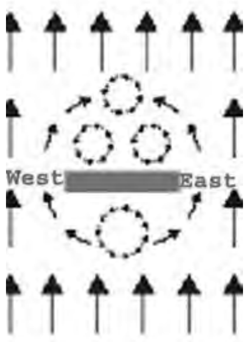


Fig.1 The area protected by a vertical wall is roughly a circle with the wall as its diameter.

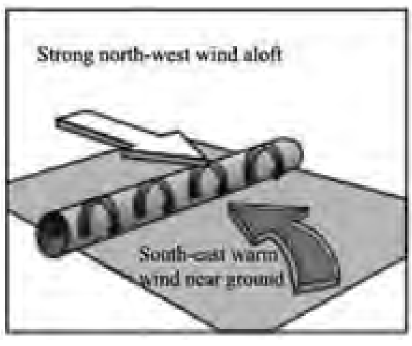


Fig.2 Violent clash creates a vortex.

Afterwards, we will use the wind tunnel to examine the vortex formation when two air flows collide. As shown in Fig.2, when the south wind and north wind collide, a vortex is created. We need to verify it with the wind tunnel. In addition, we need to find the precise location of the vortex produced in the collision.

3. Achievements

We expect that the experiments will confirm the theoretical predictions and provide more details about the tornado formation and how we can eliminate the major tornado threats.

4. Summaries and future plans

After several pre-tests, we have made the wind tunnel ready for the experiment. We plan to carry out the tests in summer 2016. In addition, our work has received much attention in USA. The program of Smart Cities Innovation and Defense Energy & Resilience Challenges has invited our project to present a show case at the Summit of Smart Cities, Austin, Texas, June 13-15, 2016. We will analyze the inputs and feedback from the Summit participants and US Government agencies to incorporate them into our research.

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] R. Tao and M. Nakano: Eliminating Major Tornadoes in US Tornado Alley, Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2015), pp.154-155.

3) Patent, award, press release etc. (patent, award, press release, note should be listed here if applicable)

(Patent) not applicable

(Award) Special Honor: The Program of Smart Cities Innovation and Defense Energy & Resilience Challenges has accepted our “eliminating tornado” project for showcase in Austin Convention Center, Austin TX, USA, June 13-15, 2016 at the Smart Cities Innovation Summit.

(Press release)

CBS news station at Wayne, Indiana, USA, “Tornado Wall,” was reported in news, on April 1, 2015.

Discovery Channel Canada, “Tornado Wall” was reported in program “Force of Nature” April 30, 2015.

課題番号	J15004
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

ターボジャブの空力特性に関する研究
Measurements of aerodynamic characteristics of the turbo-jav

関　眞佐子*†，中川　晋**
板野　智昭*，大林　茂***††
*関西大学システム理工学部，**関西大学大学院理工学研究科
***東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

ターボジャブは，ジュニアオリンピックの正式種目であるジャベリック・スローに用いられる投擲器具であり，質量約 300g，直径約 3.7cm，全長約 70cm の中空円筒形に近い形状をしている．競技用ヤリに比較して長さが短く，後尾に 4 枚の羽を有することが特徴である．本体がポリエチレン製，先端がエラストマー製であるため安全性が高く，2008 年からは全国障害者スポーツ大会にも導入されている．これまでターボジャブの飛行特性に関して流体力学的な研究はほとんどなされてこなかった．本研究は，低乱風洞実験施設を利用して，ターボジャブにはたらく流体力やモーメントの計測を行い，その空力特性を明らかにすることを目的とする．

2. 研究成果の内容

東北大学低乱風洞施設において大型磁力支持天秤装置（MSBS）を用いてターボジャブ（ニシスポーツ T5109）に作用する抗力，揚力，ピッチング・モーメントの計測を行った．風速は 10 ～ 40 m/s の範囲で 10 m/s 毎，迎え角 α は-5 ～ 5°の範囲で 0.5°毎に変化させて計測した．ピッチング・モーメントはターボジャブの重心を基準とした．

図 1 に，各迎え角に対して得られた抗力係数 C_d，揚力係数 C_l，モーメント係数 C_m をレイノルズ(Re)数の関数として描いた．ただし，Re 数は代表長さとしてターボジャブの直径を用いて定義した．図 1 より，各迎え角に対して，Re 数の増加とともに抗力係数はわずかに減少するものの，揚力係数とモーメント係数は Re 数にほとんど依存しないことが分かる．また，一定の Re 数の場合に迎え角が 0 から増加すると，抗力係数と揚力係数は増大するが，モーメント係数は 0 から減少して負の値となることも分かる．

今回 MSBS 計測により得られた各空力係数の値を，風速が 20m/s の場合（$Re \approx 4.8 \times 10^4$）に対して，当研究室の従来研究結果（ストラットにより下方からターボジャブを支持し，3 分力検出器（日章電機 LMC-3501）により計測したもの）と比較したところ，抗力係数は 5%，揚力係数は 1%の誤差範囲に収まったのに対し，モーメント係数はこれより大きな差異が見られた．これは，3 分力検出器で計測するモーメントの基準がターボジャブ重心から離れた位置にあるために，その換算の過程で種々の誤差が混入した可能性が考えられる．

迎え角αの増加とともにモーメント係数 C_m が減少して，αが正の場合に C_m は負となり，逆にαが負の場合に C_m が正となる傾向は，これまでの当研究室の研究により，風速が 25 m/s

より小さい場合には，迎え角が 35° 程度まで続くことが分かっている．これは，広い範囲の迎え角に対して迎え角を 0° に戻す向きのピッチング・モーメントが作用することを意味しており，競技用ヤリと大きく異なる点である．迎え角が多少大きな投擲でも，ターボジャブはヤリと比較して安定に飛行することが知られているが，ピッチング・モーメントのこの特性がその要因となっていると解釈され，尾翼の寄与が大きいものと推察される．

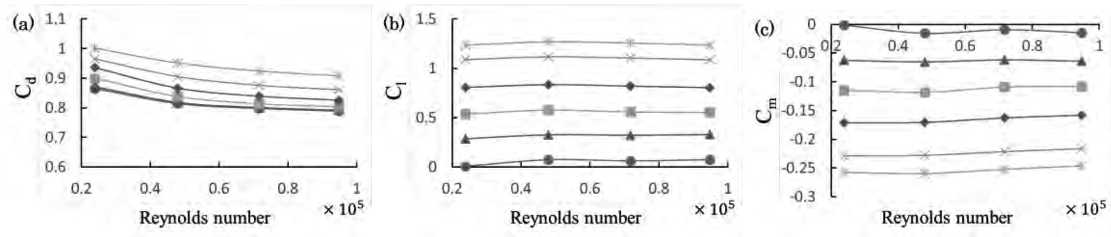


図 1：空力係数の Re 数依存性 (a) 抗力係数 (b) 揚力係数 (c) モーメント係数
●α = 0°, ▲1°, ■ 2°, ◆ 3°, × 4°, ＊5°

3. 研究目標の達成状況

風速 10 ～ 40 m/s, 迎え角 -5 ～ 5°の範囲で，ターボジャブの 3 分力計測が実行できた．ジュニアオリンピックにおけるジャベリック・スローの男子記録は 80 m 以上であることから，中学生のトップレベル選手の投擲における初速は 30m/s 程度と予想される．大人が競技を行う場合には更に初速が大きくなる可能性もあるが，今回計測した風速の範囲（最大値 40 m/s）でほぼ全ての投擲がカバーできると考えられる．従って，今回，広範囲の *Re* 数領域で抗力係数, 揚力係数およびモーメント係数の高精度計測が実現したことは貴重である．

4. まとめと今後の課題

風速 10 ～ 40 m/s, 迎え角-5 ～ 5°の範囲で行った 3 分力の MSBS 計測より, ターボジャブの抗力係数，揚力係数，（ピッチング）モーメント係数を求めた．その特性から，ターボジャブが多少大きな迎え角でも安定して飛ぶことの説明がなされ，ターボジャブは安全性とともに投擲のしやすさを兼ね備えた投擲器具であることが示された．実際の投擲において迎え角が 5°以上の場合もみられる. 今後 5°を越える迎え角の場合についても空力特性を明らかにする必要がある．また，ターボジャブはローリングしながら飛んでいることも分かっているので，ローリングがターボジャブの飛行に与える影響を調べることも重要である．

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] S. Nakagawa, Y. Konishi, T. Nakajima, T. Itano, M. Sugihra-Seki and S. Obayashi, Measurements of aerodynamic characteristics of the turbo-jav. *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information 2015*, Sendai, (2015), pp. 164-165.

[2] 塩見健人, 西田宙起, 中川晋, 中嶋智也, 板野智昭, 関眞佐子：ターボジャブの飛距離と空力特性, 第 20 回先端科学技術シンポジウム (2016).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15005
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	３年目

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

門脇 敏*†，小林 秀昭**††
*長岡技術科学大学技術経営研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

近年，グローバルな環境問題，特に地球温暖化に関する問題が盛んに議論されている．そして，代替燃料としてのバイオ燃料が，低環境負荷の観点から注目されている．バイオ燃料を実用燃焼器へ適用するには，火炎の不安定性に関する知識が不可欠である．バイオ燃料の燃焼では，中間生成物が不安定性に多大な影響を及ぼしているため，この影響を評価することは，現象を把握する上で必要不可欠である．本研究では，予混合火炎の不安定性に及ぼす中間生成物の影響を調べ，そのメカニズムを解明することを目的とする．

2. 研究成果の内容

支配方程式として化学反応を考慮した圧縮性ナヴィエ・ストークス方程式を採用し，二次元非定常反応流の数値計算を遂行した．計算スキームとしては，有限差分法の一つである陽的マッコーマック法を用いた．本数値計算では，申請者らがこれまでに開発してきたコードをベースとし，未燃ガスや中間生成物のルイス数，並びに反応速度の頻度因子を変化させて計算を遂行した．なお，計算の遂行では，流体科学研究所のスーパーコンピューターを用いた．

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

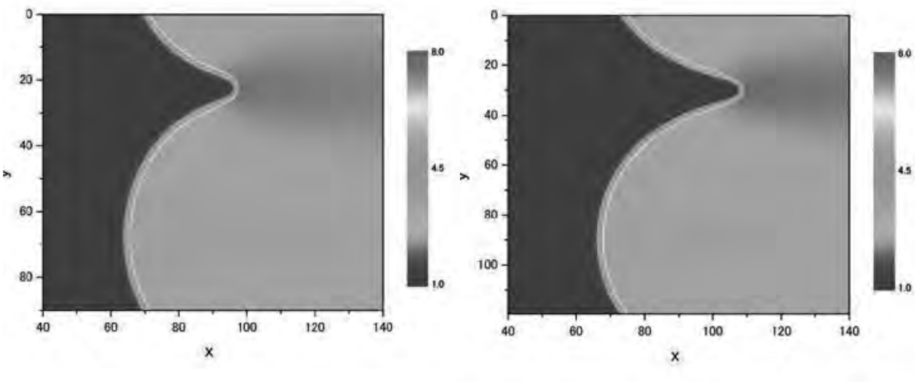


図１ セル状火炎の温度分布（$Le_1 = 2.0$，$Le_2 = 2.0$ & 0.5，$\psi = 0.1$）

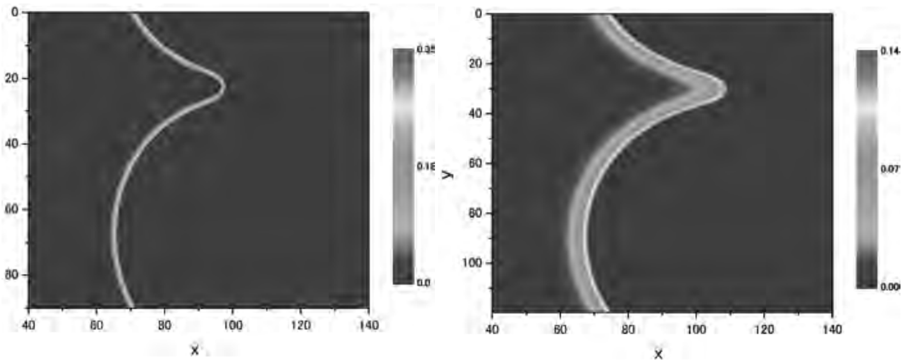


図２　中間生成物の濃度分布（$Le_1 = 2.0$，$Le_2 = 2.0$ & 0.5，$\psi = 0.1$）

図１は，セル状火炎の温度分布を示したものであり，未燃ガスのルイス数は$Le_1 = 2.0$，中間生成物のルイス数は$Le_2 = 2.0$（左図），0.5（右図）である．ここで，ψは反応速度の頻度因子の比であり，その値が小さくなると中間生成物の発生量は大きくなる．未燃ガスのルイス数が１より大きいこと（拡散・熱的効果）により，未燃ガス側に凹な火炎面において高温領域が存在している．このとき，中間生成物のルイス数が温度分布に与える影響はマイナーである．

図２は，セル状火炎における中間生成物の濃度分布を示したものである．中間生成物のルイス数が未燃ガスのそれより小さいとき（$Le_2 = 0.5$），中間生成物が火炎の上流側に幅広く分布している．これは，中間生成物の拡散が大きいことによるものである．

3.　研究目標の達成状況

本研究では，予混合火炎の数値計算を遂行し，不安定挙動における中間生成物とルイス数の影響を精査した．未燃ガスのルイス数が１より大きいとき，未燃ガス側に凹な火炎面において高温領域が存在すること，並びに中間生成物のルイス数が未燃ガスのそれより小さいとき，中間生成物が火炎の上流側に幅広く分布することを示した．

以上のことから，予混合火炎の固有不安定性における中間生成物に着目した本研究は，充分な成果を得ていると考えられる．

4.　まとめと今後の課題

バイオ燃料の有効利用の観点から，予混合火炎の固有不安定性における中間生成物とルイス数の影響を精査することは，主要な地位を占めるものである．今後は，詳細な化学反応を考慮した数値計算を遂行し，火炎の不安定機構を体系的に調べる予定である．

5.　研究成果（*は別刷あり）

1)　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）なし

2)　国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1]　Satoshi Kadowaki1, Kenji Ando, Thwe Thwe Aung, Wataru Yamazaki, and Hideaki Kobayashi, Intrinsic Instabilities of Premixed Flames with High Lewis-Number Reactants and Intermediate Products, Proceedings of the 15th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, pp. 38-39, (2015)

3)　その他（特許，受賞，マスコミ発表等）なし

課題番号	J15006
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

熱遷移流に対する分子動力学解析
Molecular dynamics study on thermal transpiration flow

山口 浩樹*†，菊川 豪太**††
*名古屋大学大学院工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

流れにおいて，流体を構成する分子が他の分子と衝突するまでに平均的に移動できる距離である平均自由行程の系の代表長さに対する比は，クヌッセン数と呼ばれる無次元数であり，希薄気体の効果を表す重要な無次元数である．流動場の微細化に伴い，クヌッセン数が大きい「高クヌッセン数流れ」が広くみられるようになってきた．この高クヌッセン数流れにおいては生じる特異な現象の一つに，流れ方向に存在する温度勾配によって低温側から高温側へと誘起される熱遷移流（熱匍匐流）がある．様々な解析や実験が行われてきたが，この熱遷移流が作り出す詳細な流動構造についてはまだ十分明らかになっていない．従来の解析で用いられてきた DSMC（直接シミュレーションモンテカルロ）法などによる手法では分子の衝突過程をモデル化しているために不十分であり，現象全体の大きな時空間スケールに対して詳細な流動構造の解明を行うためには結果として大規模な MD（分子動力学）シミュレーションが要求される．

そこで，本研究では，分子動力学法を用いて大規模数値シミュレーションを行うことにより直接的に熱遷移流の流動構造を解析し，その特性を明らかにすることを試みる．具体的には，微細流路を構成する壁面に温度勾配を課し，その内部での流動を解析する．

2. 研究成果の内容

構築済みの汎用分子動力学計算プログラムを利用し，流路壁面に温度勾配を与えた系を構築し，流路内部における流動を解析した．なお，壁面の影響を明らかにするために，壁面分子も陽に取り扱った．境界条件としては流路壁面に対し低温，高温，低温とすることで周期境界条件を満たすように温度勾配を設定し，初期条件としては流体の温度が壁面温度と等しくなるようにした．計算系の様子を図１に示す．

そして，計算条件を探索するために，相対的に小規模なテスト系を用いた MD シミュレーションを実施した．分子の初期配置としては，マイクロ流路内の MD シミュレーションで広く行われているように，数密度が一定となるように流路内にランダムに配置して解析を行った．しかし，流路内に温度分布があることから，数密度を一定としたために圧力分布が存在することになり，その後に流路内に生じた流動構造が圧力勾配と温度勾配のどちらの要因によるものか判別できないことが明らかとなった．そこで，流路全体の圧力が一定となるように温度条件を考慮した上で初期配置するように改良を行った．また，温度場や数密度場に比較して流速分布を解析するためには，より多くの統計量を確保することが必要であることが改めて明らかとなった．

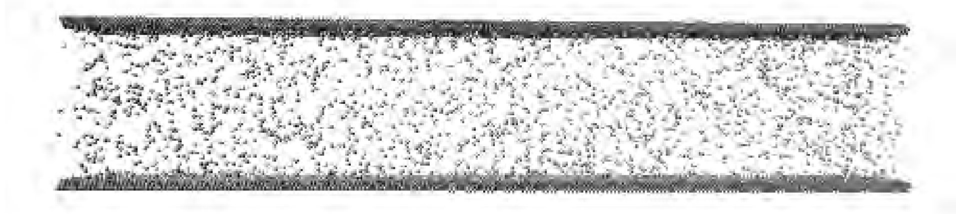


図1：固体壁面分子も考慮した計算系

また，流路内部の流動構造を解析するために，温度や速度，数密度などを流路断面内における二次元分布として可視化できるようにするためのプログラムも開発した.

3. 研究目標の達成状況

当初の目標であった，汎用の分子動力学プログラムを改良することによる熱遷移流を解析するための計算系の構築及び解析のためのプログラムの開発を実施することができた.

一方で，計算条件の探索を進める中で，無次元量としてのクヌッセン数のみで計算条件を設定できないという新たな問題も発覚した. MD シミュレーションにおいては計算負荷の低減のために流路サイズを小さくとることが一般的に行われるが，分子の大きさに対して十分に大きくないと分子の大きさそのものが流路内の流動構造に影響してしまうことが明らかとなった．そのため，更なる計算条件の検討が不可欠である.

4. まとめと今後の課題

微細流路を構成する壁面に温度勾配を課した分子動力学法による大規模数値シミュレーションを通して直接的に熱遷移流を再現することを目指し，分子動力学計算プログラムの改良と解析ツールを開発し，テスト系による計算条件の詳細な検討を実施した.

今後は，系の大きさという有次元量に対する影響を明らかにした上で，クヌッセン数を変化させながら本計算を実施して，詳細な流動構造の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] H. Yamaguchi and G. Kikugawa: Molecular Dynamics Study on Thermal Transpiration Flow, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 90-91.

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	J15007
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	1st year

Control of thermal transport across a solid-liquid interface by using self-assembled monolayer

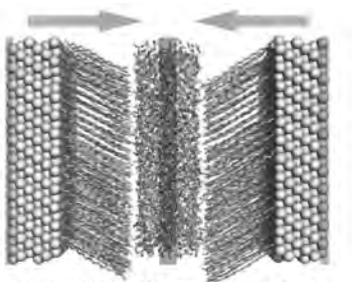
Shih-Wei Hung*, Junichiro Shiomi*†
Gota Kikugawa**††
*Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

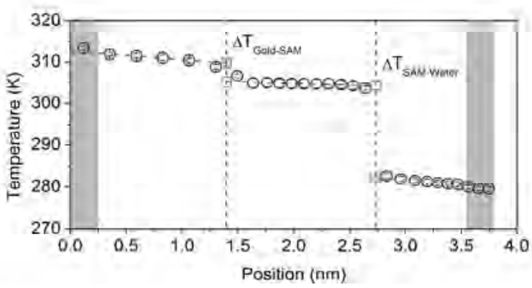
Interfaces between materials become increasingly important due to the recent rapid development in nanoscle engineering. When the systems reach the nanometer scale, thermal boundary resistance (Kapitza resistance) of even atomistically flat interface can become dominant because of significantly large specific surface area. Thermal transport across a solid-liquid interface plays an important role in determining heat conduction through materials and devices. One effective way to control thermal boundary conductance (TBC), an inverse of Kapitza resistance, is surface functionalization of the solid surface with self-assembled monolayers (SAMs). The surface properties can be easily and flexibly modified by the designation of SAM molecules. Therefore, it can be achieved to tailor the thermal transport across the solid-liquid interface with the use of SAMs. This study aims to explore the thermal transport across solid/SAM/liquid interface. To that end, non-equilibrium molecular dynamics (NEMD) simulations were performed to identify the effects of the chain length and terminal group on the TBC. The temperature dependence of TBC was also examined.

2. Details of program implement

This work sought to study the interfacial heat transfer at the water-SAM interface. Two different terminal groups were adopted to study the effect of wettability, methyl group for hydrophobic SAMs and hydroxyl group for hydrophilic SAMs, on interfacial thermal transport. Three alkanethiol molecules with different hydrocarbon chain lengths for each terminal groups were chosen to study the influence of chain length.



(a)



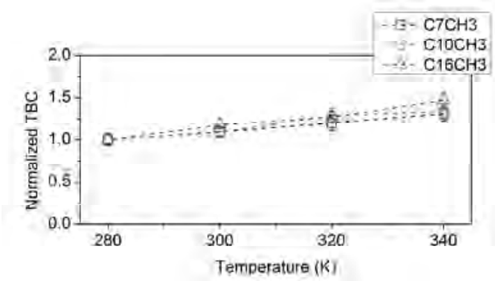
(b)

Figure 1 : (a)The molecular model system consisting gold, SAM surface of C16CH3 molecules and water molecules. (b) The temperature profile of gold/C16CH3/water system at 300 K.

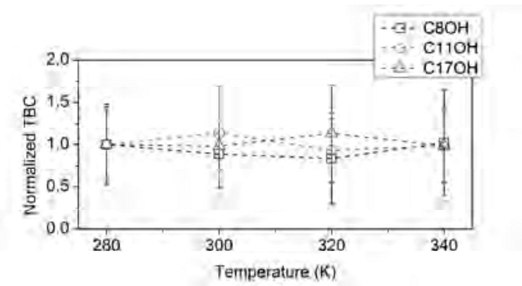
NEMD simulation with constant heat flux (one-dimensional) was performed. A constant amount of thermal energy was added in the heat source region and the same amount of energy was subtracted from the heat sink region, as illustrated in Fig. 1(a). The magnitude of the heat flux imposed in the present study was 2.0 GW/m^2. The local temperatures were calculated from the kinetic energy of molecules inside the slab bins, which were arranged in the direction perpendicular to the interface. Figure 1(b) shows the temperature distribution of C16CH3. TBC can be calculated by $G = J/\Delta T$, where G is the TBC, J is the magnitude of heat flux, and ΔT is the temperature gap at the interface.

3. Achievements

The calculated values of TBC are in consistent with the previous MD study, 98 MW/(m^2K) for CH3-terminated SAM and 1014 MW/(m^2K) for OH-terminated SAM at 300 K. To clarify the temperature dependence of $G_{SAM\text{-}Water}$, the values of $G_{SAM\text{-}Water}$ were normalized to the values at 280 K, as shown in Figures 2(a) and 2(b). The results reveal that the relation between $G_{SAM\text{-}Water}$ chain length is slight for both CH3-terminated and OH-terminated SAMs. The values of $G_{SAM\text{-}Water}$ show temperature dependence for CH3-terminated SAMs, while the temperature dependence of $G_{SAM\text{-}Water}$ is sight for OH-terminated SAMs.



(a)



(b)

Figure 2 : Normalized TBCs as a function of temperature. (a) CH3-terminated SAM; (b) OH-terminated SAM.

4. Summaries and future plans

In this study, the effect of chain length, terminal group, and temperature on the TBC at SAM-water interface were studied. The different temperature dependence for hydrophobic (CH3-terminated SAMs) and hydrophilic (OH-terminated SAMs) surfaces were observed. In future work, the further analysis will be performed to realize the underlying mechanisms.

5. Research results (* reprint included)

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

Not Applicable.

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

*[1] S.-W. Hung, J. Shiomi, and G. Kikugawa: Control of thermal transport across a solid-liquid interface by using self-assembled monolayer, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 92-93.

3) Patent, award, press release etc.

Not Applicable.

課題番号	J15008
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	新規（発展型）

常温圧縮せん断法を用いたマイクロ成形技術の開発
Technical development for the micro shape forming used by compression shearing method at room temperature

中山 昇*†，高木　敏行**††，堀田　将臣*，坂上　将太*，
三木　寛之***，小助川　博之**
*信州大学工学部，**東北大学流体科学研究所
***東北大学学際科学フロンティア研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

近年，医療分野や半導体分野で機械の小型化が進んでおり，機械の小型化に伴い，装置の構成部品も小型かつ高精度なものが要求される．微細形状を有する機械部品には樹脂製の部品が多く使用されている．樹脂製の部品には大量生産が可能であるという利点があるが，強度が低い，寿命が短い，熱に弱いといった欠点がある．そのため，高強度かつ熱に強い金属材料を用いた微細部品が求められている．しかし，金属材料は加工が困難であるという欠点があり，加工方法の確立が課題とされてきた．現在，ミリオーダー，ナノオーダーの加工法は充実しているが，マイクロオーダーの成形技術は空洞化している．マイクロオーダーの加工法として放電加工が挙げられるが，大量生産や複雑な形状の加工は困難である．

そこで新しいマイクロオーダーの加工方法として，常温圧縮せん断法 1)(Compression Shearing Method at Room Temperature：COSME-RT)を用いた金型の表面形状の転写を考えた．常温圧縮せん断法とは，常温および大気雰囲気中で金型の間に金属粉末を充填し，圧縮荷重とせん断応力を同時に負荷することで粉末を薄板に固化成形する成形法である．常温圧縮せん断法の特徴として，常温および大気雰囲気中で，短時間で成形体を作製することが可能であること，また成形と加工を同時に行うことができるため，大量生産に適していることが挙げられる．成形時に使用する金型の表面に微細形状を施すことで，成形体に微細形状を転写できると考えた．

本研究では常温圧縮せん断法を用いた転写特性を明らかにするため, 純 Al 粉末を使用して成形体を作製し，微細形状(ビッカース圧痕)の転写を行うことを目的とした．また，粒径の異なる三種類の Al 粉末を使用し，粉末の粒径が転写特性に及ぼす影響を明らかにした．

2. 研究成果の内容

本研究では，粒径の異なる三種類の純度 99.6%の純 Al 粉末を使用した．それぞれ，粉末粒径 D = -38 μm，粉末粒径 D = 63~75 μm，粉末粒径 D = 125~150 μm である．

鏡面加工を施した固定板(Stationary plate)にビッカース試験機により試験荷重 P_{HV} = 9.8N でピラミッド状の圧痕を付与した．このときのビッカース圧痕の対角線長さは約 50 μm となった．隣り合うビッカース圧痕との距離を 100 μm と設定した．

成形体の作製には常温圧縮せん断法を用いた．大気雰囲気中で，固定板(Stationary plate)および移動板(Moving plate)の間に混合粉末を充填し，圧縮応力σ_Nを負荷したまま保持する．その後，移動板を変位させせることで試料に対しせん断ひずみγを負荷し，固化成形を行う．ここで，せん断ひずみγは，$\gamma = L_S / t_P$で表され，L_Sはせん断距離(mm)，t_Pは試料厚さ(mm)である．成形条件は，成形体の目標寸法を10×40×0.25mm，σ_N = 1250MPa，L_S = 5mm，t_P = 0.25mm，γ = 20，およびせん断速度を5mm/minで一定とした．

転写部の微細組織を観察するため，電界放出型走査電子顕微鏡を用いて断面観察を行った．図1に粉末粒径D = 63~75μmの転写部の断面のSEM像を示す．図1より，ビッカース圧痕の形状を確認できることができ，微細形状がAl成形体に転写されていると考えられる．また，図2に粉末粒径D = 63~75μmの転写部の断面のIPFマップを示す．図2より，COSME-RTにより成形することで結晶粒が微細化していることが確認できた．結晶粒が微細化することにより，微細形状が転写されたと考えられる．

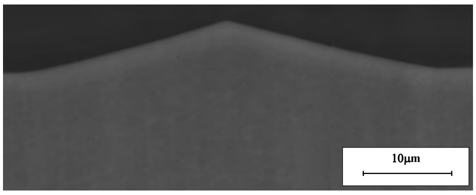


図1：63-75μmの粉末により成形した成形体の長手方向断面のSEM像

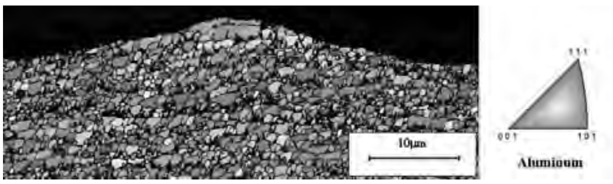


図2：63-75μmの粉末により成形した成形体のIPFマップ

3. 研究目標の達成状況

一度の加工により，マイクロスケールの部品製造開発が可能であることがわかったため，一定の目標を達成できたと考えられる．

4. まとめと今後の課題

本研究により，微細粒を有し，さらにμスケールの部品製造が可能であることが示唆された．ただし，摩擦係数の低下などの機能性の評価を行っていないため，今後，評価しなければならないと考えられる．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] 坂上将太，中山　昇，堀田　将臣，三木寛之，高木敏行，小早川博之：常温圧縮せん断法により成形した純アルミニウムの転写特性，平成27年度　塑性加工春季講演会　講演論文集，横浜市，(2015-5)，pp.243-244

* [2] T. Tohoku and Shota Sakagami，Noboru Nakayama，Toshiyuki Takagi，Hiroyuki Miki and Hiroyuki Kosukegawa: Technical Development for the Micro Shape Forming used by Compression Shearing Method at Room Temperature, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 132-133.

課題番号	J15009
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	3 年目

空隙媒体による水中爆発の減衰と軽減効果について
Attenuation and reduction effect of underwater explosion by porous materials

北川 一敬*†，大谷 清伸**††，小西康郁**††
*愛知工業大学，**東北大学流体科学研究所

1. 研究目的

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

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

2. 研究成果の内容

図 1 は爆薬を物体面(凹凸形状の Foam80)から下方 30mm の位置で起爆させた時に発生した爆発ガスの変形挙動の 2 次元変形の可視化結果である．No.1 は経過時刻 0ms，時間間隔は Δt =0.53ms である．爆薬が起爆し，No.2 から No.4 の間に爆発ガスは真球状に膨張， No.5 ではフォーム表面で反射した膨張波が爆発生成ガスの上面に当たることで爆発生成ガスの上面が収縮を始める．No.6 から No.8 では膨張波による収縮とともに爆発生成てきとうガス内部が負圧となり，収縮していく，No.9 から No.12 では爆発生成ガスが再膨張し，爆発生成ガス収縮時に発生する水流ジェットによって膨張収縮運動をしながら下方に移動する．

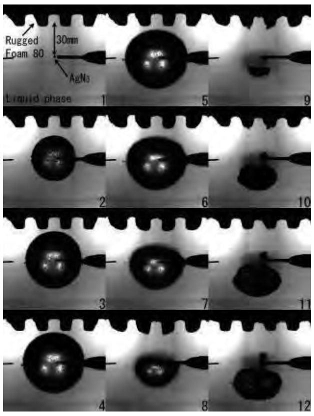


図 1 爆発生成ガスの挙動 (Δt=0.5ms)

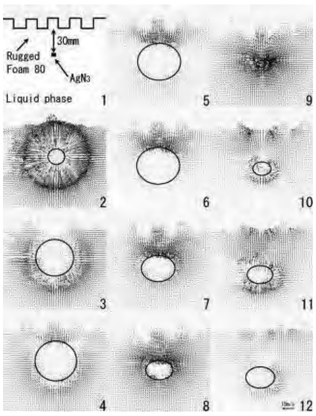


図 2 爆発生成ガス周りの速度分布(Δt=0.5ms)

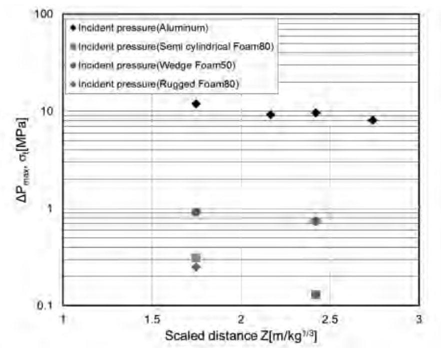


図 3 最大圧力と換算距離の関係

図 2 は爆薬を物体面(凹凸形状の Foam80)から下方 30mm の位置で起爆させた時に発生した爆発生成ガス周辺流れ場の速度分布を示す. No.1 は経過時刻 0ms, 時間間隔は Δt=0.50ms である．図中の黒丸は実際の爆発生成ガスの変形を表す． No.2 では起爆後爆発生成ガスが発生し，これにより急速に爆発生成ガス上下左右境界面付近の速度が上がる(+13m/s)． No.3

からNo.5では爆発生成ガスが最大になるにつれて水の速度は減少していく．No.4では爆発生成ガスと上面付近の速度が下向きに約-5m/sで発生している．No.5では約-7m/sまで速度が上昇する．No.6で静止していた下左右面付近の流れが起爆部方向に発生する．No.7では爆発生成ガス上面付近の速度は約-7m/sとなりNo.8からNo.9では下向きに水流ジェットが発生し(-5m/s)，No.10以降再膨張，再収縮を行い下方に移動する．図3は各種形状材質の入射衝撃波の最大過剰圧・応力の関係を示す．入射衝撃波及びバブルパルスの過剰圧の場合，凹凸剛体壁よりも凹凸空隙フォームでは90から99%減衰し，従って，水中爆発の減衰と軽減が行われた．また，各形状により最大過剰圧が異なり形状による減衰効果の違いが確認できた．

3. 研究目標の達成状況

水中爆発時に印可される衝撃圧・動的破壊挙動を，複雑構造媒体の組合せによって，物体損傷軽減の評価を行うことが研究目標である．各種形状(平面，凹凸，楔形，半円)フォームによる物体形状の影響を調べ，凹凸形状の空隙フォームにおいても，衝撃圧の減衰と水流ジェットを物体から遠ざける事ができ，当初の研究目標を達成した．特に，水中爆発の減衰と軽減効果は，媒体形状(三角，半円)，媒体の物性値や分布変更により得られると考えている．

4. まとめと今後の課題

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

今後の課題として，水中爆発の軽減効果は，入射衝撃波とバブルパルスのインパルス，水流ジェットの流速，爆発生成ガスの膨張収縮運動と媒体の音響インピーダンスから総合判断し，水中爆発の軽減を図る．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

*[1] K. Kitagawa, T. Nomura, K. Ohtani and A. Abe：Attenuation of underwater explosion propagating through porous compressible foam, Science and Technology of Energetic Materials, Vol. 76, No. 6, (2015), pp.127-132.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] K. Kitagawa, D. Nagahiro, K. Ohtani, Y. Konishi and A. Abe: Attenuation and Reduction Effect of Underwater Explosion by Porous Materials(2nd report), *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 70-71.

[3] 長廣大樹，北川一敬，大谷清伸: 水中爆発周辺流れ場のPIV 計測，火薬学会2015年度年会，(2015), pp. 99-102.

[4] 長廣大樹，北川一敬，大谷清伸: 水中爆発と各種形状の可変空隙媒体との衝突干渉，平成27年度衝撃波シンポジウム, (2015), p-17.

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	J15010
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

飛行船および索が有する空力性能の係留式高層プラットフォームシステム挙動に対する影響性

Influence of aerodynamic performances on airship and tether for behavior of captive upper-platform system

千葉 一永*†，大林 茂**††
*電気通信大学大学院情報理工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

より簡易で広範な運用を目指し，かつランニングコストを 100%無くすべく，未だ実現されていない世界初の試みである，係留式高層プラットフォームシステムの構築が最終目的である．係留式にするメリットは，1) 推進力無しに停留可能，2) プラットフォームの上げ下ろし無しに係留索を這うクライマを用いることでペイロードの移送が可能, 3) ペイロードへの電力供給が有線で可能，4) 浮揚ガスの補充が係留索に沿う小型気球あるいはパイプラインで実行可能，という点にある．これにより，1960 年前後に宇宙観測へ多大な功績を残した Rockoon システムに替わる高頻度宇宙輸送射場を構築する．本研究では，システム概念設計のための，飛行船および索が有する空力性能のシステム挙動への影響性を解析的に明示し，システム概念設計の礎を築く．

2. 研究成果の内容

システムの静的挙動を表す運動方程式を導出し，プラットフォームとして従来型軸対称機体とハイブリッド（浮揚ガスによる浮力および機体形状により動的に生成される揚力を併せ持つ）機体との比較を行い，システムの移流距離から定量的な差異を明らかにした．

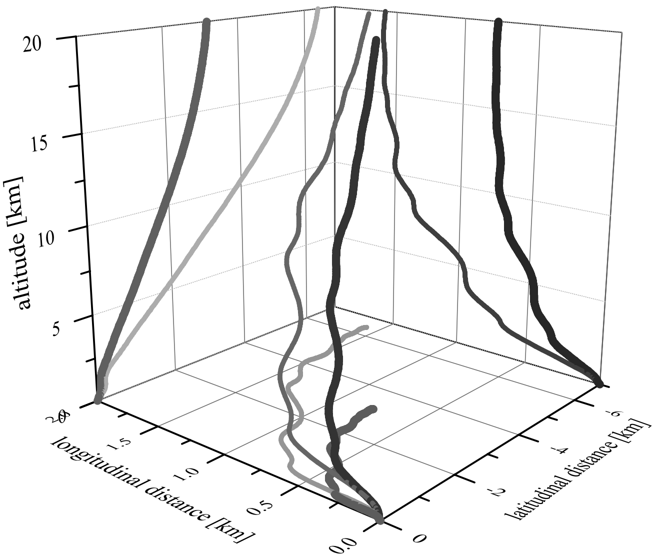


図 1：高層プラットフォームの揚力の差異によるシステム挙動の比較.

3. 研究目標の達成状況

高層プラットフォームの機体の空力性能および索の空力抵抗によるシステムの静的挙動の違いを明らかにするとともに，成層圏までの各高度での新たなインフラとしての可能性を示唆した．各分野での研究者達との交流を進めており，航空宇宙産業へのインパクトをもたらすべく研究を進めている．

4. まとめと今後の課題

使い捨てあるいは再使用とは一線を画す新たな宇宙輸送システムとして，Rockoon システムと成層圏プラットフォームから着想を得た，係留式高層プラットフォームシステムの成立性の検討を進めている．当該年度は，システムの静的挙動を解析し，システムの空力性能の違いによるシステムの静的な挙動の差異を定量的に示した．今後は，増速度$\Delta \boldsymbol{V}$の観点から，優位性のある高度を見極めるとととともに，プラットフォームの機体概念設計を進める．さらに，概念設計と並行して低高度からの実験を進め，知見を蓄積する．

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] Chiba, K., Satori, S., Mitsuhashi, R., Onda, M., Sano, M., Sasaki, J., and Akiba, R.: Feasibility studies on a high-altitude captive lighter-than-air platform system, AIAA Paper 2015-3378, 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (AVIATION), Dallas, Texas, USA, June 2015.

[2] 千葉 一永, 山田 哲哉, 恩田 昌彦, 佐鳥 新, 秋葉 鐐二郎: 係留式高層LTAプラットフォームシステムの実現可能性検討, 航空宇宙流体科学サマースクール 2015, 湯河原, 2015/8.

[3] 千葉 一永, 恩田 昌彦, 佐鳥 新, 秋葉 鐐二郎: 係留式高層プラットフォームシステムが持つ空力性能の系挙動に対する感度, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 2015/10.

[4] 山田 哲哉, 千葉 一永, 佐鳥 新, 丸 祐介, 佐藤 哲也: 将来輸送の持続的開発に向けた Aerial Launch Platform/System, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 鹿児島, 2015/10.

*[5] Nishikawa, R., Chiba, K., Obayashi, S., Onda, M., Satori, S., and Akiba, R.: Feasibility studies on a high-altitude captive platform system, 12th International Conference on Flow Dynamics (ICFD), Sendai, Japan, October 2015.

[6] 佐鳥 新, 三橋 龍一, 千葉 一永, 秋葉 鐐二郎: 係留式高層プラットフォームによる小型衛星打ち上げ事業のビジネスモデル, 日本航空宇宙学会北部支部講演会/第 13 回北海道宇宙科学技術創成センター学術講演会, 札幌, 2016/3.

[7] 西川 遼祐, 千葉 一永, 恩田 昌彦, 佐鳥 新, 秋葉 鐐二郎: 係留式高層プラットフォームの上昇経路予測, 日本航空宇宙学会北部支部講演会/第 13 回北海道宇宙科学技術創成センター学術講演会, 札幌, 2016/3.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし．

（受賞）なし．

（マスコミ発表）なし．

課題番号	J15011
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	3 年目

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

槇原 幹十朗*†，大谷 清伸**††
長谷川 美貴***，石井 あゆみ***，沖 義弘*，近藤 周*，土屋 佑斗***，近藤 一希***

*東北大学工学研究科，**東北大学流体科学研究所
***青山学院大学理工学部
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

スペースデブリが宇宙ステーションなどの有人宇宙施設に衝突し与圧壁に貫通穴が生じれば，空気漏れが起こる．スペースクルーは早急に貫通穴を発見し対処する必要があるが，衝撃によって電気系統がダウンし，既在の位置同定手法は使えない可能性が高い．そこで，暗闇でも貫通穴を認識できる位置表示手法が求められる．急激な温度・圧力上昇をトリガーにして長時間発光・蓄光するメカノクロミズム金属錯体を与圧壁内側に塗布することで，暗闇でも衝突貫通穴の周りを長時間発光させ続けるシステムを構築することを研究目的とする．

2. 研究成果の内容

発光体原料は，Eu_2O_3 等を種々の混合比の粉末を市販の接着剤に混合させアルミ製のバンパーに塗布した．この際，発光材料との混合しやすさ，バンパーへの塗布のしやすさ，乾燥後の表面のスムースさ, 発色の確認のしやすさなどを加味し, 接着剤は 5 種類程度を試した．発光体を塗布したバンパーと 10 cm の間隔でもう 1 枚のバンパーを配置し，与圧壁様に設置した．衝突実験には，東北大学流体科学研究所の一段式火薬銃の装置を用い，3 km/s 程度でプロジェクタイルを衝突させる実験を行った．

発光スペクトルの測定には，USB2000 を用いた．光ファイバーを衝突装置のチャンバーに設置し，その場観察を行った．衝突後，UV ランプ(254 nm)を照射しながら，同装置で衝突中心近くとその周辺の発光を数点測定した．発光スペクトル観測を行った．その結果を図 1 に示す．図 1 から，試料はプロジェクタイルが衝突した近辺とそれより遠い位置での発光色が異なることが明らかである．衝突していない部分は 620 nm 付近に 3 価のユウロピウムに帰属されるシャープな帯が観測されるのに対し，衝突した付近では 450 nm を中心にブロードな帯が新たに観測されている．すなわち，これは激しい衝突により 3 価のユウロピウムが 2 価のユウロピウムに化学変化を起こしたことを示唆している．このような実験による 3 価のユウロピウムの還元の現象を報告した例はなく，非常に新しい科学の展開が期待される．

3. 研究目標の達成状況

254 nm の励起光を用いて 3 価のユウロピウムが 2 価のユウロピウムに変化することを赤色から青色への変化という形で目視できるまでにすすんだ．今回のサンプルを調整するまでに，30 通り以上の試料を試験してきた．発光資料のスペクトルが観測されているので，研究目的は達成できたと考える．

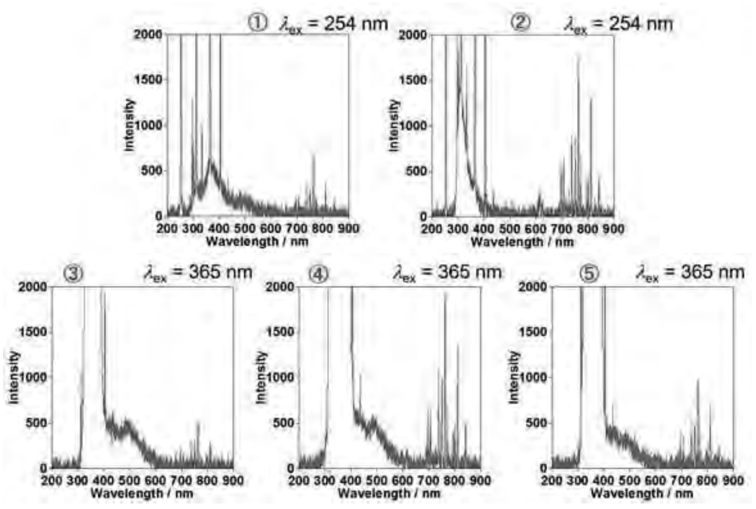


図１　衝突後の発光試料のスペクトル

4. まとめと今後の課題

今後は次の段階を経て試料の合成と同衝突実験を試み，目的達成を目指す.

- より発光の色調変化が鋭敏に変化する試料の合成
- 衝突後に発光減衰時間が 1 分間程度になるような試料の合成
- 衝突のみで化学反応（3 価のユウロピウム還元）と超残光性を兼ね備えた試料合成

5. 研究成果（*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] Makihara, K. and Takahashi, R.: Survivability Evaluation of Electrodynamic Tethers Considering Dynamic Fracture in Space-Debris Impact, *AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 53, No. 1, (2016), pp. 209-216.

[2] Makihara, K. and Matsumoto, N.: Survival Probability of Hollow Cylindrical Mesh Tether under Space Debris Impact, *AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets*, (in press).

[3] 沖義弘，松本紀彦，大谷清伸，長谷川直，槙原幹十朗: 識別率を用いた超高速衝突のデブリクラウド抽出法，日本航空宇宙学会論文集, Vol. 63, No. 4, (2015), pp. 157-165.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Oki, Y., Makihara, K. and Hasegawa, S.: Damage Estimation of Pressure Wall from Kinetic Energy of Debris Cloud at Oblique Impacts, *Proceedings of 30th International Symposium on Space Technology and Science*, Kobe, (2015), (DVD, 8 pages).

[2] Oki, Y., Kondo, S., Ohtani, K., Hasegawa, S., Hasegawa, M., and Makihara, K.: Position Indication of Air-Leakage caused by Space-Debris Impact using Photoluminescent Substance, *Proceedings of the 15th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), pp. 20-21.

[3] 近藤周，槙原幹十朗: スペースデブリ衝突におけるメッシュテザーの構造形態の影響に関する研究，日本機械学会東北支部第51期総会講演会, (2016).

[4] 近藤周，沖義弘，長谷川美貴，石井あゆみ，土屋佑斗，近藤一希，槙原幹十朗: テープテザーの生存確率評価のためのデブリ衝突損傷モデルの構築，平成27年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム, (2016).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15012
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

低騒音翼のための翼後縁形状の最適化に関する研究
Study on optimization of trailing edge for low noise airfoil

山縣　貴幸*†，早瀬　敏幸**††
*新潟大学工学部，**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

風力発電は、再生可能エネルギを用いたクリーンな発電方法であり，温室効果ガスの削減やエネルギ資源の確保の観点から、さらなる普及が望まれる。一方で，環境問題への意識の高まりから社会生活における騒音低減が，様々な分野において重要な課題となっている．本研究では、翼後縁形状の形を変えることで、低騒音な風車翼を実現することを目的としている．その基礎研究として対称翼を基本形状とした空力騒音特性と翼後縁形状の関係を数値シミュレーションにより評価する方法について検討し，翼形状の最適化のための基礎技術の構築を行なう．本研究期間では，対称翼の空力特性および空力騒音特性に関する過去の実験データに基づき，数値シミュレーションにより翼後縁形状や迎角の影響を再現し，翼後縁形状の変化による空力騒音低減のメカニズムの解明を目標とする．

2. 研究成果の内容

本研究で対象とする翼後縁形状の変更による空力騒音の低減では，従来用いられているトリッピングワイヤを用いた方法と比較すると機械的強度の点で利点があり，特別な制御システムを組み込むことなく翼の低騒音化を行なえる可能性がある．この翼後縁形状の変更における空力騒音の低減に関して共同研究を行なうことにより，実験および数値解析の両面からそのメカニズムを考察することが可能である．

本研究では，過去の実験データに基づき，数値シミュレーションにより翼後縁形状の空力騒音への影響を評価する方法について検討を行なった．まず，基礎的な翼形状として対称翼の NACA0018 を対称として，LES 解析による速度場の計算を行なった．解析コードは，OpenFOAM Ver. 2.3.0 を用いて，迎角 $\alpha = 0 - 30°$ の範囲で解析を行ない，揚力および抗力の変化を確認した．その結果，$\alpha = 12°$ と $\alpha = 15°$ の間で流れの剥離が生じ，揚力の急激な低下が見られ，過去の実験結果と一致することから計算の妥当性を確認した．次に，翼後縁を垂直に切り落とした対称なフラットバック翼とその一方の角を丸めた非対称なフラットバック翼の数値解析を行なった．過去の実験結果では，$\alpha = 6°$ において通常翼では離散周波数騒音が発生し，騒音レベルが最大となるが，対称および非対称なフラットバック翼では，離散周波数騒音が抑えられ，通常翼に比べて騒音レベルが低下する．数値解析においても，図 1 に示すように翼後縁の上面において，フラットバック翼では速度変動や Powel 音源の時間変化も減少することから空力騒音が低下すると考えられる．

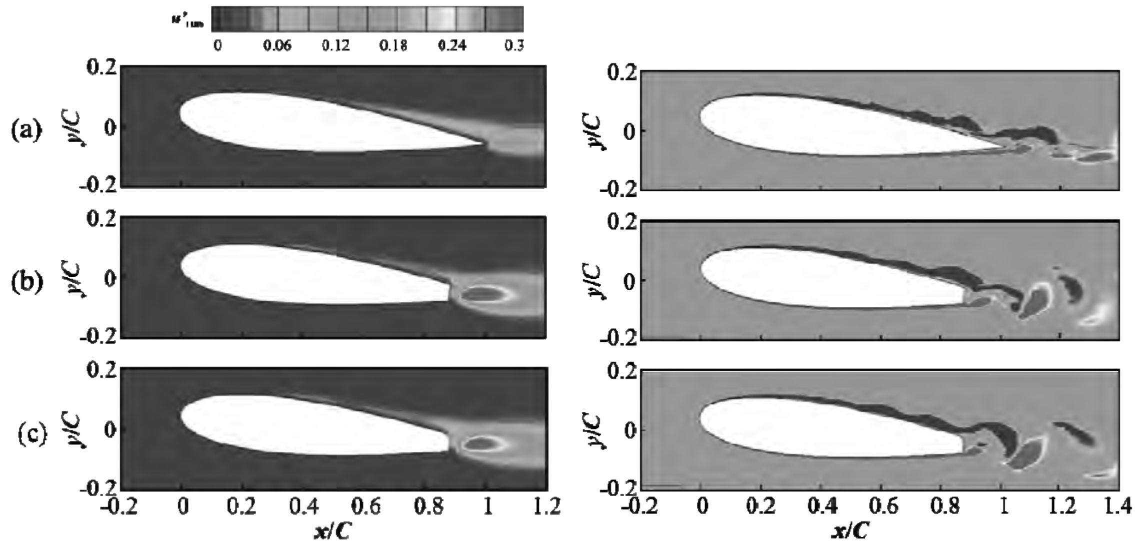


図 1 : 翼周りの鉛直方向速度変動分布（左）と Powel 音源分布（右）, (a) 通常翼, (b) 対称フラットバック翼, (c) 非対称フラットバック翼

3. 研究目標の達成状況

本研究では，過去の実験データに基づき，数値シミュレーションにより翼後縁形状の空力騒音への影響を再現することを目標として，通常翼およびフラットバック翼周りの流れ場の解析を行なった．その結果，翼後縁形状による速度場の変化や迎角の影響など，実験データと一致する傾向が得られたため，本期間での目標は概ね達成できたものと考える．

4. まとめと今後の課題

本研究では，対称翼の空力特性および空力騒音特性に関する過去の実験データに基づき，数値シミュレーションにより翼後縁形状や迎角の影響を再現し，翼後縁形状の変化による空力騒音低減のメカニズムについて考察を行なった．その結果，フラットバック翼では通常翼に比べ, 翼後縁の上面での速度変動や Powel 音源の変化が減少することで空力騒音が低下することが明らかとなった．今後は，より実機に近い条件での空力騒音の評価を行なうため，流入乱れの影響を考慮することや，翼形状の最適化のための主要パラメータの影響の評価が必要である．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] T. Yamagata, R. Saito, N. Fujisawa, K. Inoue, T. Hayase: Study on Optimization of Trailing Edge for Low Noise Airfoil, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), pp. 36-37.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

課題番号	J15013
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

水および液体窒素の高圧環境下における噴霧特性の研究
Atomizing characteristics of water and liquid nitrogen jets under high pressure environment

渡邉　力夫*†，小林 秀昭**††
*東京都市大学工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

平成 26 年度より開始した共同研究の 2 年目にあたる平成 27 年度では，引き続き常温水を高圧環境下においてスプレイノズルから噴射し，形成される噴霧様態の高速度ビデオカメラによる観察を実施した．今年度は特にノズル噴射孔付近の拡大撮影を実施することにより，噴霧初期の波動特性（変動モード，周波数，振幅，波速など）が噴霧様態に与える影響を解析した．また，噴霧全体の流動状態を解析するために，画像データより噴霧全体の速度分布を得ることができる PIV（Particle Image Velocimetry）計測を実施した．流体科学研究所における実験は平成 27 年 9 月 8 日から 9 月 11 日までの 4 日間実施され，表 1 に示す試験条件範囲内で 80 ケースに及ぶ実験を実施した．試験内容としては，常温水をスプレイノズルによりチャンバ内に噴射し，後方から光源により照射した状態で高速度ビデオカメラにより撮影するバックライトイメージング法による光学可視化試験を行った．また，一連の動画から微小時間間隔の 2 つの連続した画像を読み込み 2 次元面内の流速分布を解析する PIV 処理も実施した．

表 1 ： 試験条件

噴射圧力 P [MPa]	0.4 ~ 2.1
背景圧力 P_c [MPa]	0.1 ~ 0.8
水温度 [K]	288

図 1 に代表的な光学可視化試験の結果を示す．噴射圧力と背景圧力との差圧を 1.3 MPa と固定し，背景圧力を上昇させた際の結果である．背景圧力が高くなるにつれて噴流の全体の乱れ，特に横方向から観察した波面振動が大きく乱れていることがわかる．本研究ではさらに，噴流の広がり角や液膜波長，液膜分裂長さに影響を与えるパラメータを調査し，ウェーバー数・差圧・ジェット数・背景圧力が大きく影響を与えていることを明らかにし，モデル式を確立することにより現象を整理することができた．

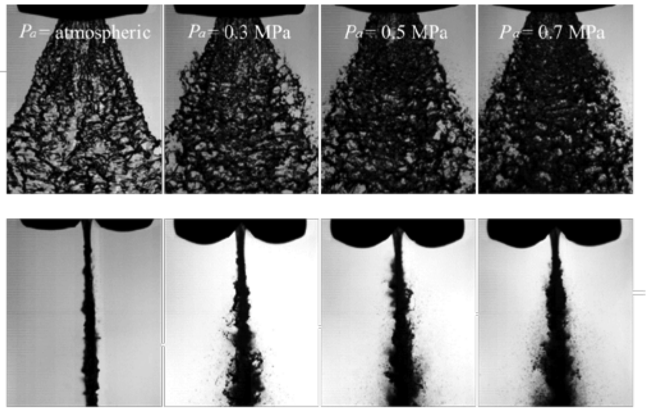


図1：常温水のスプレイノズル噴射可視化写真．噴射差圧 1.3 MPa で固定．

3. 研究目標の達成状況

平成 26 年度と平成 27 年度の研究により，スプレイノズルによる常温水噴霧の噴霧特性に関してはパラメータとの関係性をモデル化することができ，所望の結果が得られた．ただし，高温水や液体窒素の噴射に関しては装備施設的な問題が解決できず実施を見送った．

4. まとめと今後の課題

平成 27 年度は流体科学研究所における 4 日間の実験により，常温水の噴霧特性，特に背圧環境が与える影響を解析した結果，背圧や差圧などのパラメータと噴霧特性との関係性をモデル化することができた．今後は高温水と液体窒素の噴霧ができるように検討を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] R. Watanabe, N. Hiramoto, H. Ishii, T. Kudo, H. Kobayashi: Effect of Ambient Pressure on the Atomization Characteristics of Water Spray from a Fan Spray Injector, *Proceedings of 13th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Tainan, Taiwan, (2015), pp. 83-84.

[2] Hiroki Ishii: Spray Pattern Observation of Atomized Water Jet and Liquid Nitrogen for Water/Liquid Nitrogen Rocket Engine, *Proceedings of 30th International Symposium on Space Technology and Science*, Kobe, (2015), 2015-e-68(CDROM).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[3] 石井浩貴，平本成実，渡邉力夫，工藤琢，小林秀昭：高圧下におけるファンスプレイノズルによる水噴霧の光学的観察，第 43 回可視化情報シンポジウム，(2015)，B107 (CDROM).

[4] R. Watanabe, H. Ishii, T. Tanaka, H. Kobayashi: Liquid Film Breakup and Atomization of Water Spray Jet under High Ambient Pressure, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), CRF-12.

[5] 石井浩貴，田中宇真，渡邉力夫，小林秀昭，工藤琢：ファンスプレイノズルを用いた水噴霧における高圧環境が噴霧パラメータに与える影響，第 24 回微粒化シンポジウム，(2015)，pp. 47-50.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15014
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

磁性流体の界面現象の実験解析およびマイクロデバイスの開発

Experimental Analysis on Surface Phenomena of Magnetic Fluid and Development of Micro Devices

須藤 誠一*†，伊東 正英**，中西 将人**
上原 聡司***，西山 秀哉***††
*秋田県立大学システム科学技術学部，**秋田県立大学大学院システム科学技術研究科
***東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

自由界面を有する磁性流体が磁化すると，通常流体では考えられないような様ざまな現象を呈する．本研究では，磁性流体を水中に沈め界面現象を発生させ，それらの発生するメカニズムを明らかにし，さらに，磁性流体のそのような特性およびメカニズムなどを利用したデバイスの開発を目的とするものである．

2. 研究成果の内容

本研究は，水中に配置した小さな円柱状永久磁石に水と混じり合わない磁性流体を吸着した磁石-磁性流体系が外部交流磁場を受けた場合の動的な界面現象について磁場振幅の影響を調べた．すなわち，外部交流磁場振幅の変化に対する磁性流体界面の変化について，界面振動が最大振幅を示す応答位相を固定して，振幅や曲率などその形状変化を明らかにした．

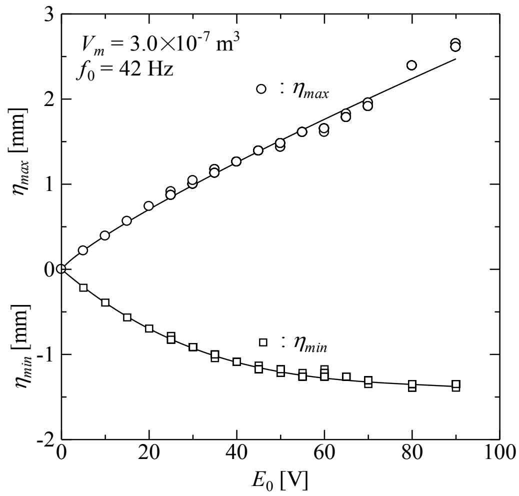


図1：磁性流体界面振動における最大変位および最小変位の印加電圧依存性

3. 研究目標の達成状況

小さな円柱形状永久磁石に比較的少量の磁性流体を吸着し，その系を水中に配置し，外部

から磁石の磁極方向に交流磁場を印加した場合の磁性流体の界面応答現象を調べ，外部交流磁場に対して伸縮調和振動を示すこと，共振振動数を有すること，印加電圧に振動振幅が依存すること，界面の曲率も印加電圧に依存することを明らかにした．水中における界面応答の基礎的な特性を得ることができたことから，研究目標はある程度達成されたといえる．

4. まとめと今後の課題

円柱形状 NdFeB 永久磁石，水と混じり合わない炭化水素ベース磁性流体，比較的小さな強さの外部交流磁場を基本要素とした系において，水中での磁性流体の界面現象を明らかにした．今後は，このような液体中における磁性流体界面現象を有効に利用したマイクロデバイスの実用化に向けた開発が必要となろう．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

*[1] M. Nakanishi, S. Sudo, and H. Nishiyama: Dynamic Interfacial Phenomena at Water-Magnetic Fluid System Subject to Alternating Magnetic Field, *Materials Science Forum*, Vol.856(2016), pp.15-20.

[2] S. Sudo, M. Nakanishi, M. Shinozaki, and H. Nishiyama: Characteristics in the Opening and Closing Operations of Micro Magnetic Fluid Diaphragm Mechanism by Alternating Magnetic Field, *Materials Science Forum*, Vol.856 (2016), pp.26-31.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[3] S. Sudo, K. Takahashi, S. Uehara and H. Nishiyama: Capillary Phenomena of Magnetic Fluid Bridge between Two Permanent Magnets in Alternating Magnetic Field, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp.148-149.

[4] S. Sudo, K. Takahashi, and H. Nishiyama: Surface Oscillations of Magnetic Fluid in Magnet-Magnetic Fluid Systems under the Alternating Magnetic Field , *Proceedings of Twelfth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2015), pp.556-557..

[5] M. Nakanishi, S. Sudo, and H. Nishiyama: The Effect of Surrounding Fluids on the Interfacial Oscillation of Magnetic Fluid Subject to Alternating Magnetic Field, *Proceedings of Twelfth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2015), pp.560-561..

[6] S. Sudo, K. Takahashi, and H. Nishiyama: Periodic Disintegration and Reconnection of Magnetic Fluid Bridge by Alternating Magnetic Field, *Proceedings of The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, Awaji City, Hyogo*, (2015), pp1-2.

[7] S. Sudo, M. Nakanishi, S. Inomata, H. Takana, and H. Nishiyama: Liquid Surface Oscillations of ferrofluid Droplet in Static and Alternating Fields, *Abstract Book of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics, Toyohashi,* (2015), p.271.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）優秀講演賞，水-磁性流体系における動的界面現象（第 2 報 外部交流磁場振幅による形状変化），磁性流体連合講演会講演予稿集，中西将人, 2015.12.4, 磁性流体研究連絡会.

課題番号	J15015
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	3 年目

空間的せん断応力勾配環境下における血管内皮細胞の力学応答
Mechanical response of vascular endothelial cells under fluid shear stress with its spatial gradient

吉野 大輔*†，坂元　尚弥**††
*東北大学流体科学研究所，**首都大学東京システムデザイン学部
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本研究では，前年度までに明らかになった空間的せん断応力勾配の有無およびせん断応力の大きさによる血管内皮細胞の伸長・配向性の違いと，チロシン脱リン酸化酵素の局在の違いの原因を検証するために，流れ環境下の細胞内のひずみ分布を数値計算により明らかにした．図 1 に数値計算に用いた血管内皮細胞の 2 次元モデルおよび境界条件を示す．内皮細胞の変形状態の推定には，大変形非線形有限要素解析ソルバーである MSC. Marc (MSC Software)を使用した．8 節点の四角形要素により細胞の有限要素モデルを構築(図 1a)した．境界条件(図 1b)として，細胞モデルの底面の変位を拘束し，上面に流体せん断力に相当する節点力を流れ方向に負荷した．細胞間接着部位には初期条件として粘着条件を与えた．細胞のヤング率およびポアソン比はそれぞれ 2.97 kPa，0.49 とした．図 2 に得られた細胞内ひずみ分布を示す．一様なせん断応力下では，流れ方向のひずみは細胞上流側で圧縮，下流側で引張りとなることがわかる(図 2a，b)．せん断応力の増加に伴い，圧縮ひずみと引張りひずみの分布は顕著になる．一方，空間的勾配を有するせん断流れ環境では，細胞内全域で引張りひずみとなる(図 2c，d)．せん断応力が小さい場合は細胞内ひずみがほぼ一様な分布となり，せん断応力が大きくなると細胞の下流側でその周囲と比較してひずみが顕著に大きく

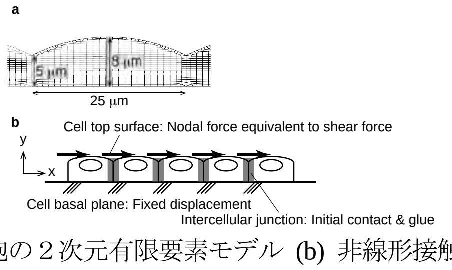


図 1 : (a) 血管内皮細胞の 2 次元有限要素モデル (b) 非線形接触解析のための境界条件

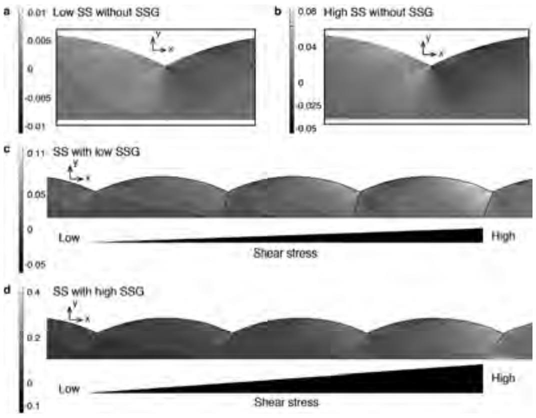


図 2 : 流れ方向のひずみ分布，一様せん断応力小(a)，大(b)，せん断応力勾配小(c)，大(d)

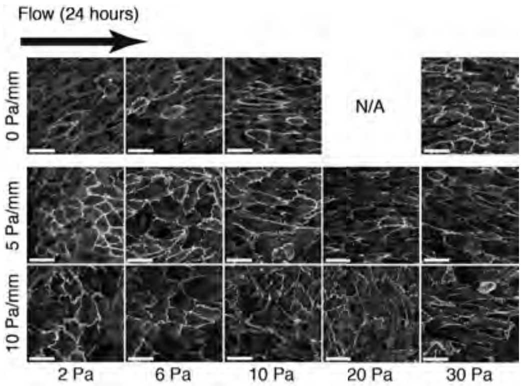


図 3：24 時間流れ負荷後の血管内皮細胞の形態

なる．前年度までに得られた流れ負荷後の内皮細胞の形態変化(図 3)を見ると，空間的勾配を有するせん断流れ環境であっても高せん断応力の場合に内皮細胞は流れ方向に配向・伸張することがわかる．数値解析によるひずみ分布と実際の細胞の配向・伸張状態を比較すると，せん断応力勾配環境下では，細胞内ひずみ分布の上流側と下流側における相対的変化が細胞内に極性を誘引し，細胞の形態変化を引き起こすことが考えられる．

3. 研究目標の達成状況

３年目の平成２７年度は，せん断応力勾配環境下の血管内皮細胞の伸張・配向性と細胞内ひずみ分布との関係を検証した．勾配環境下において，せん断応力が小さい場合は細胞内ひずみがほぼ一様となり，せん断応力が大きい場合は細胞の下流側で細胞内ひずみがその周囲に比べ顕著に大きくなり，相対的変化が生じることがわかった。前年度までの成果を統合することで，ひずみ分布の相対的変化と勾配環境における細胞極性，伸張・配向性との関係を示唆する結果を得ることに成功した．

4. まとめと今後の課題

本研究では，数値解析により細胞内ひずみ分布を明らかにし，ひずみ分布の相対的変化と勾配環境における細胞極性，伸張・配向性との関係を示唆する結果を得た．今後は，得られた結果を基に，動脈瘤発症に関わる細胞内シグナル伝達機構の詳細な解明に着手する．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Daisuke Yoshino, Naoya Sakamoto, Masaaki Sato: Relationship between cell orientation and strain distribution in endothelial cells under fluid shear stress with its spatial gradient, Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2015), pp.74–75.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15016
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

準地衡風乱流における高エネルギー(負温度)領域での渦の動力学
Vortex dynamics of the high energy (negative temperature) state in quasi-geostrophic turbulence

高橋 直也*†，服部 裕司**††
宮嵜 武***，石原 雅也***， 畠山 望****
*東京電機大学 工学部，**東北大学流体科学研究所
***電気通信大学 大学院 情報理工学研究科,
****東北大学 未来科学技術共同研究センター/流体科学研究所(兼任)
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

大気・海洋といった地球流体中には長寿命の秩序渦構造が数多く存在し，その相互作用が乱流場の動力学を支配する．秩序渦構造の運動は準地衡風近似方程式によって精度よく記述され，その統計力学が調べられている．本研究では準地衡風近似方程式に対し，擬スペクトル法による直接数値計算を行う．この結果に対し，DBSCAN 法によるクラスター解析を実施し，統計量の時間発展を調査する．さらに渦領域モデルに基づく最大エントロピー理論との比較を行い，数値計算結果が最大エントロピー状態になっているのかどうか確かめる．

2. 研究成果の内容

準地衡風近似方程式を擬スペクトル法で数値的に解くことにより，時間発展後にどのような渦分布となるかを調査した．図 1 に挿入した可視化画像より，時間発展後の渦構造は鉛直方向依存性のある正負の柱状渦となり，2 次元 dipole 型の理論解とは異なるものとなった．

渦領域モデルに基づくクラスター解析を行なった．その結果を図 1 に示す．アスペクト比の時間発展から t=5000 付近を境目として，初期のアスペクト比があまり変化しない区間（区間 A）と，その後のアスペクト比が増加する区間（区間 B）とに分けられる．渦数の時間に対するべき指数は，両ケースとも区間 A で-1.3，区間 B で-3.0 となった．

渦領域モデルに基づく最大エントロピー理論では，渦面積（確率密度関数の面積分）とエネルギーを保存量として，シャノンエントロピーをラグランジュの未定乗数法を用いて最大化させて理論解を得た．その結果を図 1 に示す．最大エントロピー理論による理論解と数値計算結果（Case A の t=18600）と比較すると，定性的に良く一致した．このことから，数値計算において十分時間発展させた状態はほぼ最大エントロピー状態だと言える．

3. 研究目標の達成状況

格子点数 512^3，1024^3 の数値シミュレーションだけでなく，DBSCAN 法によるクラスター解析により定量的な解析を行なった．さらに数値計算結果と渦領域モデルに基づく最大エントロピー理論との比較を行い，時間発展後の渦構造が理論解と定性的に良く一致することを確認した．

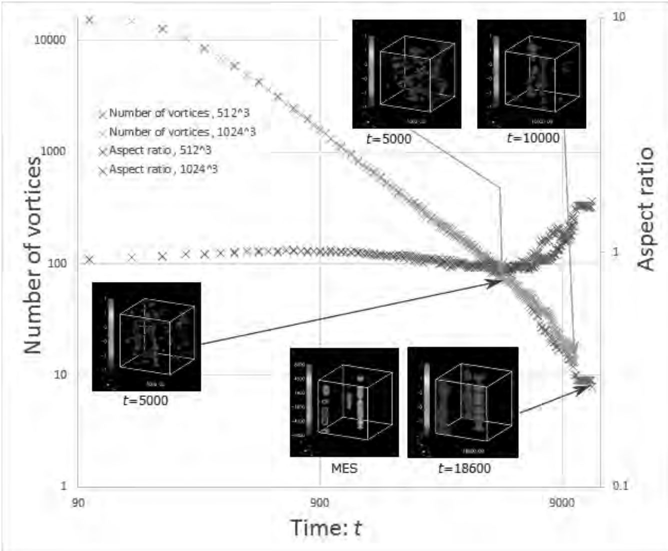


図 1：渦領域数 N とアスペクト比の時間発展．（両対数グラフ）

4. まとめと今後の課題

数値シミュレーションと渦領域モデルに基づく最大エントロピー理論との比較から，数値シミュレーションで時間発展させればさせるほど最大エントロピー状態に近づく．しかしながら数値シミュレーションには粘性項が入っているので，時間発展に伴いエネルギー・エンストロフィーが散逸している．両者を保存量と仮定する最大エントロピー理論と比較を行う際に障害となっている．そのため，数値シミュレーションで通常粘性項の代わりに超粘性項を導入することで，散逸の影響をできるだけ小さくした計算が必要とされる．さらにその結果に対し DBSCAN 法によるクラスター解析と，渦領域モデルに基づく最大エントロピー理論との比較も行う必要がある．

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] M. Ishihara, N. Takahashi, T. Miyazaki, N. Hatakeyama, and Y. Hattori: Vortex Dynamics of the High Energy (Negative Temperature) State in Quasi-geostrophic Turbulence, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2015), pp. 166-167.

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

[3] 今野優哉，下田裕一，宮嵜武：周期境界条件下における準地衡風点渦系の組織化，日本物理学会第 70 回年次大会講演概要集，(2015) p. 2976.

[4] 石原雅也，嵯峨圭晟，今野優哉，宮嵜武：準地衡風渦系の統計力学　―直接数値計算と渦領域モデルの比較―，日本流体力学会年会 2015 USB 講演論文集，(2015).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15017
区分	一般共同研究
課題分野	基盤流体科学分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

海洋細菌に対する衝撃波殺菌効果の向上に関する研究

Study of improvement in sterilization effects on marine bacteria
using underwater shock waves

阿部晃久*†，孫　明宇**††
*神戸大学海事科学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

海洋環境保全のため、国際船舶輸送における船舶バラスト水中の微生物の処理が近い将来義務付けられることから、従来の化学薬品処理に代わる安全安心な殺菌処理技術が求められている。本研究では、水中衝撃波の衝撃圧、キャビテーション気泡運動によるフリーラジカルとリバウンド衝撃圧による海洋細菌の衝撃波殺菌効果を示し、殺菌効率の向上のための処理条件を明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究では、水を満たした小型水槽内に線爆による水中衝撃波を発生させ、船舶バラスト水管理条約の規制対象となる細菌と同属だが毒性の無い海洋ビブリオ属細菌を用いて、殺菌効果の検証菌体実験を実施した。行った実験条件は次の３種類である；【菌体実験１】衝撃波背後に多数の微小気泡が発生する放電電圧 4.5 kV での実験、【菌体実験２】衝撃波背後の気泡数密度が少ない放電電圧 3.3 kV での実験、【菌体実験３】抗酸化剤（Vitamin C）を添加することでフリーラジカル生成による殺菌効果を抑制した実験。本実験で、サンプルの採取位置は菌体原液を満たした容器の底面である。以上の３種類の菌体実験について、結果は以下のとおりである。

図１は放電電圧 3.3 kV で放電回数に伴う生存菌体の割合の変化を示している。図中の▲、◆、■、●は、それぞれ同条件で得られた実験結果である。放電電圧 3.3 kV で水中衝撃波を照射した場合、可視化により衝撃波背後に生成されたキャビテーション気泡の数密度が少ないことがわかっている。結果として、本放電電圧条件では、殺菌効果が得られていないことがわかる。

図２は放電電圧 4.5 kV で放電回数に伴う生存菌体の割合の変化を示している。図中の▲、◆、■、●は、それぞれ同条件で得られた実験結果である。放電回数 15 以上で菌体の減少傾向が判断できる。電圧 4.5 kV で生じた衝撃波背後に多くのキャビテーション気泡が生成されたことが菌体減少の原因であると考えられる。

図３は放電電圧 4.5 kV の条件で Vitamin C を添加して放電回数に伴う生存菌体割合の変化を示している。図中の◆と■は、それぞれ同条件で得られた実験結果である。Vitamin C は OH ラジカルの作用を抑制する働きがあることから、殺菌効果が低下すると考えられたが、実験結果において、菌体実験２よりも明確な殺菌効果が得られた。本結果の合理性について更なる実験・検討が必要である。

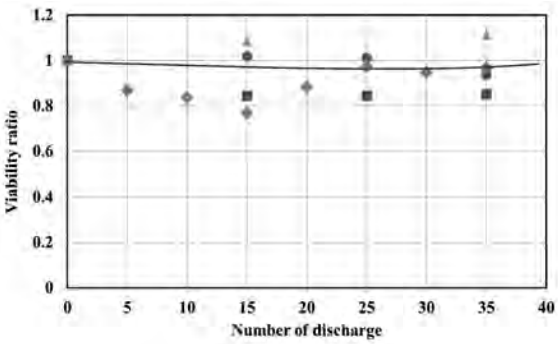


図１：放電回数と菌体生存率の変化（3.3 kV）

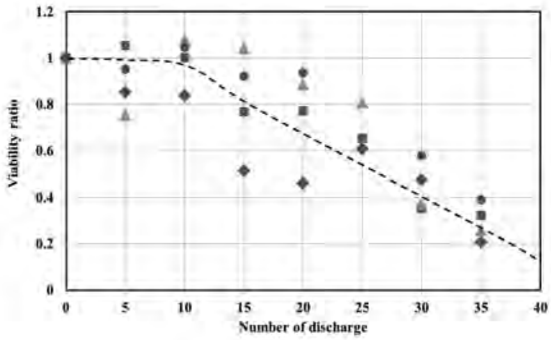


図２：放電回数と菌体生存率の変化（4.5 kV）

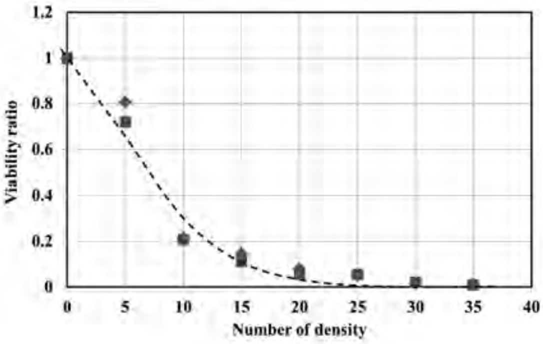


図３：抗酸化剤添加した場合の放電回数に伴う菌体生存率の変化（4.5 kV）

3. 研究目標の達成状況

本菌体実験の殺菌効果について、菌体数が減少する傾向は得られたが、信頼性の高い再現性が得られておらず、明確な殺菌効果が検証できていない。しかしながら、衝撃波背後に発生するキャビテーション気泡の崩壊運動が菌体減少の一因であることは確認できたことから、本研究目標に対する達成度は、50%程度と判断している。

4. まとめと今後の課題

本研究では、小型水槽内の線爆よって生成された衝撃波の水槽内における波動伝播や干渉によってキャビテーション気泡が生成し、気泡運動によるフリーラジカルとリバウンド衝撃圧の作用による殺菌効果が確認された。しかしながら、主な殺菌効果の原因がフリーラジカルによるものか衝撃波圧力によるものかについて不明である。今後、菌体実験データの再現性を高め、殺菌の主要因について明らかにすることが課題である。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] J. Wang, T. Gonai, A. Abe, M. Sun and T. Koita: Study on Improvement in Sterilization Effect of Shock Wave for Marine Bacteria, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), pp.168-169.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）衝撃波と微小気泡群を用いた殺菌装置，孫　明宇，小板　丈敏，郷内　稔也，阿部晃久，王　静竹，2015.10.26，特願2015-209916.

課題番号	J15018
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

しゅう動面におけるMe-DLC由来軟質金属層の諸物性と摩擦・摩耗特性に関する研究
Research on the physical and the tribological properties of a soft metal layer originating in Me-DLC on sliding surface

後藤　実*†，高木　敏行**††
伊藤　耕祐***，竹野　貴法****，三木　寛之*****，小助川博之**
*東都大学工学部，**東北大学流体科学研究所
日本大学工学部，*東北大学大学院工学研究科
*****東北大学学際科学フロンティア研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

プラズマ CVD 法で DLC マトリクスを形成しながら DC スパッタ法で Cu または Ag を膜中に分散させる東北大学流体科学研究所所有の PVD/CVD 複合成膜装置で成膜した Cu/DLC ナノコンポジットコーティング（Cu-DLC$_{CVD}$）および AG/DLC ナノコンポジットコーティング（Ag-DLC$_{CVD}$）の摩擦界面に生成するトライボフィルムの生成プロセスと摩擦・摩耗の関係を明らかにした．さらに，RF マグネトロンスパッタ法においてスパッタ収率の低い C ベースターゲット上の低エッチングレート領域にスパッタ収率が相対的に極めて高い Cu または Ag タブレットを同心円状に配置した同心円複合ターゲットを開発し，その複合ターゲットによって成膜した Cu/DLC ナノコンポジットコーティング（Cu-DLC$_{PVD}$）および Ag/DLC ナノコンポジットコーティング（Ag-DLC$_{PVD}$）の成膜条件と膜の特性およびそれらと摩擦・摩耗特性の関係を調査した．

その結果，PVD/CVD 複合成膜装置では膜中の Cu または Ag の濃度が 50at.%以下の Cu-DLC$_{CVD}$ および Ag-DLC$_{CVD}$ は成膜できなかったが，直径 50 mm の C ベースターゲット上に配置した Cu または Ag タブレットの直径を 10~14 mm の間で変化させ，RF 出力を 75 W~175 W の範囲で変化させることで，Cu-DLC$_{PVD}$ の Cu 含有量および Ag-DLC$_{PVD}$ の Ag 含有量をそれぞれ 25~54at.%と 26~65at.%の範囲で成膜可能であることが確認できた．透過電子顕微鏡による観察の結果，PVD/CVD 複合成膜法で成膜した場合でも RF マグネトロンスパッタ法で成膜した場合でもいずれも DLC マトリクス中に Cu または Ag のクラスターが均一に分散した構造となることが明らかになった．また，ナノインデンテーションの結果，Cu または Ag の添加量の増加に伴い，膜の硬さは DLC マトリクスの 20 GPa 前後から低下

していくことがわかった．Cu または Ag 添加量の減少に伴う摩擦・摩耗特性の変化は，金属添加量の低下に伴い金属質トライボフィルムの形成がされにくくなり，摩擦係数の変動が顕著になる傾向が認められた．

3. 研究目標の達成状況

Cu-DLC$_{CVD}$および Ag-DLC$_{CVD}$と，Cu-DLC$_{PVD}$および Ag-DLC$_{PVD}$を比較した場合，双方の成膜法で実現可能な金属含有量の領域における膜構造には本質的な異差は認められず，金属含有量の低下に伴い膜の硬さが増加することを確認した．また，金属含有量の低下に伴い，しゅう動相手材摩擦面への金属質トライボフィルムの形成がされ難くなり，摩擦特性が変動する傾向が認められた．これらの知見は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し，接触境界面におけるナノメカノ流動ダイナミクスの学理構築に寄与すると共に，次世代炭素ナノコンポジットしゅう動材料の設計手法の確立に資するものである．

4. まとめと今後の課題

異なる 2 つの方法で成膜した Cu-DLC と Ag-DLC の物性と摩擦摩耗特性をそれぞれ比較し，ナノコンポジット膜構造の共通性と金属含有量に対する機械的性質の変化を明らかにした．また，膜中の金属含有量の低下に伴い，摩擦界面に形成されるトライボフィルムの組成と形態は変化し，摩擦・摩耗特性に大きく影響することが明らかとなった．しかし，低金属濃度領域における膜のナノ構造と摩擦・摩耗特性の解明は今後の課題である．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

*[1] M. Goto, K. Ito, J. Fontaine, T. Takeno, H. Miki and T. Takagi: Formation processes of metal-rich tribofilm on the counterface during sliding against metal/diamondlike-carbon nanocomposite coatings, *Tribology Online, Vol. 10, No. 5 (2015) pp.306-313.*

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] Minoru Goto, Toshiyuki Takagi, Kosuke Ito, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Hiroyuki Kosukegawa: Research on the Physical and the Tribological Properties of a Soft Metal Layer Originating in Me-DLC on Sliding Surface, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 134-135.

[3] Minoru GOTO, Minoru ODA, and Tetsuhiro Nawata: TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SOFT-METAL / DLC COMPOSITE COATINGS PREPARED BY RF MAGNETRON SPUTTER USING COMPOUND TARGETS, Proc. 42th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, (2015), p. 23.

[4] Minoru Goto, Julien Fontaine, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, and Kosuke Ito: The role of metal-rich tribofilm on the load dependent friction behavior of metal diamondlike-carbon nano-composite coatings, Proc. 6th ICMDT2015, (2015), pp.68-69.

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	J15019
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

微分位相構造に基づく後方乱気流の多感覚呈示
Topology-based multisensory realization of wake turbulence

竹島 由里子*†，大林 茂**††，三坂 孝志***
*東京工科大学メディア学部，**東北大学流体科学研究所，
***東北大学学際フロンティア研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

現在，数値計算結果の解析には主に可視化が利用されている．しかし，人間が視覚から同時に把握できる情報量には限界があり，多変量データなどの解析ではデータ全体を表現するのは困難である．そこで本研究では，航空機翼後方にできる後方乱気流の数値計算データを対象とし、可視化だけでなく力覚化や聴覚化などの多感覚を用いて直感的にデータを解析する方法についての研究を行う．可視化や力覚化では数値データをどのように色や形，力に変換するかという伝達関数の設計が重要になってくる．従来法では，試行錯誤的にユーザが決定していたが，その場合，適切に解析結果が呈示されるかどうかはユーザの技量に大きく依存してしまう．そこで，本研究では，対象データをあらかじめ解析することにより，その特徴を考慮して半自動的に伝達関数を設計する方法を提案する．特徴としては，データ全体の大局的な情報および局所的な情報を抽出可能な微分位相構造に着目する．

2. 研究成果の内容

数値解析データの解析に視覚および力覚を利用するためには，それらの伝達関数の設計をどのように行うかが重要となる．本研究では，従来の試行錯誤的な処理を省略するため，対象データから得られる微分位相構造に基づいて，伝達関数の設計を行う．微分位相解析では，局所的な構造として臨界点が，大局的な構造として位相情報が抽出される．3 次元データにおける臨界点は極大点（C_3），極小点（C_0），鞍点（C_1，C_2）の 3 つに分類され，臨界点周りの等値面の位相変化は図 1 に示す 10 通りに集約される．なお，図 1 の等値面は，物理値が大きいほうから小さいほうへ見ていったときの変化とする．後方乱気流の渦度の大きさに微分位相構造を適用し，極大点を渦中心，鞍点を 2 つの渦が結合する点，極小点を渦が消滅する点とみなし，伝達関数の設計を行った．可視化においては，渦を強調して表示するために，極大点および鞍点付近の不透明度を高く設定した．また，3-C_2(b)および 3-C_1(b)においては，等値面が入れ子状に存在するため，多次元伝達関数を用い，外側の等値面の不透明度が低くなるように設定をした．力覚化においては，デバイスを渦中心に引き寄せる力や，渦度に応じて抵抗を与える伝達関数を定義した．これにより，視覚および力覚を用いて，後方乱気流データの解析を行うことができる．プロトタイプでは，可視化には幾何学的な情報の抽出が不要なボリュームレンダリングを利用し，力覚化には3自由度の力覚化デバイスPHANToM OMNIを用いた．その結果，視覚からだけではなく，力覚から渦の強さを確認することができた．

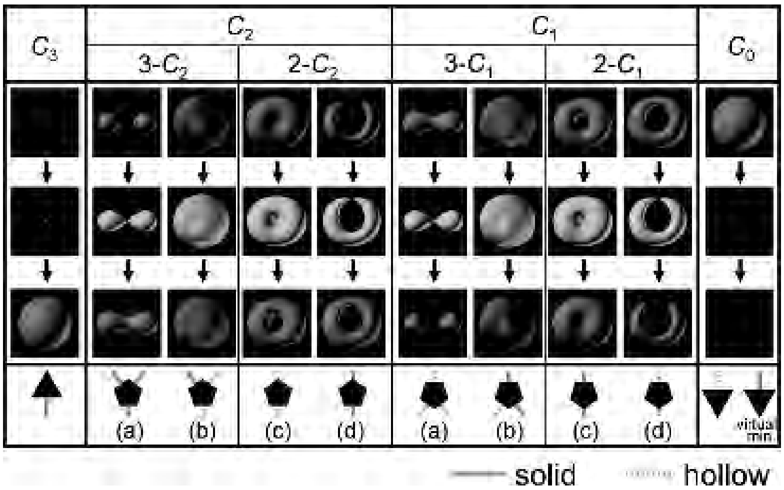


図 1: 3 次元データにおける臨界点の分類

3. 研究目標の達成状況

可視化を用いた視覚だけの解析方法と，視覚と力覚の多感覚を利用した解析方法を比較すると，視覚だけでは色や不透明度から数値の分布を把握する必要があるが，力覚も併用することにより，どの領域で渦が強いかなどをスタイラスへの抵抗で感じることができる．ただし，力覚は視覚ほど精密に情報を捉えることができないことから，有効性の検証などを行う必要がある．力覚デバイスを用いることにより，航空機が後方乱気流に突入したときと類似した抵抗を感じるようにできると考えている．

4. まとめと今後の課題

本年度は第 1 段階として，後方乱気流解析のための多感覚呈示システムのプロトタイプの作成を行った．その結果，視覚だけを利用した解析よりも，より直感的に渦の強さを感じることができた．今回は，同じ渦度の大きさを視覚および力覚伝達関数設計に利用した．本研究の最終目的は，多変量の解析であるため，視覚と力覚に異なるデータ成分を与えた実験が必要となる．ただし，人間の力覚は視覚ほど微細な差異を感じることができないため，どのデータ成分を視覚と力覚に割り当てるかは重要な課題である．また，開発中のプロトタイプでは主に臨界点における物理値と種類に関する情報を利用しているが，今後，臨界点の位置を考慮した伝達関数設計についても考慮する必要がある．

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] Y. Takeshima, T. Misaka, and S. Obayashi: Topology-Based Multisensory Realization of Wake Turbulence, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 32-33..

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15020
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

高密度水素安全管理に関する連成解析

Coupled analysis of high-density hydrogen safety management

石本 淳*†，Alain Combescure**††，松浦 一雄***††，桑名 一徳[1]††，中村 裕二[2]††
*†東北大学流体科学研究所，**††INSA de Lyon LaMCOS，**††愛媛大学工学部，
[1]††山形大学工学部，[2]††豊橋技術科学大学工学部

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

2015 年には FCV の市場投入と本格普及が開始され，リスクアセスメントならびに新エネルギー複合化による高密度水素製造・輸送・貯蔵・充填・走行に関わるトータルシステムの創成に関わる研究が重要視されてくるものと考えられるため，以下の流体－材料連成科学的アプローチからなる先端研究を実施した．まず，70MPa 高密度水素充填技術とリスク管理システムの創成を目的とした以下の研究を実施した..

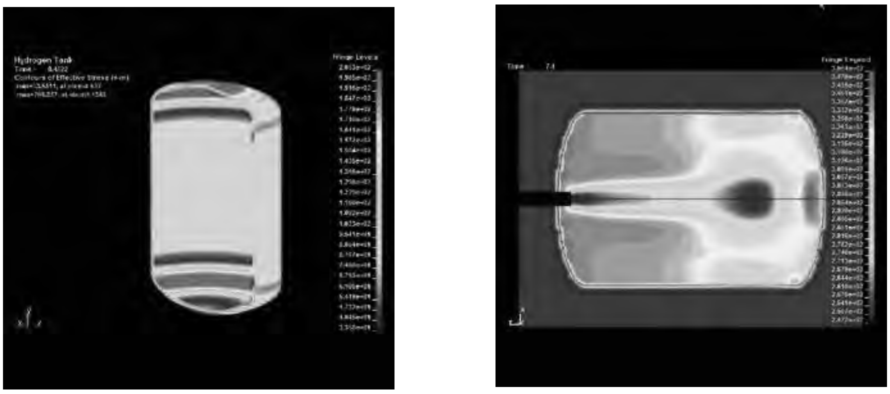
まず，3 分間高速充填連成解析システムの開発を行い，70MPa 高圧水素高速充填現象に関する流体－材料連成コンピューティングを実施し，気相状態と材料応力分布の同時解析が可能となった(Fig. 1).

3. 研究目標の達成状況

達成度は 80%である． 高圧水素タンクのき裂伝播現象を解析する上で必要となる連続体力学理論，線形破壊力学理論の基礎，粒子法の一種である Peridynamics モデルの定式化を実施した.

4. まとめと今後の課題

本年度の研究では，メガソニック場中の複数気泡挙動を解析する数値解析手法を構築でき



(a) Mises stress profile of H_2 vessel　　(b) Gaseous H_2 Temperature profile

Fig. 1 Computational results of the flow characteristics and pressure vessel's strength of material are analyzed at the same time in 70MPa high-pressure and high-speed H_2 filling condition.

た．今後は，高圧水素タンクのき裂伝播現象を解析する上で必要となる連続体力学理論，線形破壊力学理論の基礎，粒子法の一種である Peridynamics モデルの構築を行い，き裂伝ぱに関するシミュレーションを実施する．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Kazuo Matsuura, Masami Nakano and Jun Ishimoto,
Dynamic restriction mechanism for the upper limit of exhaust flow rates in the real-time sensing-based forced ventilation control of leaking hydrogen,
International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, No. 12, pp. 4401-4411. [IF: 3.313].

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Jun Ishimoto,
Supercomputing of Multiscale Multiphase Flow Related to Industrial Field and Natural Disaster Problems, *11th Korea-Japan CFD Workshop (KJCFD2015)*, Dec. 16th, 2015, Kyushu University, Fukuoka, Japan [Invited].

[2] Jun Ishimoto and Alain Combescure,
Coupled Analysis of High-Density Hydrogen Safety Management
12th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), Oct. 27-29, 2015, Sendai International Center, Sendai, Japan.

[3] Toshinori Sato, Jun Ishimoto, and Alain Combescure,
Hybrid MPS and Eulerian computational approach for high-density hydrogen leakage with crack propagation in pressure vessel,
ELyT Workshop 2015 in Matsushima, Feb. 18-21, 2015, Matsushima Century Hotel, Matsushima, Japan.

[4] 佐藤寿則（東北大院）、石本淳（東北大）、Alain Combescure (INSA Lyon, France),
粒子法とオイラー法を用いた高圧タンクき裂伝ぱに伴う水素漏えい現象に関する連成解析
混相流シンポジウム 2015　オーガナイズドセッション（OS-5 サステナブル異分野融合型混相流），2015 年 8 月 4 -6 日，高知工科大学（高知県香美市）

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15021
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

バリスティックレンジへ適用可能な感圧塗料技術の開発
Development of Pressure-Sensitive Paint Techniques for Ballistic Range Experiments

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

1. 研究目的

本研究では，申請者らが開発した「超高速応答型感圧塗料」について，塗料の更なる改善と計測法の改良により，S/N 比を大幅に改善することを目標とし，非定常圧力場の定量可視化計測に適した感圧塗料計測法の確立を目指したものである．感圧塗料の改良を通じ，非定常計測に適切な塗料としての超高速応答型感圧塗料技術の確立を目指しつつ，計測法についても検討を行った.

2. 研究成果の内容

本研究は，図 1 に示す二段式軽ガス銃（東北大学流体科学研究所に設置)を用いて行った．本装置を一段式ガス銃モードとして用い，直径 25 mm の飛翔体を 442 m/s で射出し，飛翔体周りに生じる衝撃波が試験板上に形成する非定常圧力場を感圧塗料により可視化した.

感圧塗料には，従来型の超高速応答型感圧塗料を用いた．今回，発光検出系としては従来用いていたイメージインテンシファイアを用いた計測系ではなく，Phantom v2511 にレンズを装着しただけの簡易セットアップで試験を行っている．試験時には，飛翔体が試験板上に到達した瞬間に合わせて可視化を開始し，計測後に画像処理を行い結果を圧力場に変換した.

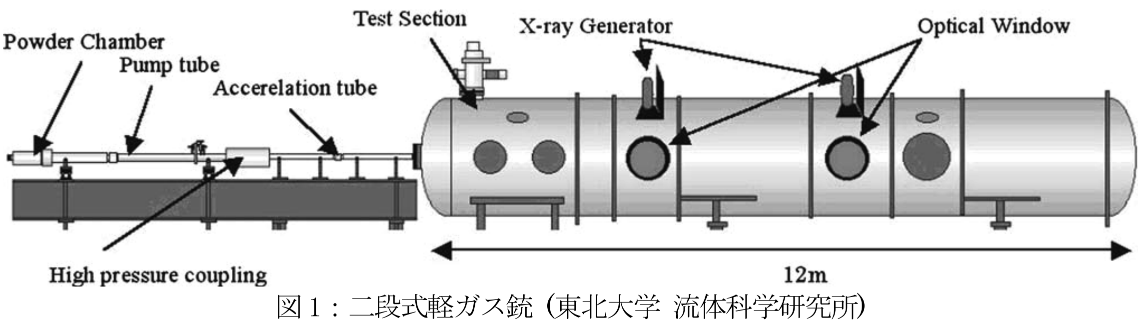


図 1：二段式軽ガス銃（東北大学 流体科学研究所)

図 2 に，衝撃波が試験板上に到達した際の可視化結果を示す．図中の色はその部分における圧力に対応しており，圧力値は図の右のカラーバーに示された通りである．また，飛翔体は図の左から右の方向に飛翔するため，衝撃波の伝播も同様の方向に生じている.

図より，試験板上における飛翔体由来の衝撃波の伝播の様子がステップ状の圧力値の上昇

及びその後の圧力低下により明瞭に可視化されている．また，従来のイメージインテンシファイアを用いた計測と比較して信号雑音比も改善しており，計測系の改善及び画像処理の段階でのフィルタ処理が有効に機能しているのがわかる．

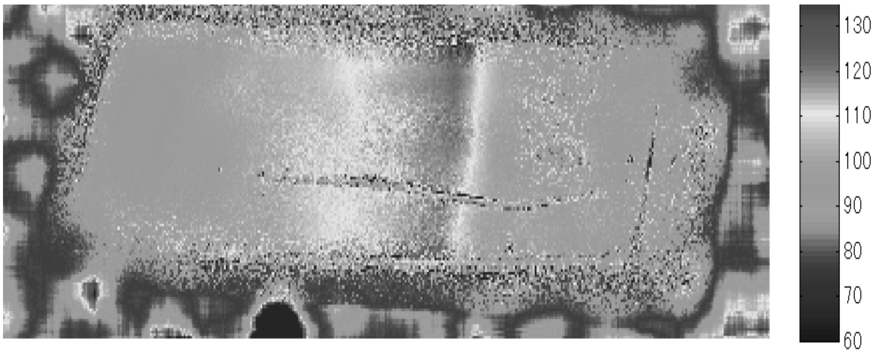


図 2：試験板上の飛翔体由来の衝撃波伝播の様子

3. 研究目標の達成状況

本研究においては，計測系の改善と感圧塗料の改善という二つのアプローチにより非定常高速衝撃波現象の解明のための感圧塗料技術の向上を目指した．前者については改善の成果が見られたが，後者については現時点で未だサンプル試験の段階にあり，実際の試験への投入という過程までには至らなかった．しかしながら，後者については塗料の改善のための有力候補を見出すことには成功しており，結果，全体としては達成度は高いと言える．

4. まとめと今後の課題

本年度においては主に計測系の改善により計測結果の改善を果たすことができたが，改善された超高速応答型感圧塗料を用いた計測までには至らなかった．今後は現在有力候補となっている色素だけではなく，他の色素も用いて感圧塗料の改善を進め，非定常衝撃波現象の解明に資する計測系および感圧塗料技術を向上させていくものである．

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] 沼田大樹，浅井圭介，大谷清伸: 超高速応答型感圧塗料を用いたバリスティックレンジ実験における非定常圧力場計測，第 93 期流体工学部門講演会，東京理科大学 葛飾キャンパス (2015).

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	J15022
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	２年目

カルマン渦列の周波数選択機構の究明と渦列形成の抑制
Frequency-selection mechanism of Karman vortices and vortex suppression

高木　正平*†，小西　康郁**††
大林 茂**††
*首都大学東京システムデザイン学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

円柱や二次元鈍頭物体あるいは二次元翼後流に形成されるカルマン渦列について，安定理論の助けを借りてその周波数決定機構を究明すると共に渦列形成の抑制実験を行う．

2. 研究成果の内容

2.1 カルマン渦列抑制実験

流れ場の基本流として二次元対称翼 NACA0006（翼弦長 40mm）の迎角 α を変化させ，後流にカルマン渦列が形成される条件を，熱線風速計及び smoke-wire 法を用いた流れの可視化より決定した．主流速度 4.2m/s においては α=3.8°を超えると渦列が形成され始めた．そこで α=3.9°に設定して(図 1a)，太さ 1mm の針金を翼後縁から(X,Y)=(10,20)並びに(10,30)に挿入した．この挿入によって，図１b よりカルマン渦列が抑制されていることが分かる．さらに針金の抑制効果を調べた結果，この挿入で翼の実質迎角が α=3.8°より小さくなることが判明した．さらに，高分解能周波数分析を行い，カルマン渦列の周波数選択性に feedback 機構が絡んでいることも明らかにした．

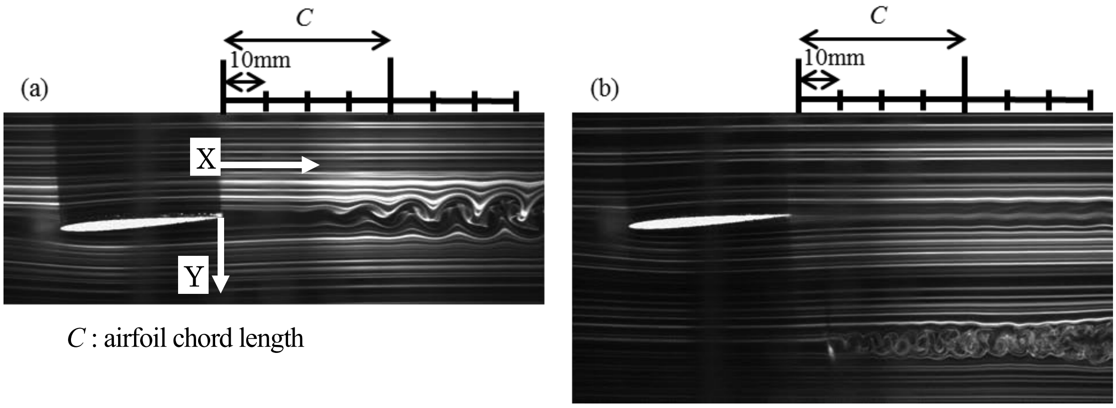


図１: smoke-wire による可視化.　(a)細い針金なし，(b) 細い針金を(10,30)に挿入

2.2 カルマン渦列の成長・抑制の人工制御

針金による抑制効果が判明したことから，針金の代わりに薄板を用いてその迎角を ON/OFF することでカルマン渦列の成長・抑制が人工制御できる可能性が生まれた．渦列は薄板の迎角

変化で成長と抑制を自由に制御できた．また，カルマン渦列形成に貢献する変動の時系列データから時間成長率あるいは減衰率α（図２）が求まり，今後，理論と比較するための貴重な実験データが得られた．

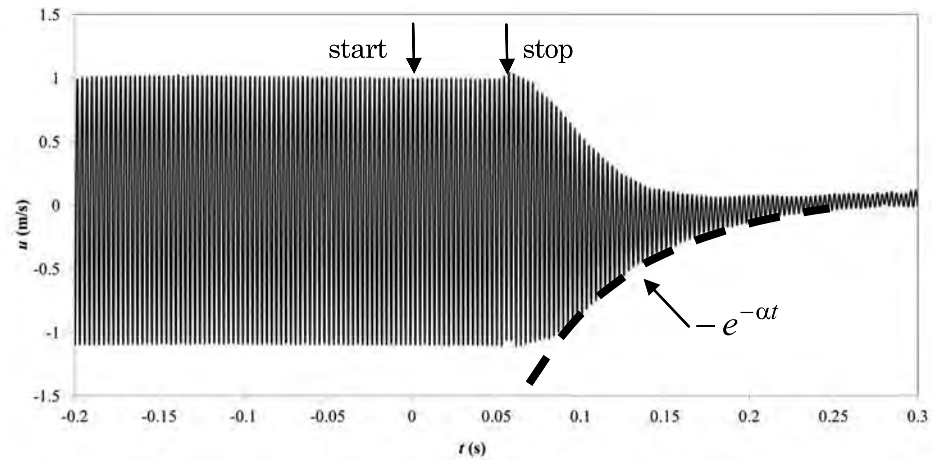


図２．薄板の迎角を 0 度から 18 度に急変．矢印は，迎角変化の開始と停止を示す．

3. 研究目標の達成状況

今年度 2 つの実験を実施した．渦列抑制までを今年度の目標とし，達成できた．さらに前期の実験で抑制効果の解明まで進んだ．この知見から新しい実験を下期に実施し，これまで難しいとされた時間成長率・減衰率を容易に計測できた．以上より，目標達成率は 300%である．

4. まとめと今後の課題

二次元翼後流のカルマン渦列の抑制とその効果の機構解明ができた．また，カルマン渦列周波数の選択性に圧力変動を介した feedback 機構の存在も明らかにした．さらに，後流の時間発展型の全体不安定に起因した速度変動の時間成長率・減衰率を計測できた．

以上の成果を踏まえ，カルマン渦列周波数の選択性に feedback 機構が絡むことから，次年度この機構の強弱を顕在化できる模型を用いて，全体不安定と周波数の選択性にメスを入れる．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし．

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] S. Takagi, Y. Konishi and S. Obayashi: Control of Karman vortex street behind a thin airfoil at low Reynolds number, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 170-171.

[2] S. Takagi, Y. Konishi, N. Itoh, M, Asai and S. Obayashi: Detection of a logarithmic singular point behind an airfoil model at low Reynolds numbers, *Proceedings of the Twenty-fourth International Congress on Theoretical and Applied Mechanics,* Montreal, (2016).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15023
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2015.4 .01~2016.3.31
継続年数	2年目

自然環境中の大規模非定常高速流体現象の定量的可視化計測法
Quantitative Visualization of Unsteady High-speed Fluid Phenomena in Nature

水書 稔治*†，大谷　清伸**，　大林 茂**††
*東海大学工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1.　研究目的

非定常高速流体現象研究では，光学的流れの可視化計測法は，研究手法として確立したものであり，定量・定性を問わず，様々な可視化計測法が提案され，実用化されてきた．一方，実験室を一歩出た自然環境下では，流れ場の状態量を定量的に比較的容易に取得できる可視化計測法は実用化されていない．これは，実験室内と比較し，自然環境下では，制御不能な外的擾乱が多く，実験室内と同等の光学的に静粛な環境を担保できないことが大きな理由である．衝撃波現象など非定常高速流体現象を3次元的かつ定量的に可視化計測が提案できれば，航空宇宙機開発など応用空気力学分野にとって有益な情報をもたらすことが可能である．たとえば，実機飛行条件での機体まわりの流れ場の直接計測が可能となる．これは，実飛行状態での翼面でのはく離現象，機体と搭載物間での衝撃波干渉，大気中を広範囲に瞬時に伝播するソニックブームの地表付近の挙動の直接計測が可能となり，今まで培われてきた数値解析法や多点計測法と併用することで，測定の精度・確度の向上，ならび流れ場全体の把握が容易になる．

本研究では，野外における大規模衝撃波現象の定量的可視化計測法の確立をめざし，背景型シュリーレン法（Background-Oriented Schlieren，以下，BOS）に着眼した自然環境下で容易に利用可能な光学的流れの可視化計測法の基礎研究を進めている．

本年度の研究では，微小爆発によって発生した衝撃波を利用して，視野中心から辺縁部に至る計測精度を評価した．自然環境下では BOS 計測に非テレセントリック光学系（計測に平行光束を用いない光学系）の利用が適用範囲も広く，利便性も高い．一方，BOS では，注目現象による屈折率分布変化でおきる背景移動量が計測対象であるため，非テレセントリック光学系では，背景移動量が現象を見込む角度に影響を受ける．高精度の定量計測の実現には，視野角を関数とした評価関数の取得が不可欠である．

2.　研究成果の内容

テレセントリック光学系および非テレセントリック光学系の配置において，微小爆薬（アジ化銀 10 mg）による球状衝撃波の BOS 計測を行った. アジ化銀は空中に固定し，レーザで起爆した. 光学系配置によって決定される BOS 法の感度 e=ZB/ZD は，それぞれ約 0.33 である．ここで，ZB は，結像レンズから背景までの距離，ZD は測定対象（起爆位置）から背景までの距離である．テレセントリック光学系の集光系には大型凹面鏡（直径 1.0 m，焦点距離 8 m）を用いた．撮影には高速度カメラ（Vision Research Phantom, v2511）を使用し，光源には可視化用インコヒーレントレーザ（Cavitar Ltd., CAVILUX Smart）を用いた．撮影フレームレートは 25,600 fps，有効画素数は 1280×800 pix.である．露光時間は可視化レーザのパルス幅で制御し，0.1 μs とした．背景模様に

はランダムドット模様（ドットサイズは2ピクセル，密度20%）とした．実験では平行光束を使用するテレセントリック光学系で得られたズレ量と非テレセントリック光学系の誤差を評価した.

テレセントリック光学系および非テレセントリック光学系で取得した実験画像から背景模様移動量絶対値を色表示したところ、次に示す個結果を得た。; アジ化銀は爆発生成物を発生させるために爆点近傍にはノイズが見られ，移動量グラフからも爆点近傍ではノイズの発生が確認された．テレセントリック光学系の場合，非テレセントリック光学系よりも背景模様移動量が大きく取得されていることがわかる．具体的には，爆点から45°方向に約80 pix.位置では，非テレセントリック光学系は移動量が80%小さいことがわかった．同様に約150 pix.位置では55%，約230 pix.位置では27.2%，約380 pix.位置では37.5%小さいという結果が得られた．可視化画像から衝撃波面には移動量が均一でないことが確認でき，その影響により約230 pix.位置のみ大きく差異が生じた．これらの結果から，視野中心と辺縁部における背景移動量比較したところ，非テレセントリック光学系による市や中心部との移動量計測誤差は予測値の範囲に収まることがとがわかった.

3. 研究目標の達成状況

本研究の目標は，非テレセントリック光学系による背景型シュリーレン法における視野辺縁部での計測誤差を評価するものである．球状衝撃波をテレセントリック光学系と非テレセントリック光学系双方で計測し，その結果から視野辺縁部での計測精度においてテレセントリック光学系が優れていることが定性的に評価できたものの，背景照射光の一様性が不完全であることに起因するノイズが多く存在し，定量的評価による優位性をコントラストよく評価できなかった.

4. まとめと今後の課題

測定部に平行光束を形成するテレセントリック光学系に対する非テレセントリック光学系を利用した背景型シュリーレン法（BOS）における視野辺縁部での誤差が，幾何学的な関係から導かれる予測式で評価可能であることを実験で示した．このことは，自然環境下での大規模流体現象の定量的可視化計測にBOSを適用した際にも同様と考える．今後の課題として，背景照射光の拡散を抑える光学系に変更することで，背景面での一様性を向上させ，定量的に精度の優位性を評価する．さらに，背景模様の空間周波数と解析精度の関連を系統的な評価を行う.

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] T. Mizukaki, K. Otani, and S. Obayashi: Quantitative Visualization of Unsteady High-speed Fluid Phenomena in Nature Environment, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), pp. 156-157.

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	J15024
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

翼端漏れ渦キャビテーションの熱力学的効果
Thermodynamic Effect on Tip Leakage Vortex Cavitation

姜 東赫*†，伊賀 由佳**††
*青山学院大学機械創造工学科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

高温水中における翼端漏れ渦キャビテーションに及ぼす熱力学的効果の影響を明らかにすることを目的とする.

2. 研究成果の内容

・研究内容

高温高圧キャビテーションタンネルにおいて，翼端隙間を有する翼型を用い，主流温度30℃から90℃までの範囲で実験を行った．具体的には以下の2点を行った.

①静止画及び高速度画像による翼端漏れ渦キャビテーションの可視化

②サーミスタを直接漏れ流れに挿入することによる，翼端漏れ渦キャビテーション内の温度降下量の測定

・研究成果

①可視化により4つのキャビテーションの発生形態が観察され，迎角及びキャビテーション数に対する発生形態をマッピングした．その結果，30℃と 90℃の間でキャビテーションの発生形態には大きな違いは見られなかった．一方，迎角8°，主流温度90℃の条件において，あるキャビテーション数ではキャビティ体積変動が 30℃の場合よりも減少した．これは高速度画像の輝度値総和の FFT 解析によっても確かめられた．一方で，下流圧力変動のFFT解析を行ったところ，下流へ放出されるキャビティの周期的崩壊が強くなるという結果が得られた.

②翼端漏れ渦キャビテーション内の温度と主流温度を同時に測定し、キャビティ内の温度降下量を測定した．主流温度 90℃の条件において，キャビテーション数の温度降下量に対する影響を調べたところ，キャビテーション数が減少し，キャビテーションが成長するにつれて温度降下量が増加するという結果が得られた．スーパーキャビテーション状態における温度降下量は，0.4K であった．続いて主流温度を70℃から90℃まで段階的に変化させ，主流温度の温度降下量に対する影響を調べたところ，主流温度の増加と共に温度降下量が増加するという結果が得られた．この結果を図1に示す．これは一般的なシートキャビテーションと同様の傾向を示している.

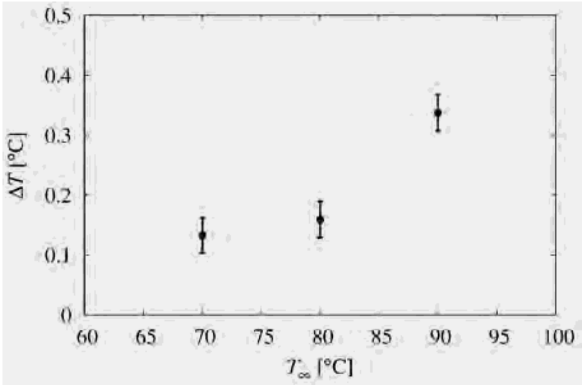


図１：主流温度が翼端漏れ渦キャビテーション内の温度降下量に及ぼす影響

3. 研究目標の達成状況

ロケット用ターボポンプインデューサの設計においてキャビテーション不安定現象を抑制するための指針を得ることが本研究の目標である. 温度と圧力測定を行い，翼端漏れ渦キャビテーションの温度降下量と圧力変動を評価した．ところが，翼単漏れ渦キャビテーションの熱力学的効果に最も影響される渦度が評価されていない．実際３次元のロケットエンジンに適応するまで考えると約３０%程度達成できたと考える.

4. まとめと今後の課題

翼端漏れ渦キャビテーションの可視化及びキャビティ内の温度降下量測定を行い，以下の結論を得た.

・30℃の常温水と 90℃の高温水の間には，キャビテーションの発生形態に大きな違いは見られなかった.

・迎角 8°，主流温度 90℃の条件において，あるキャビテーション数ではキャビティ体積変動が減少した．一方で，下流へ放出されるキャビティの周期的崩壊が強くなるという結果が得られた.

・常温水と高温水の比較では翼端漏れ渦キャビテーションの発生形態を変えるほどのキャビティ体積の抑制効果は現れなかったが，主流温度の上昇に伴い，蒸発に伴う温度降下量が翼端漏れ渦キャビテーション部において増加した．90℃の高温水中で、翼端漏れ渦キャビテーション内の温度降下量はスーパーキャビテーション状態において 0.4K であった.

今後の課題を以下に示す.

・翼端漏れ渦キャビテーションとシートキャビテーションの温度降下量を比較し，それぞれのキャビテーションに及ぼす熱力学的効果の影響の程度を明らかにする.

・数値解析により漏れ流れを伴う負圧面の渦度を推定し，渦度が熱力学的効果に及ぼす影響を明らかにする.

・翼端隙間を変えて比較を行い，翼端隙間と熱力学的効果の関係を明らかにする.

5. 研究成果（*は別刷あり）

1） 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] D. Nakai, T. Furusawa, D. Kang and Y. Iga: Experimental Study of Thermodynamic Effect of Tip Leakage Cavitation in Hot Water, *Proceedings of the International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Honolulu, (2016), No. 196.

課題番号	J15025
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

新力天秤を用いたサイレント超音速複葉翼モデルの空力特性
Aerodynamic characteristics of a silent supersonic biplane model using a new force balance

川添 博光*†，大林　茂**††，三木 祥平*
*鳥取大学，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

超音速複葉翼モデルの離着陸における低速飛行時の空力特性を調査するために，それに適した六角形状の新力天秤を設計・製作する．またこの力天秤を用いて縦三分力を計測・解析する．

2. 研究成果の内容

図 1(a)に製作した六角状力天秤を示す．揚力/抗力の推算から六角のアスペクト比は 5/3 とした．これにより複葉翼モデルの揚力，抗力，およびピッチングモーメントの縦 3 分力を同時計測することができる．この種の力天秤の特徴として，軽量，コンパクト，安価に製作することができ，様々なモデルや測定対象に合わせた設計・製作が可能である．図 1(b)はこの力天秤を装着した複葉翼モデルの風洞試験の様子である．

(a)　(b)

図 1　六角状力天秤と風洞試験

図 2 に六角状力天秤の荷重に対するひずみ，したがってホイートストーンブリッジからの出力との関係を示す．これより，Fz と Fy の干渉は極めて小さく，力天秤として良好な特性を有していることがわかる．この力天秤を 3 種類の複葉翼モデル（図 3 右下の写真）の直下に取り付け，回流式低速風洞に設置して力とモーメントを測定した．図 3 に 3 種類の複葉翼モデル（前後縁テーパ，前縁のみテーパ，後縁のみテーパ）における空力特性の結果を示す．揚力については低迎角において前後縁（以降は両縁）テーパ翼が優れているが，α=10~16° の高迎角時には前縁テーパ翼が優れている．この原因として，前縁後退角が大きくなる前縁テーパ翼では前縁剥離渦の効果によるものと考えられる． 抗力に関しては，α=10~18° において前縁テーパ翼の抗力増加がみられる．これも渦揚力の増大とともに抗力が増加したためである． L/D 特性については，全迎角において両縁テーパ翼が優れている結果となった．

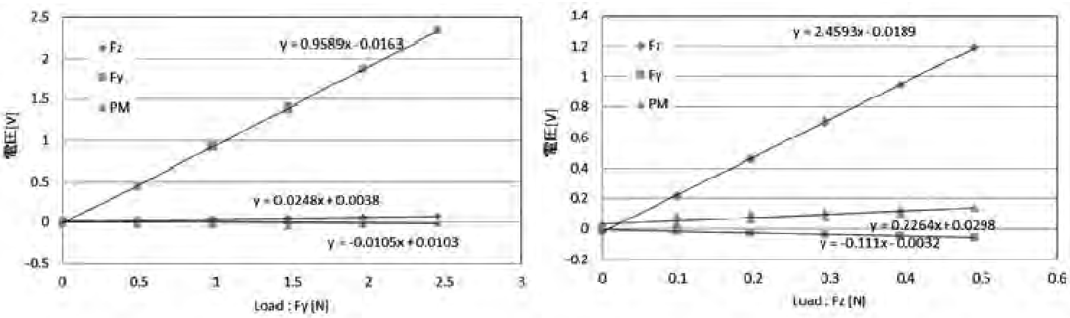


図 2 六角状力天秤の荷重・起電力特性

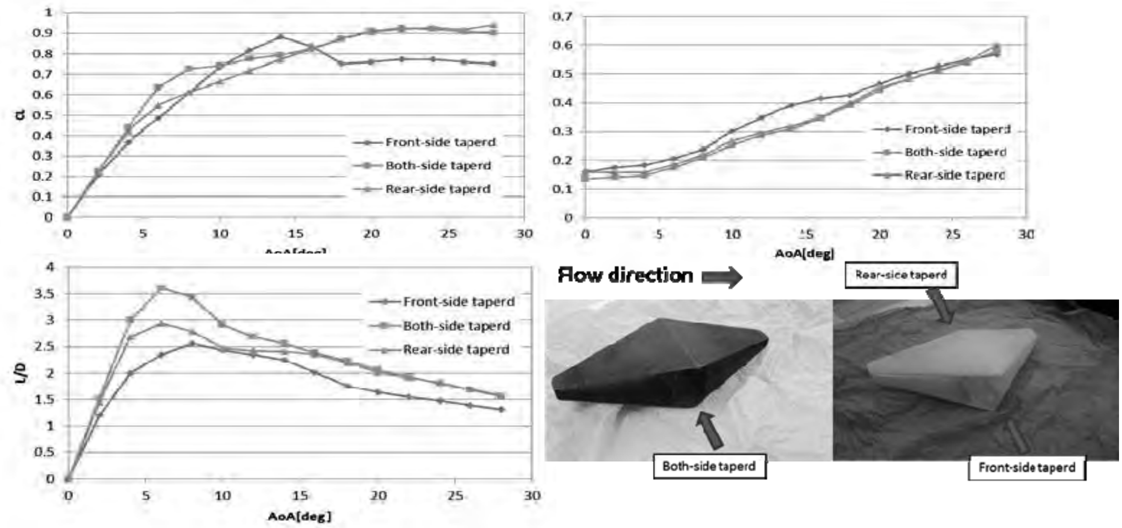


図 3　複葉翼モデルの空力特性

3. **研究目標の達成状況**

過去に行ったリング状力天秤，また楕円状力天秤による実験結果および力天秤の構造(歪)解析シミュレーションから，歪みゲージのサイズを考慮すると，六角状力天秤はこれらの力天秤に比べ測定精度が向上していることがわかった.

4. **まとめと今後の課題**

新たに六角状力天秤を設計・製作し，低速における 3 種類の複葉モデルの空力特性を調査した. リング状力天秤に続き，任意の L/D に応じた楕円状力天秤を開発したが，本研究の六角状力天秤は歪みゲージの貼付の容易さ，天秤における歪分布の線形性からさらに測定精度が向上している. 今後，高速流中の空力特性の調査を行うために，高レイノルズ数実験に適した六角状力天秤を設計・製作し，複葉翼モデルの空力特性調査を行う.

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] S. Miki, H. Kawazoe and S. Obayashi: Aerodynamic characteristics of a silent supersonic biplane model using a new force balance, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), pp. 2-3.

*[2] 三木祥平，川添博光 : イージーユース力天秤の高精度計測について, *第 53 回飛行機シンポジウム*, 愛媛, (2015), JSASS-2015-5018-1B12, pp. 1-8.

3) **その他（特許，受賞，マスコミ発表等）**なし

課題番号	J15026
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

マッハ1近傍の流れの非正常性の研究
Study of the unsteady flow at near mach number 1.0

菊池 崇将*†，大谷 清伸**††

*日本大学理工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

定常流れでの衝撃波離脱距離はマッハ 1.0 で無限大に発散する．しかしマッハ 1.0 の定常状態は自然界には存在せず, マッハ数 1.0 近傍(音速近傍)は非定常性の高い速度域である．この非定常性のため音速近傍での衝撃波離脱距離は無限大に発散せず，見かけ上有限の衝撃波離脱距離になり，衝撃波離脱距離から流れの非定常性を評価できると考えられる．本研究の目的は，音速近傍の速度域で減速しながら飛行する物体の非定常な衝撃波離脱距離と物体の減速率の関係を明らかにすることで，音速近傍流れの解明を目指すものである．

2. 研究成果の内容

衝撃波関連施設に設置された弾道飛行装置を用いて，直径 7.93mm の球を自由飛行させ，球の衝撃波離脱距離を可視化計測した．計測にハイスピードビデオカメラを使用し，連続写真を取得した．球の材質をアルミ(密度 : 2.7 g/cm^3)とジュラコン(密度 : 1.41 g/cm^3)の 2 種類選択することで，球の減速率を変化させた．また，球の速度を音速近傍に複数選択した．図 1 に衝撃波離脱距離の時間変化を示す．離脱距離は時間進行とともに増加しており，球の飛行マッハ数が低いほど離脱距離の時間変化は大きくなっている．また，衝撃波離脱距離の時間変化は，球の飛行マッハ数が 1.0 を僅かに下回る範囲から顕著になる．図 2 に衝撃波離脱距離と球の飛行マッハ数の関係を示す．異なる実験条件の結果を一つの図に示している．アルミ球とジュラコン球の離脱距離は，それぞれ一つの曲線にプロットできた．それぞれの曲線は，定常流れでの離脱距離曲線が流れの非定常性に依存して変形したと考えられ，離脱距離計測から流れの非定常性を評価可能だと確認できた．球の飛行マッハ数 1.0～1.1 の範囲では，減速率の違いは離脱距離の時間変化への影響は少ないが，衝撃波離脱距離の大きさへ影響を与えている．流れの非定常性により変形したアルミ球とジュラコン球の離脱距離曲線は，速度が十分に速いとき，定常流れでの離脱距離曲線と重なるが，速度域が音速に近づくと定常流れでの離脱距離曲線から枝分かれすると推測できる．マッハ数 1.0～1.1 の二つの球の離脱距離曲線の違いは，この速度域が枝分かれをした後の速度域である可能性を示している．すなわち，現象の非定常性が現れ始める遷移速度域であると推測でき，計測速度域を高速側へ拡張することで臨界マッハ数が取得できると予想している．

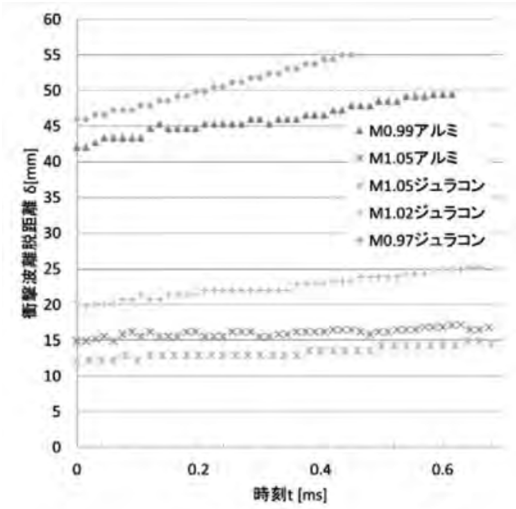


図１：衝撃波離脱距離の時間履歴

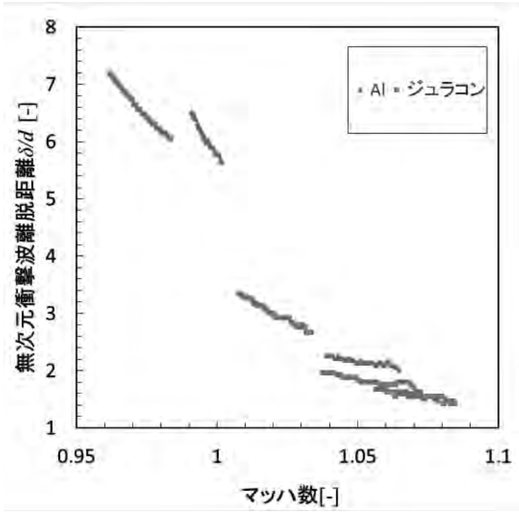


図２：飛行マッハ数 vs 衝撃波離脱距離

3. 研究目標の達成状況

本年度は，飛行体の減速率を変化させることで流れの非定常性を制御し，且つ流れの非定常性を衝撃波離脱距離を指標として評価することの可否を確認すること，非定常性の詳細な評価が可能な飛行体速度域の探査が研究目標である。衝撃波離脱距離を非定常性の評価指標として使用可能なエビデンスが取得できたこと，非定常性が現れ始める速度域と非定常性が顕著になる速度域が取得できたことから，本年度の研究目標は達成できたと考えている．

4. まとめと今後の課題

マッハ数 1.0 近傍の速度で減速しながら自由飛行する球の離脱距離計測実験から，衝撃波離脱距離が大きく変化し，流れの非定常性が顕著に現れる速度域を発見した．今後，該当速度域での同様の実験から，非定常性を定量的に見積もり，非定常流れでの衝撃波離脱距離の実験式を構築する．

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. Kikuchi, S. Baba, H. Nishihara and K. Ohtani: Study of the unsteady flow at near Mach number 1.0, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 4-5.

*[2] 菊池崇将, 馬場翔太, 西原寛人, 大谷清伸: 自由飛行する球の衝撃波離脱距離計測, 平成 27 年度衝撃波シンポジウム(2016), 1B2-3.

3） その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

「なし」

課題番号	J15027
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

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

岩本 悠宏*†，高奈 秀匡**††
*名古屋工業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

日本のエネルギー事情は大きな方向転換を余儀なくされ，再生可能エネルギーへの注目が集まる中, 風力エネルギーの導入率は国内外において年々増加している. 風力発電において, 一定出力を得るため，風速変動に対して風車翼ピッチ角を制御し，発電機回転数を一定に保つ定格出力制御が行われている．そこで本研究では，この余剰風力エネルギー回収による風力発電の高度利用を目的として，発電と回転トルク制御を同時に可能とする液体金属を用いた電磁エネルギー変換装置を提案し，そのファラデーの電磁誘導による発電出力とローレンツ力を活用した回転トルク制御機構の性能を実験的，数値解析的に調査している．ここで, 本装置の高性能化に向けて，内部液体金属の流動現象とそれに起因する発電特性とトルク制御メカニズムに資する知見を得ることが重要である．本研究では，その基礎研究として，Dellor's Lattice Boltzmann model に基づく電磁流体解析基礎コードの開発を行い，３次元 MHD テイラークエット流れを解析した.

2. 研究成果の内容

図１に解析モデルを示す．解析対象は，３次元 MHD テイラークエット流れであり，内円筒が一定の角速度 ω で回転し，外円筒は静止している．また，z 方向に一様磁場 B を印加している．

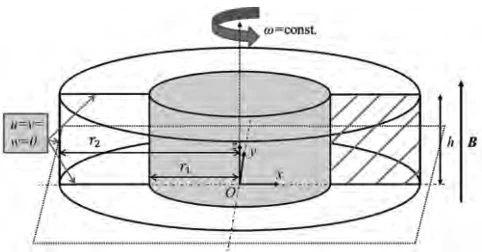
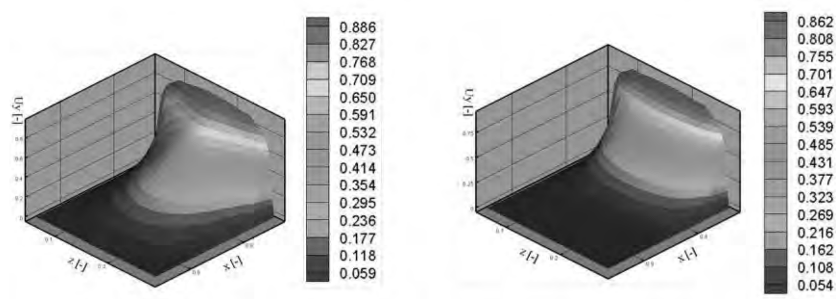


図１：解析モデル



(a)$Re = 100$, $Ha = 0$　　(b)$Re = 100$, $Ha = 8$
図２：xz 断面における周方向速度

図２に，$Re = U(r_2 - r_1)/\nu = 100$ における(a)無磁場時（$Ha = B(r_2 - r_1)\sqrt{\sigma/\rho\nu} = 0$）および(b)磁場印加時（$Ha = 8$）の *xz* 断面（図１の斜線断面）での周方向速度の解析結果を示す．図２より，内円筒が回転することにより粘性力により流体が駆動することがわかる．一方で磁場を印加した場合，流路中心付近で流速が減速し，速度勾配が増加することがわかる．これは，磁場印加によりトルク制御が可能であることを意味する．また，図３に磁場印加時（$Ha = 8$）における *xz* 断面での *y* 方向ローレンツ力の分布を示す．図３より，中心付近で負（流体の流動方向とは逆向き）のローレンツ力が作用することがわかる．これにより，図２において，磁場印加により回転面における流体の速度勾配が大きくなることで，トルク制御が可能になることが明らかとなった．

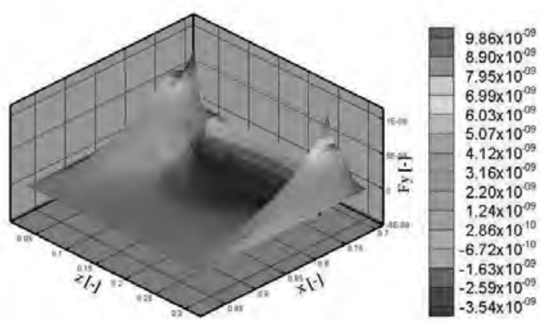


図３ : *xz* 断面における *y* 方向ローレンツ力分布

3. 研究目標の達成状況

本研究で提案する電磁エネルギー変換装置の性能向上に向けて，ファラデーの電磁誘導による発電出力とローレンツ力による回転トルク制御メカニズムを解明するため，Dellor's Lattice Boltzmann model に基づく電磁流体解析基礎コードの開発を行った．また，本基礎コードを用いて３次元 MHD テイラークエット流れを解析し，電磁エネルギー変換装置内部の流動現象に関する基礎的な知見を得た．

4. まとめと今後の課題

本年度では，Dellor's Lattice Boltzmann model に基づく電磁流体解析基礎コードの開発を行い，提案する電磁エネルギー変換装置のトルク制御メカニズムに関する基礎的な知見を得た．今後は，本年度開発した電磁流体解析コードを発展させ，より実現象，実機に近い幾何学的条件，流体条件における電磁流体解析コードを開発し，ファラデーの電磁誘導による発電性能とローレンツ力に起因するトルク制御メカニズムに関するさらなる調査を行う．

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] T. Taki, Y. Iwamoto, H. Takana and H. Yamaguchi: Numerical Simulation of Coaxial MHD Power Generator using Lattice Boltzmann Method, Implementation of Software Library for Flow Analysis, Proceedings of Twelfth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2015), pp.730-731.

[2] Y. Iwamoto, H. Takana, K. Taki and H. Yamaguchi: Magnetohydrodynamics Simulation on MHD Power Generator for Wind Energy, Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2015), pp.70-71.

[3] 瀧健太，岩本悠宏，高奈秀匡，山口博司 : 格子ボルツマン法により同軸型 MHD 発電の特性調査，日本機械学会第 93 期流体工学部門講演会，東京，(2015), 1110.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）なし

課題番号	J15028
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	3 年目

波のエネルギーに基づく軸流を持つ渦の安定性解析とその応用
Stability Analysis of Vortices with Axial Flow based on Energetics and its Application

服部 裕司*†，廣田 真*，福本 康秀**††
*東北大学流体科学研究所，**九州大学マス・フォア・インダストリ研究所
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

昨年度は軸流をもつ渦の曲率不安定性について，正しく導かれた評価式を用いて波のエネルギーの立場から安定性の判別を行い，孤立モードの特徴的な振る舞いにより安定/不安定の交代が実際に起きていることを明らかにした．本年度は楕円型不安定性の場合にこれを応用するための準備を行った．

曲率不安定性と楕円型不安定性は，単独では中立安定な渦上の波（Kelvin 波）が曲率またはひずみにより共鳴することによって発現する．曲率成分は渦軸まわりの角波数が 1 であり，角波数が 1 異なる Kelvin 波を共鳴させる．これに対しひずみ成分は渦軸まわりの角波数が 2 であり，角波数が 2 異なる Kelvin 波を共鳴させる．図 1 に楕円型不安定性を引き起こす可能性がある Kelvin 波の分散曲線と波のエネルギーの符号の一例を示す．ω’=13 から正の傾きで伸びている m=13 の分散曲線（正エネルギー）とω’=15 から負の傾きで伸びている m=15 の分散曲線（負エネルギー）の交点は通常の楕円型不安定性が発現する点である．これに対し，ω’=14 から伸びている m=15 の孤立モードはエネルギーの符号を変える．ω’=13 に接する手前では安定，接した後 k が増加する部分では不安定，k が減少する部分で安定，さらに k が増加する部分では不安定となると予想される．これを実証するために不安定成長率の評価を今後行う予定である．

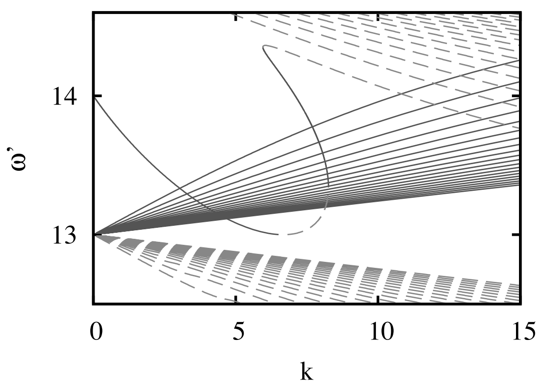


図１：楕円型不安定性を引き起こすKelvin 波の組の分散曲線（m=13, 15）と波のエネルギーの符号．実線が正エネルギー，破線が負エネルギーに対応する．

3. 研究目標の達成状況

応用上重要な渦流れである翼端渦や回転翼端渦は一般に軸流をもち，その渦度分布は一般に翼を含む系全体の境界条件に依存する．軸流をもつ渦の安定性の一般理論を構築することにより，これらの渦の安定性を解明し，渦度分布を制御することによる流れの安定化および不安定化への道を切り拓くことが本研究の目標である．波のエネルギーによる安定性の判別は，一般には煩雑な安定性解析に対して，簡便な代替手段を与える．本年度は，楕円型不安定性の場合の評価の準備を行った．また３年間の研究の中で正しいエネルギーの表式を導き，その有用性を示すことができた．概ね十分な結果を得たといえる．

4. まとめと今後の課題

軸流をもつ渦の安定性を波のエネルギーの表式を用いて判別する方法を確立することができた．楕円型不安定性の場合の実証が残っているが，これについては今後の共同研究で取り組む予定である．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Y. Hattori, M. Hirota, Y. Fukumoto, “Stability Analysis of Vortices with Axial Flow based on Energetics and Its Application,” Proceedings of the 15th International Symposium on Advanced Fluid Information (2015), p. 106-107.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J15029
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	New

Rolling characteristics of neutrophils on PDMS surface mimicking the endothelial topography

Atsushi Shirai*†, ††, Jean-Paul Rieu**, ††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University,
**University Claude Bernard Lyon 1
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Neutrophils are known to roll on endothelium of post-capillary venules as the very early event in their immune response. Numerous studies have been performed on the rolling characteristics of the neutrophils for the fundamental understanding of their behavior in the response. Most of those former studies have focused on contribution of binding of selectins on the endothelium and their ligands on the blood cells to the rolling. In the post-capillary venules, however, axially accumulated red blood cells which displace neutrophils toward the vessel periphery and surface topography of the endothelial surface would also affect the rolling characteristics of the cells. Then, in this study, we focused on the correlative effects of the pressing force from the red blood cells and the surface topography of the endothelium on the rolling characteristics of neutrophils.

2. Details of program implement

To elucidate the correlative effects of the pressing force and the surface topography on the cell motion, we introduced the inclined centrifuge microscope system. With this system, we can apply a well-controlled pressing and driving forces to the cells to quantify contribution of the forces on the motion of the cells. Motion of HL-60 cell line, widely accepted model cell of neutrophils, was observed under a variety of the pressing force on a PDMS substrate which has a hexagonal pattern which mimics surface topography of the endothelial cell layer (design and silicon mold realized in Lyon, France). Figure 1 shows an example of trajectories of the HL-60 cells on such a substrate (the width of the line is 12 μm and the depth is 2.3 μm). The substrate also has a stripe pattern for the comparison of the motion of the cells with the hexagonal pattern. As shown in this figure, most of the cells move along hollow part between the patterns of the substrate. We examined influence of the pressing force to the traceability of the cells on the patterns. Here, the hexagonal pattern was designed considering the apical cell surface of HUVECs.

3. Achievements

We measured velocity of the HL-60 cells on the substrate under a variety of pressing force of 23.5 to 70.5 pN while a constant driving force of 30 pN was applied. Figure 2 shows influence of the pressing force on the mean cell velocity in the direction of the driving force. The velocity was normalized by that of the cells moving along the stripe pattern. The velocity is 1 if all the cells move straight overtaking the hexagonal pattern, and is 0.4 if the move along the hollow part of the pattern. As shown in this figure, the normalized velocity decreases with the increase in the pressing force to

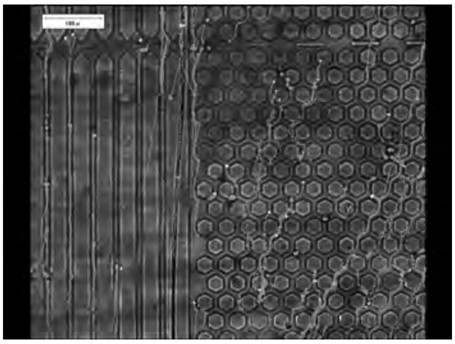


Figure 1 : Trajectories of HL-60 cells on the PDMS substrate at 47 pN of the pressing force and 30 pN of the driving force. The pressing force was applied perpendicular to the figure and the driving force was applied upward.

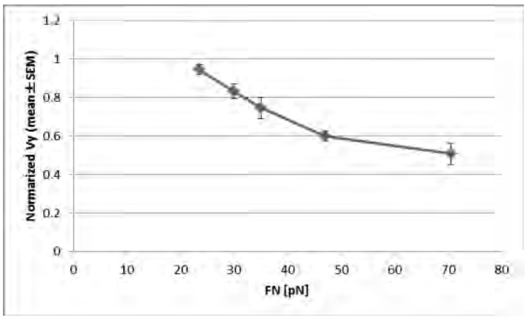


Figure 2 : Mean velocity of HL-60 cells in the direction of the driving force on the hexagonal pattern normalized by that on the stripe pattern. The normalized velocity is 0.4 when all the cells trace hollow part of the hexagonal pattern.

approach 0.4. Since it is known that P-selectin which dominates the rolling of neutrophils on the endothelium predominantly expresses along border of the endothelial cells, this result indicates that the pressing force by the axially accumulated red blood cells and bumpy surface topography of the endothelium enhance possibility for the neutrophils to contact with the P-selectin.

4. Summaries and future plans

We observed behavior of HL-60 cell line on a PDMS substrate on which hexagonal pattern was molded to mimic surface topography of the endothelium. Obtained result implies that the pressing force by the axially accumulated red blood cells, together with the bumpy surface topography of the endothelium, helps neutrophils to bind with selectins which express along border of the endothelial cells. It is known that the endothelial cells are elongated and oriented in the direction of blood flow. We plan to observe motion of the HL-60 cells on an elongated hexagonal pattern to compare with the present result for discussing influence of the elongation of the endothelial cells on the rolling characteristics of neutrophils on blood vessel.

5. Research results (* reprint included)

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

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

[1] A. Shirai and J.-P. Rieu: Rolling characteristics of neutrophils on PDMS surface mimicking the endothelial topography, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 76-77.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

(Award)

(Press release)

課題番号	J15030
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	2015.4.1 ~2016.3.31
継続年数	1年目

衝撃波の細胞内伝播動態の解析
Mechanism of shock wave propagation within the cell

中川 敦寛*†，中川 桂一**，大谷 清伸***††
*東北大学病院, **東京大学大学院理学系研究科，***東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

本研究の目的は，衝撃波の細胞内伝播という超高速複雑ダイナミクスを捉えるために必要な高速度画像装置の開発を行うことである．次いで，高速度画像装置と衝撃波照射デバイスおよび顕微鏡を組み込んだシステムにて可視化を行い，最後に細胞と衝撃波のインタラクションの解明に取り組むことである．

2. 研究成果の内容

高速度画像装置の開発については，一連の研究から，衝撃波の細胞内伝播という超高速複雑ダイナミクスを捉えるために必要なスペックとしては，フレームレート 1 Gfps，連続撮影枚数 25 枚，空間解像度 400×400 pixels は必要であると考えられており，このスペックを満たす撮影システムとなるようパラメータの設定と検証を実施し，可視化自体の目途がついた.

3. 研究目標の達成状況

高速度画像装置の開発に関しては，細胞内衝撃波伝播の可視化において求められるスペックとなる、フレームレート 1 Gfps、連続撮影枚数 25 枚、空間解像度 400×400 pixels を実現する撮影システムの開発に向け、まずは可視化は達成した．最適化については現在取り組んでいる．概ね予定通りの進捗である．

平成 28 年度は衝撃波照射系の構築として音響的に生体内を模擬したゼラチン等を用いたサンプルと，衝撃波照射デバイスの作製（放電式あるいはレーザ光を用いる）を行い，既存高速度カメラ(フレームレート 0.2 Gfps)での実験を継続し，細胞培養系での予備実験に移行する．基礎実験の段階でもできるだけ臨床に近い調査を行うようにする．

4. まとめと今後の課題

細胞内の衝撃波伝播を可視化することで，生体組織に対する音波作用に関する直接的かつ本質的な情報を提供することが期待できる．この結果は血管新生や骨成長など既知の効果のメカニズム解明だけでなく，臨床現場でのアンメットメディカルニーズとのマッチングを図り，音波の新たな再生・活性化効果を演繹的に見出し医療へとつなげる可能性があるものと推察される．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Nakagawa A, Ogawa Y, Amano K, Ishii Y, Tahara S, Horiguchi K, Kawamata T, Yano S, Arafune T, Washio T, Kuratsu JI, Saeki N, Okada Y, Teramoto A, Tominaga T: Pulsed Laser-induced Liquid Jet System for Treatment of Sellar and Parasellar Tumors: Safety Evaluation. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*, 76(6)(2015), pp.473-82.
[2] Mata-Mbenba D, Mugikura S, Nakagawa A, Murata T, Kato Y, Tatewaki Y, Li Li, Takase K, Ishii K, Kushimoto S, Tominaga T, Takahashi S: Intraventricular hemorrhage on initial computed tomography as marker of diffuse axonal injury after traumatic brain injury, *J Neurotrauma*, 32(5) (2015), pp.359-365.
[3] Endo. T, Takahashi Y, Nakagawa A, Niizuma K, Fujimura M, Tominaga T: Use of Actuator-Driven Pulsed Water Jet in Brain and Spinal Cord Cavernous Malformations Resection: *Neurosurgery*, 11 (Suppl 3)(2015), pp.394-403.
[4] Nakano T, Sato C, Sakurai T, Kamei T, Nakagawa A, Ohuchi N: Use of water jet instruments in gastrointestinal endoscopy, *World J Gastrointest Endosc*, 8(3)(2016), pp. 122-7.
[5] 大谷清伸, 中川敦寛, 沼田大樹: 模擬モデルを用いた爆風による外傷性脳損傷機序解明に関する数値模擬, *M&M2015,*材料力学カンファレンスプロシーディング, (2015), pp.369-371.
[6] 大谷清伸, 中川敦寛, 中川桂一： 生体模擬物質中の衝撃波伝播挙動, *M&M2015,* 火薬学会秋季研究発表会, (2015), pp.1-4.
[7] * 中川敦寛、遠藤敏毅、川口奉洋、冨永悌二: パルスウォータージェットメスを用いた精密手術用治療器, *精密工学誌*, 81(4) (2015), pp293-297.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[8] Nakagawa A, Tominaga T: Changing innovation landscape in Japanese academia: Mindset, culture, and infrastructure, China Medical University 台中、台湾, (2015)
[9] Nakagawa A, Tominaga T: Changing innovation landscape in Japanese academia: Mindset, culture, and infrastructure, National Taiwan University 台北、台湾, (2015)
[10]大谷清伸, 中川敦寛, 沼田大樹： 模擬モデルを用いた爆風による外傷性脳損傷機序解明に関する数値模擬, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 慶応大（矢上）, 横浜, (2015), #OS1508-369.
[11]大谷清伸, 中川敦寛, 中川桂一: 生体模擬物質中の衝撃波伝播挙動, 火薬学会 2015 年度秋季研究発表会, 別府, 大分, #23, (2015), pp.59-62.
[12]中川敦寛、刈部博、川口奉洋、古谷桂子、工藤大介、小林直也、山内正憲、久志本成樹、冨永悌二: 重症頭部外傷領域におけるイノベーション, 第 43 回日本救急医学会総会・学術総会, 東京フォーラム, (2015),
[13]中川敦寛、麦倉俊司、Daddy Matas、今井啓道、川口奉洋、工藤大介、古谷桂子、石ヶ森朝香、館正弘、久志本成樹、冨永悌二: 頭蓋顔面骨折と外傷性脳損傷合併例の特徴, 第 38 回日本脳神経外傷学会, あわぎんホール 徳島, (2015),

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）2015 年度秋季研究発表会「特別賞」特別賞受賞, 大谷清伸, 火薬学会, 2015.12.11

（マスコミ発表）なし

課題番号	J15031
区分	一般共同研究
課題分野	⑤基盤研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1 年目

微細加工を施した伝熱面を流れる液膜流の熱流動特性
Heat and Fluid Flow Characteristics of Liquid Film Flow along Heat Transfer Surface with Microscopic Grooves

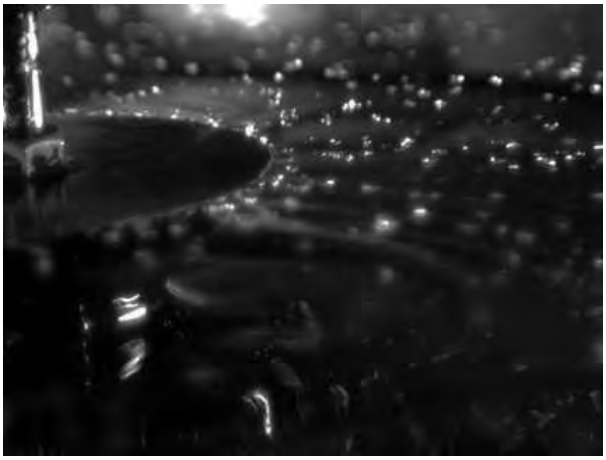
足立 高弘*†，平澤 貴典*，東大野 晃慈*
岡島 淳之介**††，小宮 敦樹**，秋永 剛***
*秋田大学大学院工学資源学研究科，**東北大学流体科学研究所
***アストン大学
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

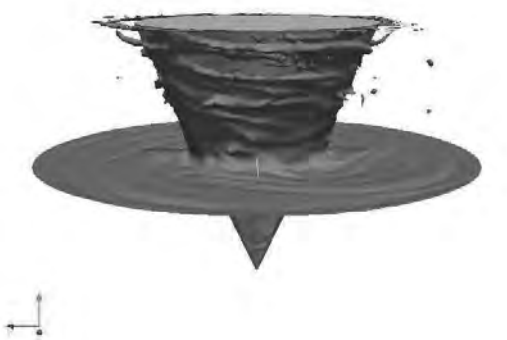
液膜流は，熱交換器や管路の内部，スピンコーターの内表面周りあるいは回転円すいの外表面周りなど工学的応用面に多く見られる流れである．液膜流れは膜厚が薄いことが特徴であり，液膜流の研究は膜が薄いために実験での計測が極めて困難であり数値計算に依るところが大きい．現在，最も信頼のおける気液二相流の数値計算手法の一つとして，CLSVOF(Combined Level-Set and Volume of Fluid)法がある．この方法は，レベルセット法と VOF 法という古くからある方法を組み合わせ，短所を補うことで信頼のおける方法となっており利用者が増加している．本公募研究では，この CLSVOF 法に気液界面での物理量(密度や粘度など)のシャープな変化を組み込むことが可能な GF(Ghost Fluid)法をカップルさせた新しい手法を開発する．GF 法は新しい手法であり，特に円筒座標系や回転を伴う系における取り組みがなく，それらの系での信頼のおける熱流動現象の解析手法を確立させることが目的である．また，流路の表面に微細加工を施すことによる伝熱促進についても調べる．さらに研究が進んだ場合には，凝縮や蒸発といった相変化の効果を取り入れることも検討する．

2. 研究成果の内容

流体研の高速度ビデオカメラを用いて，数値計算の対象となっている現象の可視化実験を行った．すなわち，回転円すい外表面を上昇する液膜流れと上昇した後に周囲に噴霧される液滴の可視化実験を行った．図 1(a) は，その際の可視化写真である．液滴の噴霧状態を上手く可視化することに成功した．さらに，流体研のスパコンから利用できるアプリケーションの OpenFOAM を利用して，この現象の再現に取り組んだ．図 1(b) が，OpenFOAM による計算結果である．回転円すい外表面を液膜流が上昇する様子が再現できている．ただし，可視化実験のように円すい底面での液滴の噴霧の再現までには至らなかった．微細な液滴な噴霧を再現するためには，さらに細かなメッシュを必要とするため，さらに計算時間や計算費用が必要となる．



(a) 可視化実験の結果



(b) OpenFOAM による結果

図 1：回転円すい外表面の上昇液膜流

3. 研究目標の達成状況

本研究では，有限差分法を基に HSMAC 法と CLSVOF(Coupled Level Set and Volume of Fluid Method)と GFM(Ghost Fluid Method)といった新しい方法を用いた数値解析プログラムの開発を行ってきた．この方法では，計算の途中で気液の質量は厳密に保存される，また，界面の形状から曲率を精度良く算出すること出来るので，界面追跡の精度が高い．この手法を確立することが最終目的である．現在のところ，プログラミングが複雑で上手く計算が進まない状況にある．そこで，まず既存商用あるいはフリーのソフトである FLUENT あるいは OpenFOAM を用いた数値解析にも取り組んだ．これらの結果は，開発中の計算法の信頼性確認の際に計算結果の比較対象として用いるため必ず必要なステップである．

4. まとめと今後の課題

気液二相流の界面を追跡するための新しい方法を取り入れた数値計算コードの開発を目的として研究を進めてきた. CLFVOF および GFM を円筒座標系に適用して計算を進めようと試みたが現在までのところ上手く進んでいない．今後の課題として，円すいの斜面に沿った一般座標系を導入して，一般座標系での界面追跡法の開発を行う必要があると考える．一方で，これらのプログラム開発に平行して，センター内のアプリケーションである FLUENT や OpenFOAM を利用して現象の再現に取り組んだ. 特に OpenFOAM はフリーソフトであるにもかかわらず，本研究のような複雑な現象をある程度再現することができた．今後は実験等との結果との比較を行い，定性的かつ定量的な信頼度を確認することが課題となる．

3. 研究成果（*は別刷あり）

1) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] T. Hirasawa, T. Adachi, K Higashiono, J Okajima and T Akinaga：Heat and Fluid Flow Characteristics of Liquid Film Flow along Heat Transfer Surface with Microscopic Grooves, Proc. 12th International Conference on Fluid Dynamics, Sendai, Japan, (2015), USB.

[2] 平澤貴典・足立高弘：回転円すいの外表面を上昇する液膜流れの数値シミュレーション，オープン CAE シンポジウム 2015@富山，富山，(2015)，USB.

課題番号	J15032
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

大規模環境でのふく射および対流によるエネルギー輸送に関する研究

Study on Energy transport by Radiation and Convection in Large Scale Environment

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

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本年度は，前年度までに確立した独自のふく射観測ゾンデ技術を用いた観測データの取得を目指した．本放射ゾンデと別途，他機関が開発した雲粒子ゾンデを 1 つの気球に接続し，タンデム飛揚観測を行った．結果の一例を図 1 に示す．放射プロファイルの変化と雲粒子の密度には明らかな相関が認められた．また，本ふく射観測ゾンデの測定系コンポーネントを JAXA が開発中の長時間飛翔用スーパープレッシャー気球に搭載するための仕様を検討した．

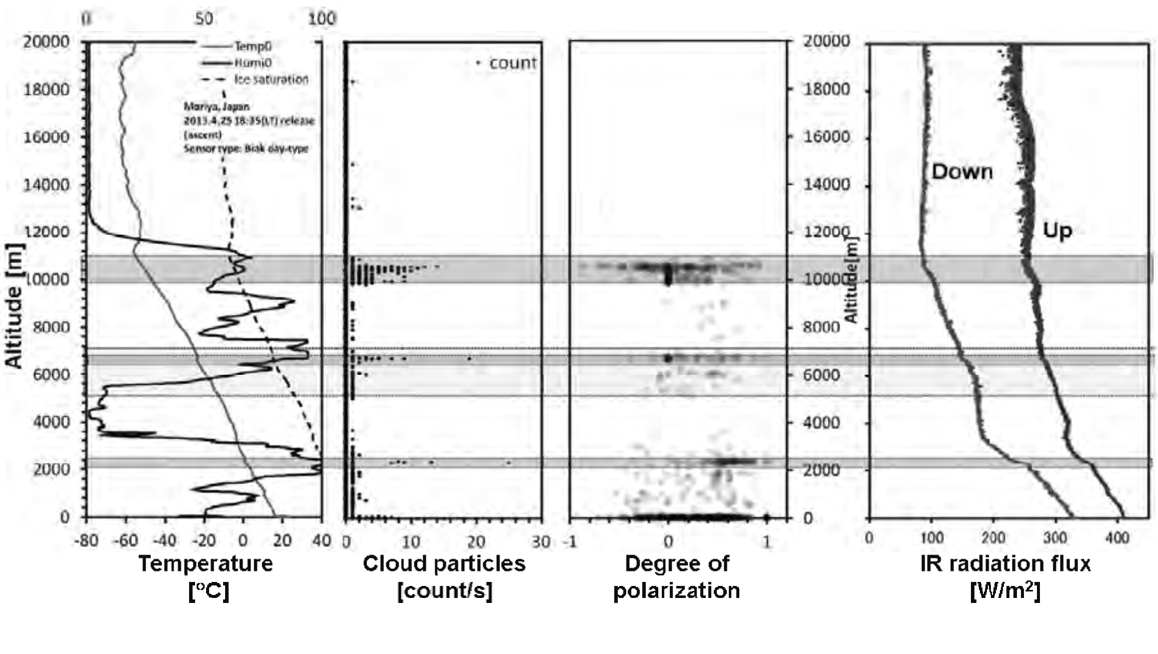


図1：ふく射観測ゾンデおよび雲粒子観測ゾンデのタンデム気球飛揚観測の結果

3. 研究目標の達成状況

メガスケール伝熱現象である都市温暖化および地球温暖化の精緻なシミュレーション・局所温度予測等を実現するためには，数値モデリング構築のための支援データを取得する信頼性が高く，且つ安価で高頻度の観測がおこなえる観測ツールが不可欠である，今年度の観測結果よりシミュレーションモデリングの構築を行う上で重要な成果が得られた．本研究成果により，研究目標の達成に向けて前進したと考えている．

4. まとめと今後の課題

本年度の共同研究では，これまでの共同研究で確立してきたふく射観測ゾンデを利用した具体的な観測結果を得ることができた．今回得られたデータを詳細に解析し，シミュレーション結果との対比やモデリングの考察を行う予定である．また，最新の気球システムに搭載することを検討しており，従来よりも長時間の観測データを収集する試みにトライする．

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] Noboru Yamada, Junnosuke Okajima, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama, Study on Energy Transport by Radiation and Convection in Large Scale Environment, Proceedings of the 15th international symposium on advanced fluid information, (AFI2015), Sendai international center (October 8-10, 2015), CRF-31.

[2] 斎藤，芳隆；後藤，健；山田，和彦；中篠，恭一；秋田，大輔；松尾，卓摩；河端，昌也；田村，啓輔；大谷，章夫；山田，昇；松嶋，清穂；田中，茂樹；橋本，紘幸；島津，繁之，皮膜に網をかぶせた長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発(NPB5-1a)，JAXA 大気球シンポジウム(2015)， isas15-sbs-008.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15033
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	1 年目

膨張波照射による気泡運動と生体組織への影響

Bubble Motion and Effect of Biological Tissue by Underwater Expansion Wave Irradiation

橋本 時忠*†，小川 祐司*
大谷 清伸**††
*佐賀大学大学院工学系研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

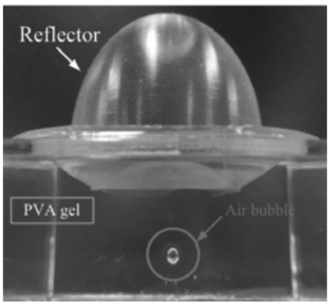
医療分野において，膨張波は生体に対する新たな治療に応用できる可能性を持っている．しかし，生体内とほぼ同様の挙動を示すと考えられる水中の膨張波に関する報告はほとんどされていない．そこで本研究では膨張波が生体に及ぼす影響について知見を得るために，生体に等価した模擬生体を製作して集束膨張波を照射する．その干渉の様子を詳細に観察して，気泡運動から模擬生体に働く力学的作用を間接的に観測し，生体組織への影響について考察する．

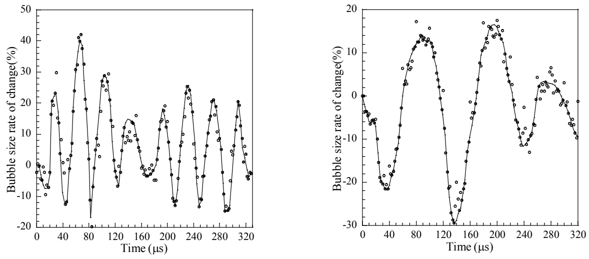
2. 研究成果の内容

本研究では集束膨張波照射による模擬生体への影響の観察を目的として圧力測定，膨張波照射実験を行った．さらに，膨張波の力学的な効果を知るために，生体の音響特性に等価させた模擬軟組織として PVA を採用して，集束圧力波（衝撃波，膨張波）を照射した．模擬軟組織内部の集束領域内に微小な気泡を設置して，集束膨張波照射による気泡の挙動を詳細に観察した．

本研究で膨張波の発生と集束を同時に可能にするためにシリコン樹脂(PDMS)製の楕円形状型リフレクターを設計した．製作した PVA ゲルをリフレクターに接着させてゲル内に集束膨張波・集束衝撃波を照射して実験を行い，設計上の焦点で圧力波が集束していることが確認できた．

次に，微小気泡をゲル内の集束領域に設置し，変形の様子を詳細に可視化した．気泡はシリンジを用いて設置した(図 1)．図 2(a), (b)に集束膨張波と集束衝撃波をそれぞれ照射した際の気泡直径の時間変化を示す．これらの結果から，与える圧力波によって特徴的な気泡変動が見られた．これは，気泡の周辺組織に圧力波が変位を与えていることを意味し，膨張波照射による力学的作用を間接的に説明できる．





(a)　膨張波照射時　　(b)　衝撃波照射時

図 1　ゲル内に設置された気泡

図 2　圧力波照射時

3.　研究目標の達成状況

模擬生体中に設置した気泡の変化から，膨張波照射は衝撃波照射と同様に周辺組織を変位させ，生体組織に影響を与えることができる可能性を示すことが出来た．従って，予想される成果に対して 90%以上の達成度が得られたと言える．

4.　まとめと今後の課題

集束膨張波が生体に与える効果を検討するために生体の音響特性に等価した模擬生体を製作し，気泡を設置して詳細に可視化した．気泡に集束膨張波と集束衝撃波を作用させると，気泡の挙動に違いが見られた．現在，理論解析，数値計算，実験の気泡運動を詳細に調査中であり，数値計算により再現できれば，周囲媒質である模擬生体への力学的な効果が説明できるので，今後，実験と同様に計算を実施する必要がある．

5.　研究成果（*は別刷あり）

1)　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2)　国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Y. Ogawa, T. Hashimoto, K. Ohtani: Bubble Motion and Effect of Biological Tissue by Underwater Expansion Wave Irradiation, Twelfth Int. Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), OS17: IFS Collaborative Research Forum (AFI-2015), Sendai, Japan, (2015), #CRF-36, pp.72-73.

*[2] 小川 祐司，今村透，竹下海渡，金丸拓史，橋本時忠，住隆博，松尾繁，瀬戸口俊明: 集束膨張波照射による模擬軟組織への効果, 平成 27 年度衝撃波シンポジウム, 熊本 (2016), P-14, USB

3)　その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）Best Presentation Award（若手プレゼンテーション賞），集束膨張波照射による模擬軟組織への効果，小川 祐司，2016. 3. 16, 平成 27 年度衝撃波シンポジウム

（マスコミ発表）なし

課題番号	J15034
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	１年目

ＭＲ流体流動場中における微粒子挙動の解明
Investigation on behavior of particles in MR fluid flows

井門 康司*†，中野 政身**††
堤 浩晃***
*名古屋工業大学大学院工学研究科，**東北大学流体科学研究所
***名古屋工業大学大学院工学研究科博士前期課程
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

ＭＲ流体は磁場に反応して粘性（厳密には、降伏せん断応力）が変化する機能性を有する。この機能性の発現には、分散した強磁性体微粒子の磁場下での磁気分極に伴う粒子クラスター構造の形成が大きく関与しており、これら微粒子の磁場下での挙動を解明することは、ＭＲ流体の機能性と性能を評価する上において非常に重要となる。磁場下でのこれら微粒子のクラスター構造の形成に関する研究は、実験においてはほとんどが流動場のない状態での粒子クラスター構造の可視化観察が行われている程度で、数値解析では静止状態及びせん断流れ場での限られた粒子数における定性的な粒子クラスター形成・崩壊挙動が再現されているが不明な点が多い。本研究では、離散粒子法などの数値解析と可視化実験によって印加磁場下でのＭＲ流体中の実規模レベルでの強磁性粒子のクラスター形成・崩壊の挙動を明らかにすることを目的とする。ＭＲ流体に含まれる強磁性粒子の磁場下での挙動を、離散粒子法を用いたハイブリッド数値解析手法を用いて調べる。微小間隔の平行平板間のＭＲ流体のせん断流れ中の強磁性粒子の挙動について、顕微鏡を利用した可視化実験を行うとともに、数値解析結果との比較を行い，数値計算結果の妥当性を確認する。印加磁場強度や流動条件などが、強磁性粒子が形成するマイクロ構造に与える影響について明らかにする。

2. 研究成果の内容

本解析対象は流動する流体中の強磁性微粒子の挙動であり，流体と粒子の相互作用を考慮するとともに，印加磁場下においては粒子間の磁気的な相互作用を考慮する必要がある。このような解析対象について数値計算を行うため，新たにハイブリッド数値解析法を開発した。すなわち，流体の運動については HSMAC 法を用いて解析し，粒子の運動については離散粒子法を用い，流体と粒子の相互作用を考慮して流体中の粒子を表現するため埋め込み境界法を取り入れた解析コードを新たに開発した。開発した計算コードを用いて，平行平板間のＭＲ流体の流れ場中での強磁性微粒子挙動を解析した。本解析では，ＭＲ流体中の強磁性微粒子の体積分率を 10%とし，印加磁束密度を 12.5 mT および 25 mT，平板間距離で定義したレイノルズ数を 0.04 および 0.4 と設定して解析を行った。図１は初期状態と粒子のクラスター形成がほぼ定常となった状態での強磁性微粒子分布を示している。初期状態では強磁性微粒子はランダムに配置されている。磁場印加とともに上壁面が一定速度で移動を始める。レイノルズ数が 0.4, 印加磁束密度が 25 mT の場合, 流れ方向に層状のクラスターが形成され，鎖状クラスターは流れ場中央近傍で上側鎖状クラスターと下側鎖状クラスターの切り替わ

りが発生していることが確認された。これは可視化実験での結果とも一致する。

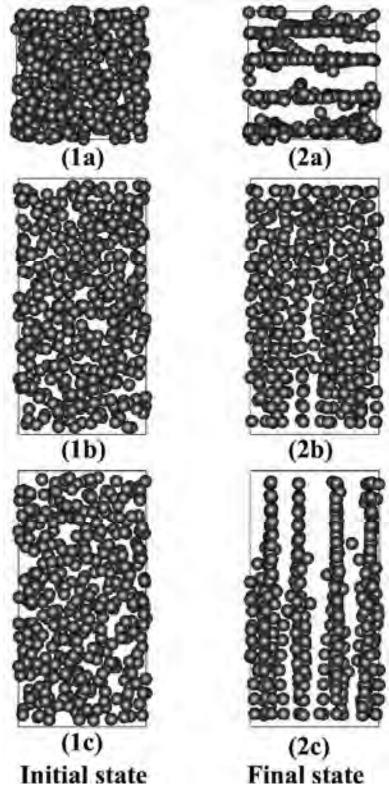


図１　強磁性微粒子の分布状態。分布図はそれぞれ(1)初期状態および(2)定常状態。(a)上壁面方向, (b)流れに対して横方向から, (c)流れ方向からそれぞれ見た図。Re=0.4, B=25 mT。

3. 研究目標の達成状況

流動する MR 流体中の粒子挙動を解析する基本的な数値計算コードの開発は終了し，微小間隔の平行平板間単純せん断流れ中の粒子挙動について解析を行い，可視化実験との比較を行った。その結果，数値計算結果が定性的に可視化実験結果と一致し，その妥当性を確認した。

4. まとめと今後の課題

印加磁場下における流動するMR流体中粒子挙動を解析する基本的な計算コードを開発した。今後，スーパーコンピューターでの計算に対する最適化を進めるとともに，実スケールに近い解析モデルを設定した場合に必要となる計算時間を推定する。その結果を踏まえ，実際のスケールを想定した解析を長時間計算により遂行する必要がある。

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] Hiroaki Tsutumi, Yasushi Ido, and Masami Nakano: Investigation on Behavior of Particles in MR Fluid Flows, Proceedings of the 12th International Conference on Flow Dynamcis, (2015), CRF-74.

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	J15035
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	３年目

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

佐々木　大輔*†，下山　幸治**††，岡本　正人*，永谷圭司***，赤坂剛史*
小松一彦****，三坂孝志*****，大塚光******，大林茂**
*金沢工業大学工学部，**東北大学流体科学研究所，
東北大学未来科学技術共同研究センター，*東北大学サイバーサイエンスセンター
*****東北大学学際フロンティア研究所，******東北大学大学院工学研究科
†申請者，††所内対応教員

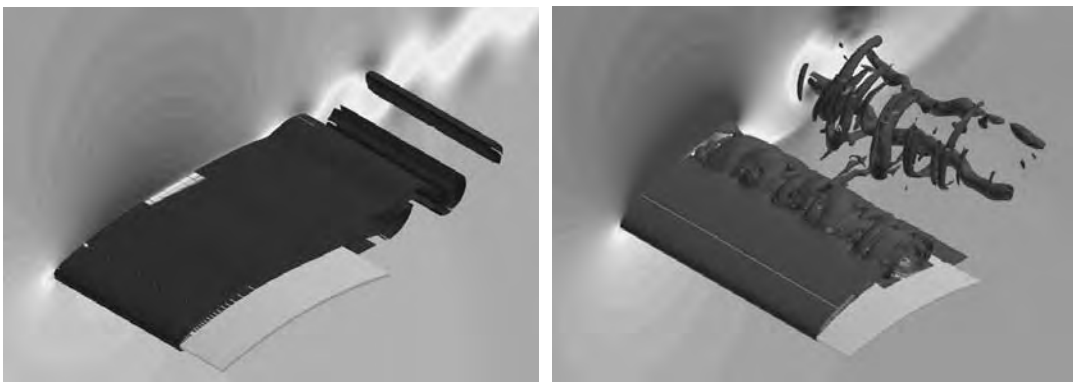
1. 研究目的

災害調査や撮影といった様々な場所で近年小型航空機やマルチコプタが活用されている．それら小型航空機の活躍の場を広げるためには，低レイノルズ数領域における空力性能の向上が不可欠である．そこで，本研究では，数値的および実験的に低レイノルズ数流れにおける流体解析手法の構築を行う．

2. 研究成果の内容

平板翼，翼型（NACA0012），円弧翼を対象として低レイノルズ数における流体解析をBuilding-Cube 法（BCM）により行った．図１に迎角２度及び 10 度における翼上面の渦構造を示す．迎角が上がるにつれ，渦構造が３次元となることが確認できた．さらに，直交格子法の利点を活かして，振動翼（ヒーヴィング運動）の流体解析を実施した．

また，マルチコプタの性能向上を目的として，シュラウド付きロータ周り流れを数値計算によって解析し，風洞による可視化結果との比較を行った．双方の可視化結果の比較により流体計算結果の妥当性を確認し，数値計算結果に基づいてシュラウド内部の流れ構造を明らかにした．



(a) 迎角２度　　(b) 迎角 10 度

図１：平板翼における渦構造（レイノルズ数 5000）

3. 研究目標の達成状況

本研究を通して，低レイノルズ数における実験的・数値的に複雑な流れ場の解明ができたことからおおむね目標を達成でき，実機に対しても適用可能であると考えられる．ただし，振動翼に関しては検証が不十分であり，更なる検証と精度向上が必要である．

4. まとめと今後の課題

低レイノルズ数域における小型航空機周りの流れ場を解明し，空力特性を把握するために実験的・数値的に流体解析を行った．その結果，複雑な流れ場の解明ができたが，ロータ周り等の実際の流れ場に適用するためには移動物体における妥当性検証が今後必要である．

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] D. Sasaki, T. Kurishita, M. Kamada: Robust Airfoil Optimization of Human-Powered Aircraft against Manufacturing Variations, *Proceedings of 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Sendai, (2015).

[2] H. Otsuka, K. Nagatani: Flow Visualization of a Separation Flow From a Shrouded Rotor Inlet in a Crosswind, *Proceedings of the 7th Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT)*, Cairns, Australia, (2015).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[3] 國塩泰希, 佐々木大輔, 大塚光, 永谷圭司: CFDとEFDによる横風中のダクテッドファン周り流れの可視化に関する基礎検討, 第47回流体力学講演会／第33回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム講演論文集, 東京, (2015).

[4] 飯岡大樹, 兒島有哉, 佐々木大輔, 岡本正人: 直交格子積み上げ法を用いた折り曲げ薄翼のCFD解析, 第47回流体力学講演会／第33回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム講演論文集, 東京, (2015).

[5] 鯰名啓太, 岡本正人: 低レイノルズ数における S 字キャンバを持つ翼型の空力特性, 第47回流体力学講演会/第33回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム講演論文集, 東京, (2015).

[6] 鯰名啓太, 谷口由佳, 岡本正人: 低レイノルズ数における物体表面形状による抗力係数への影響, 第47回流体力学講演会/第33回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム講演論文集, 東京, (2015).

*[7] D. Sasaki, D. Iioka, Y. Kojima, T. Akasaka, M. Okamoto, T. Misaka, S. Obayashi, K. Shimoyama: Cartesian-based CFD Approach Toward Investigation of Aerodynamic Characteristics of Low-Reynolds Number Airfoils, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 8-9.

[8] 兒島有哉, 飯岡大樹, 佐々木大輔: 直交格子 CFD を用いた低 Reynolds 数流れにおける翼型の空力特性比較, 第53回飛行機シンポジウム講演論文集, 松山, (2015).

[9] D. Iioka, Y. Kojima, M. Okamoto, D. Sasaki, S. Obayashi, K. Shimoyama: Computational Fluid Dynamics Analysis of Thin Angular Airfoils Using Building-Cube Method, *Proceedings of the 7th Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT)*, Cairns, Australia, (2015).

[10] D. Sasaki, H. Katayama, T. Kurishita: Robust Design Optimization of Airfoil for Human-Powered Aircraft considering Manufacturing Errors, Next Generation Transport Aircraft Workshop 2016, Hawaii, (2016).

[11] D. Sasaki, Y. Kojima, D. Iioka, R. Serizawa, S. Takahashi: Towards Aerodynamic Characteristics Investigation Based On Cartesian Methods for Low-Reynolds Number Flow Simulation, The 23rd Workshop on Sustained Simulation Performance, Sendai, (2016). [Invited]

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15036
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

腹足類這行運動の粘液の特性解析とその壁面移動ロボットへの応用
Characteristic analysis of mucus of crawling locomotion in gastropods and its application to a wall climbing robot

塚越 秀行*†，中野 政身**††
渡辺 将広*
*東京工業大学，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

様々な環境に吸着しながら移動するカタツムリは，粘液の粘度を巧みに操作している．本研究では，カタツムリの粘液の基本特性を解明し，その原理を応用して多様な壁面に吸着しながら移動できるロボットの創成を目指す.

2. 研究成果の内容

レオメータを用いて，カタツムリの粘液のせん断速度－せん断応力特性や動的粘弾性特性に関するレオロジー特性の計測を行った．図１は，せん断速度を 1.0s^{-1} の一定値に保ったまま，粘液に力を加えた際のせん断応力の時間推移を示したグラフである．この結果より，力を加え始めた初期の段階では，時間経過とともにせん断応力は単調増加する弾性を示し，さらに力を加え続けると，一度減衰した後，せん断応力が横ばい傾向となる流動性を示すことが明らかとなった．図 2 は，せん断速度を変化させた際のせん断応力の変化を測定した結果である．本結果より，カタツムリの粘液は，降伏値を超えた後，流体の変形によって構造が破壊されて流動性を増す流体，すなわち，チキソトロピー流体と考えられる．

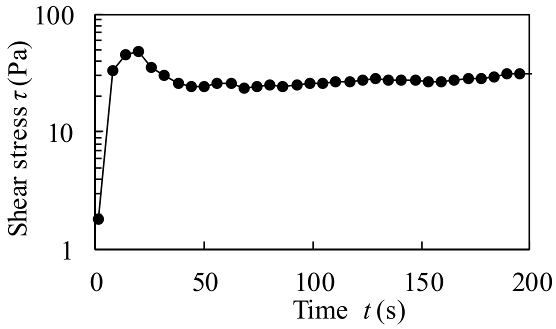


図１：せん断応力の時間応答（$\dot{\gamma} = 1.0\ \mathrm{s}^{-1}$）

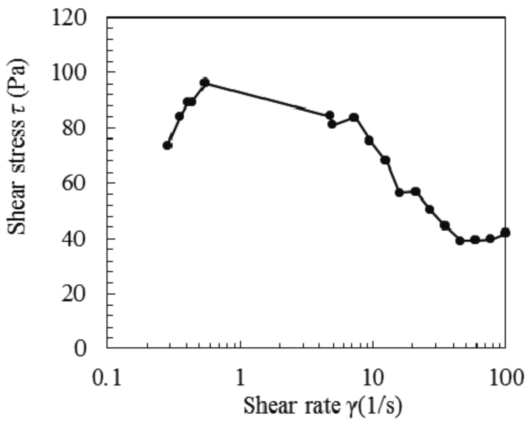


図２：せん断速度－せん断応力特性

3. 研究目標の達成状況

本研究の最終目的は，カタツムリのように粘液を利用しながら凹凸面に吸着しながら移動する壁面・天井移動ロボットを工学的に再現することである．

平成 27 年度の成果として，カタツムリが這行運動を実現するうえで，粘液の特性として求められるせん断方向の特性を解明することができた．しかし，天井面を含む 3 次元的環境に吸着して移動するためには，垂直方向の吸着特性も解明する必要がある．人工粘液を作製するうえで，垂直方向の吸着原理と設計条件を今後明らかにしていく予定である．

4. まとめと今後の課題

カタツムリの粘液のせん断方向のレオロジー特性を計測し，そのメカニズムに関連づけてカタツムリが這行運動を行える原理の一部を解明することができた．今後は，垂直特性の解明とともに，人工粘液を作製し，カタツムリと類似の動作を行う機械モデルと用いて，コンクリート壁面の吸着移動の実現を試みる予定である．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1） 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2） 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[番号]発表者: タイトル，学会名等，発表場所，(発表年)，ページ.

*[1] Masahiro Watanabe, Hideyuki Tsukagoshi, and Masami Nakano: Rheological Properties of Snail's Mucus Enabling Adhesive Crawling Locomotion, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2015)*, Sendai Japan, (2015), pp.162-163.

3） その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15037
区分	一般共同研究
課題分野	⑤基盤研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	３年目

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

李鹿 輝*†，中野　政身**††
*山形大学大学院理工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

流れに関連した振動現象は身の周りに多く存在する．例えば，航空機の翼のフラッタや高速走行中の自動車の風を切る音，旗のはためき，キャビテーション等である．このような流れに関連した振動現象は「流体励起振動」（Flow-Induced Vibration, FIV）と呼ばれている．

本研究は，流れに誘起される柔いフィンの振動とその後流を対象として，フィンの振動とそれによって誘起された後流の構造との関係を明らかにして，振動フィンの効率的な粉粒体空気輸送への応用を目的とする．さらに，効果的なフィン装置を粉粒体空気輸送に応用し，被輸送粒子速度と空気速度の分布の計測により省エネルギーの効果を評価する．

2. 研究成果の内容

(1)実験装置及び方法

フィンの振動観察及び後流の計測のため，本実験は回流型風洞を使用した．Fig.1 に実験モデルを示す． Table 1 にフィンの材質や物性値，使用するフィンの幅について記す．

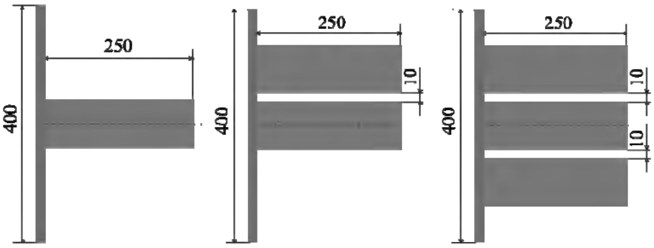
Table 1

Material	PET
Length *L* [mm]	250
Width of soft fin *W* [mm]	50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180
Thickness *h* [mm]	0.15
Density ρ [kg/m^3]	1390
Young modulus *E* [GPa]	3.9

Fig.2 に風洞の測定部の概要と座標軸を示す．柔らかいフィンの振動観察の方法は次の通りである．①中央のフィンに上から流れ方向に広がるレーザシートを照射する．②流れの中でのフィンの挙動を側面から高速度カメラで撮影する．③コンピュータで取得した画像データを低速再生し，中央のフィンの全振幅をスケールで，振動数と波形を目視で調べる．

フィンの振動観察時の実験条件は，平均主流速度 1.7， 2.4，3.0，3.7，4.3 m/s，レイノルズ数 2.76，3.91，4.88，6.02，7.00 （×10^4）. 次にフィンの後流の可視化時の実験条件は，平均主流速度 3.0，レイノルズ数 4.88×10^4，フレーム数 3000 fps，露光時間 1/3000 s，測定時間 1 s，解像度 512×512 pixel である．

(2)実験結果及び考察



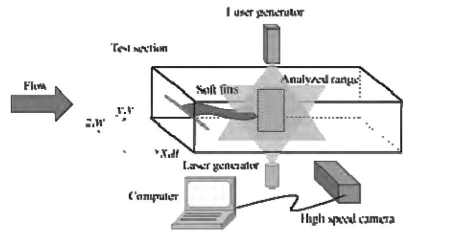


Fig.1 Soft fins **Fig.2 Coordinate of test section in wind tunnel**

Fig.3 に代表例として気流速度 3.50[m/s]におけるフィンの振動状態と可視化した様子を示す．フィン後流においてはっきりと渦を巻いている様子が確認できる．

Fig.4 に，各流速における乱れ強さの分布を示す．流速が上がるにつれて乱れ強さの分布が広く，また強くなっていることが確認できる．3.7m/s の境界は，フィンにねじれが生じる付近であった．つまり解析領域断面において，3.7m/s はねじれが生じることによって乱れ強さが弱くなったと言える．その後，乱れ強さは再び強くなっていることがわかった．

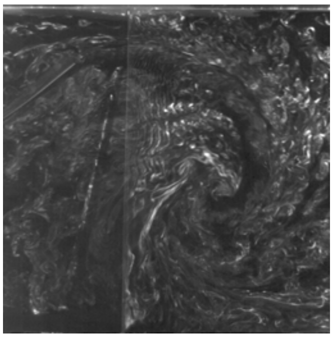


Fig.3 Vibration state of soft fin

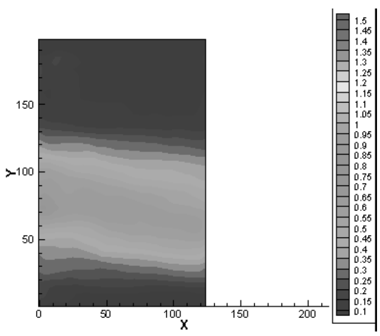


Fig.4 (a) 3.2m/s

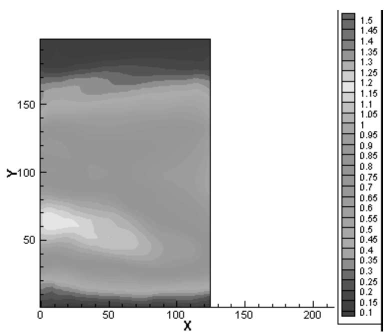


Fig.4 (b) 3.5m/s

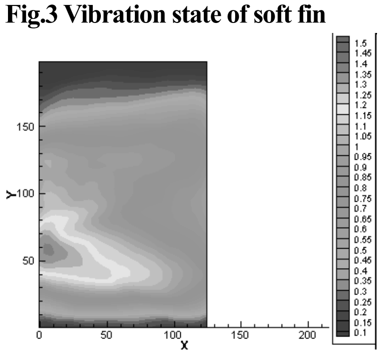


Fig.4 (c) 3.7m/s

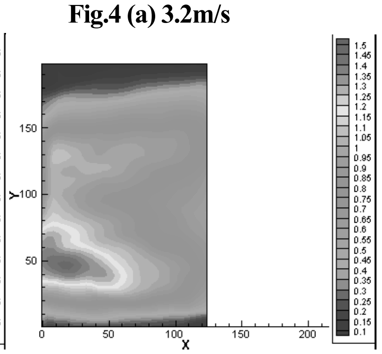


Fig.4 (d) 3.8m/s

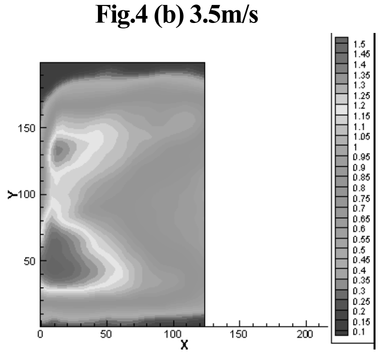


Fig.4 (e) 4.0m/s

Fig.4 Reynolds stress in wake of soft fins

3. 研究目標の達成状況

柔いフィンの励起振動により発生した流れ場を PIV で計測し，フィンの振動とそれによって誘起された後流の構造との関係を明らかにした．

4. まとめと今後の課題

気流速度が増すごとに乱れ強さが広く，強くなる傾向がある．しかし，フィンがねじれを生じさせた場合，乱れ強さが減少する．W70 より W200 の方が，フィン後流の解析領域において大きな渦がはっきりと確認された．

5. 研究成果（*は別刷あり）

*[1] A. Rinoshika, Shunya Suzuki and M. Nakano: Measurement on wake flow induced by soft fins' vibration, *Proceedings of The Fifteenth International Symposium on Advanced Flow Information*, Sendai, Japan (2015), pp.160-161.

課題番号	J15038
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	3 年目

超高効率太陽電池用量子ドット構造のバンド構造と光学的性質
Electronic Band Structure and Optical Properties of Quantum Dot Structures for extremely high-efficiency solar cells

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

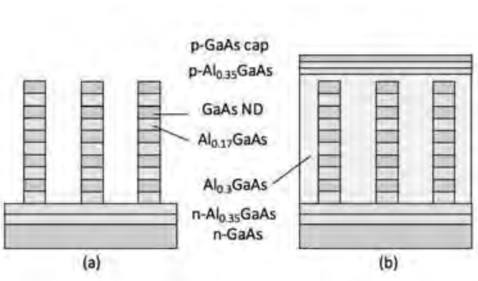
1. 研究目的

太陽光発電が基幹電力となるには変換効率 50%以上が求められており，それを実現させる技術として多接合型量子ドット太陽電池が注目されている．その光電変換効率を飛躍的に増大させるためには，量子ドットのバンド構造，特にゼロ次元状態密度や，ドット間の電子的相互作用を調べることが不可欠である．しかしながらこれまで良質の量子ドットを得ることが困難であった．そこで，流体科学研究所で中性ビームを用いて作製に成功した半導体ナノディスク（以下、NDs）が形成するミニバンド構造を，光学的手法を用いて解明する．得られた知見を用いて，様々な NDs アレイを積層させた多接合型量子ドット太陽電池を作成し，飛躍的な変換効率向上を目指す．

2. 研究成果の内容

昨年度はⅣ属元素からなる Ge-NDs を用意し，ミニバンド形成による光学的測定変化を評価した．その結果，Ge-NDs アレイにおいてそのバンド構造が変化し，ミニバンド化することでキャリア寿命が増加することが確かめられた．本年度はこの成果を受けて，III-V 属半導体 GaAs からなる NDs アレイ構造を流体研で用意し，その光学的特性を宮崎大学で評価した．GaAs のバンドギャップは室温で約 1.4 eV と，単接合太陽電池でもっとも高い変換効率が期待できる材料であり，GaAs-NDs アレイを高品質に作成し，その光学的特性を明らかにすることは多接合型量子ドット太陽電池実現において非常に重要である．

GaAs-NDs アレイは流体研が所有するトップダウンプロセスを用いて以下のように作成した．まず，ともに 12 nm の GaAs 井戸層と $Al_{0.17}Ga_{0.83}As$ 障壁層から成る量子井戸(MQW)を n 型 GaAs 基板上に作製した．次にバイオテンプレートと中性子ビームによりエッチングを行い，ナノピラー(NPs)を形成させた[図 1(a)]．その後，AlGaAs を再成長させることで NDs アレイを形成させた[図 1(b)]．図 2 に，今回用意した GaAs-MQW，NPs，NDs の発光スペクトルを示す．スペクトル比較から，NDs 試料のみに観測された発光ピーク C1～C3 は NDs からの発光信号であると考えられた．理論計算結果と比較した結果，形成された ND の直径が 7 から 15 nm と変化したため，関連する発光ピークが C1～C3 のように複数観測されたと結論づけることができた．NP 構造起因の発光スペクトルは今回初めて明確に観測できたものである．



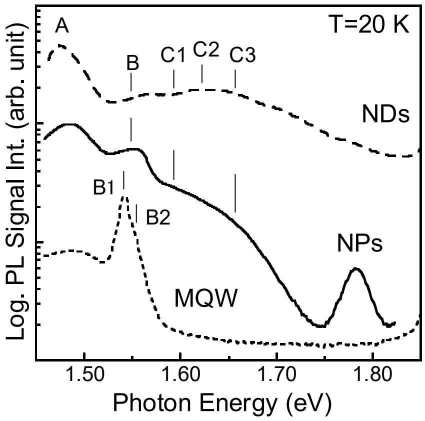


図1：用意したNP [(a)]とND[(b)]試料　　図2：20 Kにおける発光スペクトル

3. 研究目標の達成状況

今年度は多接合型量子ドット太陽電池を実現させるために極めて重要な材料であるGaAs-NDs アレイを用意し，その光学的特性を発光分光法で評価した．そのなかで、NDs化によるバンド構造変化を反映した発光スペクトルを初めて実験的に検出し，量子ドット太陽電池実現の可能性が高いことを明らかにした．ただし，当初の目的であった実際の太陽電池構造の実現までには至らなかったことから，達成度は8割と判断する．

4. まとめと今後の課題

多接合型量子ドット太陽電池材料として重要なGaAsにおいて， NDsによるバンド構造変化を初めて明確に観測した．ただし光吸収領域の制御ならびにキャリア輸送特性の改善にはより高品質なGaAs-NDsアレイの形成が必要となり,今後継続して共同研究を実施する．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] D. Ohori, A. Suzuki, C. Thomas, A. Higo, S. Samukawa, A. Fukuyama, and T. Ikari: Light emission from GaAs/AlGaAs nanopillars fabricated by neutral beam etching and bio-template, E-MRS Spring Meeting 2015, (2015), I-IX-6.

[2] A. Fukuyama, D. Ohori, A. Suzuki, C. Thomas, A. Higo, S. Samukawa, T. Ikari: Photoluminescence study of quantum levels in GaAs/AlGaAs quantum nanodisks fabricated by bio-template and neutral beam etching, E-MRS Spring Meeting 2015, (2015), I-10-4.

[3] D Ohori, K. Kondo, T. Fujii, T. Okada, S. Samukawa, T. Ikari, A. Fukuyama: Quantum Levels in Ge Nanodisk Array Structure Fabricated by Nano-protein-mask and Neutral Beam Etching Investigated by A Photoluminescence Technique, 第34回電子材料シンポジウム, (2015), pp. 135-136.

[4] 大堀大介、近藤清文、トーマス セドリック、肥後昭男、寒川誠二、碇哲雄、福山敦彦: 平成27年秋季第76回応用物理学会学術講演会, (2015), 14a-4D-1.

*[5] D. Ohori, K. Kondo, C. Thomas, A. Higo, S. Samukawa, A. Fukuyama, T. Ikari: Photoluminescence study on GaAs quantum nanodisk array fabricated by bio-nano-template and neutral beam etching, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 98-99.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15039
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

末梢神経刺激用磁気刺激コイルの開発
Development of magnetic coil to stimulate a peripheral nerve

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

1. 研究目的

本研究の目的は，末梢神経磁気刺激用コイルの課題の一つである発熱の問題に着目し，小型で発熱が少なく，長時間使用可能なコイルを開発することである．

2. 研究成果の内容

磁気パルス発生コイルの近傍に発電用コイルを設置して，磁気パルス発生コイルのエネルギーの一部を発電用コイルにて電力に変換し，これを空冷ファン用の電力とすることで，ファン用の電源ケーブルを用いずに冷却ファンを駆動し冷却できる空冷式磁気パルス発生コイルの製作を可能とした．図 1 に開発した冷却機構の原理図を示す．刺激コイルから発生する磁束は，発電コイルを貫通し，誘導電圧が発電コイルの端子間に発生する．誘導電圧は，発電コイルに接続された整流器によって整流される．さらに，整流された誘導電圧はコンデサによって平滑される．

発電用コイル(58mm径 x 8 回巻)と磁気パルス発生コイルの距離を変化させた場合の，距離と整流後の出力電圧の関係を図 2 に示す。磁気パルス発生コイルからの距離を長くすると出力電圧は小さくなり，距離を変えることで出力電圧を制御できる．

コンデンサに並列抵抗を入れた場合の、発電用コイルの整流出力電圧(最大・最小値)と、コンデンサに並列接続する負荷抵抗の値との関係を図 3 に示す．コンデンサ容量を 13600μF として，並列抵抗の値を 33，50，100，200Ωとした場合，並列抵抗が 100Ωのときにコンデンサの最大・最小電圧は 15V と 10V となった，この条件で 100Ωの抵抗を外して定格電圧，電流が 12V と 0.14A のファンモーターを接続すると，長時間にわたる回転が可能であった．

図 4 は磁気パルス発生コイルの温度変化測定による冷却効果の評価である.図 4 の結果は，磁気パルス発生コイルと発電用コイルの距離が近すぎると発電用コイルによる磁気刺激コイルのエネルギー消費量が過剰になることを示す。したがって、刺激条件に応じて、磁気パルス発生コイルと発電用コイルとの距離を適切に設定する必要があることを示す。

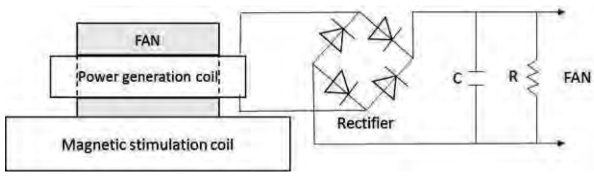


図 1：冷却ファン駆動原理図

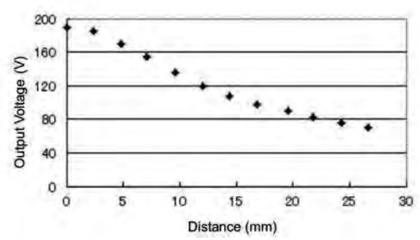


図 2：コイル間距離と誘起電圧の関係

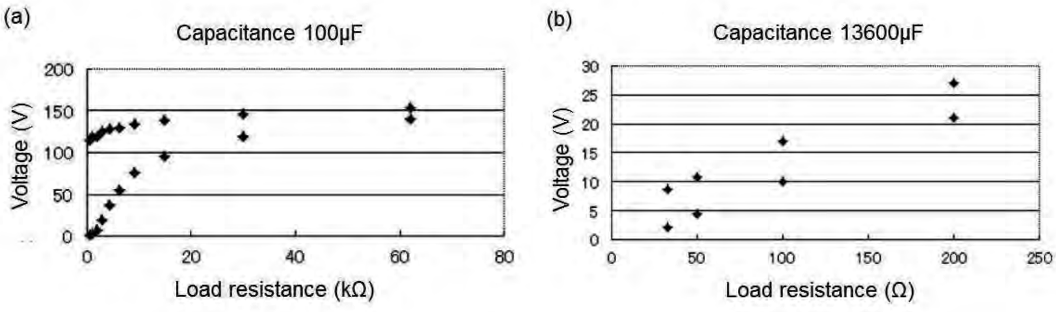


図 3 : コイル間距離と誘起電圧の関係

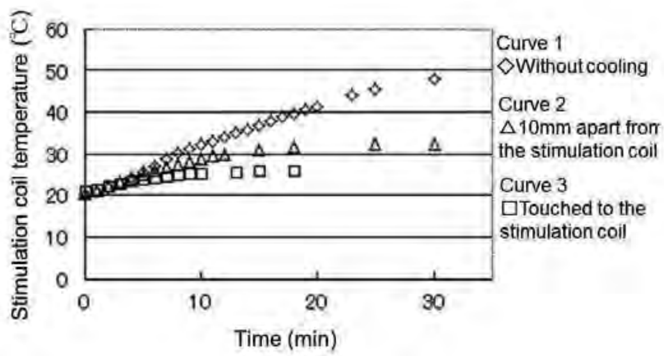


図 4 : コイル間距離と誘起電圧の関係

3.　研究目標の達成状況

磁気パルス発生コイルの磁界による起電力を使用することで，ファン用の電源と電源ケーブルを使用せずに，冷却ファンによる強制冷却が可能となった．この冷却方法は、磁気刺激時に磁気パルス発生コイルの温度上昇を抑制することができる．また，磁気パルス発生コイルのケーブルの高い可とう性を維持できる．

4.　まとめと今後の課題

本研究で開発した空冷式磁気パルス発生コイルを用いれば従来コイルと比較して長時間にわたり磁気パルスを発することが可能であり，より効率的にパルス磁気刺激法を用いた診断，治療を実施することが可能になる．

5.　研究成果（*は別刷あり）

1）　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2）　国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Shinya Kamo, Hitoshi Mori, Kenji Yashima, Toshiyuki Takagi, Shinichi Izumi, Ryoichi Nagatomi, Hiroyuki Kosukegawa, Toshihiko Abe: Development of magnetic coil to stimulate a peripheral nerve, *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai (2015), pp.68-69

課題番号	J15040
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	新規

溶射用外部磁界印加型プラズマジェット内の飛行粒子の数値解析

Numerical Analysis of In-flight Sprayed Particles in Plasma Jet for a Thermal Plasma Spray with an Externally Applied Magnetic Field

藤野 貴康*†，高奈 秀匡**††
齋藤　宏輝*，中根 悠介*
*筑波大学，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

外部磁界印加型大気圧プラズマ溶射装置で生成されるプラズマジェットと溶射飛行粒子の非定常３次元解析を実施し，溶射装置内部のプラズマ流体挙動と電圧変動の関係および各種運転条件下での飛行粒子の動力学/熱力学特性を明らかにする.

2. 研究成果の内容

外部磁界印加型大気圧プラズマ溶射装置を対象とした非定常３次元電磁流体シミュレーションを実施した．その結果，磁界を印加することでスパイラル形状の回転アークが発生すること（図 1)，また，その回転に伴いアノード上の電流集中点が時間的に移動することが示された．さらに，磁界の印加によりアーク電圧（投入電力）が上昇し，装置から流出するジェットのエンタルピーが上昇することがわかった.

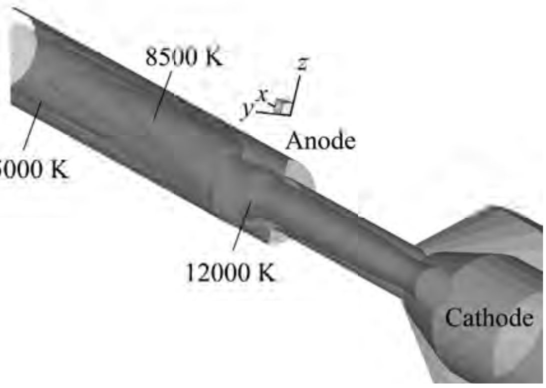


図 1：外部磁界印加型（B = 0.8 T）大気圧溶射装置内における温度分布）

次に同溶射装置で生成したプラズマジェット中に溶射粒子をジェット外縁部から半径方向に投入することを想定し，飛翔粒子の動力学/熱力学特性を解析した．その結果，磁界の印加は溶射粒子の飛行速度の上昇と溶融率の向上に極めて効果的であることが示された．これらの磁界印加の効果は，先に述べたジェットの高エンタルピー化によってもたらされるものである．また，磁界印加時には，噴出ジェットの回転速度成分（ジェット対向方向から観て反時計回り成分）の影響を受け，図２に示すように，溶射粒子の飛行軌道はジェット対向方向からみて左側に曲げられること，そして，その軌道の変化は溶射装置内のアーク位置に対応して時間的に変動することが明らかとなった．この非対称性と運転条件の関係を事前に把握した上で，適切に溶射装置または基板の位置を時間的に移動させることで，磁場印加型プラズマ溶射装置でも基板にほぼ一様な被膜を形成できると考えられる.

3. 研究目標の達成状況

３次元電磁流体解析から外部磁界印加型大気圧プラズマ溶射装置内において発生するスパイラル形状の回転アークをシミュレーションすることに成功し，さらには，同装置環境下での溶射粒子の動力学/熱力学的特性に関する知見を得ることができたことから，当初設定した目標のうちの一つは概ね達成できたと言える．今後は、実験時に観測されている磁場印加による電圧変動の抑制効果について適切な物理モデルを構築し，その抑制効果のメカニズムを明らかにするための解析に取り組む。

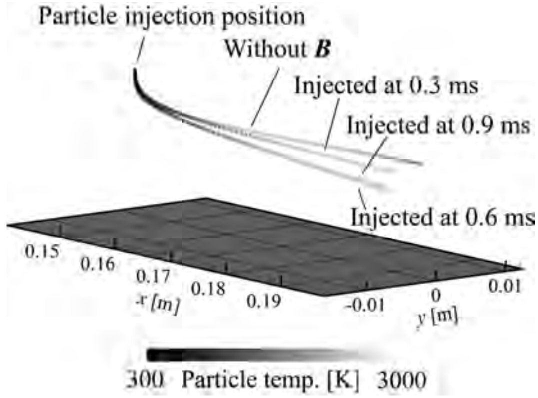


図２：溶射粒子の飛行軌道に沿った温度履歴

4. まとめと今後の課題

本研究では外部磁界印加型大気圧プラズマ溶射装置内の電磁流体挙動及びジェット中の溶射粒子の動力学/熱力学特性を解析するための３次元数値解析プログラムを開発し，そのプログラムを用いた解析から，同溶射装置で生成されるアーク構造やジェットの熱流体特性，また，同装置から噴射されるジェット内に投入された溶射粒子の飛行・熱特性に関する知見を得ることができた．今後の課題は、外部磁界印加型大気圧プラズマ溶射装置を用いた実験で観測されている磁場印加による電圧変動の抑制効果の物理的メカニズムを明らかにすることである．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] H. Saito, Y. Nakane, T. Fujino, H. Takana, and J. Mostaghimi: Three-dimensional Simulation of a Non-transferred DC Plasma Torch with a Mixture Gas of Carbon Dioxide and Methane, *International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015*, Toyohashi, (2015), p. 269.

[2] H. Saito, Y. Nakane, T. Fujino, and H. Takana: Numerical Analysis of In-flight Particles in Plasma Jet for a Thermal Plasma Spray with an Externally Applied Magnetic Field, *12th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2015), pp. 50-51.

[3] 中根悠介，齋藤宏輝，藤野貴康，高奈秀匡：CO_2とCH_4の混合ガスにおける熱プラズマの熱力学的特性および輸送特性，電気学会全国大会，仙台，(2016)，1-062.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

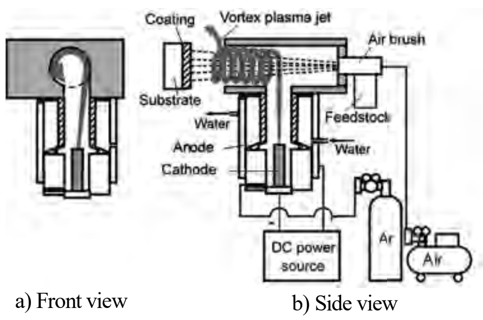
課題番号	J15041
区分	一般共同研究
課題分野	②エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	１年目

旋回流プラズマジェット微粒子形成プロセス用高熱効率プラズマトーチの開発
Development of high thermal efficiency plasma torch for fine particle synthesis using vortex plasma jet

安藤 康高*†，Dickson Kindole*††，野田 佳雅*††，
上原 聡司**††，中嶋 智樹**††，西山 秀哉**††，
Oleg P. Solonenko***††
*足利工業大学工学部，**東北大学流体科学研究所
*** Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch RAS
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的
前研究（課題番号 J14H005）では，旋回流 Ar プラズマジェットを用いた大気液相前駆体プラズマ溶射（ASPPS）装置による酸化チタン皮膜形成を行い，光触媒特性を有するアナターゼ，ルチル混合酸化チタン微粒子の形成に成功した．しかし，Ar プラズマジェットは発熱量が低いため，一部の前駆体が気化されず液滴のまま基材に輸送され，微粒子の品質を著しく低下させるという問題があった．そこで本研究では，N_2 の Ar 作動ガスへの添加によりプラズマジェット発熱量を増加させ，その前駆体気化率向上効果を確認した.

2. 研究成果の内容
図１に，本研究で使用した ASPPS 装置の模式図を示す．本装置は，旋回流発生ノズルを取り付けたプラズマトーチ，直流電源，エアブラシ（前駆体供給系）及び作動ガス供給系より構成されている. 実験条件は表１に示すとおりであり，作動ガスである Ar, N_2 それぞれの流量を 2 l/min., 0.5 l/min.に設定した．出発原料となる前駆体には，エタノール（C_2H_5OH）により 20 倍希釈したチタニウムテトライソプブトキシド（TTIB: $Ti(OC_4H_9)_4$）を使用した．なお本研究では，本装置の皮膜形成能力を確認するため，ステンレス基材上に酸化チタン微粒子を堆積させ皮膜を形成した．皮膜形成後は，X 線回折による皮膜結晶構造解析，メチレンブルー脱色試験による光触媒特性評価を行った．その結果，N_2 流量 2 l/min., Ar 流量 0.5 l/min.，放電電流 100A の条件で，前駆体を完全に気化する（目視観察で液滴の下流への輸送が無い状態にする）に十分な発熱量を有す



a) Front view　　b) Side view
図１：ASPPS 装置の模式図

表１：皮膜形成条件

Working gas (Flow rate)	Ar (0.5 l/min.)/ N_2 (2 l/min.)
Carrier gas	Air
Discharge power	25V, 100 A
Deposition distance	20 mm
Feedstock	C_2H_5OH diluted TTIB* solution
Feedstock quantity	20 ml
Feedstock feed rate	0.1 ml/sec.
Substrate (Size)	304 stainless steel (15*15*1 mm)

る旋回流プラズマジェットが得られた（図２）．また，前研究同様、本条件においてもプラズマジェットは旋回流発生ノズル内壁に沿って下流へと移動したが，旋回流発生ノズルに損耗などの熱的ダメージを与えることなく 4min.（放電の安定化に要する時間 30sec., 原料投入（皮膜形成）時間 200sec., 停止までに要する時間 10sec.）の連続運転が可能であることがわかった．形成された皮膜も，昨年の実験と同様アナターゼ，ルチル混合酸化チタン皮膜が形成され（図３），メチレンブルー脱色試験により光触媒特性を有することが確認された.

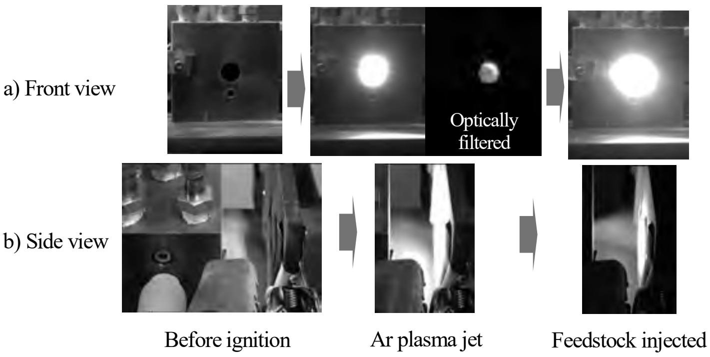


図２：旋回流ノズル外観写真

図３：試料外観写真（皮膜形成後）

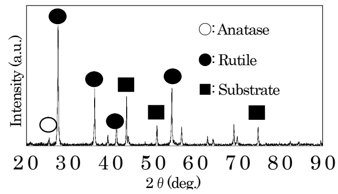


図４：皮膜の XRD パターン

3. 研究目標の達成状況

本研究では，a) プラズマジェットの発熱量が前駆体気化率に及ぼす効果の確認，b) 薄膜形成条件の確立，c) 旋回流形成ノズル付陽極ノズルの熱損失評価を目標に掲げている．a), b)については，N_2 の作動ガスへの添加により発熱量の高いプラズマジェットを形成しその効果を確認するとともに，皮膜形成にも成功した．一方，c)については，成膜時間内では水温上昇が認められず，N_2 添加によりプラズマジェット発熱量を上昇させた条件でも熱損失はわずかであることは定性的に確認したが，定量的な評価を行うには至っていない．以上より，達成度は 75%と考えている．

4. まとめと今後の課題

昨年度開発した旋回流形成ノズル付陽極ノズルを用いた，プラズマジェット発熱量の前駆体気化率に及ぼす効果の調査及び薄膜形成条件の最適化を行い，N_2 ガス添加による発熱量上昇により前駆体気化率の向上，皮膜形成距離 20mm でのルチル，アナターゼ混合皮膜の形成を確認した．今後は，定量的な熱損失の評価，実験条件の皮膜強度に及ぼす影響の調査を中心に行う．

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] D. Kindole, Y. Noda, Y. Ando, S. Uehara, T. Nakajima, H. Nishiyama, O. P. Solonenko: Rapid Deposition of Photo-catalytic Titanium Oxide Film by Atmospheric SPPS using Ar Vortex Plasma Jet, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 52-53.

[2] Oleg P. Solonenko, Y. Ando, H. Nishiyama, A. A. Golovin, S. Uehara: Revisited High-Energy Treatment of Thermal Plasma CVD Titania Coatings, Proceedings of the Twelfth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, (2015), pp. 182-183.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし．

課題番号	J15042
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	新規（発展型）

ナノ粒子ＥＲ流体の高機能化とマイクロチャンネル内での流動評価
Improvement and Micro-Channel Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions

田中 克史*†，中野 政身**††，ロブソン 星夜***
*京都工芸繊維大学材料化学系，**東北大学流体科学研究所
***京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

エレクトロレオロジー(ER)効果は，ある流体に外部電場を印加・除去することによって生ずる見かけの粘度の増加・回復応答現象である．ER 効果が見られる流体は ER 流体と称されており，機能性流体としての応用が期待されている．本研究では，粒径がナノメーターオーダーの酸化チタンナノ粒子を用いた分散系を中心として ER 流体を種々の条件で調製し，流体の微細構造及びマイクロチャンネル内における ER 効果の評価を行うとともに，流体の安定性の評価を行うことを目的とする．

2. 研究成果の内容

粒子径 250 nm 程度の酸化チタンナノ粒子，シリコーンオイル，変性シリコーンオイル，または，これらの混合系を用いて，粒子体積分率$\phi = 25$ vol%の流体試料を調製した．これらの試料について，50 μm の微細間隙において流動特性を評価した．無電場における応力のせん断速度依存性では，全せん断速度範囲において，変性シリコーンオイル系流体は，シリコーンオイル系流体より，1 桁程度低い応力値を示す結果が得られ，混合系流体については，両者の応力値の間の値として得られた．一方，電場応答測定の結果，電場強度 2 kV/mm 以上で比較すると，同程度の誘起せん断応力（電場下と無電場の応力値の差）が得られた．

また，粒子径 400 nm 程度の酸化チタンナノ粒子と，上記変性シリコーンオイルを用いた流体($\phi = 20$ vol%)について，調製後長時間経過後の安定性を評価した．図 1 に，正弦波電場下で測定した応力のせん断速度依存性を示す．電場周波数は 1 kHz とし，せん断速度の増加(UP)・減少(DOWN)に対応した流動特性を 2 周期測定した. 電場振幅 16 kV/mm では，first run (UP)の応力は，first run (DOWN), second run (UP, DOWN)の応力に比べて低い値が得られ，hysteresis が観測された．second run では，せん断速度の増加（または減少）に対応して，応力値の局所的減少・増加（dip）挙動が観測された．一方，電場振幅 12 kV/mm 以下では，dip 挙動，hysteresis は観測されず，比較的安定

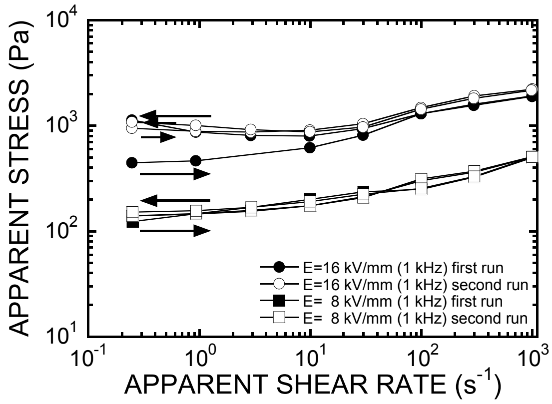


図 1：応力のせん断速度依存性

な流動特性が得られた．図 1 には，電場振幅 8 kV/mm の結果を示している．

3. 研究目標の達成状況

混合系オイルを分散媒とした流体の流動挙動評価から，無電場における応力値低下機構として，粒子界面に吸着する化学変性オイルを想定したモデルを支持する結果が得られた．また，貴研究所における流動解析システムにより，直流電場で顕著に観測された，せん断速度の増加・減少による応力値の hysteresis，dip 挙動のような流動不安定性の一因として，粒子の平行円板治具外への不可逆的な排出に着目することができ，正弦波電場の印加により，同一バッチ試料においても，比較的安定した流動が得られた.

4. まとめと今後の課題

貴研究所における流動解析システムにより，さらに詳細な現象の解明が進むと期待される．また，無電場下における応力値の一層の低下，流動の安定化が望まれる．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] K. Tanaka, S. Robson, H. Kobayashi, M. Takasaki, M. Nakano, and A. Totsuka: Simultaneous observations of microgap flow behavior and microstructure of electro-rheological nano-suspensions based on titanium dioxide nano-particles, Colloid Polym. Sci, Vol. 293, No. 9 (2015), pp. 2531–2541.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] K. Tanaka, S. Robson, H. Kobayashi, Mi. Takasaki, Masami Nakano, A. Totsuka: Development and Micro-Channel Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proc. of the 15th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), pp. 136-137.

*[3] K. Tanaka, H. Kobayashi, M. Takasaki, and M. Nakano: Simultaneous Observations of Micro-Gap Flow Behavior and Micro-Structure of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proc. of the 12th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2015), pp. 524-525.

[4] ロブソン星夜, 田中克史, 小林治樹, 中野政身, 戸塚厚: 二酸化チタンナノ粒子分散系エレクトロレオロジー流体の電場応答と粒子挙動, 日本レオロジー学会第 42 年会講演予稿集, 京都, (2015), pp. 49-50.

[5] ロブソン星夜, 田中克史, 髙﨑緑, 小林治樹, 中野政身, 戸塚厚: ナノ粒子分散系エレクトロレオロジー流体における粒子挙動と流動特性の同時観測, 第 64 回高分子討論会予稿集, 仙台, (201５), 2 pages.

[6] ロブソン星夜, 田中克史, 髙﨑緑, 小林治樹, 中野政身, 戸塚厚: ナノ粒子分散系エレクトロレオロジー流体における粒子挙動と流動特性の同時観測, 第 63 回レオロジー討論会講演要旨集, 神戸, (2015), pp. 94-95.

[7] ロブソン星夜, 田中克史, 髙﨑緑, 小林治樹, 中野政身, 戸塚厚: 酸化チタンナノ粒子分散系における ER 効果と流動挙動の同時観測, 繊維学会予稿集, 京都, (2015), pp. 163-163.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（受賞）若手優秀ポスター賞，酸化チタンナノ粒子分散系における ER 効果と流動挙動の同時観測，ロブソン星夜, 2015.10.22. 繊維学会.

課題番号	J15043
区分	一般共同研究
課題分野	⑤基盤研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

乱流中の渦の複雑な時空間構造の解析
Analysis of complex spatiotemporal structures of vortices in turbulence

石原 卓*†，服部 裕司**††
*名古屋大学大学院工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的
近年の計算機の発達により，従来不可能であった数値計算，データ解析，可視化が可能になってきている．本研究では京コンピュータなどのスーパーコンピュータを用いた乱流の大規模直接数値シミュレーション（DNS）によって得られる大規模時系列データを可視化・解析する手法を開発し，高レイノルズ数乱流の物理的な理解を深めることを目的としている．

2. 研究成果の内容
2.1 新しい解析手法の開発
（1）周期境界における乱流の大規模 DNS によって得られた渦度場の時系列データ（2048^3×2000 snapshot）を組織的に開発するコードを開発し，テイラー長に基づくレイノルズ数 R_{λ}=263 の乱流場における高エンストロフィー領域の時間変化を解析可能にした．
（2）世界最大規模の乱流 DNS によって得られるエンストロフィーをテイラー長程度のフィルターを用いて粗視化することにより，高レイノルズ数乱流中の渦の組織構造を抽出し，それを用いて種々の条件付き統計量の解析を可能にした．

2.2 新しい現象の解明
（1）R_{λ}=263 の乱流場において，高エンストロフィー領域のサイズ分布がある統計的定常状態にあり，領域サイズにより平衡を保つ機構が異なること（8150h^3 以上：移流，融合による増加~分裂による減少，8150h^3 以下:移流，融合による減少~分裂による増加）が分かった．
（2）高レイノルズ数乱流において特徴的な渦クラスタ（強いミクロな管状渦が密集した渦組織構造）は内部の構造が変化しつつ持続する構造であることが分かった．また，抽出した渦クラスタを用いて，慣性粒子の追跡シミュレーションを行ったところ，渦クラスタ内部では慣性の大きい粒子の相対拡散が促進されることが分かった．

3. 研究目標の達成状況
乱流の大規模 DNS で得られる時系列大規模データを解析する手法の開発が進んだ．また，開発した手法を用いたデータ解析により，乱流の動力学の理解が進んでいる．

4. まとめと今後の課題

R_λ=263 の乱流場の時系列データの解析により，乱流中の渦構造の動力学の理解が進んだ．さらなる大規模データの組織的な解析により，高レイノルズ数乱流中の渦組織構造の動力学の理解を進めることが今後の課題である．大規模なデータの保存・管理が問題となっている．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] T. Ishihara, Y. Hattori, Analysis of Complex Spatiotemporal Structures of Vortices in High Reynolds Number Turbulence, Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015) 2015/10/28

[2] Kei Enohata, Koji Morishita, Takashi Ishihara, Relative diffusion of a pair of inertial particles in the inertial sub-range of turbulence　American Physical Society 68th Annual DFD Meeting (APS-DFD2015)　2015/11/23

[3] 服部裕司，石原卓，一様等方性乱流中の高渦度領域の動的形状解析 II，日本物理学会 2015 年秋季大会　関西大学 2015/9/18

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15044
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	継続 2 年目

中性粒子ビームプロセスによる高性能高移動度 MOS トランジスタに関する研究
Study on the high-performance and high-mobility MOS transistor by the neutral beam process

遠藤 和彦*†，水林 亘*，寒川 誠二**††
*産業技術総合研究所，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

これまで Si CMOS トランジスタは微細化により高性能化が実現されてきた．現在，トランジスタの最小加工寸法は 20nm 以細とナノ領域に達し，従来の微細化だけでは所望の性能が得られないため，シリコン（Si）より移動度が高い Ge，III-V 材料などへの置き換えが検討されている．ゲルマニウム（Ge）は電子とホール移動度の両者が Si に比べ高いので，一つの材料で CMOS 化できる有望なチャネル材料と考えられている．また，Si トランジスタと同様にゲートの制電支配力を確保するため，Ge トランジスタでもチャネルを立体化する必要がある．立体チャネルを形成する上で通常のドライエッチング法で行った場合，エッチングダメージによる性能低下が懸念される．Ge の場合，Si に比べ耐熱性が低いため，熱処理によるダメージ回復プロセスが行えない課題がある．本研究では，東北大学　寒川研究室で研究開発された中性粒子ビームによる無損傷加工技術と，産総研で開発している次世代トランジスタ技術を融合し，新材料トランジスタのプロセス研究・開発を行うことを目的とする．

2. 研究成果の内容

図 1 に通常の Reactive Ion Etching(RIE)方法で加工した Fin チャンネルの断面 TEM 像を示す．通常の RIE の Cl_2 ガスで Ge Fin チャネルを形成できる．また，Ge Fin 下の Al_2O_3/SiO_2 BOX は，ほとんどエッチングされていない．Ge の場合，Si トランジスタプロセスで用いられる 1000℃以上の高温での熱処理によるダメージ回復が出来ないため，今回の通常の RIE を用いたエッチングでは，エッチングダメージが Fin チャネルに残ることが懸念される．Fin チャネルへのエッチングダメージは，性能，信頼性の低下を引き起こすので，ダメージフリーで加工できる方法が必要となる．

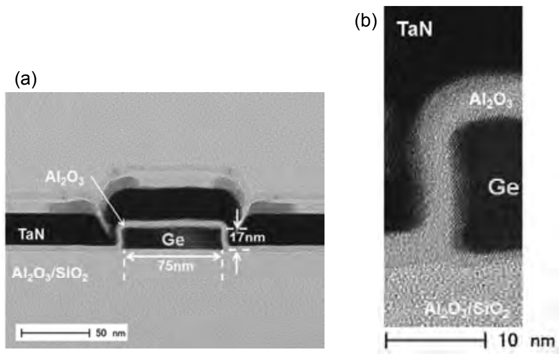


図 1 (a) 通常の RIE で加工した Fin チャネルの断面 TEM 像．(b)Fin チャネル部分の拡大図．

Ge Fin チャネルをダメージフリーで加工するため，中性粒子ビームでのエッチングを試みた．図 2 に中性粒子ビームを用いて加工したマルチ Ge Fin チャネルの断面 TEM 像を示す．バイアスパワー有り無しで行った．Ge 上部のハードマスク SiO_2 は，通常のエッチング方法でエッチングを行い，Ge のみを中性子ビームでエッチングした．いずれの場合もマルチチャネル Fin が形成される．形状も高いアスペクト比を実現している．特に，バイアスパワーが高いと垂直性が改善し

ている．また，いずれの場合も埋め込み酸化膜はほとんどエッチングされておらず，高い選択比を確保されていることが分かる．このことは，極薄 BOX においても中性粒子ビームエッチングが適用できることを意味する．次に，中性粒子ビームで加工した Ge Fin の加工表面を調べた（図 3）．バイアスを印加したサンプルは，印加していないサンプルに比べ Fin 加工表面に凹凸があり，荒れが見られる．これは，バイアス印加による表面のダメージだと考えられる．一方，バイアスを印加していない場合，Ge Fin 加工面は非常にスムーズである．バイアス印加により加工の垂直性はよくなるが，Fin 加工面の荒れの問題となる．バイアスを印加しない場合，加工面はスムーズなので，今後より条件を最適化することにより，Ge CMOS FinFETs 作製プロセスの Fin 加工においてダメージフリーで加工できる中性子粒子ビームエッチングとして有望であることが分かった．

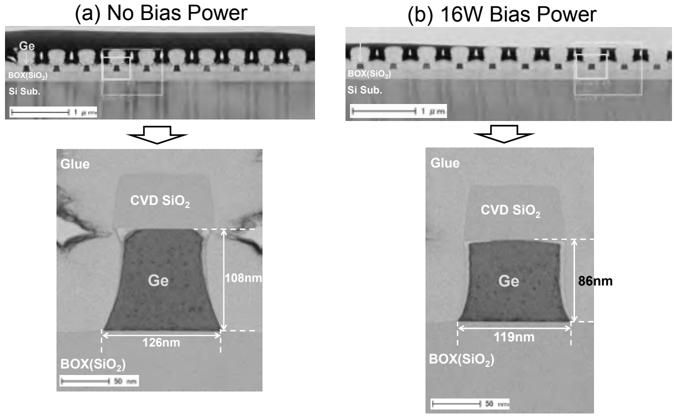


図 2　(a) 中性粒子ビームを用いて加工したマルチ Ge Fin チャネルの断面 TEM 像．（a）バイアスパワーなし，(b) バイアスパワー16W．

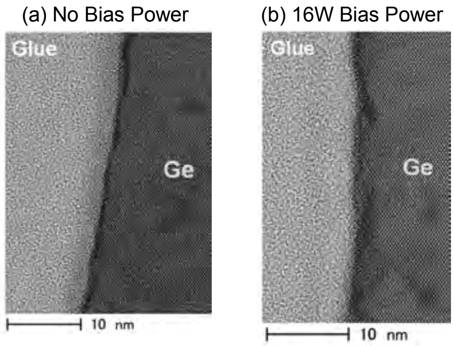


図 3　（a）バイアスパワーなし，(b)バイアスパワー16W．中性粒子ビームを用いて加工した Fin チャネルの加工面の断面 TEM 像．

3.　研究目標の達成状況

成果として，中性粒子ビーム加工を用い，ゲルマニウム/シリコン酸化膜/シリコン基板上に 100nm 幅のゲルマニウムチャネルの形成に成功した．その効果を確認するためにゲルマニウムトランジスタプロセスを確立した．概ね掲げた目標を達成することが出来た．

4.　まとめと今後の課題

本共同研究は，高品質なゲルマニウムトランジスタの実現に向け，現在，立体型チャネルで課題となる加工技術に関して，中性粒子ビーム加工を用いた立体型ゲルマニウムトランジスタの研究・開発を進めてきた．

中性粒子ビーム加工で立体型 Ge チャネルトランジスタを試作し，その性能検証することが今後の課題である．

5.　研究成果

1)　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）　なし

2)　国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1]　W. Mizubayashi, K. Endo, H. Ota, T. Kubota, S. Noda, S. Samukawa：Formation of Damage-Free Fin Channel by Neutral-Beam Etching for Ge FinFETs, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), pp. 120-121.

3)　その他（特許，受賞，マスコミ発表等）　なし

課題番号	J15045
区分	一般共同研究
課題分野	基礎研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

ホールトーン現象のアクティブ制御に関する研究
Researches on the active control of the hole tone phenomena

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

1. 研究目的

円形のノズルあるいは穴から流出した噴流がノズルと同じ直径の穴が開いている下流に置かれた板を通過する際に発生する自励発振音はホールトーンと呼ばれる．普段，我々は固体燃料ロケットモータ，自動車取入口，排気システム，換気装置，ガス供給システムや，笛吹きやかんなど，多くの実用的な場面においてこの音に遭遇する．近年，ホールトーンのパッシブ制御に関しては詳細が徐々に報告されつつあるが，アクティブ制御に関しては，例えば効果的な制御法や消音の確実性など，依然として漠然とした状況にある．そこで本研究は，計算による直接音解析を実験と併せて行い，ホールトーンのアクティブ制御を主体とした効果的な低減化制御法を開発することが目的である．

2. 研究成果の内容

長さ330㎜の尾管を付けたホールトーンシステムを構築した．ノズル直径，下流板の穴直径，尾管直径は共に51 ㎜であり，ノズル出口と下流板間の衝突距離は50 ㎜である．実験では噴流速度を20 m/s以下の範囲で行った．噴流速度が11 m/s未満の時，尾管がないオリジナルのホールトーンと同様に流速の変化に対して発振周波数が線形的に変化した．噴流速度が11 m/s以上では，15 m/sまで発振周波数が一定となるロックイン現象が見られた．レーザー・スモーク法により噴流せん断層の可視化を行った．その結果，ロックイン現象が起きている際の渦の合体の様子などが分かった．噴流速度が12 m/sの場合を対象として，直接音解析を行った．実験とピーク周波数が定量的に一致する数値計算を実現できた．

3. 研究目標の達成状況

尾管を付けたホールトーンシステムの実験計測を行い，ホールトーンに対する尾管の影響を明らかにすることが出来た．またロックインが生じている噴流速度条件において，尾付きホールトーンシステムの発振周波数を正確に計算可能となった．またプラズマアクチュエータ励起システムを開発することができた．研究目的に対するこれまでの全体達成度は40%である．

4. まとめと今後の課題

尾管を付けたホールトーンシステムの実験計測および直接音解析を行い，ホールトーンに対する尾管の影響を明らかにすると同時にその高精度予測が可能になった．今後，噴流出口部で噴流をプラズマアクチュエータで励起する制御システムの効果について詳細検討してゆくことが課題である．

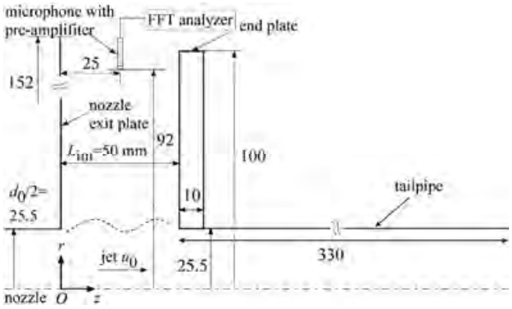


Fig. 1 Hole tone system with a tailpipe

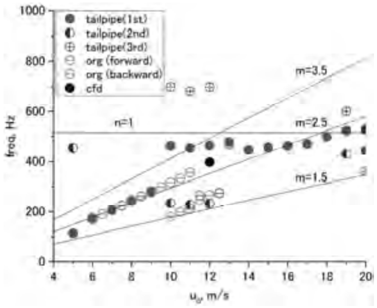
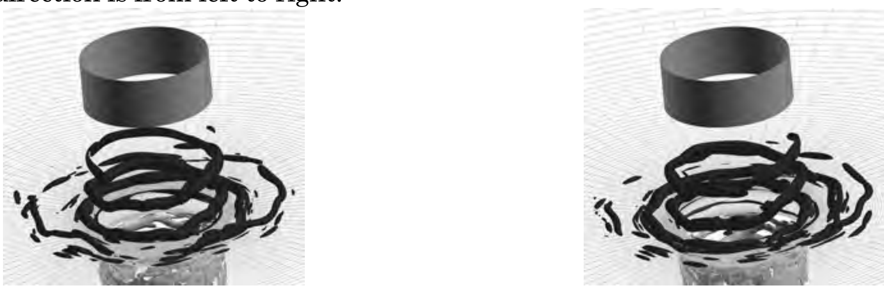


Fig. 2 Variation of the most dominant peak tone frequency with jet speed u_0

(a) t=0 (b) t=0.16L_{im}/u_0 (c) t=0.32L_{im}/u_0

Fig. 3 Experimental visualization of jet between the nozzle exit and the end plate for u_0=12 m/s, flow direction is from left to right.



(a) t=0 (b) t=0.252L_{im}/u_0

Fig. 4 Visualization of vortex structures by the iso-surfaces of the second invariant of the velocity gradient tensor Q+=14.5, and iso-surfaces of w=0 showing backflow regions, u_0=12 m/s. L_{im}: impingement length

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

*[1] K. Matsuura and M. Nakano: Direct Computation of a Hole Tone Feedback System with a Tail Pipe, *Proceedings of International Gas Turbine Congress 2015 Tokyo,* Tokyo, Paper MoAME.1, pp. 61-64(2015).

[2] 松浦一雄, 中野政身：空力自励音の圧縮性直接計算, 油空圧技術, 第54巻4号, pp. 40-44 (2015).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[3] K. Matsuura and M. Nakano: Experimental and Direct Computation Study on Flow-Acoustic Interaction of a Hole Tone with a Tail Pipe, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, pp. 506-507 (2015).

[4] K. Matsuura and M. Nakano: Researches on the Active Control of Hole Tone Phenomena, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 174-175.

[5] 松浦一雄，中野政身：尾管付きホールトーン系における流れと音の相互作用に関する研究，JSME 流体工学部門第 35 回流力騒音シンポジウム講演予稿集，仙台，p.7-7 (2015).

課題番号	J15046
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	新規

飛翔体の空力性能改善に関する研究

Study on Improvement of Aerodynamic Performance for an Airborne Projectile

長谷川 裕晃*†，大林 茂**††
中川 健一*，イトゲル ウグームル*，手倉森 重一*
*秋田大学大学院工学資源学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

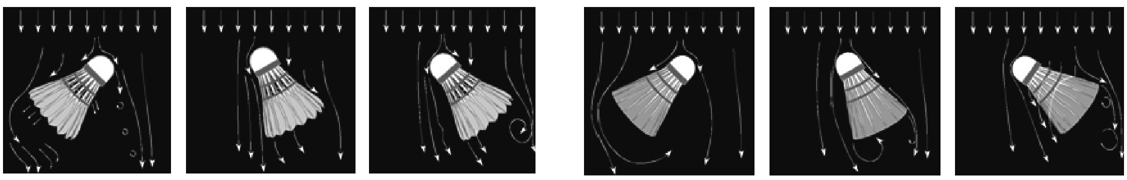
1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本研究ではバドミントンシャトルコックの空力安定性とスポーツスーツの生地通気量の違いが空力特性に及ぼす影響を調べる為に流体力測定と可視化実験，熱線風速計を用いた速度分布測定を行った.

飛翔体の空力安定性について，シャトルコックは打球した際，その姿勢のまま飛翔するのではなく向きを変えながら飛んでいく．このシャトルコックのインパクト直後の急激迎角変化中の飛翔メカニズムに着目し解明を行う．飛翔安定性解明のアプローチとして，シャトルの隙間部，羽根部に軽量で通気性の無い和紙で加工を行い 4 つのシャトルを用意し，スモークワイヤー法による流れ場の可視化を行った．可視化結果のオーバーシュート時に着目すると, Conic w/o gaps 型のモデルの方においてシャトルスカート後方に反時計回りの渦が存在している．またこの渦によってオーバーシュート角が大きくなった．次に，オーバーシュート後の段階について着目した．Standard 型においてスカートの片側のみから渦が生成，放出されており，結果としてこの渦がシャトル周りの反時計回りの循環を強め，α=0 °に戻る力を大きくしていることが分かった.



(1)45deg (2) -30deg (3) -44deg
(a) Standard shuttle

(1)45deg (2) -30deg (3)-44deg
(b) Conic w/o gaps

Fig.1 Schematic representation of flow field

一方，スキージャンプスーツの異なる生地通気量での流れ場特性を評価する為に，楕円柱に生地を巻きつけ，熱線風速計を用いた速度分布測定を行った．以前の結果から通気量が増加することで失速角が後退することが分かっているため，速度分布から原因の考察を行った. 結果として通気量の大きな case2 の生地において，楕円柱後縁表面付近で流れの増速が確認

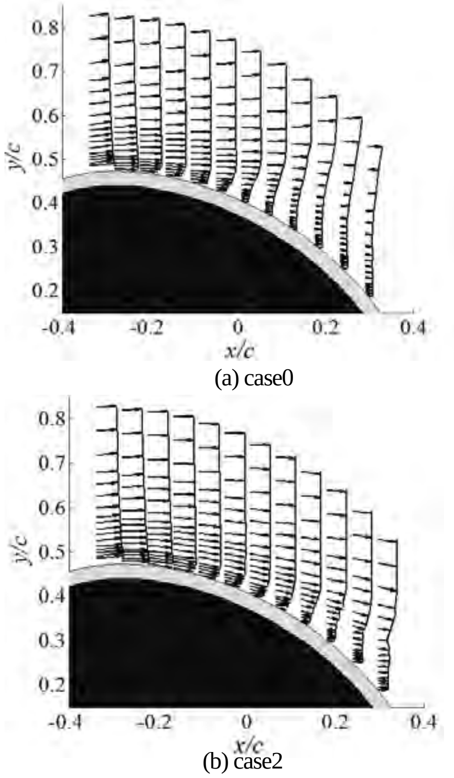
できた. このことから, 通気量が増加することで, 生地内部を通った流れが後縁付近に流れ出て，失速角の後退が生じていると考えられる.

3. 研究目標の達成状況

バドミントンシャトルコックの縦回転挙動においてはシャトルスカート端から生じる渦の挙動を捉え，安定性メカニズムの解明を行った．スキージャンプスーツの生地を巻きつけた楕円翼の失速角の後退について，速度分布測定から原因の考察を行った．次項に示す課題を残しつつも当初の目標は概ね達成できた.

4. まとめと今後の課題

空力安定性について，シャトルの縦回転挙動においてシャトルスカート端から放出される渦の挙動が回転中の挙動を支配していることがわかった．しかし，シャトル内部の流れが後流に与える影響は不明である．今後内部流れの挙動について調べる必要がある．次に高揚力，低抗力化について，翼表面に空気通気量がある生地を付与することにより，抗力減少と失速角後退が生じることがわかった．通気量が増加することで楕円柱後縁表面に増速が発生し，このことが原因で失速角後退が起きたと考えられる. しかし, 通気量が増えすぎると失速が早まる結果が出ており, 今後はこの現象についてより詳細に調べ，通気量と空力特性の関係を解明する.



(a) case0

(b) case2

Fig.2 The velocity profile of the elliptic

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] Uguumur Itgel, Hiroaki Hasegawa, Shigeru Obayashi, Lift Enhancement of NACA 0012 Airfoil by Active Stall Control Using a Spanwise Array of Synthetic Jet Actuators, The 13th Asian International Conference on Fluid Machinery, (2015)

[2] Shigekazu Tekuramori, Hiroaki Hasegawa, Shigeru Obayashi, Study on Improvement of Aerodynamic Performance for an Airborne Projectile -The Results of Wind Tunnel Test on Air Permeability of Ski Jumpsuit Fabric-，International Conference on Flow Dynamics(2015)

[3] Shigekazu Tekuramori, Hiroaki Hasegawa, Shigeru Obayashi, Study on Fluid Dynamic Performance of Different Air Permeability Fabrics Shigekazu Tekuramori, Hiroaki Hasegawa, Masahide Murakami, Shigeru Obayashi ,The First Pacific Rim Thermal Engineering Conference, (2016)

[4] 手倉森 重一, 長谷川裕晃, 瀬尾 和哉, 村上正秀, 大林茂, 空気通気量の異なるスキージャンプ用生地での空理気性能，航空宇宙学会北部支部講演会 2015

[5] 手倉森 重一, 長谷川裕晃, 瀬尾 和哉, 村上正秀, 大林茂, スキージャンプ用生地の通気量が飛距離に与える影響, シンポジウム：スポーツ・ヒューマン・ダイナミクス 2015

[6] 手倉森 重一, 長谷川裕晃, 瀬尾 和哉, 村上正秀,通気量の異なる生地を巻きつけた楕円柱の流れ場特性, 日本機械学会流体工学部門講演会 2015

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

「ザ・データマン～スポーツの真実は数字にあり～」493km/m　人類最速の闘い　バトミントン金メダルへの挑戦

課題番号	J15047
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

非平衡乱流現象の解明と制御

Investigation of Non-equilibrium Turbulence and Its Application to Flow Control

酒井　康彦*†，早瀬　敏幸**††
長田　孝二*，渡邉　智昭*，岩野　耕治*
*名古屋大学大学院工学研究科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

格子乱流において，乱流格子の近傍領域では乱流の波数間エネルギフラックスと散逸がバランスしない，非平衡乱流となっていることが最近の研究で明らかにされた．このような乱流は格子乱流近傍の流れ場に限らず，乱流噴流や壁面乱流境界層等の空間発展する乱流場でも普遍的に存在することが予想されるが，その存在と詳細なメカニズムは明らかにされていない．そこで本研究では，直接数値シミュレーション（DNS）などの数値解析により，格子乱流場以外でのその存在の有無の検証を含めた非平衡乱流現象を解明することを目的とする．

2. 研究成果の内容

本年度は，単一四角格子乱流場の乱流構造を明らかにすることで非平衡乱流場の詳細を明らかにするとともに，乱流非乱流界面における輸送現象を明らかにした．また，時間発展型非定常自由せん断流の数値シミュレーションコードを構築した．

2.1 単一四角格子乱流場の非平衡領域における乱流構造の解明

フラクタル格子を構成する要素の一つである単一四角格子乱流場に対する直接数値シミュレーション(図１)を行い，非平衡性が現れる領域である格子近傍での乱流構造の解明を行った．本年度は非平衡性と速度勾配テンソルの第二不変量等，各種乱流統計量との関連を明らかにした．またヘリシティに着目した研究を行った結果，この領域では二次元のシート状構造から３次元構造に遷移することが明らかになった．またエンストロフィまたは散逸率が高い場所においては，速度ベクトルと渦度ベクトルが沿うように現れることが明らかになった．

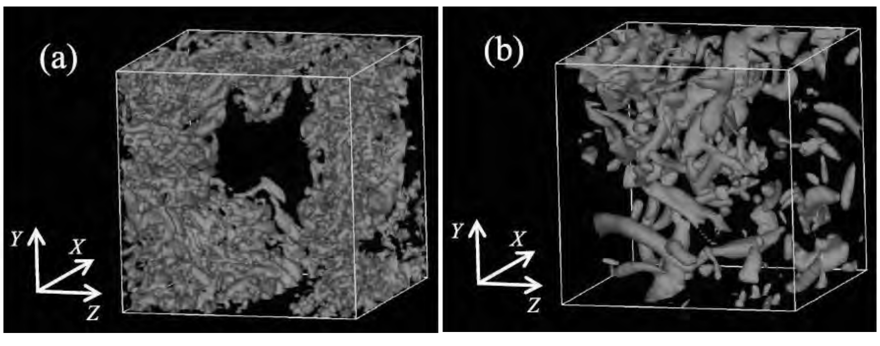


図１：単一四角格子により生成された非平衡乱流中のコヒーレント渦構造. (a) 格子近傍, (b) 下流域. 単一四角格子背後のコヒーレント渦構造(Q 値により可視化)の空間分布が位置によって大きく異なることがわかる.

2.2 時間発展型非定常自由せん断流の乱流・非乱流界面における流動構造の研究

時間発展型非定常自由せん断流の数値計算コードを開発し，時間発展型噴流および混合層の DNS を行った．そして，乱流・非乱流界面における流体粒子の取り込みとそれに伴うスカラ輸送について調べた．その結果，界面の外縁付近の粘性層では流体粒子の取り込みが渦度の粘性拡散に伴って生じ，粘性層の内側に現れる乱流小領域では界面近傍の小スケール渦運動によって流体粒子が取り込まれることが明らかになった．

3. 研究目標の達成状況

格子乱流場に対しては，単一四角格子に対する DNS を実行し，非平衡性とエネルギー散逸や渦度（エンストロフィ）の関係を明らかにした．一方非平衡性について議論されていない他の流れ場については，噴流の数値計算コードを開発したうえで，乱流非乱流界面における運動量やスカラ輸送機構を明らかにした．これらの結果は下記のように成果発表された．

4. まとめと今後の課題

本共同研究から，格子乱流場の非平衡領域での流動構造の詳細が明らかにされつつある．また噴流場に関する研究においては，その非平衡性の有無を明らかにするとともに，そこでの運動量・熱・物質輸送も関連させて解析することで，高効率噴流制御につなげていきたい．

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] Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, Y. Ito, T. Hayase, Enstrophy production and dissipation in developing grid-generated turbulence, Physics of Fluids, Vol. 28(2016), 025113.

[2]Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, Y. Ito, T. Hayase, Spatial evolution of the helical behavior and the 2/3 power-law in single-square-grid-generated turbulence, Fluid Dynamics Research, Vol 48(2016), 021404.

[3]T. Watanabe, C. B. da Silva, Y. Sakai, K. Nagata, T. Hayase, Lagrangian Properties of the Entrainment across Turbulent/Non-Turbulent Interface Layers, Physics of Fluids, Vol.28(2016), 031701.

[4]T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito, T. Hayase, Turbulent Mixing of Passive Scalar near Turbulent and Non-Turbulent Interface in Mixing Layers, Physics of Fluids, Vol.27(2015), 085109.

[5]Y. Zhou, K. Nagata, Y. Sakai, Y. Ito, T. Hayase, On the Evolution of the Invariants of the Velocity Gradient Tensor in the Single-Square-Grid-Generated Turbulence, Physics of Fluids, Vol. 27(2015), 075107.

[6]T. Watanabe, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito, T. Hayase, LES-Lagrangian Particle Method for Turbulent Reactive Flows based on the Approximate Deconvolution Model and Mixing Model, Journal of Computational Physics, Vol. 294 (2015), pp. 127-148.

[7]N. Wu, Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito, T. Hayase, Study on the dynamics and geometry of developing planar jets in view of the invariants of the velocity gradient tensor, Journal of Hydrodynamics, Vol.27(2015), pp. 894-906.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[8] Y. Sakai, K. Nagata, Y. Ito, K. Iwano, T. Hayase, T. Watanabe, Y. Zhou: Investigation of Non-equilibrium Turbulence and Its Application to Flow Control, Proc. of the 15th International Symposium on Advanced Fluid Information, (2015), pp.180-181.

[9]長縄洸佑，酒井康彦，DNS によるデルタタブが噴流場に及ぼす影響の解明，第 47 回日本機械学会東海支部学生員卒業研究発表講演会講演論文集，(2016) (USB).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

特になし．

Project code	J15048
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	1st year

Characteristic simulation of neutral beam etching fabricated nanodisks for new material applications

Yiming Li*†, Seiji Samukawa**††

*Department of Electrical and Computer Engineering, National Chiao Tung University, 1001 Ta-Hsueh Rd., Hsincuh 300, Taiwan
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In this project, we study the electrical, mechanical and photonic properties of NDs-based nanomaterials by solving a set of electronic structure, classical, and quantum mechanical equations.

2. Details of program implement

We perform calculation of electronic structure for system of NDs firstly. We combine classical and quantum mechanical descriptions and the statistical distribution of NDs' arrangement to simulate the electrical, mechanical, and photonic properties of the synthesized material. As shown in Fig. 1, we consider miniband formation conditions with process parameters from experiments. Furthermore, the appropriate operation condition is optimized for the fabrication of specific nanodevices.

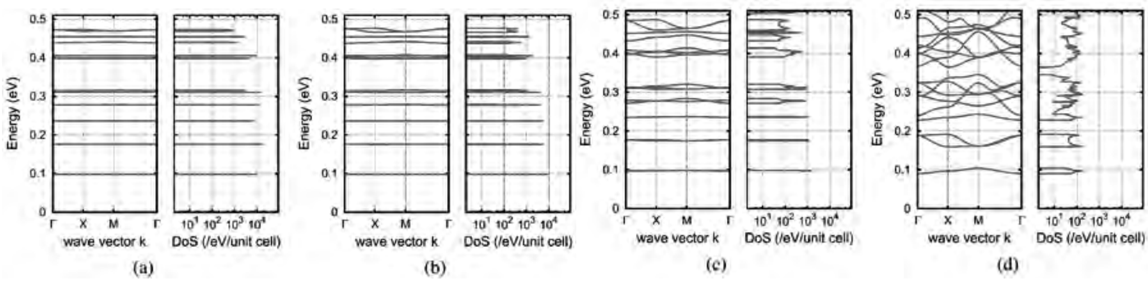


Figure 1 : Band structure along symmetry point Γ-X-M- Γ and the DoS for Ge/Si QDs square superlattice with QD radius 3.2 nm, thickness 4 nm, and varied interdot space. (a) 3.3 nm. (b) 2.3 nm. (c) 1.3 nm. (d) 0.3 nm.

3. Achievements

According to the expected results stated in the application form, we develop physical model for ND-based material simulation. Characteristic verification is conducted by the project responsible member of IFS. We have reported interesting studies and have joint publication from both universities.

4. Summaries and future plans

The 3D advanced finite element method by a unit cell with the consideration of translation symmetry and appropriate boundary condition was developed to efficiently and accurately calculate the miniband structure and DoS for an idealistical QDs array with realistic geometrical parameters. In the next project, we will explore the electronics structure of NDs for energy harvesting devices.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] M.-Y. Lee, Y. Li, and S. Samukawa, "Miniband Calculation of Three-Dimensioanl Nanostructure Array for Solar Cell Applications," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 62, No. 11, Nov. 2015, pp. 3709-2714.

[2] L.-W. Yang, Y.-C. Tsai, Y. Li, A. Higo, A. Murayama, S. Samukawa, and O. Voskoboynikov, "Tuning of the electron g-factor in defect free GaAs nanodisks," *Physical Review B*, Vol. 92, Dec. 2015, 245423 (9 pages).

*[3] M.-Y. Lee, Y.-C. Tsai, Y. Li, and S. Samukawa, "Miniband Dependence on the Density of Ge/Si Quantum Dots for Solar Cell Application," in *International Electron Devices and Materials Symposium*, Tainan, Taiwan, Nov. 19-20, 2015.

[4] Y.-J. Lee, F.-J. Hou, S.-S. Chuang, F.-K. Hsueh, K.-H. Kao, P.-J. Sung, W.-Y. Yuan, J.-Y. Yao, Y.-C. Lu, K.-L. Lin, C.-T. Wu, H.-C. Chen, B.-Y. Chen, G.-W. Huang, H. J. H. Chen, J.-Y. Li, Y. Li, S. Samukawa, T.-S Chao, T.-Y. Tseng, W.-F. Wu, T.-H. Hou, and W.-K. Yeh, "Diamond-shaped Ge and Ge0.9Si0.1 Gate-All-Around Nanowire FETs with Four {111} Facets by Dry Etch Technology," *IEEE International Electron Devices Meeting*, Washington, DC, Dec. 7-9, 2015, p. 15p1 (4 pages).

[5] Y.-J. Lee, T.-C. Cho, P.-J. Sung, K.-H. Kao, F.-K. Hsueh, F.-J. Hou, P.-C. Chen, H.-C. Chen, C.-T. Wu, S.-H. Hsu, Y.-J. Chen, Y.-M. Huang, Y.-F. Hou, W.-H. Huang, C.-C. Yang, B.-Y. Chen, K.-L. Lin, M.-C. Chen, C.-H. Shen, G.-W. Huang, K.-P. Huang, M. I. Current, Y. Li, S. Samukawa, W.-F. Wu, J.-M. Shieh, T.-S. Chao, and W.-K. Yeh, "High Performance Poly Si Junctionless Transistors with Sub-5nm Conformally Doped Layers by Molecular Monolayer Doping and Microwave Incorporating CO_2 Laser Annealing for 3D Stacked ICs Applications," *IEEE International Electron Devices Meeting*, Washington, DC, Dec. 7-9, 2015, p. 6p2 (4 pages).

[6] Y.-C. Tsai, M.-Y. Lee, Y. Li, and S. Samukawa, "Miniband Formulation in Ge/Si Quantum Dot Array," in *Proceedings of International Conference on Solid State Devices and Materials*, Sapporo, Japan, Sep. 27-30, 2015, pp. 882-883.

[7] L.-W. Yang, Y.-C. Tsai, Y. Li, O. Voskoboynikov, A. Higo, A. Murayama, and S. Samukawa, "Electron g-factor Engineering in GaAs Quantum Nano-Disks Fabricated by Defect-Free Neutral Beam Etching Process," in *Proceedings of International Conference on Solid State Devices and Materials*, Sapporo, Japan, Sep. 27-30, 2015, pp. 430-431.

[8] Y.-C. Tsai, M.-Y. Lee, Y. Li, and S. Samukawa, "Numerical Simulation of Highly Periodical Ge/Si Quantum Dot Array for Intermediate-Band Solar Cell Applications," in *IEEE Int'l Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices*, Washington, DC, Sept. 9-11, 2015, (4 pages).

*[9] M.-Y. Lee, Y.-C. Tsai, Y. Li, and S. Samukawa, Electronic Structure Dependence on the Density, Size and Shape of Ge/Si Quantum Dots Array," in *The 18th IEEE Int'l Workshop on Comput. Electronics*, West Lafayette, IN, Sept. 2-4, 2015, (4 pages).

[10] M.-Y. Lee, Y.-C. Tsai, Y. Li, and S. Samukawa, "Modeling and Simulation of Well-Ordered Ge/Si-Nanodisk Array for Quantum Dot Solar Cells," Presented in *IEEE The 4th Int'l Symposium on Next-Generation Electronics*, Taipei, Taiwan, May 4-6, 2015. **(Invited Talk)**

2) Patent, award, press release etc.

Best Paper Award, "Miniband Dependence on the Density of Ge/Si Quantum Dots for Solar Cell Application", M.-Y. Lee, Y.-C. Tsai, Y. Li, and S. Samukawa, Nov. 19-20, 2015, *International Electron Devices and Materials Symposium*.

課題番号	J15050
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	2年目

水中におけるストリーマ進展機構
Propagation mechanism of streamer in water

佐藤 岳彦*†，金澤 誠司**††，金子 俊郎***
大谷 清伸*，小宮 敦樹*
*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，††所内対応教員または所外対応研究者

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，本研究では正極性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

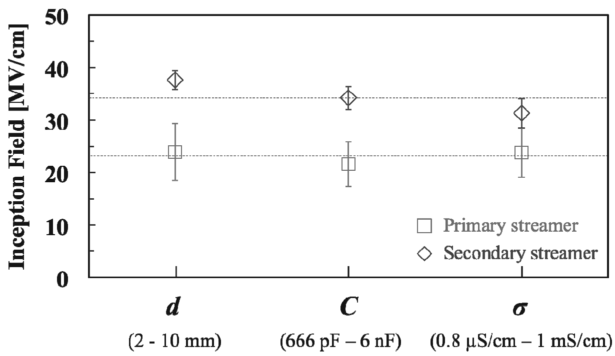


Fig. 1. Average inception fields acquired by changing the gap distance, the capacitance, and the water conductivity.

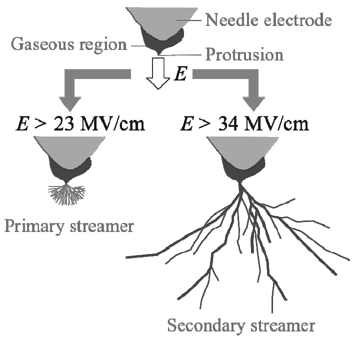


Fig. 2. Threshold electric fields for the inception of a primary streamer and a secondary streamer in water.

本年度は放電条件である電極間距離，コンデンサーの静電容量，水の導電率の変化に対して放電開始に必要な電界強度がどのように影響を受けるのかについて明らかにした．電極間距離を 2, 6, 10 mm に変化させた時，放電開始電圧は上昇するが電界強度は概ね一定であることが明らかになった．コンデンサーの静電容量を 0.67，2，6 nF に変化させた時は，放電開始電圧は低下するが，同様に電界強度については概ね一定であった．水の導電率を 0.8, から 1 mS/cm に変化させた時は，放電開始電圧は上昇するが，電界強度に関しては概ね一

定であった．いずれの場合についても，1 次ストリーマよりも 2 次ストリーマの電界強度の閾値は高い．それぞれのパラメータについて放電開始の平均電界強度を図 1 にまとめる．これより，放電条件に関わらず，1 次ストリーマ発生には 23 MV/cm，2 次ストリーマ発生には 34 MV/cm が必要であることが示された．これは，水中放電の形態は放電開始の電界強度に依存することを示しており，世界でも知見されていない成果である．

3. 研究目標の達成状況

本年度は，放電条件の違いによる放電開始電界強度への影響を明らかにし，放電条件に関わらず放電開始電界強度に閾値があることを明らかにした．これは，本課題の目的である水中放電の進展機構に重要な知見を与える成果であり，本年度の目標を達成することができた．

4. まとめと今後の課題

本年度は，電界強度の閾値が一定であることを明らかにした．今後は，負極性ストリーマの進展機構の解明を目的とする．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

*[1] H. Fujita, S. Kanazawa, K. Ohtani, A. Komiya, T. Kaneko and T. Sato: Role of Continuous Discharge Current for Secondary Streamer in Water, *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, Vol.10, No.1, (2016), pp.16-19.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] T. Sato, H. Fujita, S. Kanazawa, K. Ohtani, A. Komiya and T. Kaneko: Initiation and propagation processes of underwater streamers, *Joint Symposium of the 9th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (APSPT-9) and the 28th Symposium on Plasma Science for Materials (SPSM-28)*, Nagasaki, (2015). （招待講演）

[3] H. Fujita, S. Kanazawa, K. Ohtani, A. Komiya, T. Kaneko and T. Sato: Threshold electric fields for the inception of a primary streamer and a secondary streamer in water, *22nd International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC22)*, Antwerpen, Belgium, (2015), Presentation No. P-I-3-23.

[4] 佐藤岳彦, 藤田英理, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 金子俊郎: 水中ストリーマの進展開始電界強度への放電条件の影響, *2015 年度第 39 回静電気学会全国大会, 静電気学会講演論文集 2015*, 東京, (2015), pp.27-28.

*[5] H. Fujita, S. Kanazawa, K. Ohtani, A. Komiya, T. Kaneko and T. Sato: Effect of Electric Fields on the Inception of Primary and Secondary Streamers in Water, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2015)*, Sendai, (2015), pp.102-103.

[6] 熊谷諒, 金澤誠司, 大谷清伸, 小宮敦樹, 金子俊郎, 中嶋智樹, 佐藤岳彦: 負極性水中放電の進展過程の可視化, *日本機械学会東北支部第 51 期総会・講演会*, 仙台, (2016).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）該当なし

（受賞）[1] 平成 27 年度静電気学会論文賞，水中正ストリーマの進展開始電圧に及ぼす放電パラメータの影響，藤田英理，金澤誠司，大谷清伸，小宮敦樹，金子俊郎，佐藤岳彦，2015.11.13, 静電気学会誌, 39 巻 1 号, (2015), pp.21-26.

（マスコミ発表）該当なし

課題番号	J15051
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1 年目

プラズマ流による気泡生成機構に関する研究
Clarification of bubble generation and flow dynamics in the vicinity of an electrode by water plasma

佐藤 岳彦*†，中谷 達行**††
宮原 高志***，大谷 清伸*
*東北大学流体科学研究所，**岡山理科大学技術科学研究所
***静岡大学大学院総合科学技術研究科
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

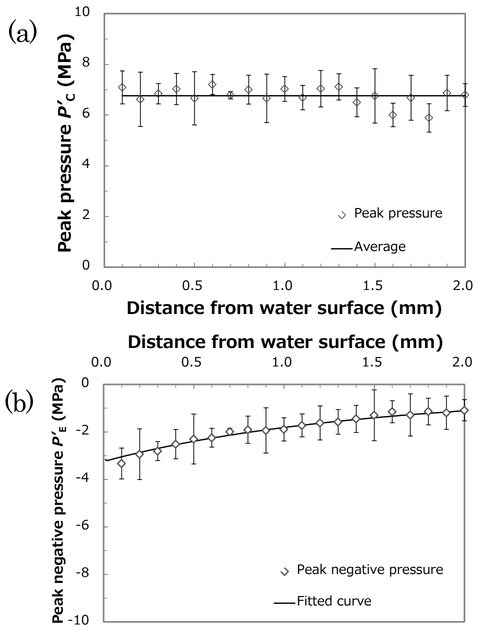


Fig. 1 (a) Peak pressure of the compressive wave against the distance from water surface and (b) peak pressure of the reflected expansion wave against the distance from the water surface.

平成 27 年度は，平成 26 年度に開発した気泡の可視化法を利用して，膨張波と気泡生成の関係について研究を進めた．膨張波は，パルス幅 7 ns の Nd: YAG ナノパルスレーザーを光学系を通し水中で収束させ圧縮波を集光点から発生させる．この圧縮波は水面で反射し膨張波となる．この膨張波が，水中を通過すると，その負圧によりキャビテーション気泡が水面近傍にわずかに生成される．気泡は，概ね 1 μs 後に数十 μm まで成長する．この時の最大圧力の水面からの距離による変化を測定した結果を図 1 に示す．図 1 (a)は，圧縮波の圧力分布，(b)は膨張波の圧力分布を示す．圧縮波は，概ね 7 MPa で水面からの距離に関わらず一定であることが示されている．一方，膨張波は，水面近傍で−3 MPa を示し，水面から 2 mm の位置で−1.5 MPa 程度まで減少していることが明らかになった．昨年度観測に成功したキャビテーション気泡は水中に存在するナノスケールの気泡核が原因となっていると考えられるため，気泡の大きさや数密度分布などは不明である．そこで，既知のマイクロスケールの気泡を超音波造影剤を利用して生成し，その密度を変えた時に起こる現

象について観察した．これにより，気泡密度を増やすことで，観察可能なキャビテーション気泡の数も増大することが明らかになった．また，膨張波の圧力の減少に気泡発生密度が低下した．これは，膨張波によるキャビテーション気泡生成は，水中に存在する微細気泡が核となり発生していることを示す．すなわち，可視化ができないナノスケール気泡に対しても同様な現象が起こっていることを示唆している．

3. 研究目標の達成状況

本年度は，膨張波により発生したキャビテーション気泡が，水中に存在する微細気泡を核に発生していることを示唆するデータを示すことができた．これにより，膨張波を利用した気泡可視化法が水中に存在する気泡の計測に応用することができることを示し，本年度の目的を達成したと考えている．

4. まとめと今後の課題

本年度は，水中に存在する微細気泡が膨張波により発生するキャビテーション気泡の核となっていることを示すことができたが，今後はこのデータをより詳細に検証し，超微細気泡の固気判別法の開発を進める．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

*[1] T. Sato, T. Nakatani, T. Miyahara, S. Ochiai, M. Oizumi, H. Fujita and T. Miyazaki: Study on Formation of Plasma Nanobubbles in Water, *Journal of Physics: Conference Series.*, 656(2015), 012036 (4 pages).

[2] 佐藤岳彦，中谷達行，宮原高志，落合史朗，大泉雅伸，藤田英理，宮崎孝道：水中放電によるプラズマナノバブルの生成に関する研究，岡山理科大学技術科学研究所年報第34号, (2016), pp. 8-12.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[3] T. Sato, Y. Nagasawa, K. Ohtani, T. Miyahara and T. Nakatani: Development of Bubble Generation Method by Plasma, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2015),* Sendai, (2015), pp. 104-105.

[4] T. Sato, T. Nakatani, T. Miyahara, S. Ochiai, M. Oizumi, H. Fujita and T. Miyazaki: Study on Formation of Plasma Nanobubbles in Water, *9th International Symposium on Cavitation (CAV-2015),* Lausanne, Switzerland, (2015).

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	J15052
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

移動物体周りの非定常流体現象予測の高度化のための研究

Study for Accurate Prediction of Unsteady Aerodynamic Characteristics around Moving Objects

大林　茂†*，高橋　俊††**
*東北大学流体科学研究所
**東海大学工学部動力機械工学科
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

流れ中で運動する物体周りで生じる非定常流体現象と履歴現象に対して，風洞実験と数値解析の両面からアプローチして高精度な予測を行う．実工学製品における非定常流体現象の性能検討は重要であるが，データ取得の困難さから未だ発展が望まれている．そこで本研究ではこれに対して風洞試験技術と直交格子法による数値解析技術の開発と高度化により，物理現象の解明に取り組む．これにより非定常翼周りで生じるダイナミックストールの要因解明や，それを応用した流体制御技術を研究開発する．

2. 研究成果の内容

NEC SX-9 を主に用いて大規模計算を行い，平板周りの流れにおいて実験と良い一致を示す揚力係数，抗力係数を求め，さらに翼がピッチング運動した際にも揚抗力の係数が実験値と非常によく似たヒステリシスを示すことが確認された．

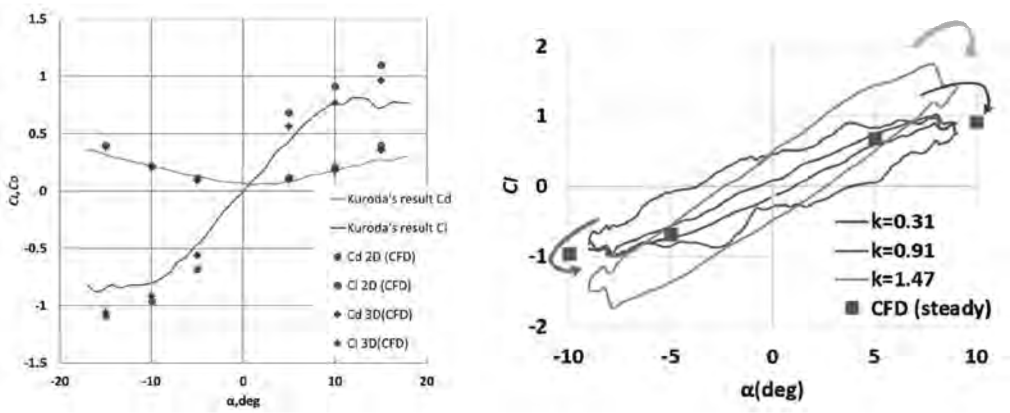


図 1：固定した平板翼周りの空力係数の比較（左）と
運動翼の揚力係数に見られる履歴現象（右）

図 2：2 次元と 3 次元の迎え角 15°の固定翼周りの可視化結果

図 1 に空力係数，図 2 に迎え角が 15°の際の瞬時の流れ場の渦度分布図を示す．ヒステリシスのグラフから, 無次元周波数が 0.91 を境に位相遅れの逆転が生じることとヒステリシスが弱くなること，また可視化図からは流れの三次元性が強く確認される．

3. 研究目標の達成状況

本研究の当初の目的は多くの非定常実験データを取得できるシステムの提案と高度化であったが，学生の取り組みの関係から数値解析を高度化して他者の実験結果と比較することとした．その結果，移動物体，特に翼の運動に伴う動的失速の結果と思われる流体現象を発見できたことは大きな進展であるが，いまだ実験の高度化には至っておらず，そちらに注力する必要がある．

4. まとめと今後の課題

今後は特に風洞試験の高度化と，シミュレーションによる加減速運動から生じる物体付近の循環の調査等を行い，実験的・理論的な観点から調査を進める．

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] Mizuno, Y., Takahashi, S., Nonomura, T., Fukuda, K., “A Simple Immersed Boundary Method for Compressible Flow Simulation around a Stationary and Moving Sphere”, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 438086, 2015.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 芹沢涼平，高橋俊，佐々木大輔，岡本正人，大林茂，“直交格子法による低レイノルズ数・高無次元周波数の運動翼の空力解析”，第 47 回流体力学講演会，東京，(2015).

[3] 芹沢涼平，高橋俊，佐々木大輔，岡本正人，大林茂，“低レイノルズ数・高無次元周波数における運動翼の空力解析”，第 29 回数値流体力学シンポジウム，福岡，(2015).

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

無し

課題番号	J15054
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

高繰返しレーザーパルスを用いた超音速流体制御の数値解析

Numerical Analysis on Supersonic Flow Control using High Repetitive Laser Pulses

岩川 輝*†，佐宗 章弘*
大林 茂**††
*名古屋大学大学院工学研究科，**東北大学流体科学研究所

1. 研究目的

超音速旅客機の実用化に向けては，超音速で飛行する際に発生する衝撃波に起因する造波抵抗やソニックブームが依然として大きな課題となっている．本研究では，これらの衝撃波に起因する問題の解決に向けて，高繰返しレーザーパルスを用いて流れ場にエネルギーを与えることで衝撃波を制御する非接触・局所的・能動的な高速流体制御を提案している．これまでに本手法を用いて，実験的に衝撃波低減効果及び境界層剥離の抑制効果が示されている．一方で，その詳しいメカニズムは調べられておらず，本研究課題では，高繰返しエネルギー付加による高速流体制御技術について，数値解析を用いたメカニズムの解明を目指すものである．

2. 研究成果の内容

2.1 高繰返しエネルギー付加を用いた造波抵抗の低減

マッハ数 2 及び 3.2 程度の流れにおいて，同様のパルスエネルギー及び周波数でエネルギー付加を行った場合の抗力低減効果について実験的に調べ，マッハ数の増大とともに効果も大きくなることが示された．高マッハ数では実験装置の制約から試験模型形状が限定されていたため，数値解析を用いて複数の模型形状において抗力低減効果を調べた結果，同様のエネルギー付加を行う場合でも，その効果は模型のサイズにも影響されることが判明した．このことから，エネルギー付加を用いた方法では，投入パワーだけではなく，エネルギー付加に対する模型のサイズが重要なパラメータとなっており，エネルギー付加によって形成された高温低密度領域と衝撃波の干渉によって形成される渦輪の挙動が抗力低減の主な要因となっていることが予想される．

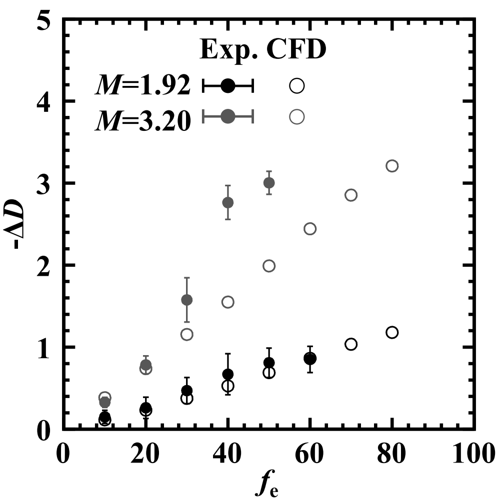


図１ 実験及び数値解析の抗力低減量の比較

2.2 高繰返しエネルギー付加を用いた衝撃波–境界層干渉制御

衝撃波と境界層の干渉によって誘起される衝撃波の振動は，繰返しレーザーエネルギー付

加によって変調させることができ，その振動は投入パワーの増大に伴って大きく低減させることが可能であることが実験から判明している．この現象について数値計算を用いた解析に取り組んでいるが，流れ場の構造が実験と数値計算で一致せず，実験と比較して数値計算の方がエネルギー付加による境界層剥離制御の効果が小さい傾向が確認されており，このメカニズムについては明らかとなっていない．

3. 研究目標の達成状況

高繰返しエネルギー付加を用いた造波抵抗の低減については，実験と数値解析がよく一致する結果が得られており，詳細な解析を行うことでそのメカニズムを詳しく調べることが可能となった．一方，衝撃波-境界層干渉現象では，実験と解析で結果が異なる要因については現状では判明しておらず，数値計算のモデルの見直しを行っているところである．

4. まとめと今後の課題

高繰返しエネルギー付加を用いた高速流体制御技術のメカニズムを明らかにするため，実験と数値計算の双方を用いて詳細に現象を調べている．衝撃波とエネルギー付加領域の干渉による造波抵抗の低減については，今後，数値計算結果を詳しく解析し，また実験では実施できないような条件での計算を進めることでメカニズムの解明に向けて取り組む．一方，衝撃波-境界層干渉現象のように複雑な流れ場の構造を有するような現象は数値計算で再現できておらず，今後，計算モデルの改良等に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] 岩川輝，丹波高裕，正田達郎，Pham Hoang Son，酒井武治，佐宗章弘：エネルギー付加による衝撃波-境界層干渉制御のメカニズム，第 47 回流体力学講演会/第 33 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム(2015).

[2] A. Iwakawa, T. Sakai, A. Sasoh, S. Obayashi: Numerical Analysis on High Speed Flow Control using Repetitive Laser Energy Deposition, 12th International Conference on Flow Dynamics, (2015), CRF-6.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J15055
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	3rd year

Ignition Studies of Gaseous Pre-mixtures in Turbulent Flow

Roman Fursenko*†, Kaoru Maruta**††
Evgeniy Sereshchenko*, Sergey Mokrin *, Hisashi Nakamura**, Koichi Takase**, Onishi Takakazu**
*Far-Eastern Federal University, School of Engineering, Vladivostok, Russia
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

The ignition of turbulent flames is one of the most important problems in the combustion theory. It is relevant to many combustion engineering applications such as investigations of various modes of engine operation required for a better control of fuel efficiency and idle stability of the engine operation. For example, lean premixed turbulent combustion has great potential for fuel economy and NOx emissions reduction in spark – ignition engines. Frequently, the ignition occurs in flows that are highly turbulent and, therefore, involve a wide range of time and length scales. The deep understanding of ignition processes in such conditions is crucial for optimization of ignition systems. Ignition energy is an important property for devices require combustion events to be initiated at a predetermined location and time.

The ignition process in time-independent ABC-flow field modeling turbulent flow was investigated numerically in the frame of 3D thermal-diffusion model in confined domain with nonadiabatic boundary conditions. The influence of velocity amplitude, vortex size and Lewis number on ignition energy were studied. Dependencies of ignition energy on flow intensity calculated for different wave numbers and $Le = 1.0$ are shown in Fig. 1. Lines with solid markers correspond to the ignition in confined domain with nonadiabatic boundary conditions (case 1) and the lines with open markers correspond to the case with periodic boundary conditions (case 2). Numerical results show that in large–scale eddies flow, the ignition energy is almost constant until the turbulent intensity exceeds some critical value, then the linear increase of ignition energy is observed (see Fig. 1 k = 0.1). Such behavior resembles previous experimental observations. At small flow intensity, the ignition energy for the two cases of boundary conditions is the same. In the range of high flow intensities the ignition energy calculated for case 2 is significantly higher than that one for case 1. This is due to the mixture cooling in the near-boundary region. Fig. 2 shows dependencies of minimum ignition energy on wave number calculated for different flow intensities and $Le = 1.0$. For the both case it was found that for the fixed value of flow-intensity U there is a critical wave number corresponding to the maximal ignition energy, but in the case 2 this energy is larger. In addition, the dependencies of the ignition energy on Lewis number were obtained numerically. It was found that ignition energy is changing very slowly in the range of Lewis numbers from 0.3 to 1.1, and rapidly increases for Lewis numbers larger than 1.2. Such behavior resembles previous results obtained for the spherical flame initiation in the quiescent mixtures with high Lewis numbers. It may be concluded that the reduced thermal-diffusion model combined with prescribed flow field is reasonable for qualitative investigations of the ignition in the turbulent flow.

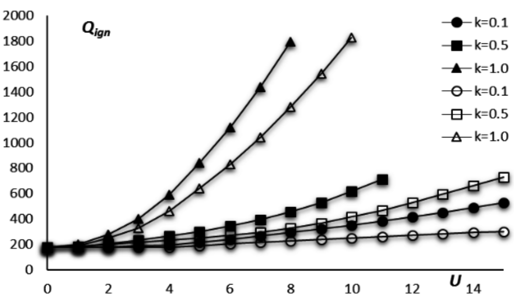


Fig. 1. Dependencies of minimum ignition energy on flow-intensity

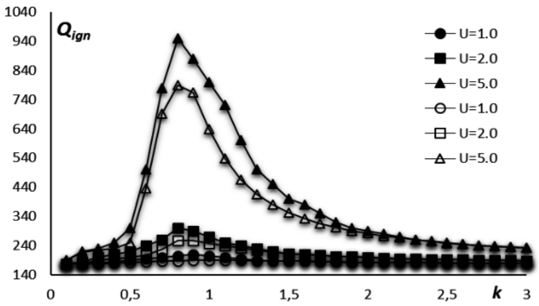


Fig. 2. Dependencies of minimum ignition energy on wave number

In the course of project implementation Russian project members (R. Fursenko and E. Sereshchenko) visited Institute of Fluid Science, Tohoku University. During the visit Japanese and Russian groups had discussions on the results obtained in the frame of the project and formulated plans of the future research. Project members took part in the 15th International AFI conference and presented the results of the project.

3. Achievements

All results which have been expected in the submitted project were achieved. It was shown that theoretical results obtained within reduced thermal–diffusion models combined with prescribed flow field allows us to qualitatively explain some experimental results on the ignition in the turbulent flow.

4. Summaries and future plans

The influence of premixed gases properties on ignition energy in the ABC – Flow modeling 3D turbulent flow was investigated numerically in the frame of thermal – diffusion model. Analysis of time-dependency of maximal gas temperature allow us to give qualitative explanation of ignition energy behavior under variation of different parameters. Reduced mathematical model allows us to decouple thermal-diffusive and hydrodynamic processes for better understanding of dynamical behavior of the flame after its initiation by hot spot.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] Evgeniy Sereshchenko, Roman Fursenko, Sergey Minaev, Shenqyang Shy: Numerical Simulation of Ignition in ABC – Flow Modeling 3D Turbulence using a GPU – based approach, *Proceedings of The International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, Leeds, UK, (2015), (6 pages).

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

[2] Evgeniy Sereshchenko, Roman Fursenko, Sergey Minaev, Shenqyang Shy, Kaoru Maruta, Hisashi Nakamura: Numerical Studies of Ignition in ABC-Flow in Confined Domain with Nonadiabatic Boundary Conditions, *Proceedings of the 15th International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, Japan, (2015), pp. 40–41.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J15056
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	2nd year

Cavity formation mechanism in a cavitation process

Takehiko Sato *†, Mohamed Farhat **††
Outi Supponen **, Kiyonobu Ohtani *, Tomoya Minami***
*Institute of Fluid Science, Tohoku University,
**Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)
***Graduate School of Engineering, Tohoku University
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

Figure 1 shows the schematic diagram of the experimental setup. An underwater shock wave was generated by a spark. A pulsed high-voltage circuit was composed of a DC power source, a spark gap switch, registers and capacitors. A trigger signal from a function generator was sent to a delay generator and it controlled to synchronize the timings of the spark and the back light laser. The applied voltage was measured by a high-voltage probe with an oscilloscope. The trigger signal to an ultra-high-speed camera was sent from the oscilloscope.

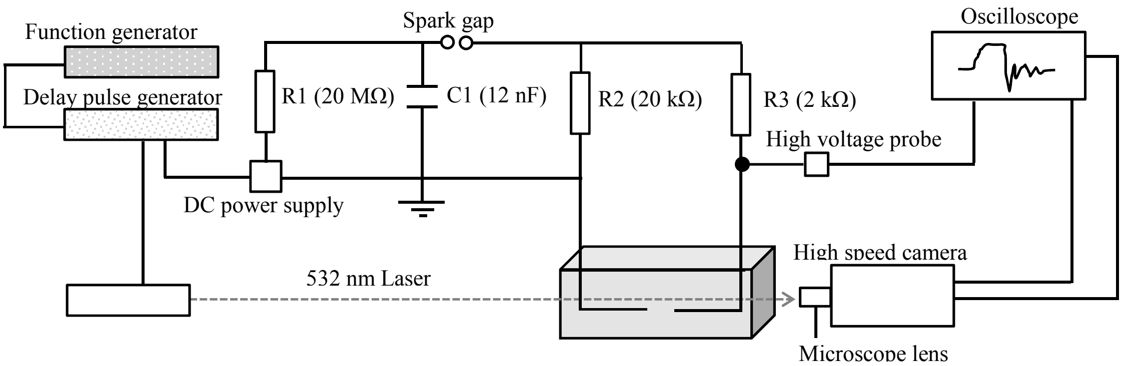


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Secondary cavitation bubbles were produced as the spark-generated primary compression wave reflected from a near free surface as an expansion wave, making these micro-bubbles grow. We also observed micro-jets forming from these bubbles. Figure 2 shows the relationship between the angles of these microjets and the propagation direction of the primary shockwaves. The directions of microjets showed approximately the same directions of the propagation of the compression shock wave, rather than the direction of the reflected expansion wave. This might be caused by the pressure difference of the shock wave between the inlet and outlet sides of the pre-existing bubbles in the water. Because it was reported that the microjets were generated in the direction of the shock wave propagation when the shock wave passed a bubble [3] and the microjet is generated towards lower pressure region [4, 5]. The results obtained in this study show the same trend of these reported phenomena, although no visible bubbles were observed before the generation of the shock wave.

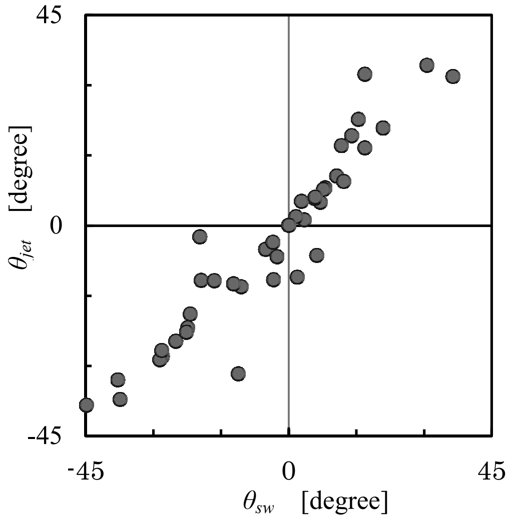


Fig. 2 Analysis results of angle of micro-jets and shockwaves.

3. Achievements

We found that directions of cavitation bubble micro-jets induced by the expansion wave correspond to the propagation direction of the *secondary* compression wave, which is the compression wave produced as the expansion wave reflects from the surface of the expanding bubble and experiences yet another phase inversion. We show this by using developed visualization system through the collaborative research.

4. Summaries and future plans

In this year, the secondary cavitation bubble micro-jets were visualized and the directions of micro-jets were dictated by the secondary compression wave produced by a series of shock wave reflections from near surfaces. In the following year, we will clarify the mechanism of this phenomenon by aiming to control the direction of the compression wave.

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. Minami, T. Sato, K. Ohtani, T. Nakajima, T. Kaneko and M. Farhat: Microjet Formation Mechanism in a Cavitation Process, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2015),* Sendai, (2015), pp. 140-141.

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

Not applicable

(Award)

Not applicable

(Press release)

Not applicable

Project code	J15057
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	2nd year

Characterization of Plastic Deformation using Electromagnetic NDT Methods

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

1. Purpose of the project

The purpose of this project is to investigate the feasibility of electromagnetic NDT methods for evaluation of biaxial plastic deformation. In practice, biaxial tensile test-pieces of different plastic deformation are fabricated, and correlation of the biaxial plastic deformation and the PECT signals is experimentally investigated to clarify the feasibility of PECT to evaluate the biaxial plastic deformation.

2. Details of program implement

Figure 1 shows the probe and a biaxial test-piece for PECT measurments. Plastic deformation of different levels were introduced to the testpieces with a MTS biaxial tensile machine and the corresponding PECT signals are measured by using the probe. The expeimental reults of Figure 2 reveals that the dependences of PECT signals on the uniaxial and biaxial tensile plastic deformations are almost the same.

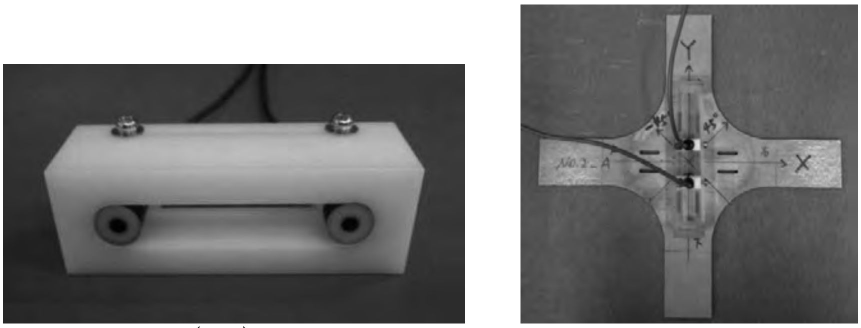


Figure 1: PECT probe (left) and biaxial test-piece of SUS316 stainless steel (right)

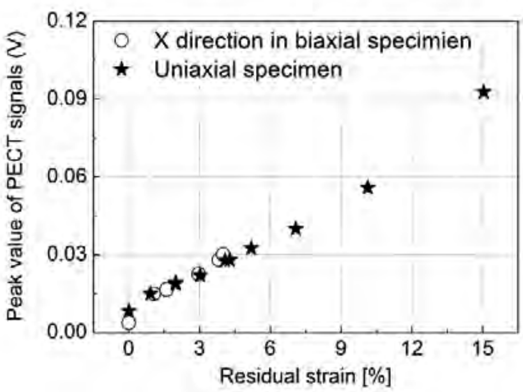


Figure 2: Comparison of peak signals for uniaxial and biaxial strain test-pieces

3. Achievements

The feasibility of NDE for biaxial plastic deformation in stainless steel using pulsed ECT method has been validated. The coil distance of the PECT probe of 40 mm and 50 mm has better sensitivity to evaluate the biaxial residual strain. In addition, the evaluation results of uniaxial and biaxial plastic deformations show that their sensitivities are comparable. The final conclusion is that the PECT method for uniaxial strain evaluation is also promising for application to biaxial ones.

4. Summaries and future plans

In this year project, the feasibility of electromagnetic NDE for evaluation of plastic deformation in a structure of biaxial strain state has been investigated and found suitable in case for the typical stainless steel used in nuclear power plants.

As future work, concerning the plastic deformation occurred in the structures of RAFM steels which are important for new generation nuclear structure, to propose and validate electromagnetic NDT methods for its quantitative evaluation will be conducted. With experiments and numerical simulation, the correlation and influence of the plastic deformation on the NDT signals will be investigated for typical RAFM steels.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] S. Xie, Z. Chen, T. Takagi and T. Uchimoto, Sizing of pipe wall thinning using pulsed ECT method based on inverse analysis, NDT&E Int., Vol.70, 87-95, 2015.

[2] S. Xie, H. Chen, W. Cai, Z. Chen, T. Takagi, T. Uchimoto, Feasibility Investigation of NDE for plastic deformation in biaxial specimen using PECT method, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.40, 43-50, 2015.

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

[3] C. Pei, S. Zhao, S. Xie, Z. Chen*, T. Uchimoto, T. Takagi, Characterization of plastic deformation using EMAT, Proc. 15th Int. Conference on Advanced Fluid Information, 54-55, Sendai, 2015.

[4] W. Cai, S. Xie, C. Pei, Y. Li, Z. Chen*, T. Uchimoto, T. Takagi, Characterization of local conductivity of SCC with DCPD method, Proc. 3rd Int. Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, 5-6, Proc. 10th ICFD, 846-847, Sendai, 2015.

[5] S. Xie, W. Cai, M. Tian, L. Wu, Z. Chen*, T. Takagi, T. Uchimoto, Numerical Method for Nonlinear Simulation of Magnetic Saturated Pulsed Eddy Current Testing Signals and Its Application to Evaluation of Wall Thinning in Carbon Steel Piping, in Proceedings of Compumag'Monteral, 2015.

[6] H. Li, D. Zhang, W. Cai, Y. Li, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi, Effect of phase transformation on the damage induced magnetization of 304 austenitic stainless steel, Proc. of 20th ENDE, Sendai, 97-98, 2015.

3) Patent, award, press release etc.

"A Measurement method for local conductivity based on 4-probe DCPD method", Z. Chen, W. Cai, S. Xie, Y. Li, T. Huang, H. Li, L. Wang, September 1, 2015, ZL20141019354.8, China Patent, approved.

Project code	J15058
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	3 year

Numerical and experimental research on active control of self-sustained flow oscillations with sound interaction

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

1. Purpose of the project

The project has been concerned mainly with flow-sound interaction; particularly with flow-induced sound that acts back strongly on the flow that generated it in the first place, to cause a lock-in of the flow-oscillations to the sound field. We have obtained a good, analytically-based understanding of how the flow field and the sound field are connected, and of how they modify each other.

2. Details of program implement

The system that has been investigated, a cavity (expansion chamber) followed by a tailpipe, is shown in Fig. 1. A uniform air flow is entering the system via the short pipe-segment on the left. A jet, bordered by a shear layer, is formed in the cavity. Emphasis is on the understanding of how flow oscillations can generate acoustic standing waves in the tailpipe and interact with them; in particular how the flow oscillations can lock-in to the tailpipe acoustic resonance.

The unstable shear layer of the jet is modeled via a discrete vortex method, based on axisymmetric vortex rings. Modeling of the sound generation is based on the Powell-Howe theory of vortex sound. The overall, compound acoustic problem is solved analytically (although approximately), in terms of matched asymptotic expansions.

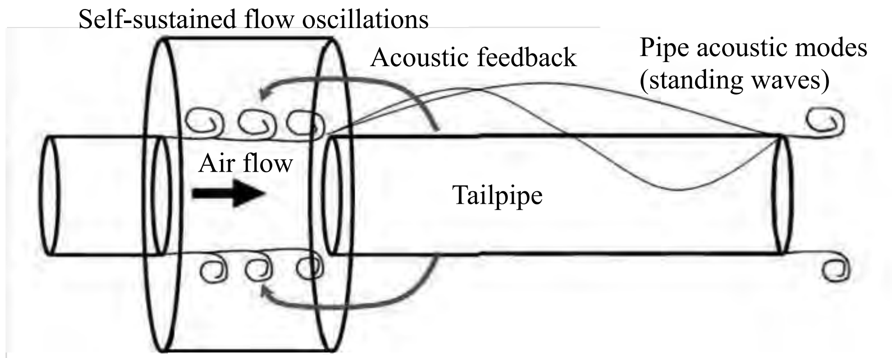


Fig. 1. Sketch of the cavity-tailpipe system. The black arrow indicates the direction of the flow. The red arrows symbolize acoustic feedback from the tailpipe to the self-sustained flow oscillations in the cavity.

3. Achievements

Lock-in of the self-sustained flow oscillations in the cavity to resonant acoustic oscillations in the tailpipe has been simulated successfully based on the method outlined in section 2. The solution method applied to solve the acoustic problem gives analytical expressions for the sound pressure and the acoustic feedback velocity. These approximate expressions are simple enough to provide a good understanding of the flow-sound interaction. We have also analyzed – and implemented in our computer program – how the shear layer (modeled by the discrete vortex method) is modified by the acoustic feedback.

4. Summaries and future plans

The main achievements are (i) successful simulation of flow-sound interaction phenomena, including lock-in of the flow field oscillations to the sound field oscillations, and (ii) a good theoretical (analytical) understanding of this interaction process.

As to future plans, there are several interesting topics that merit further, detailed investigation, such as (i) the stability of the flow and (ii) the existence of localized sound modes in the cavity. These topics will be dealt with in a new project starting April 2016.

5. Research results (* reprint included) (Research results published from April 2015 to March 2016. If not applicable, write "not applicable". If the result is reprinted article included in the Report, put a mark "*" in front of No.)

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

[1] M. A. Langthjem and M. Nakano: Flow-acoustic interaction in an expansion chamber-pipe system, *XXIV ICTAM, 21-26 August 2016,* Montreal, Canada, (2016), extended abstract; accepted, (2 pages).

[2] M. A. Langthjem and M. Nakano: Asymptotic and numerical analysis of resonance and lock-in by flow-acoustic interaction in an expansion chamber-pipe system, *JSME Journal of Fluid Science and Technology*, submitted, (2016) (15 pages).

[3] M. A. Langthjem and M. Nakano: A combined analytical and numerical analysis of the flow-acoustic coupling in a cavity-pipe system, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics,* submitted, (2016) (39 pages).

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

*[1] M. A. Langthjem and M. Nakano: Flow-acoustic interaction in an expansion chamber-pipe system: solution by the method of matched asymptotic expansions, *Mechanisms and Mathematical Aspects of Nonlinear Wave Phenomena, RIMS Kokyuroku 1946,* Kyoto, (2015), pp. 125-135.

[2] M. A. Langthjem and M. Nakano: Resonance and Lock-In by Flow-Acoustic Interaction in an Expansion Chamber-Pipe System, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2015), pp. 498-499.

[3] M. A. Langthjem and M. Nakano: Numerical and Experimental Research on Active Control of Self-Sustained Flow Oscillations with Sound Interaction, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 176-177.

3) Patent, award, press release etc. (patent, award, press release, note should be listed here if applicable)

not applicable

Project code	J15059
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	1st year

Investigation of inhomogeneous mixing of plasma species in the hybrid-stabilized argon-water arc discharge for subsonic-supersonic quasi-laminar plasma flow regimes

Jiří Jeništa*† ††, Hidemasa Takana**, Hideya Nishiyama**††, Milan Hrabovský*
*Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i., Czech Republic
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Numerical simulation of mixing of plasma chemical species in the discharge and near-outlet regions of the worldwide unique type of thermal plasma generator with hybrid stabilization of electric arc by axial argon flow and tangential water vortex. Comparison of the calculated results with available experiments.

2. Details of program implement

1) Further elaboration of the existing numerical code for the calculation of mixing of hydrogen, oxygen and argon plasma species within the discharge region of the hybrid arc by the combined diffusion coefficients method:

a) Generation of new boundary conditions at the discharge chamber inlet.
b) Dependence of transport and thermodynamic properties, diffusion coefficients, particle masses and radiation losses on argon mass fraction (except for their temperature and pressure dependencies).
c) Many other changes in the code – correction of signs of some terms in the equations, data prints, etc.

2) New calculations have been carried out for currents 150–400 A and for argon mass flow rates between 15–22.5 slm (standard liters per minute). The obtained results are now being prepared for publication in a peer-reviewed journal. The set of calculation for 500-600 A has been also carried out and the results have to be further discussed and explained.

3. Achievements

Mixing of plasma species has been studied in detail so far for 150–400 A and for 15 and 22.5 slm of argon. The principal results of the project can be summarized as follows:

- Mixing of water and argon plasma species is inhomogeneous under the all studied conditions.
- Argon species are dominant in the central regions of the arc, water ones in arc fringes. For higher currents argon mass fraction in the central arc region increases.
- Temperature and concentration (ordinary) diffusions are the most dominant contributions in the argon mass diffusion flux. Diffusion due to pressure gradients is lower and due to the electric field is nearly negligible.
- These first results agree with our former experiments carried out 2 mm downstream of the nozzle orifice: calculated radial temperature profiles exhibit very good qualitative and quantitative agreements with the measurements.

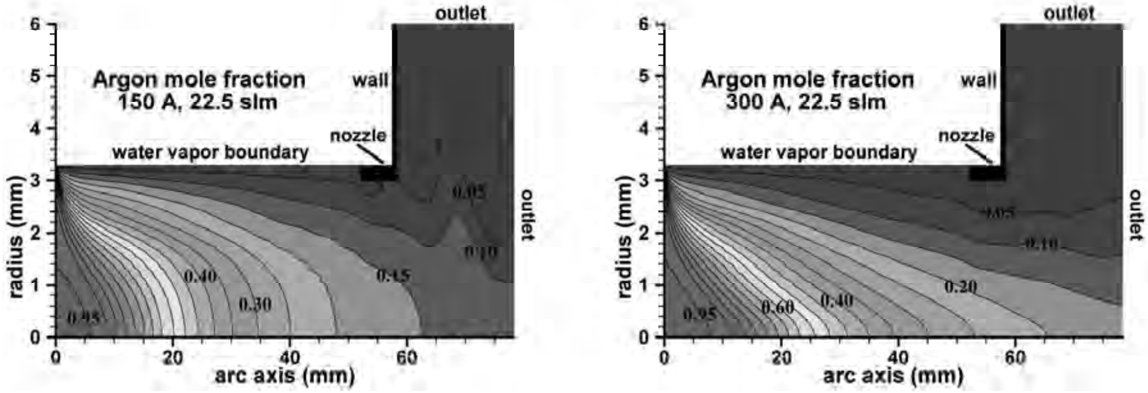


Figure 1. Isopleths of argon mole fraction for 150 A (left) and 300 A (right) discharges. Water mass flow rates are 0.111 g·s^{-1} (150 A) and 0.228 g·s^{-1} (300 A); argon mass flow rate is 22.5 slm for both currents. The increase of argon mole fraction in the centre of the arc for higher current is obvious. Contour increments are 0.05.

4. Summaries and future plans

The results of the project confirm inhomogeneous mixing of argon and water plasma species in the discharge calculated by the combined diffusion coefficients method. Diffusion of species is influenced by highly nonlinear dependence of the combined diffusion coefficients on temperature, pressure and argon mass fraction.

Our future plans include further simulations for higher currents (500-600 A) and argon mass flow rates (22.5-40 slm) and comparison with available experiments for the temperature, velocity and argon mole fraction profiles. Some peculiarities observed now in the simulations for 500 and 600 A have to be explained (i.e., asymmetric temperature and velocity profiles in the discharge). Also, the validity of experimental radial argon mole fraction profiles near the exit nozzle, based on the optical emission spectroscopy measurements of ArI and OI lines carried out at IPP (Institute of Plasma Physics AS CR, v.v.i), has to be checked.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1]J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, A. B. Murphy, M. Bartlová, V. Aubrecht, Preliminary Study of Mixing of Plasma Species in a Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc, *Plasma Physics and Technology*, ISSN: 2336-2626, Vol. 2, Issue 3, 2015, pp. 316-319.

[2] J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, M. Hrabovský, A. B. Murphy, M. Bartlová, V. Aubrecht, Investigation of inhomogeneous mixing of plasma species in a hybrid-stabilized argon-water arc discharge: The very first simulations, *Proc. of 15th Int. Symposium on Advanced Fluid Information* (AFI 2015), pp. 56-57, ISSN 1344-2236, IFS-TM027, October 27-29, 2015, Sendai, Japan.

[3] J. Jeništa, H. Takana, S. Uehara, H. Nishiyama, A. B. Murphy, M. Bartlová, V. Aubrecht, Mixing of plasma species in a hybrid-stabilized argon-water electric arc. (Poster). *Abstracts* - 24th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP 2015), p. 35, web: http://www.icnsp.org/program.html, August 12-14, 2015, Golden, Colorado, USA.

2) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J15060
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	3rd year

Energy release dynamics in porous media

Nickolay Lutsenko*†, Kaoru Maruta**††, Anatolii Maznoy*
* Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

Heterogeneous combustion in porous media occurs quite often in nature. From the point of view of mechanics, various objects can be modeled as porous media: soil, peat, rock, debris of destroyed buildings and so on. The most common type of heterogeneous combustion in porous media is peat fire. Besides, the principles of heterogeneous combustion in porous media are used in a various technological processes.

In the present project the numerical model, which was previously developed for 1D case, is expanded to 2D case and used for solving plane time-dependent problems of heterogeneous combustion in porous objects under free convection. In such porous objects, which may arise from natural or man-caused disasters, the flow rate of oxidant, which enters into the reaction zone in porous object, regulates itself. It should be noted, that proposed numerical model can be used for solving various problems of filtration combustion for both forced filtration and free convection, for both natural and technological processes.

The numerical experiments have shown that 2D time-dependent waves of heterogeneous combustion in porous media under free convection propagate, as well as 1D combustion waves, in two modes with different degrees of burnout of solid combustible material. At the same time, when the initial and boundary conditions in the porous object are non-one-dimensional, the combustion front can move complicatedly. The example of the solid phase temperature and the field of gas velocity within the porous object is demonstrated in Fig. 1.

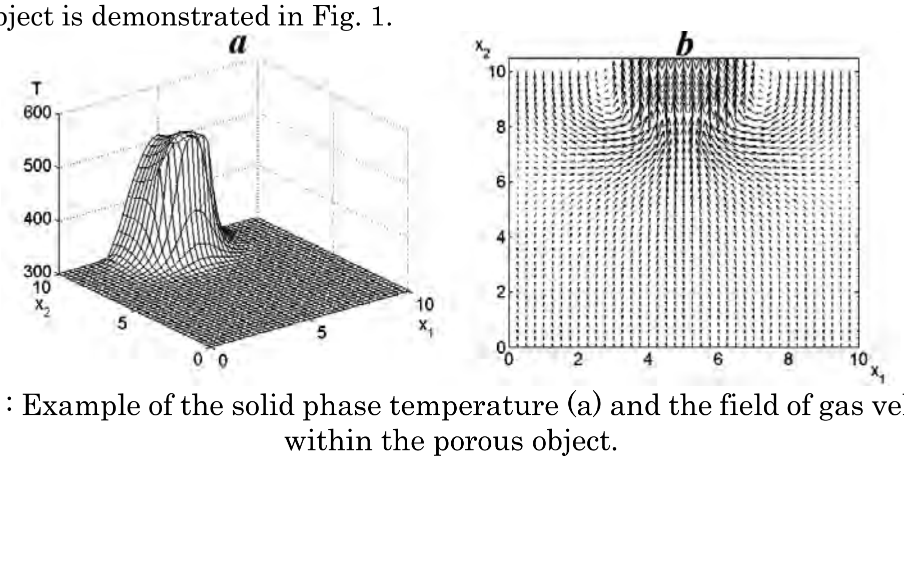


Figure 1 : Example of the solid phase temperature (a) and the field of gas velocity (b) within the porous object.

For specific purposes spherical or cylindrical geometries of the porous burners are preferred over flat configuration. As the radiation characteristics and the flame stabilization are not enough studied for the spherical or cylindrical porous burner, thermal and radiative characteristics of axial-symmetric cylindrical porous radiant burners made of porous NiAl manufactured by the CS method have been experimentally studied in the present project.

3. Achievements

The results which had been expected in the present project were achieved. The original numerical method for modeling the time-dependent 2D processes in porous media with zones of heterogeneous combustion under both natural convection and forced filtration was developed and used for solving some problems. The temperature and radiative characteristics of cylindrical porous burners have been investigated and experimental dependencies of the porous-shell temperature, specific radiant power and radiation efficiency on the mixture flow rate (firing rate) and mixture composition have been obtained.

4. Summaries and future plans

It is revealed that two-dimensional time-dependent waves of heterogeneous combustion in porous media under free convection propagate, as well as one-dimensional combustion waves, in two modes with different degrees of burnout of solid combustible material; the reflection of two-dimensional combustion waves takes place too. Experimental results demonstrate existence of two different combustion regimes, external and internal regimes of combustion, observed at the same values firing rate and fuel-air equivalence ratio. In the external combustion regime, the flame is stabilized near the outer burner surface whereas flame stabilization occurs inside the hollow of the porous shell in internal combustion regime. It has been experimentally shown that the internal combustion mode is characterized by higher temperatures of the outer burner surface, higher specific radiation power and radiation efficiency, as well as more uniform glow of the porous medium compared to the external combustion mode.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] N.A. Lutsenko: On Numerical Modeling of Two-Dimensional Heterogeneous Combustion in Porous Media under Free Convection, *Proceedings of 10th Asia-Pacific Conference on Combustion ASPACC 2015.* Beijing, China (2015), 6 pp.

[2] R. Fursenko, E. Odintsov, A. Maznoy, A. Guschin, A. Kirdyashkin, S. Minaev: Experimental Study of Temperature and Emissive Characteristics of Radiative Cylindrical Porous Burners, *Proceedings of 10th Asia-Pacific Conference on Combustion ASPACC 2015.* Beijing, China (2015), 6 pp.

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

*[3] N.A. Lutsenko, K. Maruta: On Numerical Modeling of Time-dependent 2D Processes in Porous Media with Zones of Heterogeneous Combustion, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), pp. 42-43.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J15061
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	2nd year

Flammability Limits of Low-Lewis-number Premixed Flames

Roman Fursenko*†, Sergey Mokrin*†
Sergey Minaev*††, Kaoru Maruta **††
*Far-Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
**Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan

1. Purpose of the project

The development of new combustion technologies needs in deep understanding of near-limit low-Lewis-number flame structures that are still not well investigated. The main problems are associated with complex spatial/temporal structure of the flame that sometimes assumes the form of separate cells or hot spots resembling flame balls. The main objective of the project is development and generalization of fundamental theory of non-stationary behavior of self-fragmented premixed flames near the flammability limits caused by heat losses, transport processes and flow non uniformity. The project implementation will also contribute to development of unified flammability limits theory which is in vital importance for the further progress in new environmentally friendly technologies such as HiTOC (or "mild" combustion) and others.

2. Details of program implement

Characteristics and spatial structure of premixed low-Lewis-number flames in stretched flow of two slot burners are studied numerically and theoretically in the frame of thermo-diffusive model with one-step chemical reaction. Three different combustion regimes are distinguished: twin planar flames, twin wrinkled flames and multiple flame tubes. In the multiple flame tube case the continuous flame front surface does not exist and combustion wave is represented by the set of separate reacting spots of tube-like form. The regions of existence of different combustion regimes in fuel concentration / stretch rate plane were determined. It was found that continuous flames (i.e. wrinkled and planar twin flames) exist inside the C-shape extinction limit curve obtained in the frame of one-dimensional model, while flame tubes appear beyond this limit in the entire range of stretch rates. Investigations of Lewis number effect shown that extension of low-Lewis-number counterflow flame flammability limits is related with the formation of non-planar flame tube structure caused by the effect of diffusive-thermal instability. Similarities and differences in regime diagrams and spatial flame structure of stretched premixed flames in conventional axisymmetric configuration and in slot-jet arrangement are discussed. Besides that, theoretical and numerical results are compared with experimental data available in a literature.

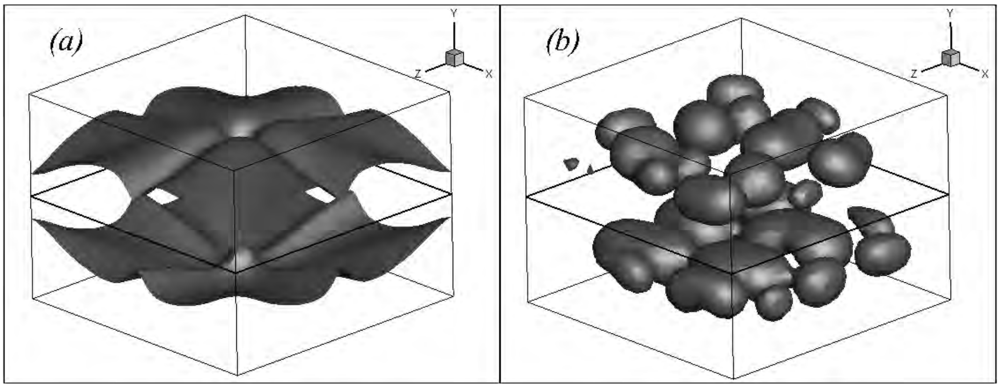


Figure 1 : Equiscalar surfaces of temperature that are typical for twin cellular flames (a) and sporadic combustion wave (b) in axisymmetric counterflow configuration.

3. Achievements

An analytical theory is developed that is capable to predict propagation velocity of flame front consisting of array of separate flame balls. The numerical simulations of the flame patterns such as self-fragmented and cellular flames were performed and the verification of theoretical predictions by experimental data on stretched flames was conducted at qualitative level. In particular, the structure of the sporadic combustion waves in the divergent channel and counterflow configuration is studied numerically. In both cases the cellular flames and sporadic combustion waves exist in near-adiabatic conditions and at high heat loss intensity, correspondingly. It was shown, that sporadic combustion wave can be characterized by average flame position and flame velocity. Dependencies of the velocity of the flame in divergent channel and of counterflow flames on heat loss intensity are close to each other. The results of project facilitate creation of effective numerical algorithms that are necessary for simulations of lean gas burning in practical applications.

4. Summaries and future plans

The future plans include the solution of related problems that contain a hierarchy of models from the model of flame propagation in a single channel to a model of collective spread of flames in the adjacent channels describing the filtration gas combustion in porous media. The development of reduced kinetics models and the investigations directed to creation of porous materials by SHS methods will be also performed.

5. Research results (* reprint included)

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

* [1] S. Minaev, R.Fursenko and K.Maruta: *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), pp. 44-45.

[2] I.Terletskii, S.Minaev, K. Maruta: Maximal Efficiency of Combustion Systems with Countercurrent Heat Exchanger, *Twelfth International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2015).

[3] A. Katoch, M. Asad, S. Minaev, S. Kumar: Laminar Burning Velocity of Methanol-Air Mixtures using Meso-scale Channels, *Twelfth International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2015).

2) Press release

1. FEFU Newspaper, “Ostrov.ru”, https://www.dvfu.ru/newspaper/news/interview/toplabs-v-dvfu/?sphrase_id=104549August 1, 2015. (in Russian)
2. FEFU Newspaper , https://www.dvfu.ru/program/events/21988/ (in Russian)

Project code	J15062
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	New(progressing)

Development of Conservative Kinetic Force Method

Vladimir Saveliev*†, Shigeru Yonemura**††
Filko, Svetlana ***, Kawagoe, Yoshiaki **
* Institute of Ionosphere, NCSRT, Kazakstan,
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
*** Zhetysu State University, Kazakhstan

1. Purpose of the project

Early by applicants, the equation for a two-particle distribution function equivalent to the Boltzmann equation was proposed. The equation describes the interaction in pairs of quasiparticles in terms of their rotation around the centers of mass with angular velocity, which depends on the velocity distribution function. In the first variant of Kinetic Force method, energy of quasiparticles representing real molecules was not conserved. In the second variant, we introduced the kinetic equation for auxiliary two-particle distribution function of quasiparticle pairs. We have shown that the compensation of the energy deficit in the plain Method of Kinetic Force by changing the filter parameter of small scales was physically correct.

In our newest algorithm, the energy of a system of molecules conserves without any additional corrections. Thus, the advantages of modeling on the base of two-particle distribution function of quasiparticle pairs are used more effectively. The new algorithm of Kinetic Force Method named serial recalculation of the velocities of quasiparticles pairs was suggested. This algorithm automatically provides energy conservation in the system of molecules in the course of simulation without supplementary corrections. Thus, the advantages of modeling on the base of two-particle distribution function of quasiparticle pairs are used more effectively.

2. Details of program implement

In the Kinetic Force Method the system of molecules is replaced by a set of N quasiparticles. The renormalized equation for two-particle distribution function $F(\boldsymbol{v},\boldsymbol{u})$ states that the effect of molecular collisions is equivalent to the effect of rotation around the center on mass of quasiparticle pairs with the angular velocity $\boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{u})$, which depends on two velocities of the pair and on one-particle distribution function $f(\boldsymbol{v})$. The generator of rotations around axis $\boldsymbol{n}$ is given by the following equation:

$$\hat{\sigma} = \boldsymbol{n}\cdot\hat{\boldsymbol{\sigma}},\quad \hat{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}}\times\mathbf{v},\quad \mathbf{v} = \boldsymbol{v}-\boldsymbol{u},\quad \mathbf{w} = \frac{1}{2}\left(\boldsymbol{v}+\boldsymbol{u}\right),\quad \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{v}}-\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{u}}\right).$$

Scattering operator $\hat{\chi}$ expressed through the generator $\hat{\sigma}$ reads:

$$\hat{\chi} = 2\int d\Omega_n \left|\cos\theta\right| \, b\left(\mathrm{v},\mu\right)\left(e^{\pi\hat{\sigma}}-1\right)$$

where

$$e^{\pi\hat{\sigma}}F(\mathbf{v}) = F(e^{\pi\hat{n}}\,\mathbf{v}),\quad \hat{n} \overset{df}{=} \boldsymbol{n}\times,\ \ \hat{n}\mathbf{v} \overset{df}{=} \boldsymbol{n}\times\mathbf{v}$$

$$e^{\pi\hat{n}}\mathbf{v} = \mathbf{v}' = \left[\left(1-\cos\pi\right)\hat{n}^2 + \left(\sin\pi\right)\hat{n} + 1\right]\mathbf{v} = 2\boldsymbol{n}\,\boldsymbol{n}\cdot\mathbf{v} - \mathbf{v},$$

$$\cos\theta = \frac{\boldsymbol{n}\cdot\mathbf{v}}{\mathrm{v}}, \qquad \mu = \frac{\mathbf{v}'\cdot\mathbf{v}}{\mathrm{v}^2} = \cos 2\theta\,.$$

Factorization of eigenvalues of the operator $\hat{\chi}$ corresponds to the factorization of the scattering operator $\hat{\chi}$ itself:

$$\hat{\chi} = \hat{\boldsymbol{\sigma}}^2\hat{\chi}_- = \hat{\boldsymbol{\sigma}}\hat{\chi}_-\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{\partial}{\partial\mathbf{v}}\cdot\mathbf{v}\times\hat{\chi}_-\hat{\boldsymbol{\sigma}} = -\frac{\partial}{\partial\mathbf{v}}\cdot\left[\mathbf{v}\times\hat{\boldsymbol{\Omega}}\right]$$

where

$$\hat{\boldsymbol{\Omega}} = -\hat{\chi}_-\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \hat{\chi}_-\mathbf{v}\times\frac{\partial}{\partial\mathbf{v}} = \frac{1}{2}\hat{\chi}_-\left(\boldsymbol{v}-\boldsymbol{u}\right)\times\left(\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{v}} - \frac{\partial}{\partial\boldsymbol{u}}\right)$$

These equations allows us to model the dynamics of the system of molecules due to collisions by a rotation of the relative velocity $\mathbf{v} = \boldsymbol{v} - \boldsymbol{u}$ in quasiparticle pairs $(\boldsymbol{v},\boldsymbol{u})$ with the angular velocity $\boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{u})$:

$$\boldsymbol{\Omega}(\boldsymbol{v},\boldsymbol{u}) = \int \frac{d\Omega_n\left|\cos\theta\right| b_-\left(\mathrm{v},\mu\right)}{f\left(\boldsymbol{v}\right)f\left(\boldsymbol{u}\right)}\left(\boldsymbol{v}'-\boldsymbol{u}'\right)\times\left(f\left(\boldsymbol{u}'\right)\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{v}'}f\left(\boldsymbol{v}'\right) - f\left(\boldsymbol{v}'\right)\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{u}'}f\left(\boldsymbol{u}'\right)\right),$$

where

$$\boldsymbol{v}' = \boldsymbol{nn}\cdot\boldsymbol{v} + \left(1-\boldsymbol{nn}\cdot\right)\boldsymbol{u},\ \ \boldsymbol{u}' = \left(1-\boldsymbol{nn}\cdot\right)\boldsymbol{v} + \boldsymbol{nn}\cdot\boldsymbol{u}.$$

3. Achievements

We presented a new expression for angular velocity of rotation in quasiparticle pairs that provides more efficient numerical calculations. This expression contains integral on one dimension less than we had earlier. Thus, the advantages of simulation of rarified flows on the base of two-particle distribution function can be used more effectively.

4. Summaries and future plans

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

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

5. Research results (* reprint included)

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

"not applicable"

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

[1] V.L. Saveliev, S.A. Filko andS. Yonemura: Development of Conservative Kinetic Forc e Method. *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 178-179.

3) Patent, award, press release etc.

"not applicable"

Project code	J15063
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	1 year

Application of Magneto-Rheological Elastomers to energy harvesting

Gael Sebald*†, Masami Nakano**††
*LGEF, INSA-Lyon, France
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Magneto-Rheological Elastomers (MRE) exhibits a magneto-mechanical coupling, i.e. a dependence of the shear modulus on the magnetic field and a dependence of the magnetic permeability on the shear strain. It can therefore be utilized for energy conversion, such as vibrational energy converted into magnetic one, and through induction in coils, into electrical one. In the framework of energy harvesting from vibrations, the use of soft polymers offers the advantages of being low-cost and mechanically very soft compared to their piezoelectric counterparts.

Within this project, we aim at evaluating and enhancing the capability of MRE for energy harvesting by working on three complementary aspects:

1. Elaboration and optimization of the material
2. Modeling and characterization
3. Application to the design of an energy harvesting demonstrator

2. Details of program implement

During the previous year, the two first aspects of the research objectives were investigated. Both isotropic and anisotropic MR elastomers were fabricated and tested at IFS from Prof Nakano expertise and facilities. Their magneto-magnetic properties were quantified and preliminary energy conversion densities were estimated through Dr Sebald 5 weeks stay at IFS last August.

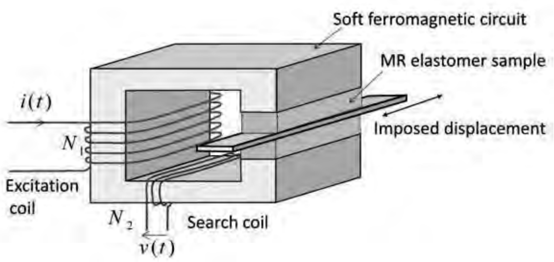


Figure 1 : Characterization bench for MRE properties measurements

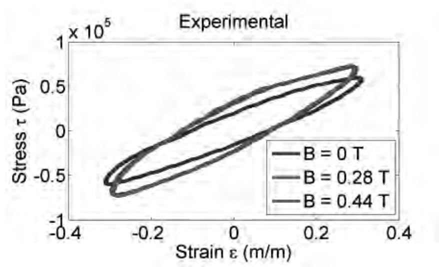


Figure 2 : Mechanical properties dependence on static magnetic field

3. Achievements

In this work, a quadratic model for the elastomer was developed (for the coupled properties), which allowed predicting the low-field behavior of the material.

Both isotropic and anisotropic MRE were fabricated at the IFS and characterized. Magneto-Rheological Elastomer (MRE) fabrication consists in dispersing 70 wt% carbonyl iron particles in an elastomer matrix (Silicone rubber). In case of anisotropic MRE, a static magnetic field (0.3T) was applied during curing of the matrix. An experimental characterization bench was developed for measuring both mechanical properties dependence on magnetic field and the dependence of magnetic permeability on shear strain (see figure 1). A clear dependence of the mechanical properties on magnetic field was successfully measured (see figure 2).

Their properties were then estimated and the energy conversion capabilities were calculated. It is found that energy conversion in the range of a few mJ.cm-3 is feasible for shear strain levels of 40%.

However this simplified modeling shows major limitations in high field zone. Further work will focus on deepen the physical mechanisms responsible for the magneto-mechanical coupling including the saturation of the coupled property with the magnetic field.

4. Summaries and future plans

We applied for a "New (progressing present project)" IFS Collaborative Research Project for 2016 fiscal year. The project gathers Pr Masami Nakano, Dr Gael Sebald, Pr Jean-Yves Cavaillé, and Dr Mickaël Lallart (from INSA-Lyon). This research topic will be developed strongly in the framework of UMI ELyTMaX laboratory created beginning of 2016 in Tohoku University. Both Pr Jean-Yves Cavaillé and Dr Gaël Sebald are working in this new lab since April 2016. The main goals of the extended collaboration will be the achievement of efficient magneto-rheological (MR) elastomer featuring significant susceptibility change with the applied shear stress and the development of a fully working demonstrator for vibrational energy harvesting. This includes the developments of the material and new mechanical architecture together with its electrical interface. A side results will be the development of an efficient model for MR elastomers.

These objectives will be achievable by combining the expertise of Prof. Nakano's group with the knowledge of permanent members of ELyTMaX in terms of material physics, characterization and modeling, and INSA-Lyon in terms of macroscopic modeling, energy conversion and harvesting. It is therefore expected significant advances in the above-mentioned fields, yielding publications in peer-reviewed journal and possibly joint patenting on the material and techniques.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] Gael SEBALD, Masami NAKANO, "Application of Magneto-Rheological Elastomers to Energy Harvesting", Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), Sendai (Japan) October 27-29.
Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, pp. 58-59

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

Project code	J15064
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	3rd year

The continuous spectrum in the Moore–Saffman–Tsai–Widnall instability

Stefan G. Llewellyn Smith*†, Yuji Hattori**††, Makoto Hirota**
*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, UCSD
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

Professor Llewellyn Smith visited the Institute of Fluid Science during the period August 31–September 4, 2015. During this visit, Professors Llewellyn Smith and Hattori discussed work on the two-dimensional MSTW instability and on vortex filaments with density differences. Professor Hattori talked about the collaborative research at ICFD2015.

3. Achievements

Professor Llewellyn Smith has continued to work on algorithms to compute steady-state vortex patches and Sadovskii vortices in strain. These finite-amplitude exact nonlinear solutions are the natural generalizations of the basic states oringially used by Moore and Saffman, which have infinitesimal strain. The algorithm solves a Riemann problem numerically, and is potentially more flexible than previous strategies that have been used to compute free-surface flows. These basic states can then also be used in stability calculations to understand the effect of finite-amplitude rather than infinitesimal strain on the MSTW instability. Density and surface tensions effects can be included in these calculations.

Professor Llewellyn Smith has also been working on a numerical method based on slender vortex filament theory to compute the motion of vortex filaments in the presence of buoyancy and surface tension effects. Such flows constitute the next step beyond line vortices, which are rectilinear. Since they are not steady-state structures, understanding their dynamics is important even before considerations of stability.

Professor Hattori has studied the MSTW instability of a destabilized vortex pair. Concentration of vorticity due to selective decay was discovered as in the case of 2D Taylor-Green vortices, but the effect was rather weak. Selective decay is caused by reconnection of vortex tubes (Fig. 1).

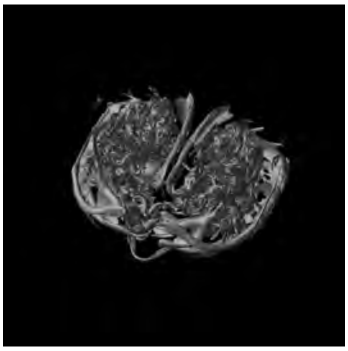


Figure 1: Vortex reconnection in a turbulent vortex pair.

4. Summaries and future plans

Future work on the MSTW instability requires synthesizing a number of results obtained by the PIs, including the two-dimensional Taylor–Green vortex calculations, the time-dependent exact two-dimensional solutions using Laplace transforms (numerically and analytically) and the relation to the finite-amplitude Sadovskii basic states.

Works on the MSTW instability were initially motivated by the question of the stability of vortex rings. Video sequences of bubble rings show how robust these are. They stay smooth, suggesting that surface tension may be stabilizing the interface. It is natural therefore to consider the effect of density discontinuities and surface tension both on the MSTW instability and on vortex rings.

Work on the unsteady vortex filament calculations will elucidate non-trivial basic states (e.g. vortex knots). The instability of the vortex ring will be revisited in the presence of density differences in the core. The effect on the geometric optics calculation is particularly interesting, because density effects have previously not been considered much. The usual kinematic wavenumber transport equation would not seem to depend on density, so presumably the effect of density will manifest itself as coupling together different solutions in different regions. The curvature instability occurs at the cross points of dispersion curves of the Kelvin waves which have internal structures inside the vortex ring. These cross points may vanish for the hollow vortex ring, but the density jump and surface tension can give rise to other instabilities.

Finally the stability of the Abrashkin–Yakubovich family of vortices will be considered. These have a Lagrangian formulation, which will require some technical developments.

5. Research results (* reprint included)

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

Not applicable.

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

[1] Y. Hattori, M. Hirota, S. G. Llewellyn Smith, "The continuous spectrum in the Moore-Saffman-Tsai-Widnall Instability," Proceedings of the 15th International Symposium on Advanced Fluid Information (2015), p. 108-109.

3) Patent, award, press release etc

Not applicable.

Project code	J15065
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	2nd year

Predictive Kinetic Modeling of Energy Thermalization, Chemical Reactions, and Compression Wave Formation in Non-equilibrium Nanosecond Pulse Discharges in Air and Fuel-air Mixtures

Hidemasa Takana*†, Igor Adamovich**
Zak Eckert** and Hideya Nishiyama *
*Institute of Fluid Science, Tohoku University,
** Department of Mechanical and Aerospace Engineering,
The Ohio State University, USA
†Applicant, IFS responsible member

1. Purpose of the project

The overall objective of proposed research is to provide quantitative insight into mechanisms of molecular dissociation by electron impact and by quenching of electronically excited species, "rapid" (sub-acoustic time scale) and "slow" (vibrational relaxation time scale) heating of the flow, chemically active species formation, and compression wave generation in nanosecond pulse filament discharges. This insight is crucial for predictive analysis of high-speed plasma flow control and plasma-assisted ignition applications.

2. Details of program implement

The present approach uses the reduced dimensionality (1-D axial + 1-D radial), master equation, nonequilibrium air plasma model (Shkurenkov 2014), developed at OSU under a collaborative project with IFS. The kinetic model is used to predict time-resolved temperature, N_2 vibrational level populations, and compression wave speed in nanosecond pulse "diffuse filament" discharges in air and hydrogen-air mixtures, showing good agreement with the experimental data.

3. Achievements

In the present work [1], kinetic modeling is used to analyze energy partition and energy transfer in nanosecond pulse discharges in air and nitrogen. The modeling predictions are compared with time-resolved temperature and $N_2(v=0\text{-}9)$ vibrational population measurements by picosecond broadband Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy (CARS) and phase-locked Schlieren images of a compression wave generated due to heating of the discharge filament on sub-acoustic time scale. The present kinetic model has been previously validated using time-resolved measurements of $N_2(v=0\text{-}4)$ vibrational level populations, [N], [O], and [NO] in nanosecond pulse discharge in air at a lower specific energy loading, as well as time- and spatially resolved temperature measurements in nanosecond pulse discharges in air and H_2-air at a lower pressure.

In the experiments modeled in the present work, the diffuse filament, nanosecond pulse discharge (pulse duration ~100 ns) was sustained between two spherical electrodes at 100 torr and operated at a low pulse repetition rate, 50 Hz, to enable

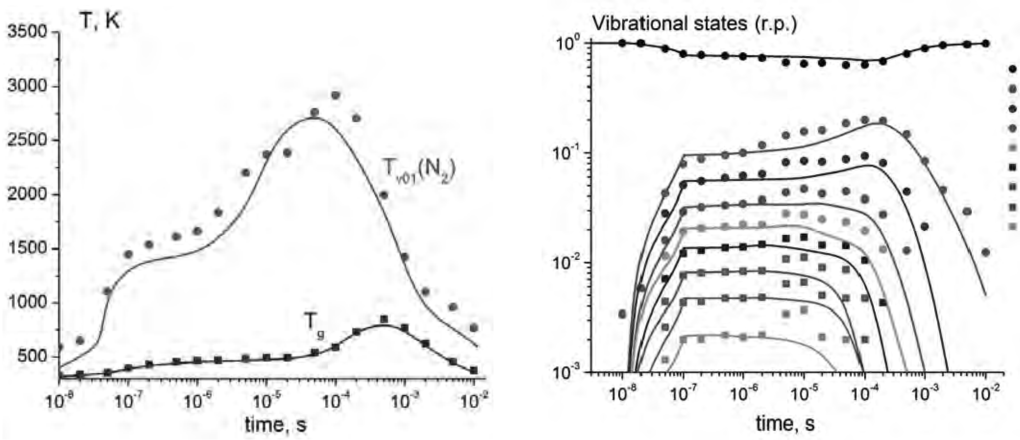


Figure 1. Left: Experimental and predicted time-resolved gas temperature and "first level" N_2 vibrational temperature during and after the discharge pulse in air. Right: Experimental and predicted N_2(v=0-9) vibrational level populations, plotted vs. time after beginning of the main discharge pulse in air. Symbols: experimental data, lines: model predictions.

rotational-translational temperature and N_2 vibrational level population measurements over a wide range of time scales after the discharge pulse, from tens of ns to tens of ms. The present analysis is based on a one-dimensional axial model for the discharge pulse, and a one-dimensional radial axisymmetric model for the afterglow. The model shows good agreement with the experimental data, reproducing experimental discharge current pulse waveforms, as well as dominant processes of energy partition and energy transfer in the discharge and the afterglow. Specifically, the results demonstrate that energy thermalization and temperature rise occurs in two stages, (i) "rapid" heating, occurring on the time scale τ_{rapid} ~ 0.1-3 μs (in nitrogen) and τ_{rapid} ~ 0.1-1 μs (in air), dominated by $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ energy pooling processes, $N_2(B^3\Pi_g)$ and $N(^2P,^2D)$ quenching (in nitrogen), and by quenching of multiple excited electronic states of N_2 molecules by O_2 (in air), and (ii) "slow" heating, on the time scale τ_{slow} ~ 50-500 μs, caused primarily by N_2 vibrational relaxation by O atoms (in air), and nearly completely missing in nitrogen due to the much slower vibrational relaxation rate. Parametric modeling calculations also showed that pulse wave form with short rise time and high peak voltage leads to the effective generation of O atoms in air.

4. Summaries and future plans

On-going and future work includes measurements of time-resolved electric field and electron density in air plasmas (by Thomson scattering and CARS / 4-wave mixing), and predicting them using a 2-D kinetic 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] I. Shkurenkov, I.V. Adamovich, H. Takana and H. Nishiyama: Kinetic Modeling of Energy Thermalization, Chemical Reactions, and Compression Wave Formation in Non-equilibrium Nanosecond Pulse Discharges in Nitrogen and Air, Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2015), pp. 60-61.

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

Project code	J15066
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	3rd year

Generation and transport of chemical species in low-temperature atmospheric plasma for sanitization device

Tetsuji Shimizu*†, Takehiko Sato**††
Gregor Morfill*, Hideto Kamiyama ***
*terraplasma GmbH,
**Institute of Fluid Science, Tohoku University,
***Graduate School of Engineering, Tohoku University
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

Purpose of the project

Cold atmospheric plasma has been applied to treatment of living tissues and microorganisms. This field of science is called plasma medicine. One major application in this field of science is disinfection and sterilization. Especially in public places, a new system to inactivate microorganisms is required because a number of antibiotic-resistant bacteria is increasing and a number of newly developed antibiotics on the market is decreasing. Moreover, nosocomial infection (hospital-acquired infection) has been seriously reported.

In this project, we would like to discuss the flow propagation mechanism initiated by cold atmospheric plasma. In the inactivation process by the cold atmospheric plasma, reactive species which can have an inactivation effect on microorganisms are produced and transported onto objects. In order to achieve high efficiency of inactivation, both production and transport of reactive species are necessary to control. An already built-up set-up for plasma production was used in this project and we discuss the flow generation by the cold atmospheric plasma.

Details of program implement

As already reported in the last years, a plasma discharge system with a pin electrode and water was used in this project. The pin electrode made of platinum with a sharpen edge was placed 1 mm above the water surface. The pure water of 0.8 µS/cm in electrical conductivity was poured in a quartz glass cell of 10 × 10 × 3 mm^3. The water surface level was as high as the height of glass cell. The glass cell was placed on a metal plate which was electrically grounded.

By applying a high voltage between the pin electrode and metal plate, a plasma discharge was formed from the tip of the pin electrode to the water surface. The amplitude of voltage was -7.5 kV with a square waveform and a repetition frequency was 5 kHz. The plasma production was very local and the diameter of the plasma discharge was almost as same as the diameter of pin electrode (0.3 mm in diameter).

At high pressure including atmospheric pressure, a plasma discharge can drive a gas flow because the accelerated ions can transfer kinetic energy to neutrals through collisions efficiently. The gas flow formation was observed by Schlieren visualization technique using a high speed camera. A series of photos by the camera was synchronized with the signals of high voltage and electrical current using an oscilloscope. Figure shows a series of photos observed by the camera between the pin electrode and the water surface every 20 µs. At 20 µs, after a peak current corresponding to a plasma discharge at around 0 µs was observed, a hot spot was developed around the tip of the pin electrode. The hot spot moved toward the water surface with a relatively slow velocity of a few m/s until 100 µs. At 120 µs, another hot region was created at the tip of the pin electrode. Between 100 and 120 µs, the applied voltage increased from -7.5 kV to 0 V and several discharge currents appeared. The newly developed hot spot as well as the previous spot was transported toward the water surface with much higher velocity of about 20 m/s as shown in the photos of No. 6 -8.

There were two types of gas flow formation observed. One is the slow gas flow initiated by the discharge when the voltage decreased from 0 V to -7.5 kV. The other gas flow with higher velocity was initiated by the plasma discharges when the applied voltage went up to zero. The directions of both flows were same.

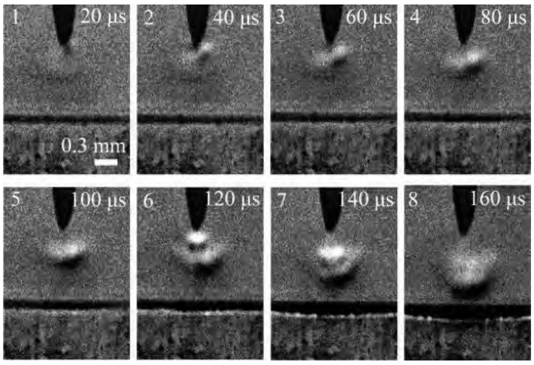


Figure: A series of Schlieren photos between the pin electrode and water surface. At 0 and 100-120 µs, the plasma discharges were ignited.

Achievements

The plasma discharge drove the gas flow in the plasma. The gas flow direction using negative applied voltage in this project was from the pin electrode toward the water surface. As previously reported, the gas flow direction was also from the pin electrode to water surface when a positive voltage was applied. This suggests that the flow direction is independent on electrical polarity, but dependent on mechanical geometry. Furthermore, there were two types of flow development observed.

Summaries and future plans

The atmospheric discharge was produced between the pin electrode and water surface. By applying a negative high voltage to the pin electrode, two types of gas flow were observed. Through this collaborative research since years, we found that the developed flow direction is not dependent on the polarity of electric field.

A further investigation is needed to reveal the mechanism of gas flow development. We think that the charging on the water surface and mechanical geometry of the plasma system play an important role to develop a gas flow. Through an investigation for above-mentioned topics, the understanding of the gas flow formation becomes clearer.

Research results (* reprint included)

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

[1] T. Shimizu, M. Hara, N. Kishimoto, D. Yoshino, G. E. Morfill, and T. Sato: Gas Flow Formation by Plasma Discharge on Water Surface, *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, 10(2016), pp. 83-87.

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

[2] T. Shimizu, G. E. Morfill, N. Kishimoto, H. Kamiyama, and T. Sato: Generation and Transport of Chemical Species in Low-Temperature Atmospheric Plasma for Sanitization Device, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai*, (2015), pp. 78-79.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J15067
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	1 st year

Numerical study on gas lubrication of a textured surface in micro/nanoscale

Shigeru Yonemura*†, Yevgeniy Bondar**††
Alexander Shevyrin**, Pavel Vashchenkov**
Alexandr Kashkovskiy**, Anton Shershnev**
* Institute of Fluid Science, Tohoku University
** Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics,
Siberian Branch of Russian Academy of Science

1. Purpose of the project

Surface texturing has been studied for improvement in tribological performance of sliding surfaces. In the case where liquid is used as a lubricant for microhydrodynamic bearings, the pressure cannot be lower than the pressure at which cavities are formed in the liquid. Therefore, the pressure rise will be greater than the pressure drop, and it has been explained that this asymmetric pressure distribution may make the pressure averaged over the whole surface higher than the ambient pressure. Since the cavitation does not appear in gas, the mechanism of gas lubrication is different from that of liquid lubrication and it had not been explained. Recently, Yonemura *et al.* clarified the mechanism of high gas pressure generation induced by a textured surface in micro/nanoscale. However, in order to design the optimal configuration of the surface texture for good tribological performance, further accumulation of knowledge of gas lubrication of a textured surface is required. In the present study, numerical simulations and theoretical analyses are performed in order to understand this phenomenon in more detail.

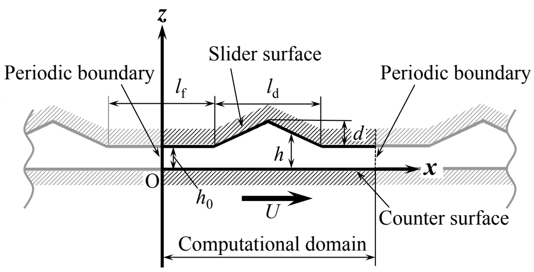


Fig. 1 Computational domain.

2. Details of program implement

The effect of the size of the lubricated region on high gas pressure generation was investigated. The lubricated surface considered here was the surface with triangular dimple, whose surface pattern was repeated infinitely in the sliding direction, as shown in Fig.1. It was found that as the size of lubricated region decreases under the conditions of a fixed shape of the lubricated region and fixed ambient gas, two opposing effects, i.e., the “rarefaction effect” and the “miniaturization effect,” appear. The former increases the sliding speed required to generate high pressure, whereas the latter reduces it. The present theoretical analyses showed that the optimum size of the lubricated region, which minimizes the required sliding speed, is in the transition flow regime around Kn=10. Figure 2 shows the relation between the sliding speed and the generated averaged pressure. Let us focus on the required sliding speed to generate one fixed high pressure. Figure 2 shows that it decreases with increasing Knudsen number for Kn<10, and reaches the minimum at Kn=10, and starts to increase again with increasing Knudsen number for Kn>10. This result validates our expectation due to the present theoretical analysis. Since the sliding speed required in the case of micro/nanoscale gas lubrication of a textured surface is much smaller than that for continuum gas lubrication, the former gas lubrication is much superior to the latter.

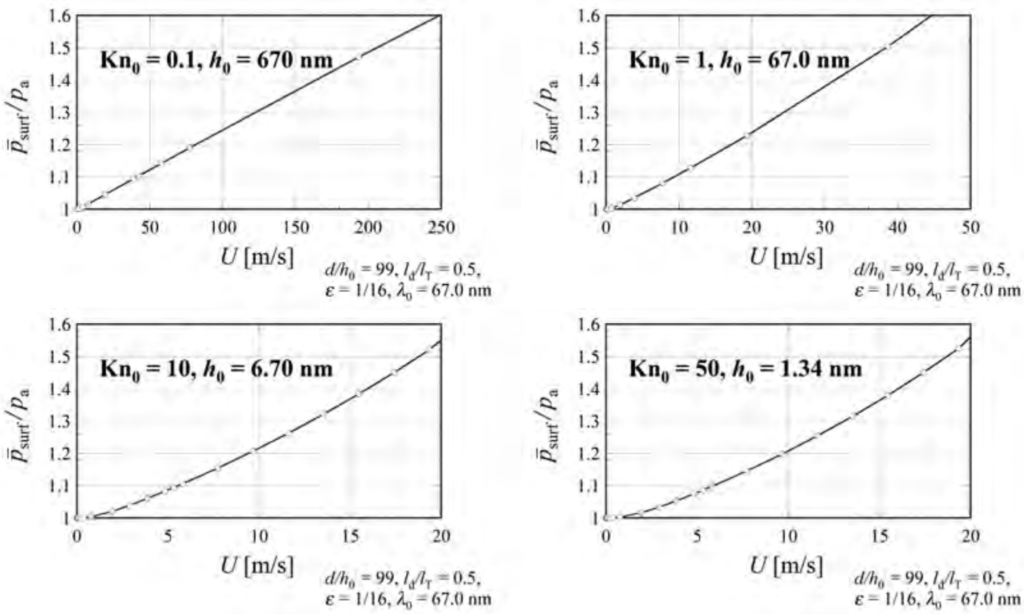


Fig. 2 Relation of the superficially averaged gas pressure $\bar{p}_{\mathrm{surf}}$ to the sliding speed U.

3. Achievements

We obtained the important and general knowledge about the effects of rarefaction and miniaturization on the gas lubrication of textured sliding surface.

4. Summaries and future plans

In the second year, we will extend the treated textured pattern from 2D to 3D.

5. Research results (* reprint included)

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

Not applicable

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

[1] S. Yonemura, Y. Kawagoe, A. Shevyrin, P. Vashchenkov, and Y. Bondar: Study on Gas Lubrication of a Textured Surface in Micro/Nanoscale, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2015), pp. 94-95.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J15068
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	New

Application of Data Assimilation to Aviation Safety System

Junho Cho*, Takashi Misaka**, Shigeru Obayashi**
Kwanjung Yee*, Shinkyu Jeong***
*Department of Aerospace Engineering, Seoul National University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
***Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University

1. Purpose of the project

Air traffic has been forecasted to be the largest on record in this year and has grown steadily by about four percent every year. The airport capacity has reached its limit with the steady increase of aviation demands. Thus a method for improving the efficiency of airport capacity has been required. For this it is recommended to adjust the time interval of the take-off and landing between consecutive aircrafts. Meanwhile, unreasonable shortening would cause an accident due to the wake turbulence. In this study, data assimilation will be applied to predict the wake vortices which restricts the number of aircraft take-off and landing in airport. Aircrafts generate a pair of long-lived counter-rotating wake vortices which is a potential risk for the following aircraft especially when it is taking off and landing. The decay process of wake vortex is dependent on various factor such as clear air turbulence, horizontal wind velocity, and the strength of wake vortex pair. In this collaboration we have developed a fast-time prediction model of wake vortices. Such a prediction model helps to adjust take-off and landing separations at airports.

2. Details of program implement

In this study, measurement integrated simulation using incremental four-dimensional variational (4D-Var) data assimilation method was used for accurate wake vortex idenfication and the POD reduced order model was used for efficient prediction. The incremental approach was used to reduce the high computational cost of 4D-Var. In the incremental 4D-Var, adjoint of a low level grid is used to compute the gradient of increments. The validation of both methods was performed for an idealized test case using virtual Lidar measurement. The cost function history and the gradient of incremental 4D-Var shows good agreement with those of 4D-Var.

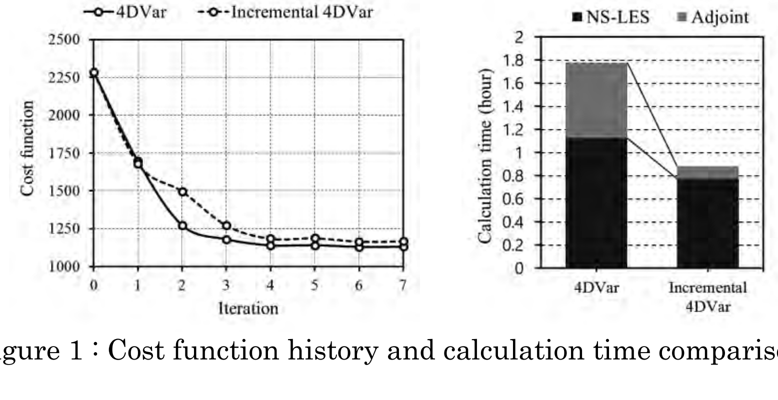


Figure 1 : Cost function history and calculation time comparison.

3. Achievements

The prediction of wake vortex according to atmospheric condition had been done with virtual Lidar measurement data and data assimilation technique. We have successively implement incremental method to the four dimensional variational data assimilation program to improve the and efficiency. Overall accuracy of incremental approach show similar result with 4D-Var.

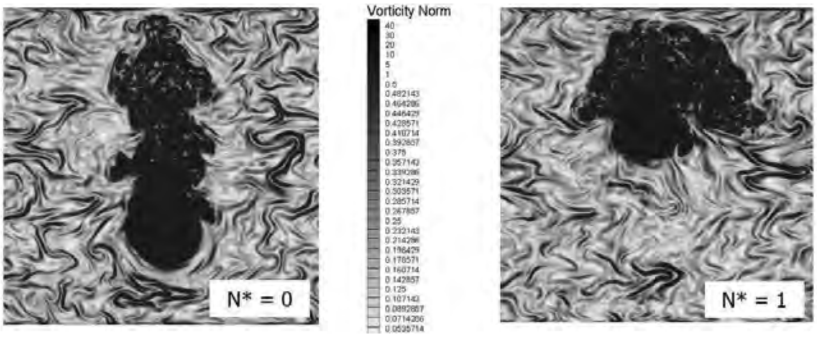


Figure 2 : Wake vortex comparison according to thermal stratification level at t*=5 (ambient turbulence field forcing factor, ε*=1e-6)

4. Summaries and future plans

POD method were used for efficient prediction of wake vortex pair. Turbulent kinetic energy and time had been tested for design variables of POD. As shown in Figure 2, the errors need to be improved in prediction algorithm of POD when using more than two design variables. Currently artificial neural network weight estimation is on develop.

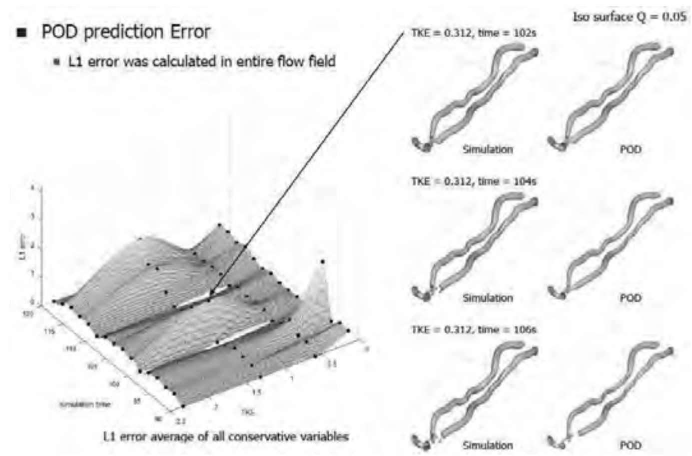


Figure 2 : Rear time prediction of wake turbulence using proper orthogonal decomposition method

5. Research results (* reprint included)

1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)

Junho Cho, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Yee Kwanjung, Shinkyu Jeong: Application of Data Assimilation to Aviation Safety, *IFS Collaborative Research Forum (AFI-2015)*

Junho Cho, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Kwanjung Yee, Shinkyu Jeong: Application of incremental Four-Dimensional Variational Method to Aviation Safety, *The 12th World Congress on Computational Mechanics*

3) Patent, award, press release etc.

Project code	J15069
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	1st year

AERODYNAMIC DESIGN AND OPTIMIZATION OF HIGH SPEED TRANSPORT AIRCRAFT

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

1. Purpose of the project

The purpose of the present research is to study sonic boom propagation from supersonic flight through atmospheric turbulence. Initially, sonic boom propagation is simulated by solving the Khokhlov–Zabolotskaya-Kuznetsov (KZK) equation and later by general RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)-based high fidelity numerical method and the pressure wave through the turbulence field is estimated.

2. Details of program implement

In the first year of preliminary study, the research activity is directed in evaluating loudness effect of supersonic flight, by developing a methodology which is based on general RANS-based CFD tool that has been used by industries. To simplify the process, wedge configuration is used and with adaptive mesh for better shock dynamic capturing (Figure 1, left), because this configuration is relatively easy to be predicted. This methodology is based on N-Wave evaluation that is produced by supersonic flight. Then, by doing FFT, N-Wave could be converted to Sound Pressure Level (SPL) with respect to Frequency to measure its loudness (Figure 1, right).

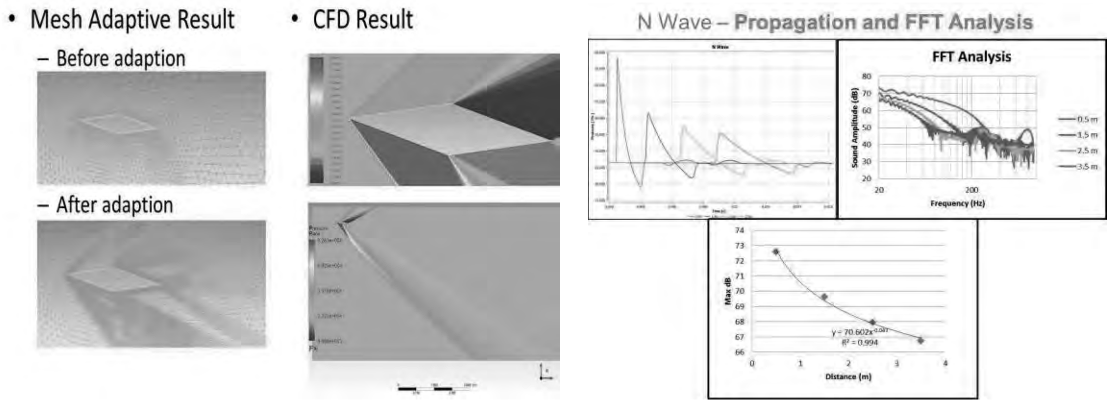


Figure 1 : Results of mesh adaptive and CFD And N-wave evaluation

The methodology of N wave evaluation is as follows:

- Data were picked at several location below wedge (in m)
- Peak value is decreasing over distance
- Rise time is increasing distance
- Converting Sound Pressure Level (SPL) Amplitude by using Fast Fourier Transformation (FFT)
- Max dB is following power function (similar to sound propagation characteristic)

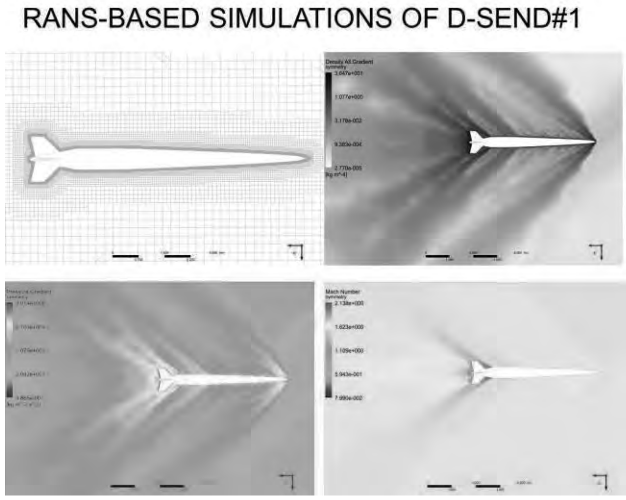


Figure 2 : RANS-based simulations of D-SEND#1

In the 1st year of research, we also carried out RANS-based simulations by employing the Low Boom Model (LBM), which utilizes a sonic boom reduction technique in the D-SEND#1 (Drop test for the Simplified Evaluation of Non-symmetrically Distributed sonic boom experiment conducted by JAXA that aimed to validate low boom techniques) experiment, as the present application. Turbulent field is considered in the atmospheric boundary layer at less than 1000 [m] above the ground. The result can be seen in Figure 2. However, N-Wave could not be captured due to lack of mesh resolutions. Figure 2 shows the mesh, the density gradient (for better shock imaging), Mach and pressure contours.

3. Achievements
   - High fidelity RANS-based Industrial CFD tool can be used to predict loudness of supersonic flight and simulate LBM of D-SEND#1 experiment
   - Supersonic flight effects have the same characteristic as sound propagation

4. Summaries and future plans

   For future plans in Year 2 and 3, the following will be carried out:
   - Better mesh resolutions for RANS-based simulations
   - Extended study is needed to determine its characteristics against shape, turbulence, flight speed, etc.
   - Comparisons between KZK tool and RANS-based numerical method.

   Finally, effort will be centered on the incorporation of sonic boom analysis methods into conceptual design studies of high speed transport aircraft.

5. Research results (* reprint included)

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

   Not applicable. However, a journal paper will be prepared based on recent results.

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

   R.O. Bura, K. Shimoyama, S. Obayashi: Numerical Analysis of Sonic boom Propagation ThroughAtmospheric Turbulence, Proceedings of the ICFD2015, October 27-29, 2015 (Oral and poster presentations)

3) Patent, award, press release etc.

   Not applicable

Project code	J15070
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	1st year

Development and applications of micro-motors consisting of smart polymer rotor and dielectric liquid

Masami Nakano*†, Miklos Zrinyi**††
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
**Laboratory of Nanochemistry, Semmelweis University
†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The rapid development of micro-manufacturing has initiated the development of electrostatic micromotor to be used in micro-electromechanical systems (MEMS) for energy conversion. The early attempts to miniaturize the electromotors were achieved by making a scale reduction of existing motor parts. Due to their complicated construction, the coils of traditional electromagnetic motor are rather difficult to miniaturize. In this project, a novel principle has been proposed for realization of a side drive micromotor, based on the electrorotation phenomena.

2. Details of program implement

We have presented the first direct observation of electric field induced rotation of epoxi-based polymer rotors. Polymer disks, hollow cylinders and gears were prepared

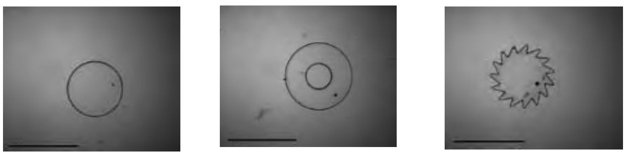


Fig.1 Polymer disks, hollow cylinders and gears made of epoxy based polymer (SU-8)

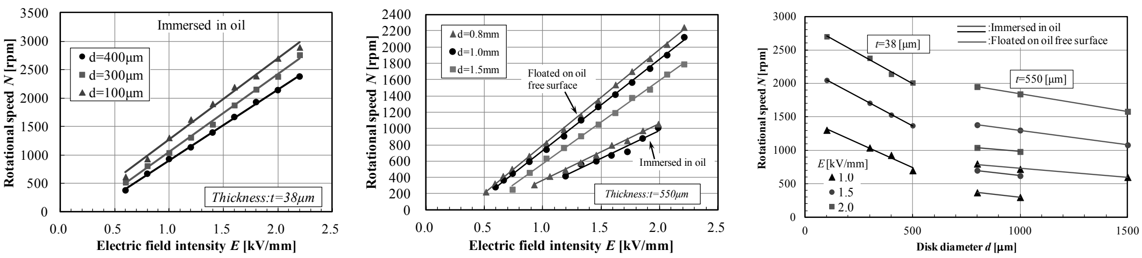


Fig.2 Effect of disk diameter d

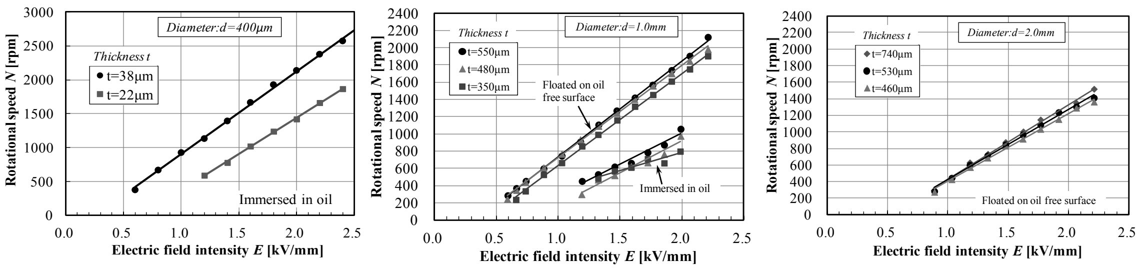


Fig.3 Effect of disk thickness t

in few micrometer dimensions as rotors. Electrorotation of these sub-millimeter sized tools was studied under uniform DC electric field. The effect of shape, size and thickness were investigated.

3. Achievements

We were able to prepare epoxy based polymer showing reproduciable rotation under uniform DC field. The speed of rotation strongly depends on the strength of uniform DC field as well as on the size of rotors. The floating disks on oil surface perform faster rotation than the corresponding disks immersed in oil.

All these measurements provide fundamental information on micro-motor characteristics which is important for further micro-engineering development.

4. Summaries and future plans

More careful investigation is needed in order to study the effect of size and thickness on the speed of electrorotation. We plan to investigate SU-8 epoxi-based disks having diameter from 100 to 1500 micrometer. The thickness will also be varied from 30 to 100 micron. Not only the speed of rotation will be studied, but attempt will be made to determine the no-load torque of the rotors.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] R.A Bauer, L. Kelemen, M. Nakano, A. Totsuka and M. Zrinyi: Fabrication and electrorotation of a novel epoxy based micromotor working in uniform DC electric field, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No.10, (2015), 105010(5 pages).

[2] M. Nakano, T. Okumura, A. Totsuka and M. Zrinyi: Micro-motor of EAP Composite Rotor Rotating in Dielectric Liquid under Uniform DC Electric Field, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics,* Under review. (In Japanese)

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

[3] M. Nakano, A. Totsuka, T. Ambo, R. A. Bauer, L. Kelemen and M. Zrinyi: Electrorotation of Epoxy Based Microrotors in Dielectric Liquid under Uniform DC Electric Field, *Proceedings of the 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2015)*, Hyogo, Japan, (2015), 2P2-F-3(2 pages).

[4] M. Zrinyi and M. Nakano: Polymer Rotor for Micro-Electromotor, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2015)*, Sendai Japan, (2015), CRF-67, pp.136-137.

[5] M. Nakano, A. Totsuka, T. Ambo and M. Zrinyi: Micromotor of Epoxy based Electro-active Polymer Rotors in Dielectric Liquid Working Under Uniform DC Electric Field, *Proceedings of JFPS 2015 Spring Conference on Fluid Power System*, Tokyo Japan, (2015), pp.58-60. (In Japanese)

[6] M. Nakano, T. Okumura, A. Totsuka and M. Zrinyi: Micro-motor of EAP Composite Rotor Rotating in Dielectric Liquid under Uniform DC Electric Field, *Proceedings of MAGDA Conference 2015 in Tohoku, The Japan Society of AEM*, Sendai Japan, (2015), pp.341-346. (In Japanese)

3) Patent, award, press release etc.

(Press release)

The 34th issue the WW-EAP Newsletter, "EAP Polymer Rotor for Micro-Electromotor", M. Zrinyi and M. Nakano, Vol. 17, No. 2, (2015), pp.15-15.

URL: http://ndeaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/newsltr/WW-EAP_Newsletter17-2.pdf

Project code	J15071
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	2nd year

Numerical study of thermal and chemical non-equilibrium effects in near-continuum hypersonic flows

Georgy Shoev***†, Shigeru Yonemura**††
Yevgeniy Bondar***, Pavel Vashchenkov*
*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics,
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
***Novosibirsk State University
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The main challenge of the project is validation of different models of vibration-dissociation coupling for accurate simulation based on the numerical solution of the Navier-Stokes equations in the two-temperature approximation.

2. Details of program implement

The main goal of this year was to validate different models of vibration-dissociation coupling via comparisons with available experimental data. As the first step of the program we developed a numerical tool for simulation of a high-enthalpy flow of a binary mixture of nitrogen (N_2/N) with non-equilibrium dissociation and vibrational relaxation. This tool is based on the Navier–Stokes equation in the two-temperature approximation. ANSYS Fluent is used as the core CFD-solver. The conservation equation of vibrational energy is added to the system of the Navier–Stokes equations by using the option of the user-defined scalar transport equation. Translational and rotational modes are assumed to be in equilibrium, so we distinguish only two temperatures: translational and vibrational. Source terms describing the translational-vibrational energy exchange are added to the right hand-side of the equations of translational and vibrational energy conservation and calculated in user-defined functions. In order to take into account the vibrational temperature of N_2 in the dissociation rate, it is also calculated in user-defined functions.

The Landau–Teller model is used to describe vibrational thermal relaxation. The vibrational relaxation time is calculated with the use of a semi-empirical formula by Millikan and White (Chem Phys, 1963). The following reactions of dissociation are taken into account: 1) N_2 + N -> 3N; 2) N_2 + N_2 -> 2N + N_2. The kinetic coefficients for the equilibrium dissociation rate constant are taken from Park (1985, AIAA Paper-85-0247). The Park and Kuznetsov models are used to calculate the dissociation rate.

We consider an axisymmetric problem of a steady high-speed (V_∞=5226 m/sec) flow around a cone with diameter d=4 cm. The flow consists of a binary mixture of nitrogen (N_2/N) with the mass fraction of the diatomic component equal to Y_{N2}=0.9535. The incident flow is assumed to be thermally equilibrium at T_∞=$T_{v\infty}$=2420 K and density ρ_∞=0.012 kg/m^3. The calculations are performed for different cone angles δ in the interval from 60° to 75°. These cases correspond to those considered in Leyva (PhD thesis, 1999). The above-described conditions are imposed on the left (inflow) boundary, while all variables on the right (outflow) boundary are extrapolated from the computational domain (Fig. 1a). The cone itself is subjected to no-slip conditions, and the wall is assumed to be isothermal at the temperature T_w=300 K.

The results of computations are given in Fig. 1. A curved bow shock is observed in front of the cone, which can be seen in Fig. 1a, 1c, 1d ($\delta = 70°$). The bow shock is normal on the axis of symmetry and the flow behind it is subsonic (Fig. 1a). In accordance with the Rankine-Hugoniot conditions, the flow parameters behind the bow shock become different as the distance increases away from the axis. The expansion fan, emanating from the trailing edge of the cone, accelerates the flow up to supersonic velocities. The bow shock is detached from the cone at a distance Δ/d, which was measured in experiments.

Figure 1b shows a comparison of the stand-off distance obtained in experiments ("Exp") and computations with the Park (curve "1") and Kuznetsov (curve "2") models. Good agreement between experimental and numerical data is observed. Translational-rotational and vibrational temperatures are given in Fig. 1c and Fig. 1d for $\delta = 70°$. These temperatures are different just behind the bow shock and then relax to each other.

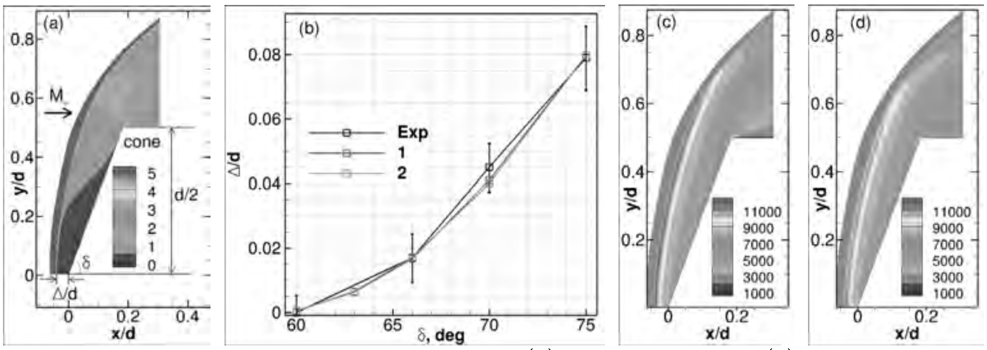


Figure 1 : Results of numerical simulations. (a) Mach number, (b) stand-off distance of the bow shock, (c) translational-rotational temperature and (d) vibrational temperature of molecular nitrogen.

3. Achievements

The expected results were achieved completely.

4. Summaries and future plans

The numerical tool for simulation of high-enthalpy non-equilibrium flows has been developed and applied for validation of the Park and Kuznetsov models of dissociation. The next step is a comprehensive numerical study of a high-speed flow over a cone in a wide range of flow parameters. Validation of different dissociation models (Macheret-Fridman, Park, β-model, Kuznetsov and two types of Marrone-Treanor models) is planned to be performed.

5. Research results (* reprint included)

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

Not applicable.

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

*[1] Georgy Shoev, Pavel Vashchenkov, Shigeru Yonemura, Yevgeniy Bondar : Numerical Study of Non-Equilibrium Flow with Dissociation and Vibrational Relaxation over a Wedge, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 16-17.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J15072
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	New (progressing)

傾斜キャビティ内流れの不安定性評価
Evaluation of Flow Instability in Tilted Cavity Configuration

小宮 敦樹*†，Daniel Henry**††，岡島 淳之介*
*東北大学流体科学研究所，**Ecole Centrale Lyon
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では，平空間内における自然対流現象の三次元数値計算を行い，流動場が不安定となる温度差，重力方向の影響等の諸条件について評価を行う．並行して自然対流現象に関して，光干渉技術を応用利用した温度場および流動場の同時計測システムを用いて可視化実験を行い，不安定化における温度場と流れ場の関係性を定量評価するとともにそのメカニズムの詳細解析を行う．

2. 研究成果の内容

本研究では，フランス Ecole Centrale Lyon 側で閉空間内流れ三次元数値シミュレーションを行った．作動流体がプラントル数（Pr）0.7（空気）および 5.9（水）における立方体形状閉空間内自然対流現象を計算し，広範なレイリー数（Ra）領域における流動場の様相を詳細検討した．計算結果より分岐線図を作成すると，安定状態であった流れが諸種の条件変化によって不安定化に至り，特に重力方向の影響は不安定化遷移に大きく関係していることが分かった．この計算結果を実証するにあたり，本年度は平空間キャビティ内自然対流現象における温度場と流れ場の同時計測システム構築を行った．図 1 に計測セルを，図 2 に $Pr = 5.9$ の作動流体における計測によって得られた温度場と流れ場の様子を示す．図から明らかなように，平空間内全体において温度場及び流れ場を高精度に計測することが可能となった．これらの開発した技術を基に，今後傾斜キャビティ内流れにおける自然対流不安定化の計測実験を行っていく．

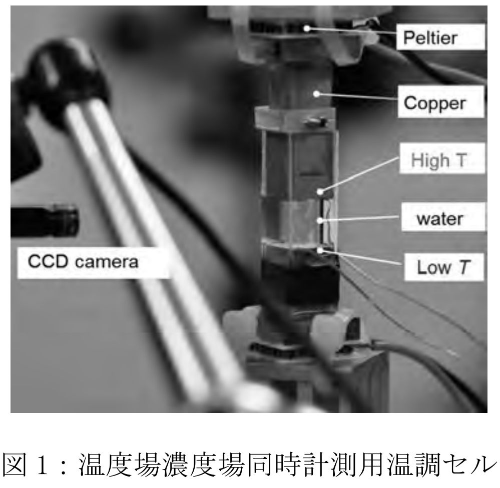
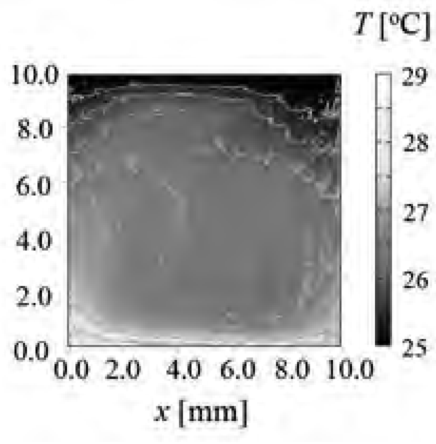
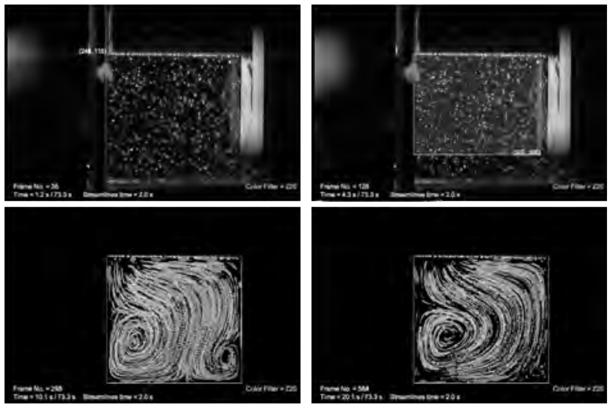


図 1：温度場濃度場同時計測用温調セル



(a) 温場計測結果



(b) 流れ場計測結果

図 2：同時計測システムによる温度場及び流れ場の可視化結果

3. 研究目標の達成状況

本研究では，自然対流熱伝達現象を利用した伝熱促進技術等の熱デザインの分野の一助となる知見を得ることが期待できる．これに対し，本年度は実験的研究を進め，温度差起因の自然対流場の流れ場と温度場の同時計測を行った．この技術開発は乱流による伝熱促進技術の開発や，伝熱抑制技術の開発といった熱流動場における伝熱制御に大きく資するものであると考えられ，全体としては 70%の達成度と評価することができる．

4. まとめと今後の課題

今年度はこれまでの公募共同研究成果で得られた自然対流の不安定化に関する知見を実証すべく，温度場および流れ場の同時計測システムの開発を行ってきた．従来の干渉計に PIV システムを取り入れることで精緻な計測システムを開発した．これにより，自然対流の不安定化遷移に関してより詳細な情報を取得することが期待できる．次年度以降は，開発した本システムを用いて，温度場・流動場同時観察実験を行い，不安定化に関する信頼のある諸データを取得を行っていく．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1） 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1]. Juan Felipe Torres Alvarez, Daniel Henry, Atsuki Komiya and Shigenao Maruyama, Transition from multiplicity to singularity of steady natural convection in a tilted cubical enclosure, Physical Review E, Vol.92 (2015), 023031.

2） 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

なし

3） その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）　なし
（受賞）　なし
（マスコミ発表）　なし

Project code	J15073
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	New

Investigation of nozzle flows at low Reynolds numbers

Yevgeniy Bondar*†, Kaoru Maruta**††
Georgy Shoev*, Anton Shershnev***
*Novosibirsk State University,
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
***Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The main goal of the project is twofold: to investigate numerically the flow in the near field of a plume exhausting from a plane two-dimensional nozzle and to evaluate the accuracy of the different models which are regarded more accurate than Navier-Stokes equations but less accurate than the Boltzmann equation for modeling such flows (in particular, ESBGK model kinetic equation).

2. Details of program implement

Numerical simulations were performed using different approaches: the deterministic solution of the ESBGK equation and the Navier-Stokes equations. A numerical technique for solving the model kinetic equations is based on the employment of reduced distribution functions and uses the discrete ordinate method and high-order shock-capturing WENO schemes. The Navier–Stokes equations are solved on a structured grid of quadrilateral computational cells using high-order shock capturing MUSCL TVD schemes with velocity slip and temperature jump condition on the solid wall. Computations were performed for the flow of argon exhausting from a plane wedge-like micronozzle with a h=100 µm throat half-width into the vacuum. To study the influence of the rarefaction effects on the nozzle flow, computations are performed for two values of Reynolds numbers, Re_h = 350 and Re_h = 50. Figure 1 shows comparison of the results of numerical simulations. As can be seen, in case Re_h = 350 profiles are in very close agreement, so one can conclude that in the inner flow rarefaction effects are moderate and can be taken into account in Navier–Stokes-based simulation using the velocity slip and temperature jump boundary conditions on the solid wall.

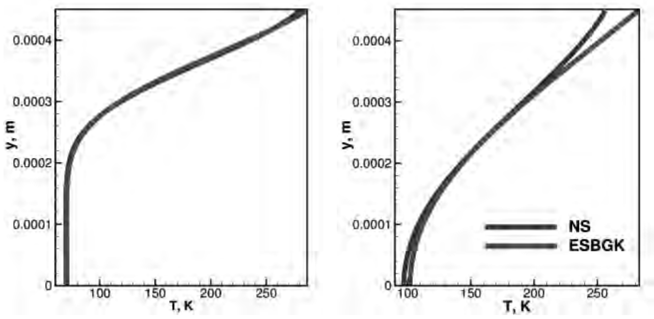


Figure 1 : Distribution of non-dimensional temperature across the nozzle in section x=0.0001 m.

As expected, in low pressure case, rarefaction effects are much stronger. Close to the nozzle exit, the velocity slip on the wall exceeds 20% of the velocity value on the nozzle centerline and the distribution function near the wall is far from the equilibrium one due to interference of incoming molecules and those are re-emitted by the wall surface (See Fig. 2).

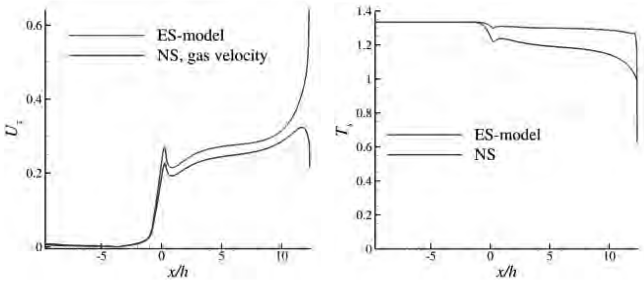


Figure 2 : Non-dimensional distributions of slip velocity and temperature on the nozzle surface, $\mathrm{Re}_h = 50$.

3. Achievements

All of the expected results were achieved during the project.

4. Summaries and future plans

Numerical simulations of the flow in a plane wedge-like micronozzle were performed using two approaches Navier-Stokes equations with velocity slip boundary conditions on the solid wall and model kinetic equation with the ellipsoid statistical model of collision term. For $\mathrm{Re}_h = 350$ a good agreement between continuum and kinetic approach was observed, except for the corner point near the nozzle exit. In case of lower Reynolds number $\mathrm{Re}_h = 50$ rarefaction effects become more pronounced and cannot be taken into account using velocity slip and temperature jump boundary conditions. Comparison of results shows significant discrepancies in flowfields and distributions of gasdynamic quantities across the nozzle.

The further development of the project is connected to practical applications of the supersonic micronozzles. One of such applications is the generation of high-speed collimated beams of microparticles used for printing solid materials on a substrate. It is well known that collimated beams can be successfully generated by subsonic (convergent) nozzles. Supersonic (convergent/divergent) nozzles could be used to create high-speed beams; however, in the supersonic part, flow streamlines are divergent. So the main goal of future studies is to evaluate the possibility of aerodynamic focusing in such nozzles. Numerical simulations will be performed using different continuum and kinetic approaches. Special attention will be paid to development of the two-phase hybrid code based on the continuum approach for modelling the gas flow inside the nozzle, the kinetic approach for modelling the gas flow outside the nozzle, and first-principle, fully kinetic module for the particulate phases.

5. Research results (* reprint included)

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

Not applicable.

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

*[1] Kaoru Maruta, Yevgeniy Bondar, Georgy Shoev, Anton Shershnev: Investigation of nozzle flows at low Reynolds numbers, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 96-97.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

Project code	J15074
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	new

Investigation of flame inhibition through radical scavenging mechanisms

Vladimir Gubernov*†, Kaoru Maruta**††
Valeri Babushok*, Taisia Miroshnichenko*,
Olga Larkina*, Nikolai Beliakov*,
Hisashi Nakamura**, Shogo Onishi**
*Engineering School, Far Eastern Federal University
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

(I) to introduce the models with gross chain-branching reaction mechanism describing the combustion of hydrocarbon fuels in microflow reactor and including the inhibition mechanism of radical scavenging and modification via the radical-wall interaction or reactions with inhibitor species; (ii) to investigate how these processes influence the flame speed, structure and stability and modify the flammability limits.

2. Details of program implement

We numerically study the effect of depletion of the radical concentration on the properties and stability of freely propagating flames with chain-branching reaction mechanism (Zeldovich–Barenblatt model) which is supplemented by additional stage of direct first order reaction of conversion of radicals into the products, which is aimed to mimic in very general manner various mechanisms of depletion of the radical pool.

It is shown that the properties of the planar deflagration waves directly depend on the rate of the radical sink reaction, k. The maximum values of the flame temperature and concentration of radicals as well as the burning velocity are found to be linearly correlated with k. Two types of critical phenomena related to the deflagration waves can be observed in the system: the loss of stability due to the onset of traveling or cellular instabilities and flame quenching due to the fold bifurcation. The influence of the radical sink reaction rate is manifested as the uniform shift of all critical parameters to smaller values of the activation energy with the increase of k. It is found that critical parameter values for the neutral stability boundary and fold bifurcation are less sensitive to the variation of k, than to the changes of the heat loss parameter.

The solutions emerging as the neutral stability boundary is crossed in the space of parameters are investigated. It is found that the pulsating or cellular combustion waves can be obtained for Lewis number greater or smaller than 1, respectively. These solutions are illustrated in Figure 1.

The results obtained during the work on the project were discussed and the plans of future investigation were outlined during the visit of the project research team members (V. Gubernov, V.Babushok, T. Miroshnichenko) to IFS in 2015. Project members took part in the 15th International AFI conference and presented the results of the project.

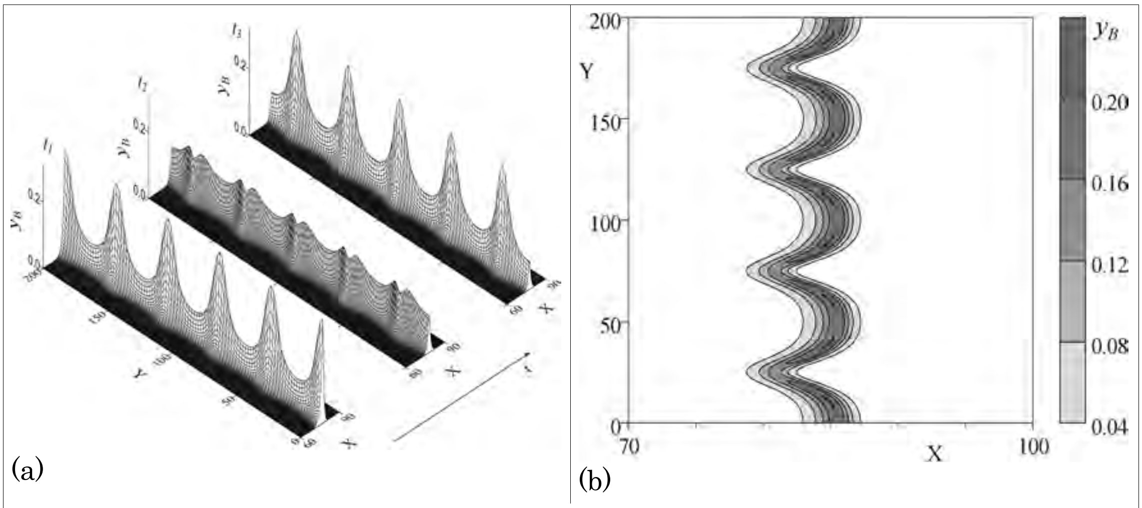


Figure 1 : The distribution of radicals in (a) pulsating wave and (b) cellular wave for for Lewis number for fuel equal to 10 and 0.7, respectively.

3. Achievements

The goals of the project are fully achieved. The generalized model was developed which describes the premixed hydrocarbon flame propagation and includes the process of depletion of radicals due to the interaction with reactor walls and/or the reaction with inhibitor. The role of different mechanisms of radical scavenging on the structure, properties and stability of premixed flames was studied based on this approach.

4. Summaries and future plans

The analysis undertaken in course of the current project allows to understand to which extend the depletion of radicals by various mechanisms affects the properties and stability of hydrocarbon flames. The future research will be aimed to include the details of specific type of fuel, inhibitor and experimental setup to make the direct comparison with experimental data possible.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] V.V. Gubernov, S.S. Minaev, V.I. Babushok and A.V. Kolobov, *J. Math. Chem.*, 53 (2015), pp. 2137-2154.

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

*[2] V. Gubernov, S. Minaev, V. Babushok, A. Kolobov, *Proceedings of Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), pp. 46-47.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J15075
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	3年目

バイオテンプレート法による大面積２次元高密度および分散型ナノ粒子エッチングマスク作製の理論解析
Development of bio-template process for realizing etching mask of 2D ordered or dispersed array of nanoparticle.

山下 一郎*，寒川 誠二**
*奈良先端科学技術大学院大学，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

これまで本提案チームは量子効果を利用したデバイスの開発を共同で実施している。具体的には、厚さ数ナノメータ半導体層を絶縁層もしくワイドギャプ半導体で挟むサンドイッチ構造を作製し、そのサンドイッチ構造の表面に球殻タンパク質フェリチンを用いて作製したナノ粒子マスクを配置する。その後ナノエッチングを実施して、半導体ナノディスク量子井戸を作製するものである。これまでに大型ウエファでの密度を制御されたナノ粒子のマスクを実現してきたが、今年度はフェリチン改質とウエファ表面の相互作用のシミュレーションを行い、スピンコート法で一層で、密度・間隔制御を行えるフェリチン 2 次元構造を作製する手法を開発することを目的とする。

2. 研究成果の内容

ナノエッチングによる量子効果素子実現には、20～50nm距離制御ナノ粒子配置マスクが必要となる。これまで外径12nmのナノ粒子内包フェリチンを用いてきたがタンパク殻厚が2nmと小さいため20～50nm距離配置はできない。そのため低相互作用のポリエチレングリコールを外表面に修飾して広間隔化を行った。奈良先端大でヒドロキシスクシンイミド（*N*-Hydroxysuccinimide: NHS）付加ポリエチレングリコールとフェリチン外表面のアミン残基との化学反応条件を検討し、分子量500から20,000の大分子量のPEG修飾に成功した。フェリチンの直径は分子量に比例して大きくなり（図１）、また東北大学と共同実施したPEG修飾フェリチンの半導体基板上展開により、間隔制御がPEG分子量により可能になることが示された（図２）。さらにランダム吸着のシミュレーションからフェリチン結合過程がランダム吸着家庭であることが示唆された（図３）。

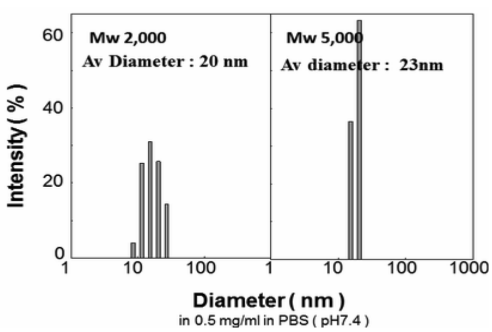


図１．分子量 2,000、5,000 のポリエチレングリコール修飾層を持つフェリチンの DLM 測定結果

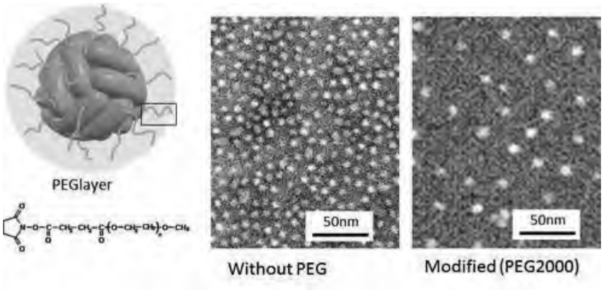


図２. ポリエチレングリコール修飾層を持ったフェリチンの模式図と分子量 2,000PEG 修飾によるフェリチン分子間距離の制御結果を示す SEM 像

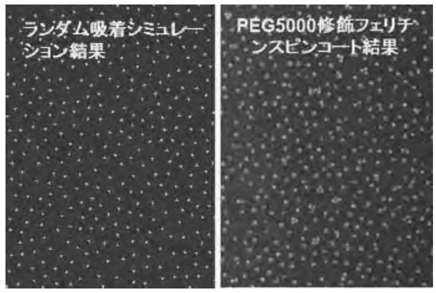


図３. フェリチンのランダム吸着のシミュレーション結果とスピンコート実験結果。両者はほぼ同等となった

3. 研究目標の達成状況

分子量2,000を超える大分子量ポリエチレングリコール修飾層を導入することで目標の50nmを超えるフェリチン粒子間距離制御に成功した。しかしながら長距離周期性を持つ配置は実現できなかった。吸着過程はシミュレーションによりランダム吸着過程であることが明らかになった。

4. まとめと今後の課題

単純な PEG 層に異方性を加える必要があることが示された。粒子間間隔の制御には PEG 修飾層が有効であることが実験的示された。シミュレーションより長距離周期性を実現するためには単純な PEG 層だけでは難しく、フェリチンサブユニットたんぱく質に対称性を反映した遺伝子改変が必要なことが示唆された。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

*[1] A. Higo, T. Kiba, Y. Tamura, C. Thomas, J. Takayama , Y. Wang, H. Sodabanlu, M. Sugiyama, Y. Nakano, I. Yamashita, A. Murayama, S. Samukawa : “Light-Emitting Devices Based on Top-down Fabricated GaAs Quantum Nanodeiks”, *Scientific Report*, **5**, (2015), pp. 9371.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Ichiro Yamashita, Naofumi Okamoto, Rikako Tsukamoto, Seiji Samukawa : “Development of bio-template for etching mask of 2D ordered/dispersed array of nanoparticle”, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 200.

[2] Yi-Chun Lee, A. Higo, C-Y. Lee, C. Thomas, T. Tanikawa, K. Shojiki, S. Kuboya, R. Katayama, T. Kiba, P. Yu, I. Yamashita, A. Murayama, S. Samukawa :“Fabrication of InGaN/GaN nanodisk structure by using bio-template and neutral beam etching process”, Nanotechnology (IEEE NANAO), Rome, (2015), pp 12787-1281.

[3] 菊池 亜紀応、八尾 章史、毛利 勇、中村 雅一、山下 一郎、澤野 憲太郎、寒川 誠二、小野 崇人: 「中性粒子ビームエッチング技術を用いた Si 量子ドットの作製と熱伝導特性」、第 76 回応用物理学周期学術講演会　名古屋国際会議場/名古屋、 9/14 (2015)、pp.08-068

[4] C. Thomas, C-Y Lee, Akio Higo, N. Okamoto, I. Yamashita, S. Samukawa : “InGaAs quantum dot fabrication by a top-down approach for optical devices applications: effect of nanoscale etching mask”, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学/平塚、3/14 (2015)、 pp. 07-120

[5] 肥後 昭男、木場 隆之、トーマス セドリック、王 云鵬、山下 一郎、杉山 正和、中野 義昭、村山 明宏、寒川 誠二、「バイオテンプレート極限加工による GaAs 量子ナノディスク LED の試作」、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学/平塚、3/11 (2015), pp. 12-278

その他（特許，受賞，マスコミ発表等） 該当なし

課題番号	J15076
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

プラズマ流による密閉小型容器内のウイルス不活化法の開発

Inactivation of virus by a plasma flow in a closed small vessel

佐藤 岳彦*†，押谷 仁**††
中嶋 智樹*，岡崎 和貴***
*東北大学流体科学研究所，**東北大学大学院医学系研究科
***東北大学大学院工学研究科
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

新型インフルエンザを始めとした新興感染症の発生や，医療機関におけるウイルスによる感染事故などは，健康を脅かす大きな社会問題となっている．近年，低温で発生するプラズマを利用した空気清浄機などが製品化されているが，これらの効果は未だ学術的に証明されているとは言えない．そこで，本研究では、低温プラズマ流によるウイルスの不活性化の効果について検証を行い，ウイルスへの感染リスク低減の可能性について明らかにすることを目的とする．

2. 研究成果の内容

平成 27 年度は，小型密閉容器内の細菌・ウイルス不活化装置の開発に取り組んだ．図 1 に実験装置の概略図を示す．電極構造は，石英ガラス管を誘電体として，中心にネジ状電極を通し，管外壁面にアルミテープ電極を巻き付けている．ガラス管は長さ 20 mm，外径 5.2 mm，内径 3.6 mm，ネジ状電極では長さ 20 mm，胴部 3.5 mm，先端の曲率半径 100 μm とした．また，電源部において家庭用電源から得た電圧を±3.1 kVpp，周波数 27 kHz の正弦波に増幅することで，ガラス管内で放電を発生させた．滅菌容器はコンタクトレンズケースを用いており，ふたの中心に穴をあけて電極を設置した．

表 1，2 に放電時間の違いに対する気中および水中における滅菌試験の結果を示す．気中の場合には，滅菌は 3 分で，水中の場合には 30 分で完了した．これは，放電により生成する O_2ー・，NO・，NO_2・および O_3が生成すると考えられる．また，気流を生成したことにより，化学輸送が促進され，滅菌効果が増加したと考えられる．水中では，酸化力の強い OH・，HO2・および ONOO-などが生成し、芽胞菌の損傷を促進し

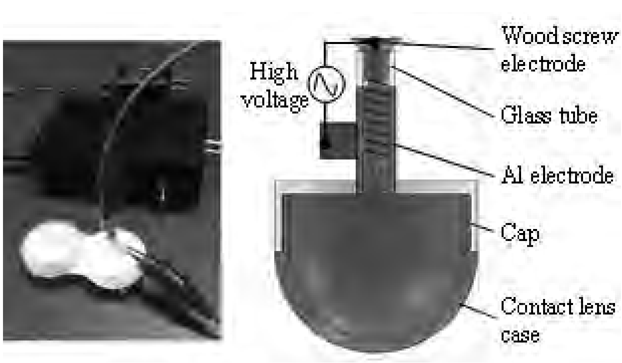


図 1 実験装置の概略

表１　気中における滅菌結果

	Discharge time [min]		
	1	2	3
Sterilization result	+++	+−−	−−−

表２　水中における滅菌結果

	Discharge time [min]		
	20	25	30
Sterilization result	+++	++−	−−−

ている可能性がある．気流の生成は，空中の電荷が静電気力により加速されることによると考えられる．また，予備的な実験としてウイルスの不活化の評価を行い，ウイルスの種類により不活化が可能であることを明らかにした．

3. 研究目標の達成状況

本年度は，目標とするプラズマによる細菌・ウイルスの不活化装置の開発と不活化の評価を行うことを目標としたが，概ねその目的を達成できた．特に，流れを生成することで効率的に不活化効果を高めることに成功した．

4. まとめと今後の課題

本年度は，予備的な実験でウイルス不活化の評価を行い，評価方法を確立することができた．今後は，ウイルス不活化の評価を開発したプロトコルに沿って行い，不活化の有意性を検証する予定である．また，開発した装置は窒素酸化物を利用した装置であるが，オゾンを主たる不活化ガス成分とする装置の開発にも取り組む予定である．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

該当なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] K. Okazaki, T. Sato, H. Oshitani, M. Okamoto, T. Nakajima and S. Fujimura, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI-2015),* Sendai, (2015), pp. 80-81.

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	J15077
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

ふく射要素法を用いたレーザー温熱治療に関する研究
A study of laser thermotherapy using radiation element method

櫻井　篤*†，圓山 重直**††，中村 勇友*，小宮 敦樹**，岡島 淳之介**，
*新潟大学工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では，金ナノロッド(GNR)による局在プラズモン共鳴を用いた局所がん治療への応用を目指す．そのため，光線放射モデルによるふく射要素法（以下 REM2）及び電磁波解析を用いて，生体内における光伝播を解析する．この方法と血流や代謝熱を考慮に入れた生体伝熱方程式と結合させることによって，レーザー温熱治療時における複雑な生体内伝熱現象について定量的評価を行っていくことを目的とする．

2. 研究成果の内容

本研究では，生体内の光多重散乱や GNR によるプラズモン加熱，体内の血流や代謝熱を考慮した複合伝熱解析を考慮し，レーザー治療時の複雑な生体内伝熱解析を行った．まず，伝熱工学的観点から生体内の伝熱現象を評価するために，光線放射モデルによるふく射要素法 REM^2 と Pennes の生体伝熱方程式を用いたふく射伝導伝熱複合解析のモデル化を行った．GNRs を用いた生体組織へのレーザー照射を想定した数値計算を行い，GNRs の有無，また GNRs を用いたレーザー治療における数密度などの様々なパラメータを変更し，その時の生体組織内の熱流束分布，温度分布の変化について評価した．図 1 および図 2 にはレーザー治療において GNRs の有無による計算結果の比較を行った．GNRs の注入は熱流束の全体的な上昇をもたらし，短い照射時間で局所加熱が可能であることがわかった．

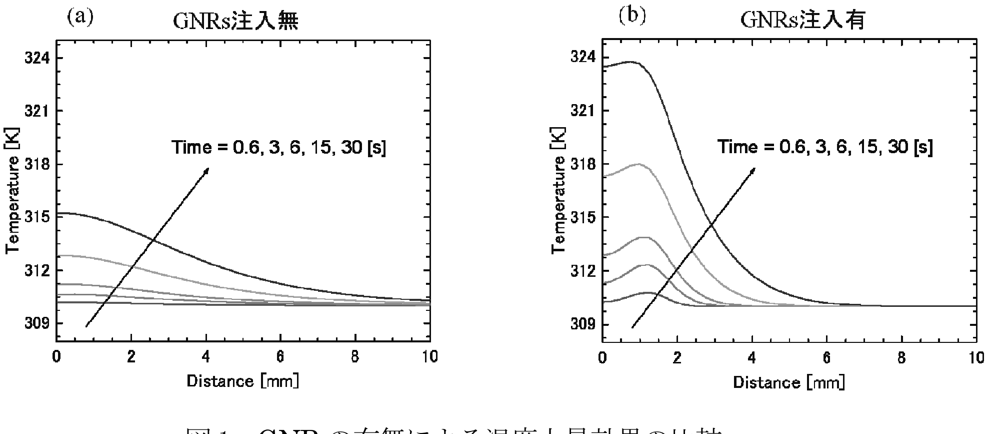


図 1：GNR の有無による温度上昇効果の比較

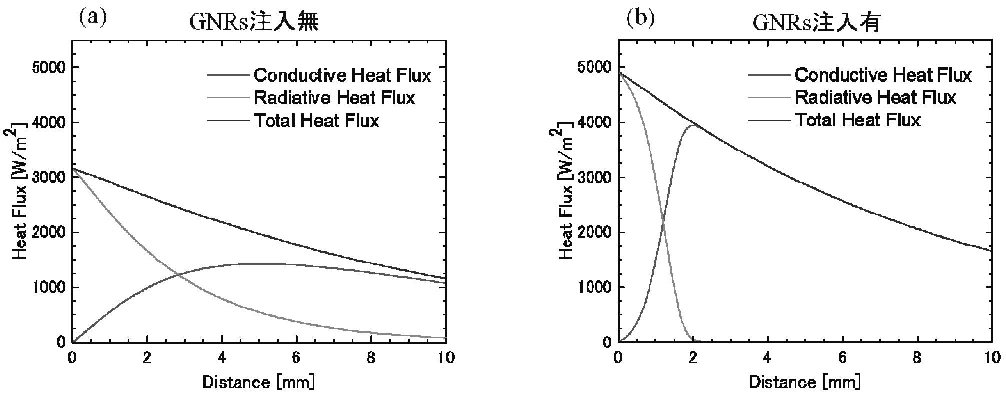


図２：GNR の有無による伝導熱流束，ふく射熱流束，全熱流束の比較

3. 研究目標の達成状況

これまでにレーザーの過照射による火傷などといった治療ミスを減少させるため，生体伝熱現象の数値予測モデルの開発を行ってきた．またプラズモン加熱を用いた局所レーザーがん治療についても検討を重ねてきており，現在までに１次元生体伝熱モデルによってプラズモン加熱を含む様々な状況を考慮して生体伝熱現象を明らかにしている．

4. まとめと今後の課題

本研究では，レーザー治療時における生体伝熱現象の解明と新たな治療法について検討してきた．今後は，これまでに開発してきた１次元生体伝熱モデルを３次元に拡張し，またプラズモン加熱のより詳細なモデル化により，高効率な局所加熱法の検討を行いたいと思っている．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] A. Sakurai, Y. Sato, A. Komiya, J. Okajima, Y. Nakamura and S. Maruyama: Coupled Photon and Bioheat Transport Simulation for Laser Induced Photothermal Therapy, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Flow Dynamics,* Sendai, (2015), p. OS7-4 (2 pages).

*[2] T. Sugiura, T. Okabe, J. Okajima, A. Komiya, Y. Nakamura, A. Sakurai , V. Timchenko, T. Kodama and S. Maruyama: Experimental and Numerical Investigations of Local Heating of Biological Tissue for Laser Therapy, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), pp. 64-65.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15078
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

固液界面熱抵抗の分子動力学的研究
Molecular Dynamics Study on Thermal Resistance of Solid-Liquid 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．マクロな熱流体力学においては，界面における熱輸送特性を定量化するための概念として，界面における温度ジャンプと熱流束との比として与えられる熱抵抗が広く用いられており，超電導マグネットのクエンチなど従来から存在する応用上の問題に加えて、高発熱機器からの熱回収・放熱問題に関連して、様々な応用研究が始まっており、これを制御するための TIM（界面熱材料）など関連分野も萌芽期を迎えつつある。固液界面の熱抵抗では、固体－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，分子動力学シミュレーションにより，(1)ナノメートルスケールの構造をもつ界面，(2)分子スケール＝結晶格子スケールの構造をもつ界面，の両面からこの問題にアプローチを試みた．(1)では，ナノ加工による溝構造の幾何形状と濡れ性，系の圧力が界面近傍の熱抵抗およびエネルギー輸送機構に及ぼす影響を調べるために，非平衡分子動力学シミュレーション（NEMD）を用いて，界面近傍のエネルギー伝搬の機構を調べた．(2)では，結晶格子スケールの構造をもつ固体結晶表面において形成される特異な液体構造における熱輸送特性を解析した．

2. 研究成果の内容

<u>(1)ナノ構造化界面</u>　　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 Lennard-Jones 粒子を仮定し，平行に配置された固体層で液体領域を挟んだ計算モデルを用いた．本モデルに対して液体領域中心部の圧力を変化させた場合に，表面に付着する溝状微細構造の間隔 L や高さ h，固液間相互作用強さ α が固液界面熱抵抗にどのような影響を与えるかを調べた．図 1 は，フラット な界面（$L = h = 0$）と溝状微細構造を有する界面における固液界面熱抵抗の圧力依存性を

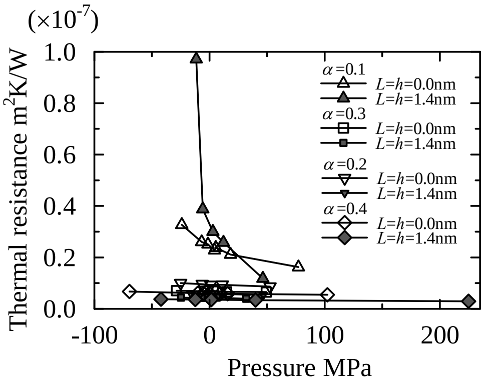


図 1: フラット界面およびナノ構造化界面における系内圧力と固液界面熱抵抗の関係

示す．図 1 より，固液界面熱抵抗と圧力は負の相関があること，αならびに溝状微細構造の有無によって，固液界面熱抵抗の圧力依存性が大きく異なること，αが小さく溝状微細構造が存在する場合に固液界面熱抵抗の圧力依存性が最大となること，などが分かった．

<u>⑵結晶格子界面</u>　α-quartz 構造の(001), (011), (100)の各結晶面がシラン基およびシラノール基で末端修飾された表面と液体メタンとの間の固液界面を再現する分子動力学計算系を構築し，界面に垂直な熱流束を印加して熱輸送特性を解析した．図 2 に固液界面近傍の液体が示す局所的な熱伝導率を示す．固液界面領域の吸着構造において液体分子の粗密が空間的に生じて密度が振動するのに伴って，熱伝導率も振動を示している．この局所熱伝導率と局所の密度の関係をプロットしたのが図 3 である。両者には強い相関が認められる．局所熱伝導率の局所密度依存性は多くの場合にバルク液体における熱伝導率の密度依存性に類似しているが，密度 550 kg/m^3 付近に見られる第一吸着層だけは、密度の割には熱伝導率が高くなっていない．固体壁面から強い拘束を受けて効率的なエネルギー伝搬が行われていないものと考えられる。

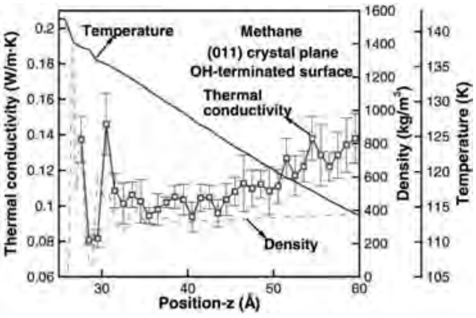


図 2: SiO_2 固体壁に接する液体メタンの局所熱伝導率．最左端の密度ピークが液体分子の固体表面における吸着層．

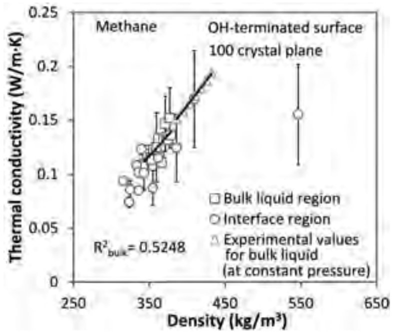


図 3: 液体メタンの局所熱伝導率と密度の関係

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特性を明らかにした．

4.　まとめと今後の課題

今後は，固体表面構造と固液界面領域の熱抵抗の相関やスケールの変化に伴う支配メカニズムの変移，さらに固液界面の複合的な重畳効果について、さらに研究を発展させたい．

5.　研究成果（*は別刷あり）

1）　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] M. Shibahara, R. Toda, Y. Ueki and T. Ohara, Molecular Dynamics Study on Influences of Slit Structures on Thermal Resistance and Energy Transport Mechanism at a Liquid-Solid Interface, Proc. of the First Pacific Rim Thermal Engineering Conference, Hawaii, USA, March 13-17, (2016) PRTEC-14385.

[2]* Hari Krishna Chikukoti, G. Kikugawa, M. Shibahara and T. Ohara, Local thermal transport of liquid alkanes in the vicinity of α-quartz solid surfaces and thermal resistance over the interfaces: A molecular dynamics study, Physical Review E, Vol. 91 (2015), 052404.

2）　国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] M. Shibahara, T. Ohara and G. Kikugawa, Molecular Dynamics Study on Thermal Resistance of Solid-Liquid Interfaces, Proc. 15th Int. Symp. Advanced Fluid Information, Sendai, 2015.

[2] 芝原正彦，戸田亮平，植木祥高，小原拓，スリット状微細構造が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響に関する分子動力学的研究，第 52 回日本伝熱シンポジウム，福岡，2015 年 6 月．

3）　その他（特許，受賞，マスコミ発表等）　なし

Project code	J15079
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	3nd year

Study of thin films and ribbons of Heusler alloys for the use in energy saving magnetic refrigeration technology

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

*National University of Science and Technology "MISiS"
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
***Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University
****Physical-Technical Institute, Immanuel Kant Baltic Federal University
*****Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University
******Chelyabinsk State University
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Purpose of the project is experimental study of structural, mechanical and magnetic properties of melt-spun ribbons of X_2MnAl (X = Ni, Fe) based Heusler alloys. Alongside with magnetic properties, mechanical properties (ductility, internal friction, elastic modulus) which are of considerable importance for practical applications, will be evaluated in wide ranges of temperatures and external stresses.

2. Details of program implement

During the last year, the research was focused on the theoretical study of the influence of different martensite aging mechanisms on features of martensitic transformations and on experimental evaluation of structural, transport and magnetic properties of NiMnIn and NiMnAl-based melt spun ribbons.
The results obtained on the Ni-Mn-In films indicated that the transport properties of the thin films strongly depend on the structural ordering of the films. Specifically, annealing converts the semiconducting-like character of the resistivity into that typical for metals. This is due to annealing-induced crystallization of the as deposited films which are in partially amorphous state. In both the as-deposited and the annealed thin films the field dependence of the resistivity is negative, which is typical for thin films of Heusler alloys and can be ascribed to the suppression of the spin disorder scattering.
The influence of Co alloying on transport properties of Ni-Mn-Al melt-spun ribbons was investigated. Results of electrical resistivity measurements showed that $Ni_{50}Mn_{31}Al_{19}$ and $Ni_{45}Co_5Mn_{32}Al_{18}$ samples exhibit a temperature hysteresis of the electrical resistivity which was attributed to a first order martensitic transformation while no hysteresis was observed in $Ni_{40}Co_{10}Mn_{33}Al_{17}$ sample. Measurements of the Hall effect indicated that the Co alloying leads to an increase of carrier mobility.
Aging-induced changes in the features of the calorimetric peak accompanying martensitic transformation were considered in the framework of phenomenological theory. Taking into account two different mechanisms of martensite aging, it was demonstrated that the domination of the internal axial stress contribution narrows the

calorimetric peak and elevates its magnitude, while the prevalence of the internal pressure contribution broadens the calorimetric peak (Fig.1).

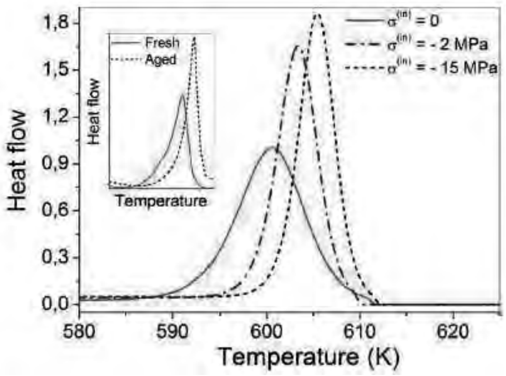


Figure 1: Effect of internal axial stress on the temperature dependence of heat flow.

3. Achievements

The main achievements can be summarized as follow.
First, structural, transport and magnetic properties of NiMnIn and NiMnAl-based melt spun ribbons were evaluated. Second, a phenomenological theory for description of aging-induced changes in the features of the calorimetric peak accompanying martensitic transformation was developed.

4. Summaries and future plans

In summary, we have studied experimentally structural, transport and magnetic properties of melt-spun ribbons of Heusler-based alloys and developed a theoretical model for description of aging-induced changes in the features of the calorimetric peak accompanying martensitic transformation.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] M.V. Lyange, M.V. Gorshenkov, A.V. Bogach, M. Ohtsuka, H. Miki, T. Takagi, and V.V. Khovaylo: Structural and transport properties of $Ni_{45}Mn_{40}In_{15}$ thin films, *Solid State Phenom.*, 233-234 (2015), pp. 670 – 673.

*[2] A. Kosogor, M. Lyange, M. Zadorozhnyy, H. Miki, T. Takagi, V.A. L'vov and V. Khovaylo: Influence of different mechanisms of martensite aging on the features of martensitic transformations, *Phys. Status Solidi (b)* 252 (2015), pp. 2758 – 2761.

*[3] M. Seredina, M. Lyange, V. Khovaylo, S. Taskaev, H. Miki, T. Takagi, R. Singh, R. Chatterjee, and L. K. Varga: Electric resistivity and Hall effect of Ni(Co)-Mn-Al melt spun ribbons, *Mater. Sci. Forum* 845 (2016), pp. 65 – 68.

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

[4] V. Khovaylo, M. Lyange, A. Konovalov, M. Seredina, H. Miki, T. Takagi, R. Chatterjee, L.K. Varga: Transport Properties and Hall Effect of Ni(Co)-Mn-Al Melt-Spun Ribbons, *12th International Conference on Flow Dynamics* (2015), p. 144.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J15080
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	1st year

Measurement-integrated analysis methodology for complex flow systems

Toshiyuki Hayase*†, Luca Brandt**††
Kosuke Inoue*, Shervin Bagheri**, Fredrik Lundell**
*Institute of Fluid Science, Tohoku University
*** Mechanics, Royal Institute of Technology KTH
†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The collaborative research project aims to establish a measurement-integrated analysis methodology applicable to complex flow systems. It is important to exactly reproduce complex real flows in many situations, such as clarification of blood flow phenomena in a living body and estimation of flow states in turbulent flow control, but existing method of measurement or numerical simulation cannot solely solve the problem. International collaboration is performed to investigate the measurement-integrated analysis methodology and apply the method to several flow-related problems to confirm its validity.

2. Details of program implement

International collaboration is performed to apply the novel fluid-structure analysis and data assimilation schemes of KTH to the measurement-integrated (MI) simulation of IFS.

Target problems of the proposed project are 1) interaction between a red blood cell and endothelial cells on a blood vessel wall and 2) analysis method for a turbulent flow in a hybrid wind tunnel.

IFS side has the numerical analysis code for MI simulation, and experimental apparatus of the inclined centrifuge microscope (ICM) and the hybrid wind tunnel (HWT). The frictional characteristics of erythrocytes moving on a cultured endothelial monolayer on a glass plates can be measured by ICM. A turbulent flow behind a square cylinder can be analyzed by MI simulation with HWT.

KTH side has been developed a simulation code for fluid-structure simulation based on an accelerated Edwald method for Stokes flow coupled to a spectral solver for the deformation of an elastic membrane. KTH side has strong research activities in flow control problems including data assimilation methods.

As preparation of this proposal, members of both sides visited counterpart institutions and discussed about the collaboration.In the case of Conferential Collaborative Research Project, outlines, date and scale of a conference should be mentioned here.)

3. Achievements

1) Establishment of measurement-integrated analysis methodology applicable to complex flow systems, 2) clarification of the interaction between a red blood cell and endothelial cells on a blood vessel wall, and 3) establishment of the analysis method

for a turbulent flow in a hybrid wind tunnel.

4. Summaries and future plans

The measurement-integrated analysis methodology for complex flow systems was established. The three-dimensional fluid-structure interaction analysis was performed using the biconcave elastic erythrocyte model for the clarification of the interaction between the erythrocyte and endothelial cells. For future, the method developed in this collaborative project will be applied to practical problems. The typical examples are a high Reynolds flow around a car for the optimal design and a complex flow in an aorta aneurysm for early detection.

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] Toshiyuki Hayase, Suguru Miyauchi, Kosuke Inoue, Luca Brandt, Shervin Bagheri, and Fredrik Lundell, Measurement-Integrated Analysis for Complex Flow Systems, Abstract book of China-Japan Joint Workshop on Flow Dynamics and Transport Phenomena, Tsinghua University, (2015-6-23) 1-2.

[2] Akira Yatsuyagagi, Toshiyuki Hayase, Suguru Miyauchi, Kenichi Funamoto, Kosuke Inoue, Atsushi Shirai, Luca Brandt, Fundamental Study of Interaction between Erythrocyte and Endothelial Cell under Inclined Centrifugal Force (Physical Explanation of Interaction Model), Proceedings of Twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), (2015-10-28) 320-321.

*[3] Toshiyuki Hayase, Suguru Miyauchi, Kosuke Inoue, Luca Brandt, Shervin Bagheri, Fredrik Lundell, Measurement-Integrated Analysis Methodology for Complex Flow Systems: Collaborative Research Overview, Proceedings of 15th International Symposium on Advanced Fluid Information, AFI-2015, (2015-10-28) 110-111.

[4] Toshiyuki Hayase, Kohei Kawamoto, Suguru Miyauchi, and Kosuke Inoue, Measurement-Integrated Simulation of Turbulent Flow Behind a Square Cylinder, Abstract Book of International Workshop on Flow Dynamics and Spintronics, KTH, Stockholm, (2015-11-12) 8. (invited)

[5] Suguru Miyauchi, Toshiyuki Hayase, Luca Brandt, Fredrik Lundell, Shervin Bagheri, Two-dimensional simulation of interaction between solid wall and capsule in fluid under centrifugal force field, Abstract book of International Workshop on Flow Dynamics and Spintronics, (2015-11-13) 22.

[6] 川本航平，早瀬敏幸，宮内優，井上浩介，Luca Brandt，Shervin Bagheri，Fredrik Lundell,ハイブリッド風洞による角柱後流乱流場の再現,日本機械学会東北支部第 51 期総会・講演会講演論文集(USB), No. 2016-1 (2016-3-11) 43-44.

3) Patent, award, press release etc.

not applicable

課題番号	J15081
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	3 年目

温熱治療における局所加熱法の理論的・実験的研究
Theoretical and Experimental Studies of Local Heating Method in Hyperthermia Treatment

圓山 重直*†，Victoria Timchenko**††，小玉 哲也***，小宮敦樹*，岡島淳之介*
*東北大学流体科学研究所
**School of Mechanical and Manufacturing Engineering, UNSW
***東北大学医工学研究科
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では，ハイパーサーミアを見込むレーザー治療において，生体組織内の局所的な加熱手法を伝熱現象の観点から定量的に評価し，提案する．当研究グループで開発したふく射要素法を用いて，レーザーによる生体加熱機構，および生体表面を任意の手段で冷却した際の生体伝熱機構の双方を評価する．また，提案する生体内の局所加熱手法の効果を評価するために，実際の治療および動物実験を見越した冷却装置を設計する．

2. 研究成果の内容

図 1 に本研究で用いた実験装置を示す．実験用マウスのリンパ節表面を冷却しながら，波長 1064nm のレーザーで加熱が可能である. 動物実験では金ナノロッド(3.6×1012 NRs/mL)を週齢 11-13 のオスのマウスの腋窩リンパ節へ 30 μL 局所注入し，実験を行った．実験では，皮ふ表面温度が 45℃を大きく超えないよう監視し, 必要に応じてレーザーの照射エネルギーを微調整した. 冷却水の温度は実測で 12℃のものを用いた. レーザー照射条件はビーム半径 3mm, 波長 1064 nm の連続発振とした.

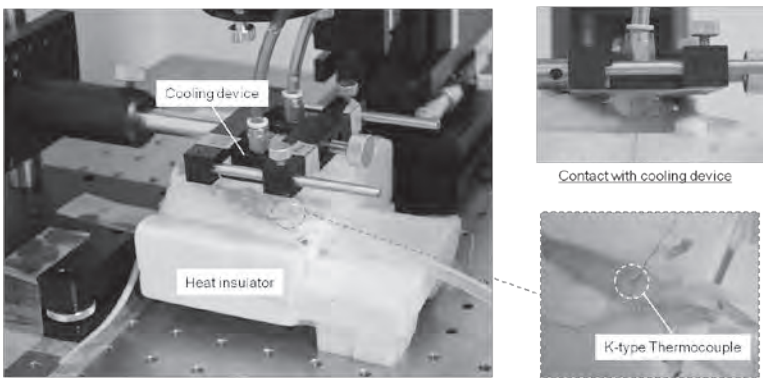


図１　実験装置外観

図 2 はレーザー治療後の腫瘍細胞からの発光強度の経時変化である。金ナノロッドを併用した治療群および非併用群は 1 回目のレーザー照射後である day 4 で発光強度の増加がコントロール群と比べて抑えられている．その後，2 回目のレーザー照射を行った後の day 5 では金ナノロッド

を併用した治療群は発光強度が減少した．金ナノロッドの非併用群においても発光強度の増加は抑えられているが，併用群の方がその度合いは大きい．

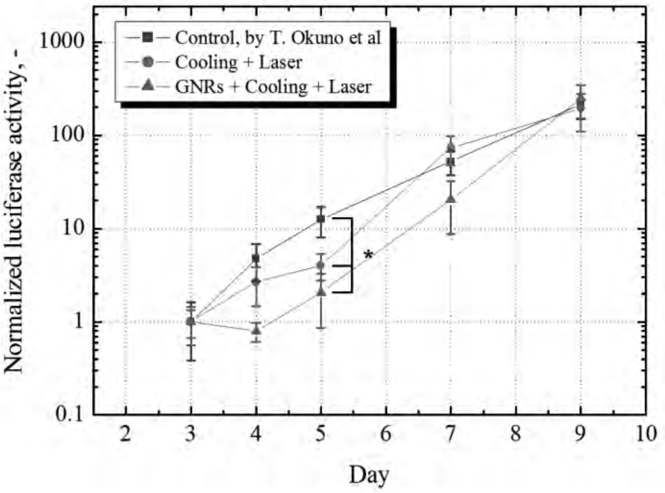


図２　レーザー治療後の腫瘍細胞からの発光強度の経時変化

3.　研究目標の達成状況

生体内の温度制御を行うための手法・装置を提案し，動物実験を行った．ハイパーサーミアにおいて，レーザーで病巣のみを局所的に加熱・破壊する治療法は未だ確立されていない．本研究が提案する手法は，実用化に向けて高い期待が持てる．以上，本年度の研究は 100%達成できたといえる．

4.　まとめと今後の課題

ハイパーサーミアを見込む生体組織内の局所的な加熱手法を，伝熱現象の定量評価により提案した．今後はより効果的な腫瘍の焼灼に向けて，ふく射伝熱の観点から加熱手法を検討する．

5.　研究成果（*は別刷あり）

1)　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] T. Sugiura, T. Okabe, J. Okajima, A. Komiya, Y. Nakamura, A. Sakurai, V. Timochenko, T. Kodama, and S. Maruyama, Experimental and Numerical Investigations of Local Heating of Biological Tissue for Laser Therapy, *Proceedings of the 15th International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2015), pp. 64-65.

2)　国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] T. Sugiura, T. Okabe, J. Okajima, A. Komiya, Y. Nakamura, A. Sakurai, V. Timochenko, T. Kodama, and S. Maruyama, Experimental and Numerical Investigations of Local Heating of Biological Tissue for Laser Therapy, *Proceedings of the 15th International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2015), pp. 64-65.

[3] D. Matsuki, J. Okajima, A. Komiya, S. Mori, S. Maruyama, and T. Kodama, Combined Application of Photo-thermal Therapy and Water-cooling System for Treatment of Tumor-bearing Lymph Nodes, *Proceedings of 12th International Conference on Flow Dynamics*, (2015), pp. 370-371.

3)　その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

特に無し

課題番号	J15082
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	新規１年目

ナノ・マイクロ構造によるふく射制御に関する研究
Study on Radiation Transfer Control by Nano-Micro Structure

圓山 重直*†，Vaillon Rodolph **††，Bong Jae Lee ***，小宮敦樹*，岡島淳之介*
*東北大学流体科学研究所
** INSA Lyon・UCBL
*** Korea Advanced Institute of Science and Technology
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では，ナノ・マイクロ構造により，可視域から近赤外領域に至るふく射特性制御に関する実験的・解析的知見を得ることを目的とする．マイクロサイズの複合粒子群を用いて波長選択性を有する機能性膜を製作し，分光光度計を用いてふく射制御塗料を塗布した基板のふく射特性を評価する．

2. 研究成果の内容

複数材料のナノ・マイクロ粒子群を含んだふく射制御塗料の反射特性を評価した．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粒子の評価・選定を行った．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 に作成した塗料を塗布した基板の写真を示す．複合粒子の基板の見た目は黒色を呈しており，CuO 基板の見た目とそれほど変わらない．

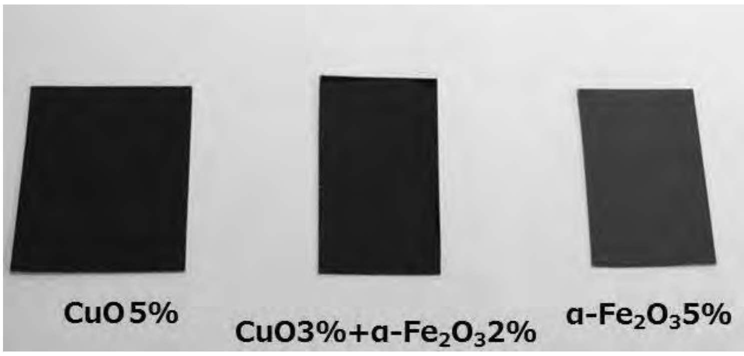


図１　作成したふく射制御塗料の写真

図 2 に図 1 で示した基板の分光反射率を示す．可視光領域において Fe2O3 は特徴的なピークを持っており，それが赤色の原因となっている．一方で CuO は可視光領域で反射率が低く、黒色を示すことが示されている．複合粒子の基板は可視光領域の分光反射率が CuO 基板のものと同様の傾向が示された．つまり同様の色を持っていることが示されている．一方，近赤外光領域においては，複合粒子の反射率は CuO 単独よりも高くなっていた．近赤外光の反射率の増加は，

基板が吸収する熱エネルギーを低減することになり，省エネルギー化を意味する．この結果から，複合粒子を用いた塗料のふく射特性の制御性が示され，粒子の種類や分率を変化させることで更なる性能向上が期待できる．

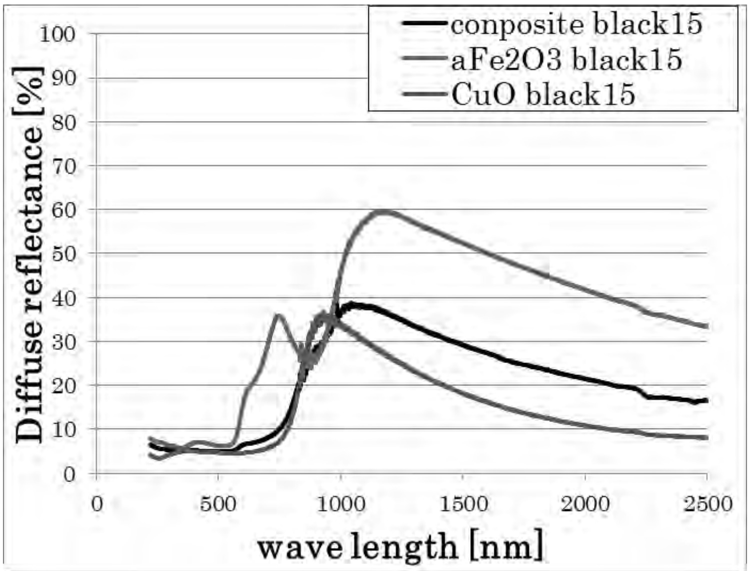


図２　作成したふく射制御塗料の分光反射率

3. 研究目標の達成状況

本年度に実施した実験では，マイクロ粒子の材料選定とその混合率で，ふく射特性が大きく異なってくることを実験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

マイクロ/ナノ構造による発現するふく射特性制御について実験および解析を推進し，マイクロ粒子を利用したふく射制御塗料によるふく射制御を行った．そこから，学術的な基礎を構築するとともに，応用へ展開する足がかりを得る．これらの成果により太陽ふく射の有効利用や省エネルギー技術への展開を目指す．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

なし

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15083
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	新規 1 年目

がん治療および診断のための生体伝熱解析
Bioheat transfer analysis for cancer treatment and diagnosis

圓山 重直*†，Mishra SubhashChandra **††，Koushik Das **，Snehasish Panigrahy **，小宮敦樹*，岡島淳之介*
*東北大学流体科学研究所
**School of Mechanical and Manufacturing Engineering, UNSW
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では，がんの早期発見や低侵襲治療のための生体伝熱解析を行う．がん組織特有の生体伝熱特性や熱物性値を考慮し，理論的に新たな治療・診断方法を検討する．

2. 研究成果の内容

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

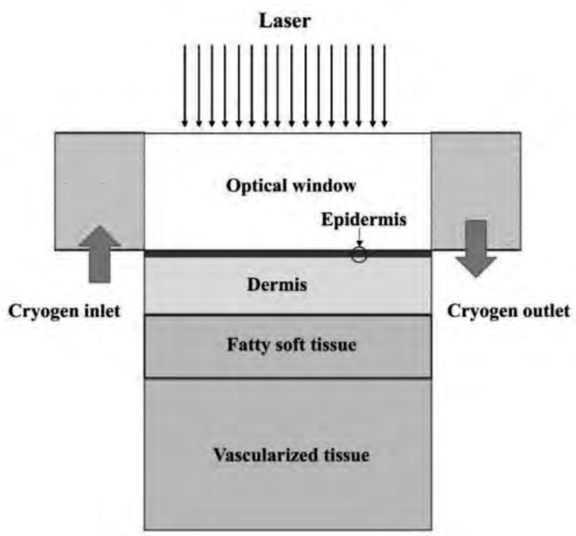


図 1　解析モデル

図２に計算結果を示す．生体組織内に温度のピークがあるのが確認できた．また生体組織内の多層構造を考慮したことにより，単層の生体組織とは異なった温度分布を取ることが明らかになった．温度分布が極小値を持つのは脂肪組織の影響と考えられる．

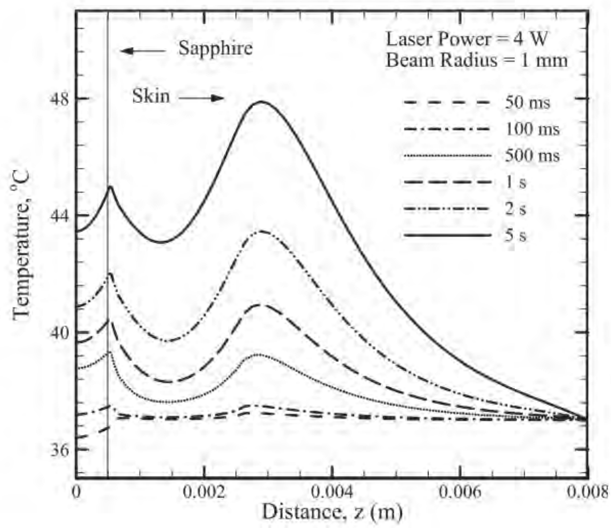


図２　生体組織内の温度分布

3.　研究目標の達成状況

がんの早期発見や低侵襲治療のための生体伝熱解析により多層構造を有した生体組織内の非定常温度分布を評価し，医療応用への展開を行った．当初目的としていた定量的な温度分布評価は達成された．

4.　まとめと今後の課題

ガンの早期発見や早期治療は重要な課題であり，熱を利用した新たな診断手法や治療方法を提案し，有効性を検証することで大きな成果が期待できる．それを通じて，生体伝熱の基礎過程の解明や，熱物性データの蓄積が期待できる。

5.　研究成果（*は別刷あり）

1)　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] R. Singh, K. Das, J. Okajima, S. Maruyama, and S. C. Mishra, Modeling skin cooling using optical windows and cryogens during laser induced hyperthermia in a multilayer vascularized tissue, *Applied Thermal Engineering*, 89(2015), pp. 28-35.

2)　国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] K. Das, S. C. Mishra, J. Okajima, and S. Maruyama, Non-Invasive Detection of a Tumor in a Human Breast, *Proceedings of the 15th International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2015),　pp. 66-67.

3)　その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

特に無し

Project code	J15085
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	3rd year

Analysis of transport phenomena of oxygen ion in solid oxide fuel cell materials

Takashi Tokumasu*†, Jeongmin Ahn**††
* Institute of Fluid Science, Tohoku University,
** Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Syracuse University
†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

For electrode materials of solid oxide fuel cell, the key properties are mixed ionic and electronic conductivity (MIEC) that allows oxygen to permeate through the material at various conditions. A conducting perovskite-type oxygen-permeable membrane reactor has shown promising results, but requires more extensive evaluation concerning MIEC properties. In order to evaluate the oxygen ionic conductivity, the membrane was investigated by both experiment and simulation. From these results, we suggest a new concept of fuel cell membrane which has high ion conductivity.

2. Details of program implement

In regard to the simulation analysis, a Molecular Dynamics (MD) simulators were constructed for $SrSc_xCo_{1-x}O_{3-\delta}$ and $La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_{3-\delta}$ membrane. The structures of fuel cell membrane and temperature dependence of diffusion coefficient were compared with those of experimental data. Moreover, activation energy for the oxygen ion migration in the membranes was evaluated by Nudged Elastic Band method. From these results, we have confirmed that the activation energy changes with the structure of membrane and the activation energy of $LaCoO_3$ membrane shows the lowest value.

Experimental procedures have also been implemented to further characterize the oxygen diffusion through the newly developed material $SrSc_{0.1}Co_{0.9}O_{3-\delta}$ (SSC). The oxygen chemical diffusion coefficient was calculated using an electrical conductivity relaxation technique (ECR); electrical conductivity was measured and monitored over time at a set temperature, ranging from 600°C to 800°C on increments of 50°C, and initially in an air environment (P_{O2} = 0.21 atm). Nitrogen was then fed into the environment, abruptly reducing the oxygen concentration in the atmosphere, and the change in electrical conductivity was monitored to calculate the chemical diffusion coefficient. Although the chemical diffusion coefficient was found at desired temperatures, the constructed simulation concentrated on finding the self-diffusion coefficient, a coefficient similar to chemical diffusion directly related by a thermodynamic factor.

In order to calculate the thermodynamic factor, a thermogravimetric analysis (TGA) was used. SSC samples were heated at the same temperature used for the electrical conductivity relaxation techniques and the surrounding atmosphere was modified to control the total oxygen concentration. After the material's mass stabilized in an air environment, enhancing the oxygen content present in the perovskite material, nitrogen was fed into the TGA, modifying the materials oxygen concentration and total mass. After the material's mass reached equilibrium ($\pm$5μg), the total concentration of oxygen in the material could be determined, allowing the thermodynamic factor to be calculated using equation below:

$$\gamma = \frac{1}{2} \times \frac{\partial P_{O2}}{\partial lnC_{O2}}$$

where P_{O2} is the oxygen partial pressure and C_{O2} is the concentration of oxygen in the material.

3. Achievements

As for the simulation analysis, we have found that activation energy for the oxygen ion diffusion varies with the configuration of dopants and vacancies and $LaCoO_3$ membrane shows the lowest activation energy which means the oxygen ion is most mobile in this membrane. The experimental results from TGA experiment were complimentary with self-diffusion coefficients calculated from the constructed model, with most values nearly matching at high temperatures (>700°C). At lower temperatures close to 600°C however, there was some discrepancies in the data, since diffusion coefficients can be difficult to determine due to limited ion mobility. Still, the work done demonstrates the progress made towards examining oxygen diffusion, and ultimately ion conductivity using Nernst-Einstein relation, of newly developed MIEC materials.

4. Summaries and future plans

As for the simulation analysis, there are quantitative disagreements between MD results of oxygen ion diffusion coefficient and that of the experimental data. To address this issue, the simulation will be performed in a condition close to that of experimental analysis. On this condition, charge of the oxygen migration path and the correlation between activation energy of oxygen ion diffusion and configuration of membrane will be analyzed. Although some of the calculated self-diffusion results were similar for some values, the experimental results only examine a limited range of temperatures signifying a need to not only modify experimental procedure while examining diffusion values at low temperatures, but also investigate at higher temperatures on smaller increments. Future work will focus on implementing these examinations using ECR and TGA. In doing so, the established trends determined from the experimentation and modeling side become more-well defined and a more accurate comparison can then be made.

5. Research results

1) Journal

[1] Ryan Falkenstein-Smith, Pingying Zeng, and Jeongmin Ahn: Investigation of oxygen transport membrane reactors for oxy-fuel combustion and carbon capture purposes, *Proceedings of the Combustion Institute*, (2016) *in press.*

[2] Pingying Zeng, Kang Wang, Ryan Falkenstein-Smith, and Jeongmin Ahn: A ceramic-membrane-based methane combustion reactor with tailored function of simultaneous separation of carbon dioxide from nitrogen, *Journal of Fluid Science and Technology*, (2016) *in press*.

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

[1] Hiroki Nagashima , Takashi Tokumasu, and Jeongmin Ahn: Analysis of transport phenomena of oxygen ion in an electrolyte of solid oxide fuel cell, Twelfth *International Conference on Fluid Dynamics*, (2015), CRF-60.

[2] Ryan Falkenstein-Smith and Jeongmin Ahn: Perovsite reactor membranes for Oxy-fuel combustion processes, Twelfth *International Conference on Fluid Dynamics*, (2015).

課題番号	J15089
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

各種基板上のカーボン系薄膜成長における量子・分子論的解析
Quantum Molecular Analysis for growth of carbon related thin films

徳増 崇*†，須藤 理枝子**††
金子 智***，安原 重雄****
*東北大学流体研究所，**さがみはら表面技術研究所
神奈川県産業技術センター，*ジャパン・アドバンスド・ケミカルズ
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、シリコン基板をはじめとする各種基板上でのカーボン系薄膜の成長プロセスを密度汎関数法や分子動力学法などの数値シミュレーションにより解析し、そのナノスケールのメカニズムを把握する。流体科学研究所のスーパーコンピュータを活用して、シリコン基板のほか各種酸化物基板上でのカーボン分子の安定性について、表面周期モデルを用いることで理論的考察・評価を行う。具体的には以下の点について研究を進めていく。

・分子力場シミュレーションによる原子・分子の安定性の評価
・酸化物基板表面におけるキンクまたはステップでのカーボン原子の振る舞いによる、カーボンリボンなどの新規機能性材料の可能性の探査
・密度汎関数理論(DFT)による最安定結晶構造の探査

これらの知見により、カーボン系薄膜成長に適した基板種と表面構造の選択を行う。また、得られた結果を所外共同研究者が担当する成膜実験結果と比較することにより、本計算の妥当性を検証するとともに現象の詳細な把握を行う。

2. 研究成果の内容

現在、YAG パルスレーザとフェムト秒レーザを用いたレーザ蒸着法などによる炭素系材料の薄膜化を進めている。本年度、レーザ蒸着装置内のターゲット制御システムの老朽化のため、新規システムの構築を行った。NEC 系 PC とヌーバス上での C 言語を用いた制御系は今後の更新が難しいため、ボード PC である Rasberry と言語として Paython を選択した。現在、グラフィック・ユーザー・インターフェースまでの制御プラグラムが完成している。

各種基板上での製膜では、特にシリコン基板において炭素系膜の表面粗さが悪化することが確認された。そこで、各種基板上での炭素六員環の安定性について検討したところ、表面粗さなどについて実験結果と非常に合うことが分かった。現在、計算の可視化について検討を行っている。

3. 研究目標の達成状況

各種基板上での炭素系分子(六員環)の安定性について検討し、実験結果と一致することを確認した。現在、多層グラフェン作製を含めて、論文誌への投稿原稿の作成を進めている。

4. まとめと今後の課題

炭素系材料と各種基板との組み合わせにより、炭素系材料の成長が不安定な状態になることが分かっている。不安定な組み合わせにおいては、炭素分子が基板上で大きく動くことが分かっている。周期条件を更に大きく取った計算が必要であると思われる。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Takashi Tokumasu, Shigeo Yasuhara, Kazuo Satoh, Yoshitada Shimizu, Takesi Rachi, Satomi Tanaka, Chihiro Kato, Manabu Yasui, Satoru Kaneko:
Growth of Multigraphene on Pencil Drawing Paper Irradiated by Femtosecond Laser
The 12th International Conference on Flow Dynamics 2015
Oct. 27 2015, Sendai International Center, Sendai, Japan

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	J15090
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

腸骨内の骨髄流れの数値流体モデルの構築

Constructing CFD model of marrow flow in an ilium

中山 敏男*†，太田 信**††
*鶴岡工業高等専門学校制御情報工学科，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

骨髄移植は白血病の有力な治療方法である．骨髄移植は健康なドナーの海綿骨の空隙内の骨髄中に存在する造血幹細胞を採取し，それを白血病の患者の静脈内に注入し移植する治療法である．骨髄採取では，1 回の穿刺における骨髄液の吸引量に制限があり，吸引された骨髄液に含まれる造血幹細胞の数が少なく，骨髄移植に必要量の造血幹細胞を得るまでドナーに対しておよそ 50 回から 100 回の穿刺が行われる．そのため，ドナーの肉体的・精神的負担が大きいことが問題である．そこで，本研究では骨髄採取時における骨髄採取用の針（穿刺針）周りの骨髄の流れについての知見を得ることを目的とする．

2. 研究成果の内容

2014 年度はブタ腸骨内の骨髄流れの数値モデル構築のための実験装置作成を実施したが，この実験系に改善の余地があり，実験系の改善を行い浸透率の測定精度を向上させる．また，数値流体力学解析を実施するためにブタ腸骨の 3 次元形状の再構築を行う．

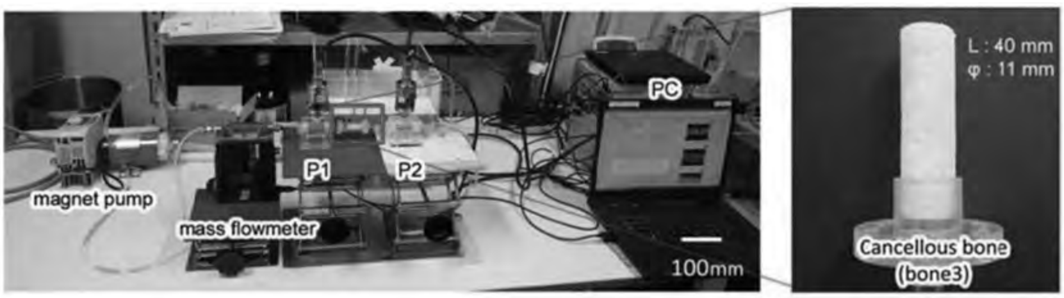


図 1：灌流試験装置

図 1 は改善した灌流試験装置の全体図である．従来の試験装置における問題点は，①大気圧の変動をとらえられない，②チューブ径が圧力により変動する，③カメラによる観察のため流れをとらえきれない，④定常状態の確認ができない，以上の 4 点である．これらの改良のために，圧力計（PW-100kPA，東京測器研究所）を導入し，チューブ径を固定するためにアクリルチューブを使用，体積流量計（FD-SS2，KEYENCE）を導入，循環流路に変更，定常性のために小型マグネットポンプ（MD-15R-N）を導入した．

数値流体力学解析を行う上で，ブタの腸骨内の海綿骨形状が必要となる．そこで，MicroCT（ScanXmate-D180RSS270，コムスキャンテクノ）でブタの腸骨を撮影し，コンピュータ

上で再構築を行った.

3. 研究目標の達成状況

従来灌流試験の結果と新しい灌流試験の結果を図 2 に示す．従来の試験結果より流速の低下が見られ，傾きが大きくなった．Darcy の法則を用いて Bone2 の浸透率を算出したところ，従来試験では$1.04 \times 10^{-10}[m^3]$，新しい試験$5.25 \times 10^{-10}[m^3]$となった.

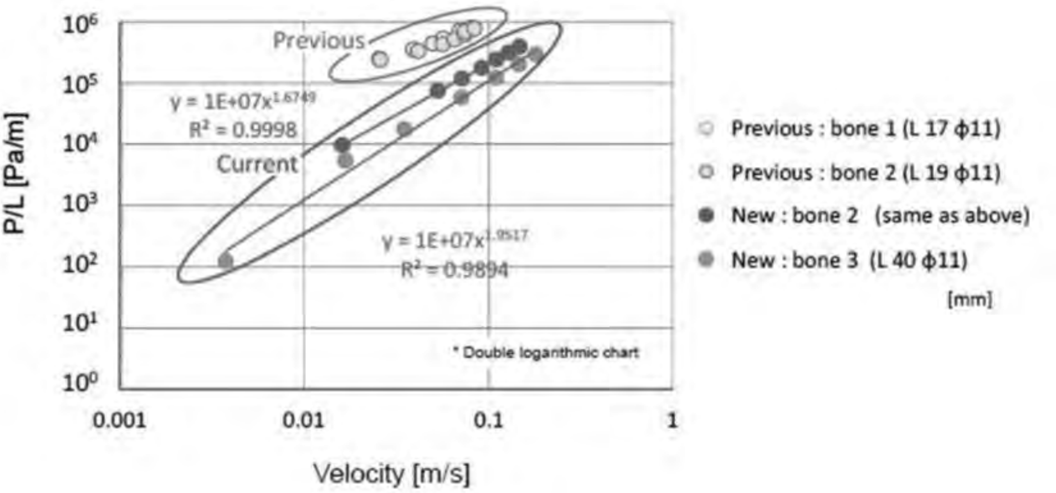


図 2：灌流試験装置

ブタの腸骨内の海綿骨形状を PC 内で再構築を行うことができた．これにより，ブタ腸骨内流れの数値流体モデルと実形状の流れの比較検討が行えるようになった.

4. まとめと今後の課題

穿刺針周りの骨髄流れに関する知見を得るために，昨年度に生じた問題を解決し，浸透率の測定精度を向上させることができた．また，海綿骨の構造を 3 次元的に再現でき，流れの比較検討ができるようになった.

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Wataru Sakuma, Toshio Nakayama, Hitomi Anzai, Shuji Nakamura, Katsuyuki Sado, Konstantin Kutscher, Martin Geier, Manfred Krafczyk, Makoto Ohta: CFD Alanyses for the flow in Cancellous Bone with LBM, *The 8th Asian-Pacific Conference on Biomechanics*, Sapporo, (2015)

[2] 佐久間航，中山敏男，安西眸，中村修二，佐渡克之，Konstantin Kucher,Martin Geier, Manfred Krafczyk, 太田信: 医療機器の開発に向けた海綿骨内の数値流体力学解析，東北大学-信州大学共催シンポジウム, (2015), 東北大学, p.23.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15091
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

遷臨界/超臨界状態における酸水素混合系に対する熱物性解析

An analysis of thermophysical properties of hydrogen/oxygen mixture at transcritical/supercritical state

徳増 崇*†，津田 伸一**††，坪井 伸幸***，片山 千春****，井川 祥平*****
*東北大学流体科学研究所，**九州大学大学院工学研究院，***九州工業大学大学院工学研究院
****九州大学大学院工学府，*****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

H-IIA ロケットなどに代表される酸素と水素を推進剤とする大型ロケットエンジンの燃焼室に関しては，その内部流れの CFD 精度向上に向けた流体力学的および反応化学的研究が多数展開されてきている一方，熱力学的観点から精度向上を図る研究はほとんど行われてきていない．しかし，酸水素混合系の熱物性データ（実験値）が皆無に等しいことから，現行の CFD では，経験的な状態方程式（EOS）を未検証のまま用いている状態となっている．そこで本研究では，エンジン内部の遷臨界/超臨界状態を想定した酸水素混合系の熱物性を分子シミュレーションにより推算し，既往の EOS の精度検証を行うことを目的としている．

2. 研究成果の内容

まず，単成分系での性質が十分に理解されている経験的ポテンシャルとして，Lennard-Jones ポテンシャルを採用し，本モデルを用いて酸水素の混合系を分子動力学（MD）シミュレーションにより再現した．そのうえで，本シミュレーションから得られる P-V-T 関係（圧力 - 体積 - 温度の 3 つの関係）を，ロケットエンジン内部流れの CFD 解析で最もよく用いられている既往の状態方程式（EOS）と比較することで，この EOS の精度検証をおこなった．

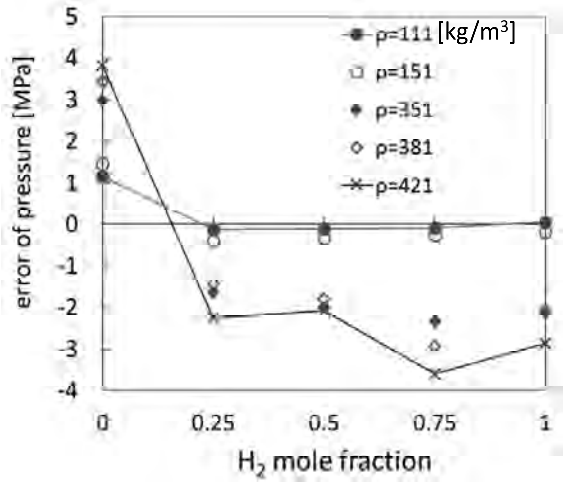


図１　本 MD と既往の EOS の誤差（温度約 250K のもとで各密度・濃度ごとに比較）

図１は，本MDと既往のEOSの差異が最も顕著に見られた結果の一例であり，横軸は水素のモル分率（濃度），縦軸は両者の絶対誤差（MDの圧力値からEOSの圧力値を引いた値）である．これより，特に水素のモル分率が 75%程度の条件において，誤差が拡大していることがわかる．液体ロケットエンジンの燃焼器は，水素濃度の高い状態で用いられることから，実際のエンジンに適用可能なCFDの実現を目指すうえでは，無視できない誤差となり得ることが示された．

なお，平成27年10月27日～29日にかけて行われたICFD2015では，本テーマに密接に関連した研究発表をおこなった．本発表では，水素特有の量子性がもたらす熱物性の変化が，エンジン内部流動現象に及ぼし得る影響を議論している．また，平成28年2月12日には，申請者である徳増准教授を所外対応研究者が訪問し，本研究の目標達成状況と今後の課題を共有してきている．

3. 研究目標の達成状況

ロケットエンジンの燃焼室開発における CFD 援用がますます本格化してきている中，酸水素混合系の状態方程式の精度未検証は，非常に大きな課題の一つとして位置づけられる．今年度は，特に水素濃度が高い混合状態において，現在用いられている状態方程式の精度がよくないという，ロケットエンジン燃焼器のCFD精度向上を図るうえでは無視できない結果が得られた．これは，現在の CFD 精度の未検証問題に対して一つの解答を与えるものであり，この点において，本研究は当初の目標を達成しつつあると認識している．

4. まとめと今後の課題

本研究では，経験的な分子間相互作用モデルによって水素と酸素の混合系を模擬し，この混合系に対する分子動力学シミュレーションの結果から，現在ロケットエンジンの解析で使用されている状態方程式の精度検証を実施した．その結果，実用上において特に重要となる，水素濃度が高い条件において，*P*-*V*-*T* 関係（圧力 - 体積 - 温度の3つの関係）の精度がよくないことが示された．

なお，ロケットエンジンの CFD 解析では，「*P*-*V*-*T* 関係」に加えて，「比熱」や「音速」も重要な熱力学量となる．今後は，これらの熱力学量も含めた総合的な評価検証を進める必要があり，この点を課題として位置づけている．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] S. Tsuda, M. Tomi, N. Tsuboi, S. Ikawa, T. Tokumasu: Extraction of the Density Fluctuations in Diatomic Fluids Around the Critical Points Using Molecular Dynamics Simulation, *J. Nanosci. Nanotech.*, 15, 4(2015), pp. 3117- 3120.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] C. Katayama, H. Nagashima, T. Tokumasu, N. Tsuboi, S. Watanabe, S. Tsuda: Discussion on the Effect of Quantum Nature on Density Structure of Liquid Hydrogen using Molecular Simulation, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 124-125.

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	J15092
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	新規

触媒層内酸素輸送抵抗に対する表面散乱の影響
The effect of surface scattering on the resistance of oxygen transport in catalyst layer

中内　将隆*，杵淵　郁也**††
武内　秀樹***，徳増崇**†
*東北大学工学研究科，**東京大学工学系研究科
高知工業高等専門学校，*東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

燃料電池触媒層における酸素輸送は低コスト化に繋がる性能向上において重要なため，限界電流測定による輸送抵抗の算出が行われているが，内部輸送現象の解明には至っていない．特に触媒層のような細孔径が数 nm のスケールにおける気体輸送は，気体分子間同士の衝突だけでなく，壁面表面における気体分子の散乱現象が輸送機構の支配要因となるため，連続体仮定に基づいた解析では輸送現象を正確に記述できない. 流路壁面における気体分子散乱を考慮した DSMC 解析が行われているが，アイオノマー表面における酸素分子反射モデルの影響により酸素拡散抵抗を過小評価してしまっている．そこで本研究では，触媒層のアイオノマー表面における酸素分子の散乱・表面拡散現象を分子シミュレーションにより明らかにすることを目的としている.

2. 研究成果の内容

担持カーボン表面に被覆した安定構造のアイオノマーを分子動力学(MD)シミュレーションにより再現し，様々な入射角，入射エネルギーを持つ酸素分子を衝突させ，散乱現象の解析を行った．図 1(a)は，アイオノマー表面から反射した酸素分子のエネルギー確率密度分布および典型的な反射モデルである拡散反射モデルにおけるエネルギー分布について示している．反射エネルギー分布はどの入射条件においても拡散反射モデルのもとと異なり，酸素分子はアイオノマー表面と完全適応せず反射していることが分かる. また図 1(b)は酸素分子の散乱角度分布を示している. 酸素分子の散乱角度分布は入射エネルギーに依存しておらず，拡散反射モデルとよく一致していることが確認できる．そのため，酸素分子はアイオノマー表面で拡散的に反射していると考えられる．また，アイオノマー表面で酸素分子が反射する際，酸素分子が表面にトラップされる現象が確認できた.

3. 研究目標の達成状況

今年度はアイオノマー表面における酸素分子散乱現象について, 散乱角度分布は従来用いられてきた反射モデルである拡散反射モデルと非常によく一致するものの，反射エネルギー分布は入射エネルギー依存性を持ち，拡散反射モデルと異なるという結果が得られた．これは現在の DSMC 解析における酸素拡散抵抗の過小評価問題に対して一つの解答を与えるものであり，この点において，本研究は当初の目的を達成しつつあると認識している.

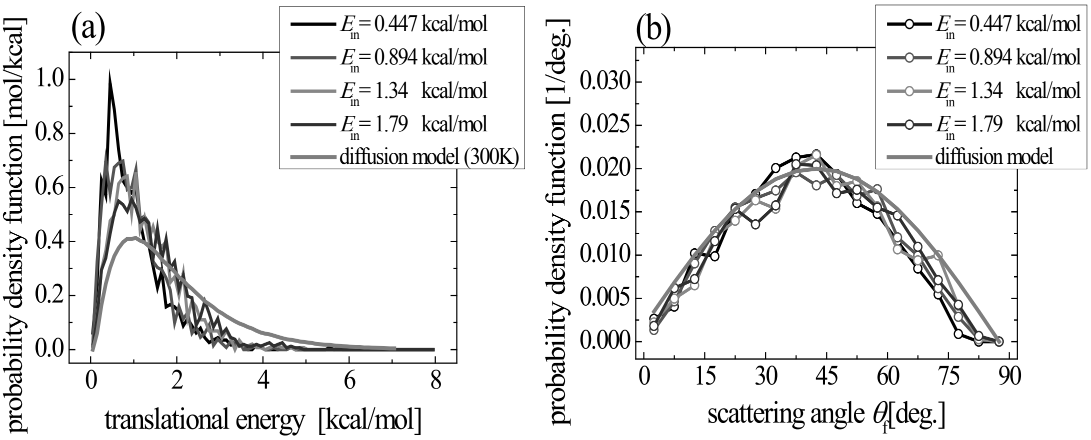


図 1　反射分子のエネルギー分布(a)および散乱角度分布(b)

4.　まとめと今後の課題

本研究では，燃料電池触媒層アイオノマー表面における酸素分子散乱現象を分子動力学シミュレーションにより解析し，反射角度分布は拡散反射モデルと非常によく一致するものの，反射エネルギー分布は入射エネルギー依存性を示し，拡散反射モデルと一致しないという結果が得られた．そのためアイオノマー表面と酸素分子のエネルギー相互作用を再現可能な反射モデルを構築することがある．

また，分子動力学シミュレーションの結果，酸素分子はアイオノマー表面上でトラップされ，複数回衝突した後に反射していることが明らかとなり，従来の反射モデルでは考慮できていない表面拡散現象が確認できた．今後はこのアイオノマー表面における拡散現象の評価を進める必要があり，この点を課題として位置づけている．

5.　研究成果（*は別刷あり）

1）　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2）　国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] M. Nakauchi, I. Kinefuchi, H. Takeuchi and T. Tokumasu: Molecular Simulation of Oxygen Scattering on Ionomer Surface in Catalyst Layer of PEFC, *Twelfth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2015)

[2] 中内将隆，馬淵拓哉，杵淵郁也，武内秀樹，徳増崇: PEFC 触媒層アイオノマー表面における酸素分子の散乱機構解析，日本表面学会関東支部　第２回セミナー，東京，(2015)

[3] 中内将隆，馬淵拓哉，杵淵郁也，武内秀樹，徳増崇: PEFC 触媒層のアイオノマー表面における酸素分子散乱挙動の分子動力学的解析，第 29 回数値流体シンポジウム，福岡，(2015)

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	J15093
区分	共同研究集会
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	２年目

次世代高温センサ研究会（フェーズ２）
Seminar for next generation sensors for super-high temperature environment (phase 2)

内一 哲哉*†，坂本 敏昭**††
三木 寛之***，青木 孝行****，秋宗 淑雄*****，
小島　純一******，荒川 敬弘*******，山下 卓哉********，
井元 尚充********, 古村 一朗**********, 蛯名 武雄*****,
森永 雅彦***********, 米津 豊作************, 金澤 兼治*************,
永井 大樹****, 高木 敏行*, 小助川 博之*
*東北大学流体科学研究所，**㈱インテリジェント・コスモス研究機構
***東北大学学際科学フロンティア研究所, ****東北大学工学研究科,
*****(独)産業技術総合研究所, ******㈱フルヤ金属, *******㈱IHI 検査計測,
********(独)日本原子力研究開発機構, *********東北経済産業局,
********** (財)発電設備技術検査協会, ***********(財)電力中央研究所,
************旭硝子㈱, *************㈱福電
†申請者，††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究会では，高温での様々な物理量の計測を必要としている関係者と高温領域でのセンサのシーズを有する関係者が集い，各種産業において求められている５００℃以上の高温環境に耐えるセンサの可能性と今後の開発の動向について議論する．シーズ側とニーズ側それぞれの立場から，より活発な議論を目指し，様々な産業において求められている５００℃以上の高温に耐える温度センサ，電磁センサ，超音波センサ等のセンサについて調査する．これらの高温領域でのセンサに求められる機能とシーズ研究，実現した場合の産業上のインパクト，また，ノイズ除去，センサネットワークの観点からの情報処理，等についても議論する．

2. 研究成果の内容

平成２７年度は，以下の２回の研究会を開催しニーズおよびシーズに関する研究を中心に調査を行った．

(1) 第１回研究会

地熱，原子力，ロケットなどの様々な応用分野における高温計測のニーズを中心に情報を収集し，今後の開発の方向を議論した．

日　時：　平成 27 年 12 月 11 日（金）13 時 30 分　― 17 時 10 分
場　所：　東北大学　流体科学研究所　GCOE 棟　3 階　セミナー室
参加者数：３３名
講　演：
「高温環境下の地熱地帯における各種測定・観測について－」

梶原　竜哉（地熱エンジニアリング株式会社）
「非破壊検査によるロケットエンジン累積損傷度の評価技術について」
堀　秀輔　(宇宙航空研究開発機構)
「高速増殖炉のセンサ技術とナトリウム工学研究施設について」
上田　雅司　(日本原子力研究開発機構 高速炉研究開発部門)
「熱電対 JIS 改正の概要、及び R 熱電対の断線事例」
小川 理　(旭産業株式会社)

⑵ 第２回研究会
　日本非破壊検査協会新素材に関する非破壊試験部門主催の「安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム」との共催により行い，非破壊検査に関する新素材研究者の観点からもご意見を頂いた．また，高温計測とビッグデータ分析との関連から今後の技術動向の分析を行った．

日　時：　平成２８年3月１７日（木）　１５：０５～１５：３５
場　所：　西之表市民会館（鹿児島県西之表市西之表 7600）
参加者数：　５１名
講　演：
「ビッグデータ分析技術がもたらす設備保全の新たな手法～センサから集められたデータを分析すると見えてくるもの～」
相馬知也　(日本電気(株))

3.　研究目標の達成状況
　第１フェーズの活動を通して明らかになった, 高温環境センサが求められている産業分野に関する情報を参考に, シーズ側およびニーズ側の情報交換を通じて高温計測の位置づけ，技術開発の戦略について検討を行った．さらに, ニーズについての調査も継続して行い, ニーズとシーズの両者から課題を抽出した．

4.　まとめと今後の課題
　本研究会では，本年度を含め合計 11 回の研究会を開催してきた．毎回出席する研究者も多く, かつ学協会との連携による自立した研究会に移行できる見通しが得られている．今後，非破壊検査協会等の研究会との連携や，学協会における常設委員会の可能性を探る．また，高温計測を核とする安全安心のための学術基盤の構築のための準備を行う．

5.　研究成果（*は別刷あり）
1)　国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
　　なし

その他（特許，受賞，マスコミ発表等）
[1] 次世代高温環境センサ平成 27 年度第 1 回研究会　講演概要集, 平成 26 年 12 月 9 日

課題番号	J15094
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	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

タンパク質のシグナル配列の物理化学的性質と細胞内小器官への輸送に関する研究
Correlation between physicochemical properties of protein signal sequence variation and subcellular transportation

池田（向井） 有理*†，太田 信**††，越中谷 賢治***，
杉田 大夢***，髙橋 大輝***，亀卦川 樹*
*明治大学理工学部，**東北大学流体科学研究所
***明治大学大学院理工学研究科
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

生合成されたタンパク質は適切な細胞内小器官に局在化され，その機能を発揮する．一方で，タンパク質の細胞内局在化のエラーが，がんや神経性疾患を引き起こすことも知られている．本研究では，異なるタンパク質局在化シグナル配列を用いて，生存細胞の蛍光観察から細胞内局在化経路や局在化効率を評価することにより，目的のタンパク質を適切な細胞内小器官に輸送する手法の確立を目指す．

2. 研究成果の内容

小胞体輸送系と細胞膜ラフト局在系の異なる複数パターンのシグナル配列を含む GPI アンカー型タンパク質の発現系を構築し，HeLa 細胞に導入した．小胞体輸送系シグナルペプチド遺伝子，および，細胞膜ラフト局在系シグナルペプチド遺伝子には，生物種の異なる以下の 2 種を用いた．

1) イネ GPI アンカー型タンパク質 CEBiP
2) ヒト GPI アンカー型タンパク質プリオン

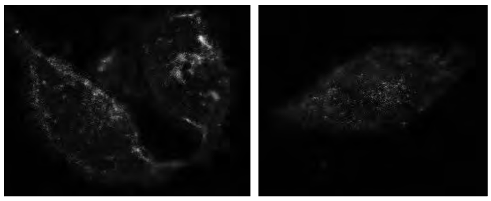


図 1. 異なる小胞体シグナル配列を導入した GPI アンカー型タンパク質の細胞内局在観察（左: ヒトプリオンの小胞体シグナル配列，右: イネ CEBiP の小胞体シグナル配列）左図の細胞において目的タンパク質は細胞膜ラフト中心に局在，右図では核内に局在している．

上記 2 種の小胞体輸送系シグナルペプチドおよび細胞膜ラフト局在系シグナルペプチドを，CEBiP の成熟タンパク質の遺伝子の N 末端側と C 末端側に，4 パターンの組み合わせで融合した．CEBiP 抗体で HeLa 細胞の免疫染色を行い，共焦点レーザー顕微鏡を用いて，HeLa 細胞における CEBiP 融合タンパク質の細胞内局在性を観察した．その結果，小胞体シグナル配列のアミノ酸組成により，細胞内局在性および局在経路が異なることを見出した．

3. 研究目標の達成状況

2015 年度計画に含まれていた実験の遂行と学会発表については計画通りであったが，論文発表は準備段階である．2014 年度計画に含まれていた論文発表の一部は 2015 年度に達成した．

4. まとめと今後の課題

小胞体シグナル配列が，細胞内局在性・局在化経路と相関を持つことが明らかになった．今後

は，より多くのシグナル配列を用いて細胞内局在性および局在化経路を観察し，シグナル配列の物理化学的性質とタンパク質の細胞内輸送経路との相関を明らかにする．

5. 研究成果（*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. Etchuya, H. Sugita, T. Kikegawa, K. Hamada, N. Takachio, N. Kato, M. Ohta, Y. Mukai, “Correlation between physicochemical properties of protein signal sequence variation and subcellular transportation”, Proceedings of the twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2015), Sendai, Japan, Oct. 2015.

*[2] H. Sugita, N. Takachio, N. Kato, H. Kaku, M. Ohta, Y. Mukai, “Comparative study between mammal and plant GPI modification mechanism”, Proceedings of the twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2015), Sendai, Japan, Oct. 2015.

*[3] D. Takahashi, T. Ogawa, K. Etchuya, K. Hamada, Y. Mukai, “Protein recognition mechanism for GPI modification”, Proceedings of the twelfth International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2015), Sendai, Japan, Oct. 2015.

*[4] Y. Mukai, D. Takahashi, T. Ogawa, K. Hamada, K. Etchuya (2016) Study of molecular recognition mechanism in protein GPI modification: a bioinformatics analysis of interaction between GPI-anchored proteins and modification enzyme, *J. Biomech. Sci. Eng.*, 11, 15-00361, 1-7.

*[5] K. Etchuya, Y. Mukai (2015) Structural characteristics around *O*-glycosylation sites in mammalian proteins, *J. Biomech. Sci. Eng.*, 10, 14-00249, 1-6.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[6] H. Sugita, N. Takachio, N. Kato, H. Kaku, Y. Mukai, “Comparative analysis of GPI modification mechanisms between human and plant proteins focusing on signai-peptides”, Pacific Symposium on Biocomputing (PSB) 2016, Poster presentation, Hawaii, USA, Jan. 6, 2016.

[7] D. Takahashi, H. Sugita, T. Ogawa, K. Hamada, K. Etchuya, Y. Mukai, “Interaction between GPI-anchored proteins and GPI transamidase”, Pacific Symposium on Biocomputing (PSB) 2016, Poster presentation, Hawaii, USA, Jan. 6, 2016.

[8] H. Sugita, N. Takachio, N. Kato, H. Kaku, M. Hayafune, Y. Mukai, “Comparative study between mammal and plant GPI modification mechanism”, 40th FEBS Congress, Poster presentation, Berlin, Germany, Jul. 8, 2015.

[9] D. Takahashi, T. Ogawa, K. Hamada, K. Etchuya, Y. Mukai, “Functional analysis of GPI transamidase with molecular phylogenetic tree”, 40th FEBS Congress, Poster presentation, Berlin, Germany, Jul. 8, 2015.

[10] 高橋大輝, 杉田大夢, 小川翼, 濱田康太, 越中谷賢治, 向井有理『ω-site 近傍の構造に着目した GPI 修飾機構の解明』第 5 回日本生物物理学会関東支部会, 口頭発表, 群馬, 2016 年 3 月 10 日.

[11] 高橋大輝, 杉田大夢, 小川翼, 濱田康太, 越中谷賢治, 向井有理『GPI アタッチメントシグナルの二次構造解析』第 38 回日本分子生物学会年会, ポスター発表, 神戸, 2015 年 12 月 1 日.

[12] 杉田大夢, 高知尾尚志, 加藤徳剛, 向井有理, 賀来華江, 早船真広『タンパク質の GPI 修飾に関連したシグナル領域の機能解析と生物種間比較』第 38 回日本分子生物学会年会, ポスター発表, 神戸, 2015 年 12 月 1 日.

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	J15095
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	2nd year

The Theoretical Modes of the Wake Flow of Road Vehicles

Chenguang Lai*†, Shigeru Obayashi**††, Yuting Zhou***, Kaiping Wen*, Zhigang Yan*, Sujuan Yu*, Chao Man*, and Chang Luo**
* Chongqing Institute of Automobile, Chongqing University of Technology
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
*** Institute of Chemical Engineering, Chongqing University of Technology
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The objective of this project is to better understand the mechanism of the unsteady three-dimensional wake structure and construct the theoretical modes of the wake flow, which can provide the key theoretical direction and basis for controlling the structures of the wake vortex and restraining the vortex excited vibration.

2. Details of program implement

The shape of automobile is optimized by combining CFD software and genetic algorithm, which is used to analyze the multivariate and multi-objective problems. In the optimization process, the front-windshield inclination angle (A1), angle of roof and the horizontal surface (A2), the rear-windshield inclination angle (A3), diffuser angle (A4), and approaching angle (A5) are parameterized as variables (as shown in Figure 1). Making the minimum aerodynamic drag, aerodynamic lift is 0 and the minimum pressure of the roof as the objective functions of the design space. The results of genetic algorithm about the optimal combination of the variables are validated by wind tunnel experiments (Figure. 2). Data mining technology is also applied to evaluate the relationship between the five design variables and the three objective functions.

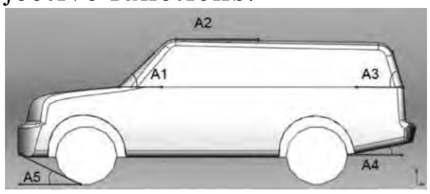


Figure 1: The research model and its parameterized variables

Figure 2: The genetic algorithm results are validated by wind tunnel experiments

3. Achievements

Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm Ⅱ is successfully applied to vehicle aerodynamic shape optimization, and 9.5% drag reduction was achieved in the premise of other aerodynamic objectives. The results also reveal that the rear shape has the largest influence on the vehicle aerodynamic performances.

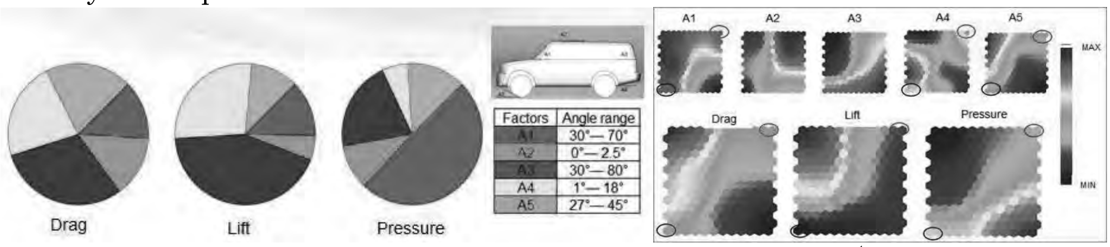


Figure 3: Some examples of the results of the genetic algorithm (Left is the sensitivity analysis chart and right is the self-organizing map neural network from left to right)

4. Summaries and future plans

Summaries: The aerodynamic shape optimization of road vehicle is carried out with Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm Ⅱ. The results show that, the optimized body shape by the genetic algorithm successfully decreased the drag coefficient by 9.5%, and the accuracy of results is verified by wind tunnel test, the genetic algorithm has guiding significance and practical application value on the appearance of cars aerodynamics optimization and improvement.

Future plans: take the method of Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm Ⅱ to investigate influence of the different rear shapes of vehicles on the transient topologies of the wake flow, thus further study and conceive the form of the eddy motions on the wake of road vehicle.

5. Research results (* reprint included)

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

[1] Chen-guang LAI, Chao MAN, Kai-ping WEN, Zhi-gang YAN, Meng-hua DUAN: Numerical study of cooling characteristics for blanking in hot stamping [J], *Hydromechatronics Engineering*, Vol. 43, No. 6 (2015), pp. 27-31

[2] Chen-guang LAI, Meng-hua DUAN, Yan ZHUANG, Yong-yan CHEN: Effect of blade dip angle on internal characteristic of hydraulic retarder [J], *Hydromechatronics Engineering*, Vol. 43, No. 12 (2015), pp. 37-40

[3] LAI Chen-guang, YAN Zhi-gang, REN Bo-qi, et al: Aerodynamic Characteristics Study Under Ground Effect of Uniderectional-Wing [J], *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2016 (2): 1-5

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

[4] C. Lai, X. Chen, et al: Aerodynamic Optimization of Vehicle Shape Based on Genetic Algorithm, *Proceedings of The Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp.34-35

[5] M. Duan, C. Lai, et al: Design space exploration on Combustion Chamber of Diesel Engine Based on Response Surface Method, *Proceedings of Twelfth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2015), pp.700-7

[6] Z. Yan, C. Lai, et al: Aerodynamic Optimization of Vehicle Shape Based on Genetic Algorithm, *Proceedings of Twelfth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2015), pp.794-795

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J15097
区分	共同研究集会
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の検査、補修、リサイクルに関わる研究会
Seminar for Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)

高木 敏行*†, 小助川 博之*
伊藤 浩志**††, 工藤 素***, 藤嶋 基***, 菊池 時雄****, 飯田 敬子*****, 菅野 英樹******,
玉川 修一******, 久田 哲弥*******, 佐藤 勲征*******, 浦 啓祐*******
*東北大学流体科学研究所, **山形大学大学院理工学研究科
***秋田県産業技術センター, ****福島県ハイテクプラザ, *****青森県産業技術センター八戸地域研究所, ******宮城県経済商工観光部, *******宮城県産業技術総合センター
†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究会では, 東北域内に炭素繊維強化プラスチック(CFRP)に関して高いレベルの知見や技術を持つ東北６県の大学・企業・公設試からなるコンソーシアムを結成し, CFRP に関わる知識向上と課題抽出および解決を以って, 東北の新産業育成を目指す. 特に CFRP のライフサイクルにおける「検査・評価」「リサイクル」「修理」「二次加工」という要素技術に注目し, シーズ・ニーズの探索とマッチング, および産学官連携による共同研究開発を展開することを目的とする.

2. 研究成果の内容

平成２７年度は, 以下の２回の講演会を開催し, CFRP が関わる産業のニーズおよびシーズと, 各地方自治体における産学官連携の取り組みについて調査を行った. また, 講演会の他に５回の「検査・評価」分科会と１回の「リサイクル分科会」を行った.

(1) 第三回 CFRP 研究会講演会

成形加工性に優れる熱可塑性 CFRP(CFRTP)の技術シーズと市場の現状について調査をし, 本研究会で目指すべき技術的な課題の抽出について議論をした.

日　時　：　平成 27 年７月９日(木)　13:30 – 17:00
場　所　：　東北大学　流体科学研究所　２号館５階　大講義室
参加者数：　６２名
講　演　：

「CFRTP の最新成形加工技術」
山形大学大学院 理工学研究科　　教授　伊藤　浩志　先生

「石川県における炭素繊維分野の取り組み」
石川県工業試験場 企画指導部　　主任研究員　多加　充彦　先生

「航空機複合材料サマーキャンプの取り組み」
秋田県産業技術センター　　主任研究員　藤嶋　基　先生

(2) 第四回 CFRP 研究会講演会

航空宇宙産業分野で利用される CFRP 部品のニーズとレギュレーションについて幅広く調査し，東北域内の企業が参入できる市場について議論を行った.

日　時　：　平成 28 年 1 月 13 日（水）　14：00～17：00
場　所　：　東北大学　流体科学研究所 2 号館 5 会　大講義室
講　演
「繊維強化プラスチックの損傷・破壊に関する実験マイクロメカニクス」
東北大学大学院工学研究科　教授　岡部　朋永　先生
「航空機複合材料構造製造の課題と今後の製造技術」
JAXA　構造・複合材技術研究ユニット　ユニット長　岩堀　豊　先生

3. 研究目標の達成状況

これまで行った４回の講演会と分科会を通して，CFRP 研究会に所属する東北域内の大学・企業・公設試は，CFRP を扱う様々な産業分野の MRO(Maintenance, Repair, Overhaul) 事業に貢献できる技術シーズを多く有することを認識した. MRO ビジネスは決して小さくなく，特に CFRP が関わる MRO の技術的なニーズは，航空機産業を初め今後増加していくことが予想される. 産官学の共同研究により東北域内の企業や大学の技術を発展させ，CFRP が関わる MRO のニーズを請け負えるよう体制を整えていくことが肝要である.

4. まとめと今後の課題

本研究会は，平成２６年１０月に発足したものであり，これまでに４回の講演会と２回の技術調査会を実施した. また，本年度に入り CFRP の「検査・評価」および「リサイクル」をターゲットとした分科会を発足した. 今後は，各分科会を中心に，各産業分野の MRO における，より焦点を絞った調査と議論を進め，産学官連携の共同研究を順次開始していく.

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

なし

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

研究会講演会

[1] 第３回 CFRP 研究会講演会～産学官連携による取り組みについて～，講演会プログラム，平成 27 年 7 月 9 日

[2] 第４回 CFRP 研究会講演会～航空宇宙複合材料の開発と課題について～，講演会プログラム，平成 28 年 1 月 13 日

技術調査会

[3] 第２回 CFRP 研究会技術調査会，調査会報告書，平成 27 年 11 月 19 日～20 日

出展

[4]東京エアロスペースシンポジウム 2015，出展ポスター，平成 27 年 10 月 14 日～16 日

共催

[5] 炭素繊維複合材料ウィンターキャンプ 2016 “CFRP 工業製品に共通する修理法の実習”，実施報告書，平成 28 年 1 月 26 日～28 日

Project code	J15107
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	3rd year

Measurement of diffusion coefficient through artificial micro and nanopores

Gary Rosengarten*†, Atsuki Komiya**††

*School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering, RMIT University,
**Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS responsible member

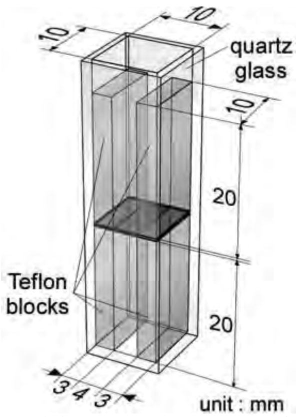
1. Purpose of the project

Quantitatively measure the mass diffusion field through nano-micro pores using phase-shifting interferometer equipment, the results will be supported by theoretical analysis. Biomimetic design based on these pores will help design low energy membranes for filtration.

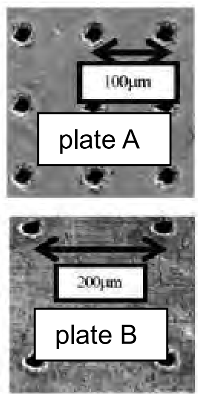
2. Details of program implement

In this research, the interferometry setup developed by Prof. Komiya from Tohoku University was used to precisely measure the transient diffusion field through the nano-micro pores. Figure 1 shows the interferometry setup, a diffusion observation cell and micro pore plates. The phase-shifting interferometer was used to the series of visualization experiments. These experimental results will be used to validate a computational model.

(a) Photo of phase-shifting interferometer



(b) Diffusion cell



(c) micro pore plates

Figure 1: Experimental setups for visualization of diffusion process.

3. Achievements

A series of visualization experiments measuring the diffusion process in aqueous solution through several holes (30 μm in diameter shown in Fig.1) in a solid plate were performed at Tohoku University using the phase-shifting interferometry setup.

Figure 2 shows a typical experimental result. By analyzing the visualized diffusion field, mass flux in the vicinity of pore plate was obtained. From the results of these experiments, it was clear that the mass flux varies temporally and it reaches different plateau value. It means that the mass flux can be controlled by using the nano-micro pore structure.

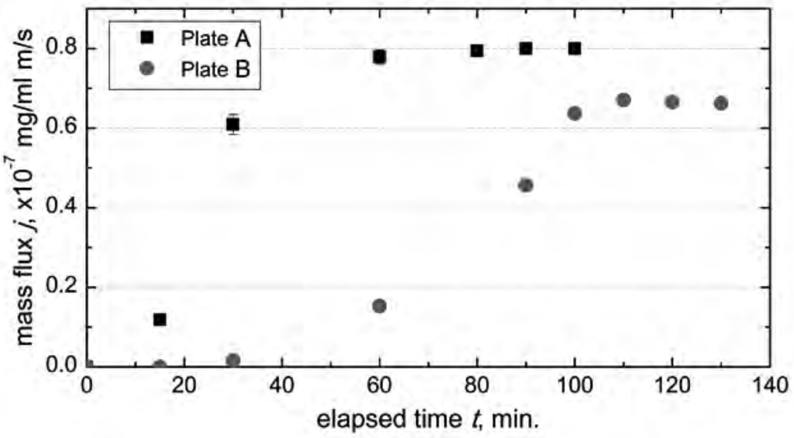


Figure 2: temporal variations of mass flux in the vicinity of pore plate.

4. Summaries and future plans

A series of visualization experiments of hindered diffusion process has been conducted to examine the diffusion through a nano-micro pore plates. By analyzing the visualized diffusion field, mass flux in the vicinity of pore plate was obtained, and controllability of mass flux using pore plates was suggested. Continuously the visualization experiment is conducted and the relationship between mass flux and pore size will be evaluated.

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] Atsuki Komiya, Evaluation of Several Dependencies of Protein Diffusion Coefficients by Precise Visualization of Diffusion Field, Proceedings of the Twelfth International Conference on Fluid Dynamics (2015), pp.360-361.

[2] Atsuki Komiya, Trial of Optical Experiment for Precise Visualization of Protein Diffusion Field and Its Evaluation, 2015 National Heat and Mass Transfer Conference in China, Keynote, (2015)

3) Patent, award, press release etc.

(Patent)

not applicable

(Award)

not applicable

(Press release)

not applicable

Project code	J15108
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2015 ~ March 2016
Project status	2nd year

Transport phenomena of nanoscale water droplet in a nano pore

Akinori FUKUSHIMA*††, Takashi TOKUMASU**†, VERGNE Philippe ***††
*Graduate school of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology
**Institute of Fluid Science, Tohoku University,
*** LaMCoS, Université de Lyon
†Applicant, ††IFS or Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Recently, many useful mechanical and energy devices that have nm-order structure are realized. Factors to determine the efficiency of these small devices are mass transport phenomena in devices. Many papers report that when substances are in nm-order structures, their transport properties are greatly different from those in macroscopic case. We have focused on the droplet shearing phenomena. In both macroscopic and microscopic cases, a liquid-vapor interface has nm-order thickness. In the macroscopic case, the friction force between droplets and solid walls can be written with contact angle and its surface tension coefficient. On the other hand, when a channel size is in nm-order scale, the relation between the velocity and the contact angle is not known in detail. Therefore the momentum transport through the liquid-vapor should be clarified. In this study, we focus on effects of liquid-vapor interface onto the momentum transport phenomena seen in the interface region. Moreover, we evaluated the effects of the wettability on the forces. To calculate much larger system, we employ Ar atoms as a liquid component.

2. Details of program implement

We evaluated friction forces between an Ar droplet and honeycomb walls using a nano channel model shown in figure 1. The velocity of the upper wall was set at 10 m/s and the velocity of the lower wall was set at -10 m/s. To keep the system at the constant temperature, the temperature of the second outside layers of the slabs was kept constant in all time steps by velocity scaling method. The temperature was set at 75 K. Figure 2(a) shows the force on the liquid-vapor interface. Red circles show the force evaluated with shear stress, and black squares show the force evaluated with contact angles. We evaluate the friction force with contact angles only when the interaction parameter between Ar atoms and wall atoms is 8×10^{-22} J. we calculated the friction force on the liquid-vapor interface with the *yz* component of stress tensor distribution on *yz* plane. The friction force is increasing with increasing the interaction parameter. Moreover, the force evaluated with contact angles is smaller than forces evaluated with stress tensor. To clarify this difference, we focus on the shear stress distribution on the *yz* plane. Figure 2(a) shows the shear stress distribution along the *y* direction on the lower wall in the case that the interaction parameter between Ar atoms and wall atoms is 8×10^{-22} J. The shear stress at the center region of the panel is almost constant. This region can be recognized as the bulk region. Moreover the region where the peak structures can be seen, and it can be recognized as the liquid-vapor interface region. Around the $y=y_1$, the shear stress is slightly larger than that on the bulk region. It can be said that this difference is the origin of the difference of between force with shear stress and the force with contact angles.

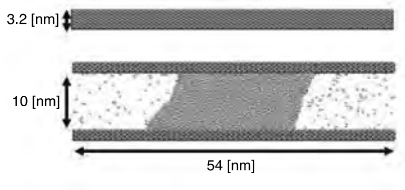


Figure 1 Channel model. Yellow dots show Ar atoms and gray dots show wall atoms.

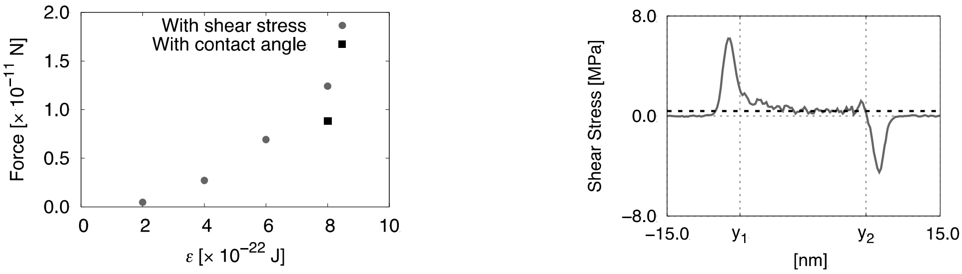


Figure 2 (a) Shear stress distribution in the case that ε=8×10^{-22} J. (b) Interaction parameter dependence of force on the interface. Red circles show the force evaluated with shear stress, and black squares show the force evaluated with contact angles.

3. Achievements

In this project, we expected to clarify the momentum transport phenomena on the liquid-vapor interface. We have obtained the important and sufficient results. We will write full papers as soon as possible.

4. Summaries and future plans

We have evaluated the force on the interface region and the center region and its interaction parameter dependence. Moreover, the difference between the definitions has been also clarified. As a result, it was clarified that the force on the interface is increasing with increasing the interaction parameter. Moreover we compared the force evaluated with the shear stress is larger than the force evaluated with contact angles when the interaction parameter is 8×10^{-22} J. The force evaluated with the contact angles is smaller than the force evaluated with the shear stress. The origin of this difference can be thought the slightly large shear stress near the interface.

5. Research results (* reprint included)

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

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

[1] Akinori Fukushima, Nicolas Fillot, Takashi Tokumasu, Philippe Vergne : "MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF A DROPLET SHEARED BY SOLID WALLS", 42nd Leeds-Lyon Symposium on TRIBOLOGY, September 7-9, 2015, Lyon

[2] Akinori Fukushima, Nicolas Fillot, Takashi Tokumasu, Philippe Vergne "Molecular Dynamics Study of the Momentum Transport by the Droplet Shearing ", Twelfth International Conference on Flow Dynamics, October 27-29, 2015, Sendai

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

2. 研究成果報告書
＜萌芽公募共同研究＞

課題番号	J15H001
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

羽ばたき飛行実用化に向けた影響因子の最適化
Optimization of influential factors for practical application of an ornithopter

石出 忠輝*†，大林 茂**††
永沼 和也***，下山 幸治**
*木更津高専機械工学科，**東北大学流体科学研究所
***木更津高専専攻科機械・電子システム工学専攻
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

近年災害時における状況確認，沿岸監視，テロ現場での情報収集等を目的として，小型飛行体（MAV : Micro Air Vehicle）の研究開発が盛んに行われている．MAV に要求されている外形サイズ，飛行及び作業形態は，現存の航空機と異なるものであり，革新的な技術開発が必要とされる．本研究ではバイオミメティクスの着想を取り入れ，低速飛行時において良好な空力特性を有する翼形状，翼構造及び羽ばたき条件を見出す事を目的としている．

2. 研究成果の内容

本研究では，図 1 に示す厚さの異なるステンレス製楕円翼を風洞内でヒービング運動させ，発生する流体力と PIV 解析で得られる前縁剥離渦の挙動との関連を調査し以下の結論を得た．

図 1：羽ばたき翼模型

(1) ヒービング振幅，板厚を変化させると，図 2 に示すように空力特性が変化し，固定翼と比較し良好な特性を示す組合せが存在する．具体的には固定翼(Case1)と比較して，特に C_L が増加する傾向が見られたのは，羽ばたき周波数 f=5Hz, 羽ばたき振幅 FA=±10°, 翼厚 t=0.2mm（Case4）及び f=5Hz, FA=±10°, t=0.5mm（Case5）の 2 条件であった．さらに揚抗比において，Case4 が固定翼と比較してより高い揚抗比を示し，良好な空力特性を有している事が確認できた．

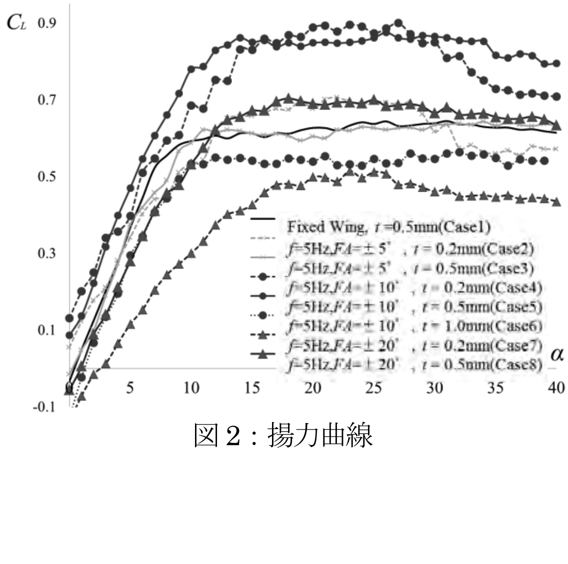


図 2：揚力曲線

(2) 模型に組み込まれているエンコーダ出力を基に，図 3 に示す PIV トリガー計測システムを構築し，特定のヒービング角度で PIV 計測することにより，羽ばたき条件の流体現象への影響を定量

的に評価する事ができた.

(3) 優れた空力特性を示した羽ばたき条件における PIV トリガー計測を行った結果，ダウンストローク時において下面からのまき込み渦（後流剥離渦）をきっかけにして，大規模な前縁剥離渦が翼壁面近傍に長い間存在している事が確認できた．図 4 は平均迎角 α=20°，羽ばたき位相角 θ=0° における PIV トリガー計測結果一例である．本実験条件における 40 秒間の PIV トリガー計測結果より，後縁剥離渦の発生が前縁剥離渦を翼表面に引き付け，渦揚力を高めているものと考えられる.

(4) 空気力と PIV の同時計測を実施し，薄翼においてヒービング運動と揚力変動の位相が 45°ずれており，前述の前縁剥離渦が存在している間，揚力が増加している事が分かった.

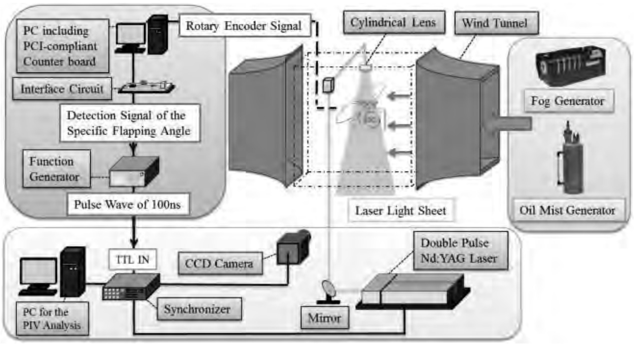


図3：PIVトリガー計測システム

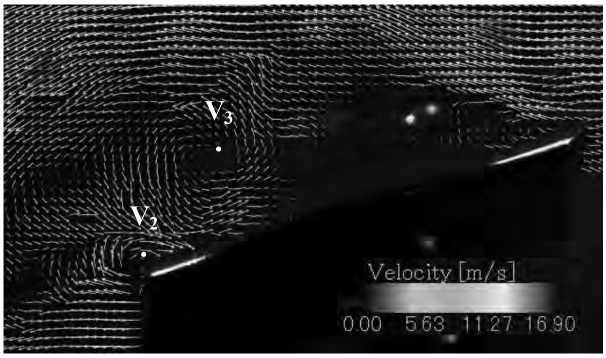


図 4：PIV 解析結果

3. 研究目標の達成状況

(1) 本研究申請時の予想とおり，羽ばたき翼において良好な空力特性が得られる翼厚と羽ばたき運動条件の組合せが存在し，PIV 計測と空気力測定を同時に行うことによってその背景となる流体現象についての知見を得る事ができた.

(2) 弾性翼模型の有効性については，羽ばたき翼外板の構造として，0.2mm 厚ステンレス製薄板を翅脈として用い，50μm 厚ポリエステル素材のフィルムを外板として貼り付けた翼を製作し，試行的に風洞実験を行ってきたが，さらなる実験データの取得が必要となる.

4. まとめと今後の課題

本公募共同研究の実施により，羽ばたき運動の空力面での有効性と流体現象との関連性についての知見が得られた．今後さらに柔軟翼の有効性と前縁剥離渦，後縁剥離渦及び翼端渦の三次元的な渦構造について知見を積み重ねていきたい.

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] 石出忠輝，清治慎介，石川弘之，永沼和也，藤本純香，藤井亮，前野一夫，下山幸治，大林茂: 羽ばたき機構を有する楕円翼に生じる流体力測定と PIV 解析，可視化情報学会論文集，Vol.35, No.10, (2015), pp. 37-43.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] T. Ishide, K. Naganuma, R. Fujii, K. Maeno, S. Obayashi and K. Shimoyama: Optimization of Influential Factors for Practical Application of an Ornithopter, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 22-23.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J15H002
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	エアロスペース分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	2 年目

2 次元キャビティ流れのホップ分岐
Hopf bifurcation of 2D driven cavity flows

岩津 玲磨*†，服部 裕司**††
*東京電機大学工学部，**東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員

1. 研究目的

2 次元キャビティ流れはベンチマーク問題としてよく計算されるが，標準的なパラメータ(アスペクト比 A=1)の場合のみが専ら計算されて各種数値計算法による計算結果が詳細にわかっている反面，他のパラメータ値での挙動を調べた文献があまりない．そこで，A=1 以外のパラメータ範囲について非定常流れの挙動を調べることを目的とする．

2. 研究成果の内容

アスペクト比 A=W/H(幅 W, 深さ H)として深いキャビティ A=1.5, 浅いキャビティ A=0.9, 0.8 について 1 次 Hopf 分岐位置の特定をおこなった.

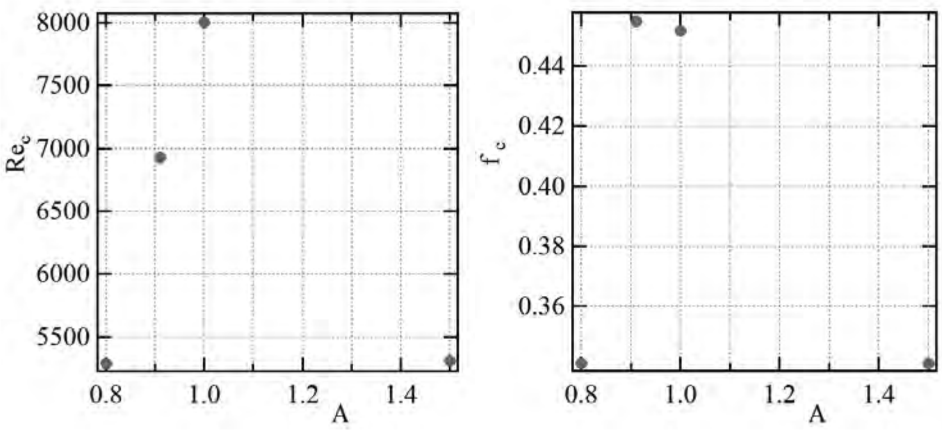


図 1：臨界レイノルズ数と臨界振動数のアスペクト比依存性

3. 研究目標の達成状況

1) 臨界レイノルズ数のアスペクト比依存性についての計算の進捗状況を図 1 に示す.

2) 深いキャビティ(A=1.5)の場合には Hopf 分岐の発生より高レイノルズ数の非定常流に初期値への依存性があり，また正方キャビティ(A=1)の場合と異なり複数の振動数が現れた. A=1 の場合同様の双安定解への回帰は調べた範囲では確認することができなかった.

4. まとめと今後の課題

パラメータ計算は現在も継続中で，浅いキャビティの計算を計画している．今後の課題としては，解析の容易な1次Hopf分岐のみを取り扱って計算を早期に終了させる必要がある．

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] Reima Iwatsu: Unsteady solutions of the driven cavity flow problem - the effect of discretization on the critical Reynolds number, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 158-159.

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	J15H003
区分	萌芽公募共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

アルミニウム合金のイメージベース解析
Image Base Analysis of Aluminum Alloy

Vinicius de Souza*, 鈴木 克幸**†, 大林　茂***††, 下山 幸治***
*東北大学大学院工学研究科, **東京大学人工物工学研究センター
***東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

1.1 研究の背景と目的

アルミニウム合金の長期間使用に資するために, アルミニウム合金の疲労強度の数値的な評価方法を確立し, より高い耐疲労強度を持ったアルミニウム合金を開発するための方法論を構築する. 具体的には, アルミニウム合金のＣＴ画像に対し, 弾塑性を考慮したイメージベース有限要素解析を行い, 繰り返し荷重を負荷した際の疲労強度を評価し, 最適設計を行うことにより, より高い耐疲労強度を持ったアルミニウム合金を開発する.

1.2 研究期間内の最終目標

CT スキャンイメージの取得し, このイメージデータに対し, 画像処理の技術を用いて前処理を行い, イメージベース有限要素解析技術を用いた解析により, 繰り返し荷重を与えた際の合金の微視構造の弾塑性挙動を解析する. スーパーコンピュータによる大規模計算を進めることにより, き裂の進展のメカニズムを解明し, 疲労強度の評価につなげる. そして, 最適設計を応用して, 具体的な材料の微視構造の設計, 合金配分の調整などの設計を試みる.

2. 研究成果の内容

2.1 新しい解析手法の開発

イメージベース有限要素解析の大規模計算の手法を確立することにより, 様々な材料設計を可能とする技術を開発する.

2.2 新しい現象の解明

アルミニウム合金の破壊のメカニズムを解明することにより, 合金の設計の指針を与える. 特に, き裂の核生成のメカニズムとして, 応力の集中によるものと粒子とマトリクスの滑りによるもの２つのタイプが考えられており, それらの最終強度への影響について考察する.

3. 研究目標の達成状況

これまで, 申請者らは, Spring 8によるAl-Si-Mg合金の鋳造物のCTスキャンイメージの取得し, このイメージデータに対し, 画像処理の技術を用いて前処理を行い, イメージベース有限要素解析技術を用いた解析により, 繰り返し荷重を与えた際の合金の微視構造の弾塑性挙動を調べ

るための準備を進めてきた. 2015 年度はオープンソースソルバーのFrontISTR を流体科学研究所のスーパーコンピュータに移植し，非線形有限要素法を用いた弾塑性解析が行える環境を整えた.

4. まとめと今後の課題

今後，2016 年度前半には，大規模計算を進めることにより疲労強度の評価につなげることを試みる．また，2016 年後半にはその結果を設計に反映するために，トポロジー最適設計を応用して，具体的な材料の微視構造の設計，合金配分の調整などの設計を試みる.

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Vinicius Aguiar de Souza, Osamu Kuwazuru, Katsuyuki Suzuki, Masakazu Kobayashi, Hiroyuki Toda, Shigeru Obayashi: Investigation of the Fatigue Damage in Cast Aluminum Alloy using Synchrotron Microtomography, Image Processing and Image-based Finite Element Analysis, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information*, (2015), pp. 130-131.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（特許）なし

（受賞）なし

（マスコミ発表）なし

2. 研究成果報告書
＜連携公募共同研究プロジェクト＞

連携公募共同研究プロジェクト	
課題番号	J15R001
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	3 年目

心電計と超音波を融合したマウス胎仔心機能評価
Cardiac evaluation of fetal mice by ECG and ultrasound

杉林 里佳*†，伊藤 拓哉**††
船本 健一***††，早瀬 敏幸****††， 木村 芳孝**
*国立成育医療研究センター　周産期・母性診療センター　胎児診療科,
**東北大学医学系研究科　融合医工学分野
***東北大学学際科学フロンティア研究所
****東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

母体腹壁誘導胎児心電図は母体や胎児に対し非侵襲的に胎児心電図を計測することができる方法である。S/N が非常に小さい胎児心電位をノイズから抽出するには R 波の検出が必要である。しかし、特定の胎齢（妊娠 30 週前後）で一時的に R 波の振幅が低下し R 波の検出が困難となることが知られているが実態は不明である。

本研究の目的はマウス胎仔を対象とし R 波の電位が低下する機序を解明することである。切迫早産の治療薬として用いられる硫酸マグネシウム($MgSO_4$)は、血中濃度によっては心収縮力に影響を与えうることが知られている。胎齢の異なる胎仔を用いて生理学的手法（心筋収縮力、心電図）による評価系に外的因子（母獣薬物投与）による振幅低下の機序を解明し，ヒト胎児で安全に R 波を増加する手段開発の基礎研究とする。

2. 研究成果の内容

R 波振幅修飾実験（超音波検査：流体科学研究所　早瀬研究室，心電位計測：医学系研究科　木村研究室にて実施）

交配日確定マウスを作成し、胎齢 15.5 から 18.5 のマウスを用いてケタミンとイソフルランによる麻酔下で母獣を開腹し胎仔の心電位を直接誘導で計測した。母獣腹腔内に $MgSO_4$500㎎/kg を投与し、R 波振幅の変化を算出した。また胎仔の循環動態の変化について早瀬研究室が所有する超音波画像診断装置（VEVO-2100）を用いて計測を行った。

胎齢 15.5 と 18.5 のマウス（2 母獣、4 胎仔）を用いた計測結果を図 1 に示す。$MgSO_4$ 投与後、約 20 分で母獣の心拍数の減少が見られ、続いて 40～60 分を最下点とする胎仔の心拍数減少を認めた。心拍数減少は $MgSO_4$ の刺激伝導障害によるものと考えられたが、母仔の反応のピークには時間差がみられた。胎仔の心拍数変化が見られたにも関わらず、R 波電位は著明な変化を認めずほぼ一定の値を示した。$MgSO_4$ の投与は胎児心拍数細変動を減少させることが知られているが、Short term variability(STV)は胎仔心拍数の減少に伴い増加がみられた。

胎齢 15.5 のマウスに $MgSO_4$ を腹腔内投与後に超音波診断装置を用いて胎仔の Fractional shortening(FS)の計測を試みた。胎仔心拍数や STV に変化が現れるより前の薬剤投与 20 分後には FS の低下がみられた（図 2、表 1）。

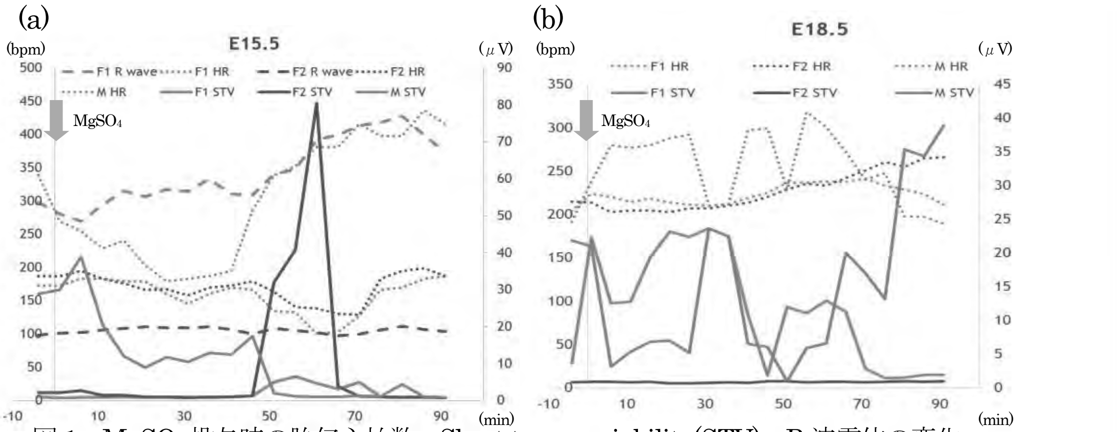
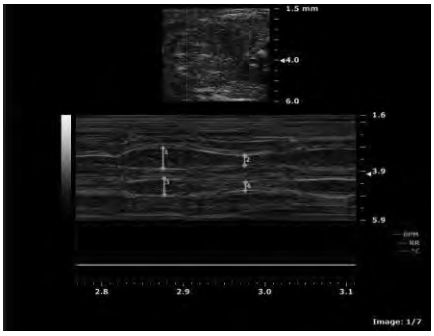


図 1：$MgSO_4$投与時の胎仔心拍数、Short term variability(STV)、R 波電位の変化
(a)胎齢 15.5 (b)胎齢 18.5



	%FS (Right)	%FS (Left)
Before MgSO4 administration	52.8	48.3
5min later	47.7	50.0
10min later	-	31.0
20min later	48.3	26.9

図 2：Fractional shortening 計測　　表 1：$MgSO_4$投与時の Fractional shortening の変化

3. 研究目標の達成状況

妊娠マウスを用いて母獣への薬剤投与により胎仔の心機能変化についての評価を行う実験系を確立し、安定した状態での胎仔心電図計測と胎仔超音波検査が可能になった。選択した薬剤では予想された R 波電位の変化が得られなかったが、母仔の心拍数変化に差異を認め、胎仔心拍数の減少に伴い STV の増加を認め胎齢の異なるマウスでも同様の変化が見られた。

4. まとめと今後の課題

妊娠中期の胎児心電図の R 波電位低下の機序解明を目的に母獣への硫酸マグネシウム投与をおこなったが胎仔の R 波の電位の変化は認めなかった。胎仔のみに発現している T 型 Ca チャネル刺激薬を用いて R 波電位の変化、胎齢による違いを明らかにし、特定の胎齢で観察される一過性の R 波振幅低下の生理学的機序の解明に努めることを課題とする。また母仔の心拍数変化の差異や心拍数減少と STV 増加の関連性について症例数を増やして検討を行う。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

該当なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] R. Sugibayashi, T. Ito, K. Funamoto, T. Hayase and Y. Kimura：Cardiac evaluation of fetal mice by ECG and ultrasound, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 184-185.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

該当なし

連携公募共同研究プロジェクト	
課題番号	J15R002
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	3 年目

漂流物混入型津波に関するスーパーコンピューティングとスケールモデリング
Supercomputing and Scale Modeling of Flotsam Mixed Tsunami

石本 淳*†，今村 文彦**††，Kozo Saito***††, Jean-Yves Cavaillé****††
*東北大学流体科学研究所，**東北大学災害科学国際研究所
***IR4TD, University of Kentucky, USA
****MATEIS, INSA-Lyon, France
†申請者，††所外対応研究者

1 研究目的

現在，海洋学者等により行われている津波シミュレーションは数 100 km に渡る広領域を対象とするものが主であり，解析に用いられる方程式も長波近似等の何らかの近似を施した方程式を用いるのが慣例となっている．このような従来型シミュレーション手法によっては津波高さや浸水域の広域予測に対してある程度の成果を得られてはいるものの，長波近似（鉛直方向流速分布は一様と仮定）を用いているため津波が構造物体に及ぼす力の影響に関しては正確な予測が行われているとは言えず，工業プラント等の比較的狭い領域における土地や建造物のダメージ予測に対しては適用が不可能であるのが現状である．さらに今回の震災で非常に大きな問題となった，第二波・第三波の津波すなわち震災がれき・漂流物が引き波によって混入した場合の津波は破壊力が通常の津波に比較して非常に増大すると考えられるが，従来型の海水単相のみの津波シミュレーション手法のみはダメージ予測が困難であると言える．

そこで本研究では，漂流物・震災がれきが混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い，スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価を行う．本シミュレーションによる津波衝撃力評価に関する定量予測精度高度化のため，沿岸海域の模型化と津波スケールモデリングの概念を用いた基礎実験を行い，シミュレーション結果との比較検討を行う．

また，陸上構造物の津波衝撃緩和を可能にする配置最適化・形状最適化シミュレーション，沖合に建造する津波緩衝用構造物の形状や配置に関するシミュレーション予測を行う．

2 研究成果の内容

漂流物・震災がれきが混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い，スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価を行った．本シミュレーションによる津波衝撃力評価に関する定量予測精度高度化のため，沿岸海域の模型化と津波スケールモデリングの概念を用いた基礎実験を行い，シミュレーション結果との比較検討を行った．

混相津波シミュレーションのベースとなる専用コードを開発しており，1）自動車の漂流，2）漂流木が混入した津波が水門に衝突する場合，3）漂流小タンクが固定された大タンクに衝突

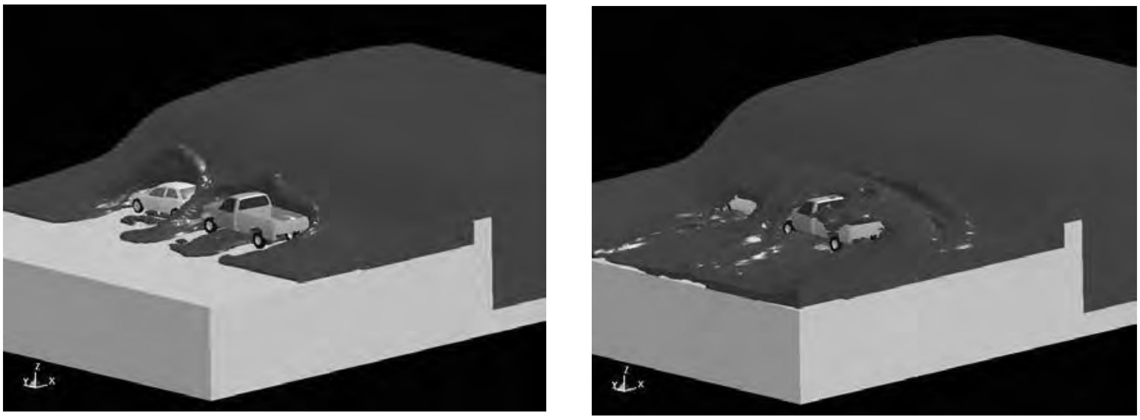


図１　津波による自動車漂流に関する融合数値計算結果

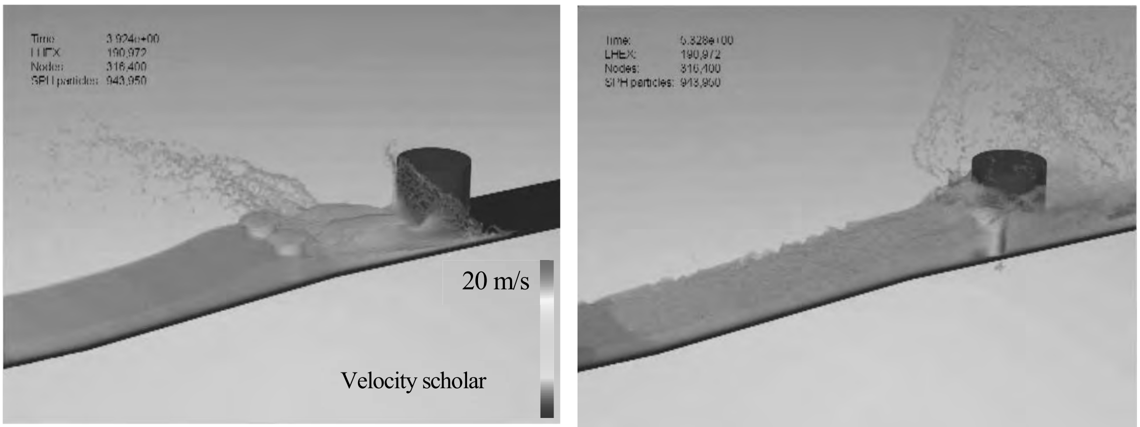
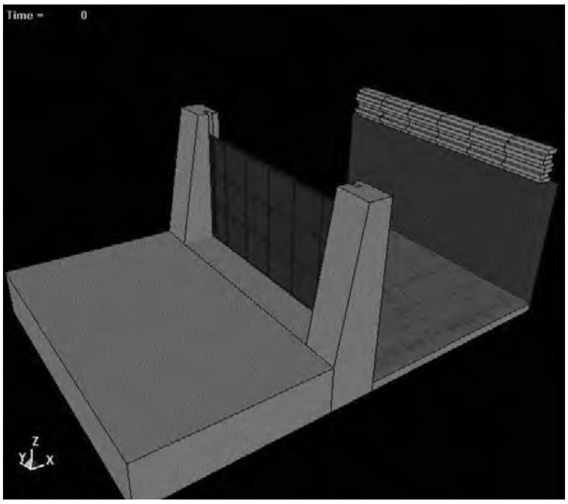


図２　津波による小型タンク漂流と陸上構造物への衝突現象に関する融合数値計算結果

する場合のシミュレーションを行った．その結果，流木が混入した津波の場合は水門に対し衝撃力が 2 倍以上に増加することが判明した．
また，重量の重いオイルタンクが津波に混入した場合，混相津波が陸上構造物に与える衝撃力は単相津波の場合よりも 10 倍以上に増加することが判明した．



Specifications for numerical model

- Tsunami: Euler element（260,288 elements）
- Water gate and prop： Lagrange element（22,728 elements）[Concrete section：Rigid body, Water gate： Elastic-plastic body]
- Flotsam: Lagrange elements（Rigid body, Specific weight: 0.9, Total mass 1.1 ton）（1,260 el elements）
- Initial velocity of tsunami: 3.0 m/s
- Size of water gate: width: 5.0 m, height: 2.5 m

Fig. 3. Computational geometry for lumber mixed tsunami impacting a water gate.

The lumber mixed tsunami's hydrodynamic impact behavior for a water gate

Next, the effect of flotsam mixing on the impact force of the tsunami was numerically predicted. In the present computation, the lumber mixed tsunami's hydrodynamic impact behavior for a water gate was performed. Figure 3 shows the computational geometry for lumber mixed tsunami impacting a water gate, and the specifications of computational model items including the initial numerical conditions. For the dynamic material characteristics, it was assumed that the concrete section had a rigid body and the water gate had an elastic-plastic body.

Figure 4 shows the numerical results of the lumber mixed tsunami's hydrodynamic impact behavior on the water gate. The computation was performed with lumber and without lumber to study differences of tsunami impact behaviors. In Figure 4, the color contours in the water gate represent different magnitudes of stress. Interestingly, the change in flexibility and impact stress of the water gate by the impact of lumber mixed tsunami was numerically reproduced. Figure 5 shows the effect of flotsam (lumber) in the tsunami on the impact force to the water gate. It was found that the impact force of lumber mixed with a tsunami was two times greater than that of single phase tsunami (without flotsam case).

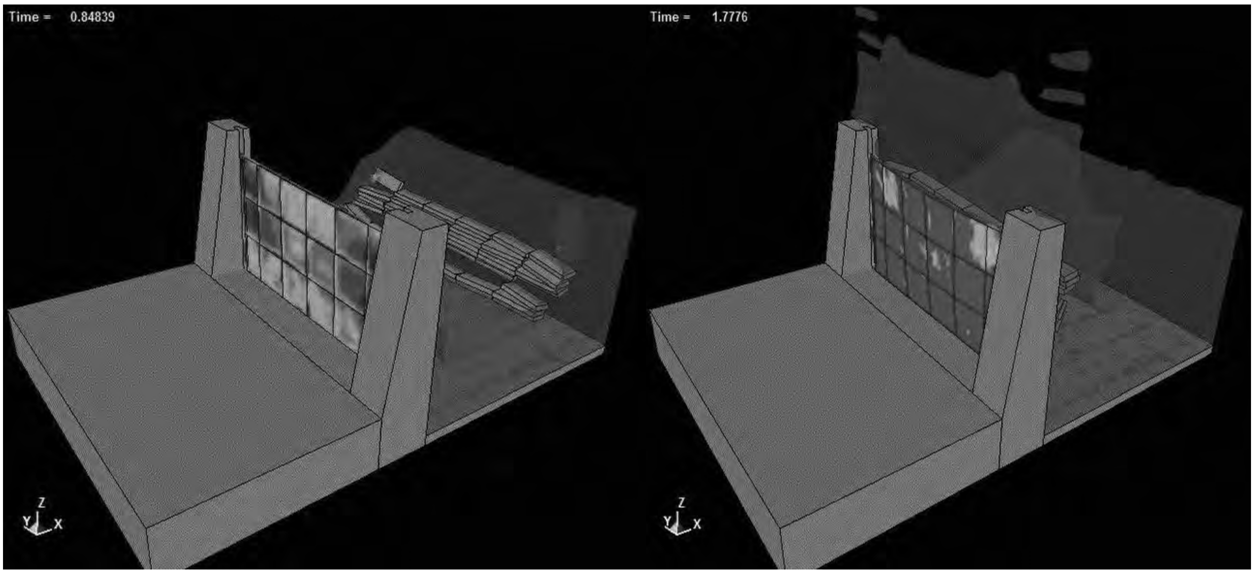


Fig. 4.　Lumber mixed tsunami’s hydrodynamic impact behavior on the water gate.

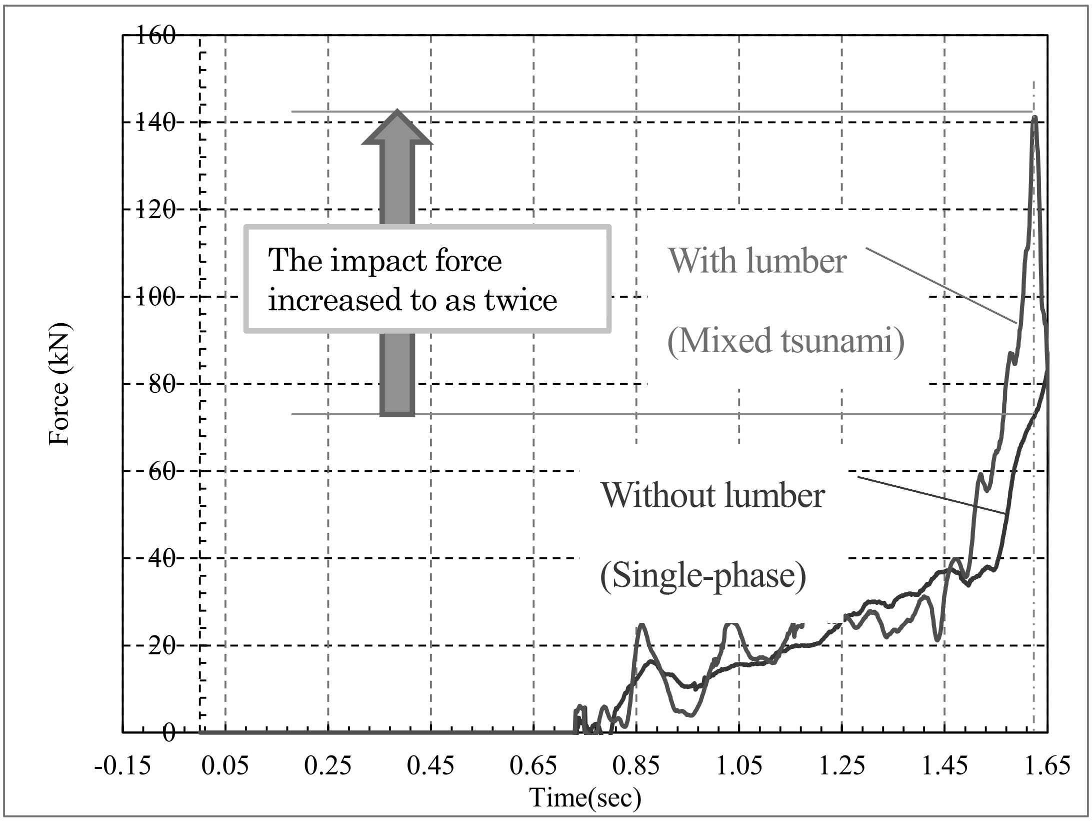


Fig. 5.　Effect of flotsam (lumber) mixing with tsunami on impact force for the water gate.

Computation of a flotsam mixed tsunami behavior by SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) method

In the final computation, we constructed the SPH method to investigate the interaction between a tsunami and structures, and also to investigate the damage of a flotsam mixed tsunami on land structures. For the numerical modeling, we assumed the following mixed tsunami flow conditions.

- A flotsam or obstacle was carried away by the backwash of the first wave of the tsunami, and then pushed by a second wave of the tsunami.
- The flotsam went onto the shore and collided with the land structure.

To analyze these phenomena, we used the computational geometry which demonstrates two small tanks impacting a large tank, as shown in Fig. 6. The tsunami wave was assumed to break down within collapsing rectangular water column as it collided with the small tank and began to move the small tank because of the impact force of the tsunami. These small tanks in the tsunami wave then collide with the large tank which is fixed to the ground. The small cylindrical tanks were assumed to be filled with oil, and were regarded as obstacles or flotsam

Structure	Density	Shell thickness
	(kg/m^3)	(mm)
Small tank	1038.31	N/A
Large tank	7850.0	20

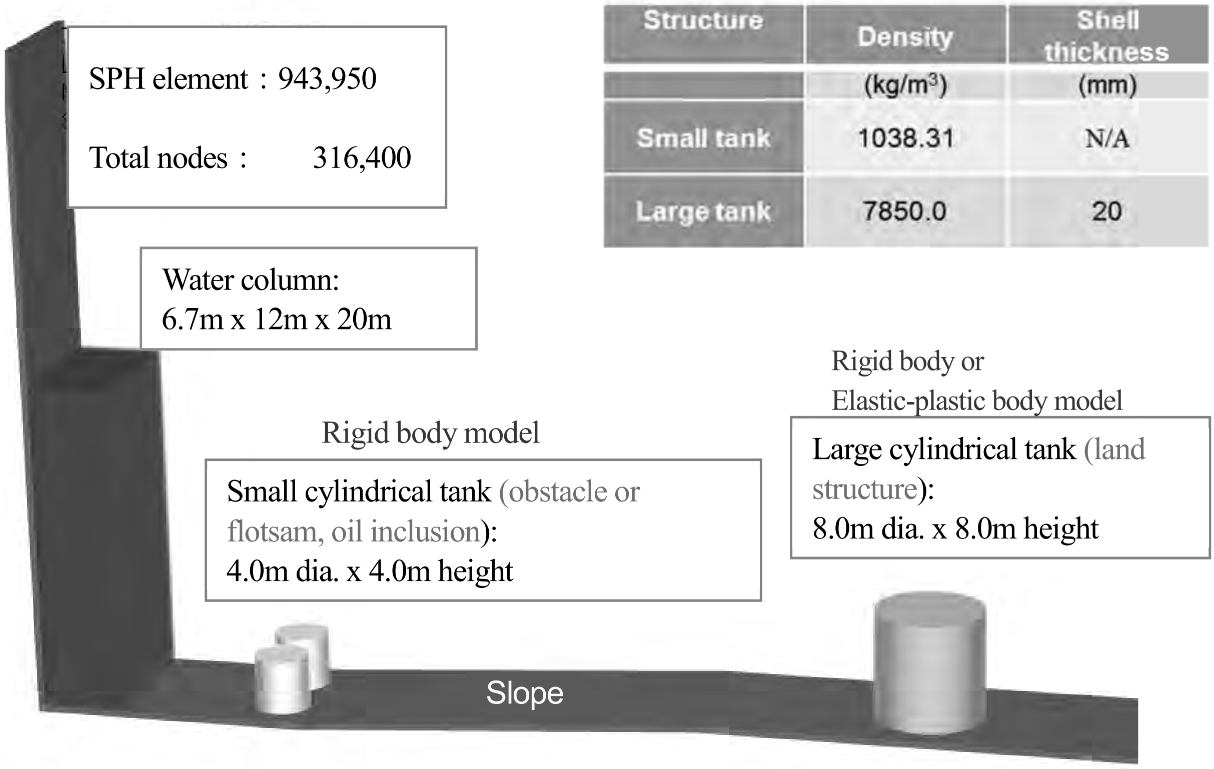
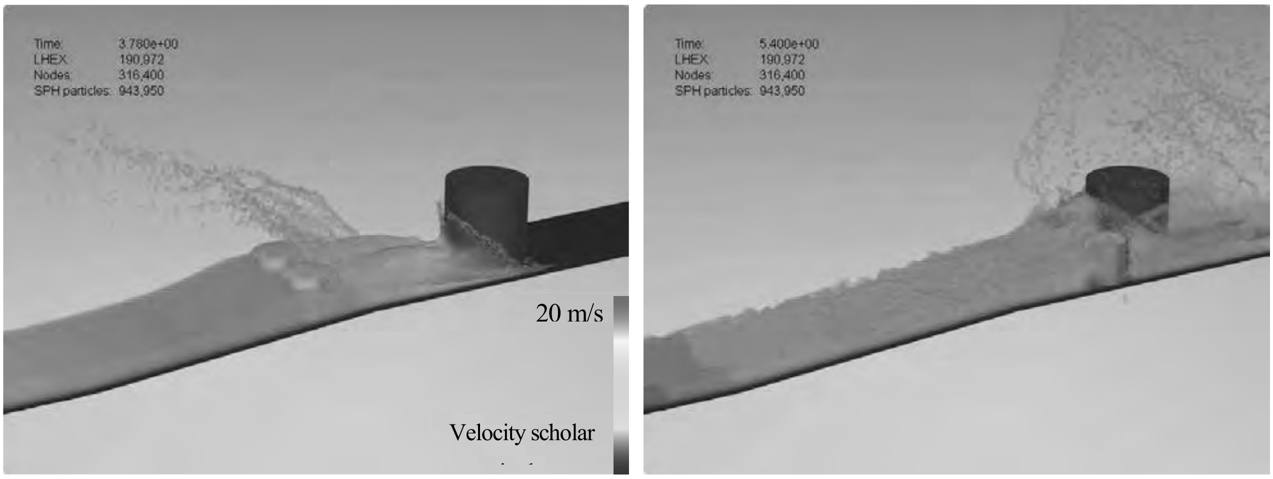


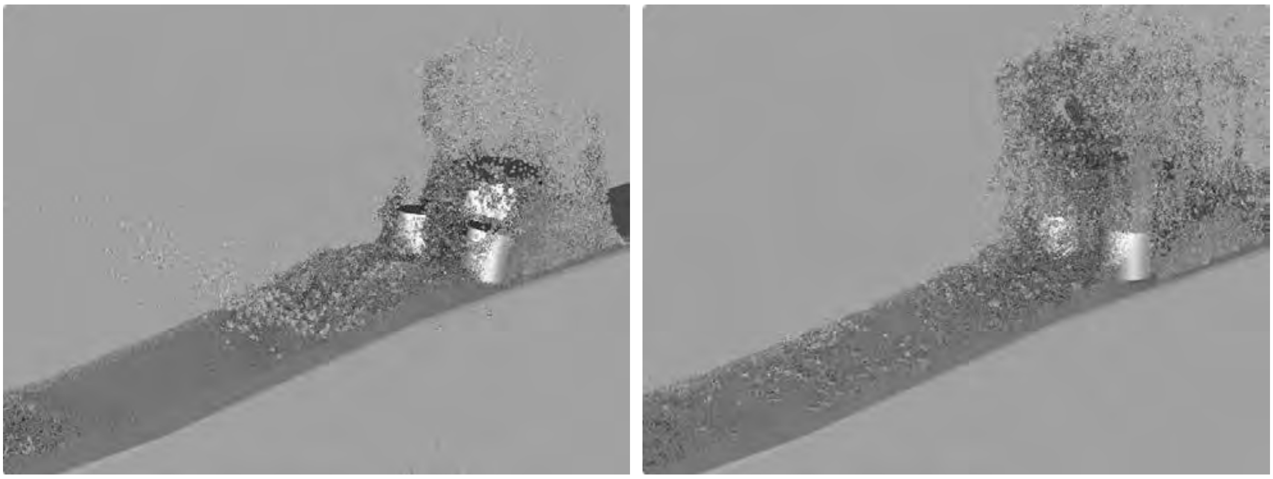
Fig. 6. Computational geometry for small tank mixed tsunami impacting a land structure.

within the tsunami with a slip boundary condition relative to the ground. The large cylindrical tank was fixed to the ground, and was assumed to be hollow (empty) with a shell thickness of 20 mm.

Figure 7 shows the SPH numerical results of the flotsam mixed tsunami. The flow characteristics and behavior of its interface deformation and collision with the land structures were clearly simulated.



(a) Small tank mixed tsunami flow characteristics and its impact behavior on a land structure



(b) Pov-RAY rendering result

Fig. 7. Flotsam mixed tsunami flow characteristics and behavior of its interface deformation and collision with a land structure by SPH method.

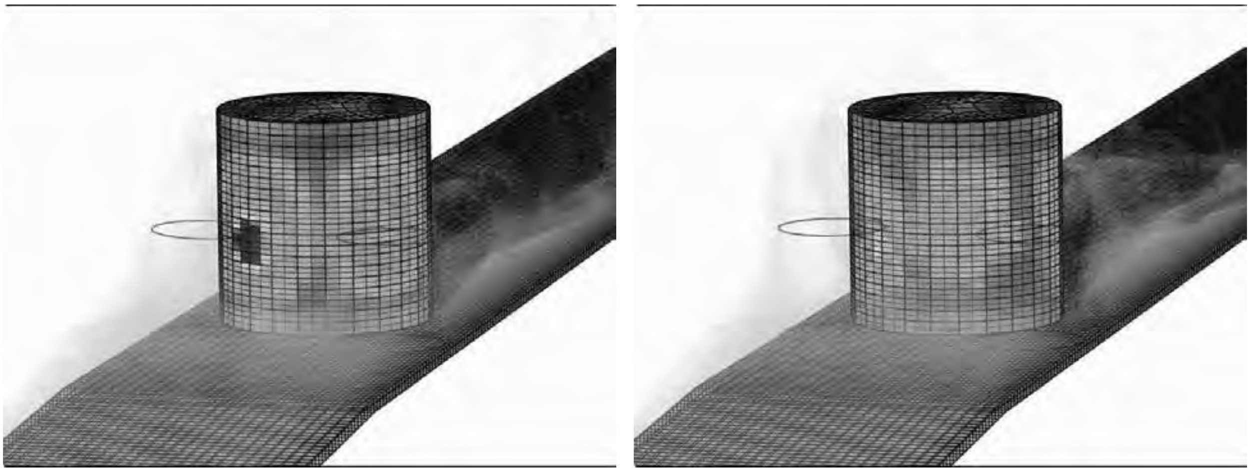


Fig. 8. Impact stress profile of land structure while flotsam mixed tsunami impingement by SPH method (Color contour denotes the scalar magnitude of stress in land structure).

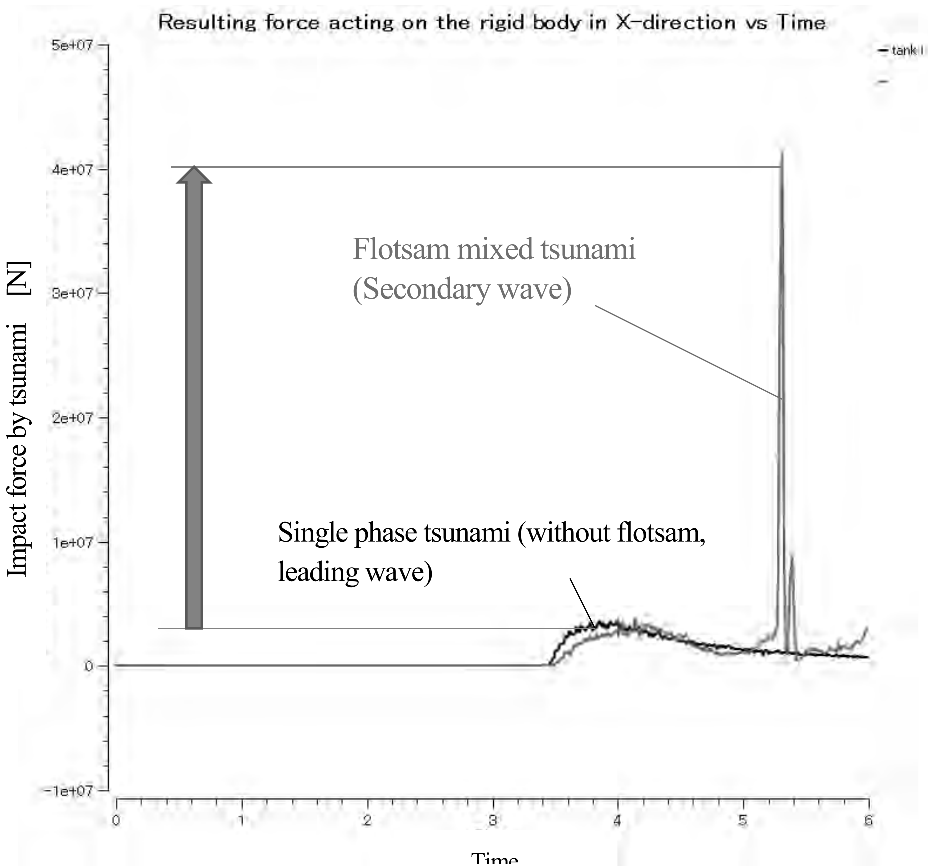


Fig. 9. Effect of flotsam mixing with tsunami on the impact force with a land structure.

Figure 8 shows the impact stress profile of the land structure with flotsam mixed tsunami impingement; an elastic-plastic body assumption was applied for the land structure. When the two small tanks impinge the larger tank land structure the maximum impact stress was 100MPa, and a corresponding maximum plastic strain of 0.0015 was numerically obtained.
Figure 9 shows the effect of flotsam mixing with the tsunami on the impact force to the land structure. In the case of a single phase tsunami (without flotsam, regarded as a leading wave), the maximum impact force was 3.5MN. In the case of a flotsam mixed tsunami (regarded as secondary wave), the maximum impact force reached 42MN. In other words, it was found that the impact force magnitude of flotsam (small tank) mixed with the tsunami was over 10 times than that of single phase (without flotsam case) tsunami.

Scale modeling the effect of flotsam mixing on tsunami damage

The flotsam is accelerated by the water flow caused by the tsunami, with its motion and hydrodynamic force dominated by the inertia of the water and flotsam and by the force of gravity acting on the water and flotsam. The dominant physical law and similarity law for this computational system are introduced by following formula.

Dominant physical law:

Buoyancy: $\boxed{F_b = \Delta\rho g l^3}$

$\boxed{v = \frac{l}{t}}$

Inertia: $\boxed{F_i = \rho_m l^3 \frac{l}{t^2}} \longrightarrow \boxed{\rho_m l^2 v^2}$

Similarity law:

$\boxed{\pi_1 = \frac{F_i}{F_b}} \rightarrow \boxed{\frac{\rho_m v^2}{\Delta\rho g l}}$ (Froude number of flotsam mixed tsunami)

$\boxed{\pi_2 = \frac{v^2}{gl}} \rightarrow$ (Froude number of single-phase tsunami)

$\boxed{\frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{\rho_m}{\Delta\rho}} \rightarrow$ (Effect of flotsam mixing on tsunami damage)

where $\Delta\rho$ is the density difference between flotsam and seawater, ρ_m is the mixture density of tsunami, g is the gravitational acceleration, v is the velocity, l is the characteristic length, and t is the time. According to the above analysis, it was found that Froude number was suitable to evaluate the effect of mixing of flotsam on the tsunami impact damage. As the mixture density increased, namely, the amount of flotsam became larger and the density difference between flotsam and seawater became smaller, the damage of the mixed tsunami to the land structure increased. The scale effect of the mixture density and the density difference between flotsam and seawater became the dominant factors for tsunami impact force and damage prediction.
Therefore, quite reasonable results have been obtained by the present computations in which

the land structure received much greater damage by the impingement of a small tank mixed tsunami as compared to that of the lumber mixing case.

Experimental approach for tsunami scale modeling

To validate the numerical results on the height and traveling velocity of a tsunami wave, University of Kentucky students conducted the 1/1000th and 1/2000th scale model during the ME 565 course for the Great East Cost Earthquake generated tsunami in March 2011. A commercially available detergent was added to water to reduce the surface tension force for the scale model to approximately satisfy the Weber number, a ratio of the inertia and the surface tension forces. A series of color photographs including Figure 10 were taken during the experiments, which showed the scale model tsunami shape and behavior surprisingly similar to the full scale tsunami reported by a Japanese TV news. The moving speed of

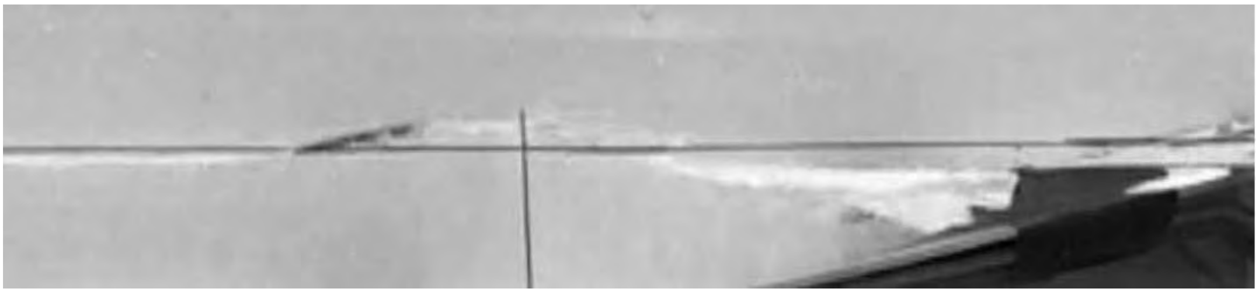


Fig. 10. A color photo taken from side for the 1/1000th scale model generated tsunami.

tsunami was roughly correlated by the *Fr* number scaling although the source term was not scaled, since the full scale data was not available at that time. This is another surprise for validity of this simple scale model experiment.

Conclusions

1. Two different supercomputing approaches, including the ALE method (Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method) and SPH method (Smoothed Particle Hydrodynamics Method), were used to investigate flow characteristics of a flotsam mixed tsunami.
2. The flotsam mixed tsunami behavior associated with interface deformation and collision with land structures was reasonably reproduced by the supercomputing methods.
3. The impact stress profile of land structures with flotsam mixed tsunami impingement was computationally predicted. As a result, it was shown that the impact force of a flotsam mixed tsunami would be over 10 times greater than that of single phase tsunami (without flotsam case). It was also found that the scale effects of mixture density and density differences between flotsam and seawater is the dominant factor for tsunami impact force and damage prediction.

3 研究目標の達成状況

漂流物混入型津波に関する混相流体力学的扱いを考慮した数値計算モデルを開発した．粒子法の一種である SPH 法(Smoothed Particle Hydrodynamics Method)と衝突解析用 FEM のカップ

リングによる混相津波シミュレーション法を開発した．

達成度は 100%である．これにより，がれき・漂流物が混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い，スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価が可能となる．

4　まとめと今後の課題

SPH 法による漂流物･震災がれきが混入した津波ダメージや衝撃力を評価するコンピューターシミュレーション（模擬実験）技術を開発した．さらにスケールモデリングに基づくモデル実験結果を計算情報として CFD 計算過程に導入する融合計算手法の基本方針を確立した．

今後の方針として，粒子法を用いた混相津波と陸上構造物の衝撃相互作用が解析可能となるシミュレーション法を開発する．

広域に渡る津波挙動と衝撃力評価が実験室レベルで解明可能となるスケールモデリング手法の開発と模型実験を行う．構造物に漂流物混入型津波が衝突した際の弾塑性変形を考慮したシミュレーション法を開発し，沿岸部構造物のダメージ予測を行う．

また，漂流物・震災がれきが混入した津波の流動と衝撃力に対し近似を用いない高精度の混相流体力学的アプローチを行い，スーパーコンピューティングによる混相津波の流動予測と構造物へのダメージ評価を行う．本シミュレーションによる津波衝撃力評価に関する定量予測精度高度化のため，沿岸海域の模型化と津波スケールモデリングの概念を用いた基礎実験を行い，シミュレーション結果との比較検討を行う．また，陸上構造物の津波衝撃緩和を可能にする配置最適化・形状最適化シミュレーション，沖合に建造する津波緩衝用構造物の形状や配置に関するシミュレーション予測を行う．

本研究より，津波被害を沿岸地域の大型構造物建設のみで回避することは限界があることが判明した．そこで，被害を最小限に食い止めるには，震源に近い沖合津波のエネルギーを元から散逸させる方法を考えた方が津波被害の軽減化対策として有効であることが推測される．すなわち，地震発生直後の沖合津波水位がまだ低い段階で津波の有する運動エネルギー・流体力を緩和させる技術を開発できれば，津波被害の根本的解決が可能になると考えられる．津波の有する流体力をその生成時から軽減化するための研究を開始する必要があると言えよう．

5　研究成果（*は別刷あり）

1)　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

[1] Jun Ishimoto and Kozo Saito,
Supercomputing and scale modeling the effect of flotsam mixed tsunami: Implication to tsunami generated by The 2011 Great East Coast Earthquake, *Progress in Scale Modeling, Volume II*, Springer (2015) pp. 45-55. DOI: 10.1007/978-3-319-10308-2_3.

[2] Jun Ishimoto,
Supercomputing of Multiscale Multiphase Flow Related to Industrial Field and Natural Disaster Problems,
11th Korea-Japan CFD Workshop (KJCFD2015), Dec. 16th, 2015, Kyushu University, Fukuoka, Japan [Invited].

[3] Jun Ishimoto,
Coupled Supercomputing of Fluid and Structure Interaction Caused by Flotsam Mixed Tsunami,
Proceedings of the 1st International Conference on Computational Engineering and

Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2014), Sendai International Center, 13-16 April 2014 in Sendai, Japan.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] Kozo Sekimoto, Kazunori Kuwana, Jun Ishimoto and Kozo Saito
The Scale Modeling Large Scale Disasters: Finding the Root Causes and Testing Effectiveness of Prevention Methods
The Third International Symposium on Innovative Energy Research III, Reconstruction of Large Scale Disasters and Explore Methods to Mitigate the Effects of These Disasters, Oct. 27, 2015, Sendai International Center, Sendai, Japan.

[2] Jun Ishimoto and Kozo Saito,
Supercomputing and Scale Modeling of Flotsam Mixed Tsunami,
12th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2015), Oct. 27-29, 2015, Sendai International Center, Sendai, Japan.

[3] Jun Ishimoto,
FSI computational study of offshore tsunami and mega-floating structures,
ELyT Workshop 2015 in Matsushima, Feb. 18-21, 2015, Matsushima Century Hotel, Matsushima, Japan.

[4] 石本 淳（東北大），Kozo Saito (Univ. Kentucky, USA),
メガフロートを用いた津波ダメージ軽減に関する SPH 連成シミュレーション，
混相流シンポジウム 2015　オーガナイズドセッション（OS-5 サステナブル異分野融合型混相流），2015 年 8 月 4 -6 日，高知工科大学（高知県香美市）

[5] Jun Ishimoto, Development of disaster damage prediction system for flotsam mixed tsunami and tsunami damage mitigation using offshore Mega-floating Structures,
The UN World Conference on Disaster Risk Reduction (Public Forum), March 14th to 18th, 2015, Sendai, Japan.

[6] Jun Ishimoto,
Supercomputing of tsunami damage mitigation by offshore mega floating structures,
International Innovation Workshop on Tsunami, Snow Avalanche and Flash Flood Energy Dissipation, Oct. 20-21, 2014, Chamonix, France [Invited].

[7] Jun Ishimoto,
Multiscale Coupled Supercomputing of Multiphase Fluid-Material Interaction,
ELyT Workshop 2014 in Frejus, France, February 19 – 21, 2014.

[8] Jun Ishimoto,
Coupled Supercomputing of Fluid and Structure Interaction Caused by Flotsam Mixed Tsunami,
COMPSAFE2014, 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, Sendai International Center, 13-16 April 2014 in Sendai, Japan.

[9] Jun Ishimoto,
Multiscale coupled computing of multiphase fluid-structure interaction,
2nd Core-to-Core Workshop "Japan-China Joint Workshop on Bio, Material and Flow Dynamics, Feb. 27, 2014, IFS, Tohoku University, Sendai, Japan.

[10] Jun Ishimoto and Kozo Saito,
Numerical Study of Flotsam Mixed Tsunami and Tsunami Scale Modeling,
Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Advanced Fluid Information, Sendai, (2014), pp.190-191.

[11] 石本 淳
先端産業における混相流動のスーパーコンピューティングと高度化,
日本機械学会 産業界における CFD 利用の高度化に関する研究分科会，2014 年 9 月 26 日, (東京理科大学・神楽坂キャンパス, 新宿区) [招待講演].

[12] 石本 淳
先端混相流に関する融合型スーパーコンピューティング,
第 4 回 DADiSP 利用技術研究会，2014 年 8 月 1 日, (ベルサール九段，千代田区) [招待講演].

[13] 石本 淳
混相流動のスーパーコンピューティングと先端産業応用,
日立研究所 技術研究会，2014 年 7 月 1 日（日立研究所機械研究センター，ひたちなか市）[招待講演].

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

連携公募共同研究プロジェクト	
課題番号	J15R003
課題分野	ライフサイエンス分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	２年目

先進的医用超音波イメージングに関する研究
Investigation on Advanced Medical Ultrasound Imaging Technology

田邉 将之*†，内藤 優*，西本 昌彦*，
橋本　浩**，地挽 隆夫**，島崎　正**，
宮内 優***，井上 浩介***，早瀬 敏幸***††
*熊本大学大学院自然科学研究科
**GE ヘルスケア・ジャパン株式会社 超音波製品開発部
***東北大学流体科学研究所
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

超音波画像診断装置は医療画像診断装置の中で最も簡便で広く使用されている機器である．超音波を用いた医療検査技術は成熟期にある反面，新たな潜在的可能性がある．1990 年代序盤，膵石や腎石などを診断する際に血流計測モードを通して眺めると，キラキラと星のまたたきのように描出される“Twinkling Sign”現象が報告された．本現象はその原理が十分に解明されておらず，これまで様々な仮説が提唱されるも未だ臨床への応用には至っていない．しかし本現象の原理が解明されれば，早期乳がんのマーカーである微細石灰の検出を始めとする様々な臨床への応用が可能であると考えられる．本研究では，超音波照射時の微細石灰化を内包する軟組織の物理特性の評価を行い，上述の特異的な現象を解明し，臨床応用に向けた知見を得ることを目的とする．

2. 研究成果の内容

本研究では，診断装置及び被験者の外的環境による影響を調べるために，複数の条件を設定し非生体実験を行った．実験環境を図１に示す．ファントムには PVA-H ゲルファントムを用い，直径約 600μm のガラスビーズを内包した．超音波診断装置(GE 社製 LOGIQ S8)とリニアアレイ振動し(GE 社製 ML6-15-D)を用い，Color flow モード（Packet size:32）でエコー信号を取得し，画像を生成した(図 2)．Type-I では，超音波診断装置から十分離れた台の上に緩衝材を置き，その上にファントムを設置した．そして，プローブを手で保持することで手の微小振動によるエコーへの影響を調べたところ，Twinkling Sign が出現した． Type-II は，Type-I と同様にファントムと診断装置を離した．その上で，プローブを手で保持するのではなくステージで固定した．したがって，ガラスビーズはプローブから発せられる超音波による音響放射圧の影響のみを受けると推測される．実験の結果，Type-II で得られた画像から Twinkling Sign は出現しなかった（図２(b)）．Type-III は，プローブをステージで固定し，ファントムを超音波診断装置とモニターと同じ台の上に置いた．したがって，ガラスビーズは超音波による音響放射圧と超音波診断装置から発せられるファンなどの振動の影響を受けると推測される．超音波を照射した結果，Twinkling Sign が出現した．Type-IV では，Type-II と同じようにプローブとファントムを固定し，さらにスピーカーを別の台に設置し単一正弦波(50 から 400Hz)を連続的に照射することでファントム

に振動を与えた．したがって，ガラスビーズは超音波放射圧とスピーカーからの正弦波振動の影響を受けると推測される．実験の結果，加振周波数 50 から 300Hz の範囲の Twinkling Sign が出現した．400Hz では出現しなかったのは，スピーカーの出力特性により十分な振動を与えることができなかったためであると推測される．

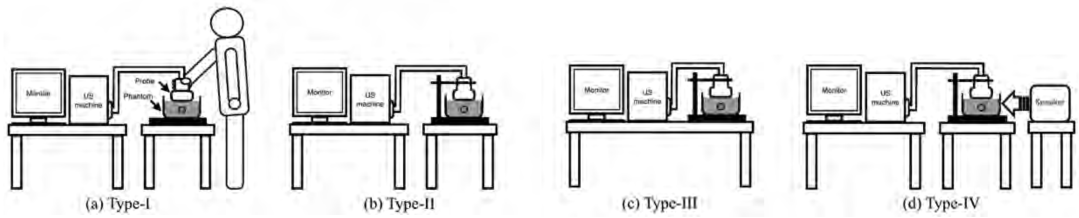


図１：実験環境

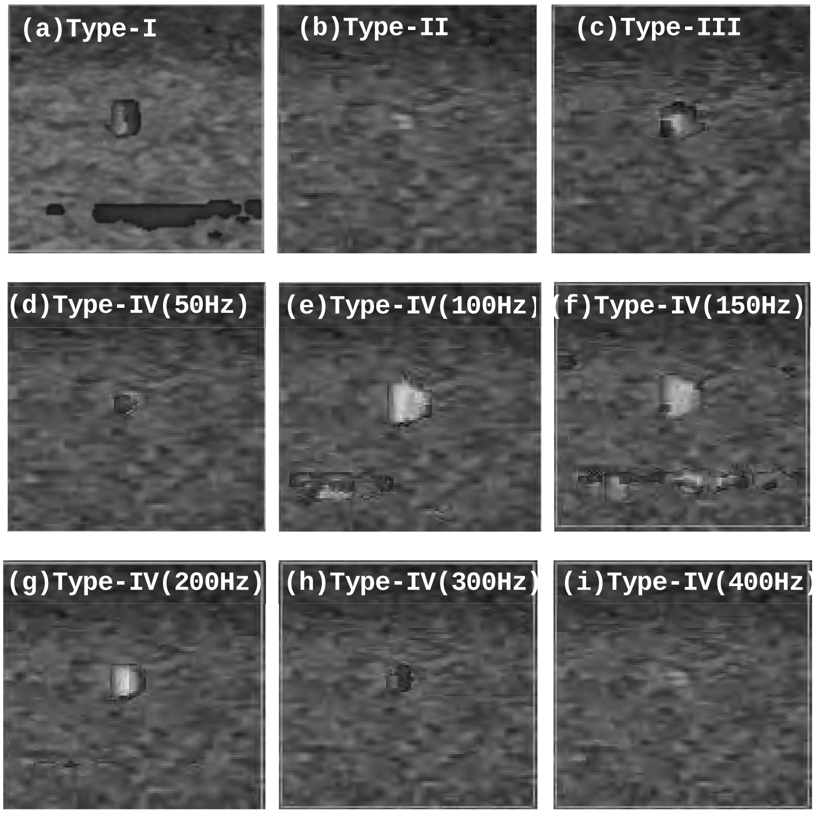


図２：CF 画像における Twinkling Sign 出現の様子

CF モードで得られたエコー信号をもとに解析を行う．ガラスビーズからエコーの振幅を求め，連続照射時のピーク値の時間推移から直流成分を削除することでエコー振幅の揺らぎを抽出する．得られた揺らぎを図３に示す．図３(a)から，Type-I における手の微小振動によるエコー振幅の揺らぎの振幅が非常に大きく，また周波数が低いことがわかる．得られた揺らぎをフーリエ変換し，周波数スペクトルを求めた（図４）．図３(h)および図３(i)において最初の７パケットで急激に振幅が落ちていることがわかる．これは PRF を高く設定したことで診断装置の照射パルスの強度が徐々に落ちていくためであると推測される．Type-II, III,および IV の加振周波数 50 から 200Hz までは時間領域においてほとんど違いが見られないが，周波数スペクトルを見ると，Type-II はピークがなく，特定の周波数成分を持っていないことがわかる．Type-III では，110Hz 付近にピークが見られた．これは診断装置の振動が原因であると考えられる．Type-IV では，300Hz までは加振周波数とほぼ同じ周波数成分にピークが見られた．

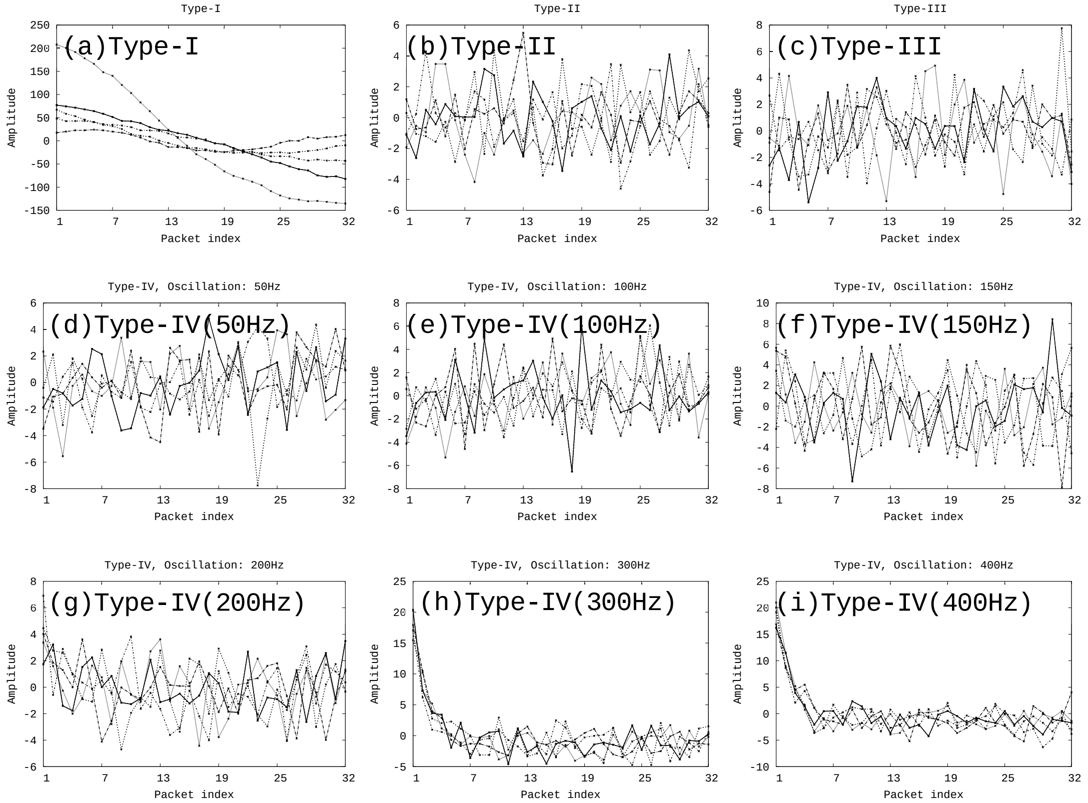


図３：エコー振幅の揺らぎ

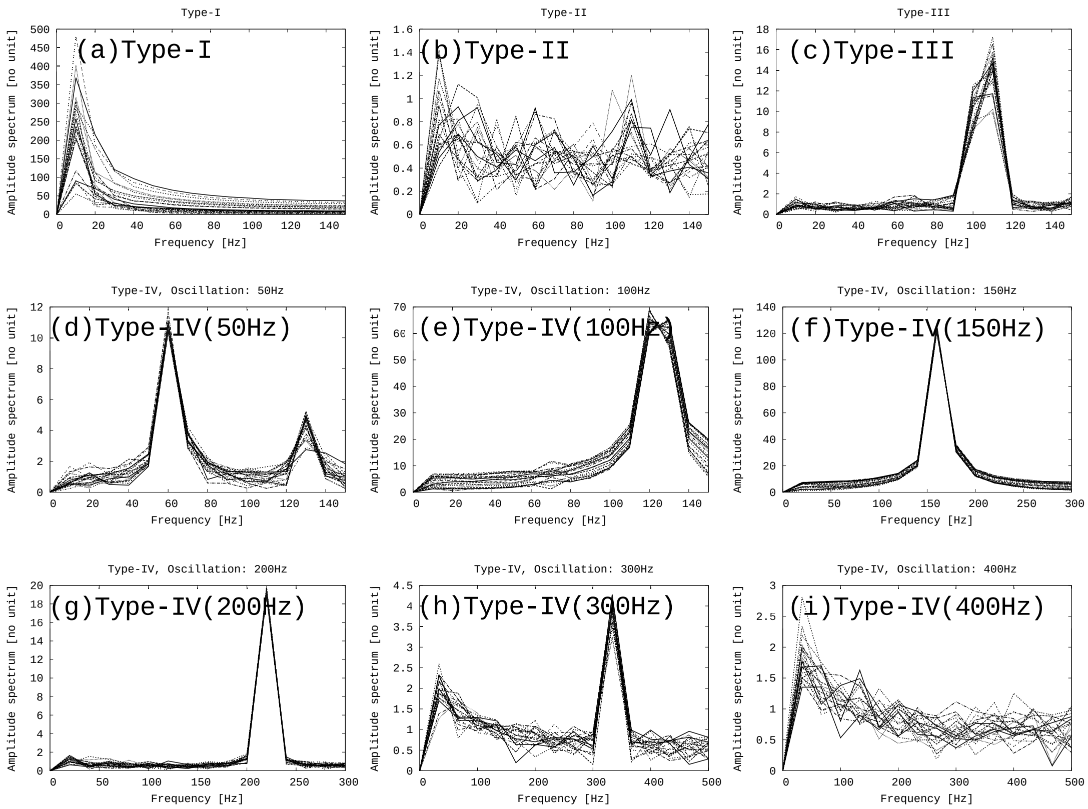


図４：エコー振幅の揺らぎの周波数スペクトル

3.　研究目標の達成状況

本年度設定した目標のうち，実験的検討については目標を達成した.

4.　まとめと今後の課題

2015 年度は，微細石灰化を内包する軟組織に超音波照射し，診断装置の周囲に存在する様々な外乱が CF 画像に影響を与え，Twinkling Sign を引き起こしている可能性が示唆された．今後は得られた成果をもとに臨床応用を目指す.

5.　研究成果（*は別刷あり）

1）　学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2）　国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 田邉将之，内藤優，西本昌彦，橋本浩，地挽隆夫，島崎正：騒音環境下における超音波ドプラ画像の虚像解析，電子情報通信学会大会 総合大会，福岡，(2015), A-4-2.

[2] Y. Naito, M. Tanabe, M. Nishimoto, H. Hashimoto, T. Jibiki, T. Shimazaki: Investigation of Twinkling Artifact by Controlling Oscillating Disturbance, *Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium*, Taipei, (2015), 3 pages.

[3] Y. Naito, M. Tanabe, M. Nishimoto, H. Hashimoto, T. Jibiki, T. Shimazaki: Analysis of the ultrasound echo in low frequency oscillation for detection of microcalcification, *The 36th Symposium on Ultrasonic Electronics*, Tsukuba, (2015), 3P5-12.

[4] 内藤優，田邉将之，西本昌彦，橋本浩，地挽隆夫，島崎正：環境外乱下における軟組織中に内包される微細石灰化からの超音波エコーの観察, 電子情報通信学会　超音波研究会, 東京, (2015), AI-2015-01, 6 pages.

[5] M. Tanabe, Y. Naito, M. Nishimoto, H. Hashimoto, T. Jibiki, T. Shimazaki, S. Miyauchi, K. Inoue, T. Hayase: Investigation on Advanced Medical Ultrasound Imaging Technology, *Proceedings of the Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information*, Sendai, (2015), CRF-R4.

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

連携公募共同研究プロジェクト	
課題番号	J15R004
課題分野	②エネルギー分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	継続 3 年目

省エネルギーのための知的層材料・層構造に関する国際共同研究

International collaborative research on smart layered materials and structures for energy saving

Toshiyuki Takagi*†, Tetsuya Uchimoto*
Jean-Yves Cavaillé**††
Christian Boller***††, Jinhao Qiu ****††,
Julien Fontaine*****††, Manfred Kohl******††
Henrik Alfredsson *******††
* Institute of Fluid Science, Tohoku University,
** INSA de Lyon, *** Fraunhofer Institute for NDT,
**** Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
***** EC Lyon, ******Karlsruhe Institute of Technology
*******KTH Royal Institute of Technology

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. 研究目的

本研究は，東北大学とリヨンとの大学との過去１０年以上にわたる研究交流を通して開拓された「知的構造材料」に関する研究分野の発展形として位置づけられ，近年進展の目覚ましいマルチマテリアル多機能性材料とセンシング技術との融合により，新たな知的構造体の創成を目指す．特に，知的構造体と流体との相互作用に着目した新しい省エネルギー機能を実現するための学理基盤を構築する．このために，東北大学科学研究所を中心とする日本とリヨン，グルノーブルを中心とするフランスの研究チームに加え，センシング技術の産業応用について実績のあるドイツ・フラウンホーファ研究機構，中国における知的材料構造研究の重点拠点である中国・南京航空航天大学，境界層制御に関する理論および実験研究において世界的に著名な拠点である KTH スウェーデン王立工科大学が加わり，研究を加速させる．

上記の研究分野を構築するための研究として，主に以下のテーマについて取り組む.

１）センシング機能と境界層の制御機能を有するスマート構造炭素繊維複合材料

２）スマート伝熱，制振，潤滑機能を有する知的層構造材料の開発

３）耐食性を有する受動傾斜フィルムによる新しいエネルギープラント材料システム

これらの共同研究について，情報を共有するとともに学理を抽出するために，交流期間中に毎年セミナーを開催する．また，若手研究者の発掘と育成のために，サマースクールの開催，国際大学院の連携，を積極的に推進するとともに，若手研究者の回遊研究を通した研究者交流を図る．本研究の全体の構想図を図１に示す.

2. 研究成果の内容

日本、フランス、IZFP、南京航空航天大学、KTH スウェーデン王立工科大学におけるジョ

イントラボラトリや共同研究体制を活用して、先進的輸送機械のための知的層材料・層構造研究及びエネルギープラント保全のための知的層材料・層構造研究に関する共同研究テーマについて、要素研究から応用研究にいたるまでの研究を推進した。さらに、東北大学・リヨン大学間の学術的な研究を国際産学連携に発展させるための取り組みとして、ELyTGlobal計画について立案し、日仏の共同研究を中心に、ドイツ、中国、スウェーデンとの産学連携を行うことを決めた。また、CNRS の Unité Mixte Internationale (UMI, 国際混成研究所)を東北大学に設置し、本研究課題との連携について明確にした。

知的層材料・層構造研究の基盤となる、マルチマテリアルシステムの最適化設計手法の検討、流動との相互作用による機能発現のモデル化、スマートセンシング、等の研究領域について、構築された学理基盤の中間評価を行い、今後重点的に取り組む課題について検討を行った。特に、炭素系コーティングによる超低摩擦潤滑についての研究、セルロースナノファイバ(CNF)を用いた新しい多機能性複合材料に関する研究、新しいマルチセンサを高度化し、産業応用するための研究等について重点的に研究を行う。また、挑戦的なテーマについては引き続き若手研究者による共同実験により研究を行い、応用展開と、本研究の学理の深化のための研究を推進した。以下に代表的な研究成果について記載する。

1) Magnetorheological elastomers for energy harvesting

A Magneto-Rheological Elastomer (MRE) exhibits a magneto-mechanical coupling, i.e. a dependence of the shear modulus on the magnetic field and a dependence of the magnetic permeability on the shear strain. It can therefore be utilized for energy conversion, such as vibrational energy converted into magnetic one, and through induction in coils, into electrical one. In the framework of energy harvesting from vibrations, the use of soft polymers offers the advantages of being low-cost and mechanically very soft compared to their piezoelectric counterparts.

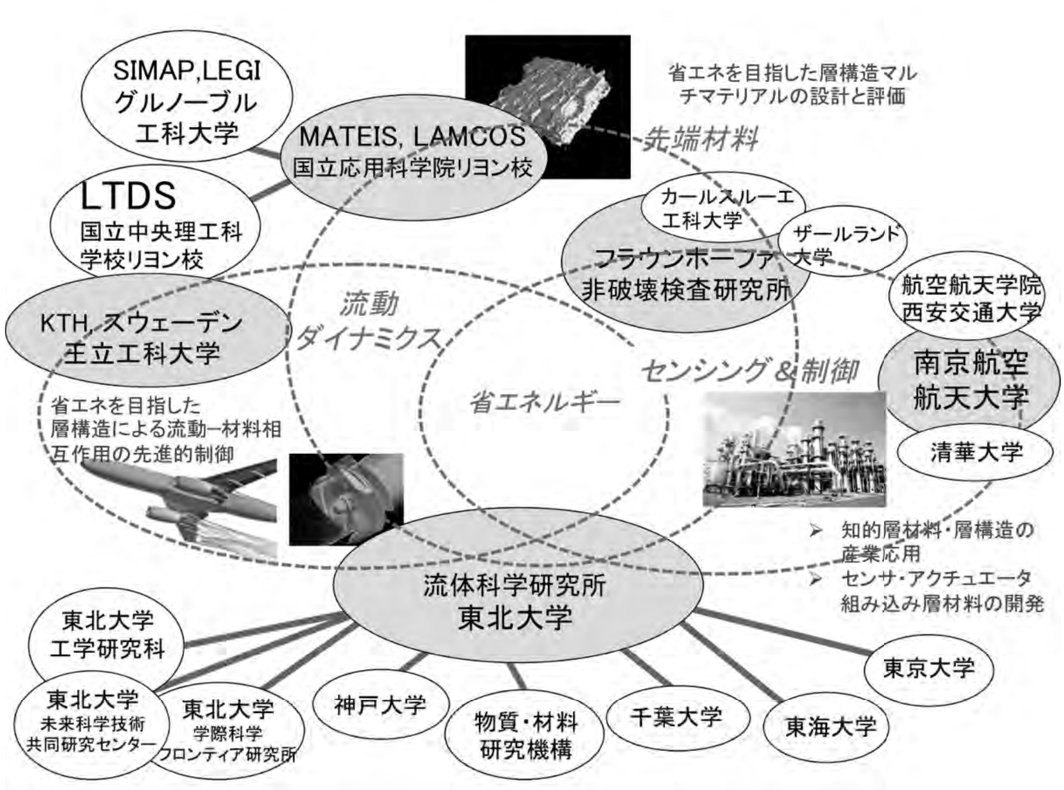


図１：本研究の構想

Both isotropic and anisotropic MRE were fabrication at the IFS and characterized. Magneto-Rheological Elastomer (MRE) fabrication consists in dispersing 70 wt% carbonyl iron particles in an elastomer matrix (Silicone rubber). In case of anisotropic MRE, a static magnetic field (0.3T) was applied during curing of the matrix. An experimental characterization bench was developed for measuring both mechanical properties dependence on magnetic field and the dependence of magnetic permeability on shear strain (see Fig. 2). A clear dependence of the mechanical properties on magnetic field was successfully measured (see Fig. 3).

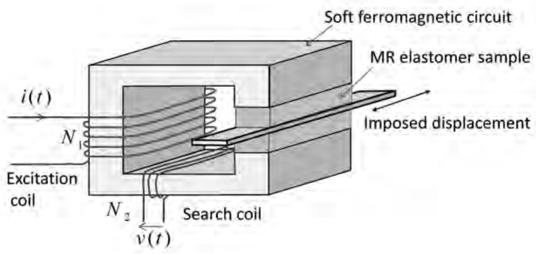


Figure 2: Characterization bench for MRE properties measurements

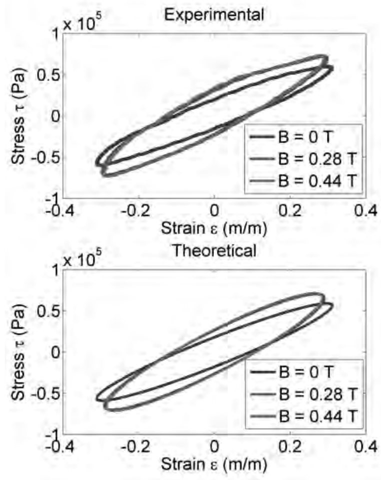


Figure 3: Mechanical properties dependence on static magnetic field

2) Metamagnetic Shape Memory Alloy Plate for Energy Harvesting Device

In this study, shape memory behavior on the Ni-Co-Mn-In film and plate are investigated for the practical application as a magnetically driven actuator device. Ni-Mn-In alloy film and plate containing Co were fabricated by a sputtering and a novel powder molding technique. The MT and one-way SME induced by controlling the temperature were observed on both, and the MT temperatures decreased with increasing magnetic field.

Following experiments were carried out to verify the one-way SME behavior of the film by heating and applying magnetic field. The film was initially bended from flat to 65 degree at room temperature and recovered its shape by heating. Further, a filed induced shape recovery was observed when the partly shape recovered film of 45 degree residual bending at 363 K was set under the magnetic field. Shape recovery process from 0T to 3T is shown in Fig. 4. It shows the possibility of metamagnetic SME and the possibility for magnetically actuated devices.

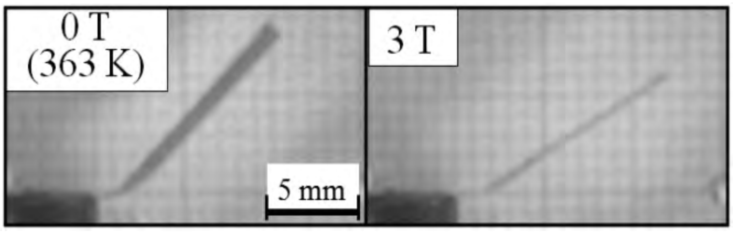


Fig. 4 Shape recovery process of the heat-treated Ni-Co-Mn-In film by applying the magnetic field.

3) Development and Performance Evaluation of High Temperature Electromagnetic Acoustic Transducer Using Air-cored Pulsed Electromagnet

This study proposes an EMAT that uses an air-cored pulsed electromagnet to overcome the Curie temperature limitations of these devices. For the purpose, we design the air-cored electromagnet, which can apply a sufficiently high magnetic field, and fabricate a prototype EMAT using high temperature materials as shown in Fig. 5. To evaluate the performance of the proposed EMAT, pulse-echo waveforms are measured under high temperature conditions. To increase the signal-to-noise ratio of the echo signals, the pulse-echo waveform is discussed in the frequency. As a result, the echo signals are successfully obtained over the temperature range from RT to 700 degrees C, and the reduction of shear wave velocity with increasing temperature is confirmed as shown in Fig. 6.

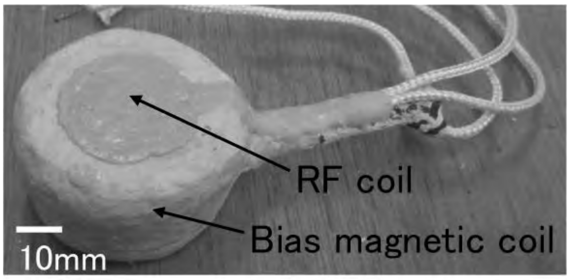


Fig. 5 Photograph of the high temperature EMAT probe.

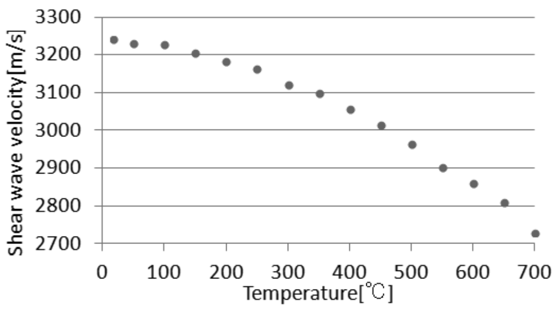


Fig. 6 Shear wave velocity variation with temperature.

3. 研究目標の達成状況

本共同研究においては、マルチマテリアルを用いた知的層材料・構造に関する共同研究について、流動と材料の相互作用とそのセンシングという新しい観点から研究を進め、省エネルギー機能を有する多機能材料システムについての学問領域を開拓する。平成２７年度はこれら一連の研究を推進し、当初の目標は達成したと考える。さらに、知的層材料・層構造研究の基盤となる、マルチマテリアルシステムの最適化設計手法の検討、流動との相互作用による機能発現のモデル化、スマートセンシング、等の研究領域について、構築された学理基盤の中間評価を行い、今後重点的に取り組む課題について検討を行った．また、未到エネルギー研究センターの国際展開にも貢献したと考えられる。

4. まとめと今後の課題

知的層材料・層構造研究の基盤となる、マルチマテリアルシステムの最適化設計手法の検討、流動との相互作用による機能発現のモデル化、スマートセンシング、等の研究領域について、学理基盤が構築された。今後，マルチマテリアルの設計・最適化研究と流動との相互作用による機能発現のモデル化を重点的に行うことにより，航空機，自動車，鉄道などの輸送システムへの応用展開を図る。また、保全の高度化につながる，検査・モニタリングのためのセンサ材料研究，耐食性を有し，かつモニタリングの用意な材料システムの開発についても研究を進め、プラント

保全への応用を展開する。

今後特に、炭素系コーティングによる超低摩擦潤滑についての研究、セルロースナノファイバ(CNF)を用いた新しい多機能性複合材料に関する研究、新しいマルチセンサを高度化し、産業応用するための研究等について重点的に研究を行う。また、挑戦的なテーマについては引き続き若手研究者による共同実験により研究を行い、応用展開と、本研究の学理の深化のための研究を推進する。

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] Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Yohei Takahashi, Hiroshi Naganuma, Kazufumi Sugawara, Yoriaki Sasaki, Thierry Douillard, Karine Masenelli-Varlot, Joel Courbon, "Thickness evaluation of thermally sprayed coatings after exposure to boiler tube environments by eddy current testing", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Volume 47, No. 4, June 2015, pp. 993–1001

[2] Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Toshiaki Ichihara, Gerd Dobmann, "Evaluation of fatigue cracks by an angle beam EMAT–ET dual probe", NDT&E International, Volume 72, June 2015, pp. 10–16

[3] Gábor Vértesy, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Ivan Tomáš, Hidehiko Kage, "Nondestructive characterization of flake graphite cast iron by magnetic adaptive testing", NDT&E International, Volume 74, September 2015, pp. 8–14

[4] "Shejuan Xie, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, "Quantitative non-destructive evaluation of wall thinning defect in double-layer pipe of nuclear power plants using pulsed ECT method", NDT&E International, Volume 75, October 2015, pp. 87–95

[5] Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Zhenmao Chen, Kensuke Yoshihara, Gerd Dobmann, "Evaluation of Residual Strain in the Structural Materials of Nuclear Power Plants", Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVIII), Vol.40, 2015, pp.3-8

[6] Shejuan Xie, Hong-En Chen, Wenlu Cai, Zhenmao Chen, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Kensuke Yoshihara, "Feasibility Investigation of NDE for Plastic Deformation in Biaxial Specimen using PECT Method", Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVIII), Vol.40, 2015, pp.43-50

[7] Gábor Vértesy, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Ivan Tomáš, "Correlation between ultrasonic velocity and magnetic adaptive testing in flake graphite cast iron", Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol.66, No.7, 2015, pp.174-177

[8] Masami Aono, Takanori Takeno, Toshiyuki Takagi, "Structural, Electrical, and Optical Properties of Amorphous Carbon Nitride Films Prepared using a Hybrid Deposition Technique", Diamond & Related Materials, Vol.63, March 2016, pp.120-124

[9] Minoru Goto, Kosuke Ito, Julien Fontaine, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, "Formation Processes of Metal-Rich Tribofilm on the Counterface During Sliding Against Metal/Diamondlike-Carbon Nanocomposite Coatings", Tribology Online, Vol. 10, No. 5, 2015, pp. 306-313

[10] M. Gueltig, H. Ossmer, M. Ohtsuka, H. Miki, K. Tsuchiya, T. Takagi, M. Kohl, "Thermomagnetic actuation by low hysteresis metamagnetic Ni-Co-Mn-In films", Materials Today: Proceedings, International Conference on Martensitic Transformations, ICOMAT-2014, Volume 2, Supplement 3, 2015, pp. 883–886

[11] Kesavan Ravi, Yuji Ichikawa, Kazuhiro Ogawa, Tiana Deplancke, Olivier Lame, Jean-Yves Cavaille, "Mechanistic Study and Characterization of Cold-Sprayed Ultra-High Molecular Weight Polyethylene-Nano-Ceramic Composite Coating", Journal of Thermal Spray Technology, Volume 25, Issue 1, January 2016, pp. 160-169

[12] Kesavan Ravi, Yuji Ichikawa, Tiana Deplancke, Kazuhiro Ogawa, Olivier Lame, Jean-Yves Cavaille, "Development of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Coating by Cold Spray Technique", Journal of Thermal Spray Technology, Volume 24, Issue 6, August 2015, pp. 1015-1025

[13] Kazuhiro OGAWA, Shun HATTA and Hiroyuki YAMAZAKI, "Improvement of Interfacial Strength for Thermal Barrier Coatings by Formation of Wedge-Like Thermally Grown Oxide", Proceedings of 11th International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications, June 2015

[14] Jun Ishimoto, Haruto Abe and Naoya Ochiai, "Computational prediction of cryogenic micro-nano solid nitrogen particle production using Laval nozzle for physical photo resist removal-cleaning technology", Physics Procedia, Vol. 67, 2015, pp. 607-612

[15] Jun Ishimoto and Hideo Horibe, "Development of Environmental Harmony Resist Removal System using Cryogenic Particulate Spray", Journal of Photopolymer Science and Technology, Vol. 28, No. 2, 2015, pp. 285-288

[16] Mingzi Zhang, Hitomi Anzai, Bastien Chopard, Makoto Ohta, "Manufacture-Oriented Design Optimization for a Flow Diverter Stent Using Lattice Boltzmann Method and Simulated Annealing, Proceedings of the 11th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-11), June 2015, pp. 310-315

[17] Makoto Ohta, Hitomi Anzai, Yukihisa Miura and Toshio Nakayama, "Parametric study of porous media as substitutes for flow-diverter stent", Biomaterials and Biomedical Engineering, Vol. 2, No. 2, 2015, pp. 111-125

[18] Fumio Kojima, Akinori Furusawa, and Takafumi Ito, "Impact model and control of ultrasonic excitation using electromagnetic acoustic transducer," Proceedings of the 10th Asian Control Conference, May 2015, pp. 1566-1571

[19] 古澤彰憲, 三輪有弘, 森川惇, 小島史男, "電磁超音波探触子を用いた超音波ガイド波による鋼管内部の減肉検査,"日本 AEM 学会誌, Vol. 23, No. 2, 2015, pp. 350-355

[20] Masae Kanda, Tiana Deplancke, Olivier Lame, Yoshitake Nishi, Jean-Yves Cavaille, "Evaluation of the Tensile Strength of Electron Beam Irradiated Powdered Ultra High Molecular Weight-Polyethylene (UHMWPE) Prior to Sintering", Materials Transactions, Volume 56, No. 9, 2015, pp. 1505-1508

[21] Chisato Kubo, Masae Kanda, Olivier Lame, Jean-Yves Cavaille, Yoshitake Nishi, "Effects of Homogeneous Low Energy Electron Beam Irradiation (HLEBI) on Adhesive Force of Peeling Resistance of Laminated Sheet with Polyethylene (PE) and Austenitic 18-8 Stainless Steels", Materials Transactions, Volume 57, No. 3, 2016, pp. 373-378

[22] N. Azeggagh, L. Joy-Pottuz, D. Nelias, J. Chevalier, M. Omori, T. Hashida, "Hertzian contact damage in silicon nitride ceramics with different porosity contents", Journal of the European Ceramics Society, Volume 35, Issue 8, August 2015, pp. 2269–2276

[23] Kanjuro Makihara, Akihiro Takezawa, Daisuke Shigeta and Yuta Yamamoto, "Power Evaluation of Advanced Energy-Harvester using Graphical Analysis", Mechanical Engineering Journal, Vol. 2, No. 4, 2015

[24] Yuta Yamamoto, Kenji Yoshimizu and Kanjuro Makihara, "Synthetic Assessment of Self-

Powered Energy-Harvesting Including Robustness Evaluation", Mechanical Engineering Journal, Vol. 2, No. 5, 2015

[25] Fethi HAMDANI, Hiroshi ABE, Benoit TER-OVANESSIAN, Bernard NORMAND, Yutaka WATANABE, "Effect of Chromium Content on the Oxidation Behavior of Ni-Cr Model Alloys in Superheated Steam", Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 46, Issue 5, May 2015, pp 2285-2293

[26] Renata Troian, Koji Shimoyama, Frédéric Gillot, and Sébastien Besset, "Methodology for the Design of the Geometry of a Cavity and its Absorption Coefficients as Random Design Variables Under Vibroacoustic Criteria", Journal of Computational Acoustics, Accepted

[27] Keiichi Shirasu, Go Yamamoto, Toshiyuki Hashida, "Application of Aligned Carbon Nanotube-Reinforced Polymer Composite to Electrothermal Actuator", Carbon Nanotubes- Current Progress of their Polymer Composites, edited by Mohamed R. Berber, InTech open access publisher, accepted

[28] 槙原幹十朗, 吉水謙司, 竹澤晃弘, "振動ハーベスティングにおける発電エネルギ増加制御の研究", 日本機械学会論文集, (in press)

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[29] M. Aono, T. Takeno, T. Takagi, "Structural, Electrical, and Optical Properties of Amorphous Carbon Nitride Films Prepared using a Hybrid Deposition Technique", 9th International Conference on New Diamonds and Nano Carbons 2015, Shizuoka, Japan, May 26, 2015

[30] Fumio Kojima, Akinori Furusawa, and Takafumi Ito, "Impact model and control of ultrasonic excitation using electromagnetic acoustic transducer," The 10th Asian Control Conference, Kota Kinabalu, Malaysia, Oral Presentation, 1570076949, June 3, 2015

[31] Frédéric Gillot, Renata Troian, Koji Shimoyama, and Sébastien Besset, "Robust Shape Optimization under Vibroacoustic Criteria and Uncertain Parameters", 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Sydney, Australia, Oral Presentation, 1377, June 10, 2015

[32] Kazuhiro OGAWA, Shun HATTA and Hiroyuki YAMAZAKI, "Improvement of Interfacial Strength for Thermal Barrier Coatings by Formation of Wedge-Like Thermally Grown Oxide", 11th International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications, Vancouver, Canada, Oral Presentation, CMCEE-T4-S6-009-2015, June 18, 2015

[33] Marcel Gueltig, Makoto Ohtsuka, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, Manfred Kohl, "Thermal Energy Harvesting by High Frequency Actuation of Magnetic Shape Memory Alloy Films ", 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2015), Anchorage, USA, Oral Presentation, Th1B.004, June 25, 2015

[34] Jun Ishimoto and Hideo Horibe, "Development of environmental harmony resist removal system using cryogenic particulate spray", The 32nd International Conference of Photopolymer Science and Technology, Materials & Processes for Advanced Microlithography, Nanotechnology and Phototechnology (ICPST-32), Chiba, Japan, Oral Presentation, B4-08, June 26, 2015

[35] Jun Ishimoto, "Supercomputing of Multiscale Multiphase Flow Related to Industrial

Field and Natural Disaster Problems", 11th Korea-Japan CFD Workshop (KJCFD2015), Fukuoka, Japan, Oral Presentation, Decemer 16, 2015
[36] Fumio Kojima, Arihiro Miwa, Hirotaka Nakajima, Akinori Furusawa, Hiroyuki Nakamoto, "Mode Analysis of Ultrasonic Testing using Magnetic Device and its Application to Inspection of Illumination Pillars", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-1, October 28, 2015
[37] Ke Xiong, Jinhao Qiu, Hongli Ji, Jun Cheng, Keyin Zhou, Yupeng Tian, Chao Zhang, Jinling Zhao, Hongyuan Wang, "The Current Progress in Research on Health Monitoring Methods for Laminated Composite Structures", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-2, October 28, 2015
[38] Wenlu Cai, Shejuan Xie, Cuixiang Pei, Yong Li, Zhenmao Chen, "Characterization of Local Conductivity of Stress Corrosion Crack with DCPD Method", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-3, October 28, 2015
[39] Gildas Diguet, M. H. Jomaa, L. Seveyrat, L. Lebrun, K. Masenelli-Varlot, Jean-Yves Cavaillé, "Huge Electrostriction of PU Induced by Their Heterogeneous Microstructures", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-4, October 28, 2015
[40] Akira Miyamoto, Patrick A. Bonnaud, Ryuji Miura, Ai Suzuki, Naoto Miyamoto, Nozomu Hatakeyama, "Multiscale, Multiphysics Computational Chemistry Methods for Smart Materials and Energy Harvesting", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-5, October 28, 2015
[41] Hiroyuki Miki, Koki Tsuchiya, Eijiro Abe, Makoto Ohtsuka, Marcel Gueltig, Hinnerk Ossmer, Manfred Kohl, Toshiyuki Takagi, "Metamagnetic Shape Memory Alloy Plate for Energy Harvesting Device", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-6, October 28, 2015
[42] Hongli Ji, Jinhao Qiu, Li Cheng, Hong Nie, "Design and Application of Unsymmetrical Synchronized Switch Damping Systems", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-8, October 28, 2015
[43] Akihiko Chiba, Yuichiro Koizumi, Shihai Sun, Shingo Kurosu, "Microstructure and Mechanical Properties Evolution of Biomedical Co-Cr-Mo Alloys Produced by Electron Beam Additive Manufacturing", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-9, October 29, 2015
[44] Alain Combescure, Paul Profizzi, Kazuhiro Ogawa, "SPH Implementation Of Adhesive Forces: Adhesion Of Elastic Bodies And Cold Spray Prediction", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-10, October 29, 2015
[45] Kazuhisa Sato, Toshiyuki Hashida, "Reliability Improvement of Layered Solid Oxide Fuel Cells", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures

for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-11, October 29, 2015
[46] Kazuhiro Ogawa, Shun Hatta, Mitsuhiro Oikawa, Tadashi Tatsuki, Hiroyuki Yamazaki, "Development of New Bond Coat Materials for Efficiency Improvement of Gas Turbine Plants", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-12, October 29, 2015
[47] Damien Fabrègue, Juan Antonio Chafino Aixa, Akihiko Chiba, "Porous Titanium Alloys Elaborated by EBM with an Optimize Microstructure", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-13, October 29, 2015
[48] Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Gilles Aurégan, Nicoleta Crisan, "Tribology of Engineered Surfaces: How Coatings and Texturation can Reduce Friction Losses?", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-14, October 29, 2015
[49] Ryoichi Hombo, Takanori Takeno, Julien Fontaine, Hiroyuki Miki, Naoki Kato, Takahiro Nozu, Naruhiko Inayoshi, Michel Belin, Toshiyuki Takagi, "Low Electrical Contact Resistance and Friction Behavior of Cu-DLC Nanocomposite Coating on Brass Substrate Sliding against Brass Ball", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-15, October 29, 2015
[50] Takanori Takeno, Kazuki Ikoma, Koshi Adachi, "Nanointerface formation using Carbon-related Nanocomposite Coatings for Low Friction Mechanical Systems", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-16, October 29, 2015
[51] Fethi Hamdani, Hiroshi Abe, Yutaka Watanabe, "Effect of Surface Preparation on the Oxidation Rate of Ni-Cr Model Alloys in Superheated Steam", Third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, Sendai, Japan, Oral Presentation, OS18-17, October 29, 2015
[52] T. Takagi, "Review of C2C activities and Perspectives", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016
[53] D. FABREGUE, J. FONTAINE and T. UCHIMOTO, "Toward next stage of ELyT-LIA: Goal and Framework", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016
[54] G. SEBALD, T. TAKAGI and T. UCHIMOTO, "Structural Health Monitoring and Nondestructive Testing ", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016
[55] E. MAIRE, Hidemi KATO, "Nanoporous Materials", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016
[56] S. MARUYAMA and Patrice CHANTRENNE, "Interface Design for advanced heat transfer", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016

[57] T. TOKUMASU and C. MINFRAY, "Flow Interfaces", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016

[58] B. NORMAND and Y. WATANABE, "Durability", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016

[59] Frédéric GILLOT & K. SHIMOYAMA, "Optimization", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016

[60] M. OHTA, V. FRIDRICI and P. KAPSA, "Material and Surface Design for Medical Application", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016

[61] Jen-Yves CAVAILLÉ and Kazuhiro OGAWA, "ELyTMaX", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016

[62] Kazuhiro OGAWA, Olivier LAME, "Cold Spray", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016

[63] J. FONTAINE and K. ADACHI, "Surfaces and Interfaces", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016

[64] A. CHIBA, FABREGUE, "Materials for Biomedical Application", JSPS Core-to-core program International research core on smart layered materials and structures for energy saving, Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016

[65] G. DOBMANN , "Contributions from Germany", JSPS Core-to-Core Program Workshop "International research core on smart layered materials and structures for energy saving", Lyon, France, Oral Presentation, January 20, 2016

[66] Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, "Core-to-core Program Now and Future: International Research Core on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Oral Presentation, June 22, 2015

[67] Tetsuya Uchimoto, "Development and Evaluation of High Temperature EMAT", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Oral Presentation, June 22, 2015

[68] Hiroyuki Miki, "Ni-Mn-In Type Magnetic Shape Memory Alloy Thin Plates for Magnetically Actuated Devices", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Oral Presentation, June 22, 2015

[69] Hiroyuki Kosukegawa, Takanori Takeno, Hiroyuki Miki, Toshiyuki Takagi, "Fabrication and Structural Analysis of Metal-containing Diamond-like Carbone Coatings aiming for Sensing Applications", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Oral Presentation, June 22, 2015

[70] Kanjuro Makihara, "Self-powered Energy Harvester for Multimodal Structural Vibrations", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Oral Presentation, June 22, 2015
[71] Shigenao Maruyama, "Control of Radiative Transfer by Nano-Structure for Environmental Issues -Development of Cool Black-", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Oral Presentation, June 22, 2015
[72] Yu Fukunishi, "Optimum Actuator for Instability Wave Control", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Oral Presentation, June 22, 2015
[73] Mitsuo Yoshimura, Koji Shimoyama, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, "Topology Optimization of Flow Channels with Heat Transfer Using Genetic Algorithm", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 1, June 22, 2015
[74] Sho Takeda, Hiroyuki Miki, Takamichi Miyazaki, Toshiyuki Takagi, "Mechanical and Tribological Behavior of Cu-based Self-lubricating Composites Processed by Compression Shearing Method at Room Temperature", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 2, June 22, 2015
[75] Xiao Yang Wu, Tetsuya Uchimoto, Toshiyuki Takagi, Ryoichi Urayama, Hao Feng, "Effect of High Temperature Heating Treatment After Fatigue Testing of 316L Austenitic Stainless Steels on Eddy Current Signals", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 3, June 22, 2015
[76] Mingzi Zhang, Hitomi Anzai, Makoto Ohta, "Introduction of Optimization of Design using Combination of Lattice Boltzmann Method as CFD and Simulated Annealing for Reduction of Flow Speed", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 4, June 22, 2015
[77] Ke Xiong, "State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures: Mission and Research", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Oral Presentation, June 22, 2015
[78] Jinhao Qiu, "New Monitoring Methods of Composite Structures", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Oral Presentation, June 22, 2015
[79] Hongli Ji, "Semi-active Vibration Control Based on Synchronized Switching Damping and its Application in Aerospace Engineering", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Oral Presentation, June 22, 2015
[80] Hongguang Liu, Ke Xiong, Kan Bian, Kongjun Zhu, "Actuation Properties of Nano-BaTiO3/Nafion Based Ionic Polymer Metal Composite Actuators", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and

Smart Structure Technology, Nanjing, China, Oral Presentation, June 22, 2015

[81] Xueshi Ma, Xiao Pan, Jiyun Lu, Kan Bian, KeXiong, "Debond Characteristics and FBG Monitoring Analysis of CFRP T-joints under Tensile Load", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 5, June 22, 2015

[82] Na Gu, KeXiong, Jinhao Qiu, "The Electrical Response of Bending pt-IPMC", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 6, June 22, 2015

[83] Sheng Zhang, Hongli Ji, Jinhao Qiu, "Multi-modal vibration control using synchronized switch damping method with state observer", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 7, June 22, 2015

[84] Jinchen Wei, Kongjun Zhu, Jianhui Zhang, Jinhao Qiu, Jing Wang, "Atomization Characteristics of a Piezoelectric Ceramic Ultrasonic Atomizer", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 9, June 22, 2015

[85] Choncong Tao, Jinhao Qiu, Weixing Yao, Hongli Ji, "Numerical Investigation of Effect of Drilling-induced Delamination on Fatigue Life of Open Holed Composite Laminate", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 12, June 22, 2015

[86] Zhang Wang, Chao Zhang, Jinhao Qiu, Hongli Ji, "Detection of Damage Depth in an Isotropic Plate Based on Genetic Algorithm Using Laser Ultrasonic System", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 13, June 22, 2015

[87] Qiang Ji, Jinhao Qiu, Jinzhou Du, Kongjun Zhu, Hongli Ji, Jing Wang, "Detection of Damage Depth in an Isotropic Plate Based on Genetic Algorithm Using Laser Ultrasonic System", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 14, June 22, 2015

[88] Hongyuan Wang, Jinhao Qiu, Hongli Ji, Chao Zhang, "Impact Localization Using Metal-Core Piezoelectric Fiber Rosettes Based on Bayesian Inference", The 1st NUAA-Tohoku University Joint Symposium on Fluid Science, Aerospace Engineering and Smart Structure Technology, Nanjing, China, Poster Presentation, Poster No. 19, June 22, 2015

他　５５件

3） その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

（マスコミ発表）　電気新聞　非破壊検査　大学院生が体験, 2016.3.15

（第２回Non-Destructive Testing International Winter School 2016）

Multiple Collaborative Research Project	
Project code	J15R005
Subject area	Aerospace
Research period	April 2014 ~ March 2015
Project status	2^{nd} year

Physical insight into Mach reflection transition and its hysteresis in axisymmetric intakes in continuum and rarefied flow conditions for high-speed airbreathing propulsion

Hideaki Ogawa*†, Sannu Mölder**, Evgeny Timofeev***
Georgy Shoev****, Yevgeniy Bondar****
Kiyonobu Ohtani*****††, Shigeru Obayashi*****
*School of Engineering, RMIT University
**Department of Aerospace Engineering, Ryerson University
***Department of Mechanical Engineering, McGill University
****Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Russian Academy of Science
*****Institute of Fluid Science, Tohoku University
†Applicant, ††IFS or non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

The theoretical axisymmetric Busemann intake is generally regarded as producing an efficient compression field and is often used as a basis for hypersonic intake studies. The axisymmetric full Busemann intake for a Mach 8 freestream can achieve a total pressure recovery of 97% and uniform outflow in inviscid flow, with the 3% loss occurring over a downstream conical shock wave at the end of the initial isentropic compression. Boundary layer losses, on the long (and heavy) isentropic surface, of such intakes, can lead to as much as a 50% decrease in total pressure recovery. The presence of the boundary layer also has a considerable effect in modifying the inviscid flow (Fig. 1). These two factors suggest that the 'inviscid' intake should be shortened and that the effect of such shortening on the inviscid core flow be compensated so as to retain as much as possible of its original performance.

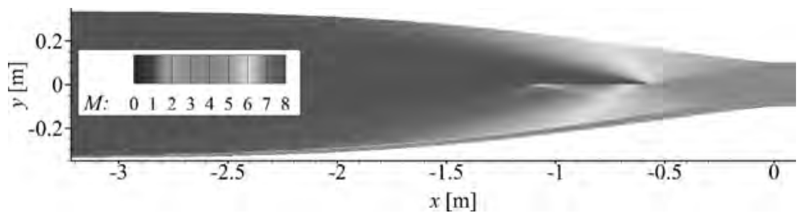


Figure 1 : Inviscid (top) and viscous (bottom) Busemann intake flowfields (Mach number)

Intake stunting (axial contraction) has been suggested as a shortening method to improve the overall performance of the Busemann intake. These studies noted that mode transition of the centerline shock reflection occurred from a configuration with an infinitesimally small Mach disk, resembling a regular reflection (which is prohibited theoretically at the axis) to that with a distinct Mach disk (stem), as seen in Fig. 2. The intermediate transition process is characterized by highly unsteady, complex flow structures including a toroidal (ring) vortex, as shown in Fig. 3. The variations of the centerline pressure in the stunting process in inviscid flow indicated that the shock reflection features a reflected shock in the two-shock regular reflection before mode transition and a three-shock Mach reflection after transition. Simulations for the reverse (stretching) process revealed possible existence of hysteresis during mode transition of shock reflection.

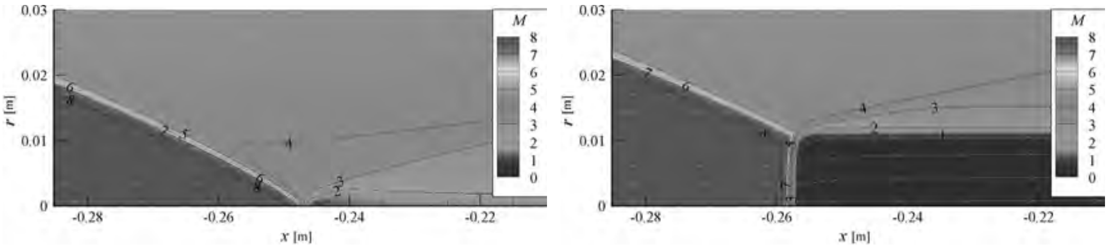


Figure 2 : Centerline shock reflection in stunted Busemann intakes before/after transition (Mach number). Left: apparent regular reflection, right: Mach reflection

Figure 3 : Flow structure of centerline shock reflection in stunted Busemann intakes (Mach number and adaptive grid). Left: during mode transition, right: Mach reflection after transition

New theories are required to predict the shock behavior in the axisymmetric regime, where the axis singularity prohibits the existence of regular reflection at the centerline. On the other hand rather sparse literature is available for studies investigating the physics and behavior of Busemann intakes in the rarefied gas environment. Experimental investigation is also needed to verify the flowfields and shock structures in the stunted Busemann intakes due to significant impact on the intake performance as well as for purely scientific interest. An experimental study is to be conducted in a supersonic wind tunnel by employing so-called M-flow intake rings, which are shaped to produce conical shocks of constant strengths to focus on the centerline. To preserve the inviscid flow and its pressure distribution it is necessary to correct the surface shape of the wind tunnel models by the boundary layer displacement thickness.

The overall project aims to fill this gap in the body of knowledge by scrutinizing flowfield characteristics and elucidating the driving mechanism in both continuum and rarefied flow regimes in a best practice approach coupling theory, computation and experiment to be realized by international collaboration. This Multiple Collaborative Research Project in Year 2, in particular, has been conducted in order to develop a method for the viscous correction of stunted (axially contracted) Busemann intakes and assess the capability of the designed method in a numerical approach. The flowfield in a rarefied gas has also been examined by means of the Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method to investigate the flow behavior in the low-density atmospheric environment at a high altitude.

2. Details of program implement

The overall research project is designed to be conducted in international collaboration, consisting of two phases: The first stage examines intake flowfields in **numerical** and **theoretical** approaches, focusing on Mach reflection (MR) in the stunted (axially contracted) Busemann intakes, comprising two elements considering continuum flow and rarefied gas, as outlined below, whereas the second stage conducts experimental investigation, as described later in Section 4:

(a) The shock structures and behavior in continuum ambient conditions are to be studied numerically by probing into inviscid and viscous transitional flowfields with high-fidelity computational fluid dynamics (CFD) solvers for hypersonic flow at Mach 8, respectively. Analytical investigation is conducted in light of the shock wave theories and shock polar analysis. The resultant flowfields are examined carefully to detect the occurrence of MR hysteresis, with particular attention to the intake configurations and flow conditions where mode transition was observed formerly. The numerical studies are primarily conducted by researchers at RMIT University and McGill University by utilizing commercial and in-house CFD solvers, whereas the analytical studies are performed primarily by researchers at RMIT University and Ryerson University.

(b) The characteristics of intake flowfields in rarefied flow environments are investigated by applying a DSMC (direct simulation Monte Carlo) code to airstream at large Knudsen numbers due to large mean free path, assuming high-altitude flight conditions at Mach 8. The characteristics and behavior of shock structures are examined by performing a simulation with a mean free path of molecules corresponding to a Knudsen number of 0.003. Comparison is to be made with the continuum flowfield obtained from the CFD simulation. This study is primarily conducted by researchers at ITAM by employing the in-house DSMC software.

Conditions and configurations

The Busemann intake captures a uniform hypersonic airflow at Mach 8 with a static pressure and temperature of 1,197 Pa and 226.5 K, respectively. The full intake length is 3.215 m and the intake entrance radius is 0.335 m with a contraction ratio of 11.2. The compression ratio is 33.0 and 49.7 for the inviscid and viscous full Busemann intakes, respectively. Stunting is achieved by contracting the original Busemann intake in the axial direction. Stunting leads to changes in the compression ratio, while the intake entry and exit diameters and hence the contraction ratio and the mass flow rate remain constant. The Reynolds number based on the intake exit radius of 0.1 m is 3.01×10^{5}.

Computational fluid dynamics

For continuum flow simulations, the intake flowfields are computed by utilizing a commercial high-fidelity code CFD++, which solves the Navier-Stokes equations implicitly with 2^{nd}-order spatial accuracy, assisted by multigrid convergence acceleration. The advanced wall-function technique is used for near-wall treatment and turbulence is modeled by the two-equation SST k–ω RANS model. The air is treated to be a calorically perfect gas with a specific heat ratio of 1.4. The intake surface is set to be adiabatic for viscous simulations. The axisymmetric computational domains are represented by two-dimensional fully structured meshes. The domain for the stunted Busemann intakes is composed of 220,000 cells (1,101 nodes along the wall and 201 nodes in the wall-normal direction). The minimum cell thickness on the wall is 10^{-5} m for viscous computations, which provides a dimensionless wall distance value y^{+} of 1.4.

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

Boundary layer correction

Boundary layer profile data is obtained by extracting wall-normal data planes from CFD solutions. A total of 51 data planes were deemed sufficient to capture the distribution of the displacement thick- ness for both the Busemann and M-flow geometries. In both of these cases, there are wall normal gradients that extend well beyond the boundary layer edge. This is particularly true for the mass-flux tangential to the wall, and there- fore the calculation of displacement thickness δ^* is highly dependent on the calculation of boundary layer thickness δ, which defines the limit of integration in the following equation:

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{\rho u}{\rho_e u_e}\right) dn$$

where n is the wall-normal coordinate and subscript e denotes the boundary-layer edge values.

An edge detection method based on profiles of total enthalpy is used. Since computations are performed with an adiabatic boundary condition, it is assumed that the total enthalpy of the flow outside of the boundary layer is equal to the freestream value, which limits any total enthalpy gradients to the boundary layer region. The search for the boundary layer edge begins at the wall and the edge is found when the following conditions are satisfied simultaneously: (a) Total enthalpy is within 1% of the freestream value; (b) The gradient of total enthalpy with respect to the wall normal distance is zero. The final distribution of displacement thickness is then smoothed using a simple 3-point moving average, which results in a distribution sufficiently smooth for the CFD.

The process is performed in an iterative manner until convergence is achieved with respect to the mean-squared error given by

$$y_{\mathrm{mse}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \sqrt{1 - \left(\frac{y_{\mathrm{vis}} - \delta^*}{y_{\mathrm{inv}}}\right)^2}$$

where N is the number of data points; y_{inv} and y_{vis} are the radial coordinates of the point k $(1 \le k \le N)$ on the intake wall in inviscid and viscous flows, respectively. The radial position of each node point k on the intake wall is updated for the next iterative step by

$$y_{\mathrm{vis}}^{i+1} = \frac{y_{\mathrm{inv}}}{y_{\mathrm{vis}}^{i} - \delta^*} y_{\mathrm{vis}}^{i}$$

until convergence is achieved by satisfying $y_{\mathrm{mse}} \le \varepsilon$, which is set to be 10^{-7} here.

3. Achievements

Results

The viscous correction methodology has been applied to the stunted Busemann intakes. Figure 4 displays the progression of the mean-squared error for various intake lengths. Convergence to 10^{-7} is achieved in fewer iterations for highly stunted intakes and in more iterations, up to seven, for less stunted ones.

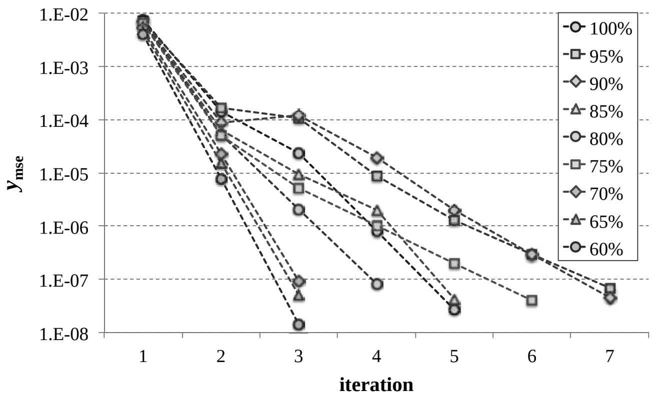


Figure 4 : Progression of viscous correction process with respect to the mean-squared error y_{mse} of intake surface geometries for stunted Busemann intakes of various length

Plotted in Fig. 5 (left) is the progression of the intake contour shape iterations during the viscous correction process starting initially with the inviscid geometry till convergence at the final iteration step for the full Busemann intake. The intake contour is updated most significantly from the initial geometry at $i = 0$ to the next step $i = 1$ for all intake lengths, followed by rather minor modifications that occur mainly near the intake exit in the subsequent steps. The velocity profiles (normalized by the freestream velocity) at the exit plane of the full Busemann intake at sequential iterative steps, i = 1 to 4, are shown in Fig. 5 (right) in comparison with the inviscid profile. A typical flat core flow is achieved in four iterations over almost entire original inviscid exit area. The effects of the boundary layer require opening the intake from a radius of 0.1 m to 0.126 m, as indicated by the boundary layer velocity profiles plotted in Fig. 5 (right).

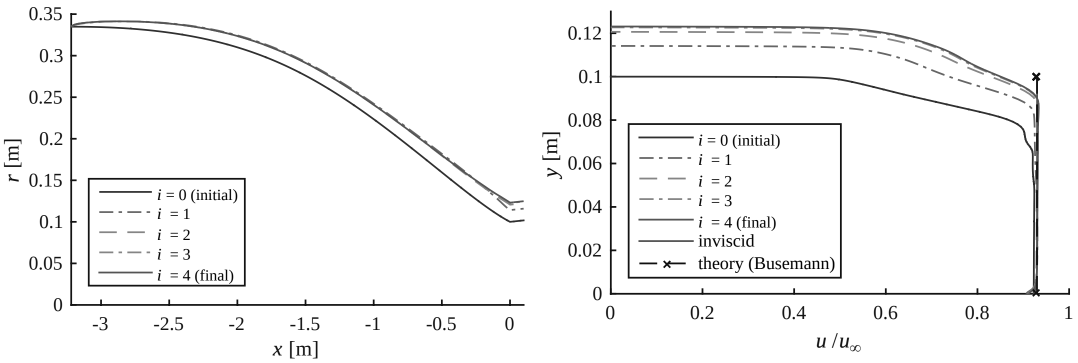


Figure 5 : Left: geometry progression (not to scale) in the viscous correction process starting with the inviscid geometry ($i = 0$), right: progression of velocity profiles at the intake exit during the viscous correction iterative process for the full Busemann intake

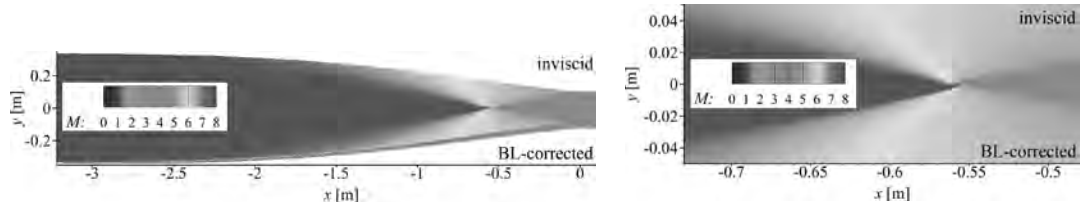


Figure 6 : Mach number distributions of the inviscid and viscous-corrected flowfields for the full Busemann intake (right: close-up)

Figure 6 compares the inviscid flowfield for the original stunted geometry and viscous one for the boundary-layer corrected geometry for the full Busemann intake, showing nearly identical flow structures except a slight difference in the vicinity of the focal point, as seen in Fig. 6 (right).

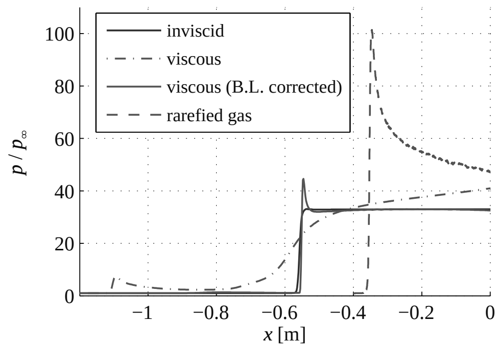


Figure 7 : Comparison of centerline pressure distributions for inviscid, viscous, and viscous-corrected flowfields in the continuum flow regime and that in the rarefied gas environment

A comparison of centerline pressure results from the various simulation types, for the full Busemann geometry, is shown in Fig. 6. Considerable similarity can be seen between the inviscid flowfield with the original geometry and the viscous one with the boundary-layer corrected geometry in term of (1) perpendicular pressure rise at the focal point except a small overshoot (2) smooth upstream pressure distributions, in contrast to the viscous flowfield for the original geometry, which indicates an initial pressure increase at $x = -1.1$ m due to the impingement of a shock caused by the boundary layer displacement at the leading edge. The centerline pressure in the rarefied gas is characterized by a higher pressure peak at a further downstream location. This is associated with the downstream presence of the focal point, as seen in Fig. 7, where the flowfield is compared to that for the viscous-corrected geometry, which results in a nearly identical flowfield to the inviscid flow, as seen in Fig. 6.

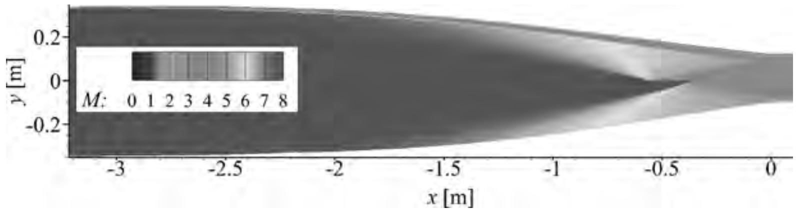


Figure 7 : Comparison of the Mach number distributions of the B.L.-corrected viscous (top) and rarefied gas ($Kn = 0.003$, bottom) flowfields for the full Busemann intake

Achievement level

The present research project has progressed to a stage where various interesting characteristics for centerline shock reflection and its mode transition have been revealed by means of high-fidelity numerical simulations performed for stunted Busemann intakes. It has also highlighted the importance of verification of the aerodynamic phenomena including Mach reflection mode transition and its hysteresis by comparison with experimental results. Experimental validation then requires a reliable and accurate viscous correction method in order to reproduce the features of inviscid flow in the wind tunnel environment.

Such an effective and robust viscous correction methodology has been developed by coupling viscous CFD computations with a wall correction method based on local boundary layer displacement thickness, whose edge is detected, based on the total enthalpy profile. This iterative process has successfully been applied to stunted (axially contracted) Busemann intakes for Mach 8 freestream, as described above, as well as M-flow intake ring geometries in Mach 2 supersonic freestream (results are not shown in this report) so as to be used in the prospective experiments to be conducted in the supersonic wind tunnel at Institute of Fluid Science, Tohoku University, as mentioned as a future plan in Section 4.

The experimental study to be conducted using the model designed with the viscous correction method will play a pivotal role in the verification of the MR transition and its hysteresis as well as the establishment of the new criteria to predict the occurrence of such phenomena. Fundamental difference in the shock structure between the continuum flow and rarefied gas regimes has been identified. The results obtained here will serve as the basis for the following research to be pursued in order to elucidate the driving mechanism of the hysteresis (if it exists) and to gain further knowledge for the reliable and efficient operation of high-performance, inner-compression, axisymmetric airbreathing engines at various altitudes and atmospheric conditions, as per the objectives described in the expected results.

4. Summaries and future plans

Summaries

This activity report has described the purpose, methodology, and progress of the Multiple Collaborative Research Project on the intake physics for high-speed airbreathing propulsion being undertaken in international collaboration by researchers in Australia, Canada, Russia, and Japan. In particular it focuses on the physical characteristics and behavior of the shock waves and their reflection at the symmetry axis (centerline) in the axially contracted (stunted) Busemann intakes, which can have crucial influence on the intake performance and engine operation. Abrupt changes in the shock structure associated with Mach reflection (MR) mode transition were observed in the stunting process simulated by high-fidelity CFD (computational fluid dynamics) solvers. A possibility of MR transition was been suggested in the course of stunting and reverse (stretching) process simulations performed in the numerical investigation in the preceding General Collaborative Research Project in Year 1 (project code J14054).

In order to enable high-quality experiment, which is essentially required for the verification of aerodynamic phenomena and intake design numerically examined, a robust and effective viscous correction method has been developed with an iterative approach employing a boundary-layer edge detection technique based on the total enthalpy profile in the present project. The viscous-corrected geometries have been shown to reproduce the inviscid flow conditions with a high degree of accuracy, validating the approach. Overall, an improvement has been achieved in the reproduction of the initial inviscid fields, which indicates that the methods outlined here can be usefully employed to improve the design of axisymmetric internal compression intakes for viscous flows, offering promise to the experimental testing that shall follow this endeavor. Physical insights have also been gained into the characteristics of shock waves and their reflection in the Busemann intake in the rarefied gas environment, which have been found to differ significantly from those in the continuum flow regime as a result of a numerical study by means of the Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method.

Future plans

Experiments will be conducted in the supersonic wind tunnel with a Mach 2 nozzle at Institute of Fluid Science, Tohoku University in the General Collaborative Research Project in Year 3 (project code J16090). They will employ the annular forebody of the Busemann contour on the verge of MR transition as well as so-called M-flow ring intake geometries which can generate desired shock reflection, so as to ensure flow visualization of shock reflection at the axis of symmetry. These experimental models will be designed by applying the viscous correction capability developed in the present study. Further numerical investigation will be conducted in order to draw a conclusion to the existence of the hysteresis of MR transition and elucidate the driving mechanism (if existent) in the continuum flow regime as well as to scrutinize the underlying physics responsible for the difference observed in the intake flowfield in the rarefied gas regime.

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] H. Ogawa, B. Shoesmith, S. Mölder, G. Shoev, Y. Bondar, E. V. Timofeev, K. Ohtani, and S. Obayashi: **Flow Physics of Stunted Busemann Intakes in Viscous and Rarefied Flow**, *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Advanced Fluid Information,* Sendai, (2015), pp. 188-189.

[2] S. Mölder: **Curvature of Shocks at Regular and Mach Reflection**, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Fluid Dynamics,* Sendai, (2015), pp. 170-171.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

連携公募共同研究プロジェクト	
課題番号	J15R007
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2015.4 ~2016.3
継続年数	1年目

超並列脳型ＬＳＩのためのナノ構造アナログメモリ素子の開発
Development of a nanostructure analog memory device for massively-parallel brain-like LSIs

森江 隆*†，高橋 庸夫**††，寒川 誠二***††，
東原 敬**，安藤 秀幸**，内田 貴史***，曹 民圭***，
久保田 智広***，大野 武雄****
*九州工業大学生命体工学研究科，**北海道大学情報科学研究科，
東北大学流体科学研究所，*東北大学原子分子材料高等研究機構
†申請者，††所内対応教員または所外対応研究者

1. 研究目的

脳の情報処理様式をまねた人に近い認識・学習・判断能力を有する機械の実現を目指して，神経細胞が発するスパイク状パルスの同期等による時空間並列情報処理を物理的に実現する超低消費電力・省サイズ・高精度な実ニューロン方式脳型集積回路の要素技術として，分子の自己組織化機能によるナノ構造作製技術を駆使して，制御性の高いアナログ記憶素子を開発する．すなわち，これまでの研究実績に基づいて，新規なナノ構造による抵抗変化型記憶素子の作製技術を確立し，試作素子の評価および制御回路の考案により，アナログ記憶量の微少更新を実現する．

上記の目的のため，流体研の寒川教授、大野准教授，久保田准教授の検討を参考に，アナログ動作を目指した抵抗変化メモリ構造を検討し，初期検討材料として，MoOx/Cu を選択して，そのアナログ記憶素子としての動作特性を検討することとした．

2. 研究成果の内容

今回の検討では，抵抗変化型メモリ (ReRAM) として，予備検討の結果から W よりもアナログ特性に適すると予想された Mo 系材料を採用することとし，Pt/Cu/MoOx/Al_2O_3/Al 構造の素子を用いた．Pt 電極側に正電圧を印加することで，初期の高抵抗から低抵抗に変化させることができ (SET 動作 (書込動作))，逆にこの低抵抗状態から Pt 電極に負電圧を印加すると，高抵抗にスイッチする RESET 動作 (消去動作) が生じる．抵抗値をアナログ的に変化させることができれば，この抵抗値を結合重みとする脳型集積回路を実現することができる．

この素子では，SET 書込時の電流を制限することで抵抗値をアナログ的に変化させることができることを見いだした．すなわち，大きな電流で SET すると，より低抵抗になる．これは大電流で書き込むことで，より太い導電性フィラメントが形成されるからであり，高橋らが別途検討した TEM その場観察技術でこの現象を確認している．しかし，2 端子 ReRAM 単独の構造では浮遊容量が大きく，抵抗スイッチ時にこの容量を充電するオーバーシュート電流が流れるため，精度よく電流が制御できないという問題があった．本研究では，図 1 の模式図に示すように，Si-MOSFET を接続した ReRAM 素子を作製することで浮遊容量を小さく抑え，MOSFET のゲート電圧で SET 時の電流を制御することとした．

このようにして作製したデバイスの I-V ヒステリシス特性を図２に示す．初期の高抵抗状態から，正側に電圧をスキャンすると急激に低抵抗化し電流が増えるが，MOSFET の飽和電流で止まり，

電圧を 0V 方向に引き戻すと，MOSFET の飽和特性に沿って電流が減少していく様子がわかる．この時，MOSFET のゲート電圧で飽和電流を制御することが可能であり，飽和電流によって ReRAM の低抵抗状態の抵抗値（LRS）が変化する．図３（左）に示すように，大電流を流す（すなわちゲート電圧 *Vg* を高くする）とより低抵抗になる（LRS が減少する）．*Vg* と LRS の関係にはばらつきがあるので，LRS を目標値に設定するには複数回の書き込みが必要になる．その手法として，目標より LRS が下回った場合は，*Vg* の値を下げて再書き込みをし，上回った場合は *Vg* を上げて再書き込みをして目標値に近づける Verify 操作手法を採用した．その一例を図３（右）に示す．目標値を 10kΩとして *Vg*＝2.3V，2V，2.1V の 3 回の Verify 操作でほぼ目標に到達した様子を示している．この結果は，MOSFET に隣接して作製した ReRAM を用いて，アナログ的な抵抗値制御が可能であることを示している．

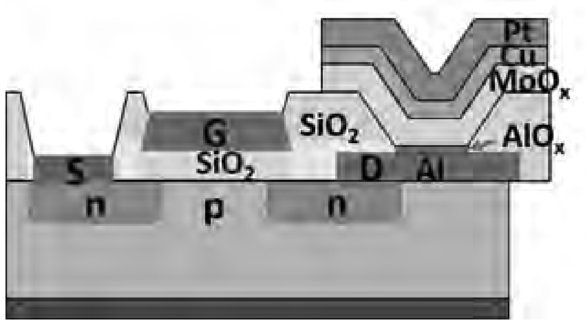


図１：MOSFET を接続した MoOx/Cu 系 ReRAM 素子の模式的断面構造図

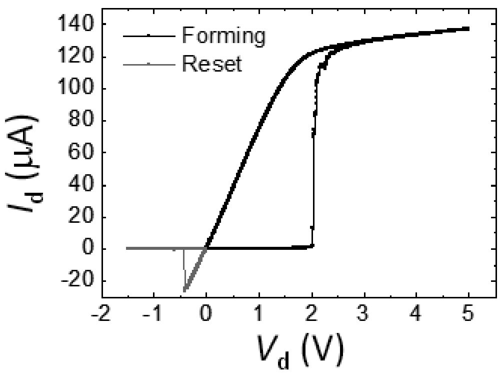


図２：作製した MOSFET 付き ReRAM の I-V ヒステリシス特性

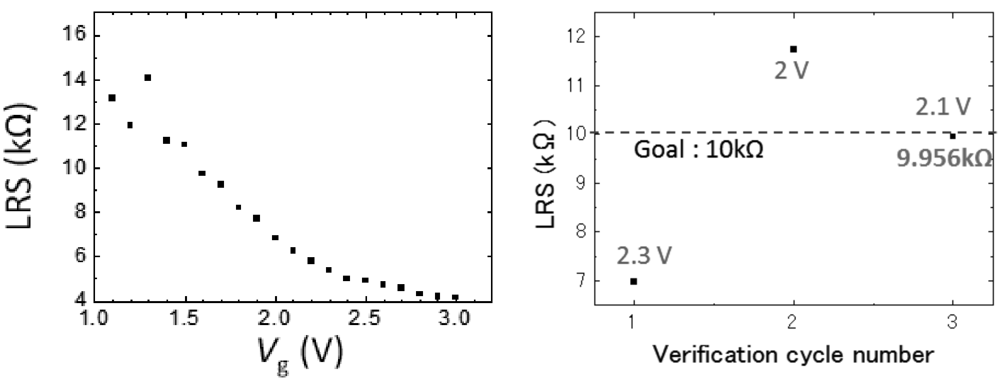


図３：作製した MOSFET 付き ReRAM のゲート電圧-抵抗値の関係（左）とアナログ抵抗値制御（右）

次に，LRS をパルスで制御することを検討した．脳型システムのモデルであるスパイキングニューラルネットワークでは，2 個のスパイクパルスの時間タイミング差で学習を行う「スパイクタイミングシナプス可塑性（STDP)」が知られており，ReRAM にこの学習則を実装する試みがなされている.上記のようにSET動作での低抵抗化にはMOSFETのゲート電圧を変える必要があるため，スパイクタイミングを電圧に変換する回路を考案・設計した．一方，RESET 動作では，図４に示すようにパルス幅またはパルス数で抵抗値を制御できることが分かったので，パルスタイミング差をパルス幅に変換する回路を考案・設計した．両回路を個別素子でブレッドボード実装し，MOSFET 付き ReRAM を制御した結果，図５に示すように，生体の STDP 則と同様な特性を ReRAM 素子で得ることに成功した.

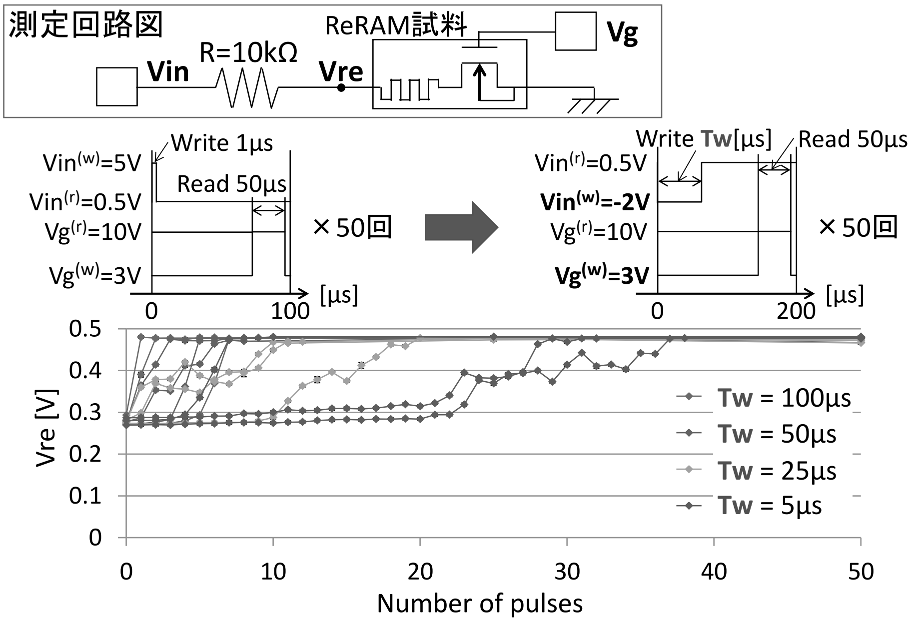


図４：パルス印加 RESET 動作における抵抗値のアナログ的変化特性

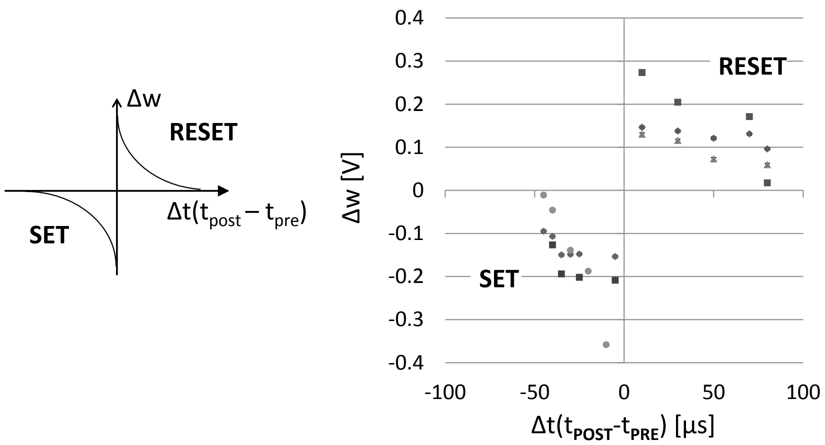


図５：生体での典型的な STDP 特性（左）と，試作した ReRAM 素子での実現した STDP 特性（右）

3. 研究目標の達成状況

上記の結果は、ニューラルネットワーク LSI の超低消費電力化・省サイズ化・高精度化を実現する要素技術として，アナログ動作 ReRAM 素子の見通しを得たことを示している．併せて，研究成果[1]では，流体研・寒川研究室での自己組織化バイオテンプレート技術と中性イオンビーム技

術により作製したナノ構造における超低消費電力重み付き加算(積和演算)機能を確認しており，本成果と併せて，ナノ構造による ReRAM 素子の超低消費電力化・省サイズ化を実現する第一歩を踏み出せたと言える.

4. まとめと今後の課題

MOSFET と結合した ReRAM 素子構造により，アナログ抵抗可変素子を実現できた. 今後，超低消費電力積和演算機能を実現するナノデバイスとの結合または一体化により，高性能脳型メモリ素子を開発し，実ニューロン方式脳型ハードウェア実現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）

*[1] T. Tohara, H. Liang, H. Tanaka, M. Igarashi, S. Samukawa, K. Endo, Y. Takahashi, and T. Morie: Silicon Nanodisk Array with a Fin Field-effect Transistor for Time-domain Weighted Sum Calculation toward Massively Parallel Spiking Neural Networks, Appl. Phys. Express, Vol. 9, No. 3 (2016) 034201.

[2] T. Morie: CMOS Circuits and Nanodevices for Spike Based Neural Computing, IEEE Int. Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, (2015), 112-113. (Invited)

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[3] H. Ando, K. Tomizaki, T. Tohara, T. Morie, T. Hiroi, A. Nakane, R. Katsumura, A. Fukuchi, M. Arita, Y. Takahashi, and S. Samukawa: Analog Memory Operation of Resistance Change Memory with MOSFET for Brain-like LSIs, Proc. of the Fifteenth Int. Symp. on Advanced Fluid Information (AFI-2015), Sendai, (2015), 182-183.

[4] 森江隆: スパイクベース脳型計算のための集積回路とナノデバイス，日本学術振興会 シリコン超集積化システム第 165 委員会 7 月研究会，東京，(2015)【招待講演】

[5] 富崎 和正，安藤 秀幸，森江 隆，廣井 孝弘，中根 明俊，福地 厚，有田 正志，高橋 庸夫: MOSFET 上に集積化した Cu-MoOx-Al 抵抗変化型メモリの RESET 時多値メモリ動作，第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会，名古屋，(2015)，12-259.

[6] 勝村玲音，福地厚，有田正志，高橋庸夫，安藤秀幸，森江 隆:Ta_2O_5をスイッチ層に用いた抵抗変化型メモリの多値メモリ動作，第 51 回応用物理学会北海道支部/第 12 回日本光学会北海道支部合同学術講演会，東京，(2016)，口頭発表.

[7] 曹民圭，勝村玲音，福地厚，有田正志，高橋庸夫，安藤秀幸，森江隆：抵抗変化型メモリのアナログ的抵抗可変特性，春季応用物理学会，東京，(2016)，口頭発表.

[8] 勝村 玲音，Mika Kristian Grönroos，福地 厚，有田 正志，高橋 庸夫，安藤秀幸，森江 隆：Ta_2O_5を用いた抵抗変化型メモリの多値・アナログメモリ動作，春季応用物理学会，東京，(2016)，口頭発表.

[9] 富崎 和正，森江 隆，安藤 秀幸，福地 厚，有田 正志，高橋 庸夫: Si MOSFET 上に作製した Cu-MoOx-Al 抵抗変化型メモリを用いた STDP 制御回路とその評価，電子情報通信学会 NC 研究会，Vol. 115，No. 514，東京，(2016)，7-12.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

東北大学流体科学研究所
平成 27 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

平成 28 年 11 月発行

編集・発行： 東北大学流体科学研究所 所長 大林 茂

〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目 1 番 1 号
電話：022 -217- 5302（総務係） FAX：022 -217- 5311

E-mail：shomu_kb@fmail.ifs.tohoku.ac.jp
URL：http://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/koubo/index.html

印刷： 株式会社 仙台共同印刷

2016.11.8