



東北大学

平成 21 年度
公募共同研究報告書

Annual Report on
Collaborative Research Project 2009

**東北大学
流体科学研究所**

Institute of Fluid Science
Tohoku University



は し が き

東北大学流体科学研究所は、「流動現象に関する学理及びその応用の研究を行うこと」を目的としており、平成 22 年度より流体科学分野の共同利用・共同研究拠点「流体科学研究拠点」として文部科学省に認定されている。本研究所では、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平成 21 年度より実施している。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、また公募共同研究報告書として公表される。

本報告書は平成 21 年度に実施された東北大学流体科学研究所公募共同研究の成果を取り纏めたもので、公募共同研究の概要、52 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。本研究所は、本公募共同研究を通じて、国内外の様々な異分野の英知を結集させ、流動現象の基礎研究とそれを基盤とした先端学術領域との融合ならびに重点科学技術分野への応用によって、世界最高水準の多様な流動現象に関する学理の探求及び研究を推進し、社会に貢献するとともに、次世代の若手研究者及び技術者を育成するよう努めて参る所存である。今後ともご支援ご鞭撻をお願い申し上げますと共に、本報告書について、忌憚のないご意見を頂ければ幸甚である。

平成 22 年 8 月

東北大学流体科学研究所長
早瀬 敏幸

目 次

1. 平成 21 年度公募共同研究のまとめ	1
1.1 公募共同研究実施概要	1
1.2 公募共同研究成果報告会	1
1.3 申請・採択状況	2
1.4 研究者の受け入れ状況	2
1.5 研究費	3
1.6 発表件数	3
2. 研究成果報告書	
J09001 ナノ粒子分散系 E R 流体の開発と流動特性評価	5
田中 克史 (京都工芸繊維大学大学院)、中野 政身 (東北大学)	
J09002 材料劣化評価のための疲労により析出した磁性層の磁化過程シミュレーション	7
山口 克彦 (福島大学)、高木 敏行 (東北大学)	
J09003 バイオテンプレート極限加工による構造制御マルチディスク単電子トランジスタの開発	9
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)	
J09004 脳深部磁気刺激の応用に関する研究	11
八島 和美 (株式会社 I F G)、高木 敏行 (東北大学)	
J09005 量子ドット太陽電池の研究開発	13
近藤 道雄 ((独) 産業技術総合研究所)、寒川 誠二 (東北大学)	
J09006 スパイクニューロンデバイスの基礎検討	15
森江 隆 (九州工業大学大学院)、寒川 誠二 (東北大学)	
J09007 直接数値計算による中立・安定・不安定境界層乱流の構造に及ぼす境界層外乱れの影響の解明	17
酒井 康彦 (名古屋大学大学院)、早瀬 敏幸 (東北大学)	
J09008 ナノディスクアレイを用いた新規量子デバイスの特性評価技術開発	19
高橋 庸夫 (北海道大学大学院)、寒川 誠二 (東北大学)	
J09009 二段式軽ガス銃を用いたソニックブームの実験的研究	21
齋藤 務 (室蘭工業大学)、大林 茂 (東北大学)	
J09010 左心房における血流解析	23
柴田 宗一 (宮城県立循環器・呼吸器病センター)、船本 健一 (東北大学)	
J09011 マイクロ・ナノ構造体のふく射特性計測に関する研究	25
圓山 重直 (東北大学)、Vaillon Rodolphe (INSA Lyon)	
J09012 離散方位ふく射要素法を用いたふく射・対流複合伝熱解析	27
圓山 重直 (東北大学)、櫻井 篤 (新潟大学)	
J09013 大規模環境におけるエネルギー移動評価とその解析	29
圓山 重直 (東北大学)、山田 昇 (長岡技術科学大学)	
J09014 複雑媒体における非フーリエ伝熱解析	31
圓山 重直 (東北大学)、Mishra Subhash Chandra (Indian Institute of Technology)	
J09015 サイレント超音速機の低速飛行特性に関する研究	33
川添 博光 (鳥取大学大学院)、大林 茂 (東北大学)	
J09016 Investigation of Supersonic Hybrid-stabilized Argon-water Arc for Biomass Gasification	35
Jiří Jeništa (Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i.)、西山 秀哉 (東北大学)	

J09017	Experimental Analysis of Droplet Impact Process onto Rough Substrate with Solidification (Chemical Reaction)	37
	Deivandren Sivakumar (Indian Institute of Science)、西山 秀哉 (東北大学)	
J09018	予混合火炎のダイナミクスに及ぼす固有不安定性と放射の複合効果	39
	門脇 敏 (長岡技術科学大学大学院)、小林 秀昭 (東北大学)	
J09019	ナノ構造化界面における輸送現象	41
	小原 拓 (東北大学)、芝原 正彦 (大阪大学大学院)	
J09020	Investigations of Reacting Flow in Micro Channels Directed to Development of Eco-friendly Technologies of Energy Conversion	43
	Sergey Minaev (Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS)、丸田 薫 (東北大学)	
J09021	Simulations of Convection-Enhanced Delivery in Rat Brain	45
	Joshua Smith (Lafayette College)、船本 健一 (東北大学)	
J09022	マイクロチャンネル内における物質拡散場の高精度計測に関する研究	47
	小宮 敦樹 (東北大学)、Gary Rosengarten (The University of New South Wales)	
J09023	低騒音性と高空力性に優れたヘリコプタの最適設計法の開発	49
	鄭 信圭 (東北大学)、李 管中 (韓国釜山大学)	
J09024	未固結層の水圧破碎挙動解明とメタンハイドレート開発への応用	51
	伊藤 高敏 (東北大学)、石田 毅 (京都大学大学院)	
J09025	Analysis of Reactive Species in a Plasma Flow for Medical Treatment	53
	Gregor Morfill (Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics)、佐藤 岳彦 (東北大学)	
J09026	大気圧プラズマ流によるラジカル生成機構と滅菌機構	55
	佐藤 岳彦 (東北大学)、宮原 高志 (静岡大学)	
J09027	常温圧縮回転せん断法を用いた複合材料の開発	57
	中山 昇 (信州大学)、三木 寛之 (東北大学)	
J09028	Kinetic Force Method for Two-/Three-Dimensional Numerical Modeling Relaxation of Rarefied Gas flows	59
	Vladimir Saveliev (National Center of Space Researches and Technologies)、米村 茂 (東北大学)	
J09029	反応性非平衡プラズマジェットの実時間数値解析	61
	西山 秀哉 (東北大学)、田中 康規 (金沢大学)	
J09030	Numerical Studies of the Reacting Rarefied Flows in Tubes	63
	Mikhail Ivanov (Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS)、丸田 薫 (東北大学)	
J09031	マイクロ噴霧微粒化プロセスの超並列融合計算	65
	石本 淳 (東北大学)、Kozo Saito (University of Kentucky)	
J09032	脳内対流の解析による脳局所投薬技術の改良	67
	富永 悌二 (東北大学)、早瀬 敏幸 (東北大学)	
J09033	ホールトーンフィードバック問題のアクティブ制御に関する数値的・実験的研究	69
	Mikael A. Langthjem (山形大学)、中野 政身 (東北大学)	
J09034	液体ロケットインデューサの振動問題に関する研究	71
	吉田 義樹 ((独)宇宙航空研究開発機構)、伊賀 由佳 (東北大学)	
J09035	Nondestructive Evaluation of Surface/Sub-surface Material Properties of Structural Components in NPP Using Ultrasonic and Electromagnetic Method	73
	Sung-Jin Song (Sungkyunkwan University)、高木 敏行 (東北大学)	
J09036	Development of Micro-Motor for MEMS utilizing Novel Smart Polymer Composite	75
	中野 政身 (東北大学)、Miklós Zrínyi (Semmelweis University)	

J09037	Investigation of Hypersonic Flows about Leading Edges of Small Bluntness	77
	Mikhail Ivanov (Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS)、米村 茂(東北大学)	
J09038	可視化による知識発見のライフサイクル管理とその流動応用評価.....	79
	藤代 一成 (慶應義塾大学)、早瀬 敏幸 (東北大学)	
J09039	超流動ヘリウム中の沸騰膜界面における不安定現象に関する研究.....	81
	木村 誠宏 (高エネルギー加速器研究機構)、野澤 正和 (東北大学)	
J09040	スラッジ中の流体包有物による地熱資源の持続的生産性評価.....	83
	関根 孝太郎 (東北大学)、安達 正畝 (奥会津地熱株式会社)	
J09041	Production of Complex Plasma at Atmospheric Pressure.....	85
	佐藤 岳彦 (東北大学)、Gregor Morfill (Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics)	
J09042	Mechanism of Bubble Generation and Disappearance by Plasma	87
	佐藤 岳彦 (東北大学)、Mohamed Farhat (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL))	
J09043	Molecular Dynamics Study about Lubrication Phenomena of Liquid Bridges	89
	徳増 崇 (東北大学)、Philippe Vergne (INSA-Lyon)	
J09044	液体水素の熱・輸送物性に関する分子論的研究.....	91
	徳増 崇 (東北大学)、坪井 伸幸 ((独)宇宙航空研究開発機構)	
J09045	Tribological Behavior and Electrical Contact Resistance of Metal-Containing DLC Coating for Electrically Conductive Tribo-elements	93
	Julien Fontaine (Ecole Centrale de Lyon)、高木 敏行 (東北大学)	
J09046	脳動脈瘤用ステントの開発.....	95
	太田 信 (東北大学)、中山 敏男 (東北大学)	
J09047	プラズマ気泡生成法の開発.....	97
	佐藤 岳彦 (東北大学)、中谷 達行 (トーヨーエイテック株式会社)	
J09048	低誘電率薄膜エッチングのための中性ビームを用いた地球共生型ガスケミストリの研究.....	99
	斎藤 修一 (半導体先端テクノロジーズ)、寒川 誠二 (東北大学)	
J09049	極低温気液二相流体の管内流動・伝熱特性に関する研究.....	101
	小林 弘明 ((独)宇宙航空研究開発機構)、大平 勝秀 (東北大学)	
J09050	連続流方式インクジェットの液滴形成過程の最適化に関する研究.....	103
	中野 政身 (東北大学)、中西 為雄 (山形大学大学院)	
J09051	Viscosity Reduction of Complex Fluid with Suspended Particles	105
	中野 政身 (東北大学)、Rongjia Tao (Temple University)	
J09052	気象データを用いた風況予測システムの研究とその応用.....	107
	服部 裕司 (東北大学)、金元 敏明 (九州工業大学)	

3. 主な発表論文の別刷	109
--------------------	-----

1. 平成 21 年度公募共同研究のまとめ

1.1 公募共同研究実施概要

流体科学研究所では、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、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につき検討した結果、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公募共同研究を実施することとした。

公募共同研究の募集や申請手続きの情報は、平成 20 年 11 月から翌年 1 月末にかけて、本研究所のホームページで日本語と英語で広く国内外に公開するとともに、関連学会および本研究所の関連研究者メーリングリストを利用して電子メールで広く国内外に通知した。公募共同研究の採択は、共同研究委員会に過半数が外部委員の審査委員会を結成して行った。採択された研究課題には、評価結果に基づき研究経費を措置した。

平成 21 年度の公募共同研究は、原則として平成 21 年 4 月 1 日から平成 22 年 3 月 31 日まで実施された。途中、平成 21 年 11 月には、運営委員会、共同研究委員会、公募共同研究成果報告会が開催された。

1.2 公募共同研究成果報告会

平成 21 年 11 月 5 日に、公募共同研究成果報告会 IFS Collaborative Research Forum を流体科学研究所主催の国際シンポジウム AFI/TFI-2009 においてホテルメトロポリタン仙台にて開催した。本報告会では 42 件のショートプレゼンテーションとポスター発表が行われ、100 人の出席者があった（写真 1、2）。



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 申請・採択状況

申請・採択状況等を表 1 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 1：平成 21 年度申請・採択状況

	合計	内訳 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
申請数(件)	52	7	16	7	17	5
採択数(件) (国内/国際)	52 (32/20)	7 (5/2)	16 (8/8)	7 (5/2)	17 (10/7)	5 (4/1)
採択率(%)	100	100	100	100	100	100
申請金額 (千円)	20,177	2,388	6,605	2,304	7,050	1,830
採択金額 (千円)	16,639	2,115	4,850	2,076	5,929	1,669
一件あたりの 採択金額 (千円)	320	302	303	297	349	334

1.4 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 2 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、旅行期間を基に算出した。

表 2：研究者の受け入れ状況

	平成 21 年度
国内	157
国外	254
合計 (延べ人日)	411

1.5 研究費

本公募共同研究にて使用した研究費の内訳を表 3 に示す。

表 3：研究費の内訳

	平成 21 年度
物件費	8,136
旅費	7,415
合計(千円)	15,551

1.6 発表件数

研究成果の内訳を表 4 に示す。これらの成果の内、主要な論文の別刷りが、本報告書の後半に掲載されている。

表 4：研究成果の内訳

	平成 21 年度
学術雑誌(査読つき国際会議、解説等を含む)	43
国際会議、国内会議、研究会、口頭発表等	154
その他(特許・受賞・マスコミ発表等)	5
合計(件)	202

2. 研究成果報告書

課題番号	J09001
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2009.4~2010.3

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

田中 克史*†, 米田 雅*, 中野 政身**††

*京都工芸繊維大学大学院, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

エレクトロレオロジー (ER) 効果は、ある流体に外部電場を印加・除去することによって生ずる見かけの粘度の増加・回復応答現象である。ER 効果が見られる流体は ER 流体と称されており、機能的流体としての応用が期待されている。粒径がマイクロメートルオーダーの固体粒子分散系は、典型的な ER 流体として知られているが、流体の安定性、微細間隙流路への適用等の問題点が指摘されている。

本研究では、粒径がナノメートルオーダーの粒子 (ナノ粒子) を用いた分散系 ER 流体を開発し、流体の微細構造及び微細間隙における流動特性の評価を行うとともに、流体の安定性の評価を行うことを目的とする。

2. 研究成果の内容

二酸化チタンナノ粒子/シリコンオイル系を中心として、ナノ粒子分散系を調整した。この際、15 nm - 数百 nm の範囲で平均粒子径 ($2a$) の異なる粒子について、同一粒子濃度 (体積分率 ϕ) で ER 流体を調整し、スクリーニングを行った。粒子体積分率は、8.8 vol% を中心として調整した。調整した ER 流体について、流動特性の評価を行った。その際、流体の微細構造の評価を合わせて行った。具体的には、上記において調整した ER 流体の無電場における流動特性、電場応答性、及び、時間安定性を評価した。

粒子径 $2a = 80$ nm の試料について得られた無電場の流動特性では、低せん断速度域において応力の平坦部分 (見かけの降伏応力) が認められ、その値は、 $2a = 15$ nm の試料の値とほぼ一致する結果が得られた。しかしながら、16 kV/mm の電場で誘起された応力は 300 Pa 程度であり、電場除去後の応力は、電場印加前の初期値より大きな値を示す傾向が得られた。

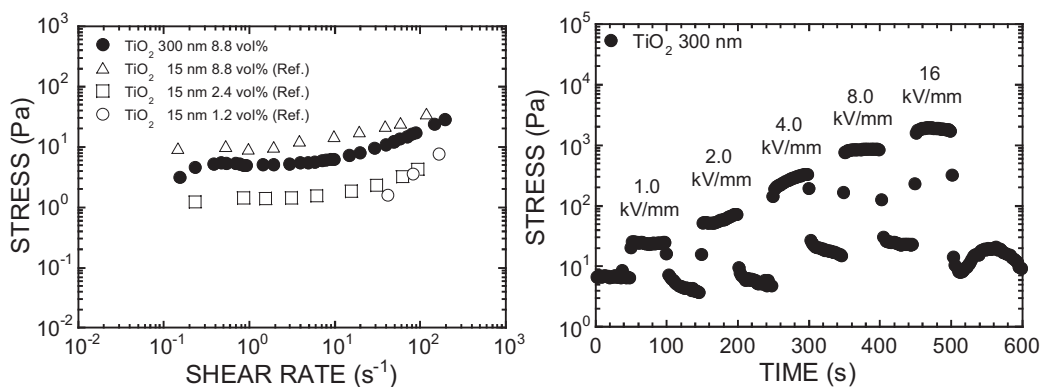


図 1: $2a = 300$ nm 程度の試料について得られた無電場の流動特性 (左), 電場応答特性 (右)

一方、 $2a = 300$ nm 程度の試料については、分散安定性、電場応答特性において比較的良好な結果が得られた。図 1 (左) には、 $2a = 300$ nm 程度の試料について得られた無電場の流動特性、図 1 (右) には電場応答特性を示す。せん断は、 $50 \mu\text{m}$ の微細間隔において、せん断速度 1.88 s^{-1} で行った。図 1 (左) には、 $2a = 15$ nm の試料について得られた結果を、参照値として白抜のシンボル (Δ , \square , \circ) で示している。図 1 (左) において、 $2a = 300$ nm の試料についても見かけの降伏応力が認められるが、その応力は $2a = 15$ nm, $\phi = 8.8 \text{ vol}\%$ の試料の値より低く、 $\phi = 2.4 \text{ vol}\%$ の試料の値より高い値が得られた。微細構造の観察結果等を総合すると粒子の分散性の向上が示唆される。図 1 (右) に示す応力の電場応答特性については、電場強度 1 kV/mm においても応力の電場応答が認められる。また、 16 kV/mm において 2 kPa 程度の応力が誘起されており、概ね良好な可逆性・安定性を示している。さらに、電場下、及び、無電場下で得られた応力の差で定義される誘起せん断応力は、電場強度の 2 乗に比例する結果が得られ、 $2a = 15$ nm の試料における傾向と類似する結果が得られた。

3. 研究目標の達成状況

$2a = 300$ nm 程度の試料は、 $50 \mu\text{m}$ の微細間隙における充填、 16 kV/mm までの高電場の印加が可能であり、比較的良好な電場応答特性・安定性が得られている。また、無電場における見かけの降伏応力は、 $2a = 15$ nm の試料より低い値が得られた。

4. まとめと今後の課題

無電場における流動挙動において、見かけの降伏応力は $2a = 15$ nm の試料より低い値が得られており、微細構造の観察結果等を総合すると粒子の分散性の向上が示唆される。しかしながら、誘起せん断応力の絶対値は、 $2a = 15$ nm の試料よりやや低い値が得られている。本共同研究において、ナノ粒子分散系 ER 流体の流動特性、及び、流体の微細構造が明らかにされつつあるが、誘起せん断応力は必ずしも粒子径のみで整理されない結果が得られており、より安定で良好な特性を示す ER 流体開発のために、さらに検討が望まれる。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] K. Tanaka, and R. Akiyama: Electrically Induced Microstructures in Micro- and Nano-Suspensions and Related Physical Properties, *Polym. J.*, Vol. 41, No. 12, (2009), pp.1019-1026. (Review Article)
- [2] 中野政身: ナノ・マイクロ粒子分散系 ER 流体のマイクロギャップフローとその点字表示システムへの応用, 混相流, Vol. 23, No. 2, (2009), pp. 135-142. (解説)

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[3] K. Tanaka, M. Komeda, N. Nakagawa, R. Akiyama, M. Nakano, and T. Tsujita: Development and Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 80-81.
- *[4] K. Tanaka, R. Akiyama, and M. Nakano: Flow Behavior and Microstructure of Electro-Rheological Nano-Suspensions before and after Yielding, *Proceedings of the Sixth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2009), pp. 132-133.
- [5] 中野政身: ナノ粒子分散系 ER 流体の回転せん断流れにおけるモルフォロジーと ER 効果, 可視化情報 (可視化情報全国講演会講演論文集), Vol. 29, Suppl. No. 2, (2009), pp. 127-128.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J09002
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.4～2010.3

材料劣化評価のための疲労により析出した磁性層の磁化過程シミュレーション
Simulation of Magnetic Dynamic Process of Magnetic Layers in Grain Boundary due to Fatigue
for Material Degradation

山口 克彦*†, 高木 敏行**††

*福島大学共生システム理工学類, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

本研究では、熱時効処理によるインコネルの鋭敏化の進行に伴う磁性変化に着目し、その磁化過程をスパコンによる並列化モンテカルロ法を用いてシミュレーションすることで非破壊検査への応用のための指標を与えることを目的としている。

2. 研究成果の内容

熱力学および一次拡散モデルに基づく粒界近傍における Cr 濃度分布の数値計算の結果をもとに各熱時効処理時間の鋭敏化クラスターの構築を行った。具体的には 30^3 個の立方体クラスターの中央に粒界面を設定し、粒界面からの距離によって変化する Cr 濃度の数値計算結果に応じて磁性サイトを分布させた。

これらのクラスターを、モンテカルロ法を用いてシミュレーションした B-H 曲線の結果は、実際の測定結果に測定結果に沿う結果となった。この結果から図 1 のように保磁力 (左) と残留磁化 (右) について、各熱時効処理時間についてみると、実験とシミュレーションの結果がよく一致していることがわかる。

3. 研究目標の達成状況

本研究におけるシミュレーションの結果は実際の測定結果と概ね一致しており、鋭敏化度と磁気特性の変化の因果関係を裏付けるものとなっている。シミュレーションで用いたモデルは磁性サイトが離散的に分布したものであり、磁性サイトの粗密がその磁気特性を決定付けていることが解明された。これらの結果は、今まで不明確であった磁気特性とインコネルの組成の変化を結びつけるものであり、磁気特性の非破壊検査への応用に貢献するものであると考えられる。

一方で、熱時効処理時間による残留磁化の変化では、そのピーク位置が計算と実験で多少ずれており、測定サンプルにおける Cr 濃度の分布を実験的に再確認するなど定量化に向けた課題が残っている。

4. 研究目標の達成状況

本研究では、鋭敏化したインコネルの磁気特性についてシミュレーションと実験結果をつき合わせるかたちでアプローチを行った。シミュレーションの結果は実際の測定結果と概ね一致しており、鋭敏化度と磁気特性の変化の因果関係を裏付けるものとなっている。シミュレーションで用いたモデルは磁性サイトが離散的に分布したものであり、このモデルからシミュレートされた磁気特性の結果が実際の測定結果と対応することから、磁性サイトの粗密がその磁気特性を決定付けていることが解明された。これらの結果は、今まで不明確であった磁気特性と

インコネルの組成の変化を結びつけるものであり、磁気特性の非破壊検査への応用に貢献するものであると考えられる。

一方で、熱時効処理時間による残留磁化の変化では、そのピーク位置が計算と実験で多少ずれており、測定サンプルにおける Cr 濃度の分布を実験的に再確認するなど定量化に向けた課題が残っている。

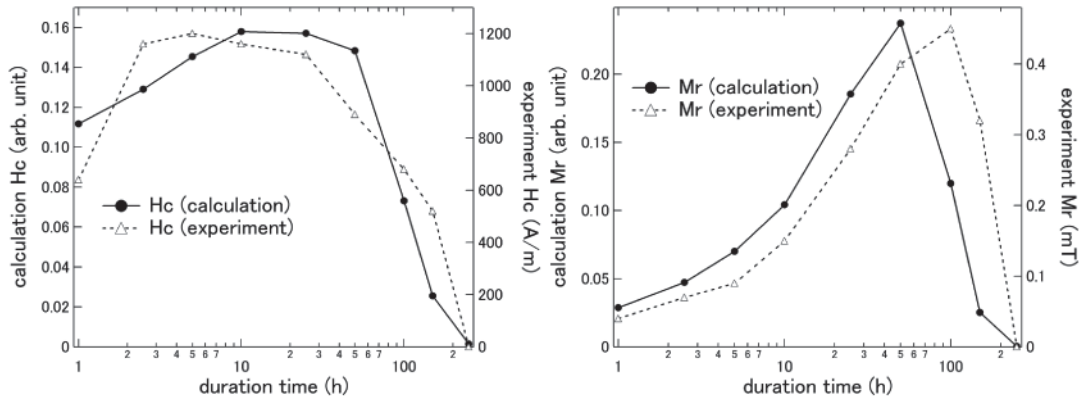


図 1. 各熱時効処理の保磁力 (左) と残留磁化 (右) の実験とシミュレーションの結果比較

5. まとめと今後の課題

本研究では鋭敏化したインコネルの粒界近傍でのクラスターを構築し、モンテカルロ法によるシミュレーションを行った。その計算結果は実際の測定結果に沿うものとなり、より信頼度の高い非破壊検査への応用のための指標を示すことができた。今後の課題は、温度により磁気特性がどのように変化するかをより詳細に検証し、それにあわせてシミュレーションの精度をさらに向上させることである。また、今回の報告では実現できなかった Cr 濃度の分散をモンテカルロ法を用いてシミュレーションすることにも引き続き取り組んでいきたい。

6. 研究成果 (*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] Katsuhiko Yamaguchi, Kenji Suzuki, Osamu Nittono and Toshiyuki Takagi: Domain Wall Displacement Simulation for Deformed Micro Magnetic Clusters, *Proceedings of Applied Electromagnetic and Mechanics (II) Symposium*, (2009), pp. 49-50.
 - *[2] Katsuhiko Yamaguchi, Kenji Suzuki, Osamu Nittono, Tetsuya Uchimoto and Toshiyuki Takagi: Magnetic Dynamic Process of Magnetic Layers in Grain Boundary due to Fatigue for Material Degradation, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.54-55.
 - [3] Katsuhiko Yamaguchi, Kenji Suzuki, Osamu Nittono and Toshiyuki Takagi: Monte Carlo Simulation for Magnetic Domain Wall Displacement with Conventional Crystal Anisotropy, *Proceedings of HYSTERESIS MODELING AND MICROMAGNETICS Symposium*, (2009), p. 101.
 - [4] 山口克彦, 鈴木健司, 入戸野修: ミクロな結晶磁気異方性を取り入れた磁壁移動シミュレーション, 第 33 回本磁気学会学術講演概要集 2009, (2009), p. 428.
 - [5] 鈴木健司, 山口克彦, 入戸野修: 疲労により析出した磁性層の磁化過程シミュレーション, 第 33 回日本磁気学学術講演概要集 2009, (2009), p. 429.
- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等) なし

課題番号	J09003
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2009.4～2010.3

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

山下一郎*†, 寒川誠二**††, 浦岡行治*,
 黄啓賢**, 五十嵐誠**, 戸村幕樹**

*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

微細化によるデバイス性能向上の限界のため、新しい構造の半導体デバイスの登場が待たれている。本研究では、中性粒子ビームによる超低損傷加工技術と蛋白質の自己組織化能により選択的に配置された金属微粒子をマスクに厚さ数 nm のナノディスクの損傷フリー超高精度加工を実現し、このナノ構造の特長をフルに活用した極低消費電力、超高集積化を可能にするマルチディスク単電子トランジスタを開発する。

2. 研究成果の内容

マルチディスク単電子トランジスタの開発に向けて量子ナノディスク:QND の 2 次元配列作製に取り組んだ。すなわち、球殻状タンパク質フェリチン (直径 12nm, 酸化鉄コア直径 7nm) の、シリコン基板上高密度 2 次元配置し、タンパク質の選択除去後ナノエッチングにより 2 次元 QND を得て、その後これをチャンネルとするトランジスタを作製する。

先ずフェリチンの自己組織化能を利用した QND の 2 次元高密度配列化条件を共同して探索研究し、中性粒子ビームによるシリコン基板表面の酸化方法 (Neutral Beam Oxidation) が高密度 2 次元配列実現に有効であることを見出した。次に、タンパク質部分だけを選択除去し、得られた 2 次元酸化鉄ナノ粒子をエッチングマスクとして、中性粒子ビームにより高精度低ダメージエッチング加工を、あらかじめシリコン基板に 1-2nm のシリコンを酸化シリコンではさんだサンドイッチ構造を持たせた基板に施すことで、円板状シリコンナノ構造すなわち量子ナノディスク:QND) の 2 次元構造を実現できることが確認できた。既にこのシリコン QND は単体で室温での量子効果の発現を確認できている。

図 1 は得られた 2 次元 QDND 配列の電気特性の温度依存性等をしめす。具体的作製法は以下のとおりである。SiO₂ (Neutral Beam Oxide : NBO) / poly-Si / SiO₂ / Si substrate 構造多層膜上にフェリチンを 2 次元配列し、酸素中熱処理によるタンパク質除去を行、鉄コアマスクを得た。この間ナノサイズマスクを用いて、基板表面に存在する 3nm 厚 NBO 膜を NF₃ ガス + 水素ラジカル照射を行うことでシリコン対して選択的に除去し、続いて塩素中性粒子ビームによって poly-Si のエッチングを行い、2 次元量子ナノディスクアレイを作製した。これをチャンネルとし、さらに上層に金属電極 (Cr/Al) を蒸着して 2 端子デバイスとした。ナノディスクは厚さ約 2nm, 直径約 10nm, ナノディスク間ギャップ約 2nm である。測定温度を 20~383K で変化させて電流測定を行い、導電率を測定した。この結果から、低温・高温で電子の輸送機構に差異があり室温以上において電流が急激に直線的に増加することから、量子ナノディスクにおいて電子が閉じ込められている障壁は 0.31eV 程度であることが分かった。

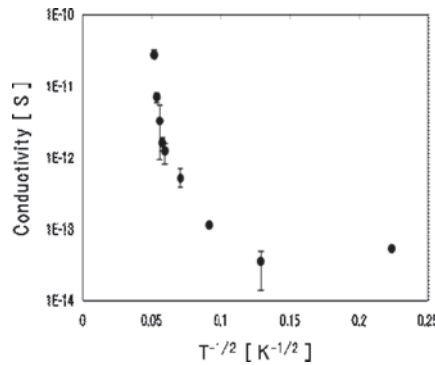


図 1： 2 端子デバイスの測定温度依存性

3. 研究目標の達成状況

高密度 2 次元ナノドットナノマスクを、中性粒子ビーム酸化したシリコン基板の表面に酸化鉄コアを持つフェリチンを高密度に一層配置することで実現し、さらに直径 7 nm のフェリチンコアをマスクとした中性粒子ビームエッチングにより、量子井戸となるナノディスク構造を実現した。このナノディスクアレイの電気特性を測定確認したところ、良好な 2 端子デバイスとしての特性が確認され、マルチディスク単電子トランジスタチャネル部の作製が達成された。ゲート電極による変調確認は達成できなかったが今後この電気特性を基にトランジスタ構造の詳細構造設計を行う。

4. まとめと今後の課題

マルチディスク単電子トランジスタのキー構造であるマルチディスクをフェリチンと中性粒子ビームエッチングにより実現できた。この研究過程で、中性粒子ビーム酸化がシリコン基板の表面状態を改変し、フェリチンタンパク質の高密度 2 次元配列に適していることが見出され、これが今回の研究成果の大きなブレイクスルーとなった。今後トランジスタ構造の詳細な電気特性を確認していく。

5. 研究成果

1) 学術雑誌（査読つき国際会議、解説等を含む）

- [1] C.-H. Huang, M. Igarashi, M. Wone, Y. Uraoka, T. Fuyuki, M. Takeguchi, I. Yamashita, and S. Samukawa: Two-Dimensional Si-Nanodisk Array Fabricated Using Bio-Nano-Process and Neutral Beam Etching for Realistic Quantum Effect Devices, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48**, (2009), 04C187-1-6.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] I. Yamashita, S. Samukawa, and T. Kubota: Bio-templated Nanostructure Fabrication with Neutral Beam, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 76-77.
- [3] 黄 啓賢, 五十嵐誠, モハマドファイルズビン ブディマン, 王 宣又, 浦岡行治, 大島隆治, 岡田至崇, 山下一郎, 寒川誠: バイオテンプレート極限加工による Si 量子ナノディスク 2 次元アレイの作製と電気特性 [2], 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川.
- [4] 黄 啓賢, 五十嵐誠, モハマドファイルズビン ブディマン, 王 宣又, 浦岡行治, 大島隆治, 岡田至崇, 山下一郎, 寒川誠二: Optical Characteristics of Two-Dimensional Array of Silicon nanodis, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川.
- [5] 黄 啓賢, 五十嵐誠, 戸村幕樹, 竹口雅樹, 浦岡行治, 冬木隆, 山下一郎, 寒川誠二: UV-Vis Spectroscopy of Two-dimensional Array of Silicon nanodisk, 第 70 回応用物理学術講演会, 富山.

3) その他（特許, 受賞, マスコミ発表等） なし

課題番号	J09004
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	2009.4～2010.3

脳深部磁気刺激の応用に関する研究

Application of Deep Brain Magnetic Stimulation

八島和美*†, 高木敏行**††, 出江紳一***, 永富良一***

*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

平成 18 年～20 年度に流体科学研究所, 医工学研究科, (株)IFG の共同研究で実施した「診断・治療用生体深部磁気刺激装置の研究開発」において, 8 チャンネル磁気刺激装置を設計・製作した。本共同研究はこれらの装置と, 研究成果を活用することで, リハビリテーション, 再生医療分野での活用が期待される新規な医療機器を開発するものである。併せて, 研究成果の製品化を検討する。

2. 研究成果の内容

平成 18 年～20 年度に実施した共同研究で設計, 製作した 8 連発磁気刺激装置を用いて動物実験を行った。この結果, 磁気刺激コイルに印加するパルス電圧が高く, 連続するパルス数が多いほど強い磁気刺激効果が得られることが分かった。また, 連発パルスの効果はパルス間隔 20ms 付近で最大になることが判明した。大脳皮質運動野への磁気刺激効果は, 運動野に対応する身体部位の筋収縮活動を筋電位として計測することにより検出できた。しかしながら脳深部には直接に対応する運動部位がない。そこで脳深部の磁気刺激効果を検証する必要性が生じた。このためには神経に磁気刺激を誘発する磁場強度を厳密に測定する必要性が生じた。静磁場や交流磁場の強度はホール素子などを用いる磁場強度計によって簡単に測定できる。一方, パルス磁場は標準となる磁場がないので市販の測定装置が示す磁場強度は校正を必要とする。そこで本共同研究ではパルス磁場の絶対強度を測定・計算してパルス波形とともに表示する装置を開発した。パルス磁場測定の原理は小さなサーチコイルの起電力を積分する方法を用いた。コイル出力電圧 V は符号を無視すると磁束密度 B の時間微分にサーチコイルの巻数 n と面積 S をかけた(1)式で表される。(1)式の磁場強度 H を時間積分すると(2)式の 1 項目となる。

$$V = nS \frac{dB}{dt} = \mu_0 nS \frac{dH}{dt} \quad (1) \quad H = \frac{10^8}{nS} \int V dt (Oe) = \frac{10^8}{nS} VCR (Oe) \quad (2)$$

時間積分を図 1 の CR 積分に置き換えると(2)式の 2 項目となり, 磁場強度 H は電圧として実時間測定が可能になる。

図1のCR積分型のパルス磁場強度測定装置が実用化されていない原因は、パルス磁場の強度、波形に対応するC（コンデンサ）とR（抵抗）の最適値を理論的に求めることができないことにある。

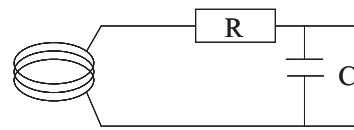


図1 CR積分回路

本研究ではパルス巾0.1~0.6ms, 磁場強度

0.1~1.2Tのパルス磁場強度を数値計算によって求めた。次にコンデンサの種類と静電容量を変えて、異なる抵抗値のCR積分回路を形成して、数値積分の結果と比較した。この結果、①周波数特性の良いコンデンサを用いる、②静電容量を実測する、③積分回路の時定数（CR）がパルス巾の数十倍となるように選定すると図1のCR積分によるパルス磁場強度は数値計算値と一致することが判明した。

この装置によると、磁気刺激が生じるパルス磁場の強さは0.17Tであった。そこで実験動物（サル）の脳深部に0.17Tより強いパルス磁場を与え、大脳皮質運動野には時間差のある磁気刺激を与えて筋電位を測定することで、脳深部磁気刺激の効果を検証した。図2は実験動物の脳深部と大脳皮質運動野に時間差を与えて磁気刺激した場合に誘発される筋電位発生時間に12msと15msの違いが生じた例を示す。

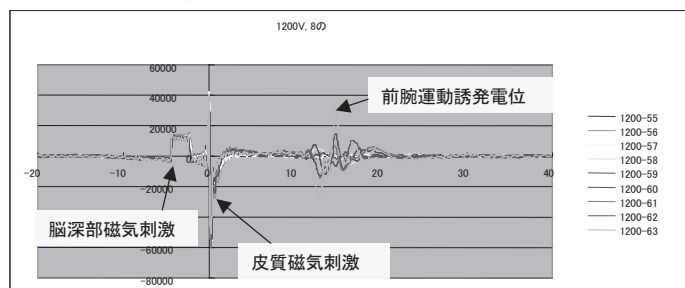


図2 脳深部と皮質の時間差磁気刺激による前腕筋誘発電位（カニクイザル）

3. 研究目標の達成状況

予想される研究成果は以下の3項目であり、それぞれは下記のように達成できた。

目標1. 磁気刺激法を活用する新規なリハビリテーション技術と装置の開発。

達成状況 連発磁気刺激により脳深部と大脳皮質を時間差磁気刺激する装置を完成させた。この装置により実験動物の筋肉を収縮させることができた。

目標2. 再生医療の基礎技術である細胞培養を、磁気刺激で促進する技術と装置の開発。

達成状況 目標1の装置のチャンネル数を2~4に減らすことで小型化するとともに、密閉された細胞培養容器内で使用可能な装置を完成させた。

目標3. 上記装置の製品化。

達成状況 ①CR積分パルス磁場強度測定装置、②ES細胞磁気刺激装置の2つを製品化した。

4. まとめと今後の課題

磁気刺激装置と実験技術を習得できたので、新規なリハビリ用装置の製品化を目指す。

5. 研究成果（*は別刷あり）

国際会議

*[1] Toshihiko Abe, Toshiaki Ichihara, Kazumi Yashima and Toshiyuki Takagi: Research on Deep Brain Magnetic Stimulation, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 62-63.

課題番号	J09005
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2009.4 ~ 2010.3

量子ドット太陽電池の研究開発

Research and Development of Quantum Dot

近藤 道雄*†, 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

限られたエネルギー資源の有効活用の為、高変換効率の太陽電池の開発が進んでいる。現在の太陽電池の変換効率を向上させるには、短波長から長波長までの広い範囲の太陽光を高い効率で吸収・変換するデバイス構造が必要である。本研究では、東北大学流体科学研究所・寒川教授グループが開発したバイオナノプロセスと中性粒子ビームエッチング技術を用いて世界で初めて実用的な量子ドット太陽電池を実現することを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究では、多接合型太陽電池のトップセルの作製を目的とした有機・無機半導体ハイブリッド構造からなる量子ドット太陽電池と寒川教授が開発したバイオテンプレートと中性粒子ビーム加工による2次元シリコンナノディスク構造の量子ドット太陽電池の開発を行った。

まず、有機物としてフラレン(C60)、半導体ナノ量子ドットとしてシリコンナノ結晶(SiNC)に注目し、これらのハイブリッド材料開発と太陽電池応用を行った。この構造におけるバンド構造では、半導体と有機物との界面でバルクヘテロ接合が形成される。そのため、有機物で光吸収し発生した励起子は、この界面で電子と正孔に解離する。ここで、真空準位から考えたC60のLUMOおよびHOMOのエネルギー準位は、SiNCの伝導帯および価電子帯の位置より低い。したがって、SiNC内で発生した電子およびC60内で発生し界面で解離した電子は、C60のLUMO準位へエネルギー移動する。一方、半導体内で生成した正孔およびC60内で発生し界面で解離した正孔は、C60のHOMO準位にエネルギー移動すると思われる。上述の現象を確認するため、はじめにSiNCの作製を行った。作製法としては、溶液中で結晶シリコンバルクをレーザーアブレーションさせる手法を用いた。本研究では、ナノ粒子作製時に使用する溶液の極性依存性についても検証し、SiNCのサイズおよびSiNC凝集構造は溶液の種類と極性に大きく依存することを明らかとした[1]。さらに、作製したシリコンナノ結晶をITO付きガラス基板上にスピコート法にて薄膜化し、その後、C60を蒸着、アルミ電極の真空蒸着のプロセスを行うことで太陽電池構造を構築した。その結果、多層膜化および作製条件の最適化を行っていないため外部量子効率はやや低いが、光感度を有する量子ドット太陽電池の開発に成功した[2]。

さらに、寒川教授が開発したイオテンプレートと中性粒子ビームの組み合わせによって形成した2次元シリコンナノディスクアレイ構造の光学的特性についても検討を行った。バンドギャップエネルギーのナノディスク厚さ依存性を示す。ナノディスク厚に伴い、バンドギャップエネルギーは減少する。この結果から、ナノディスクの厚さを変えるだけで(poly-Si

薄膜の厚さを変えるだけで), バンドギャップエネルギーを変えることができることが分かった. ナノディスクの厚さを制御することで, バンドギャップエネルギーが変化することが確認できれば, 様々なナノディスク厚を持つ構造を用意することで高効率な量子ドット太陽電池が作製できることになる.

3. 研究目標の達成状況

量子ドット太陽電池を作製し, 有機・無機半導体ハイブリッド構造からなる量子ドット太陽電池と寒川教授の開発したバイオテンプレートと中性粒子ビーム加工による2次元シリコンナノディスク構造の量子ドット太陽電池の2種類の検討を行った. その結果, まず有機・無機半導体ハイブリッド構造からなる量子ドット太陽電池構造において発電を確認することが出来た. さらに, SiNC 作製時に使用する溶液の極性・種類を変えることで, SiNC のサイズおよび凝集構造を制御できることが明らかとなった. しかし, 光電変換効率を向上させるためには, 量子ドットにおいてより多くの光吸収をさせる必要があり, 多層膜化およびSiNC の細密充填化と言った技術課題が残る. 一方, 寒川教授が提案したバイオテンプレートによる中性粒子ビーム加工により形成された高密度2次元Si量子ナノディスクのバンドギャップを制御することが可能となり, 量子ドット太陽電池への可能性を拓いたことは, 研究目標を十二分に達成したといえる.

4. まとめと今後の課題

量子ドット太陽電池を作製し, その可能性について検討を行った. その結果, 有機・無機半導体ハイブリッド構造からなる量子ドット太陽電池において光感度有することを電気的測定で確認することが出来た. しかし, 光電変換効率を向上させるためには, 量子ドットにおいてより多くの光吸収をさせる必要があり, 多層膜化およびシリコンナノ結晶の細密充填化と言った技術課題が残る. したがって, 中性粒子ビーム技術およびバイオナノプロセス技術を持つ東北大流体研寒川教授のグループと共同研究を行うことで, これまでにない均一で高密度なナノ構造を作製することが可能となり, より実用的で効率の良い量子ドット太陽電池を実現できる可能性があると考えられる.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] V. Švrcek, I. Turkevych, and M. Kondo: Photoelectric properties of silicon nanocrystals/P3HT bulk-heterojunction ordered in titanium dioxide nanotube arrays, *NANOSCALE RESEARCH LETTERS.*, 4 (2009), pp.1389-1394.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Chi-Hsien Huang, Makoto Igarashi, Maju Tomura, Masaki Takeguchi, Susumu Horita, Yukiharu Uraoka, Takashi Fuyuki, Ichiro Yamashita, and Seiji Samukawa: A New Structure of nanodisk (Stacked Nanodisk) fabricated by bio-nano-process and defect-free neutral beam etching, *2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2009)*, J-9-3, Sendai, (2009).

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	J09006
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2009.4~2010.3

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

森江 隆*†, 寒川 誠二**††
孫 意来*, 梁 海超*

*九州工業大学大学院生命体工学研究科, **東北大学流体科学研究所
†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

IFN モデルを実現するために、本研究ではナノディスクアレイ構造を用いたシナプス後電位 (PSP) 生成機能の実現を目指した。東北大学において、バイオナノプロセスによりナノディスクアレイ構造を作製し (図 1)、室温における電子トンネル効果を利用した PSP 生成機能を確認した (図 2) [1]。九州工業大学においては、シナプス荷重値を実現する構造を提案し (図 3)、シミュレーションによりその機能を確認した[2,3]。

まず、表 1 に示すパラメータを用いてナノ構造モデルを作成し、市販の電磁界シミュレータ Ansoft Maxwell 3D®により容量抽出を行った。抽出した素子容量を用いて等価回路図を作成し (図 4)、C 言語で自作した単電子回路シミュレータにより解析した。その結果、制御電極 (CG) の電圧 (V_c) により出力電圧 (PSP) の高さを制御することを確認し (図 5)、シナプス荷重を実現できることを示した。さらに、PSP 形状と制御電極幅の関係を調べ、電極幅が大きくなるほど、PSP 形状を大きく制御できることを示した (図 5)。

3. 研究目標の達成状況

ナノディスクアレイ構造の実測結果および単電子回路シミュレーションにより、ナノディスクアレイ構造の電子輸送特性を利用して PSP が生成できることを確認した。本研究で得られた結果から、ナノディスクアレイ構造を用いることで、究極の低消費電力・省面積な脳型情報処理デバイス実現の可能性が示された。

4. まとめと今後の課題

ナノディスクアレイを用いてシナプス後電位 (PSP) 生成機能を実現する構造を提案した。また、シミュレーションによりシナプス荷重値の実現可能性を示した。

今後は提案した構造を作製し、実測により提案手法を検証するとともに、デバイスの物理特性を明らかにする。

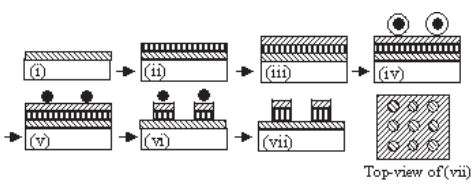


図1：ナノ構造作製プロセス

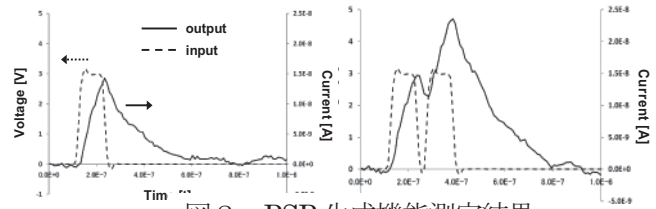


図2：PSP 生成機能測定結果

表1：ナノ構造の寸法

ナノディスク (ND)	直径	10 nm	ナノディスク数	107 個
	高さ	2 nm	ナノディスクアレイ	15×8 (行×列)
	間隔	3 nm	制御電極 (CG) -ND 間隔	10 nm

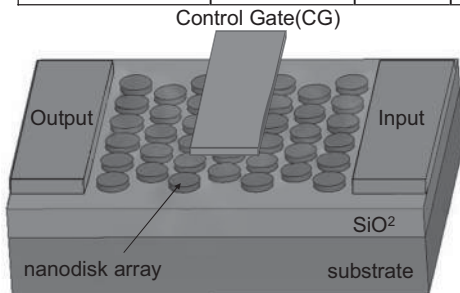


図3：シナプス部分を実現する構造

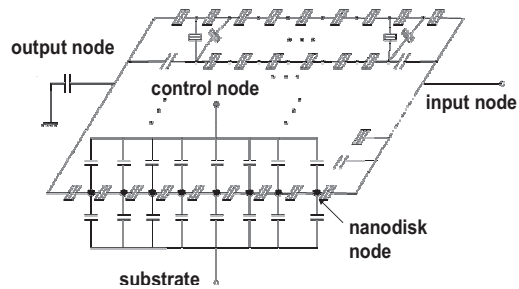


図4：図3に示す構造の等価回路図

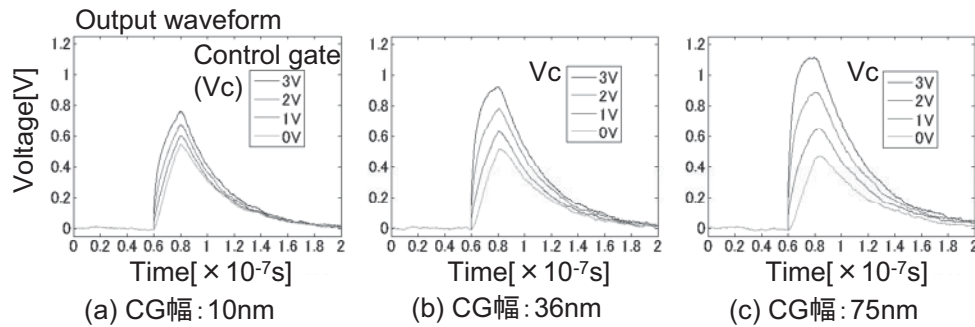


図5：PSP 生成のシミュレーション結果

5. 研究成果 (*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. Igarashi, C. H. Huang, M. Tomura, M. Takeguchi, S. Horita, Y. Uraoka, T. Fuyuki, I. Yamashita, T. Morie and S. Samukawa: New Functional Device Characteristics with 2-Dimensional Array of Si Nanodisks Fabricated by Combination of Bio-Template and Ultimate Top-down Etching, *Ext. Abstracts of Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM)*, Sendai, (2009), pp. 1364-1365.

[2] 孫 意来, 梁 海超, 森江 隆, 寒川 誠二: ナノディスクアレイ構造を用いたスパイクングニューロンデバイスの回路シミュレーション, 第70回応用物理学会学術講演会, 富山, (2009), p. 228.

*[3] T. Morie, Y. Sun, H. Liang, M. Igarashi, C. Huang, and S. Samukawa: Fundamental Study on Spiking Neuron Devices, *Proc. of the Ninth Int. Symp. on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 100-101.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J09007
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2009.4～2010.3

直接数値計算による中立・安定・不安定境界層乱流の構造に及ぼす境界層外乱れの影響の解明
 Direct Numerical Simulation on the Effects of Free-stream Turbulence
 on Neutral, Stably and Unstably Stratified Turbulent Boundary Layers

酒井 康彦*†, 早瀬 敏幸**††

長田 孝二*, 鈴木 博貴*

*名古屋大学大学院工学研究科, **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

主流の乱れが壁面乱流境界層の乱流特性と其中での熱と物質の乱流輸送に大きな影響を及ぼすことが、国内外の室内実験によって指摘されている。ところが、そのメカニズムについては、壁面のごく近傍での乱流計測や瞬間変動圧力場の測定が非常に困難であることから、実験的に解明することが極めて難しい。そこで、本共同研究では、実験と同じ乱流格子や他の乱流プロモータによって一様流中に作られる乱れを高精度に再現できる三次元直接数値計算 (DNS) コードを独自開発し、中立および安定・不安定成層境界層乱流に及ぼす主流の乱れの影響を数値的に明らかにすることを目的とする。

2. 研究成果の内容

空間発展乱流境界層の DNS コードの構築を進めた。流入部境界条件および後述の上側 (壁面と反対側) 境界条件を残して、開発が概ね終了した。また、上側 (壁面と反対側) 境界条件についての検討を行った。上側境界条件としてトラクションフリー境界条件の可能性を探るため、コードの開発およびそれに関する検討計算を行った。トラクションフリー境界条件は主に噴流の非定常数値解析等において用いられているので、二次元乱流噴流を対象として検討計算を行い、過去の実験結果と比較した。その結果、DNS 結果と実験結果が良好に一致し、トラクションフリー境界条件の適切な導入を確認した。しかしながら、この境界条件は、数値的に非常に不安定になることが知られている。そのため、空間発展乱流境界層への適用に際しては引き続き検討を進めていく予定である。

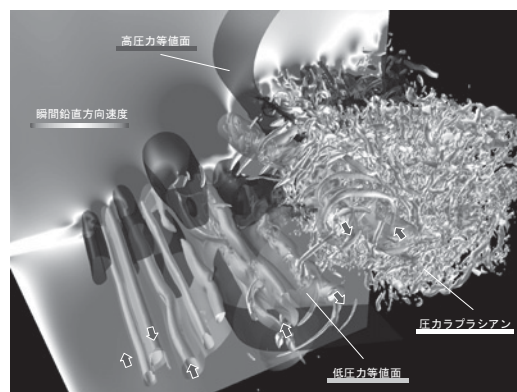


図1：トラクションフリー境界条件を導入した二次元乱流噴流の DNS

3. 研究目標の達成状況

壁面乱流を解析する空間発展乱流境界層の DNS コードに関して、流入部境界条件および上側 (壁面と反対側) 境界条件を残して開発が概ね終了した。流入部境界条件については、広く設定される既存の境界条件を改良する検討を進めている。また、上側境界条件については、多くの境界条件の中からトラクションフリー境界条件を導入し、その改良を行った後、

導入の適切さを検討計算により調べ、良好な結果を得た。また、乱流プロモータが生成する乱れとそれにより輸送されるスカラーに関する直接数値計算を引き続き進めた。ここで、乱流プロモータを、通常の実験計測で汎用な biplane-square rod 格子およびフラクタル格子とした。これらの格子乱流に対して、長大な統計時間が必要であることが知られている速度場・スカラー場に関する各種輸送方程式、変動勾配の統計量等の評価を世界に先駆けて行った。以上の成果は当初の研究目標を達成したものであると評価される。

4. まとめと今後の課題

今後は、まず、現在改良中の空間発展乱流境界層を高精度に解析する計算コードの構築を進め、その結果の妥当性の検討を行う予定である。適切な境界条件の設定についても引き続き検討を進める。その後、外部乱れを広範に組み合わせることで、壁面乱流境界層の乱流構造とその中の熱と物質の乱流拡散に及ぼす外部乱れの影響の解明を進めていく予定である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴: 有限差分法を用いた平行平板間乱流 DNS の精度向上について(粘性項への Compact Scheme の導入による散逸領域の高解像度化の試み), 日本機械学会論文集 B, Vol. 75, No. 752, (2009), pp. 642-649.
- [2] 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸, 久保貴: フラクタル格子により生成されるマルチスケール誘起乱流の構造とスカラー拡散機構(第 1 報, DNS によるフラクタル基本形状の影響に関する検討), 日本機械学会論文集 B, Vol. 75, No. 755, (2009), pp. 1387-1394.
- [3] 鈴木博貴, 長田孝二, 酒井康彦, 早瀬敏幸: 埋め込み境界法と高精度差分によるフラクタル格子乱流の三次元直接数値計算, 数理科学論文集, Vol. 11, No. 1, (2009), pp. 33-38.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[4] K. Nagata, Y. Sakai, H. Suzuki, and T. Hayase: Direct Numerical Simulation on the Effects of Free-stream Turbulence on Neutral, Stably and Unstably Stratified Turbulent Boundary Layers, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 110-111.
- [5] H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, T. Hayase, and T. Kubo: DNS of Passive Scalar Field with Mean Gradient in Fractal-Generated Turbulence, *Proceedings of the 6th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Vol. 1, (2009), pp. 55-60.
- [6] H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai, and T. Hayase: Direct Numerical Simulation of Scalar Transfer in Regular and Fractal Grid Turbulence, *Bulletin of the International Conference "Turbulent Mixing and Beyond"*, (2009), pp. 107-108.
- [7] K. Nagata, H. Suzuki, Y. Sakai, and T. Hayase: Turbulence Structure and Scalar Transfer in Fractal Generated Turbulence, *Proceedings of the Japan-Korea CFD Workshop*, (2009), CD-ROM, 5 pages.
- [8] 長田孝二, 鈴木博貴, 酒井康彦, 早瀬敏幸: フラクタル格子乱流の特性とスカラー輸送について, 数理科学講演会講演論文集, Vol. 28, (2009), pp. A402.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J09008
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2009.4~2010.3

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

高橋 庸夫*†, 寒川 誠二**††

*北海道大学大学院情報科学研究科, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

流体研の技術を用いて作製可能なナノディスクアレイを単電子デバイス機能デバイスとして用いた場合の、機能性を引き出すための評価技術を検討した。単電子デバイスは次世代の省電力と高機能性を併せ持つデバイスとして期待されているが、その高い機能性を効果的に引き出すために、多数のナノディスクをアレイ状に配置した構造を提案した。この構造の特徴の一つは、ナノディスクアレイの上部に複数のゲートを取り付けることで、多入力デバイスが作製できることである。それぞれのゲートは、その下層にあるたくさんのナノディスクと容量的にカップルするので、ゲート電圧で、その電位を変えることができる。その際、ディスクがナノメートルサイズであるので、クーロンブロッケイド効果（ディスクに電子が1個入った場合の、帯電エネルギーにより、電子の移動が制限される効果）により、それぞれのディスクを通過する電流が、ゲート電圧に対して振動する現象が現れる。ナノディスクアレイの両端に取り付けた電流端子を流れる電流は、ディスクのサイズが微妙に揺らぐ効果と、ディスクとゲート電極との容量が揺らぐ効果で、ゲート電圧に対して複雑に変化する。ここで、独立な多数のゲートを取り付けると、それぞれの入力に対して、複雑な特性が得られることになる。したがって、高い機能で動作することが期待される。

ここでは、図1の電子顕微鏡写真に示すようなナノディスクアレイを配置したデバイスを、

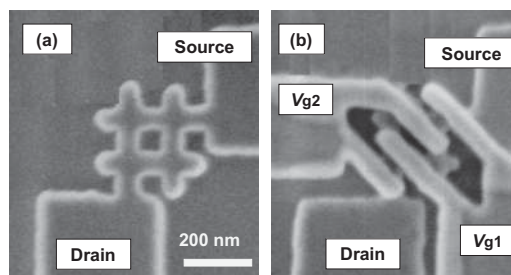


図1. 作製したナノドットアレイ(a)と、その上に2つの独立な微細入力ゲートを取り付けたデバイスの走査型電子顕微鏡写真

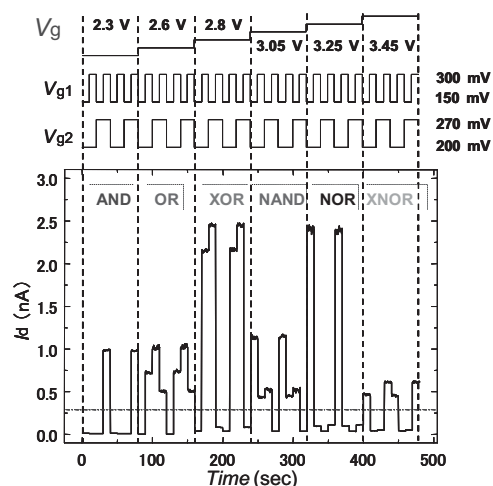


図2. 上層の制御ゲート電圧を変えたときの、入力ゲート電圧の組合せに対する出力電流特性

SOI 基板の上にパターン依存酸化法という手法で作製し、その上に微細な入力ゲートを取り付けた。この図には示していないが、その上から、デバイス全体を覆うように上層ゲート(制御ゲート)を配置した。測定温度 8K, ドレイン電圧 $V_d=5\text{mV}$ とした。図 2 は、上層ゲート電圧 V_g を変化させた、2 つの入力ゲート電圧 V_{g1} , V_{g2} を変えながら電流 I_d を測定したものである。このデバイスは 2 入力デバイスとして考えることができ、図 2 の結果は、上層ゲート電圧の変化にしたがって、AND, OR, XOR, NAND, NOR, XNOR の主要な 2 入力の論理関数がすべて出力できていることを示している。制御ゲート電圧により、機能を選択して動作させることが可能な、高機能フレキシブルなデバイスを実現できたことを示す。

3. 研究目標の達成状況

2 入力のナノディスクアレイデバイスを試作し、これまでには無い、機能選択可能な高機能フレキシブルデバイスとして動作することを示し、今年度の目標を達成した。

4. まとめと今後の課題

多入力に加え、多出力化を図り、より高い機能の創出を狙うと同時に、多出力化に伴い困難が予想される特性・機能の効果的な評価方法を構築する。

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)

[1] Y. Takahashi, et. al: Silicon Single-Electron Devices, in *Device Applications of Silicon Nanocrystals and Nanostructures*, eds. by N. Koshida, (ISBN: 978-0-387-79688-9, Springer), (2009), pp. 125-172.

[2] 高橋庸夫(分担執筆): 単電子デバイス, 「自己組織化ハンドブック」, 国武豊喜監修, 下村政嗣, 山口智彦編集, (ISBN: 978-4-86043-264-5, (株)エヌ・ティー・エス), (2009), pp.717-720.

[3] M. Jo, et. al: Silicon Nanodot-array Device with Multiple Gates, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 11, (2009), pp. 175-178.

[4] T. Kaizawa, et. al: Full Adder Operation based on Si Nanodot Array Device with Multiple Inputs and Outputs, *International Journal of Nanotechnology and Molecular Computation*, 1, (2009), pp. 58-69.

*[5] T. Kaizawa, et. al: Single-Electron Device with a Si Nanodot Array and Multiple Input Gates, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 8, No. 4, (2009), pp. 535-541.

[6] M. Jo, et. al: Double-dot Single-electron Transistor Fabricated in Silicon Nanowire, *6th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures*, Los Angeles, California, USA, (2009), pp. 54-55.

[7] M. Jo, et. al: Fabrication of Coupled-dot Single-electron Transistor in Silicon Nanowire, *2009 Silicon Nanoelectronics Workshop*, Workshop Abstracts, (2009), pp. 155-156.

[8] Y. Takahashi, et. al (invited): Novel-Functional Single-Electron Devices Using Silicon Nanodot Array, *2009 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices*, Busan, Korea, (2009), pp. 145-148.

[9] M. Jo, et. al: Logic Switching Characteristics of Multiple-gate Nanodot Array Device, *1st International Workshop on Si based nano-electronics and photonics*, Vigo, Spain, (2009).

他、合計 11 件

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

22 件

3) その他(特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J09009
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	2009.4～2010.3

二段式軽ガス銃を用いたソニックブームの実験的研究

Experimental Studies of Sonic Boom using a Two-stage Light Gas Gun

齋藤 務*†, 大林 茂**††

畠中 和明*, 山下 博**, 小川 俊弘**, 高山 和喜**

*室蘭工業大学, **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

近年、ソニックブーム低減を目指した次世代超音速輸送システムの研究開発が活発化している。流体科学研究所では、ブーゼマン型のバイプレーン（複葉翼）を採用した静粛型超音速機の研究が進められている。本研究では超音速機の静粛性向上を目指して、ソニックブームの発生、伝播並びに減衰過程について研究するため、二段式軽ガス銃を用いて微気圧波の発生と伝播に関する基礎データの収集を行うことを目的とする。また、数値シミュレーションによって実験結果と比較を行い、考察を行う。

2. 研究成果の内容

本研究では、単純形状モデルによるデータ取得を目的として、射出モデルに球体を使用した実験及び数値計算を行った。

超音速で移動する鈍頭物体周りの流れ場の重要な特徴量の一つとして、物体表面から離脱衝撃波までの距離（衝撃波離脱距離）が挙げられ、マッハ数と離脱距離の関係が古くから実験的・数値解析的に調べられている。超音速で移動する物体は大気から抗力を受け、常に減速する。そのため物体周りの流れ場は非定常状態となり、衝撃波離脱距離も時々刻々変化すると考えられる。衝撃波形成には、物体表面の影響が衝撃波面に達するまでの時間遅れがあるため、ある瞬間の速度に対して実際に観測される衝撃波離脱距離は、定常状態での値よりも小さくなることが予想される。特にマッハ数が1に近い遷音速域では減速の影響が大きく現れると予想される。また離脱距離は定常状態ではM1.0で無限大になるが、実際にはM1.0でも有限の値を保ち、亜音速になってもしばらくは衝撃波が観測され、その後部分分散波、あるいは完全分散波へ移行すると考えられる。遷音速域での衝撃波離脱距離に関する研究も報告されているが、減速についてはこれまで考慮されてこなかった。本研究では、この減速の影響に着目し、遷音速域での球体周りの非定常流れを模擬・解析し、実験との比較を行った。

図1に、シミュレーションに使用した計算領域と、計算結果の例として球体周りの圧力分布を示す。計算は2次元軸対称で行い、支配方程式としてEuler方程式を用いた。図2に、横軸に球体の移動速度、縦軸に衝撃波離脱距離を取って実験と計算で得られた結果を比較したグラフを示す。球体の移動速度は、衝撃波離脱距離を測定するために高速度カメラで撮影した画像から得た瞬間的な速度である。離脱距離 δ は、球の直径 D で無次元化した。この図より、実験結果においても、亜音速領域で離脱距離が有限の値になることが確認できる。また、実験結果と計算結果を比較すると、M1.05～M1.1では両者の間に良い一致を得た。M1.0付近では計算結果が実験結果よりも大きい値となった。これは、計算結果よりも実際の現象

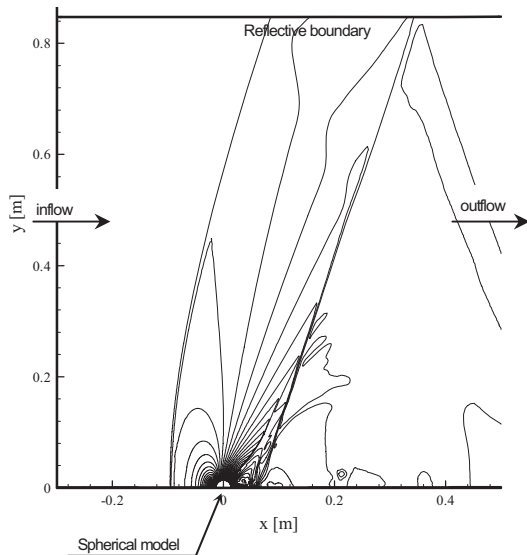


Fig.1 Computational domain

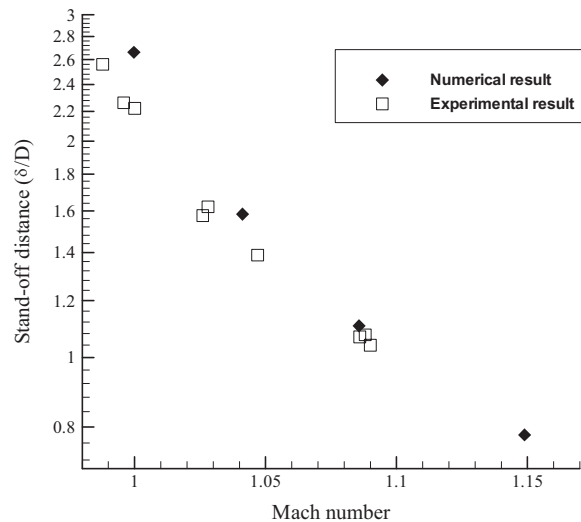


Fig.2 Shock stand-off distance

の方が、より強い減速を受けていることを示す。今回の計算では、圧力による抗力のみを考慮しているが、亜音速領域では、粘性の影響も無視できなくなるため、実験値との差が生じた可能性がある。

3. 研究目標の達成状況

流体科学研究所の二段式軽ガス銃は、亜音速から超音速までの幅広い速度域で飛翔体を射出することのできる国内唯一の実験装置であるが、この装置を用いることによって、過去の研究にはなかった、遷音速域での非定常流に対する考察を行い、弱い衝撃波現象に関する研究を行うための有効な利用技術を蓄積することが出来た。

4. まとめと今後の課題

静粛型超音速機の研究開発に関連し、ソニックブームの発生、伝播並びに減衰過程について研究するため、二段式軽ガス銃を用いた球体周りの流れ場の解析を行った。遷音速域で減速を考慮した場合の衝撃波離脱距離について、実験と計算結果の間に良い一致を得た。今後は、球の遠方での圧力波を測定し、実験と計算で結果を比較する。また軸対称物体など、形状を複雑化させた場合の研究を行う予定である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] K. Hatanaka, T. Saito, H. Yamashita, T. Ogawa, S. Obayashi and K. Takayama: Computations of Unsteady Flow Field around an Accelerating Sphere in the Transonic Flow Velocity Region, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 6-7.

*[2] 畠中和明, 廣田光智, 齋藤務, 山下博, 小川俊弘, 大林茂, 高山和喜: 遷音速域で減速する球体周りの非定常流れ場に関する数値解析, 平成 21 年度衝撃波シンポジウム, 埼玉大学, (2010), pp. 343-344.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J09010
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	2009.4~2010.3

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

柴田 宗一*†, 船本 健一**††

伊藤 久雄*, 植田 信策*, 早瀬 敏幸**, 山家 智之***,

*宮城県立循環器・呼吸器病センター 循環器科, **東北大学流体科学研究所

***東北大学加齢医学研究所

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

左心房内に形成される渦流の臨床的意義を明らかにする.

2. 研究成果の内容

(1) 第 12 回日本栓子検出と治療学会 2009 年 10 月 10 日 大阪

一般演題 『MRI 計測に基づく数値シミュレーションを用いた左心房内壁せん断応力の検討』

左心房の他の領域に比べて, 左心耳の壁せん断応力は全心周期において低いことがシミュレーション結果より示された (図 1). これは, 左心房内血栓の 90%が左心耳内で形成される原因を説明する上で重要な手がかりとなる可能性があった.

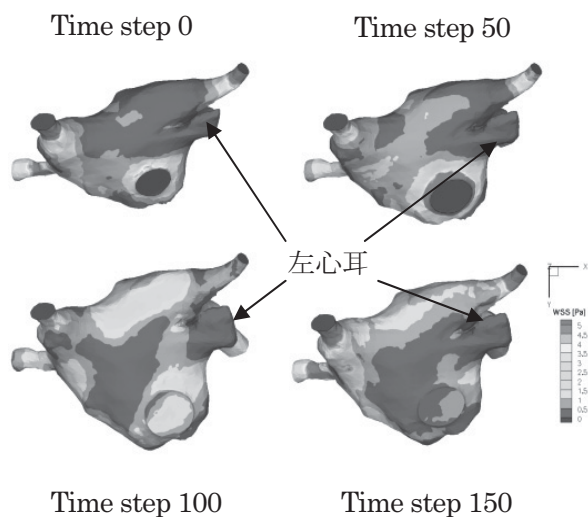


図 1 : 左心房における壁せん断応力の経時的変化

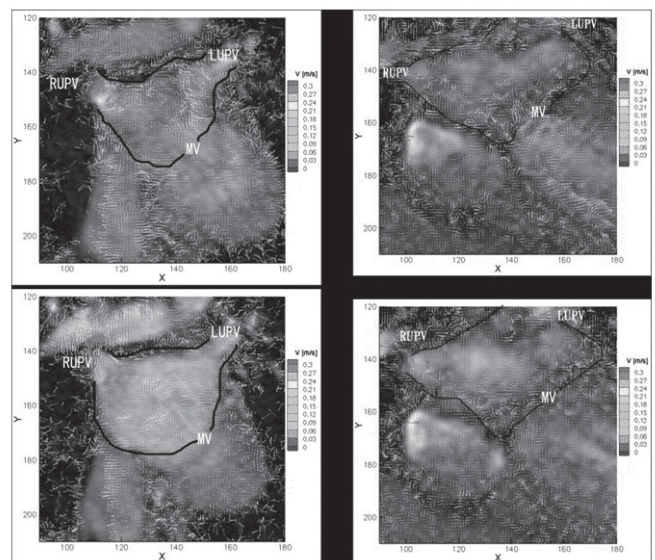


図 2 : 正常例と心房粗細動例での左心房内における渦形成の比較

(2) 第 74 回日本循環器学会学術集会 2010 年 3 月 7 日 京都

一般演題 『Left Atrial Vortices』 心房粗細動の患者では, 正常心と比較して左心房内における渦形成に差があることが観察された (図 2).

3. 研究目標の達成状況

(1)心疾患患者と健常者における渦流形成の違いを明らかにできる。

心房粗細動の1症例について、その差異を報告した。当初の目標は達成したと考える。

また最近の症例では、長期間心房細動であったが、電気的除細動により洞調律へ復した患者でも左心房内の渦形成に違いを認めており、今後症例を積み重ね報告予定としている。

(2)渦流形成に差異がある場合、その要因について言及できる可能性がある。

シミュレーション結果から正常心の場合、肺静脈・左心房・僧帽弁の解剖学的な位置関係が渦の発生に関与していると考えられた。左心房に開口する右上肺静脈は他の肺静脈よりも僧帽弁に対し直上に位置するため、容量の多い右肺からの血流は、僧帽弁開放時に重力を利用して左室へ流れ込むことができ、僧帽弁閉鎖時には、左肺静脈からの流れが斜めに合流することによって渦を巻きながら、次の僧帽弁開放時まで運動量を保つことができると推定された。一方で左心房内渦流が異なる心房粗細動患者では、左心房拡大と僧帽弁逆流が観察されており、左心房の構造的な変化と、弁膜症に伴う血流動態の変化が渦流形成変化の要因として考えられた。よって当初の目標は達成したと考える。今後は様々な症例での観察を積み重ねて、シミュレーションと併せた検証を行っていく予定である。

4. まとめと今後の課題

全ての左心房内渦流が同一ではなく、左心房拡大および僧帽弁逆流を伴う心房粗細動患者においては、正常とは異なる渦形成があることを確認した。左心房の構造的な変化と、弁膜症に伴う血流動態の変化が渦流形成変化の要因として考えられた。最近の症例では、長期間心房細動であったが、電気的除細動により洞調律へ復した患者でも左心房内の渦形成に違いを認めており、渦形成変化の原因についても症例を積み重ね検討を行う予定である。

一方で、左心房内で形成される渦流は左房壁面に近いほど速くなるため、左心房壁を wash out する効果も併せ持ち、左心房内での血栓形成を抑制する効果があると考えられる。しかし左心房本体から突出した左心耳は血流のメインストリームから外れているために、血流による壁せん断応力は低く、能動的に収縮する際には血栓形成しにくい。心房細動時には効果的な心房収縮が行われず血栓形成リスクが高まると考えられた。左心房における左心耳の存在理由についてもシミュレーションを通して考えていくこととしている。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] M. Shibata, H. Ito, T. Yambe, R. Koizumi, K. Funamoto and T. Hayase: Atrial Vortex, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.64-65.

[2] 柴田宗一, 山家智之, 小泉遼, 船本健一: MRI 計測に基づく数値シミュレーションを用いた左心房内壁せん断応力の検討, 第 12 回日本栓子検出と治療学会, 大阪, (2009)

[3] 柴田宗一, 菊田寿, 住吉忠剛, 渡邊誠, 三引義明, 大沢上: Left Atrial Vortices, 第 74 回日本循環器学会学術集会, 京都, (2010)

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J09011
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.4~2010.3

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

圓山 重直*†, Vaillon Rodolphe**††, 小宮 敦樹*

*東北大学流体科学研究所, **INSA Lyon UCBL

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、マイクロ粒子群を用いて波長選択性を有する機能性膜を製作し、可視域から近赤外領域に至るふく射特性、特に反射特性に関する実験的・解析的知見を得ることを目的とする。共同研究先および当研究室が有するそれぞれのふく射解析コードで、マイクロ粒子群が存在する薄膜の反射特性を評価し、赤外分光光度計等を用いて特性を評価する。

2. 研究成果の内容

フランス側と流体研側が各々で既有着している高精度ふく射解析コードを用いて、TiO₂ ナノ粒子群を含んだ薄膜コーティング剤の反射特性を評価した。評価パラメータとしては、薄膜厚、粒径分布、粒子数で行った。建設用高機能断熱塗料への応用を目的としているため、可視領域においても「色評価」を実施することにより、景観の観点からの反射率を定量的に評価した。また断熱という観点からは、近赤外領域での反射率を増加させるふく射特性を有した評価パラメータの決定を行った。実験的アプローチも実行し、薄膜生成器を用いて等膜厚のサンプルを作成し、反射特性を評価した。図1に示すように、波長領域は200-2500nmの範囲で評価を行い、可視・近赤外領域の両方を評価した。

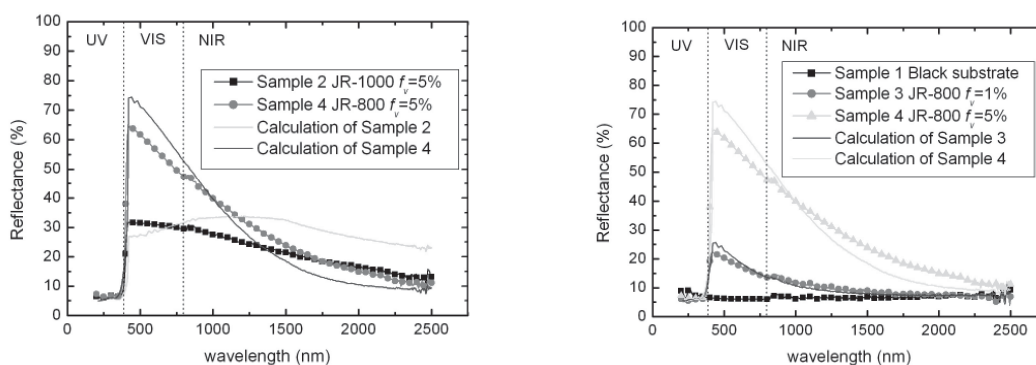


Fig. 1 : The diffuse reflectivity of TiO₂ coating

3. 研究目標の達成状況

流体研側で実施した解析結果では、粒子径が数十 μm オーダーでも予想している傾向が確認されており、これは工業的に安価で生産が可能な粒子径である。本共同研究ではここからナノスケールにまで解析を展開し、より詳細な解析および実験データの取得を行ってきた。実験及び解析結果より、本年度はハイパフォーマンスの低反射高断熱機能を有した膜の製作を試作することができ、達成度としては100%と位置付けることができる。

4. まとめと今後の課題

「研究目標の達成状況」欄に記載したように、解析および実験データより、波長選択性を有した機能膜の生成が可能となった。しかしながら、最適粒径として計算されたナノ粒子は工業的には製作が困難であり、コストの面で問題となる。今後は解析におけるパラメータを増やし、コストの面も考慮したハイパフォーマンス機能膜の生成を行う。同時にナノ粒子を TiO_2 のみに限定せず、多くの粒子について検討も行っていく。

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] S. Maruyama : Scale Effect in Heat and Fluid Flow and Nano-and Micro-Machines, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.4-1 (2009), pp.109-121.

*[2] M. Baneshi, S. Maruyama, A. Komiya : Infrared Radiative Properties of Thin Polyethylene Coating Pigmented with Titanium Dioxide Particles, *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, Vol.132 (2010), pp.023306.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[3] 江目宏樹, 円山重直, M. Baneshi, 小宮敦樹 : 波長選択性を有したナノ粒子群機能膜のふく射特性に関する研究, 第9回日本伝熱学会学生発表会, 仙台, (2009), pp.15-16.

[4] M. Baneshi, S. Maruyama and A. Komiya : Comparison of Spectral Radiative Properties of Different Titanium Dioxide Powders in Absorbing Host Medium, *The 46th National Heat Transfer Symposium of Japan*, Kyoto, (2009), pp.79-80.

[5] 江目宏樹, M. Baneshi, 円山重直, 小宮敦樹 : ナノ粒子群を用いた機能膜のふく射特性, 第30回日本熱物性シンポジウム, 米沢, (2009), pp.61-63.

[6] M. Baneshi, S. Maruyama and A. Komiya : The Investigation into the Effect of Using Different Nano-micro Metallic Powders on Sunlight Reflectivity of Pigmented Coatings, *The Sixth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2009), pp.214-215.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(特許) 該当なし

(受賞)

[1] 学生ベストプレゼンテーション賞, ナノ粒子群を用いた機能膜のふく射特性, 江目宏樹, 2009年10月29日, 日本熱物性学会

[2] Best Award of 6th ICFD(International Conference on Flow Dynamics), The Investigation into the Effect of Using Different Nano-micro Metallic Powders on Sunlight Reflectivity of Pigmented Coatings, Mehdi Baneshi, 2009年11月5日, ICFD2009

(マスコミ発表) 該当なし

課題番号	J09012
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.4~2010.3

離散方位ふく射要素法を用いたふく射・対流複合伝熱解析
Radiative and Convective Heat Transfer Analysis by REM2

圓山 重直*†, 櫻井 篤**††, 小宮 敦樹*

*東北大学流体科学研究所, **新潟大学工学部

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、離散方位ふく射要素法を用いて、ふく射および対流を考慮した非定常温度場の伝熱解析を行う。炉内や燃焼場などのふく射の影響が無視できない高温場における複合伝熱解析を行い、複雑な熱輸送と考えられる複合伝熱形態の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

共同研究者らがこれまでに開発してきた離散方位ふく射要素法を改良利用し、対流伝熱解析コードと併せることで高温場におけるふく射・対流複合伝熱解析を行った。流体研のスーパーコンピュータを使用し、計算条件をパラメトリックに変えた計算を流体研側で行い、その計算結果をもって、複合伝熱形態の評価を行った。具体的には、流れ場において全三次元空間を考慮したふく射伝熱解析を行い、乱流伝熱とふく射伝熱の相互作用 (Turbulence/Radiation Interaction (TRI)) について検証を行った。三次元チャンネル乱流の Direct Numerical Simulation (DNS) によって乱流変動を厳密に扱い、かつ全三次元空間のふく射エネルギー伝播を解くことによって現象の評価を行った。研究の第一ステップとして、まず化学反応を伴わないチャンネル乱流を扱い、相互作用による効果を考慮した場合としない場合とで、どのような違いがあるのかを明らかにした。その結果、図1に示すような乱流場におけるふく射伝熱の影響度を定量的に評価した。

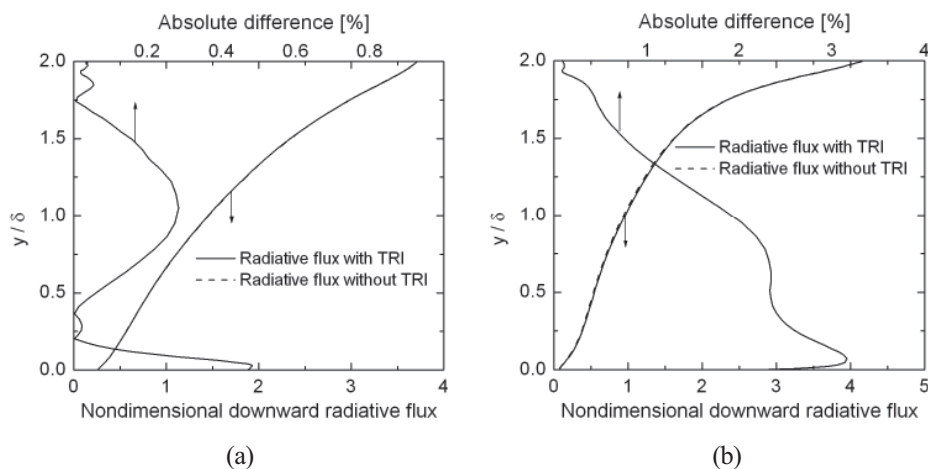


図1 : Nondimensional downward radiative flux and absolute difference
(a) Partial Pressure of $H_2O=0.1$, (b) Partial Pressure of $H_2O=0.5$

3. 研究目標の達成状況

高温場等で顕著にみられる対流による伝熱形態に、ふく射の影響がどのように及ぼすかが、本年度の研究成果として得られた。実用上の問題として化学反応の無い流れ場においては、ふく射エネルギーの乱流変動を厳密に扱うことにはあまり注力する必要は無いと言える。むしろ、ふく射性ガスの非灰色性を無視することの方が数値予測をする上で問題となる可能性が高いことが明らかとなった。これにより高温炉の設計等の工業的な知見を多く得ることができると考えられる。研究目標の達成度としては、ふく射伝熱の影響を評価したという点では100%達成できたと言える。

4. まとめと今後の課題

本研究では、流体研のスーパーコンピュータを使用し、計算条件をパラメトリックに変えた計算を行うことでチャンネル乱流における三次元ふく射伝熱解析によるふく射と乱流の相互作用(TRI)効果について基礎的な知見を得た。今後、化学反応を伴うような流れ、及びふく射性ガスの非灰色性を取扱っていく。

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] A. Sakurai, S. Maruyama, K. Matsubara, T. Miura, M. Behnia : An Efficient Method for Radiative Heat Transfer Applied to Turbulent Channel Flow, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.132-2 (2009), pp.023507.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] 高桑賢二, 櫻井篤, 松原幸治, 円山重直 : 浮力乱流 DNS のための簡略化ふく射モデルの検討, 日本伝熱学会北陸信越支部春季セミナー, (2009), pp.1-2.

[3] 高桑賢二, 櫻井篤, 松原幸治, 円山重直 : ふく射を伴う浮力乱流の直接シミュレーション, 第46回日本伝熱シンポジウム, (2009), pp.327-328.

*[4] A. Sakurai, K. Takakuwa, K. Matsubara and S. Maruyama : The Effects of Radiative Heat Transfer in a Turbulent Channel Flow, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.52-53.

[5] 櫻井篤, 高桑賢二, 松原幸治, 円山重直 : チャンネル流れにおける乱流とふく射伝熱の相互作用, 日本伝熱学会北陸信越支部秋季セミナー, (2009), pp.6-7.

[6] 櫻井篤, 松原幸治, 高桑賢二, 円山重直 : チャンネル乱流におけるふく射伝熱に関する研究, 日本機械学会北陸信越支部第47期総会・講演会, (2010), pp.451-452.

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	J09013
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.4~2010.3

大規模環境におけるエネルギー移動評価とその解析
Evaluation and Analysis of Mega-scale Energy Transfer

圓山 重直*†, 山田 昇**††, 小宮 敦樹*

*東北大学流体科学研究所, **長岡技術科学大学機械系

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、メガスケールにおけるふく射伝熱解析を行い、大都市におけるヒートアイランド現象に代表される温暖化現象のシミュレーションを行う。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ことを目的とする。

2. 研究成果の内容

流体科学研究所側では、地球へ到達する太陽放射が雲や霧等により反射・吸収され、地面により再反射されるまでの評価を行った。これに環境科学の観点からのアプローチを行い、共同研究先では温暖化現象のシミュレーションを行った。現在のところ、ふく射に関する国内外における研究では、Modestらのグループ（The Pennsylvania State University）がふく射・乱流複合シミュレーションを先進的に行っており、国内では日立研究所のグループが複合伝熱研究を開始している。ところが、両グループとも単純化されたモデルを用いた計算であり、都市などの大規模なシミュレーションは行っていないのが現状である。本研究では、地球温暖化のこれまでのシミュレーションの中で簡易モデル化されてきた部分をより詳細に評価するために、環境科学に特化したシミュレーションを行い、実用的な計算速度でヒートアイランド或いは地球温暖化現象のシミュレーションを開始することができた。図に計算結果の一例を示す。

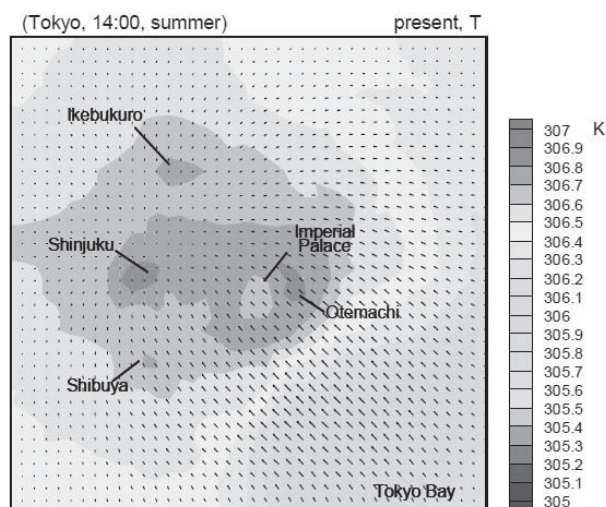


図1 : Result of radiation/convection simulation of urban heat island.

3. 研究目標の達成状況

本研究の目的は、流体科学研究所側が開発した高速ふく射伝熱解析コードREM2と、長岡技術科学大学側が保有する大気解析コードとの融合を図り、世界的に最も厳密なヒートアイランド或いは地球温暖化の数値シミュレーションコードを作成することにある。本年度はコードの開発を行い、温暖化現象の精緻なシミュレーション結果を得ることができた。コードの開発および評価を行うことができたという点では、100%の達成度と言える。

4. まとめと今後の課題

高速ふく射伝熱解析コードと大気解析コードとの融合を図り、ヒートアイランド・地球温暖化の高精度数値シミュレーションコードを作成した。今後は、本シミュレーションコードをより一層精査し、信頼性の検証、計算速度の向上、超長期シミュレーションなどの大規模化を進めていく。また、本シミュレーションを活用し、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。

5. 研究成果（*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] 山田昇, 徳原真弥, 円山重直 : ふく射性ガスの吸収および放射を考慮した路面から人体スケール物体へのふく射伝熱解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No.150 (2009), pp.9-17.

*[2] N. Yamada, Y. Hasegawa and S. Maruyama : Effect of Gas Radiation on Radiative Heat Transfer in Urban Street Canyon Model, *Heat Transfer-Asian Research*, vol.38 (2009), pp.464-474.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[3] N. Yamada, A. Sakurai, A. Komiya and S. Maruyama : Energy Transfer Simulation and Analysis on Mega-scale Environment, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.56-57.

3) その他（特許、受賞、マスコミ発表等）

（特許）該当なし

（受賞）該当なし

（マスコミ発表）該当なし

課題番号	J09014
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.4~2010.3

複雑媒体における非フーリエ伝熱解析

Non-Fourier Heat Transfer in Complex Materials

圓山 重直*†, Mishra Subhash Chandra**††, 小宮 敦樹*

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

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、生体組織に代表される非等方性媒体中の熱移動について、非フーリエ伝熱解析を行うものとする。実験的に得られている生体皮下組織での非定常温度分布を非フーリエ方程式による解析解と比較することにより、複雑系媒質内における伝熱形態を把握することを目的とする。

2. 研究成果の内容

所外共同研究者が有している非フーリエ伝熱解析手法を用いて、生体組織の温熱・冷却過程における非定常熱伝導評価を行うために、流体研側研究者が有している光線放射モデルによるふく射要素法 (REM2) とのカップリングを行い、コードの評価を行った。具体的には Lattice Boltzmann 法(LBM) を用い、有限体積法 (FVM) での結果と比較することで妥当性を評価した。一次元伝熱過程の比較結果の一例を図 1 に示す。また、流体科学研究所において疑似生体組織を用いた実験的研究を行い、複雑媒体内での非定常温度場計測実験を実施した。

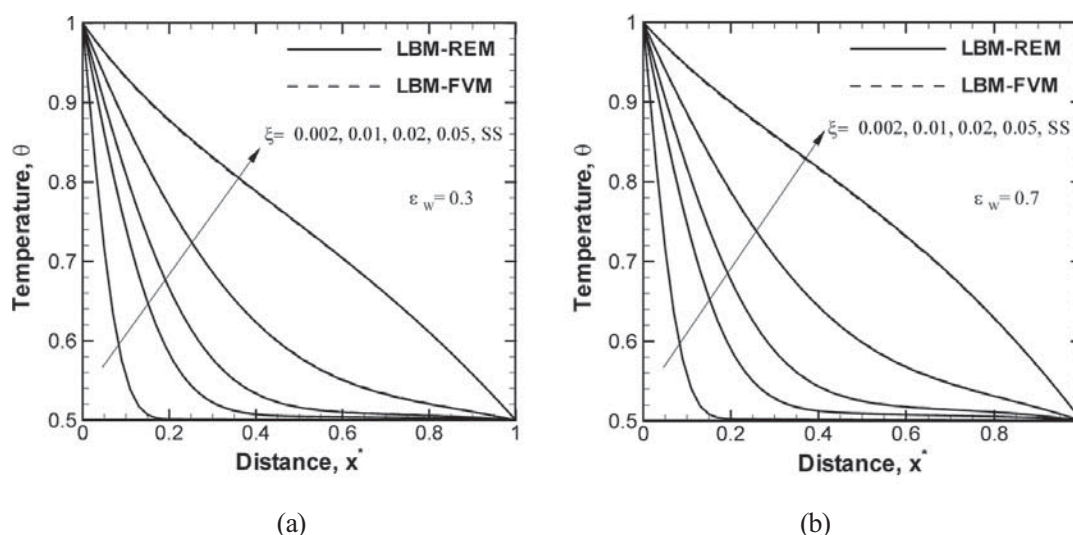


図 1 : Comparison of distributions of dimensionless temperature at different instants for emissivity of the hot boundary. (a) $\varepsilon = 0.3$, (b) $\varepsilon = 0.7$

3. 研究目標の達成状況

非等方性複雑媒質内の非定常温度分布が Lattice Boltzmann 法と光線放射モデルによるふく射要素法のカップリングコードで評価可能となることを示した。これにより高速演算で、皮膚等の複雑媒質内伝熱過程をシミュレーションすることができ、医療分野における多くの温熱・冷却治療に大きな貢献をもたらすことができると考えられる。特に、温度変化が大きい皮膚表層付近では特異な温度分布が見受けられることから、レーザー治療等における新たな治療法の提案が期待できる。本年度の成果としては目標の 100%が達成できたと言える。

4. まとめと今後の課題

光線放射モデルによるふく射要素法と Lattice Boltzmann 法のカップリングコードを開発し、その評価を行った。有限体積法での結果と比較することでコードの妥当性を評価し、高速演算で、皮膚等の複雑媒質内伝熱過程をシミュレーションすることができるようになった。今後は、実際の臨床における施術手順に則った温度境界条件を与え、皮膚等複雑媒体内の非定常温度分布をより詳細に評価していく。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

*[1] A. Sakurai, S. C. Mishra and S. Maruyama : Radiation Element Method Coupled with the Lattice Boltzmann Method Applied to the Analysis of Transient Conduction and Radiation Heat Transfer Problem with Heat Generation in a Participating Medium, *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol.57-5 (2010), pp.346-368.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] A. Sakurai, S.C. Mishra and S. Maruyama : Analysis of transient conduction and radiation heat transfer with heat generation using the lattice Boltzmann method and the radiation element method, *9th ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference*, Bombay, (2010).

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	J09015
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	2009.4～2010.3

サイレント超音速機の低速飛行特性に関する研究
 Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of
 a Silent Supersonic Aircraft in Low Speed Flight

川添 博光*†, 大林 茂**††

*鳥取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

超音速飛行する航空機といえども、離着陸時の低速飛行は避けられない。一方、航空機の事故の多くは静かな成層圏飛行時に比べ、この離着陸時に発生している。これは低速飛行という特殊な飛行状況のみならず、地表近傍における横風や突風、さらには先行する大型航空機による大気不安定などが原因となる。そこで本研究は、サイレント超音速航空機の低速飛行特性を明らかにすることを目的とした。

2. 研究成果の内容

サイレント超音速機の主翼として提案されているブーゼマン複葉翼に関して、後流計測を中心に、形状抵抗・誘導抵抗の算出/可視化を行い、翼平面形の違いによる定性・定量的議論を行った。同時に、翼端効果、翼平面形の違いによる剥離等の定性的議論の補足として、オイルフローによる可視化試験を行った。その結果、それぞれの翼において迎角を変更することによる翼端渦の干渉形態が明らかとなり、また翼端渦の干渉パターンが翼端側の流れの剥離に影響を与えている可能性が示された。これまでの研究において、空力特性に対し翼平面形のテーパがあたえる影響は限定的であることが指摘されてきたが、この要因としてサイレント超音速機の主翼テーパ比においては上記翼端渦の効果があまり大きくないためであることが挙げられた。

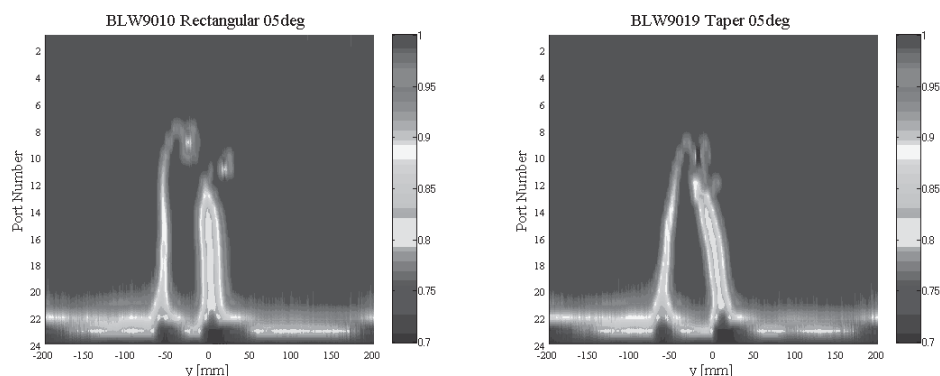


図1：複葉翼後流の正規化動圧分布 (U=30m/s, AoA=5deg) 左: 矩形翼, 右: テーパ翼

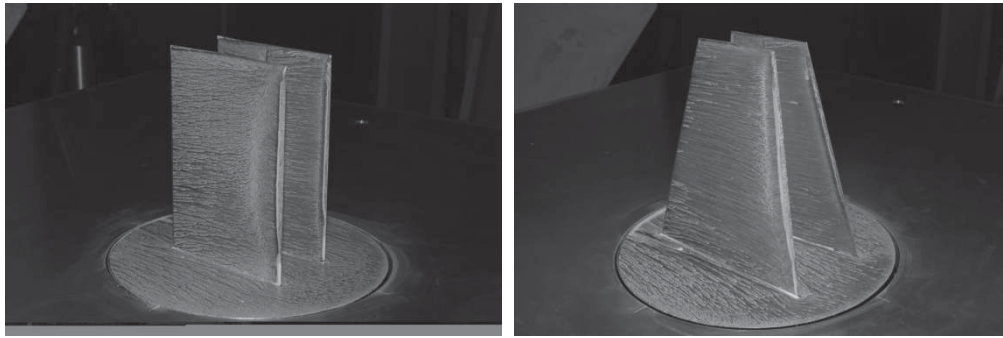


図2：オイルフローパターン（ $U=30\text{m/s}$, $AoA=5\text{deg}$ ）左：矩形翼，右：テーパ翼

3. 研究目標の達成状況

東北大学が提案する三次元形状をしたサイレント超音速機の空力特性の実験的解析に関しては、本実験及び同時に行われた研究申請者の研究により基本的な性能予測資料を得ることができたと考えており、達成度は目標に対し70%程度であると考えている。

また、ロボットを使ったサイレント超音速機の動的性能計測試験については、風洞に設置しての実験実証および基礎的性能取得には成功したものの、得られたデータの解析やトラブルシューティング等不完全な部分も多く、現時点での達成状況は30%程度と考えられる。

4. まとめと今後の課題

本共同研究はこれまで進めてきたサイレント超音速機の低速性能評価試験の一部として、三次元模型を対象とした実験を行い、実機に提案されている主翼の低速空力特性について基礎的な知見を得ることに成功した。今後の課題としてはロボットを使ったサイレント超音速機の動的性能計測試験が挙げられるが、申請時に付記したとおり、本テーマについては一年での完成を見込んでいない。本年度の成果・知見を元に今後共同研究を推進することにより、目標とするデータの取得・特性解析が可能になるものと期待している。

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

*[1] 尾崎修一，小川俊広，大林茂，松野隆，川添博光：低速における超音速複葉翼の3次元空力性能評価，日本航空宇宙学会論文集，Vol. 57, No. 671, (2009), pp. 461-467.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] H. Kawazoe, T. Matsuno, S. Obayashi, S. Jeong: Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of a Silent Supersonic Aircraft in Low Speed Flight, *Proceedings of The 9th International Symposium on Advanced Flow Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 32-33.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

Project code	J09016
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2009 ~ March 2010

Investigation of Supersonic Hybrid-stabilized Argon-water Arc for Biomass Gasification

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

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

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Integrated parametric study of hybrid-stabilized argon-water electric arc under subsonic and supersonic regimes; numerical investigation of characteristics and processes in the hybrid arc especially at high currents and argon mass flow rates with supersonic plasma flow regimes; and a detailed comparison of the calculated results with experiments.

2. Details of program implement

Two basic improvements in the existing numerical model have been adopted:

- 1) transport and thermodynamic properties for argon-water plasma mixture are calculated rigorously from the kinetic theory as a function temperature and pressure,
- 2) radiation from the arc is dependent on temperature and pressure, radiation transitions of H₂O molecule are considered.

Calculations have been carried out for the currents 300, 400, 500 and 600 A. Argon mass flow rate was varied in agreement with experiments from 22.5 slm (standard liters per minute) to 40 slm.

3. Achievements

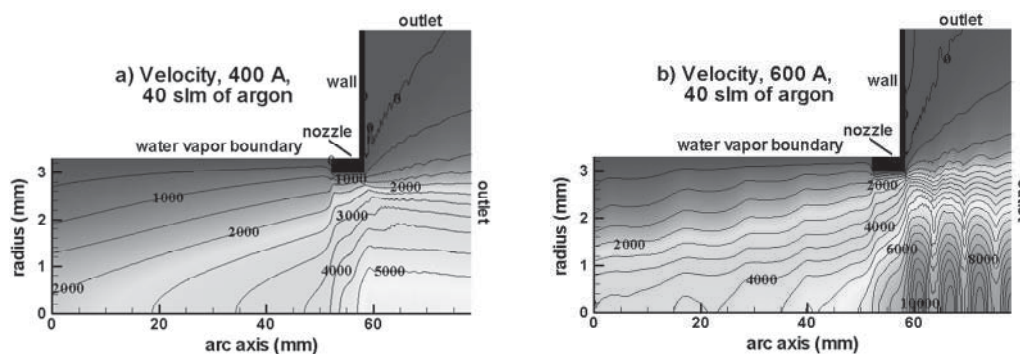


Figure 1: Velocity contours ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) for (a) 400 A and (b) 600 A discharges, partial characteristics model. The transonic flow field for 400 A converts to a supersonic flow structure with clearly distinguished shock diamonds at the outlet for 600 A. Contour increment is $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

The main goals of the project have been successfully completed:

- 1) It was proved that plasma flow in the near-outlet region of the hybrid arc is supersonic for currents higher than 500 A with argon mass flow rate higher or equal to 27.5 slm. The maximum velocity $10\ 100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and the Mach number 1.6 occurs for 600 A and 40 slm of argon.

2) The partial characteristics radiation model gives slightly lower temperatures but higher outlet velocities than the net emission model. The reabsorption of radiation ranges between 31-45%.

3) Comparison with available experimental data carried out at IPP AS CR, v.v.i., for broad range of currents and argon mass flow rates proved very good agreement for temperature profiles and good agreement for velocity profiles 2 mm downstream of the nozzle exit.

4. Summaries and future plans

The present numerical model built up in the framework of the current project enabled to clarify flow structure and temperature field in the near-outlet region of the hybrid arc. The existence of subsonic, transonic and supersonic flow regimes was proved for the range of operational parameters studied in this research. The supersonic structure with shock diamonds occurs in the central parts of the discharge at the outlet region. Calculated and experimental radial temperature and velocity profiles at the nozzle outlet exhibit very good agreement for all flow regimes. The existence of the supersonic flow regime was also confirmed experimentally through evaluation of the Mach number from measured data.

Future plans include:

1) Further clarification of differences in output plasma parameters under the net emission and partial characteristics radiation models for turbulent and laminar flow regimes.

2) Investigation of mixing of plasma species within the hybrid arc discharge using the binary diffusion coefficients method, i.e. further extension of the existing numerical model for species equations and diffusion terms, and obtaining results and comparison with available experiments.

5. Research results (* reprint included)

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

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

[1] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlová, V. Aubrecht, P. Křenek, M. Hrabovský, T. Kavka, V. Sember, and A. Mašláni: Integrated parametric study of hybrid-stabilized argon-water arc under, subsonic and supersonic regimes, *Proceedings of the 19th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC 2009)*, Bochum, Germany, (2009), 4 pages (on CD-ROM).

*[2] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, and M. Hrabovsky: Modelling of Supersonic and Turbulent Hybrid Arc for Biomass Gasification, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 40-41.

[3] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlova, V. Aubrecht, P. Křenek, M. Hrabovsky, T. Kavka, V. Sember, and A. Maslani: Integrated Parametric Study of Hybrid-Stabilized Argon-Water Arc under Subsonic and Supersonic Regimes, *Proceedings of the Sixth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2009), pp. 156-157.

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

Project code	J09017
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	June 2009 ~ July 2009

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

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

*Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Science,

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The project aims at understanding the spreading and receding dynamics of molten liquid drops onto rough target substrates comprising micron sized asperities under the presence of liquid solidification.

2. Details of program implement

The experiments of molten tin droplet impacts were carried out inside a closed chamber filled with argon gas. Droplets of molten tin were generated using a stainless steel container comprising an orifice. The container was partly filled with tin pellets and was heated using by a ring heater element. The container was kept at a temperature well beyond the melting point of tin using a heat controller unit. The high-speed camera system along with a high intensity light source in backlighting mode was used to capture the spreading and receding dynamics of the impacting droplet. For a given impacting droplet conditions, the image recordings of droplet impact on the grooved surfaces were obtained independently by viewing the droplet spreading perpendicular and parallel to the groove direction. The solid surfaces patterned with unidirectional grooves were fabricated via chemical based etching process. The base material was mirror polished stainless steel. An optical based surface profilometer was used to characterize the surface topography of the groove texture. The geometrical parameters of the grooved surfaces are given in Table 1.

Table 1. Geometrical details of the grooved surfaces

Surfaces	Groove depth, h (μm)	Groove width, w (μm)	Pillar width, b (μm)
<i>GR1</i>	53	231	17
<i>GR2</i>	53	236	65
<i>GR3</i>	77	251	49

Figure 1 shows three image sequences illustrating the impact of molten tin droplets with $We = 44.9$ on different substrates. The time lapse, t from the start of impact is increasing from the left to right and is almost identical between any two image sequences. The top most image sequence corresponds to the impact dynamics on the smooth stainless steel surface. The second and third image sequences correspond to the dynamics on the grooved surfaces *GR1* and *GR2*

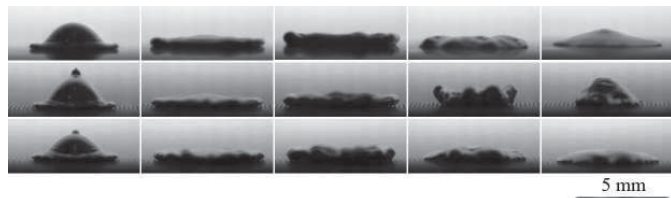


Figure 1 : The impact of molten tin droplets with $We = 44.9$ on the grooved surfaces *GR1* (second row) and *GR2* (third row). The first correspond the impact case on the smooth surface.

respectively. The droplet spreads during the early stages of impact process, reaches a maximum and then recedes.

Figure 2 shows the temporal variation of impacting droplet contact diameter, D obtained from the digital images. The impacting droplet reaches the maximum spreading diameter at almost comparable time levels however drastic changes are seen in terms of solidification process. The solidification of the impacting droplet on the grooved surfaces occurs at a slower rate compared to that on the smooth surface. Similar trends are observed for the droplet spreading along the direction parallel to the groove direction except that a lesser intense receding is seen compared to that in the direction perpendicular to the groove direction. The free edge of the impacting droplet solidified on the grooved surface *GA1* at 20.4 msec from the start of impact process which is much larger compared to that (5.8 msec) on the smooth surface.

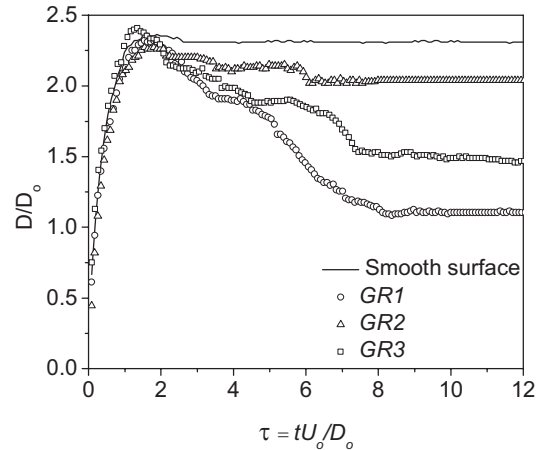


Figure 2 : Temporal variation of D measured in the direction perpendicular to the groove direction during the impact of molten tin droplets with $U_0 = 1.29$ m/sec on the grooved surfaces.

3. Achievements

The temporal variation on the spreading and receding diameter of impacting drops with solidification is obtained for the impact of molten tin drops on grooved surfaces kept at ambient temperature.

Microscopic contact angle dynamics of molten liquid with solidification – Experiments need to be conducted with higher surface temperatures.

4. Summaries and future plans

The impact process of molten tin droplets on the stainless steel surface comprising micro grooves is presented. The grooved surface *GR1* exhibits a low solid fraction which results in a reduced contact between the substrate and the impacting tin droplet. This explains the behavior of poor droplet solidification on *GR1*. A detailed experimental study on the impact of tin droplets with varying surface temperature will be carried out. This study would provide measurements to understand the contact angle dynamics of molten tin drops on the grooved surfaces.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] D. Sivakumar, K. Katagiri, T. Nakajima, H. Takana, and H. Nishiyama: Impact and Solidification of Molten Metal Droplets on Stainless Steel Surfaces Patterned with Unidirectional Parallel Microgrooves, *Proc. Ninth Int. Symp. on AFI/TFI*, Sendai, (2009), pp. 74-75.

[2] D. Sivakumar, K. Katagiri, T. Nakajima, H. Takana, and H. Nishiyama: Impact of Low Weber Number Molten Tin Droplets on Solid Surfaces Comprising Microgrooves, *Proc. Sixth Int. Conf. on Flow Dynamics*, Sendai, (2009), pp. 130-131.

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

課題番号	J09018
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.4~2010.3

予混合火炎のダイナミクスに及ぼす固有不安定性と放射の複合効果
 Combined Effects of Intrinsic Instability and Radiation on
 the Dynamics of Premixed Flames

門脇 敏*†, 小林 秀昭**††

*長岡技術科学大学大学院技術経営研究科, **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

燃焼に起因する環境負荷を低減する観点から、メタンや水素を燃料とする予混合燃焼タイプのガスタービンが注目されている。このガスタービンの燃焼現象を制御するためには、高温高圧下における乱流予混合火炎の知識が必要である。高温高圧下の予混合燃焼において、固有不安定性は火炎のダイナミクスの主要因である。そして、火炎の不安定挙動に与える放射の影響は、非常に顕著である。また、固有不安定性と放射は、複合効果として予混合火炎の燃焼速度にも大きな影響を与える。本研究では、それらの複合効果が火炎のダイナミクスと燃焼速度に与える影響を調べ、そのメカニズムを解明することを目的とする。具体的には、計算領域長さを特性波長（火炎セルサイズ）の数倍とした時間発展の数値計算を行う。そして、火炎の不安定挙動と燃焼速度を求め、それらに対する固有不安定性と放射の複合効果、並びに乱れの影響を明らかにする。

2. 研究成果の内容

図1は、ルイス数 $Le = 0.5$ 、放射パラメータ $H = H_m$ 、y 方向計算領域 $L_y = 4\lambda_c$ 、乱れ強さ $u' = 0$ & 1 における燃焼速度の時間履歴を示したものである。いずれの場合も燃焼速度は大きく変動している。これは、固有不安定性と放射の複合効果により、浅いセルと深いセルが合体と分裂を繰り返しているからである。

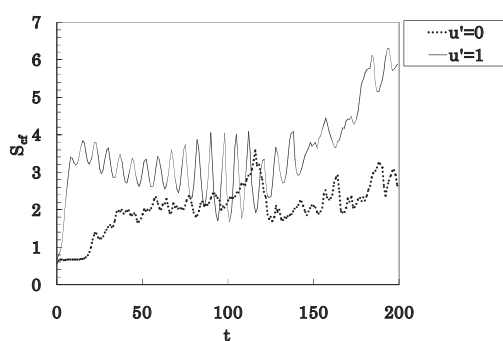


図1：燃焼速度の時間履歴

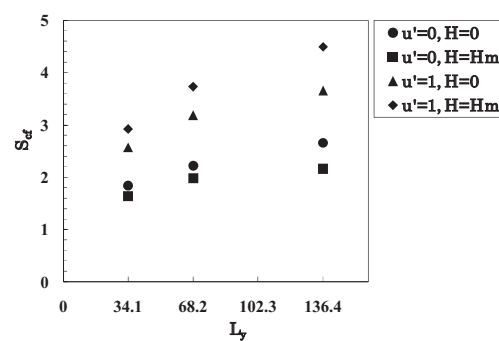


図2：燃焼速度の平均値と計算領域長さとの関係

図2は、燃焼速度の平均値と y 方向の計算領域長さとの関係を示したものである。領域長さの増大と共に、燃焼速度は単調に増加する。これは、火炎の乱れの長波長成分が、そのダイナミクスに重要な役割を演じているからである。また、未燃ガスに乱れが存在することにより、燃焼速度は大きく増加している。放射の影響について注目すると、乱れが存在しない場合、放射により燃焼速度は減少する。一方乱れが存在する場合、燃焼速度は増加する。

上記のように、固有不安定性と放射の複合効果は、非一様速度場を伝播する火炎のダイナミクスと燃焼速度に多大な影響を及ぼしている。

なお、数値計算は、東北大学流体科学研究所の並列コンピューター SGI Altix3700Bx2 を用いて行った。

3. 研究目標の達成状況

本研究により、固有不安定性と放射の複合効果によるダイナミクスと燃焼速度の関連性が明らかになった。従って、予混合火炎のダイナミクスに及ぼす固有不安定性と放射の複合効果に着目した本研究は、十分な成果を得ている。

4. まとめと今後の課題

乱れ場を伝播する予混合火炎の動的挙動に及ぼす放射の影響は、乱流燃焼研究において大きなインパクトがある。今後は、本研究で得られた結果をベースとして、乱流燃焼のモデリングに資することができるか否かを検討する予定である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] Satoshi Kadowaki, Hidekazu Takahashi, and Hideaki Kobayashi: Dynamics of Premixed Flames Propagating in Non-Uniform Velocity Fields: Combined Effects of Intrinsic Instability and Radiation, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 44-45.

*[2] 門脇敏, 高橋秀和, 小林秀昭: 非一様速度場を伝播する予混合火炎のダイナミクス: 固有不安定性と放射の複合効果, 第47回燃焼シンポジウム, 札幌, (2009), pp. 264-265.

[3] 高橋秀和, 小林秀昭, 門脇敏: 非一様速度場を伝播する予混合火炎のダイナミクスに及ぼす固有不安定性と放射の複合効果, 日本機械学会北陸信越支部第47期総会・講演会, 新潟, (2010), pp. 441-442.

[4] Satoshi Kadowaki, Hidekazu Takahashi, and Hideaki Kobayashi: The Effects of Radiation on the Dynamic Behavior of Cellular Premixed Flames Generated by Intrinsic Instability, *The 33rd International Symposium on Combustion*, Beijing, China, August 1-6, 2010.

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	J09019
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2009.4～2010.3

ナノ構造化界面における輸送現象

Transport Phenomena at Nano-structured Interfaces

小原 拓*†, 芝原 正彦**††, 菊川 豪太*

*東北大学流体科学研究所, **大阪大学大学院工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

固液界面における輸送現象は、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課題である。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理解するための概念として、熱抵抗が広く用いられてきた。熱抵抗は固体-固体界面においては良く知られた事実であり、また、近年では固体-液体界面においても様々な研究によりその重要性が認識されつつある。この場合は、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、その分子動力学メカニズムは未だ詳細な検討が行われていない。本研究においては、ナノスケールの構造をもつ固体壁表面-液体間の熱エネルギー輸送を解析するため、(1)やや大きなスケールの構造をもつ界面、(2)分子スケール=結晶格子スケールの構造をもつ界面、の両面からこの問題にアプローチを試みた。(1)では、ナノ加工による溝構造とその間隔が固液界面熱抵抗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)を用いて固液界面熱抵抗を計算するとともに、界面近傍の液体分子の自己拡散係数の変化を調べた。また、ナノ加工面に表面処理を行った場合を想定して、固体原子と液体分子間の相互作用強さが変化した場合の影響についても調べた。(2)では、面心立方格子の固体結晶における各表面が単純液体に接した系についてNEMDを実施し、界面における分子の熱的状态や分子間のエネルギー伝搬を解析し、バルク液体との特性の違いや固体表面の違いが現象に及ぼす影響を明らかにした。

2. 研究成果の内容

(1)ナノ構造化界面 液体分子、壁面および構造物の構成原子には、それぞれ水分子、鉄原子の質量を有する12-6 Lennard-Jones 粒子を仮定し、平行に配置された固体層で液体領域を挟んだ図1(a)に示す計算モデルを用いた。また、液体分子と壁面および表面ナノ構造を構成する原子間の相互作用強さは、Lorentz-Berthelot 則に基づく値を基準として、それぞれ相対値 α_w と α_s で表現した。 α_w と α_s が等しい場合において、構造間隔が固液界面熱抵抗の相対値、界面近傍の熱伝導方向の自己拡散係数へ与える影響をそれぞれ図1(b), (c)に示す。これらの図より、幾何学的表面積比の逆数($1/S^*$)と界面熱抵抗の相対値との差は、界面近傍の自己拡散係数の変化と相関があることが分かる。このような変化は、ナノ構造間隔に依存した表面相互作用と分子運動拘束条件の変化から生じた局所非平衡性の変化に起因すると考えられる。ナノスケールの溝構造ならびにその間隔が、固液界面におけるエネルギー輸送機構に及ぼす影響の解明は今後の課題である。

(2)結晶格子界面 FCC(111)または(110)表面を Lennard-Jones 粒子からなる単純液体に接した系において熱伝導を発生させ、界面近傍における熱エネルギーを保持する分子運動モ

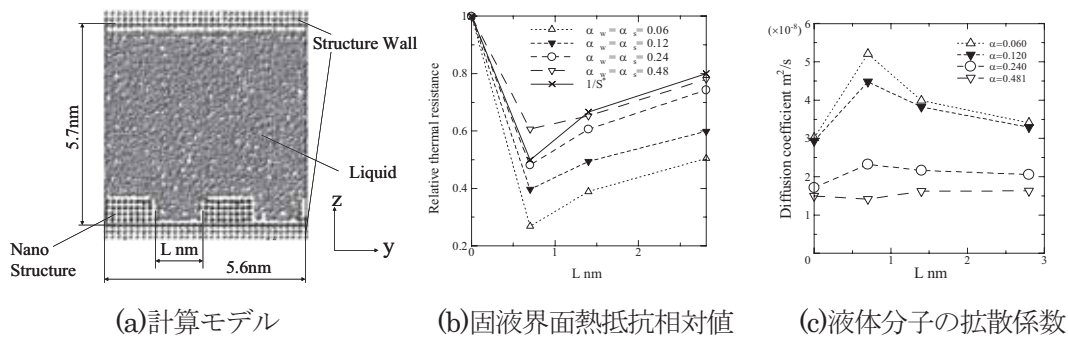


図 1：ナノ加工面計算モデルと解析結果

ードを観察すると共に、熱流束を構成する主な因子である分子間の力学的なエネルギー伝搬を観測した。図 2・図 3 に分子運動の自由度別に表した温度分布と分子間のエネルギー伝搬率を示すが、界面垂直方向の分子運動 (z 成分) によるエネルギー伝搬が卓越し、その他の運動成分によるエネルギー伝搬に対する熱抵抗が大きくなっていることや、その特性 (特に y 成分) が結晶面により異なることなどがわかる。その他、(1)における自己拡散の解析に対応して、結晶表面における分子拡散に対応した自由エネルギー分布の計測を開始した。

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、一定の成果を得た。この結果を進めるべく、鋭意検討中である。

4. まとめと今後の課題

解析対象の2つのスケールの間における輸送メカニズムの遷移が大きな問題であり、同じ解析法による比較検討を行おうとしている。

5. 研究成果 (国際会議, 国内学会)

*[1] T. Ohara, M. Shibahara and G. Kikugawa: Transport Phenomena at Nano-Structured Interfaces, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 82–83.

[2] 竹内他, 壁面ナノ構造物間隔が固液界面熱抵抗へ与える影響, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2009 講演論文集, 2009, pp. 75–76.

[3] 加藤他, 固体表面近傍の水中における物質輸送特性, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol.8, 2009, pp. 99–100.

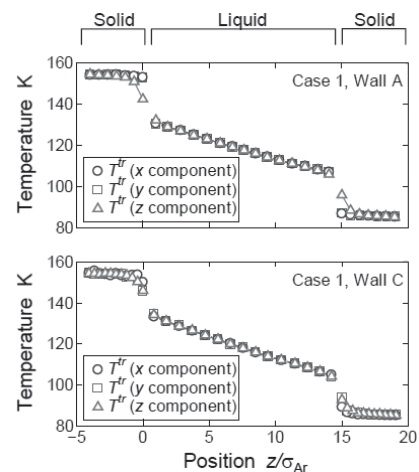


図 2：固体壁—液体—固体壁の系における温度分布。(上) (111)面, (下) (110)面。

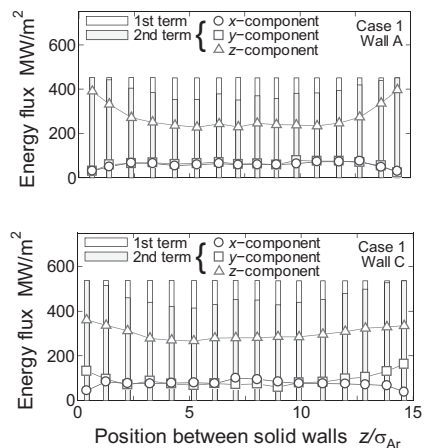


図 3：液体内における熱伝導の輸送機構。“2nd term”は分子間エネルギー伝搬を表す。(上) (111)面, (下) (110)面。

Project code	J09020
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2009 ~ March 2010

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

Sergey Minaev*†, Kaoru Maruta**††

Nakamura Hisashi**, Roman Fursenko*

*Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS,

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Theoretical clarification of reacting wave dynamics in micro channel with controlled temperature profile, which is expected to realize high-exergy-efficiency combustion

2. Details of program implement

Researches directed to development of micro burners, have allowed researchers from IFS Tohoku University to distinguish a key problem of micro combustion – a problem of flame stabilization in the channel with a temperature gradient in the walls. The characteristics of premixed flames in radial and straight micro channels with controlled temperature profile were experimentally and theoretically investigated [1-3]. New regimes of combustion were found and model of flame evolution in micro channels with non-uniform temperature of the walls was developed. The mechanisms of flame patterns formation in fibrous porous media with gas combustion obtained in experiments of Prof. K. Maruta (IFS) were theoretically clarified. The physical model of gas combustion in fibrous porous media was developed and the numerical simulations were performed to model the flame structure (Figure 1.) It was demonstrated advantages of use of radiative burners with regular packing of microchannels as effective heat sources. The results obtained were submitted for publication in scientific journals and they were presented at ICFD, ASPACC and ICDERS conferences as mutual papers.

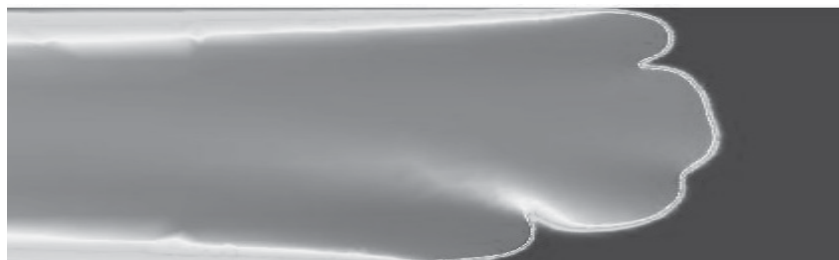


Figure 1. Temperature distribution evaluated for the flame propagating in high porosity (porosity=0.96) microfibrinous (fibers diameter=4 μm) media.

3. Achievements

The interesting phenomenon – flame repetitive ignition and extinction (FREI) was revealed in experiments on gas combustion in micro channel. Numerical simulations of FREI phenomenon have found interesting peculiarity of flame ignition at which the simultaneous formation of two flame fronts (splitting flames) is possible. Later a formation of splitting flames has been found in experiments. The effect of splitting flames can play an essential role at turbulent combustion and can be connected with noise generation by turbulent flame. Experiments and the numerical simulations conducted in IFS Tohoku University, have shown that the micro channel with controllable temperature of walls in which gas burning occurs, can be applied to verification of existing kinetic models of combustion. The investigation of radiation from microchannel with gas combustion demonstrated advantages of use of radiative burners with regular packing of microchannels as effective heat sources.

4. Summaries and future plans

Continuation of theoretical modeling and clarification of mechanism of flame patterns formation in micro channels with controlled temperature profiles. Investigations of radiative heat fluxes from micro channels with gas combustion directed to developments of effective infra red heat sources. These problems will be solved within frame of mutual research that continue developed forms of the existing collaborations between two research teams. We believe that cooperation between two research groups will proceed in the future and will promote development of new non-polluting methods of energy.

5. Research results (* reprint included)

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

- [1] A. Fan, S. Minaev, E. Sereshchenko, R. Fursenko, S. Kumar, W. Liu, and K. Maruta, *Proceedings of Combust.Inst.*, Vol. 32, (2009), pp.3059-3066.
- [2] S. S. Minaev, E. V. Sereshchenko, R. V. Fursenko, A. Fan, and K. Maruta, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 45, (2009), pp.119-125.
- [3] A. Fan, S. S. Minaev, E. V. Sereshchenko, Y. Tsuboi, H. Oshibe, H. Nakamura, and K. Maruta, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol.45, (2009), pp.1-7.
- [4] H. Yang, S. Minaev, E. Geynce, H. Nakamura, and K. Maruta, *Combustion Science and Technology*, Vol.181, (2009), pp. 654- 669.

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

- *[5] S. S. Minaev and K. Maruta, Investigations of Reacting Flow in Micro Channels Directed to Development of Eco-friendly Technologies of Energy Conversion, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.46-47.
- [6] E. Sereshchenko, S. Minaev, R. Fursenko, A. Fan, and K. Maruta, *Proceedings of Seventh Asia-Pacific Conference on Combustion*, Taipei, Taiwan, (2009), p.131.
- [7] R. Fursenko, S. Minaev, and K. Maruta, *Proceedings of the Sixth International Conference on Flow Dynamics (ICFD)*, Sendai, (2009), pp.196-197.
- [8] S. Minaev and R. Fursenko, *Proceedings of ICDERS Conference*, Minsk, (2009), CD-ROM.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J09021
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2009 ~ March 2010

Simulations of Convection-Enhanced Delivery in Rat Brain

Joshua H. Smith*†, Kenichi Funamoto**††

Martin V. Racenis*, Joel Lefever*, Toshiyuki Hayase**

*Department of Mechanical Engineering, Lafayette College, USA

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The delivery of therapeutic drugs into the brain is impeded by the blood-brain barrier, preventing adequate treatment of tumors and other diseases of the central nervous system. Convection-enhanced delivery (CED) was developed as a means to deliver therapeutic agents directly to the brain. It is challenging to measure the resulting convective velocity in vivo, so mathematical models have been developed to simulate CED. The purpose of this project is to develop a model that includes geometric and material nonlinearities, transvascular fluid exchange, and transport of the infused agent. With this model, we plan to simulate infusion in realistic brain geometry and to compare numerical results with experimental infusions conducted in rat brain.

2. Details of program implement

This is a new research collaboration between Professors Smith and Funamoto. During Summer 2009, Prof. Funamoto reconstructed a geometric model of a rat brain from MR images provided by collaborators at Tohoku University Hospital. In July/August 2009, Prof. Smith and Mr. Racenis visited Prof. Funamoto's laboratory for two weeks to begin their initial work on this project. During this visit, a parametric computational mesh with spherical infusion cavity was developed using TrueGrid. Beginning in January 2010, Prof. Smith and Mr. Lefever improved an existing, self-written finite element code for transport in deformable porous media. The code development is ongoing.

3. Achievements

The first main achievement during April 2009 to March 2010 was the construction of the geometric model of rat brain from MR images, as shown in Fig. 1.

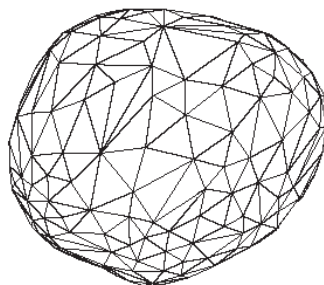


Figure 1. Rat brain geometry reconstructed from MR images.

The second main achievement was the development of an approach using TrueGrid to construct a computational mesh for this rat brain geometry that includes a spherical infusion cavity, as shown in Fig 2.

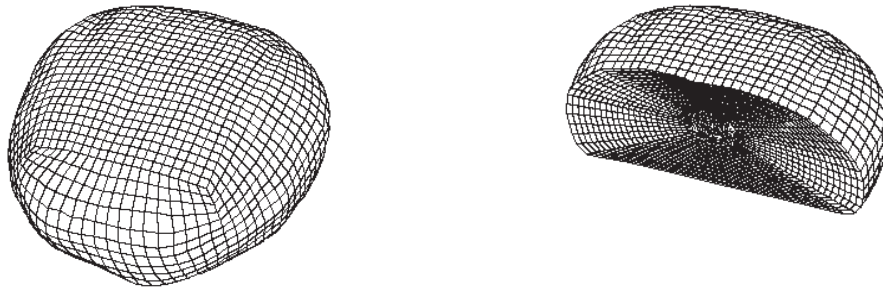


Figure 2. Finite element mesh created for the reconstructed rat brain geometry. The right image shows the more refined mesh around the spherical infusion cavity.

In addition, the existing finite element code had to be modified to be compatible with the mesh produced by TrueGrid.

4. Summaries and future plans

The mathematical model and finite element code development is ongoing. The primary plans for the future are centered on improving our existing linear, finite element code by incorporating geometric and material nonlinearities. At the same time, we will explore the use of publically and commercially-available software programs, such as ABAQUS, FLUENT, and FEBio (University of Utah), that may be suitable for modeling deformation of and transport in biphasic media.

Professors Smith and Funamoto have been awarded an extension of their Collaborative Research Project, and Prof. Smith will visit Prof. Funamoto's laboratory in July 2010 for two weeks.

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] J. H. Smith, K. Funamoto, M. V. Racenis, and T. Hayase: Fundamental Study of Convection-Enhanced Delivery Simulation in Rat Brain, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.70-71.

- 3) Patent, award, press release etc.

(Press release)

Lafayette College Campus News. "Professor Joshua Smith receives grant to research techniques for medication delivery to the brain." July 7, 2009.

Lafayette College Campus News. "Would you like some research with your sushi?" August 27, 2009.

課題番号	J09022
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.4~2010.3

マイクロチャンネル内における物質拡散場の高精度計測に関する研究
A Study of Precise Measurement Method of Diffusion Field in Micro Channel

小宮 敦樹*†, Gary Rosengarten**††

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

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、マイクロチャンネル内における物質拡散現象を実験的に明らかにすることを目的とする。光学干渉計を用いてサブミリスケールの狭チャンネル内での液相内物質輸送現象を可視化し、物質自由拡散現象に対するチャンネル幅の影響を評価する。また、外力が働く環境下での影響も評価する。

2. 研究成果の内容

研究代表者側が既存している干渉計を用いて微小非定常拡散場の可視化を行い、サブミリオオーダーの狭チャンネル内での拡散現象を評価した。チャンネル幅をパラメータとした観察実験を高精度に行うため、流体研側では、現在の解像度である十数マイクロメートルを数マイクロメートルまで技術改良した。実験には、拡散現象が比較的遅く、測定が困難とされているタンパク質を選定し、微小領域での高精度可視化を試みた。また、実験系を周囲環境条件(温度や外力等)が変えられるよう改良し、狭チャンネル内での非定常拡散場の高精度可視化および物質拡散係数の導出を行った。図1に示すように、狭チャンネル内の測定において、周囲環境条件を変えたことによる拡散現象の違いを定性的にとらえることに成功した。また、多成分系の非定常拡散場の高精度計測にも成功している。所外共同研究者側では、マイクロスケール円管内の物質移動現象可視化セルを開発し、定性的な物質移動評価を行った。

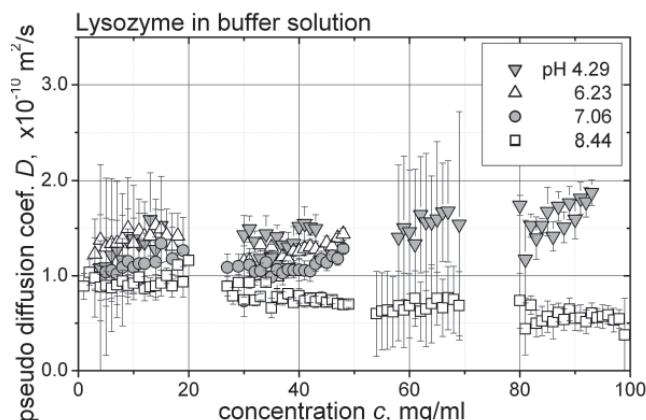


図1 : Concentration and pH value dependencies of the mass diffusion coefficient in case of lysozyme in buffer solution.

3. 研究目標の達成状況

既存の可視化装置を改良利用することで可視化実験を行うことができたことから、初年度としては十分な成果が得られたと位置づけることができる。観察視野のダウンサイジングに伴う解像度の向上などは、狭チャンネル内の高精度可視化において必要不可欠な技術要素である。しかしながら、狭チャンネル幅をパラメータとした実験の展開は、セルの設計上困難であったため、この点に関しては次年度以降に展開を図っていく予定である。全体としては目標に対して90%の達成度とすることができ、次年度に展開でき得る結果を得たと評価できる。

4. まとめと今後の課題

光学干渉計を用いて微小非定常拡散場の可視化を行い、サブミリオーダーの狭チャンネル内での拡散現象を評価した。周囲環境条件を変えたことによる拡散現象の違いを狭チャンネル内においても定性的にとらえることに成功し、可視化装置に十分な改良を施すことができた。並行して、マイクロスケール円管内の物質移動現象可視化セルを開発し、定性的な物質移動評価を行った。今後は開発したマイクロスケールセルを光学干渉計と合わせ、より詳細なマイクロスケール物質移動現象の解明に取り組む。同時にマイクロデバイス内の物質移動現象を取り扱った多くの問題に適用でき得るデータの取得を試みる。

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）

[1] 小宮敦樹, 円山重直, 守谷修一: タンパク質物質拡散現象における広域緩衝液の影響評価, 熱物性, 第24巻1号(2010), pp.15-20.

*[2] A. Komiya, J. F. Torres and S. Maruyama: Measurement of Mass Diffusion Coefficient of Multi-Component System in Aqueous Media by Phase Shifting Interferometer, *Defect and Diffusion Forum*, Vol.297-301 (2010), pp.624-630.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[3] J. F. Torres, 小宮敦樹, 円山重直: 位相シフト干渉計を用いた三成分系非定常拡散場の計測と逆問題による物質拡散係数の導出, 第9回日本伝熱学会学生発表会, 仙台, (2009), pp.17-18.

[4] A. Komiya, J. F. Torres, J. Okajima and S. Maruyama: Measurement of Mass Diffusion Coefficient of Multi-Component Systems in Aqueous Media by Phase Shifting Interferometer, *The 5th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids*, Rome, (2009), p.153.

[5] J. F. Torres, 小宮敦樹, 岡島淳之介, 円山重直: 位相シフト干渉計を用いた多成分系非定常拡散場の計測と逆問題解析による物質拡散係数および濃度比の導出, 第30回日本熱物性シンポジウム, 米沢, (2009), pp.88-90.

[6] A. Komiya, J. F. Torres, J. Okajima and S. Maruyama: Experimental Trial to Determine Mass Diffusion Coefficients in Multi-component System, *The 7th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*, Taiwan, (2009), CD-ROM 066.

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	J09023
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	2009.4~2010.3

低騒音性と高空力性に優れたヘリコプタの最適設計法の開発
 Development of Optimization Design Method for Low Noise
 and High Aerodynamic Performance Helicopter

鄭 信圭^{**†}, 李 管中^{**††}

佐々木 亮^{*}, 李 在元^{**}, 蔡 相賢^{**}

^{*}東北大学流体科学研究所, ^{**}釜山大学工学部

[†]申請者, ^{††}所外対応研究者

1. 研究目的

現在ヘリコプタが抱えている一番大きな問題は運航時に発生する騒音であり、これまでに騒音のメカニズムや低減に関する多くの研究が行われて来た。しかし、これまでのヘリコプタ騒音低減に関する多くの研究は **Parametric Study** に依存しており、高度な最適化による騒音を低減する形状の提案はあまり行われていない。そこで本研究目的は、ヘリコプタ周りで発生する騒音の正確な予測技術の開発と共に高度な最適化技術を適用し、低騒音性と高空力性に優れたヘリコプタブレードを設計することである。

2. 研究成果の内容

本研究では、本研究室で開発したクリギング近似モデルと多目的遺伝的アルゴリズムを利用する設計探索手法と釜山大学で開発したヘリコプタのブレード周りの流れ場を計算するCFD ソルバを用い、流体科学研究所未来流体情報創造センター次世代融合研究システム上で、High Speed Impulsive (HSI) ノイズ、ブレードロード (推力, C_T/σ), 振りモーメント (C_{MT}) の同時最適化を行った。その結果、図1に示すよう、ベースとして用いたブレード形状に比べ、すべての性能 (HSI, C_T/σ , C_{MT}) に関して大きな性能改善が見られている。

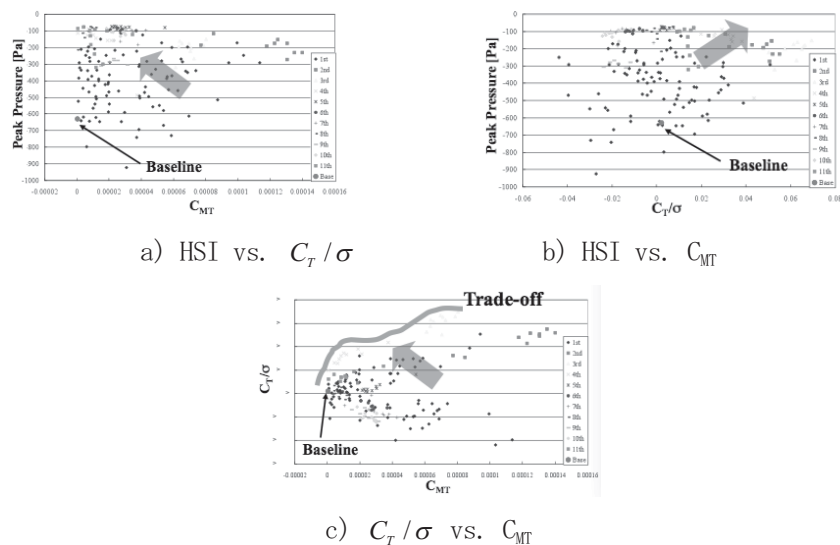


図1：設計探索で得られたベレード形状の性能の比較

なお、性能関数を支配する設計変数や形状特徴を調べるために分散分析法と自己組織化マップを用いたデータマイニングからはHSI ノイズの低減には短いブレード翼端が有効であること、 C_T/σ の向上には有効キャンバが大きいまたは振りが大きいブレードが有効であること、さらに、 C_M の改善には振りがないブレードが有効であることが分かった。

3. 研究目標の達成状況

HSI ノイズおよび空力性能に関して大幅の改善が得られたこと、さらに、ブレード性能と設計変数の関連性を明らかにすることができたことから研究目標は完全に達成できた。

4. まとめと今後の課題

本研究では、クリギンク近似モデルと多目的遺伝的アルゴリズムを利用する設計探索手法と効率の高いヘリコプタブレード流れ解析コードを用いて低騒音性と高空力性に優れたヘリコプタブレードを設計することができた。さらに、分散分析法と自己組織化マップを用いたデータマイニングからは各性能と深い関連があるブレードの形状パラメタを見つけることができた。今後の課題としては、ホバリング、先進飛行、垂直離着陸などを含めたすべての飛行状態下での性能最適化を必要がある。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] S. Chae, C. Yang, S. Jeong, T. Aoyama, S. Obayashi and K. Lee: Blade Shape Optimization for Aero-Acoustic Performance Improvement of Helicopter in Hover, *Proceedings of the Second Forum on Rotorcraft Multidisciplinary Technology*, Seoul, (2009), CD-ROM.

*[2] T. Sasaki, S. Jeong, S. Chae, K. Lee and T. Aoyama: Blade Shape Optimization and Data Mining for HSI Noise and Aerodynamics Performances of Helicopter, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 28-29.

[3] 佐々木 亮, 鄭 信圭, 蔡 相賢, 李 管中, 青山 剛史: ヘリコプタのHSI騒音低減と性能向上を目的としたブレード平面形と翼型の最適化, 第47回飛行機シンポジウム講演集 CD-ROM, (2009).

[4] 鄭 信圭: Helicopter Blade の多目的最適設計とデータマイニング, 平成21年度航空宇宙空力班シンポジウム講演集 USB, 白浜, (2010).

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	J09024
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.4~2010.3

未固結層の水圧破砕挙動解明とメタンハイドレート開発への応用

A Study of Hydraulic Fracturing in Unconsolidated Sediments and its Application to Methane Hydrate Development

伊藤 高敏*†, 石田 毅**††, 村田 澄彦**, 清水 浩之**

*東北大学流体科学研究所, **京都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

次世代資源として注目されるメタンハイドレートは、水とメタンガスからなる氷状の固体である。よって、在来型天然ガスのように坑井を通して生産するためには、減圧・加熱等の刺激を加えることで、まず地層内でメタンハイドレートをメタンガスと水に分解する必要がある。水圧破砕き裂を利用できれば、その過程を効率化できるはずであるが、メタンハイドレートを含む地層を構成するのは未固結堆積物であり、従来の水圧破砕で想定されている固結した岩石と大きく異なっている。そこで本研究では、水圧破砕によって未固結層に起こる破壊現象を室内実験と数値シミュレーションによって解明することを目的とする。

2. 研究成果の内容

坑井を掘削してケーシングを設置した後にケーシングに穿孔して地層と坑内を導通させ、その孔を通して地層に水圧を負荷する状況を想定した室内実験を実施した結果、破砕流体の粘性、圧入レート、試験片の浸透率の組み合わせによって、水圧破砕挙動に明らかな変化が生じることが明らかとなった。すなわち、き裂発生形態が、a 無き裂型、b せん断き裂型、c 空洞膨張型、d 直線き裂型、e 分岐き裂型、の5種類に変化し、また、各形態に応じて坑井圧力の大きさと坑井圧力-時間曲線の形状が変化することがわかった(図1)。次に、き裂形態にその様な変化が生じるメカニズムを詳細に追跡するため、数値シミュレーションによって室内実験で観測された現象の再現を試みた。手法には個別要素法を用い、粒子間を破砕流体が流れる状態を表す方法を独自に開発して既存の手法と組み合わせた。この結果、き裂発生形態が、室内実験と同様に破砕流体の粘性と試験片の浸透率の組み合わせによって変化

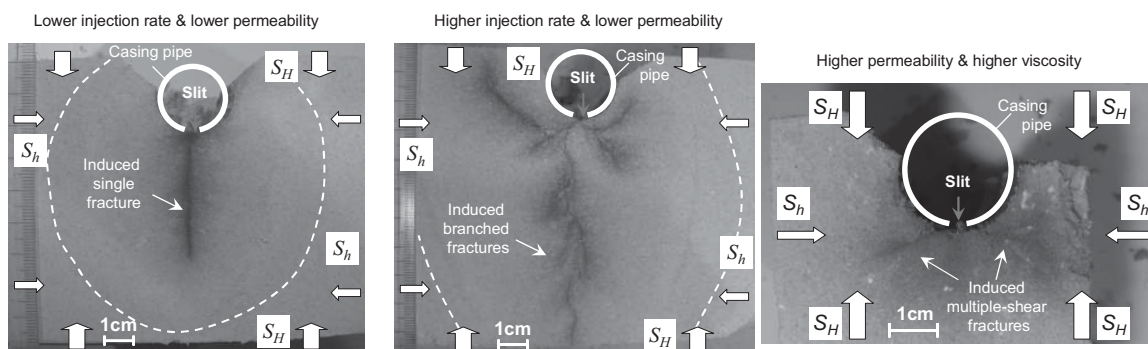
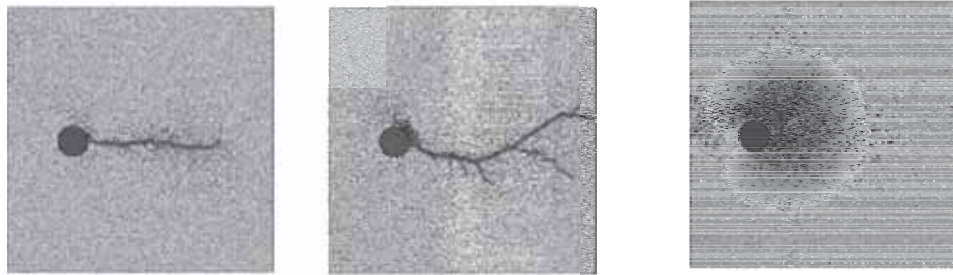


図1：室内実験で明らかになった水圧破砕挙動

することが明らかになった (図2).



(a) Linear Fracture : (b) Branched Fracture : BF (c) Cavity Expansion :

図2 : 数値シミュレーションで再現された水圧破碎挙動

3. 研究目標の達成状況

本研究により, 条件を整えれば未固結物体中であっても水圧破碎き裂の形成されることが明らかになった. この成果は, 当初の目標に合致するものである.

4. まとめと今後の課題

本研究で明らかになった特異な水圧破碎挙動は, 固結した岩石には見られないものである. よって, 未固結層の水圧破碎機構の解明につながる重要な手がかりになると期待される. 今後はさらに詳細な室内実験と数値シミュレーション結果の比較検討を行い, 特異な水圧破碎挙動を支配する主因子を明らかにする. さらに, フィールドスケールの挙動を予測できる数値シミュレータを開発することが必要である.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] T. Ito, A. Igarashi and K. Yamamoto: Laboratory Test of Hydraulic Fracturing in Unconsolidated Deformable Rocks, *Proceedings of the Fourth Biot Conference on Poromechanics*, (2009), pp.1001-1006.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] H. Shimizu, S. Murata, T. Ito and T. Ishida: Distinct Element Modeling for Hydraulic Fracturing in Unconsolidated Sands, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.50-51.
- [3] 伊藤高敏, 五十嵐哲, 高山雅樹, 山本晃司, 未固結砂層の水圧破碎挙動を模擬する室内実験, 平成21年度石油技術協会春季講演会特別講演・シンポジウム・個人講演要旨集, (2009), Vol.1, p.86.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

該当なし

Project code	J09025
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2009 ~ March 2010

Analysis of Reactive Species in a Plasma Flow for Medical Treatment

Gregor E Morfill*†, Takehiko Sato**††, and Tetsuji Shimizu*

*Max-Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Germany

**Institute of Fluid Science, Tohoku University, Japan

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In the field of “Plasma-Medicine” (plasma treatment for medical applications), it is important to understand the generation and transport of chemically reactive species because they are mainly responsible for bactericidal effect. In this project, we aim to observe a profile of reactive species in Ar plasma flow by means of optical emission spectroscopy.

2. Details of program implement

A small microwave plasma torch has been developed for the purpose of disinfection of biological tissues. The plasma was produced between the tip of the powered electrode and the surface of the quartz tube in the torch as shown in fig. 1 (a) by microwave power of 1.7 W at 2.45 GHz and Ar flow of 500 sccm. The plasma produced inside the torch flows out from the nozzle of 2 mm in diameter.

A side view of the plasma flow below the torch and optical spectra from the plasma flow are shown in fig. (b) and (c), respectively. The exposure time of the photo in fig. (b) was 30 seconds and the circles show the field of view in the spectroscopic measurements shown in fig. (c). The shape of the plasma out from the torch looks almost conical. From the spectra, Ar dominates in the vicinity of the nozzle (lines in the long wavelengths). The line at 309 nm indicates presence of OH in this region. As z (distance from the opening of the nozzle) increases, the light intensity decreases. The presence of reactive

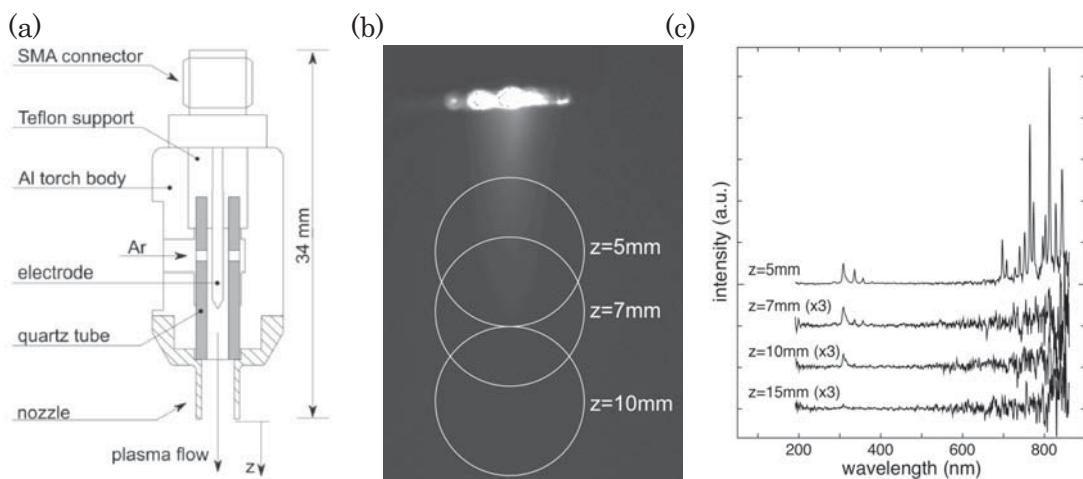


Figure 1: (a) Sketch of the plasma torch. Plasma is produced between the tip of the electrode and the surface of the quartz tube. (b) Side view of the plasma flow. The circles show the field of view for the optical spectroscopy measurements. (c) Optical spectra in the plasma flow.

species is evident in the plasma flow even at $z = 15$ mm according to the lines in UV.

The reactive species were produced through the mixing between the Ar plasma flow and the ambient air. The produced reactive species were transported to the downstream following the Ar flow. Such reactive species is very important for plasma applications in medicine because it has a bactericidal property.

3. Achievements

By the measurements in Institute of Fluid Science, Tohoku University, we could identify the reactive species (OH line in the UV) in the plasma flow. Moreover, according to the optical measurements, it is shown how the production mechanism of such reactive species is produced through the mixing between the Ar plasma from the torch and the ambient air.

4. Summaries and future plans

In order to design plasma depending on the purpose, the reactive species produced in the plasma flow were investigated by means of the optical emission spectroscopy. The optical measurements show that OH is produced in the plasma flow through the mixing between the Ar plasma flow from the torch and the ambient air.

In the next step, with the optical band-pass filter photos of the plasma flow can be taken to see the profile of the reactive species. Moreover, we would like to combine this reactive species profile with a profile of charged particles, which can be measured by an ion-counter as well as a Langmuir probe. The charged particles, especially electrons are responsible for a generation of the reactive species and they themselves could have a bactericidal effect through charging, etc.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] T. Shimizu, T. Nosenko, G. E. Morfill, T. Sato, H.-U. Schmidt, and T. Urayama: Characterization of Low-Temperature Microwave Plasma Treatment with and without UV Light for Disinfection, *Plasma Process. Polym.*, Vol.7, Nos.3-4, (2010), pp. 288-293.

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

*[2] T. Shimizu, T. Sato, and G. E. Morfill: Analysis of Reactive Species in a Plasma Flow for Medical Treatment, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.66-67.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable.

課題番号	J09026
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	2009.4～2010.3

大気圧プラズマ流によるラジカル生成機構と滅菌機構

Mechanism of Radical Generation and Sterilization by a Plasma Flow at Atmospheric Pressure

佐藤 岳彦*†, 宮原 高志**††

*東北大学流体科学研究所, **静岡大学工学部

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

大気圧プラズマ流は低温で化学反応性を有するため、バイオ・医療分野への応用が進められている。しかし、細菌や生体に影響を与える化学的活性種やその生成輸送機構、さらには生体へどのような損傷を与えるかについては十分に解明されていない。そこで、これらの未解明な現象について解明を行い、プラズマ医療の発展に寄与することを目的とする。

2. 研究成果の内容

大気圧プラズマは有害化学物質をその生成のために必要としないことから低温殺菌技術として期待されるばかりでなく、プラズマ医療におけるその多目的な臨床利用に向けた基礎研究が急速に進んでいる。本研究は、大気圧プラズマ流をバイオ・医療分野へ適用するために重要となるプラズマと水の干渉問題について、微量化学物質および生物指標の検出によって明らかにしたものである。プラズマ流はマイクロ波プラズマ発生装置のトーチ内部に挿入された内径 10 mm の石英管内部で生成された後、装置下部に設置されたシャーレに満たされた精製水と接触するように実験システムが構成された。活性酸素はルミノメーターを用いて測定された。図 1 にプラズマを 10 分照射した精製水、石英ガラスを間に挟みプラズマの光だけを 10 分照射した精製水、及びそのままの精製水の発光強度の違いを示す。発光強度はプラズマを直接照射したものだけ増加し、プラズマからの光を照射したものでは発光強度に変化は見られなかった。これはプラズマからの光ではなく、プラズマ流から輸送された化学種が水と反応し発光強度の増加につながったものと考えられる。図 2 は精製水にプラズマを照射した際の pH および発光強度の変化を示す。精製水の pH はプラズマ流照射前 6.49 を示し、プラズマ流照射に伴い減少し 10 分間の照射後の pH は 4.84 であった。照射後 30 分経過後も pH は安定し 4.89 を示した。発光強度においても 10 分間の照射の間急激に増加し、照射後 30 分経過後においても 40%程度は残存していることが明らか

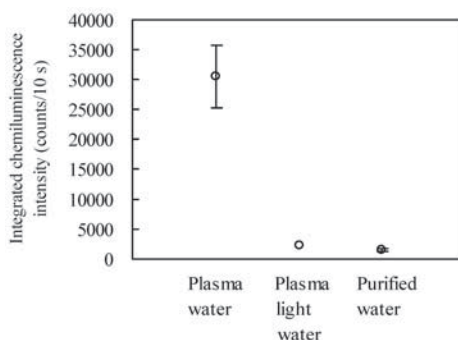


図 1 : プラズマ流を照射した精製水、石英ガラスを透過したプラズマの光のみを 10 分照射した精製水、及び未処理の精製水の発光強度

になった。また、このプラズマ流を照射した精製水は細菌に対して弱い増殖抑制作用を有していることが *Escherichia coli* を用いた活性試験の結果から明らかになった。

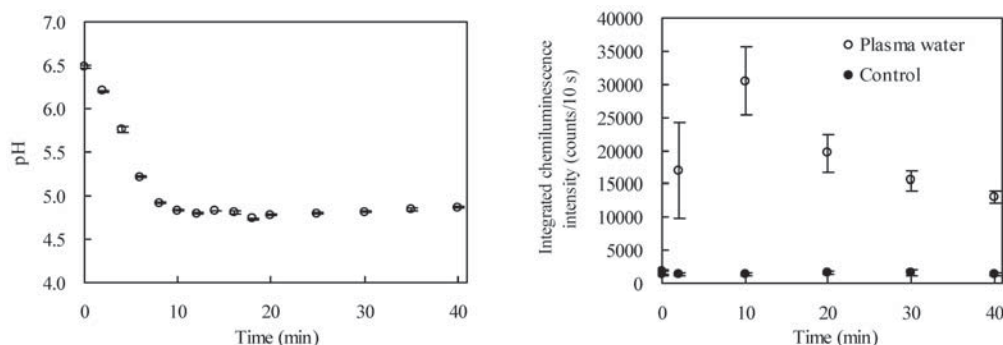


図2：プラズマ流の照射による精製水の pH および発光強度の経時変化

3. 研究目標の達成状況

プラズマ流の照射による水中での活性酸素の生成機構について、流体研における化学種生成および生体反応に関する実験・討論から平成21年度公募共同研究の成果として明らかにした。その生成機構に関する論文は国際学術誌 *Europhysics Letters* に掲載されており、研究目標は十分に達成された。

4. まとめと今後の課題

本研究の成果である大気圧アルゴンプラズマ流の照射による水中での活性酸素の生成は、生体と大気圧プラズマ流との相互作用が重要となるプラズマ医療の基礎の確立に寄与する重要な知見である。生体は水以外にも多くの成分で構成されていることから、本研究を基礎とする生体とプラズマ流との多相・多段干渉問題の解明は、今後の生体応答を中心とするプラズマ医療における重要な研究課題である。

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] T. Miyahara, S. Ochiai and T. Sato: Interaction Mechanism between a Post-Discharge Flow and Water Surface, *Europhysics Letters*, Vol.86, No.4 (2009), pp.45001-1-45001-6.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[2] T. Miyahara, S. Ochiai, and T. Sato: Mechanism of Radical Generation and Sterilization by a Plasma Flow at Atmospheric Pressure, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.60-61.

[3] 佐藤岳彦, 落合史朗, 宮原高志: 大気圧アルゴンプラズマ流と水の干渉機構, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2009 講演論文集, No.09-33, 山口, (2009), pp.101-102.

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	J09027
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2009.4～2010.3

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

中山 昇*†, 三木 寛之**††

武石 洋征***

*信州大学工学部, **東北大学流体科学研究所

***千葉工業大学工学部

†申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

我々の研究グループでは金属粉末を強制的に攪拌することで外部から加熱することなく金属粉末を固化成形することができる新しい成形プロセス「常温圧縮回転せん断法」を考案した。この成形プロセスは金属粉末の低温成形が可能であるが、プロセス中に金属が再結晶せず、圧縮負荷とせん断荷重と塑性流動により原料金属粉に形成された強固な酸化膜を破壊するために金属粉末を容易に固化成形できるのではないかと考えている。また、本技術は粉末冶金を利用した成形加工なので、ニアネットシェイプ化への展開も期待できる。さらに材料の複合化および強度向上を同時に行うことが可能な新しい成形プロセスであると理解している。

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

2. 研究成果の内容

常温圧縮回転せん断装置を用いて作製した純金属または複合材料について、組織評価、機能特性評価を行った。本所においては、高分解能 X 線回折装置を用いた構造解析および走査電子顕微鏡による精密断面観察を行った。また、機能性評価として、三木講師がフランス Ecole Centrale de Lyon において TroboScope を用いた導電性-摩擦係数の同時測定を行った。図1と図2に AlSiCuMg 粉末と MoS₂ の複合材料について実施した摩擦試験結果を示す。MoS₂ は固体潤滑材としてよく知られた材料であるが、無潤滑状態においても摩擦係数 0.1

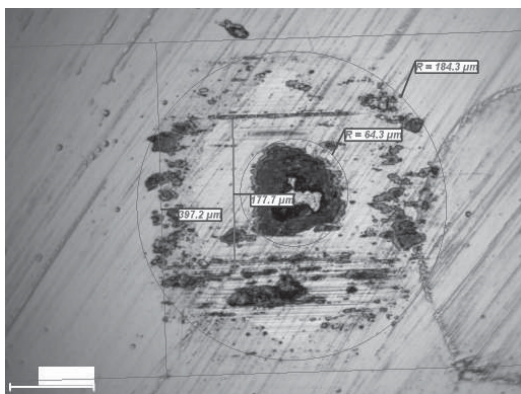


図1：ボールに形成された移着層

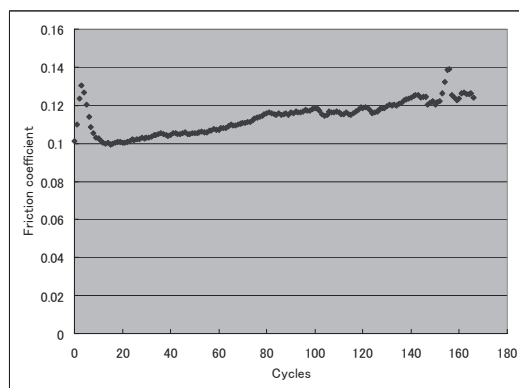


図2：摩擦試験結果

程度の良好な摺動性を示すことが明らかになった。

そのほか、複合化プロセスの解明については2元素を区分した原料粉をプロセス加工し、変位量と荷重の関係性を定性的に評価した。

3. 研究目標の達成状況

申請書記載の達成目標

1. 外部から加熱せず、高融点材料でも室温で固化成形が可能
 2. 材料の強度向上とニアネットシェイプが同時にできる新しい成形法
 3. 結晶粒径が超微細なアトマイズ粉末を使用し、室温で固化成形するため、結晶粒の粗大化がおこらない。
 4. 粉末を用いているので、複合材料を容易に作製可能
- について、1, 3, 4については当初目標を達成したが、2のニアネットシェイプについては未実施となった。

4. まとめと今後の課題

共同研究初年度であるため、基礎データの取得を目的として実施することができた。従来は機械特性として材料強度などの評価をおこなって来たが、摩擦摺動性を評価するなどの新たな応用の可能性を示すことが出来た。

今後は微細組織解析や特性マッピングなどより定量性を高める研究を推進する。また、成形可能形状の可能性について検討し、ニアネットシェイプに関する研究を進める予定である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] N. Nakayama, H. Miki and H. Takeishi: Fabrication of Composite Material by Compression Shearing Method under Room Temperature, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.86-87.

[2] 青柳信一, 武石洋征, 中山昇, 三木寛之: 圧縮回転せん断法による Al-Si-Cu-Mg/WS₂ 複合材料の摩擦特性, 日本非破壊検査協会 平成 21 年度 春季講演大会, (2009), pp.117-118.

[3] 内山善敦, 武石洋征, 中山昇, 三木寛之: 圧縮回転せん断法による Al-Si-Cu-Mg/WS₂ 複合材料の摩擦特性, 日本非破壊検査協会 平成 21 年度 春季講演大会, (2009), pp.119-120.

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	J09028
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2009 ~ March 2010

Kinetic Force Method for Two-/Three-Dimensional Numerical Modeling Relaxation of Rarefied Gas Flows

Vladimir Saveliev*†, Shigeru Yonemura**††
Svetlana Filko*.,***, Kou Tomarikawa****

*Institute of Ionosphere, National Center of Space Research and Technology

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Department of Physics, Zhetysu State University

****Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

One of the members of this project, Vladimir Saveliev, presented the Boltzmann collision integral in a divergence form in exact manner. Therefore, the collision integral can be treated as a force term with collision force F_{coll} (Kinetic Force). This allows considering a distribution function $f(v)$ as a density of quasiparticles which are moving under influence of the sum of external force F and kinetic force F_{coll} along smooth trajectories in the phase space (Kinetic Force Method).

The DSMC method has been dominant numerical method for solution of the Boltzmann equation for the last 40 years. But, the DSMC method requires huge computational load, that is, a huge number of simulation particles to decrease fluctuations and a very small time step to treat molecular collisions. In Kinetic Force Method, there is no collision integral in the governing equation, and hence, the computational load can become much smaller and the distribution function is much smoother.

The target of this project is to develop Kinetic Force Method and to obtain the new effective algorithm for 2D/3D numerical simulations of rarefied gas flows.

2. Details of program implement

We have carried out the theoretical and numerical analysis of the Kinetic Force properties and have studied ways to apply Kinetic Force Method for numerical simulations of some rarefied gas dynamics problems. We have obtained the most appropriate form of analytical expression for the Kinetic Force. This form is convenient for numerical simulations. Also we have found the effective way of necessary energy compensation. We have studied ways to improve the level of accuracy by using different cubature formulas for sphere in calculation of the multi dimensional integrals. Finally we have decided to use some special points of icosahedrons for the numerical averaging over directions of axis of rotations. This approach provided improvement of the accuracy and efficiency of the Kinetic Force Method. We have obtained the formulas for distribution function moments and quasiparticles accelerations. We have tested the Kinetic Force Method by performing numerical simulations of the 3D relaxation of slightly divergent molecular beams. We have arrived at the important physical conclusion: It is possible to considerably simplify a microdynamics of the gas dynamic system while the evolution of a distribution function remains unchanged.

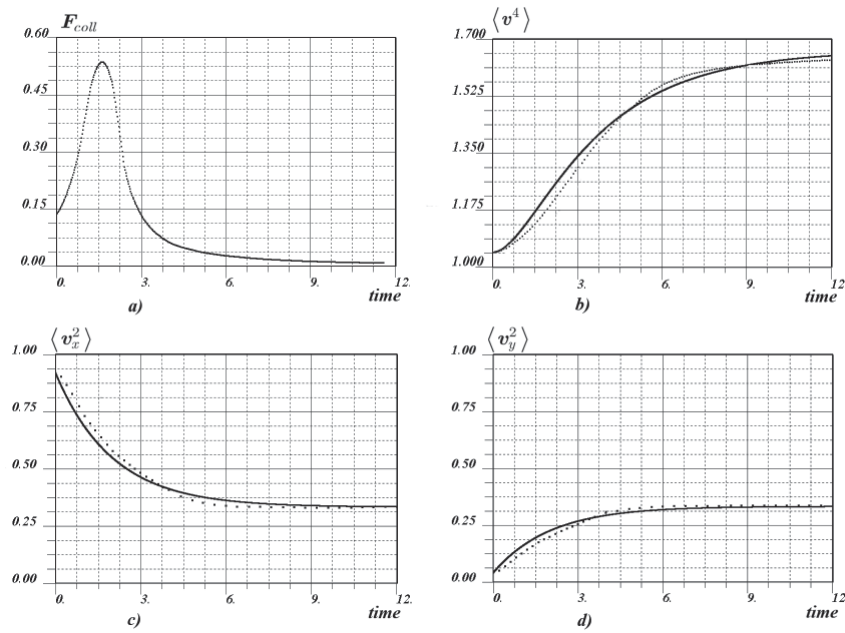


Figure 1: 3D relaxation of two slightly divergent antiparallel molecular beams with equal densities: a) graph of the time dependence of kinetic force F_{coll} ; b), c), d) graphs of the dimensionless moments of the distribution function for Maxwell's molecules in the 3D relaxation problem: — exact, ... calculated

3. Achievements

This collaborative research project is planned to achieve its objective in 3 years. In the first year, this project has been practiced successfully.

4. Summaries and future plans

The first variants of the algorithm of Kinetic Force Method have been developed and the principal correctness of the approach had been shown.

In the future we will do:

1. Further theoretical substantiation of the Kinetic Force Method for 2D/3D numerical simulations of rarefied gas flows.
2. The development and testing of the algorithm.
3. We will solve the several practical problems of 2D/3D rarefied gas flows in order to illustrate capabilities of Kinetic Force Method.
4. We will perform the DSMC simulations of the same problems to compare with the Kinetic Force Method. We will feedback results and improve the Kinetic Force Method.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] V.L.Saveliev, S.A.Filko, K.Tomarikawa and S.Yonemura: Kinetic force method for rarefied gas flows, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.104-105.

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

課題番号	J09029
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.4 ~2010.3

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

西山 秀哉*†, 田中 康規**††
 高奈 秀匡*

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

1. 研究目的

近年, 化学的に高活性である非平衡プラズマ流による内燃機関の着火促進や希薄燃焼促進が国際的に注目されており, 非平衡プラズマによる燃焼促進メカニズムの解明のために精力的に研究が行われている. しかしながら, これまでの研究では, 大気圧程度におけるプラズマ流による燃焼促進に対するものが多く, 内燃機関にみられる高圧条件下における実験研究は少ない.

そこで本研究では, 高圧条件下におけるプラズマ流による燃焼促進効果および燃焼促進メカニズムの解明を目指し, 精緻な数値モデルを構築し, 高圧下での反応過程を明らかにするとともに, 生成される高活性化学種を定量的に評価する. さらに, 本数値計算により最適作動条件を示し, 非平衡プラズマ流による内燃機関燃焼促進のための基礎資料を提供することを本研究の目的とする.

2. 研究成果の内容

図1および2に N_2/O_2 混合気体中での窒素の解離度および作動圧力が電子の平均エネルギーに与える影響を換算電界の関数としてそれぞれ示す. なお, 電子の平均エネルギーは, 0次元の二項近似ボルツマン方程式を解くことにより得られる電子エネルギー分布関数から求めている. 図1より, 電子の平均エネルギーは, 窒素の解離度に強く依存する. 窒素の解離度が高いほど, 平均エネルギーが高くなるのは, 解離による窒素分子の減少により, 電子-窒素分子間の衝突によるエネルギー損失が減少するためである. また, 図2より電子の平均エネルギーは圧力に依存せず, 換算電界のみの関数となる.

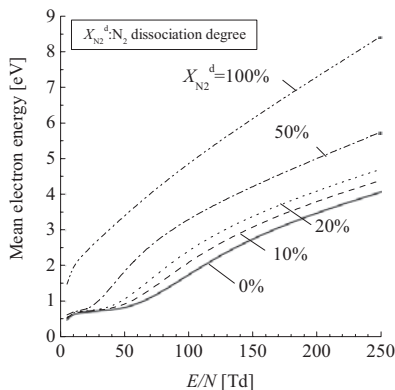


図1: 窒素の解離度が電子の平均エネルギーに与える影響

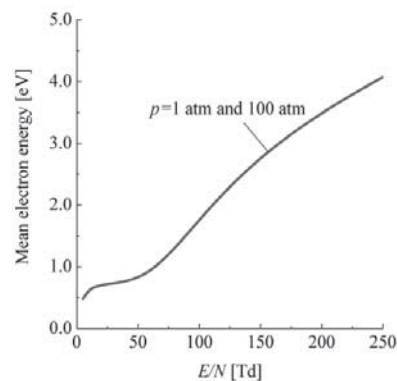


図2: 1 atm および 100 atm における電子の平均エネルギー

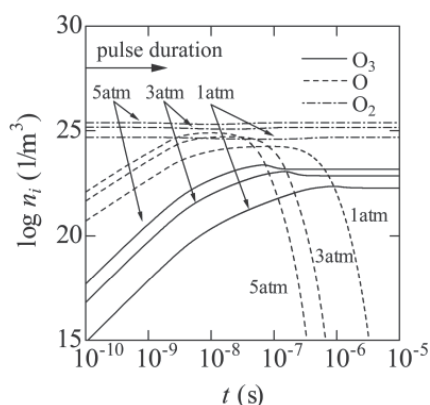


図3： 1 atm, 3 atm および 5 atm における O_3 , O , O_2 の生成消滅過程 ($T=300\text{ K}$)

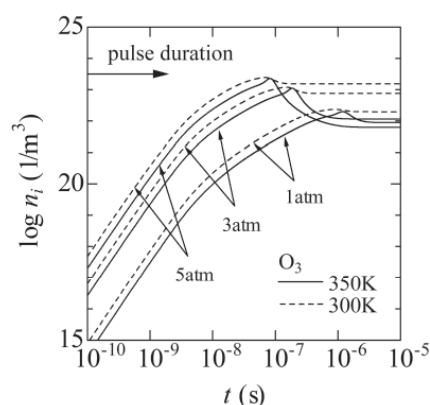


図4： O_3 の生成消滅過程に与える温度の影響

図3に温度が300 Kでの1 atm, 3 atm および 5 atm における O_3 , O および O_2 の生成消滅過程を、図4に作動温度が O_3 の生成消滅過程に与える影響をそれぞれ示す。なお、本計算では、100 Td の換算電界を計算開始より 2 ns 間与えている。図3より O は換算電界を 0 Td とした後、急激に減少する。また、圧力が高いほど寿命が短く、より早く消滅する。一方、 O_3 は、換算電界を 0 Td としても消滅せず、等しい換算電界の下では、圧力が高いほど生成量が多い。また、図4より 300 K の場合と比較して 350 K の場合では、 10^{-5} s における O_3 の数密度はいずれの圧力においても低くなり、 O_3 の減少量は圧力が高いほど大きい。

3. 研究目標の達成状況

平成 21 年度においては、研究目標であった「様々な作動条件に応じた反応場をリアルタイムで解析すること」が可能となり、これにより非平衡プラズマ流の燃焼促進等の応用に資する知見が得られた。以上より、本研究目標は概ね達成されたと判断することができる。

4. まとめと今後の課題

本研究により、非平衡プラズマ流における電子エネルギーの圧力依存性を明らかにするとともに、窒素の解離度が高いほど電子エネルギーが高くなることを示した。また、得られた知見を基に非定常 0 次元化学反応計算を行い、内燃機関での作動圧力と同程度の高圧下におけるプラズマ化学反応過程を明らかにし、生成化学種の組成および寿命を評価した。

今後は、非平衡プラズマ流における主要反応である電子衝突反応に対し、詳細に検討を行い、より精度の高い反応モデルを構築し、内燃機関における非平衡プラズマ流による燃焼促進メカニズムの解明を目指す。

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] H. Takana, Y. Tanaka and H. Nishiyama: Computational Simulation of Highly Reactive Air Plasma Jet under High Pressure Conditions, *Proc. of the Ninth Int. Symp. on AFITFT*, Sendai, (2009), pp.42-43.

- 3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J09030
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2009 ~ March 2010

Numerical Studies of the Reacting Rarefied Flows in Tubes

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

*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

The ONERA kinetic mechanism for six species, i.e., H, O, H₂, O₂, OH, and H₂O, was implemented in the DSMC SMILE software system on the basis of the effective collision chemical models. This statistical realization of the ONERA chemical kinetic mechanism was verified in for the case of homogeneous autoignition of a stoichiometric hydrogen-oxygen mixture diluted by argon (H₂/O₂/Ar= 4/2/9) at an initial pressure $P_0=240$ kPa and a temperature $T_0=1903.6$ K. The DSMC simulation results were found to be in good agreement with the numerical solution of the equations of chemical kinetics.

This kinetic mechanism was applied to DSMC simulations of detonation-wave propagation over an H₂/O₂ mixture system in a one-dimensional formulation. Conditions of specular reflection were imposed on the left and right boundaries of the computational domain. The detonation wave was initiated by the breakdown of a diaphragm (discontinuity decay) at the point $X=0$ between the channels of low ($0 < X < X_l$) and high ($X_2 < X < 0$) pressure. At the initial time, both channels were filled with the H₂/O₂ = 2/1 mixture under the following conditions: $P=P_1$ and $T=300$ K in the low-pressure channel; $P=P_2=33.35 P_1$ and $T= 2000$ K in the high-pressure channel (two pressure conditions were considered: P_1 equals 10 kPa and 100 kPa).

The non-stationary DSMC computation showed that the detonation wave moves with a velocity that accurately coincides with the theoretical value of the Chapman-Jouguet velocity. The DSMC results were compared to detonation-wave structure calculated on the basis of the ZND theory by the Cantera code. The results of DSMC simulations agree qualitatively with the ZND solution in terms of pressure, temperature, and other parameters. Quantitative differences of the DSMC results from the ZND theory are observed both in the front structure proper and in the values of parameters behind the wave front .These differences can be attributed, in particular, to the effect of thermal nonequilibrium, which is not taken into account in the ZND theory, and to the inconsistency of the thermodynamic properties of the gas, which are based on the DSMC molecular models, and the thermodynamic properties from the Cantera database. It is planned to continue verification and validation studies on applicability of the DSMC method to detonation processes, in particular, it seems important to perform comparisons with results obtained by the continuum approach (Euler and Navier-Stokes equations).

The simulations of the detonation-wave structure by the DSMC method in two-dimensional (constant-section channel) formulations were performed. The detonation is initiated by the

instantaneous heating of the end face of the channel. The computations were based on the simplified chemical kinetics for unstructured particles. The influence of rarefaction effects and of viscous and heat losses on the wall on the detonation wave structure and on its propagation process was examined. For Knudsen numbers $Kn=0.022$, in particular, the detonation wave was found to decay during its propagation along the channel, but for $Kn=0.0022$ the decaying regime is not realized. For Knudsen number $Kn=0.0022$ the non-monotonic behavior of the flow parameters is observed inside the wave. For $Kn=0.022$ all this features are smoothed due to the rarefaction effects. The influence of losses on the wall is manifested as the change in the wave structure and as a significant (twofold for $Kn=0.0022$) decrease in temperature inside the detonation wave.

3. Achievements

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

1. A chemical mechanism that describes combustion in the hydrogen-oxygen mixture was realized at the level of collision models of the DSMC method and used for the DSMC detonation studies.
2. The influence of rarefaction effects and of viscous and heat losses on the wall on the detonation wave structure and on its propagation process in a narrow channel was numerically examined by the DSMC method.

4. Summaries and future plans

A chemical mechanism that describes combustion in the hydrogen-oxygen mixture was realized at the level of collision models of the DSMC method. The DSMC simulations of autoignition of hydrogen-oxygen mixture in an adiabatic bath were performed and results are found to be in a good agreement with the solution of the equations of chemical kinetics.

DSMC method was applied to numerical study of detonation in H_2/O_2 mixture at the molecular level. The results of the DSMC modeling yield the velocity of detonation, which coincides with the Chapman-Jouguet velocity. The internal structure of the detonation wave obtained in the DSMC simulation is in good qualitative agreement with the detonation-wave structure calculated on the basis of the Zeldovich – von Neumann – Doring (ZND) theory.

The two dimensional studies of the detonation wave propagation in the channel were performed using the model chemical kinetics for unstructured particles. The effects of the losses on the wall were assessed by comparison of the results with the different boundary conditions on the channel walls.

Research plan.

1. Further development of the DSMC collision models in order to obtain a set of molecular collision models with the data completely consistent with the H_2/O_2 chemical kinetic mechanism for accurate detonation modeling at the molecular kinetic level.
2. Numerical study of the H_2/O_2 flow in a micro flowreactor with controlled temperature profile and comparison with the experimental results of Professor Maruta's team.
3. Numerical study of the shock wave entering the microchannel.

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] Ye. Bondar, K. Maruta, and M. Ivanov: Numerical Studies of the Reacting Rarefied Flows in Tubes, *Proceedings of the Ninth International Symposium of the Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 84-85.

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

課題番号	J09031
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.4～2010.3

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

石本 淳*†, Kozo Saito**††

*東北大学流体科学研究所, **University of Kentucky

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

University of Kentucky, USAとのジョイントラボラトリーを双方向型で利用し、「マイクロ噴霧微粒化プロセスの超並列融合計算」の実施を行う。ガソリンインジェクターノズル内における高速現象を伴う微粒化現象に対し、新型バロトロピックLES-VOF法を用いることにより統一的に数値シミュレーションすることが可能な専用ソルバーを開発し、超並列融合計算手法によりインジェクター噴霧マイクロ微粒化機構に及ぼすキャビテーション等の高速現象の影響を明らかにする。実施に当たっては、対象とする計算内容が複雑・高難度であるため、専用の「超並列流体融合計算システム」と、流体研スーパーコンピュータを用いる。

2. 研究成果の内容

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

3. 研究目標の達成状況

インジェクターノズル内マイクロ微粒化メカニズムに関し、液柱形成から液膜形成・分裂を経て小液滴形成に至るまで一連の高速現象を伴う微粒化現象に関し、コンピュータシミュレーションと実験からなる最新の一体型融合シミュレーションが可能なソルバーを開発した。

達成度は60%である。これにより、ガソリン用インジェクターのみならず、噴霧を利用する自動車塗装、コーティングのバーチャルプランニングに貢献するものと考えられる。

4. まとめと今後の課題

ノズル内微粒化機構解析用ソルバーに関し、マイクロキャビテーションのモデリングと新型LES-VOF数値スキームの開発を行った。さらに測定結果を計算情報としてCFD計算過程に導入する融合計算手法の基本方針を確立した。今後はスーパーコンとPCクラスタを用いたスワー

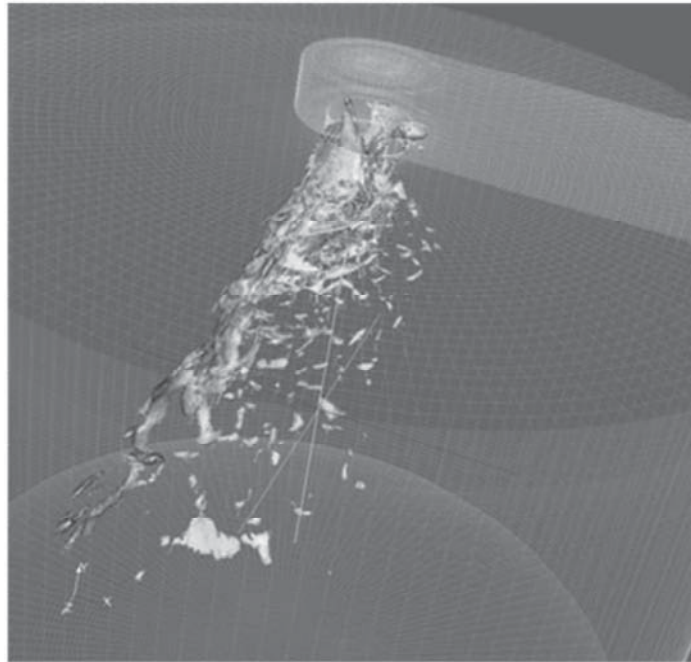


図1: マイクロキャビテーション考慮型ガソリンエンジン用インジェクターノズル微粒化プロセスの融合計算

ル微粒化モデル数値計算の実施と数値計算手法の最適化に関しては来年度に継続して研究の遂行を行う。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

*[1] Jun Ishimoto: Integrated Computation of Micro-Cavitation in Gasoline Injector Atomization, *Proceedings of the 11th ICLASS International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Colorado, (2009), [in CD-ROM].

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Jun Ishimoto, Fuminori Sato and Gaku Sato: Integrated Computation of Primary Atomization with Micro-Cavitation in Injector Nozzle, *Proceedings of the 6th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2009)*, (2009), pp. 596-597.

[3] 石本 淳, マイクロキャビテーションを伴うガソリンインジェクター乱流噴霧微粒化プロセスに関する融合計算 (招待講演), 東京大学ロケットエンジンモデリングラボラトリー 第3回ワークショップ「微粒化現象解明へのアプローチ」, (2009).

[4] 石本 淳, 丹 大輔, 鈴木俊裕, 大平勝秀, 液体水素ピンホールジェットの乱流微粒化プロセスに関する並列融合数値予測, 日本混相流学会年会講演会 2009 オーガナイズドセッション (OS-6 機能性流体のマルチスケール流動とシステム化), (2009).

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

(受賞)

映像賞・フラッシュオブザイヤー, マイクロキャビテーションを伴うガソリンインジェクター乱流噴霧微粒化プロセスに関する融合可視化シミュレーション, 石本 淳, 2009.7.21, 可視化情報学会.

課題番号	J09032
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	2009.4～2010.3

脳内対流の解析による脳局所投薬技術の改良

Analysis of Convective Flow during Convection-enhanced Drug Delivery

齋藤 竜太*, 園田 順彦*, 杉山 慎一郎*, 中村 太源*, 船本健一**, 早瀬敏幸**††, 富永 悌二*†

*東北大学大学院医学系研究科神経外科学, **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

現在、東北大学脳神経外科において悪性脳腫瘍再発例に対し新規薬剤局所投与技術である対流強化型薬剤送達法を用いた化学療法の臨床研究をすすめている。本法は脳腫瘍局所に挿入した注入針より薬剤(ACNU を用いている)を低流量で持続的に注入することで脳腫瘍局所、周囲に可及的広範囲に薬剤投与を行う方法である。ラット、サルを用いた前臨床試験を経て、現在、臨床試験を実施中である。この研究では薬液に MRI 造影剤であるガドリニウムを混入し、薬剤送達のリアルタイムモニタリングを行っている。本研究では、東北大学流体科学研究所超実時間医療工学研究分野との共同研究によりサルを用いた研究のデータを使用して投薬前の薬剤分布シミュレーションを試みた。

2. 研究成果の内容

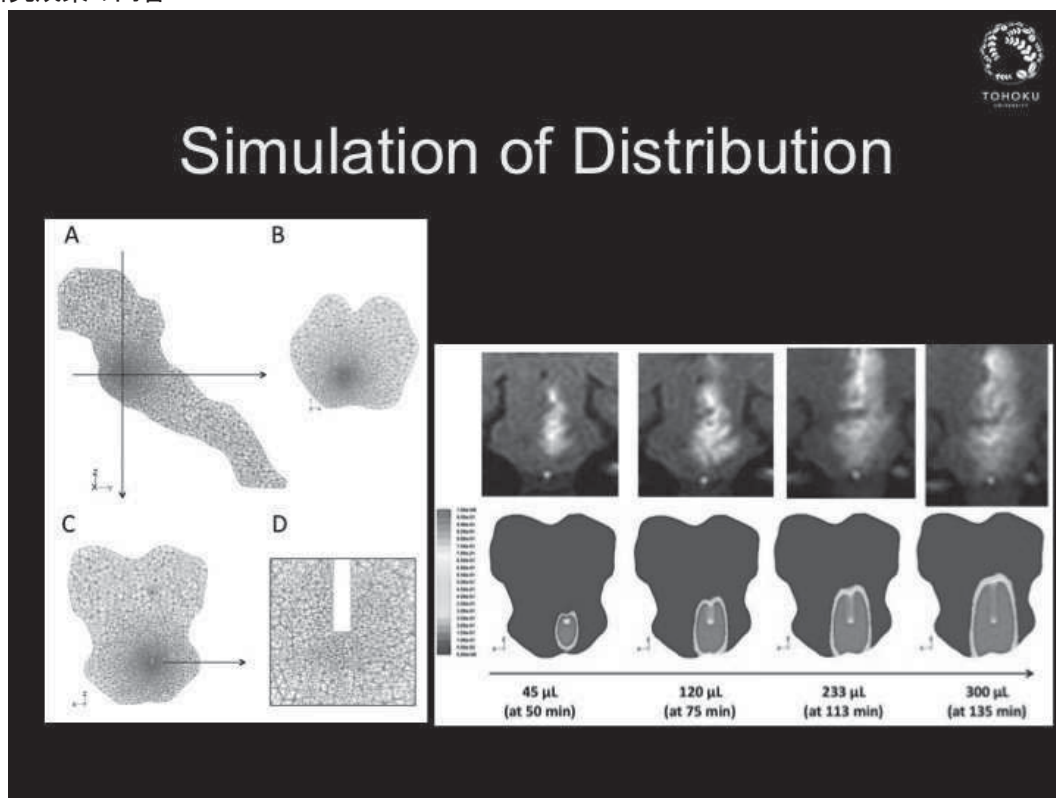


図1：サル脳幹への薬剤投与シミュレーション（右下図）と実際の薬剤分布（右上）

3. 研究目標の達成状況

主にサル脳内に注入した MRI 造影剤(ガドリニウム)の分布 MRI の DICOM データを用いて流体研に設置されているスーパーコンピュータで薬剤分布の解析を行った。脳注入部位の解剖学的構造, MRI でのテンソルのデータをもとに薬剤分布のシミュレーションを行い, 上記の結果を得ることができた。現在, 既に実施した他のサル脳内への薬剤デリバリーのデータを用いて本シミュレーションの validation を行っている状況である。

4. まとめと今後の課題

本研究の最終的な目的はヒト脳内への薬剤分布をシミュレーションし, その分布の改善を得ることである。そのための基礎となるシミュレーションを作成できた。このシミュレーションが, 他のサルに行った薬剤投与のシミュレーションとしても用いることができることを確認, さらに臨床試験として実施したヒト脳内への薬剤分布シミュレーションとして用いることができることを確認し, さらには臨床試験において薬剤投与前にシミュレーションを行うことでどの部位に注入すれば最善の薬剤分布を得られるかを知ることが目的としている。そのためにもシミュレーション手段を簡略化していくことが今後の重要な課題である。

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] Ryuta Saito, Yukihiko Sonoda, Toshihiro Kumabe, Teiji Tominaga: CED of ACNU, First *International Meeting of the Society for CNS Interstitial Delivery of Therapeutics (SCIDOT)*, Cleveland, USA, (2009).

[2] Ryuta Saito, Yukihiko Sonoda, Shin-ichiro Sugiyama, Yoji Yamashita, Ken-ichi Nagamatsu, Masayuki Kanamori, Toshihiro Kumabe, Teiji Tominaga: Image Guided Convection-enhanced Delivery of Nimustine Hydrochloride (ACNU) in Recurrent Glioma Patients, *The 3rd World Federation of Neuro-Oncology*, Yokohama, (2009).

*[3] Ryuta Saito, Yukihiko Sonoda, Toshihiro Kumabe, Ken-ichi Funamoto, Toshiyuki Hayase, Teiji Tominaga: Convection-enhanced Delivery of ACNU Under MRI Monitoring Against Recurrent Gliomas- Development of Computational Simulation of Drug Distribution, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 72-73.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J09033
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2009.4 ~2010.3

ホールトーンフィードバック問題のアクティブ制御に関する数值的・実験的研究
Numerical and Experimental Research on Active Control of the
Hole-tone Feedback Problem

Mikael A. Langthjem*†, 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

The purpose of the present project is:

- (a) To obtain a simple and fast, yet precise and rigorous, numerical procedure for simulating the hole-tone feedback problem.
- (b) To find effective flow control strategies which can limit, or cancel, the hole-tone sound generation.
- (c) To understand the physics underlying these flow control strategies in terms of flow structures and flow stability.
- (d) To verify the theoretical/numerical findings by experiments and - conversely - to discover new flow phenomena via the experiments - and to follow-up these findings by theory and simulations.

2. 研究成果の内容

Principally, the theoretical/numerical part of the project is separated into two parallel branches. The fundamental dynamics of the unperturbed (non-controlled) system is axisymmetric. However, the proposed control system makes use of three-dimensional flow perturbations. Thus the theoretical and numerical work is split up into (i) axisymmetric (i.e. two-dimensional) modeling, and (ii) fully three-dimensional modeling.

3. 研究目標の達成状況

As to the axisymmetric model, a mathematically rigorous acoustic model has been developed, based on the Powell-Howe theory of vortex sound and the boundary element method. The formulation is based on axisymmetric spherical coordinates, which provides a 'natural' multi-pole expansion. This research has been reported in Refs. 1, 3, and 5.

Mode jumps (sudden changes in sound frequencies) are however not well represented in the model. These are believed to be governed by the flow stability characteristics. Stability analyses are a part of the new project for the fiscal year 2010-2011.

As to the three-dimensional model, a method for controlling (limiting or cancelling) the sound generation, based on non-axisymmetric flow perturbations, has been investigated. The basic approach is, in principle, the same as that of the axisymmetric model, but fully three-dimensional. This research has been reported in Refs. 2, 4, and 6.

4. まとめと今後の課題

The developed numerical procedures and computer codes form a good basis for continuing studies related to the hole-tone feedback problem. These will focus on the influence of a housing (cavity) enclosing the jet, a tailpipe (continuing beyond the end-plate), and a combination of these two.

Another focal point will be the relations between forced acoustic excitation (via loudspeakers at the nozzle exit) and flow structures / flow stability. In the experiments the acoustic pressure (i.e. the hole-tone sound pressure spectrum) can display lock-in or non-lock-in to the acoustic excitations, depending on excitation frequency and amplitude. [More complicated phenomena, such as lock-in to one-half of the excitation frequency, do also occur.] We wish to understand the circumstances under which lock-in (or otherwise) occurs in relation to the stability characteristics of the flow. An appealing approach is the Floquet stability analysis.

5. 研究成果 (*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. Langthjem and M. Nakano: Numerical study of the hole-tone feedback cycle based on an axisymmetric formulation, *Fluid Dynamics Research*, 41 (2009), pp.1-26.
- [2] M. Langthjem and M. Nakano: A three-dimensional study into non-axisymmetric perturbations of the hole-tone feedback cycle, *Proceedings of the IUTAM Symposium on Unsteady Separated Flows and their Control*, Corfu, Greece 18-22 June 2007, Springer (2009), pp. 581-586.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] M. Langthjem and M. Nakano: Sound generation in the hole-tone feedback problem. In: *Mathematical Physics and Applications of Nonlinear Wave Phenomena*, RIMS, Kyoto University, 21-23 Oct. 2008 (Ed. T. Yano) RIMS Kokyuroku 1645, Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, (2009), pp. 221-230.
- [4] M. Langthjem and M. Nakano: Numerical study on sound generation from the three-dimensional hole-tone jet subjected to non-axisymmetric flow perturbations, *Proceedings of the Sixth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2009), pp. 128-129.
- *[5] M. Langthjem and M. Nakano: Numerical and Experimental Analysis of the Hole-Tone Feedback Problem, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 108-109.
- [6] M. Langthjem and M. Nakano: A Three-dimensional Study of the Hole-tone Feedback Problem, *RIMS Symposium on Euler's Equations: 150 Years of Vortex Motion and Sound*, Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, 21-23 July 2009.

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	J09034
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	2009.4~2010.3

液体ロケットインデューサの振動問題に関する研究
Study of Oscillation Problems of Inducer in Liquid Propellant Rocket Engine

吉田義樹*†, 南里秀明*, 伊賀由佳**††

*(独)宇宙航空研究開発機構

**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、ターボポンプに推進剤を供給する配管内の音響的な効果を1次元解析モデルに取り入れ、実験で観察されたキャビテーションサージの周波数が不連続となる事象を、線形安定解析で解明する事を目的とした。

2. 研究成果の内容

共同研究集会: 平成22年3月9日, 参加人数3名.

開催概要: CFDにおける, 非定常キャビテーション特性K:キャビテーションコンプライアンス, M:マスフローゲインファクターの計算手法について議論した.

ロケット用ターボポンプ単体試験設備の入口配管に音響振動を考慮したキャビテーションサージの1次元解析を行い, 次の結論を得た.

- (1) 従来の非圧縮流を仮定した解析モデルでは, キャビテーション数の低下とともにキャビテーションサージの圧力変動周波数が“不連続”となる事象を説明できなかったが, 入口配管に音響効果(圧縮性)を考慮したモデルを構築することによって変動周波数が実験結果とほぼ一致し, 定性的に実験結果を説明することができた. (図1参照)
- (2) 本現象はインデューサのキャビテーション非定常特性(M:マスフローゲインファクター, K:キャビテーションコンプライアンス)と入口配管内の音響振動が連成する自励振動である. また, 音響的にターボポンプ側は完全な開放端ではなく, キャビテーションの非定常特性によって自由端と固定端の中間的な状態にあることが分かった. このため, キャビテーション数が低くなるに従い, 音響固有値が連続的に漸減することが計算され, この傾向は実験結果の傾向と定性的に一致した. (図1参照)

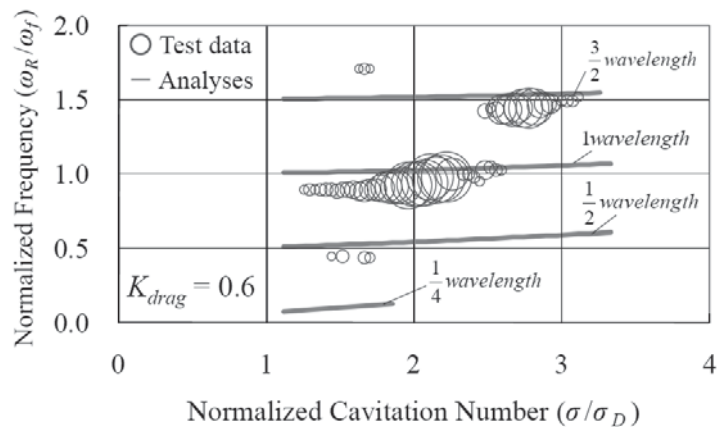


Fig. 1 Comparison of frequency between test data and analytical results (ω_R) using CFD calculated K and M

3. 研究目標の達成状況

線形解析については、ほぼ研究目標を達成した。

4. まとめと今後の課題

ターボポンプの単体試験中に発生したキャビテーションサージの周波数が不連続となる事象について、従来の解析モデルでは説明ができなかったが、ポンプ入口配管の音響効果を考慮したモデルに変更することによって定性的な説明が可能となった。

今回の解析モデルは線形モデルであり、非線形事象は取り扱えていない。今後、有限要素法や特性曲線法等によって事象のより詳細な解明を進める予定である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] 南里秀明、河南広紀、長尾直樹、吉田義樹

ロケットエンジン用ターボポンプ試験設備における音響効果を考慮したキャビテーションサージの一次元解析, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集 No.09-8, (2009.11.7-8), No.1116, pp. 373-374.

*[2] 南里秀明、河南広紀、谷 直樹、吉田義樹

ロケットエンジン用ターボポンプ試験設備における音響効果を考慮したキャビテーションサージの一次元解析(第2報:アキュムレータの影響), 日本機械学会東北支部 第45期総会・講演会, (2010.3.12), No.2010-1, No.199, pp.198-199.

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	J09035
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2009 ~ March 2010

Nondestructive Evaluation of Surface/Sub-surface Material Properties of Structural Components in NPP using Ultrasonic and Electromagnetic Method
 Sung-Jin Song*†, Tohiyuki Takagi **††, Tetsuya Uchimoto**, Sung-Duk Kwon***,
 Hak-Joon Kim**, Dong-Yeol Kim**, Ryota Oikawa**, Keitaro Ohtaki**

*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University,

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

***Department of Physics, Andong National University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In major components of nuclear power plants, micro cracks are initiated and their growth is driven by the surface degradation caused by environmental factors or surface treatments. The growth of micro cracks into larger cracks is a crucial problem and a contributor to the failure of the major components. However, using conventional nondestructive testing methods such as bulk wave ultrasonic testing, eddy current testing, etc, it may not be possible to quantitatively detect and evaluate micro cracks.

Thus, objective of this project is developing ultrasonic and electromagnetic nondestructive evaluation methods for evaluation of variation in surface/sub-surface material properties used for major components of nuclear power plants by surface treatments and degradation in order to improve reliability of those components

2. Details of program implement

From the multiple reflected ultrasonic signals, attenuation coefficients and sound velocity of the decarburized alloys were calculated. As shown Figure 1 (a), attenuation of ultrasound increases as increasing decarburized time. Also, comparing two specimens with different Chromium contents, the more Chromium added specimens show smaller attenuation compare with other one. Also, as shown Figure 1 (b), velocity of ultrasound increases as increasing decarburized time. But relation between sound velocity and decarburized time show less relationship compare to the attenuation.

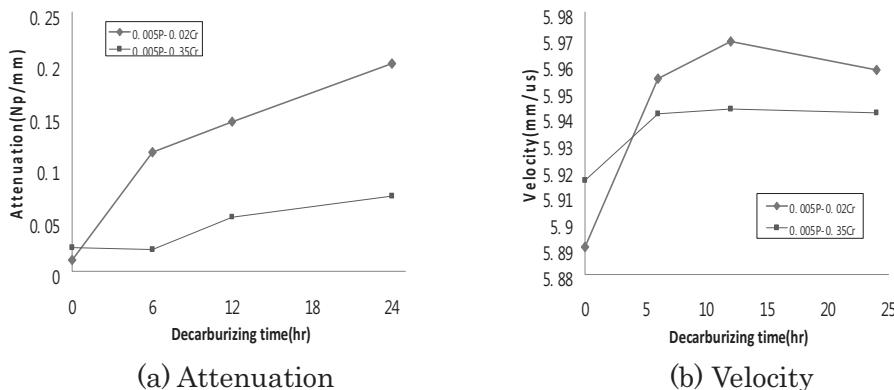


Figure 1: Measured attenuation coefficients and velocity for the decarburized specimens with different Chromium contents

Using the measured depth of decarburized layers and impedance, relation between eddy current measurements and decarburization layers were investigated. Figure. 2

shows relation between impedance change and depth of decarburizing layer for the decarburizing layer for the decarburized specimen. As shown Figure. 2 linear correlation between impedance change and depth of decarburized layers were observed.

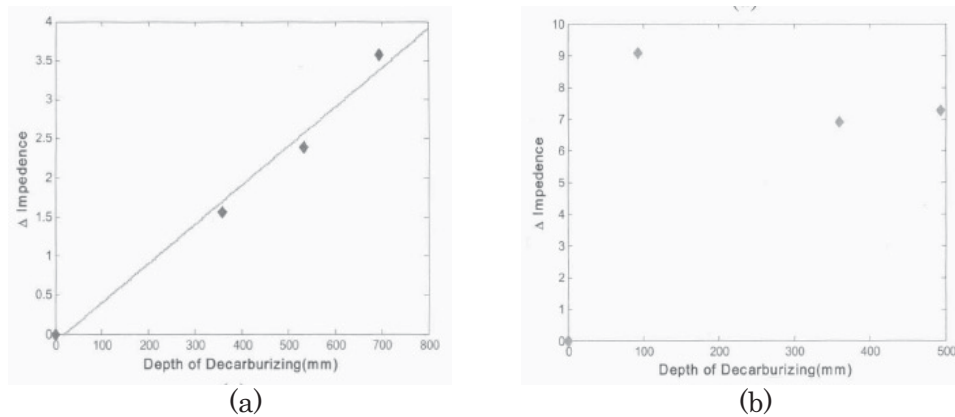


Figure 2: Relation between impedance change and depth of decarburizing layer for the decarburized specimen: (a) low Chromium content and (b) high Chromium content

3. Achievements

Through this study, we established nondestructive techniques for evaluation of surface/sub-surface material properties using ultrasound and eddy current testing. And we have exchanged core techniques for characterization of surface/sub-surface material properties between IFS(eddy current testing) and SKKU(ultrasonic testing).

4. Summaries and future plans

In this study, we found out the relation of decarburization and chromium alloying on ultrasonic attenuation and velocity and impedance change of eddy current signal using SA-106 steel specimens. From the experimental results, attenuation of ultrasonic signal and impedance changes of eddy current signals can be good nondestructive evaluation methods for characterization of decarburized layer of steels with different alloying

5. Research results (* reprint included)

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

- [1] Dong-Yeol Kim, Hak-Joon Kim, Sung-Jin Song, Sung-Duk Kwon, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto: Nondestructive evaluation of CVD diamond coating with various deposition condition, *New Physics:Sae Mulli(The Korean Physical Society)*, Vol. 60, No. 2, (2010), pp. 195-200 (In Korean).

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

- *[2] Hak-Joon Kim, Ho-Sang Shin, Dong-Yeol Kim, Sung-Jin Song, Sung-Duk Kwon, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto: Development of Nondestructive Evaluation Method for Characterization of Surface/Sub-surface Material Properties, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 58-59.
- [3] Dong-Yeol Kim, Hak-Joon Kim, Sung-Jin Song, Sung-Duk Kwon, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Hiroyuki Miki: Ultrasonic Nondestructive Evaluation of CVD Diamond Coating with Various Deposition Condition, *Proceedings of the Sixth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2009), pp. 106-107.

3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

Project code	J09036
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2009 ~ March 2010

Development of Micro-Motor for MEMS utilizing Novel Smart Polymer Composites

Masami Nakano*†, Miklós Zrínyi**††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

** Faculty of Pharmacy, Semmelweis University, Hungary

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

We have proposed to prepare smart polymer composites for development of micromotors, based on the phenomenon, called Quincke rotation.

Quincke rotation is the rotation of non-conducting objects immersed in liquid dielectrics and subjected to a strong homogeneous DC electric field. The rotation is spontaneous when the field exceeds a threshold value. Based on the polymer Quincke rotor, a totally new class of material is expected to be designed for micromechanical and microfluidic applications. Electrorotation of disk shaped polymer composites is studied as a function of electric field intensity. Our intention is to fabricate rotors, which could be used as main building blocks of micro-motors.

2. Details of program implement

We have prepared FeO(OH) loaded polymer composites using polyvinylalcohol, PVA (Merck PVA 72000). The orthorhombic FeO(OH) particles were dispersed in the polymer solution such a way, that the mass ratio of the filling material and the dried polymer was varied between 0.36 and 10.4. Polymer disks, as rotors, were prepared with a diameter of 0.57 mm and heights of 0.19 mm. Figure 1 shows an experimental device to apply electric field to the disks. Two parallel copper plates with heights of 1.5 mm were fixed onto a glass by insulation stripe. The gap distance between the electrodes was 3 mm. The space between the electrodes was filled up with linseed oil. The electric field was supplied by a high voltage DC power supply (TREC, USA). We have increased the electric field intensity up to $1.6 \cdot 10^6$ kV/m. A polymer disk was immersed in the linseed oil (Festékipari Kutatóintézet, Hungary). DC and AC electric field was applied perpendicularly to the axis of the disk. The Quincke rotation was followed by optical microscope (OLYMPUS, Japan) equipped by a high speed camera (Photron, Japan).

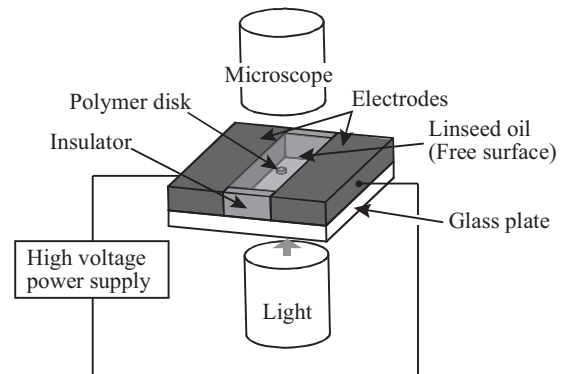


Fig.1 Experimental device to apply electric field to polymer composite disk

In order to visualize the rotation and to determine the angular frequency, a visible sign close to the edge of the disk was used. The angular frequency of the rotation was determined by recording the spinning motion of the disk. The observation was carried out at room temperature. Both the threshold field and the angular frequency of rotation were determined in both DC and AC fields.

3. Achievements

We have studied the angular motion of our composite disks and have concluded that dynamics of the rotor is very complex. If the strength of static DC field is accounted for, three regimes have been observed.

1. Below a threshold value, E_c of the electric field, the disk does not show any motion.

2. At the threshold value and slightly above, the disk begin to rotate, but the angular displacement was found to be less than 2π . The angular displacement occurred either in clockwise or counter-clockwise direction.
3. At DC field intensities much higher than the threshold value continuous rotation was observed.

We have determined the dependence of rate of spinning on the electric field intensity. This dependence is shown in Fig.2. It can be seen in the figure that with increasing electric field intensity, the rate of spinning significantly increases. It is also seen that this dependence is not linear as it was predicted for solid spherical particles. It is also seen in the figure that, the threshold value of the static electric field, E_{cr} is close to 1 kV/mm. The rotating disk acts like micro sized motors with tunable angular frequency. DC and AC electric field induced rotation of polymer composites has also been studied experimentally.

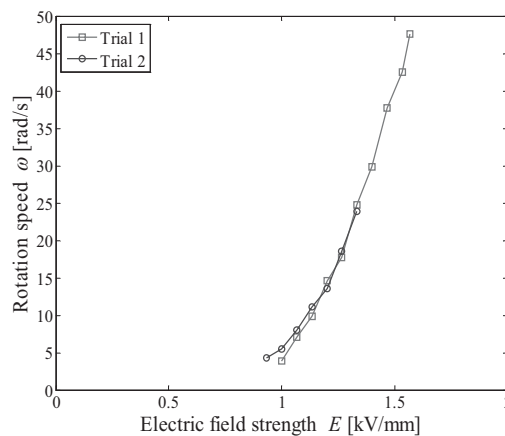


Fig. 2 Dependence of rotation speed on the DC electric field.
The figure shows only one rotation direction.

4. Summaries and future plans

We have reported the development of smart polymer composites that show spinning in static uniform field and are good candidates for ultraprecision manufacturing. A microscopic motor of which operation is based on the principle of Quincke rotation is just one step away.

The future plans include:

- Theoretical interpretation of the dynamics of Quincke rotation is based on the conservation of angular momentum of the disk.
- Experimental study of the influence of size (diameter and thickness), and composition of the polymer disk on the angular frequencies.
- To develop prototype of Quincke rotation-based micromotor.

5. Research results

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

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

*[1] M. Zrinyi, M. Nakano, T. Tsujita: Development of Micro-motor for MEMS utilizing Novel Smart Polymers, *Proceedings of the Sixth International Conference on Flow Dynamics (6th ICFD 2009)*, Sendai Japan, (2009-11), pp.114-115.

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

Project code	J09037
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2009 ~ March 2010

Investigation of Hypersonic Flows about Leading Edges of Small Bluntness

Mikhail Ivanov*†, Shigeru Yonemura**††,
Yevgeniy Bondar*

*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In the framework of the present project the phenomena of hypersonic flow about the leading edges of the small bluntness are studied. Such leading edges are the elements of the advanced hypersonic aircraft design. Feature of the high-speed flow about such edges is significant effect of the rarefaction and thermal non-equilibrium even for such parts of the flight trajectory where the flow about the air/spacecraft is continuum as a whole. The main objective of the present project is to establish the limits of applicability of continuum models for such flows. In the present project the extensive numerical studies based on the kinetic (Direct Simulation Monte Carlo method, DSMC) and continuum (Navier-Stokes equations, NS) approaches are conducted. In our opinion fulfillment of the project permits to obtain the new information on the complicated processes typical for the high-speed flow aerothermodynamics.

2. Details of program implement

In the present project the extensive numerical studies based on the kinetic (DSMC) and continuum (NS equations) approaches are conducted. The use of such combined numerical strategy allows to investigate the rarefaction and thermal non-equilibrium effects in the vicinity of the leading edge and to assess the area of applicability of the continuum approach.

The time-explicit shock-capturing code based on 4th order MUSCL TVD scheme for the convective terms and the second-order central difference approximation of the diffusive terms was used for solving the NS equations with velocity slip and temperature jump boundary conditions. The DSMC computations were performed with the SMILE software system.

At first stage of the study the $M=5$ monatomic gas 2D flow about the edge of the cylindrically blunted thick plate at a zero angle of attack was conducted by both NS and DSMC codes for the Knudsen numbers based on the edge radius of curvature $Kn_c=0.1-0.5$. The plate was assumed to be isothermal with the temperature equal to free-stream value. The length of the plate is $10R_c$. Note, that Knudsen number based on plate length is within the range $Kn \sim 0.01-0.05$, which is believed to be within the area of applicability of NS equations. The hard sphere collision model was used in the DSMC simulations, which is consistent with the square root viscosity-temperature dependence used in the NS computations.

The distribution of the pressure coefficient C_p , friction coefficient C_f and Stanton number St over the plate surface for Knudsen number $Kn_c=0.1$ is given in Fig. 1. For this Knudsen number kinetic and continuum approach predicts similar distribution of all the parameters, namely, non-dimensional pressure, friction, and heat flux. The distributions of surface parameters for higher Knudsen number $Kn_c=0.5$ are also shown in Fig. 1. For this case the pressure coefficient distributions obtained by the both methods are again in good agreement. The NS friction coefficient values are more than 10 % greater than DSMC values in some parts of the surface. The heat flux obtained in NS computations is also higher than DSMC one (more than 20 % for some parts of the surface).

The observed difference in surface parameter distributions demonstrates the significant rarefaction and non-equilibrium effects. They will be analyzed in more detail in the future. The numerical studies

for high Mach number $M=10$ flow will be conducted for which the more pronounced non-equilibrium effects are expected. Also the air flow will be simulated to assess the effects of translation-rotation-vibration non-equilibrium and other real gas effects.

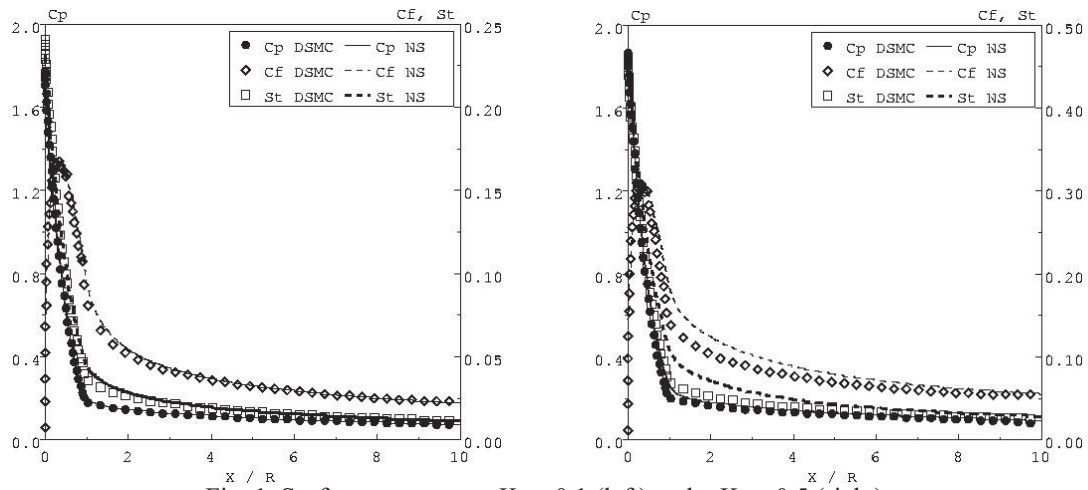


Fig. 1. Surface parameters. $Kn_c=0.1$ (left) and $Kn_c=0.5$ (right).

3. Achievements

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

The flow structure and surface parameters distribution for the flow in the vicinity of the leading edge were computationally studied in the wide range of the flow parameters, namely, Knudsen and Mach numbers. The detailed comparison of the computational results obtained with continuum and kinetic approaches allowed determining the area of applicability of the continuum models to such flows.

4. Summaries and future plans

The rarefaction effects in the vicinity of the leading edge on the heat loss and flow structure is assessed by the comparison of the results obtained by continuum and kinetic approaches at a level of flowfields and surface parameters for monatomic gas flow. The computations were performed for the moderate values of Mach number ($M=5$) and for the range of Knudsen numbers ($Kn \sim 0.1-0.5$) defined by the radius of curvature of the leading edge. It was shown, that for $Kn > 0.5$ the continuum approach is inapplicable even with account for rarefaction effects with the velocity slip and temperature jump boundary conditions.

Future research plan.

- (1) Numerical study of the applicability of the continuum approach for high Mach numbers ($M \sim 10$ and greater) for the flow in the vicinity of the blunted leading edge.
- (2) Numerical study of the effects of the vibrational non-equilibrium on the flow structure and heat loads in the vicinity of the leading edge in the wide range of the flow conditions.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] M. Ivanov, S. Yonemura, Ye.Bondar, and D. Khotyanovsky: Investigation of Hypersonic Flows about Leading Edges of Small Bluntness, *Proceedings of the Ninth International Symposium of the Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 36-37.

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

課題番号	J09038
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2009.4 ~2010.3

可視化による知識発見のライフサイクル管理とその流動応用評価
 Visual Knowledge Discovery Lifecycle Management and
 its Evaluation with Flow Dynamics Applications

藤代 一成*†, 早瀬 敏幸**††, 大林 茂**, 竹島 由里子**

*慶應義塾大学工学部, **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

e-サイエンスを推進するうえで、大規模な数値データに潜む対象の特徴的な構造や挙動に関する知見を効果的に得るための可視化技術の高度化及び標準化は喫緊の課題である。本研究では、専用オントロジーにより既存の可視化ワークフローとその適用事例を分類し、リポジトリを介してそれらをユーザに開放するとともに、階層的出自管理と可視化パラメタ半自動選択機能によってスケーラブルなワークフローのバージョンングと知見獲得過程の追跡を可能にする協同可視化ライフサイクル管理ミドルウェアの機能を拡張し、最先端の流動解析応用事例への適用を通じてその効果を実証する。

2. 研究成果の内容

これまで流体融合研究センターで開発してきた TFI-AS/V (Transdisciplinary Fluid Integration-Archive System/Visualization) システムを発展させるために、まずその理論的基盤となる可視化オントロジーと出自管理モデルを再検討した。Hesselink, van Wijk, Post による数値-視覚マッピング分類 (1994) と、可視化目的を平易な自然言語で記述する Wehrend マトリクス (1990) をベースに、情報表現レベルの差異や計算量・精度を考慮に入れながらドメインオントロジーのカーネルを再設計した。出自管理モデルは、役割の異なる複数ユーザによる協同可視化作業を前提とした階層的版管理を最大の特徴とする。

次に、米国 LLNL の Keller & Keller (1993) が収集した 138 件の先進的可視化事例から代表的な流動可視化技法を抽出し、それらの MVE テンプレートワークフローをシードサンプルとするリポジトリを構築し、2009 年 10 月に「例示による可視化設計」と「並置化ビュー構成」の機能を有するプロトタイプシステムの初期バージョンを流体科学研究所内向けに公開した。

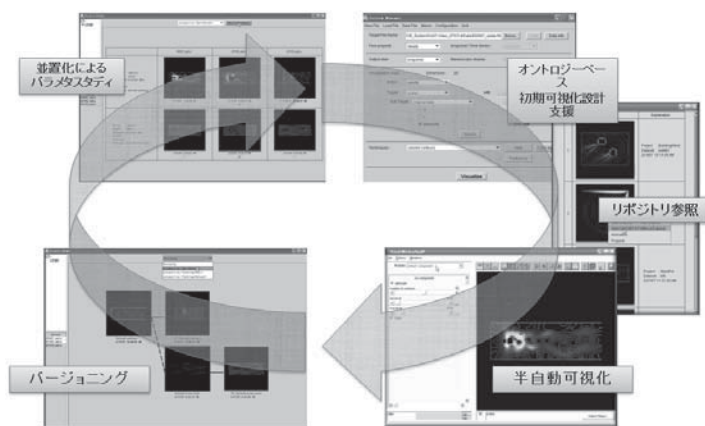


図 1 : TFI-AS/V が支援する可視化ライフサイクル

さらに、仮想風洞と後方乱気流の事例を基本テストベッドデータとして利用し、その初期効果を検証した。図 1 は、仮想風洞プロジェクトを例として、TFI-AS/V システムが支援する可視化ライフサイクル全体を概観したものである。ユーザ個々による非手続き的な初期可視化設計からバージョンングを経て、上級ユーザによる最新結果の並置化により効率的なパラメタスタディが実施されている様子がわかる。

3. 研究目標の達成状況

可視化オントロジーに基づき、可視化の専門家がもつ知識や経験を必ずしももっているとは限らないユーザに対して、目的に沿った可視化設計を支援し、知見獲得に至る出自を系統的に管理できる点で、TFI-AS/Vは目標どおり、無用なメディアデータの生成を抑制し、科学的発見の機会を増強させる素地を実現できたと考えられる。しかし、別途開発している可視化パラメタ半自動選択機能の取り込みはまだ実現できておらず、なお一層のスケラビリティ確保が必要である。

一方、階層的出自管理モデルに関しては、可視化の出自管理環境として名高い米国ユタ大学SCIのVisTrailsに較べ、より広範なユーザスペクトルに加え、より長期間に渡る協同研究に対応できる点に注力して設計してきたが、その実利的効果を検証するためには、今後の所内利用によるシステム運用評価を待たなければならない。

4. まとめと今後の課題

初年度である本年度は、TFI-AS/Vシステムの理論的基礎となる可視化オントロジーと出自管理モデルを構築すると同時に、プロトタイプの所内公開を果たした。

今後の主要な課題として下記の3点を挙げる。

- 1) 可視化オントロジーの拡張を継続し、より一層高度な流動可視化ドメインオントロジーの構築を目指す。今年度はテンソル場の3次元高階時系列データも対象に加え、各種の多次元多変量伝達関数設計原理を目的試行的に選択できるようにする。
- 2) さらに多くの代表的可視化手法をMVEモジュール群として網羅するための詳細設計と試験的実装を実施する。これらを公開テンプレートワークフローに組み込み、ユーザによる無用な画像・アニメーション生成を回避し、スケラブルな可視化を実現する。
- 3) 2次元/3次元仮想風洞等の事例適用を通じて、上記のシステム拡張の効果を検証する。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

- [1] Y. Takeshima, I. Fujishiro, S. Takahashi, and S. Obayashi: Topologically-based haptization and visualization of wake turbulence datasets, *DVD Proceedings of IEEE Image Electronics and Visual Computing 2010, Nice*, (2010).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] 藤代一成: 学融合可視化: 合点と得心の科学 (招待講演), 第1回学融合ヴィジュアルライゼーションシンポジウム講演集, 東京大学柏キャンパス, (2009), pp.44-49.

- *[3] I. Fujishiro, Y. Takeshima, S. Obayashi, and T. Hayase: Realizing scalable visualization through hierarchical provenance management, *Proceedings of Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 106-107.

- [4] Y. Takeshima, Y. Hoshi, Y. Maki, I. Fujishiro, S. Takahashi, T. Misaka, S. Obayashi: Topologically-accentuated realization of wake turbulence datasets, *Proceedings of Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.128-129.

- *[5] 藤代一成, 竹島由里子, 早瀬敏幸: VIDELICET: 階層的出自モデルに基づく可視化ライフサイクル支援システム, 画像電子学会 Visual Computing 情報処理学会グラフィクスとCAD 合同シンポジウム 2009DVD 予稿集, 旭川, (2009).

- [6] 藤代一成: VIDELICET における EFD/CFD データの並置化, JAXA 特別資料, JAXA-SP-09-002, ISSN 1349-113X, (2010), pp.71-83.

課題番号	J09039
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	2009.4～2010.3

超流動ヘリウム中の沸騰膜界面における不安定現象に関する研究
Study of Unstable Phenomena of Film Boiling in Superfluid Helium

木村 誠宏*†, 野澤 正和**††, 大平 勝秀**

*高エネルギー加速器研究機構, **東北大学流体科学研究所

†申請者, ††所内対応教員

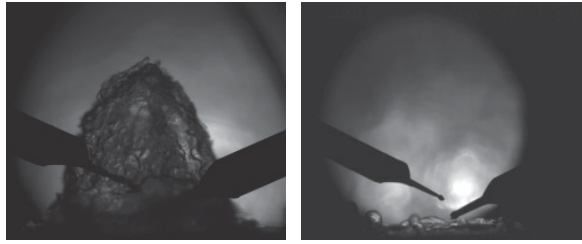
1. 研究目的

超流動ヘリウム(He II)は、2.17 K以下の温度で存在し、良好な冷媒として大型超伝導電磁石や宇宙用観測機器の極低温機器の冷却に用いられてきている。超伝導電磁石が超伝導状態から常伝導状態へと瞬時に転移するクエンチ時のように、大きな熱負荷が加わった場合、冷媒である He II が超流動崩壊を起こし膜沸騰が発生する。このような場合に、極低温機器を効率的、安全に運用するために He II 中の膜沸騰熱伝達特性の理解が求められている。これまで、飽和 He II 中においては、ノイジー膜沸騰とサイレント膜沸騰が発生することが報告されており、両膜沸騰モードは、温度、圧力、熱流束により発生領域が変化する。He II の気液自由界面の位置が高い場合、つまり沸騰が発生する面にかかる圧力ヘッドが大きい場合にノイジー膜沸騰が発生し、圧力ヘッドが小さくなるとサイレント膜沸騰が発生する。これらの2つの膜沸騰モードの熱伝達特性は明らかにされてきている。しかし、熱伝達特性と膜沸騰時における沸騰膜界面の挙動との関連性については未解明である。さらに、ノイジー膜沸騰・サイレント膜沸騰を決定づける蒸気膜界面の熱流動現象に関しても明らかにされていない。本研究では、飽和 He II 中で発生する膜沸騰現象について、熱伝達特性と蒸気膜挙動との関連性の解明を行う。膜沸騰発生用のヒータとして、ステンレス箔の平板ヒータを水平に設置し、ヒータ温度の計測により熱伝達特性の解明を行った。同時に高速度カメラを用いた可視化観測により、蒸気膜挙動及び沸騰膜界面での熱流動状態の詳細な観測を行った。He II 中で発生する特異な膜沸騰現象の性質について明らかにする。

2. 研究成果の内容

可視化窓の付いている He II クライオスタットを用いて、超流動ヘリウム中に発生する飽和膜沸騰現象の可視化観測及び熱伝達測定を行なった。ステンレス箔の平板ヒータを用い、ヒータ抵抗の温度依存性を利用してヒータ温度の算出を行なった。図1に可視化観測により得られた、飽和 He II 中における膜沸騰を示す。本実験では、ノイジー膜沸騰、サイレント膜沸騰の二種類の沸騰モードが観測された。これらの膜沸騰モードは、ヒータ表面の圧力ヘッド(気液自由界面からヒータまでの液面深さ)によって発生領域が決まり、圧力ヘッドが大きい場合にノイジー膜沸騰、小さい場合にサイレント膜沸騰が発生する。(a)にノイジー膜沸騰の可視化写真を示す。この膜沸騰では、大きな蒸気泡が発生・成長・崩壊を繰り返し、大きなノイズを伴う特徴がある。一方、(b)に示すサイレント膜沸騰では、蒸気膜厚さは非常に小さく、その挙動は、蒸気界面でわずかに変動を起こすような、穏やかな沸騰状態である。

図2に二つの膜沸騰モードにおける、蒸気膜の振動する周期と蒸気膜厚さの関係を示す。両膜沸騰モードとも、圧力ヘッドの減少に伴って蒸気膜厚さが増加する。蒸気膜厚さが増加するに従って、蒸気膜振動の周期が減少する。この傾向は、両膜沸騰モードとも温度に依存



(a) ノイジー膜沸騰 (b)サイレント膜沸騰
 図1：飽和 He II 中における膜沸騰の可視化写真. (a) 温度 2.05 K, 熱流束 3.3 W/cm², (b) 温度 2.07 K, 熱流束 2.0 W/cm².

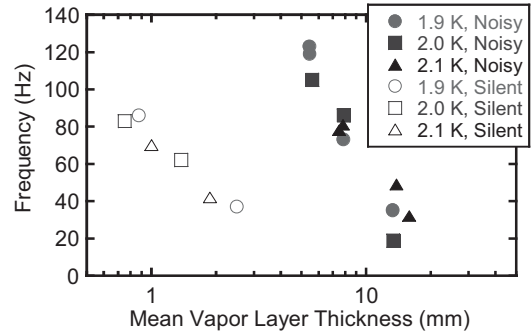


図2：蒸気膜振動の周期と蒸気膜厚さの関係. 熱流束 2.0 W/cm².

しない結果となった. ノイジー膜沸騰の蒸気膜厚さがある臨界値を越えると, 蒸気界面の熱流動状態が変化し, 沸騰モードが変化すると考えられる.

3. 研究目標の達成状況

He II 中に発生する膜沸騰モードの蒸気膜挙動と熱伝達特性の関連性を明らかにし, 各膜沸騰時の蒸気膜界面における熱流動状態を明らかにすることができた. しかし, He II 中に熱負荷が加わった際に発生する高密度量子化渦が伝熱状態に及ぼす影響は明らかにできなかった.

4. まとめと今後の課題

He II 中の飽和膜沸騰時の熱伝達特性と蒸気膜挙動の関連性を明らかにすることで, 飽和 He II 中に発生する膜沸騰現象の特徴の解明を行った. ノイジー膜沸騰, サイレント膜沸騰とも, 熱伝達率が増加するにしたがって, 蒸気膜厚さが減少し, 蒸気膜振動の周波数が増加した. 今後, より精度の高い計測技術を検討して, 高密度量子化渦挙動と膜沸騰熱伝達特性の関連性を明らかに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)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 野澤正和, 千葉真一, 大平勝秀, 木村誠宏: 超流動ヘリウム中の飽和膜沸騰における蒸気膜界面近傍の伝熱特性, 日本機械学会 2009 年度年次大会, (2009), pp.119-120.

*[2] M. Nozawa, N. Kimura, S. Chiba and K. Ohira: Study of Unstable Phenomena of Film Boiling in Superfluid Helium, *Proceedings of Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 38-39.

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	J09040
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.4~2010.3

スラッジ中の流体包有物による地熱資源の持続的生産性評価

Use of Fluid Inclusions in Sludge Sample for Estimation of Sustainable Geothermal Energy Production

関根 孝太郎*†, 安達 正敏**††

大関 仁志**, Brian Rusk***

*東北大学流体科学研究所, **奥会津地熱株式会社

***James Cook University

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

地熱地域の坑井掘削によって得られるスラッジやコア中の包有物を分析すると、その均質化温度が十分に温度回復した後の坑井内の検層温度と一致することが経験的に知られている。そのため地熱開発においては、坑井掘削によって乱されていない初期の地層温度を把握し、開発地域の地熱ポテンシャルを推定する目的で流体包有物分析が行われる。また流体包有物は、坑井検層では通常測定が困難である熱水の相状態や熱水に含まれる化学種等、フィールドの地化学モデルを考える上で重要な情報を与えることから、地熱開発において広く利用されている。

スラッジ中の流体包有物の温度測定を行うと、その均質化温度は前述のように地層温度に一致する傾向があるが、均質化温度は一般にある程度の分布を有する。すなわち、過去における地下流体の温度や組成変化の履歴が鉱物中にオーバーラップされている。包有物の特徴により地熱流体の時間的変遷が既知となれば、開発地域の熱履歴を把握できる。したがって、フィールドの長期的な熱エネルギー抽出量を外挿するための一手段として包有物を用いることができる。本研究では、スラッジ中の包有物を鉱物学的記載によって同じイベントにおいて捕獲されたと認定できる包有物のグループ、すなわち **Fluid Inclusion Assemblages** に分類し、包有物の均質化温度や捕獲流体の化学的特徴から熱水の変遷を明らかにすることを試みる。

2. 研究成果の内容

測定対象は福島県会津若松市の柳津西山地熱発電所 90N-24P 地熱生産井の深度 2380m から得られたスラッジである。粒径がおよそ 0.5mm の石英、硬石膏、斜長石の鉱物片を手選し、樹脂でスライドガラスに固定した後、厚さ 200 μ m 程度の両面琢磨片とした。石英片のみ CL 観察を行い、すべての包有物について塩濃度および均質化温度を Linkam 社製 Heating-freezing stage THMS600 によ

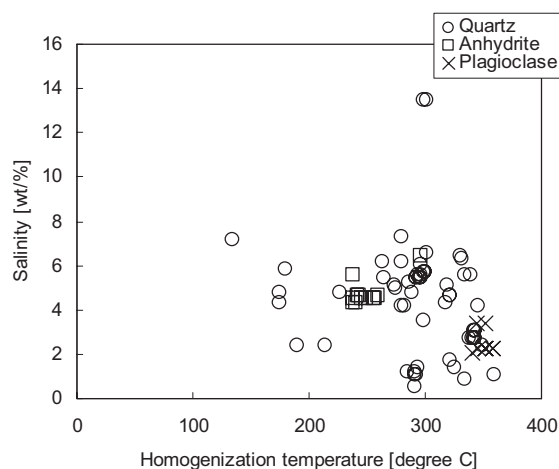


図1: 90N-24P 井深度 2380m スラッジ中の包有物の特徴

り測定した。包有物の気相については、顕微ラマン分光法によりガス組成の定性分析を行った。これらの測定後、石英片については、LA-ICP-MS 分析にて含まれる微量元素を測定した。

図 1 に包有物の均質化温度および塩濃度の関係を鉱物毎にまとめた。包有物の温度測定およびガス組成分析を行った試料は、石英 9 片、硬石膏 5 片、斜長石 3 片である。石英のうち、外形より明らかに熱水性の二次鉱物であると判断できるものは、柱面が発達した 1 片のみであり、含まれる液相包有物の均質化温度は 340°C、塩濃度は 2.7wt.%であった。石英中の包有物は概して、均質化温度および塩濃度において幅広い分布を持つ。同一の捕獲面に気液比の異なる包有物が捕獲されている場合も確認できることから沸騰流体を一部捕獲していた。一方、硬石膏および斜長石中の包有物は、均質化温度で 250°C、350°C にそれぞれ集中する。硬石膏に含まれる包有物は液相包有物であったが、斜長石に含まれる包有物は気相包有物であり CO₂ を含む。これら気相包有物は液相包有物をともなわないことから、蒸気圧曲線よりも低圧・高温な環境において捕獲されたものと判断できる。すなわち熱水活動の初期に比較的地殻浅部において存在していた高エンタルピー流体の痕跡であると考えられる。一方、LA-ICP-MS により石英中の微量元素を測定したところ、Al 含有率が 100ppm、Ti 含有率は 15~70ppm であった。近年提案されている石英中の Ti 含有率による鉱物温度計 (Wark & Watson, 2006, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 152, 743-754) を適用すると、石英の形成温度は、およそ 560~700°C である。以上の分析結果より、熱史について考える。中新世前期の大檜沢層の堆積環境は、含まれる石英中の Ti 含有量より 560~700°C であると考えられる。その後、火山性の地熱流体が 350°C 以上で生じ、同層の斜長石内に捕獲される。この火山性流体と天水との混合が生じ、温度低下および被り圧の低下により沸騰流体が生じる。この一部が石英内に捕獲された。硬石膏に含まれる包有物が最も現在に近い流体を捕獲しているものと考えられるが、これはスタンディングタイム 136 時間後の深度 2380m における検層温度である 300°C (三井金属資源開発株式会社, 90N-24P 総合解析報告書) よりも低い。また Seki (1991, *Geochem. J.*, 25, 245-265) により報告されている坑口から噴出する二相分離後の地熱流体よりも塩濃度が高く、成因が不明である。

3. 研究目標の達成状況

スラッジ中には地熱流体の変遷が記録されており、地熱地帯の熱史を把握する上で包有物の特徴を鉱物種毎また FIA 毎にまとめることの優位性は明らかと言える。一方で、貯留層の寿命管理に対して有益な情報とするためには、工夫が必要である。

4. まとめと今後の課題

包有物に含まれる流体のイオン分析等によりさらなる情報が必要である。また硬石膏に含まれる包有物の成因については不明であることから今後、検討が必要である。

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] K. Sekine, M. Adachi, H. Ozeki and B. Rusk.: Use of Fluid Inclusions in Sludge Sample for the Estimation of Thermal History of Geothermal Fields, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.48-49.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J09041
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technologies
Research period	April 2009 ~ March 2010

Production of Complex Plasma at Atmospheric Pressure

Takehiko Sato*†, Yutaka Iwafuchi**,

Tetsuji Shimizu***, Gregor Morfill***††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Graduate School of Engineering, Tohoku University

***Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Germany

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics is the world center of the research in “complex plasma”, which consists of plasma and charged fine particles. These particles interact each other under certain experimental conditions. They can form a crystal like structure under low pressure. The particles’ behaviors at atmospheric pressure have not been clarified yet, although the knowledge is important for industrial applications. The aim of this project is production of complex plasma at atmospheric pressure and analyses of its mechanism.

2. Details of program implement

2.1 Experimental setup and methods

To develop the complex plasma system, a plasma flow generated by a dielectric barrier discharge (DBD) was adopted in this study. Figure 1 shows the schematic of experimental setup. Kapton tape of 0.08 mm-thick and 50 mm-diameter was affixed on the plate ground electrode for insulation. Above it, a stainless steel mesh electrode whose diameter was 35 mm with 80 mesh/inch was placed. This electrode was fixed to the bottom of cylindrical glass chamber, the size of which is 50 mm in diameter and 22 mm in height. Two glass tubes were attached on the side of chamber as an inlet and an outlet of gas and droplets. Droplets were generated by a smoke machine and injected into the chamber through the glass tube. Plasma is generated by applying a sinusoidal voltage to the mesh electrode. Here, peak-to-peak applied voltage V_{pp} is 4 kV and frequency f is 6 kHz.

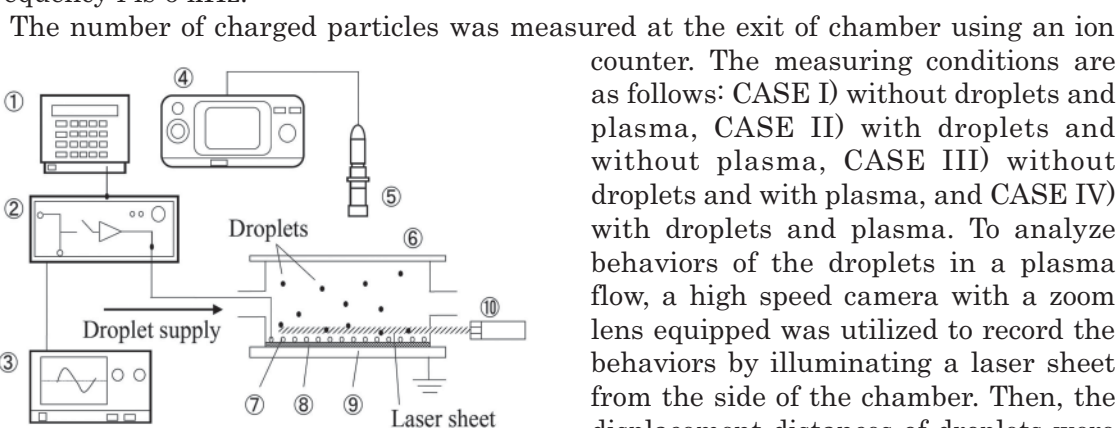


Fig. 1 Schematic of experimental setup. 1. Function generator, 2. Amplifier, 3. Oscilloscope, 4. High speed camera, 5. Zoom lens, 6. Chamber, 7. Mesh electrode, 8. Electrical insulated tape, 9. Ground electrode, 10. Laser

The number of charged particles was measured at the exit of chamber using an ion counter. The measuring conditions are as follows: CASE I) without droplets and plasma, CASE II) with droplets and without plasma, CASE III) without droplets and with plasma, and CASE IV) with droplets and plasma. To analyze behaviors of the droplets in a plasma flow, a high speed camera with a zoom lens equipped was utilized to record the behaviors by illuminating a laser sheet from the side of the chamber. Then, the displacement distances of droplets were analyzed by comparing the two kinds of images taken at interval 5 ms with or without plasma generation. The frame

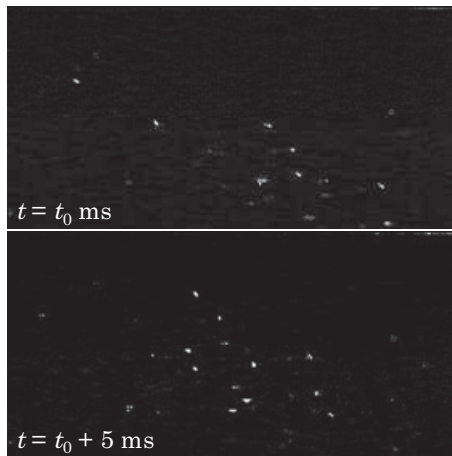


Fig. 2 Images of droplets dispersion

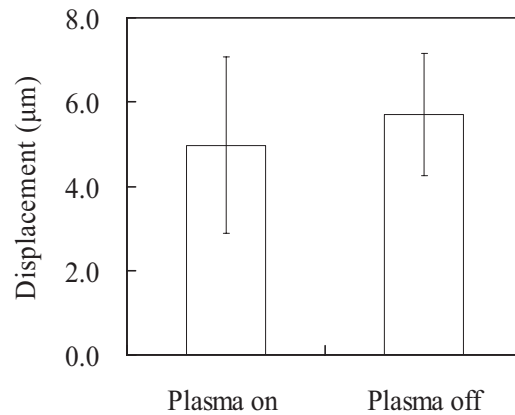


Fig. 3 Displacement distances of droplets position after 5 ms.

rate, shutter speed and resolution of the high speed camera comparing the two kinds of images taken at intervals of 5 ms with or without plasma generation. The frame rate, shutter speed and resolution of the high speed camera were 2000 fps, 1/4000 s, and 256 x 128 pixels, respectively. Magnification of zoom lens was 200 x.

2.2 Results

Figure 2 shows images of droplets dispersion. White spots in the high speed camera images show an appearance of droplet dispersion. Those particles moved in the plasma flow with keeping the similar dispersion pattern between the initial photograph and the photograph after 5 ms. Figure 3 shows the averaged displacement distance of droplets position after 5 ms. Measured displacements are 4.97 μm when plasma is generated and 5.70 μm when it is not generated. There is a possibility that the displacement distance between the nearest two droplets could be smaller when plasma is generated, although the difference is not significant. The difference might be caused by the Coulomb interaction between charged droplets in plasma affecting the movement.

3. Achievements

The planned steps which were “1. Generation of plasma at atmospheric pressure. 2. Levitation and confinement of fine particles in the plasma, 3. Analysis of particle behaviors, 4. Diagnosis of the particles’ behaviors,” had been almost completed. We also tried the formation of complex plasma on a water surface by using fine particles.

4. Summaries and future plans

We couldn’t conclude whether those particle behaviors are caused by the complex plasma or not. We will continue to clarify the particle behaviors on the water surface through the IFS collaborative research project 2010 which is to understand an interaction between a plasma flow and water.

5. Research results (* reprint included)

*[1] T. Sato, Y. Iwafuchi, T. Shimizu and G. E. Morfill: Production of Complex Plasma at Atmospheric Pressure, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.92-93.

*[2] 岩渕豊, 清水鉄司, Gregor Morfill, 佐藤岳彦: 水面近傍に形成した大気圧プラズマ流の気液流動場解析, 日本機械学会東北支部第 45 期総会・講演会講演論文集, 仙台, (2010), pp.230-231.

Project code	J09042
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technologies
Research period	April 2009 ~ March 2010

Mechanism of Bubble Generation and Disappearance by Plasma

Takehiko Sato*†, Mohamed Farhat**††, Masanobu Oizumi***

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Laboratory for Hydraulic Machines, EPFL, Switzerland

***Graduate School of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Cavitation phenomenon, which denotes the formation within a liquid of bubbles filled with vapour and gas due to pressure decrease, is a challenging issue from fundamental point of view as well as a variety of industrial applications. The research groups led by Prof. Sato (Tohoku University) and Prof. Farhat (EPFL-LMH), set up a joint program to investigate this phenomenon with a special focus on chemical reactions involved in the collapse of a single cavitation bubble. To this end, a specific experimental setup was built to allow for a bubble generation with the help of pulsed focused laser and underwater electric spark.

2. Details of program implement

Figure 1 shows an experimental apparatus which consists of a vessel, electrodes and a power supply for discharge, a laser source and an optical system for focusing, a delay generator for adjusting the start of bubble generations, and a high speed camera and a lens. The vessel is filled with ultra pure water. The platinum electrode is set with a gap of 0.075 mm. A high voltage was applied to the electrode to generate a discharge, which in turn results in generation of bubbles. A bubble was generated by the laser which is focused on the point located at 13 mm from the tip of electrodes. Both bubble behaviors are observed simultaneously at 75,000 fps and $1 \mu s$ of an exposure time by a high speed camera with a flash xenon lamp. To generate both bubbles simultaneously, the timing of laser pulse was adjusted by the delay generator and the discharge power.

Figure 2 shows the generation of concurrent bubble by laser and discharge at $t = 0 - 734 \mu s$, which bubble maximum diameter is around 2.3 mm. The left and right bubbles are generated by the laser and the discharge, respectively. The both bubbles expand to the maximum until around $t = 147 \mu s$ and then they started to shrink. The bubbles repeated expansion and collapse several times with decreasing of the bubble size, especially in the case of the discharge. The time dependence of bubble sizes derived by theoretical analysis agrees with experimental results.

3. Achievements

In 2009, Prof. Sato and Mr. Oizumi visited EPFL to clarify the chemical reaction mechanism by analysis of water

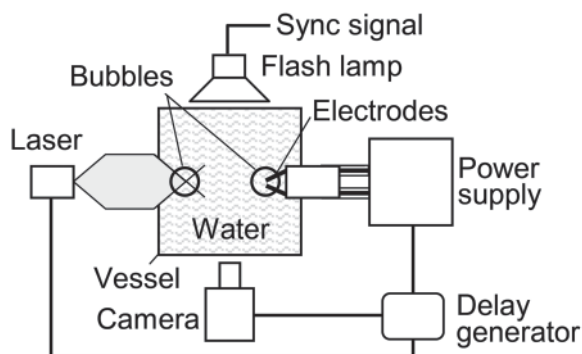


Figure 1: Experimental setup.

characteristics and optical emission spectroscopy with Prof. Farhat and Mr. Tinguely. Prof. Sato stayed for one month as a visiting professor and Mr. Oizumi stayed for two months to analyze the results. We already clarified the bubble generation and disappearance process by plasma and the effect of the chemical reaction in the process of the bubble generation and collapse.

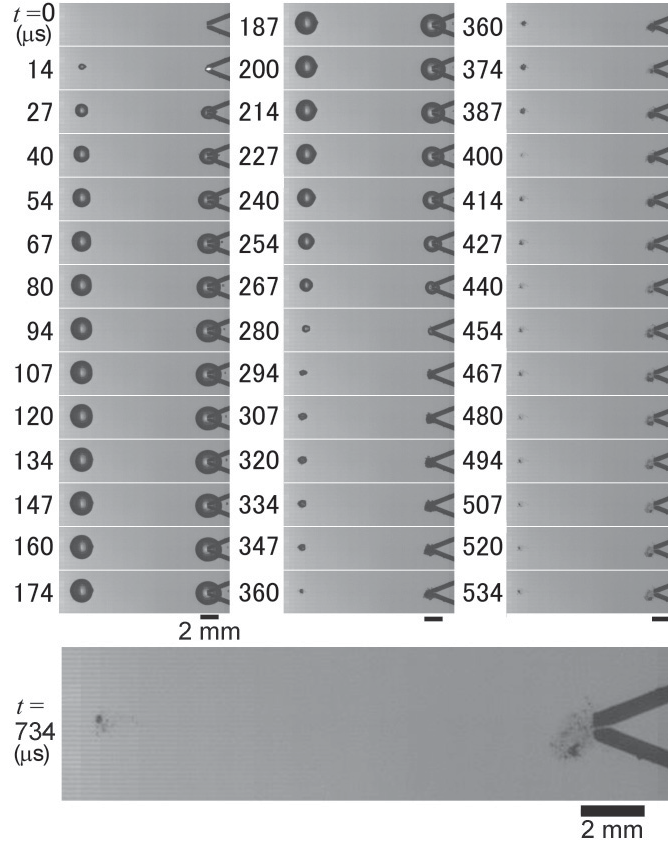


Figure 2: Process of concurrent bubble generation and collapse. The left bubble is generated by the laser focus and the right bubble is generated by the discharge.

4. Summaries and future plans

- (1) Concluding the effect of the chemical reaction and submitting a journal paper.
- (2) Analyze the collapse and disappearance process of micro bubbles after collapse of millimeter bubble generated by the laser and discharge.
- (3) Enhance exchange of researchers between EPFL and Tohoku Universities.

5. Research results (* reprint included)

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

*[1] T. Sato, M. Oizumi, M. Tinguely and M. Farhat: Mechanism of Bubble Generation and Disappearance by Plasma, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.90-91.

- 3) Patent, award, press release etc. (patent, award, press release, note should be listed here if applicable)
Not applicable

Project code	J09043
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2009 ~ March 2010

Molecular Dynamics Study about Lubrication Phenomena of Liquid Bridges

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

*Institute of Fluid Science, Tohoku University,

**LaMCoS, INSA-Lyon

†Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

In lubricated contacts, when the lubricant supply is not sufficient to fill the gap between the solid surfaces, or when the wettability conditions are bad, the film can fractionate into disjointed liquid bridges. This phenomenon occurs at many places in industry and the analysis of the lubrication phenomena in liquid bridge is very important. Especially, if the width of liquid bridge, or the gap between surfaces, is nanometer, interfacial regions cannot be neglected and therefore the characteristics of liquid bridge cannot be analyzed on a macroscopic point of view. It is the aim of this work to investigate the dynamic behavior of liquid bridges by Molecular Dynamics method, and to focus on the nanoscale phenomena occurring in the interfacial regions.

2. Details of program implement

In this year, the simulation system is constructed. 1152 Si atoms were used as the surface and water was used as the lubricant. The number of water molecules were changed according to the width of the liquid bridge. The simulation system was shown in Fig. 1. The velocity of Si wall was controlled to $V=\pm 100$ m/s. Stillinger and Weber potential was used as the Si surface and SPC/E potential was used as the interaction between water molecule. Firstly, a simulation was performed to reach the steady state of the system. It is confirmed that the properties of the system keep constant. After reaching the steady state, the velocity gradient of the system, density contour and forces acted on the surface from the water molecules were sampled and viscosity coefficient of the liquid bridge was estimated from these values. It was found out that the viscosity coefficient was decreased with the increase in the width of the liquid bridge.

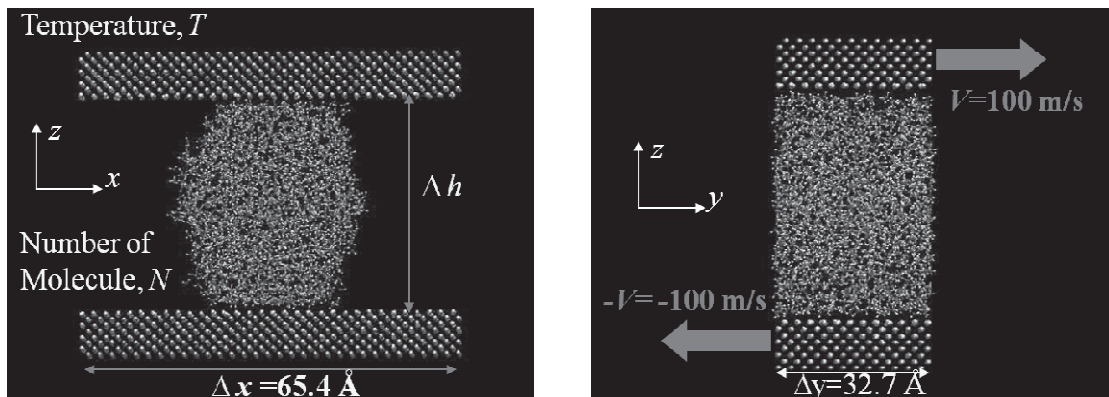


Fig. 1. Schematic diagram of the simulation system.

3. Achievements

In this year we can make the program to calculate the viscosity coefficient of liquid bridge and the dependence of the width of the liquid bridge on viscosity coefficient can be analyzed according to the application form. However, the detailed analysis of the viscosity coefficient, in which the momentum flux is divided into two parts, the one which passes through bulk of the liquid bridge and the other which passes through its interfacial region, cannot be analyzed.

This year we invited Philippe Vergne, a professor in INSA-Lyon three days for discussion about our collaborative research and he attended the GCOE/AFI/TFI conference.

4. Summaries and future plans

Next year we make a program to analyze the momentum flux in the liquid bridge in detail. We think that we have to analyze the phenomena without surfaces firstly because the surface make the shape of the liquid bridge complicated (like a barrel) and it makes the detailed analysis difficult. After the detailed analysis, we extend our method to the hydrophobic and hydrophilic surface (SiO_2 surface) and the dependence of the surface on viscosity of liquid bridge will be investigated.

5. Research results (* reprint included)

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

Not applicable

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

[1] T. Tokumasu, M-H, Meurisse, N. Fillot and P. Vergne: Lubrication Phenomena of Nanoscale Liquid Bridges by Molecular Dynamics Method, *Proceedings of the World Tribology Congress 2009*, (2009), pp.620.

[2] H. Bello, N. Fillot, P. Vergne, T. Tokumasu, T. Ohara and G. Kikugawa,: The Effect of Different Thermostating Techniques on Friction and Dissipation in Molecular Dynamics Simulations of Confined Lubrication Films, *Proceedings of the World Tribology Congress 2009*, (2009), pp.622.

*[3] T. Tokumasu, M-H, Meurisse, N. Fillot and P. Vergne: Molecular Dynamics Study about Lubrication Phenomena of Liquid Bridges, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.88-89.

- 3) Patent, award, press release etc.

Not applicable

課題番号	J09044
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2009.4~2010.3

液体水素の熱・輸送物性に関する分子論的研究
Molecular Study of Thermodynamic/Transport Properties of Liquid Hydrogen

徳増 崇*†, 坪井 伸幸**††, 津田 伸一***, 永島 浩樹****

*東北大学流体科学研究所, ** (独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

*** (独)宇宙航空研究開発機構情報・計算工学センター, **** 青山学院大学理工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

水素は現在液体ロケットエンジンの主力推進剤として用いられているが、液体ロケットエンジン内部での推進剤の温度圧力範囲は極めて広く、このような幅広い熱力学的条件のもとで、複雑かつ多様な物理化学現象が生じている。この水素の熱・輸送物性値の予測、とりわけ超臨界状態での熱・輸送物性を予測することは工学的にも非常に重要であるが、水素は量子効果が顕著に表れるため、通常の古典的な取り扱いが困難であり、まだ信頼のおけるデータが得られていない。本研究ではこの水素の熱・輸送物性を分子論的に解析することを目的とする。特に今年度は水素の量子性が熱・輸送物性に与える影響について解析することを目的とした。

2. 研究成果の内容

本研究では、LJ ポテンシャル、2CLJ ポテンシャル、exp-6 ポテンシャルの3つの分子間ポテンシャルを用いて低温水素の熱物性の再現性の検討を行った。検証方法には古典分子動力学法を用い、様々な温度・密度における圧力やエネルギーを計算し、状態方程式を導出した。以下にこの状態方程式から導出した飽和線と実験値と比較を図1に示す。

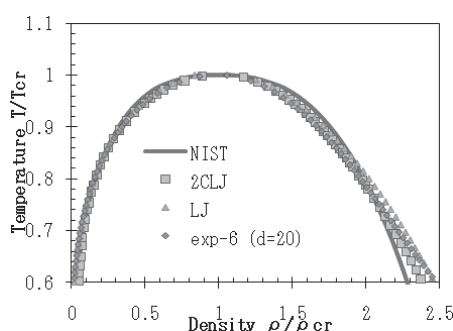


Fig.1 Comparison of the Temperature and Density saturation curve between each potential

図1より高密度領域において、計算結果は実験値を再現できておらず、不安定領域が広がっている事がわかる。この要因として、量子効果、多体効果、ポテンシャルの精度の低さなどの要因が考えられる。そこで、GAUSSIAN03を用いて分子軌道計算を行い、高精度の分子間ポテンシャルを求めた。このポテンシャルを用いて同様に温度・密度条件を与え分子動力学計算を行った。その結果を図2に示す。

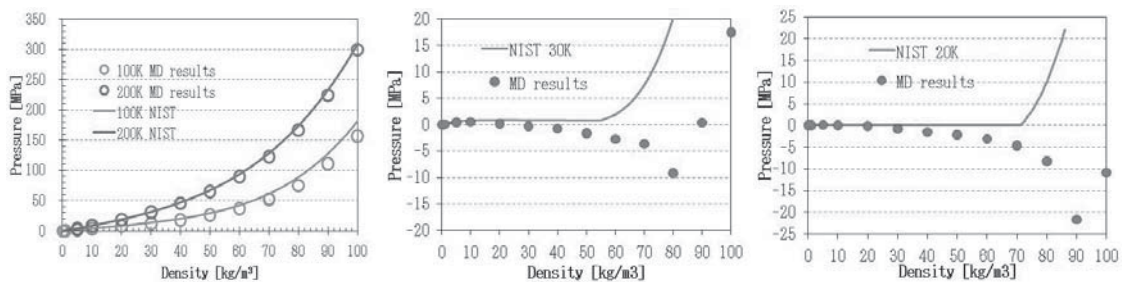


Fig.2 Comparison of the Pressure and Density curve between MD results and NIST data

図 2 より 100K 以上の超臨界領域においては、古典的手法を用いて水素の熱物性を再現できることがわかる。しかし、亜臨界領域においては高精度のポテンシャルを用いても水素の熱物性を再現することができず、実験値と比較すると不安定領域が広がっていることがわかる。このことは先に示した代表的な古典的ポテンシャルと同様の傾向であり、これより低温水素の熱物性に対するポテンシャルの影響は小さいと言える。現在のところ、不一致が生じる最も大きな要因として量子効果の影響が考えられ、液体水素の熱物性を再現する為には、古典的な手法ではなく、量子効果を考慮した非古典的な手法を用いる必要があると言える。

3. 研究目標の達成状況

(1)の古典的な分子モデルによる状態方程式の検討については、今年度の目標は達成できたと考えているが、半古典的な手法における状態方程式や輸送物性の計算についてはまだ達成されておらず、来年度以降の目標である。

4. まとめと今後の課題

100K 以上の水素の熱物性に対しては、古典的手法を適応できる可能性がある為、まずは 100K 以上の超臨界領域において、古典的な手法を用いて水素の輸送物性を再現できるかの検証を行う必要がある。一方で臨界点近傍と亜臨界領域においては、古典的な手法では低温水素の熱物性を再現できない為、非古典的な手法を用いる必要がある。今後は、経路積分セイントロイド MD の手法を用いて、低温水素の熱輸送物性の検証を行っていく予定である。

5. 研究成果

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[1] 永島浩樹, 徳増崇, 津田伸一, 坪井伸幸, 林光一, 機械学会年次大会 2009 年度年次大会, T0501-3-1, pp.119-120.

*[2] H. Nagashima, T. Tokumasu, S. Tsuda, N. Tsuboi and A. K. Hayashi, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.96-97.

*[3] H. Nagashima, T. Tokumasu, S. Tsuda, N. Tsuboi and A. K. Hayashi, *48th AIAA Aerospace Science Meeting*, AIAA 2010-994.

[4] 永島浩樹, 徳増崇, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 航空宇宙学会北部支部 2010 年講演会, JSASS-2010-H012, pp.87-90.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

Project code	J09045
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2009 ~ March 2010

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

Julien Fontaine*†, Toshiyuki Takagi**††
Takanori Takeno***, Maxime Ruet*,
Hiroyuki Miki**, Michel Belin*,
Koshi Adachi****

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

**Institute of Fluid Science, Tohoku University

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

****Faculty of Engineering, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

Me-DLC nanocomposite coatings have been deposited thanks to a hybrid process, combining rf-PECVD for DLC matrix and magnetron sputtering for metal inclusions. Several metals were considered: copper, iridium and tungsten. The size and distribution of clusters varied significantly with metal sputtering rate and DLC deposition rate, leading to various mechanical and electrical properties. Tribological behavior of these coatings was characterized with a ball-on-flat reciprocating tribometer operating in ambient air, using 52100 bearing steel balls (diameter: 6 mm) under a normal load of 0.5 N, with a stroke length of 3 mm at a sliding speed of 2 mm/s. This tribometer is besides allowing electrical contact resistance measurements.

For a hard metal like tungsten, the wear was mild for the coating even at high metal contents. However, the friction was increasing with increased metal content, reaching values larger than 0.3, with large wear of the ball. Although the electrical contact resistance was reaching 10 Ω range, it was always very noisy and increased

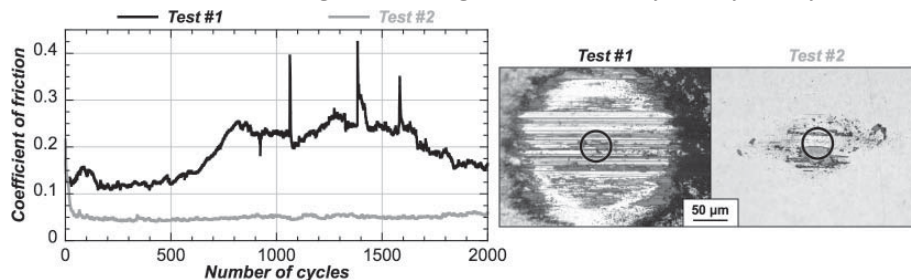


Figure 1: Two typical evolutions of friction coefficient during sliding of Ir-DLC plate against steel pin (left), and optical micrographs of corresponding pin wear scars (right).

towards the end of experiments, probably due to abundant oxidized wear debris. In the case of iridium [1], a hard and inoxidizable metal, two types of tribological behavior were observed, even on same sample (Fig. 1). After running-in, either friction remained at low values (< 0.1) or it became high and unstable (> 0.15). Thanks to experiments of shorter duration, we could establish that an Ir-rich tribofilm was formed on the ball during running-in. In the case of low friction, this tribofilm remained on the ball wear scar. However, when friction was high, the tribofilm was removed, with large wear of the ball. In both cases, the electrical contact resistance was low ($\sim 10 \Omega$), and especially stable in case of low frictional behavior.

3. Achievements

Innovative Me-DLC films having good electrical conductivity, good tribological behavior and improved durability are developed and characterized. The material design concept for such smart coatings was established.

4. Summaries and future plans

Some optimal deposition conditions have been found for Ir- and Cu-containing DLC, which allow the build-up of tribofilm on counterface. Such tribofilm controls the evolution of friction coefficient, and allow here to get a low friction with some electrical conductivity. These collaborative activities will continue in 2010 and later as follows: 1) To develop of innovative Me-DLCs (in IFS), 2) To investigate the tribofilm build-up process and the further control of the tribological and the electrical behaviors of Me-DLCs (in LTDS, ECL)

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
 - *[1] H. Miki, K. Ito, T. Sugawara, J. Fontaine, T. Takeno, M. Ruet, M. Belin, K. Adachi, T. Takagi: Friction and Electrical Contact Resistance of Iridium-Containing DLC Coatings for Electrically Conductive Tribo-Elements, *Tribology Online*, 4(2009), pp. 60-65.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
 - *[2] J. Fontaine, H. Miki, T. Takeno, K. Ito, M. Ruet, M. Belin, K. Adachi, T. Takagi: Tribological Behavior and Electrical Contact Resistance of Metal-Containing DLC Coating for Electrically Conductive Tribo-elements, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.98-99.
 - [3] J. Fontaine, H. Miki, M. Ruet, T. Sugawara, T. Takeno, K. Ito, M. Belin, K. Adachi, T. Takagi: Tribological behavior of metal-DLC nanocomposite coatings: the critical role of tribofilm build-up, *World Tribology congress 2009*, (2009), p.676.
 - [4] Julien Fontaine, M. Ruet, S. Bec, C. Guerret-Piécourt, M. Belin, H. Miki, T. Takeno: Tribological Properties of Nanocomposite Metal-Containing DLC Coatings: the Key-Role of Metal Flow Between Sliding Surfaces, *Proceedings of the Sixth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2009), pp.100-101.
 - [5] H. Miki, J. Fontaine, T. Sugawara, T. Takagi, T. Takeno, K. Adachi, K. Ito, M. Ruet, S. Bec, C. Guerret-Piécourt, M. Belin: CarbonCoat: Tribologically-based Design Strategies for Advanced Carbon Coatings, *2010 Annual ELYT lab Workshop*, (2010).
 - [6] J. Fontaine, H. Miki, T. Takeno, M. Ruet, K. Adachi, T. Takagi: Carbon-Metal Nanocomposite Coatings for Smart Tribological Interface Control, *2010 Annual ELYT lab Workshop*, (2010).

課題番号	J09046
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	2009.4～2010.3

脳動脈瘤用ステントの開発

Development of Stent for Cerebral Aneurysm

太田 信*†, 中山敏男**††

*東北大学流体科学研究所, **東北大学大学院医工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

脳動脈瘤の破裂は生命の危機に直面する非常に危険な疾患であり、年間に人口一人に数人の割合で生じていると報告されている。この危険な疾患から生命を守るためには、未破裂瘤治療が有力である。この治療法の一つとして患者に対する身体的な負担も少なく全世界から注目されている血管内治療がある。ステント留置術は脳動脈瘤の親血管部分にステントと呼ばれる侵襲を留置することで瘤内に流入する血流を阻害し、血栓化を促進、治癒膜を形成することで脳動脈瘤の完治を図るものである。

ステントの効果については数値流体力学(CFD)解析によって瘤内のフローリダクション(FR)効果が報告されている。これまでに実形状のステントおよび脳動脈瘤を用いた CFD 解析の手法の開発を行い、その効果の検証を進めてきた。その結果、ステントストラットの配置や位置が FR 効果に大きく影響することがわかり、FR 効果の大きい配置や位置を探索する必要があると考えた。そこで本研究では、FR 効果の大きい脳動脈瘤用のステント開発することを目的とする。

2. 研究成果の内容

本研究では、(1)研究対象となる動脈瘤形状の構築、(2)脳動脈瘤用ステントの構築、(3)CFD 解析、(4)CFD 結果から最も有用なステントストラットの導出の行程より、有用なステントストラットパターンの導出を行った。特に(3)、(4)においてはコンピュータによる計算量が多いので流体科学研究所所有の afimii, afigvs3 を用いた。

(1)理想動脈瘤形状

理想化された動脈瘤形状(理想動脈瘤形状)に対する有用なステントストラットパターンの探索を行った。形状は、親血管を直円管、動脈瘤を球で模擬し、ネックの形状を円にするために円柱を用いて親血管と動脈瘤を接続したものである。また、親血管の直径を 4.0[mm]、長さを 50[mm]、動脈瘤直径を 8.0[mm] とした。

(2)脳動脈瘤用ステント形状

基となるステントストラットパターンから形状を変化させ、有用なステントストラットパターンの探索を行う。ステントには空隙率 80%の拘束条件を設けた。

(3)数値流体力学解析

理想動脈瘤形状にステントを留置した各々の形状に対して CFD 解析を行った。

メッシュは複雑形状に対応する四面体メッシュを採用、メッシュジェネレーター (Gambit 2.3 (Fluent, Inc, NH.)) にてメッシュ生成を行った。メッシュの数は各々の形状で約 700,000 要素、ステントストラット周辺メッシュは CFD 結果に大きく影響するために他の領域より細かくした。

CFD 解析には定常解析を用いた。血流は単純化のため等温・非圧縮・層流のニュートン流

体とし、密度・粘性は血液の値を設定した。脳動脈を流れる血流のレイノルズ数を約 240 と仮定、入口端では 0.200[m/s]の一樣流を設定した。出口端では圧力 0[Pa]を設定、血管・瘤・ステント壁面は No-slip と設定した。ニュートン流体を仮定しているため基礎方程式は連続の式とナビエ・ストークス方程式であり、基礎方程式の離散化には有限体積法を用いた。数値解法には数値流体力学解析ソルバ (Fluent6.3(Fluent. Inc., NH.)) を使用した。

(4)CFD 結果から最も有用なステントストラットの導出

脳動脈瘤内の流速と WSS を評価指標とし、これらの指標がもっとも低下したステントストラットパターンを有用なステントストラットとする。しかしながら、流速と WSS という 2 つの評価指数があり、個々に評価したのでなく総合的に評価を行った。図 1 に横軸に動脈瘤内の流速比 (各流速/最大流速) と縦軸に WSS 比 (各 WSS/最大 WSS) をプロットしたものを示した。原点からプロット点までの間距離が短いほど良いケースと考えた。よって、125[μm]のステントが今回のベストケース(BC)であり、155[μm]がワーストケース(WC)となる。

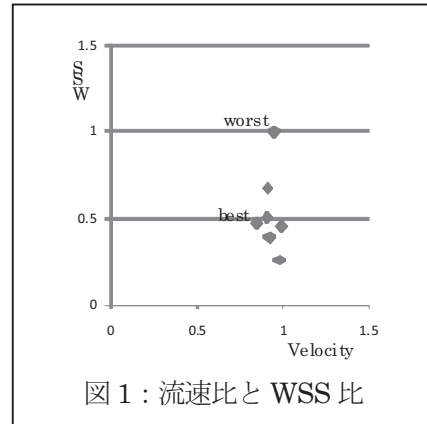


図 1 : 流速比と WSS 比

3. 研究目標の達成状況

目標を達成できたと考える。

4. まとめと今後の課題

有用なステントストラットパターンの導出が可能になった。今後の課題としては、最適化手法を取り入れることにより、今回開発した手法より有用なステントストラットパターンの導出を行う。

5. 研究成果 (国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等, *は別刷あり)

- *[1] T. Nakayama, K. Srinivas, M. Ohta: Development of Stent for Cerebral Aneurysm, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.68-69.
- [2] 中山敏男, 鄭 信圭, Srinivas Karkenahalli, 太田 信: 脳動脈瘤内の血液を低下させるためのステントストラットの探索結果, *Proceedings of the 22th Bioengineering Conference 2009 Annual Meeting of BED/JSMD*, (2009), pp.33.
- [3] M. Behnia, K. Srinivas, M. Ohta, T. Nakayama: Rheology-Fluid dynamics of Blood Flow Modeling and Simulation, *Proceedings of the Third Annual Scientific Meeting and Workshops*, New Zealand, (2010), pp.203-222 (招待講演).
- [4] T. Nakayama, K. Srinivas, H. Anzai, M. Ohta: Development of Stent Designing for Cerebral Aneurysm, *2010 Annual ELYt Workshop*, France, (2010), pp.14-16.
- [5] H. Anzai, Y. Takeshima, T. Nakayama, M. Ohta: 3D Visualization of Numerical Simulation of Blood Flow on Intracranial Stent, *International Intracranial Stent Meeting 2009*, Sendai, Japan, Aug. 5-7, (2009), p.93.
- [6] H. Anzai, T. Nakayama, Y. Takeshima, M. Ohta: 3D Visualization of Numerical Simulation of Blood Flow on Intracranial Stent, *Third Switzerland-Japan workshop on Biomechanics 2009(SLB 2009)*, Institute for Biomechanics, ETH Zurich, Engelberg, Switzerland, Sep. 1-4, (2009), p.72.
- [7] 安西 眸, 竹島由里子, 中山敏男, 太田 信: 3次元可視化システムを用いた脳動脈瘤ステント周りの血流数値解析の可視化, *機械学会年次大会 2009, Vol.6*, pp.177-178.

課題番号	J09047
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2009.4~2010.3

プラズマ気泡生成法の開発

Development of Bubble Generation Method by Plasma

佐藤 岳彦*†, 中谷 達行**††

*東北大学流体科学研究所, **トーヨーエイトック株式会社

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

平成 21 年度の公募共同研究では、水中プラズマによる気泡生成機構を解明するために反応現象ならびに放電部のプラズマ熱流動現象を解析した。

図 1 に実験装置の概略を示す。ガラス製容器内に針状電極とリング状接地電極を設置し、超純水 100 ml 中で放電を発生させた。電極は白金線($\phi 0.3$ mm)を用い、放電は高電圧増幅アンプにより電極間に正極パルス電圧と負極パルス電圧を印加した。 H_2O_2 の溶存濃度測定は、 H_2O_2 の検出に、低濃度 0.02~2.5 (mg/l) では主試薬に酵素と 4-アミノアンチピリンを用いた酵素法、高濃度 4.0~700 (mg/l) では主試薬にヨウ化カリウムを用いたヨウ化カリウム比色法を用いた。

図 2 に示すように、放電時間と共に H_2O_2 溶存濃度は上昇し、2 分間の放電で正極パルス電圧では 1.5 mg/l、負極パルス電圧では 1.0 mg/l 程度になり、正極パルス電圧の方が負極の場合より

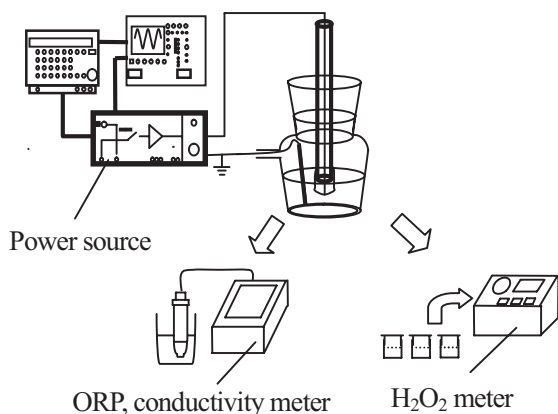


Figure 1: Schematic of experimental set up.

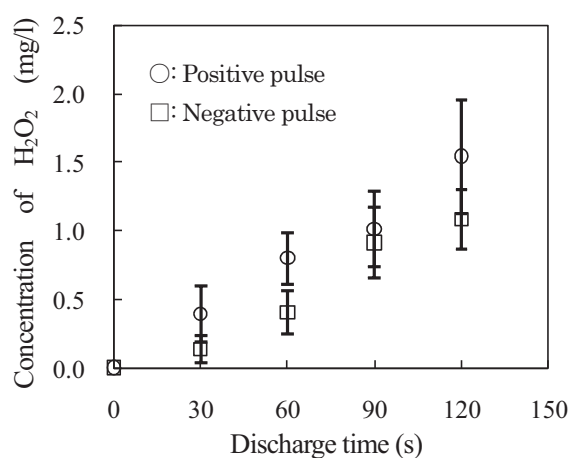


Figure 2: Effect of pulse polarity and discharge time on H_2O_2 concentration.

もより H_2O_2 が生成されていることが明らかになった。これは、正極と負極における放電形態が異なるためと考えられたため、放電部の可視化を行った結果、正極と負極においては放電形態が大きく異なることが明らかになった。すなわち、正極においてはストリーマ状の放電が水中に進展するのに対し、負極においては電極近傍のみにストリーマ群が生成され、放電形態の違いが反応現象の違いに大きな影響を与えていることが示された。さらに、これらストリーマ生成時に電極近傍において熱による気泡が生成されていることが、1 Mfps の高速度カメラの観察により明らかになった。

3. 研究目標の達成状況

本研究では、プラズマにより形成される気泡の状態や挙動を明らかにすることを目的とし、水中プラズマにおける気泡の生成要因を概ね解明した。また、プラズマにより生成される気泡と混在する、水中の気泡自然発生現象についても検証した。現在、論文投稿を準備している段階である。

4. まとめと今後の課題

本研究では、プラズマ生成時の主に熱により気泡が生成されていることが明らかになったが、水中放電に伴う気液界面の超高速非定常現象については、100 ns で放電が生成消滅することから、さらに時間分解能を上げてその詳細を解明していく必要がある。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] T. Sato, M. Oizumi, T. Miyahara and T. Nakatani: Development of Bubble Generation Method by Plasma, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.102-103.

*[2] 佐藤岳彦, 大泉雅伸, 宮原高志, 中谷達行: 水中プラズマによる水の特性変化への印加電圧極性の影響, 電気学会プラズマ技術委員会プラズマ研究会, 大阪, (2009), pp.33-36.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J09048
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2009.4~2010.3

低誘電率薄膜エッチングのための中性ビームを用いた地球共生型ガスケミストリの研究
 Environmentally Harmonized Gas Chemistry using Neutral Beam for Low-k Etching

斉藤 修一*†, 曾田 栄一*, 陣内 佛霖**, 寒川 誠二**††

*半導体先端テクノロジーズ, **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

ULSIにおける配線層間絶縁膜の静電容量による信号遅延が顕著になってきており、従来のSiO₂絶縁膜に代わる比誘電率の低い材料（低誘電率膜）の導入が進んでいる。一方、半導体に使用される絶縁膜のエッチング加工では、フロロカーボン(C₂F₆, C₅F₈, C₄F₈)などの地球温暖化係数の高いガスが使用されている。今後の低誘電率薄膜のエッチング加工では、地球共生型のガス（=地球温暖化係数の低いガス）を用いたプラズマによって、高精度な加工を行う必要がある。既に地球温暖化係数がほぼ0に近いCF₃Iによる低誘電率薄膜のエッチング技術が提案されている。本研究では、CF₃Iによる低誘電率薄膜のエッチングにおける低ラフネスのメカニズムについて詳細な検討を行うことを目的とする。

2. 研究成果の内容

CF₃I および CF₄（従来ガス）プラズマを用いて ArF フォトリソグレイブ/反射防止膜(ARC)/スピネ酸化膜(SOC)/スピネカーボン膜(SOC)の多層レジスト構造の SOG エッチングを行った。図1にラインエッジラフネス(LER)のレジスト寸法(Resist CD)依存性を示す。CF₃I で加工した場合には、エッチング前の ArF レジストの LER とほぼ変わらないのに対し、CF₄ で加工した場合には、LER は大きくなった。このメカニズムを明らかにするため、UV ランプ、中性ビーム(NB)、容量結合プラズマ(CCP)照射後の ArF レジスト表面 SEM 観察を行った（図2）。UV ランプおよび CF₃I, CF₄ の NB では表面ラフネスはほとんど見られない。しかし、CCP では大きなラフネスが見られる。特に CF₄ CCP では、表面に厚い改質層が見られた。

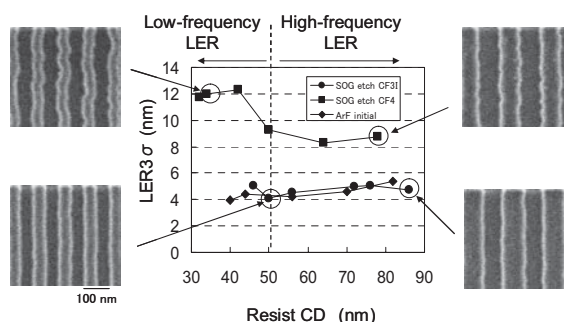


図1 LERのレジスト寸法依存性

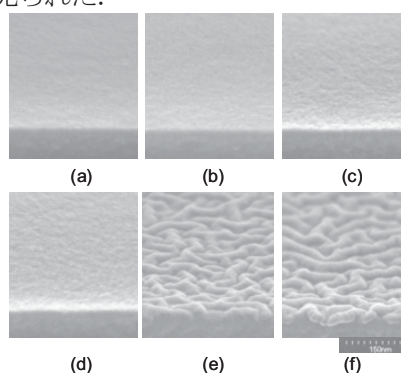


図2 ArFレジスト表面SEM観察写真
 (a)未照射, (b) UV照射, (c)CF₃I NB,
 (d) CF₄ NB, (e) CF₃I CCP, (f) CF₄ CCP

さらに、プラズマ照射後の深さ方向 XPS 観察を行った（図3）。CF₃I では 40nm の深さまで、CF₄ では 80nm の深さまで酸素密度が減っている。また、プラズマ照射後のウエハにかかる応力

を調べたところ、 CF_3I では応力が少なく、 CF_4 では大きい値を示した。一方、以前に行った FTIR の解析では、 ArF レジストポリマー中のエステル結合の $C=O$ 結合が UV 照射により切断されることが分かっている。これらのことから考えると、UV 照射により $C=O$ 結合が切断され、そのダングリングボンドに F が吸着して形成される CF 改質層が縮むことにより、 ArF レジスト膜に応力を与え、ラフネスが発生すると考えられる。 CF_3I プラズマは CF_4 プラズマに比べて紫外線強度が低く、フッ素発生量が少ないため、 CF 改質層が薄く、ラフネスの発生が低く抑えられる。

3. 研究目標の達成状況

フロロカーボンプラズマを用いたエッチングプロセスによる ArF レジストのラインエッジラフネスについて、詳細な評価を行い、十分な知見を得た。また、 CF_3I プラズマは従来フロロカーボンプラズマに比べて F ラジカルが少なく、紫外線強度が低いいため、 ArF レジストのラフネス低減に有効であることが示され、研究目標を十分に達成している。

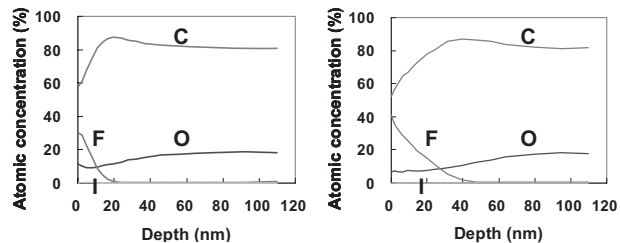


図3 XPSによる ArF レジスト深さ方向成分分布
(左) CF_3I , (右) CF_4 プラズマ

4. まとめと今後の課題

フロロカーボンガスを用いたエッチングプロセスにおける ArF フォトリソレジストの LER 発生メカニズムについて議論した。 ArF レジストポリマー中の $C=O$ ボンドが UV 照射により切断され、 F ラジカルが表面に CF 改質層を形成する。この CF 改質層が ArF レジストにストレスをかけるため、ラフネスが生じる。 CF_3I プラズマは紫外線強度が低く、 F ラジカル量も少ないので、従来ガスである CF_4 に比べてラフネスを低減することが可能である。

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌 (査読つき国際会議, 解説等を含む)

[1] E. Soda, N. Oda, S. Ito, S. Kondo, S. Saito and S. Samukawa, Reduction effect of line edge roughness on time-dependent dielectric breakdown lifetime of Cu/low-k interconnects by using CF_3I etching, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol.27, No.2, (2009) pp.649-653.

*[2] Eiichi Soda, Seiichi Kondo, Shuichi Saito, Koji Koyama, Butsurin Jinnai and Seiji Samukawa, Mechanism of reducing line edge roughness in ArF photoresist by using CF_3I plasma, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 27, No. 5, (2009), pp. 2117-2123.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[3] Butsurin Jinnai, Eiichi Soda, Koji Koyama, Shuichi Saito and Seiji Samukawa, Effect of UV Photons and Radicals for Low-Frequency Line-Edge Roughness (LER) of ArF Photo-resist during Fluorocarbon plasma etching, *2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2009)*, D-8-3, Sendai, (2009).

*[4] Shuichi Saito, Eiichi Soda, Butsurin Jinnai, Koji Koyama and Seiji Samukawa, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp. 78-79.

3) その他 (特許, 受賞, マスコミ発表等)

なし

課題番号	J09049
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	2009.5～2010.3

極低温気液二相流体の管内流動・伝熱特性に関する研究

Flow and Heat Transfer Characteristics of Cryogenic Gas-liquid Two-phase Flow in a Pipe

小林 弘明*†, 太平 勝秀**††

田口 秀之*, 小島 孝之*, 本郷 素行*, 清水 領***

*(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA), **東北大学流体科学研究所

***東北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

JAXA では長期ビジョン 2025 においてマッハ 5 クラスの極超音速機技術を実証することを目標に研究開発を実施中であり, エンジン始動時(室温→極低温)の流量制御精度向上のために, 極低温気液二相流体の流動・伝熱特性を取得する必要がある. JAXA では平成 21 年度に流動・伝熱試験装置を製作し, 液体水素のデータを取得する予定であるが, 取得データの信頼性, 流体の物性値による違い等取得データの汎用性について検討する必要がある. 本研究では, 液体窒素による気液二相流体の流動・伝熱特性を取得し, JAXA での液体水素実験結果と併せ, 流量制御技術の高度化を図る.

2. 研究成果の内容

図 1 に熱流束が 5~25[kW/m²] の場合のクオリティと圧力損失比の関係を示す. 縦軸は実験値 ΔP_{TP} をその時に流量が全て液体として流れた時の圧力損失 ΔP_{L0} で無次元化した. 図から, 気泡流では $\Delta P_{TP}/\Delta P_{L0}$ の値がほぼ 1 に一致した. また, 気泡流以外では, 均質流モデルから求めた圧力損失相関式のうち, 加速損失と摩擦損失を考慮した圧力損失 ($\Delta P_A + \Delta P_f$) と, 摩擦損失のみを考慮した圧力損失 (ΔP_f) の間に実験値が分布した. 特に, 気相の割合が比較的小さいプラグ流やスラグ流では実験値は均質流モデルに近づき, 波状流では流動様式が分離流モデルに近いので, 実験値も分離流モデルの値に近づいている.

次に, 熱流束が 5~25[kW/m²] の場合の熱伝達係数の実験値と熱伝達式との比較を行った. 液単相流や気泡流では Sieder-Tate の式と 20% 以内でほぼ一致するが, ボイド率が高くなり流動様式がプラグ流からスラグ流, 波状流になるにつれて Sieder-Tate の式より大きな値となる. $1/X_{tt} > 0.01$ の範囲で実験値と熱伝達式(1)の間には±20%以内で良い一致が得られた. ここで, Nu_{TP} は実験で得られたヌセルト数, Nu_{Lz} は液相部分が全て流路を流れるとみなした時の Sieder-Tate の式によるヌセルト数である. また, X_{tt} は Lockhart-Martinelli のパラメータである. この範囲は気液二相流のうち, 気泡流を除いた範囲に一致した. このことから, 本実験範囲では気泡流を除く気液二相流は, (1)式と同様な式を用いて熱伝達特性を評価することができると考えられる.

$$\frac{Nu_{TP}}{Nu_{Lz}} = A \left(\frac{1}{X_{tt}} \right)^n \quad A = 5.802, \quad n = 0.3689, \quad 1/X_{tt} > 0.01 \quad (1)$$

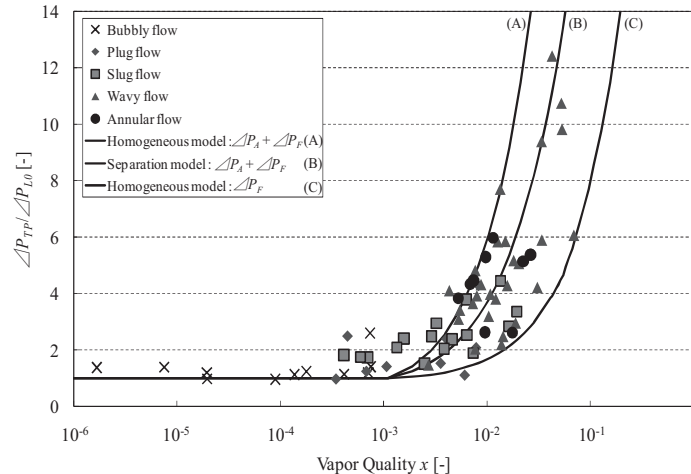


図1：液体窒素のクオリティと圧力損失比の関係

3. 研究目標の達成状況

配管内を流動する液体窒素気液二相流の流動・伝熱特性が流速，クオリティ，熱流束等をパラメータとして得られ，同時に気液二相の流動構造の違いが明確になった．JAXAにて新規に取得する液体水素気液二相流のデータとの比較により，取得データの信頼性，物性値による違いが明確となり，極低温流体の流動・伝熱特性の汎用化が可能となる．得られた結果はエンジン始動時（室温→極低温）の流量制御精度向上に貢献できる．

4. まとめと今後の課題

内径 15 mm の伝熱管を使用して，熱流束が 5~25 [kW/m²] での液体窒素気液二相流の圧力損失および熱伝達係数を取得した．その結果，圧力損失および熱伝達係数の推定が可能となり，流動様式との相関も明確となった．今後，伝熱量を増加して，実機でも重要となる高クオリティでの流動・伝熱特性の取得と取得データによる圧力損失および熱伝達係数の高精度な推定方法を明確にする．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] R. Shimizu, K. Ohira, K. Takahashi, H. Kobayashi, H. Taguchi, T. Kojima and M. Hongo: Thermo-Fluid Characteristics of Boiling Liquid Nitrogen Flowing in a Horizontal Pipe, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.30-31.

[2] 清水領，大平勝秀，高橋幸一，小林弘明，田口秀之：液体窒素の水平管内流動時の気液二相圧力損失と熱伝達特性，第81回2009年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集(2009)，p.60.

*[3] 清水領，大平勝秀，高橋幸一，小林弘明，田口秀之：液体窒素の管内流動時の気液二相熱・流動特性，日本機械学会東北支部第45期総会・講演会講演論文集(2010)，pp.200-201.

3) その他（特許，受賞，マスコミ発表等）

なし

課題番号	J09050
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2009.5～2010.3

連続流方式インクジェットの液滴形成過程の最適化に関する研究

Optimization of Droplet Formation of Continuous Ink Jet

中野 政身*†, 中西 為雄**††, 横山 雅史**

*東北大学流体科学研究所, **山形大学大学院理工学研究科

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

インクジェットプリンタのインク滴発生方式は、オン・デマンド方式と連続流方式の2種類に大別される。オン・デマンド方式はOA機器のプリンタとして実績があり、多用されている。一方、製品や梱包箱などに印字・描画を目的とする産業用のプリンタでは印字面との距離が大きく、また変化したりする関係から、飛距離を大きくとれる連続流方式が着目されている。連続流方式では超音波振動を与えたノズルから加圧したインクを連続的に噴出させ、そのジェットの流体力学的不安定性によって形成される液滴を印字に利用している。この液滴形成過程では、印字に用いる主粒子の間にサテライトと呼ばれる小径の粒子が発生する場合があります。印字乱れの原因となっている。

本研究では、温度などが変動する環境下で用いられる産業用インクジェットプリンタの印字の安定化を目的に、ノズル形状と印字の乱れの原因となるサテライトの発生との相関を実験及び数値解析によって明らかにし、広範な環境条件下でサテライトの発生しないノズル形状の最適化を図る。

2. 研究成果の内容

本研究のための数値解析手法やインクジェットの実験設備を整備した。具体的に、ノズル形状を精度良く再現できる解析プログラムを完成した。実験システムを改良し、液滴をより鮮明に撮影できるようになった。

出口径 $\phi 60 \mu\text{m}$ 、直管部長さ $40 \mu\text{m}$ と $70 \mu\text{m}$ のノズルについて、粒子化定数が 4.5, 5.0, 5.5, 6.0、実験では Piezo 振動子に印加される電圧が 1.4V から 15V の範囲、数値解析では出口平均流速に対する擾乱の振幅が 1%～5%の範囲について詳しく調べた。インクジェットの切断距離および粒子化パターンと、粒子化定数および Piezo 振動子に印加される電圧（または擾乱の振幅）との関係を系統的に整理した。実験による計測結果と数値解析の結果が定性的によく一致した。上記ノズルにおける無サテライトの領域を特定することができた。

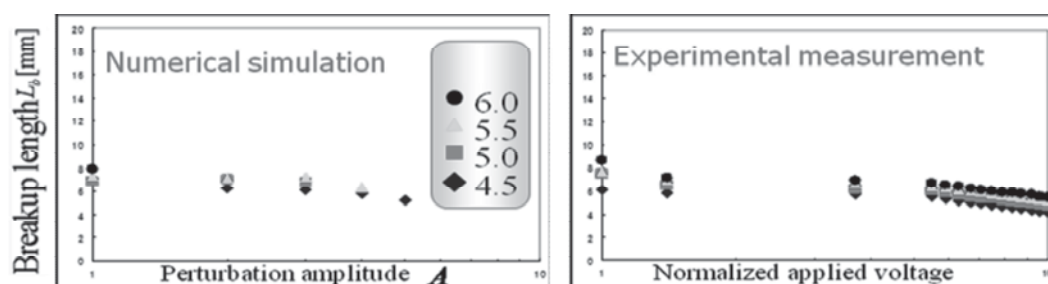


図1：インクジェットの切断距離の実験と数値解析の結果の比較

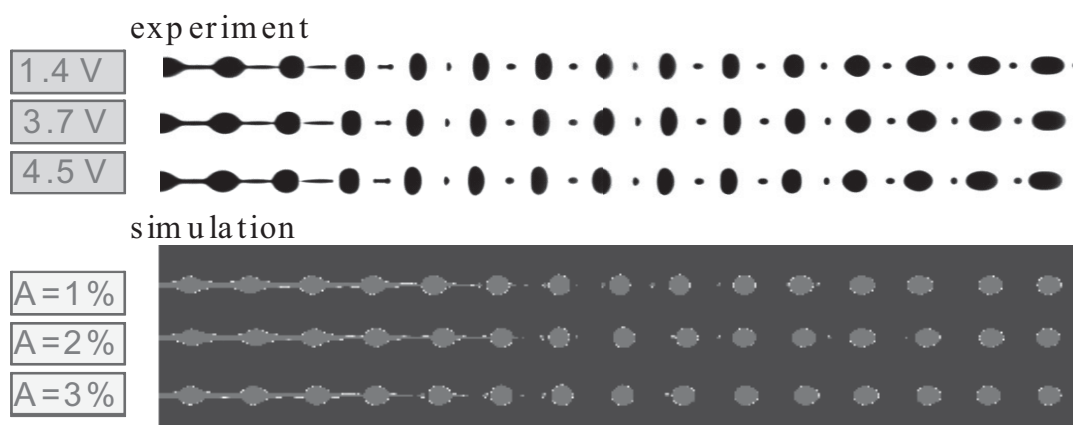


図2：粒子化パターンの実験と数値解析の結果の比較

3. 研究目標の達成状況

印字乱れの原因となるサテライト粒子の発生を抑制できるノズル形状，特にその直管部長とノズル出口速度分布がインクジェットの液滴形成過程に与える影響を実験と数値解析の両面から調べ，定性的によく一致する結果を得ることができた．研究目標をおおむね達成できたと考える．

4. まとめと今後の課題

数値解析によるノズル形状の最適化の見通しが立ったと言える．今後は数値解析を主な手段として，様々なタイプのノズル形状の最適化を行っていく．一方，数値解析ではサテライトの形状を精度良く再現できるところまでまだ至っていない．これは，計算格子の解像度不足や計算手法の数値拡散およびインクの非ニュートン性などが原因と考えられる．次年度ではこれらのことについても詳細に調べる予定である．

5. 研究成果（*は別刷あり）

1) 学術雑誌（査読つき国際会議，解説等を含む）

なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] M. Nakano, T. Nakanishi and M. Yokoyama: Optimization of Droplet Formation of Continuous Inkjet, *Proceedings of the Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2009), pp.94-95.

[2] T. Nakanishi, M. Nakano and M. Yokoyama: Experimental and Numerical Investigations of Droplet Patterns from a Continuous Ink Jet, *Proceedings of the Sixth International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2009), pp.126-127.

[3] 横山 雅史, 中西 為雄, 中野 政身: 連続流型インクジェットの粒子化パターンの可視化, 可視化情報, Vol.29, No.2, 情報全国講演会（米沢 2009）講演論文集, (2009), pp.361-364.

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	J09051
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	May 2009 ~ March 2010

Viscosity Reduction of Complex Fluid with Suspended Particles

Masami Nakano*†, Rongjia Tao**††

*Institute of Fluid Science, Tohoku University

**Department of Physics, Temple University

†Applicant, ††Non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Recently, based on the basic physics of viscosity, the collaborative researcher Prof. Tao developed a new technology, which utilizes an electric or magnetic field to change the rheology of complex fluid to reduce its viscosity, while keeping the temperature unchanged. The method will be universal and applicable to all complex fluids with suspended particles in nano-meters, sub-micrometers, or micrometers.

In this research, we propose to apply this novel technology to reduce the viscosity of diesel / bio-diesel fuel to improve the fuel injection. Small devices will be introduced just before the fuel injection for the diesel engine, producing strong electric or magnetic field to reduce the fuel viscosity. It will result in much smaller fuel droplets in atomization and also will lead to cleaner and more efficient combustion.

2. Details of program implement

This research project covers the following three different aspects of rheology and engineering.

- (1) *Preparative work*, which includes the production of the diesel / bio diesel fuel and characterization of the polymer networks.
- (2) *Study the reducing viscosity* of the diesel fuel under strong electric field by using a high precision rheometer of two parallel disks type, which has strong electric field producing devices and a temperature control unit. Proper application of eletrorheology can reduce the viscosity of liquid suspensions.
- (3) *Study on improving fuel atomization* by applying strong electric field. Reducing the fuel viscosity greatly improves the fuel atomization. The injected fuel has a pressure higher than that in the combustion chamber. The droplets are thus split, becoming smaller and smaller after they are emitted from the nozzle.

3. Achievements

Here we extend the physics principle of reducing viscosity to refinery fuels. In fact, refinery fuels, such as diesel / bio-diesel fuel and gasoline, are made of many different molecules. They can be regarded as liquid suspensions if we take the large molecules as suspended particles and the base liquid is made of small molecules. Under a strong electric field, the induced dipolar interaction makes the large molecules aggregate into small clusters. As a result, this change reduces the effective viscosity of refinery fuels. The above theory was verified by our experiment. As shown in Fig. 1, after application of an electric field of 1kV/mm for about 2 seconds, the diesel oil's viscosity is reduced by about 9%. While this reduction is not permanent, it provides the opportunity to improve fuel atomization.

In our spray experiment, we used a fuel injector to simulate fuel injection at engine

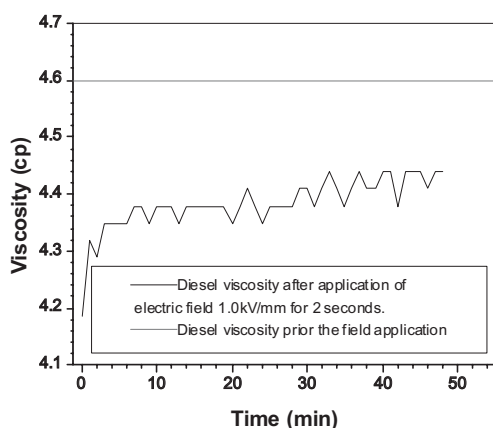


Fig.1 Test results of viscosity reduction of diesel fuel after application of electric field (19.5 °C, 1kV/mm,2 s).

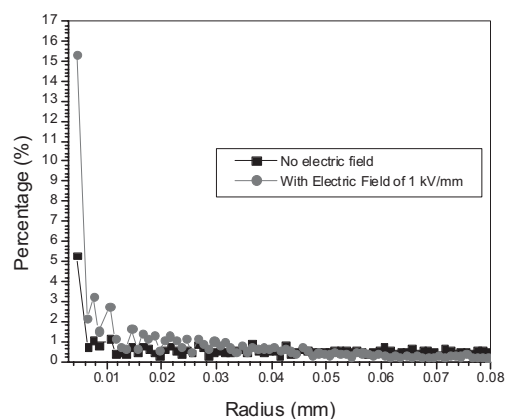


Fig.2 The droplet size distribution of diesel fuel in atomization with or without an applied electric field.

chambers and a device in which the fuel flows through two metallic meshes before it reaches the fuel injector. A voltage is applied on the two meshes to produce an electric field. When the device was on, the fuel took about 5 seconds to pass the electric field. The spray lasted for 4 milliseconds. The droplets were collected and analyzed for both cases, with the field and without the field. The statistical results for diesel fuel are in Fig.2. All of them are averaged over 50 tests. The repeatability was quite good with an error less than 5%. In the experiments with diesel fuel, the current was less than $10\mu\text{A}$, i.e. the electric power consumption is below 0.1W. For diesel fuel, the fuel pressure was 13.79 bar and the electric field was about 1.0kV/mm in the experiment. The electric field increased the number of droplets with diameter less than $40\mu\text{m}$ dramatically. The number of droplets of diameter below $5\mu\text{m}$ was increased from 5.3% to 15.3% when the device was on. The effect on diesel fuel is very significant.

4. Summaries and future plans

After application of an electric field of 1kV/mm for about 2 seconds, the diesel oil's viscosity is reduced by about 9%. While this reduction is not permanent, it provides the opportunity to improve fuel atomization. In the spray experiments, the electric field increased the number of droplets with diameter less than $40\mu\text{m}$ dramatically. The number of droplets of diameter below $5\mu\text{m}$ was increased from 5.3% to 15.3% when the device was on. The effect on diesel fuel is very significant.

By adjusting the values for the electric field and time duration, we could make this technology work effectively for other fuels, such as bio-diesel, and gasoline.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
*[1] R. Tao: Rheology For Efficient Energy Production, Transportation, and Conservation, *Proceedings of the Sixth International Conference on Flow Dynamics (6th ICFD 2009)*, Sendai Japan, (2009), pp.56– 57.
- 3) Patent, award, press release etc.
Not applicable.

課題番号	J09052
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2009.7~2010.3

気象データを用いた風況予測システムの研究とその応用
Study and Application of Real-Time Prediction System
of Airflow which uses Meteorological Data

服部 裕司*†, 高野 暁**, 金元 敏明***††

*東北大学流体科学研究所, **九州工業大学工学府, ***九州工業大学工学研究院

†申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

風力発電に代表されるクリーンエネルギーの効率的な利用に資することを目的として、局地的な短時間風況予測システムの精度向上と応用に関する研究を行う。局地気象モデル WRF を PC やワークステーション上で利用し、予報精度を確保するための未開拓の手法と指針を確立することにより、汎用性が高く手軽で利用しやすい無償の高精度システムを構築し、応用する。

2. 研究成果の内容

本研究では風速予測の対象として、北九州市内の地点（北九州市八幡西区夕原町）を選んだ。この地点には、金元らによる風車実験機が設置されている。風速データとして、2008年4月～11月の観測データ（10分平均）を用い、前後30分、計70分間の平均化をすることで、風速の平滑化を行った値を観測値として用いた。

まず、観測値のみを用いて機械学習による予測を行った。機械学習法としては、サポートベクトル回帰（SVR=Support Vector Regression）を用いた。この方法では、入力データと出力データの対応付けを過去の多数の事例（トレーニングデータ）により構成する。今の場合、ある時刻の風速（ターゲット）を予測するために、たとえば10分前から60分前の6時刻の風速データを入力データとし、ターゲットである風速を出力データとして対応付けを

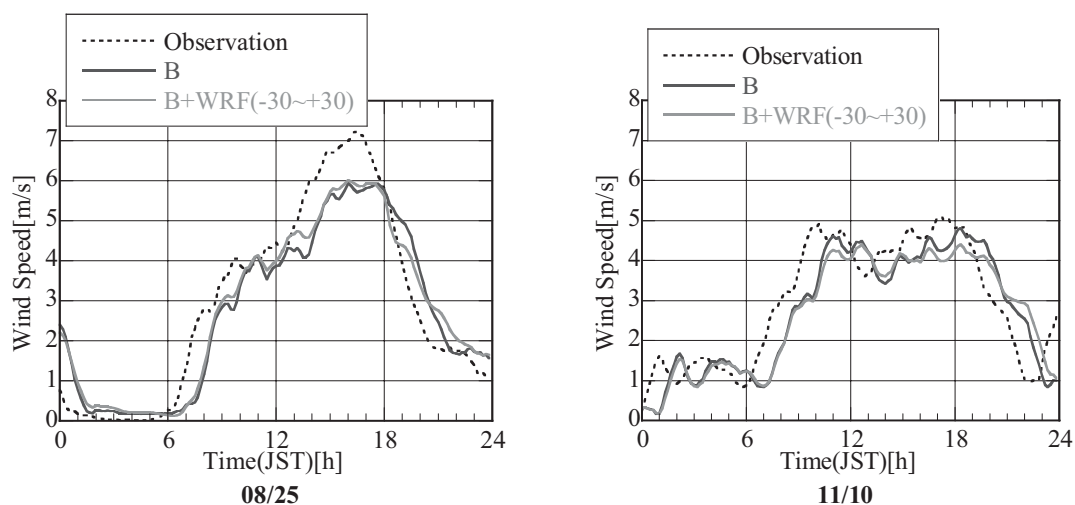


図1. SVRによる風速予測例（24時間）.

SVR により構成する。事例を作る際に使用しなかったデータ（テストデータ）により評価を行うことで、予測法としての良さを判定することができる。

その結果、観測値のみによる SVR 予測では、10 分後の予測は精度よく行うことができたが、70 分後の予測は精度が低いことがわかった。これは先行研究の結果と同様である。そこで、メソスケール気象モデル WRF による計算値を入力データに含める方法を開発した。WRF では予報値などを用いることでターゲット時刻やその先の値を得ることができるため、精度の向上を期待できる。これにより 70 分後の予測改善を試みた。その結果 WRF による計算値を加えることでほぼすべての予測の誤差を 3~9%程度小さくできることがわかった。

3. 研究目標の達成状況

- 「風車設置位置における風況予測を、気象観測データを用いたシミュレーションにより実時間よりも短い時間で行い、出力変動を高い精度で予測することにより、風力発電の系統連系の可能性を大きく広げることができる。」:精度の向上は当初の狙い通りとはなっていないが、精度が向上することを示したこと、今後のさらなる精度向上の方向性を開拓したことから、1 年間の研究としてはまずまず目標を達成したといえる。
- 「また、インド洋上など風車設置ポイントとして比較的検討し難い地域の風況を再現することにより、効果的な設置ポイント選定方法を確立するとともに、風車導入コストの低減につながる。」インド洋上はできなかったが、必ずしも風況のよくない風車設置場所を対象として研究を行ったことから、選定方法の確立に向けて準備はできたと考える。

4. まとめと今後の課題

機械学習と気象モデルを用いた手法により風速の変動を定性的に予測することができた。また、手法を組み合わせることで定量的にもわずかではあるが予測精度が向上した。そのため今後、WRF 予測値だけでなく、風速の変動と関連のある情報を取り入れ、機械学習することで、さらに予測精度を改善できる可能性を見出した。また、計算機性能が向上し、より精細な地形データなどを入手できるようになれば、将来的には PC レベルで WRF 計算の精度が良くなり、さらに風況予測の精度が向上すると予想される。

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] 高野 暁, 服部裕司, 金元敏明: WRF データと観測データによる自己学習型短時間風況予測システムの開発, 第 23 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, (2009), 4 pages.

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