

平成22年度 共同利用・共同研究拠点 「流体科学研究拠点」 活動報告書

Activity Report 2010 Joint Usage / Research Center "Fluid Science Research Center"

東北大学 流体科学研究所

Institute of Fluid Science Tohoku University



はしがき

東北大学流体科学研究所は、「流動現象に関する学理及びその応用の研究を行うこと」を 目的としており、平成22年度より流体科学分野の共同利用・共同研究拠点「流体科学研究 拠点」として文部科学省に認定されている。本拠点では、物質のみならずエネルギーや情 報の流れなど、人間生活の中で避けて通れない「時間軸」と「空間軸」上で展開されるあ らゆる「流動」を対象とする「流体科学」を核として、人類社会のさまざまな重要問題を 解決するため、国内外の研究者と本研究所の教員とが協力して行う公募共同研究を実施し ている。本公募共同研究では、エアロスペース、エネルギー、ライフサイエンス、ナノ・ マイクロ、基盤研究の5分野における流体科学に係わる研究課題を公募し、共同研究委員 会の審査を経て、所外研究者と本研究所の教員が共同研究を推進している。得られた研究 成果は、毎年11月に流体科学研究所主催で開催される国際会議における公募共同研究成果 報告会(IFS Collaborative Research Forum)において発表され、また共同利用・共同研 究拠点「流体科学研究拠点」活動報告書(平成21年度実施分については公募共同研究報告 書)として公表されている。

本報告書は平成22年度に実施された拠点の活動を取り纏めたもので、公募共同研究の概 要、64件の公募共同研究成果報告書、主な発表論文の別刷等を収録している。本拠点は、 本公募共同研究を通じて、国内外の様々な異分野の英知を結集させ、流動現象の基礎研究 とそれを基盤とした先端学術領域との融合ならびに重点科学技術分野への応用によって、 世界最高水準の多様な流動現象に関する学理の探求及び研究を推進し、社会に貢献すると ともに、次世代の若手研究者及び技術者を育成するよう努めて参る所存である。今後とも ご支援ご鞭撻をお願い申し上げると共に、本報告書について、忌憚のないご意見を頂けれ ば幸甚である。

平成 23 年 10 月

東北大学流体科学研究所長 早瀬 敏幸

1.	平成 2	2 年度流体科学研究拠点活動のまとめ	
	1.1	概要	1
	1.2	公募共同研究成果報告会	1
	1.3	流体科学データベース	2
	1.4	公募共同研究報告書	2
	1.5	公募共同研究実施状況	3
	1.6	研究成果の発表件数	4
	1.7	公募共同研究についてのアンケート結果	5
2	研究成	里報告書	
2.	J1000	25 秋口 日 1 極低温気液二相流体の管内流動・伝熱特性に関する研究	9
		大平 勝秀(東北大学) 小林 弘明(宇宙航空研究開発機構)	-
	J10002	2 極微細シリコンデバイス特性ばらつきと中性ビームを用いた LSI パターンとの相関関係の研究	11
		最上 徹 (半導体先端テクノロジーズ) 寒川 誠二 (東北大学)	
	J1000	3 二段式軽ガス銃を用いたソニックブームの実験的、数値解析的研究	13
		齋藤 務(室蘭工業大学)、大林 茂(東北大学)	
	J10004	4 高温予混合火炎の不安定性	15
		門脇 敏 (長岡技術科学大学) 小林 秀昭 (東北大学)	
	J1000	5 スパイクニューロンデバイスの基礎検討	17
		森江 隆 (九州工業大学) 寒川 誠二 (東北大学)	
	J1000	6 シャトルコックの空力特性とインパクト時の動的挙動	19
		長谷川 裕晃(秋田大学) 大林 茂(東北大学)	
	J1000	7 磁石 - 磁性流体系における複雑界面流動の交流磁場特性	21
		須藤 誠一 (秋田県立大学) 西山 秀哉 (東北大学)	
	J10008	8 ナノ粒子分散系ER流体の開発と流動特性評価	23
		田中 克史(京都工芸繊維大学) 中野 政身(東北大学)	
	J1000	9 左心房における血流解析	25
		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)	
	J1001	0 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	27
		酒井 康彦(名古屋大学) 早瀬 敏幸(東北大学)	
	J1001	1 脳深部磁気刺激の応用に関する研究	29
		八島 和美(株式会社IFG)、高木 敏行(東北大学)	
	J10012	2 胎仔脳出血メカニズムの流体学的解析	31
		伊藤 拓哉 (東北大学) 船本 健一 (東北大学)	
	J10013	3 Investigations of Reacting Flow in Micro Channels Directed to Development of Eco-Friendly	
		Technologies of Energy Conversion	33
		Sergey Minaev(Siberian Branch of Russian Academy of Science)、丸田 薫(東北大学)	
	J10014	4 Parallel Computations on the Base of GPU for Modeling of Gas Combustion Processes	35
		Roman Fursenko(Siberian Branch of Russian Academy of Science)	
	J1001	5 Simulations of Convection-Enhanced Delivery in Rat Brain	37
		Joshua Smith (Lafayette College) 船本 健一 (東北大学)	

J10016	Numerical Studies of the Reacting Rarefied Flows in Tubes	39
	Mikhail Ivanov(Siberian Branch of Russian Academy of Science)、丸田 薫(東北大学)	
J10017	Investigation of Hypersonic Flows about Leading Edges of Small Bluntness	41
	Mikhail Ivanov(Siberian Branch of Russian Academy of Science) 米村 茂(東北大学)	
J10018	レーザ誘起熱音響波を利用した超音速非定常気流の温度計測法の開発	43
	水書 稔治 (東海大学) 高山 和喜 (東北大学)	
J10019	サイレント超音速機の低速飛行特性に関する研究	45
	川添 博光 (鳥取大学) 大林 茂 (東北大学)	
J10021	鋭敏化した Alloy600 のCr欠乏領域での局所磁化過程	47
	山口 克彦 (福島大学) 高木 敏行 (東北大学)	
J10022	New Exact Solutions for Vortex Rings with Swirl and Magnetic Field	49
	Stefan Llewellyn Smith (University of California, San Diego) 服部 裕司 (東北大学)	
J10023	サイレント超音速機の超音速飛行特性に関する研究	51
	大林 茂 (東北大学) 佐宗 章弘 (名古屋大学)	
J10024	ナノ構造化界面における輸送現象	53
	小原 拓 (東北大学) 芝原 正彦 (大阪大学)	
J10025	Development Optimization Design Method for Low Noise and High Aerodynamic Performance	
	Helicopter	55
	鄭 信圭 (東北大学) Kwanjung Yee (Pusan University)	
J10026	反応性非平衡プラズマジェットの実時間数値解析	57
	西山 秀哉 (東北大学) 田中 康規 (金沢大学)	
J10027	次世代プラズマオートクレーブの開発	59
	佐藤 岳彦 (東北大学) 五十嵐 敬 ((株) 平山製作所)	
J10028	生体軟組織内の石灰化検出に関する研究	61
	小笠原 正文(GE ヘルスケア・ジャパン) 船本 健一(東北大学)	
J10029	渦構造の安定性に対する軸流効果の研究	63
	服部 裕司 (東北大学) 福本 康秀 (九州大学)	
J10030	常温圧縮回転せん断法を用いた複合材料の開発	65
	中山 昇 (信州大学) 三木 寛之 (東北大学)	
J10031	Entropy Flow in Magnetically Ordered Heusler Alloys under Influence of Temperature	
	or Magnetic Field	67
	Vladimir Khovaylo (National University of Science and Technology "MISiS")、三木 寬之(東北大学))
J10032	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	69
	中野 政身 (東北大学) 中西 為雄 (山形大学)	
J10033	Non-destructive Detection of Cracks using Electromagnetic Phenomena	71
	Jinhao Qiu (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics) 高木 敏行(東北大学)	
J10034	脳内対流の解析による脳局所投薬技術の改良	73
	冨永 悌二(東北大学) 早瀬 敏幸(東北大学)	
J10035	Blast Wave/ 衝撃波の頭蓋内伝播経路・動態の解析	75
	中川 敦寛 (東北大学病院) 高山 和喜 (東北大学)	
J10036	Numerical and Experimental Research on Active Control of The Hole-Tone Feedback Problem	77
	Mikael A. Langthjem (山形大学) 中野 政身 (東北大学)	
J10037	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)	

J10038	大気圧プラズマ流によるラジカル生成機構と滅菌機構	81
	佐藤 岳彦 (東北大学) 宮原 高志 (静岡大学)	
J10039	プラズマ気泡生成法の開発	83
	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)	
J10040	Analysis of Plasma Flow at Gas-Liquid Interface for Biological Interaction	85
	佐藤 岳彦 (東北大学) Gregor Morfill (Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics)	
J10041	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))	
J10042	Study on Friction of Soft Tissue Biomodel by PVA	89
	太田 信(東北大学) Philippe Kapsa(ECL)	
J10043	Optimization of Stent Design based on Blood Flow Analysis using LBM Method	91
	太田 信(東北大学) Chopard Bastien (Geneva University)	
J10044	Development of Micro-Motor for MEMS utilizing Novel Smart Polymer Composite	93
	中野 政身(東北大学) Mikóls Zrínyi (Semmelweis University)	
J10045	Viscosity Reduction of Complex Fluid with Suspended Particles	95
	中野 政身 (東北大学) Rongjia Tao (Temple University)	
J10046	Tribological Behavior and Electrical Contact Resistance of Metal-Containing DLC Coating for	
	Electrically Conductive Tribo-Elements	97
	Julien Fontaine (Ecole Centrale de Lyon) 高木 敏行 (東北大学)	
J10047	Integrated Analysis by Kinetic Model and Fluid Model for Innovative Plasma Applications	99
	He-Ping Li(Tsinghua University)、高奈 秀匡(東北大学)	
J10048	Development of Kinetic Force Method for Two-/Three-Dimensional Numerical Modeling	
	Relaxation of Rarefied Gas flows	101
	Vladimir Saveliev(National Center of Space Researches and Technologies)、米村 茂(東北大学)	
J10049	Investigation of Supersonic Hybrid-Stabilized Argon-Water Arc for Biomass Gasification	103
	Jiří Jeništa (Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i.) 西山 秀哉 (東北大学)	
J10050	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	105
	高橋 庸夫(北海道大学大学院)、寒川 誠二(東北大学)	
J10051	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	107
	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)	
J10052	液体水素の熱・輸送物性に関する分子論的研究	109
	德增 崇 (東北大学) 坪井 伸幸 (九州工業大学)	
J10053	水分子ネットワーク構造におけるプロトン輸送特性の解明	111
	德增 崇(東北大学) 杵淵 郁也(東京大学)	
J10054	Nano-Scale Modeling of Confined Liquid Films and Bridges	113
	德增 崇(東北大学) Philippe Vergne(INSALyon)	
J10055	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	115
	圓山 重直(東北大学)、櫻井 篤(新潟大学)	
J10056	大規模環境におけるエネルギー移動評価とその解析	117
	圓山 重直(東北大学)、山田 昇(長岡技術科学大学)	
J10057	マイクロ・ナノ構造体のふく射特性計測に関する研究	119
-	圓山 重直(東北大学)、Vaillon Rodolphe(INSA Lvon)	-
J10058	複雑媒体における非フーリエ伝熱解析	121
	圓山 重直(東北大学) Mishra Subhash Chandra(Indian Institute of Technology)	

マイクロチャネル内での物質拡散場の高精度計測に関する研究	123
小宮 敦樹(東北大学)、Gary Rosengarten(The University of New South Wales)	
Experimental Analysis of Droplet Impact Process onto Rough Substrate with Solidification	
(Chemical Reaction)	125
Deivandren Sivakumar (Indian Institute of Science) 西山 秀哉 (東北大学)	
マイクロ噴霧微粒化プロセスの超並列融合計算	127
石本 淳(東北大学) Kozo Saito (University of Kentucky)	
脆弱性血球モデルの開発	129
太田 信(東北大学) Liviu Movileanu(Syracuse University)	
硬式野球ボールの空力特性	131
宮嵜 武(電気通信大学) 大林 茂(東北大学)	
Evaluation of Surface and Sub-Surface Area of Structural Components	133
Sung-Jin Song(Sungkyunkwan University) 高木 敏行(東北大学)	
次世代反応流体科学の創成	135
石本 淳(東北大学)	
	マイクロチャネル内での物質拡散場の高精度計測に関する研究 小宮 敦樹(東北大学)、Gary Rosengarten(The University of New South Wales) Experimental Analysis of Droplet Impact Process onto Rough Substrate with Solidification (Chemical Reaction) Deivandren Sivakumar(Indian Institute of Science)、西山 秀哉(東北大学) マイクロ噴霧微粒化プロセスの超並列融合計算 石本 淳(東北大学)、Kozo Saito(University of Kentucky) 脆弱性血球モデルの開発 太田 信(東北大学)、Liviu Movileanu(Syracuse University) 硬式野球ボールの空力特性 宮嵜 武(電気通信大学)、大林 茂(東北大学) Evaluation of Surface and Sub-Surface Area of Structural Components Sung-Jin Song(Sungkyunkwan University)、高木 敏行(東北大学) 次世代反応流体科学の創成

3. 主な発表論文の別刷		161	
--------------	--	-----	--

- 1. 平成 22 年度流体科学研究拠点活動のまとめ
- 1.1 概要

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

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

公募共同研究の募集や申請手続きの情報は、平成21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 22 年度の公募共同研究は、平成 22 年 4 月 1 日から平成 23 年 3 月 31 日まで実施された。途中、平成 22 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 22 年 11 月 2 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-2010 において仙台国際 センターにて開催した。本報告会では 59 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、83 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 流体科学データベース

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

	平成 21 年度	平成 22 年度
公募共同研究成果の登録件数	16	16
登録済みデータ総数	458	478
流体科学データベースへのア クセス件数	10,040	12,123

表1:流体科学データベースへの登録件数とアクセス数

1.4 公募共同研究報告書

平成22年8月に、平成21年度の公募共同研究の成果を取りまとめた公募共同研究報告書を作成し、関係機関、研究者に配布した。報告書の内容(著作権の都合により論文別刷りは除く)は流体科学研究拠点ホームページに掲載されている。

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

- 1.5 公募共同研究実施状況
- 1) 申請·採択状況

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

		平成 21 年度	平成 22 年度
申請数(件)		52	64
採択数	汝 (件)	52	63*
国内・国際	国内	32	35
	国際	20	28
	エアロ	7	7
	スペース	(5/2)	(5/2)
	マウルゼー	16	14
	11/119	(8/8)	(5/9)
分野別件数	ライフ	7	13
(国内/国際)	サイエンス	(5/2)	(8/5)
	ナノ・	17	17
	マイクロ	(10/7)	(10/7)
	甘般	5	12
	坐盈	(4/1)	(7/5)
採択率	മ (%)	100	98
申請金額	(千円) :a	20,177	29,303
採択金額	(千円):b	16,639	24,637
充足率	(%) :b/a	82	84
一件ま 採択金額	ったりの 頁(千円)	320	391

表2:平成22年度一般公募共同研究の申請・採択状況

*所内対応教員転出のため取り下げ

	平成 22 年度
申請数(件)	1
採択数(件)	1
採択率(%)	100
申請金額(千円):a	7,000
採択金額(千円):b	7,000
充足率(%):b/a	100
一件あたりの 採択金額(千円)	7,000

表3:平成22年度分野横断プロジェクト申請・採択状況

2) 研究者の受け入れ状況

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

	平成 21 年度	平成 22 年度
国内	165	210
国外	254	384
合計 (延べ人日)	419	594

表4:研究者の受け入れ状況

3) 研究費

本公募共同研究にて使用した研究費の内訳を表5に示す。

表	5	·	研究費の内訳	I
1	0	•		

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

1.6 研究成果の発表件数

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

表6:研究成果の発表件数

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

1.7 公募共同研究についてのアンケート結果

共同研究委員会では、平成22年11月の委員会において、2年間、公募共同研究を実施したことを踏まえて、共同研究実施者にアンケート調査を行い、今後の公募共同研究の実施方法の改善に資することとした。平成23年4月に、平成22年度採択プロジェクト63件を対象に公募共同研究についてのアンケートを依頼し、49件(国内共同研究は30件、国際共同研究は19件)の回答があり、回答率は78%であった。質問内容と回答結果を表7に示す。

	質問内容	回答候補	回答件数(件)
1	公募共同研究は有意義でし	非常に有意義だった	46
	たか	有意義だった	3
		あまり有意義でなかった	0
		まったく有意義ではなかった	0
2	今後も積極的に公募共同研	活用したい	49
	究を活用したいですか	活用したいとは思わない	0
3	研究経費について	十分である	37
		やや不足である	12
		大いに不足である	0
4	適当と思われる研究経費の		平均
	額をお書きください		445,400 円
			(25 件)
5	研究経費と採択率について	採択率は下がっても研究経費を増額	10
		してほしい	
		研究経費は不十分でも採択率を維持	38
		してほしい	
		その他(経費と採択率共に維持して	1
		ほしい)	
6	自由記述		
	・研究のアイデア等を確認す	る端緒研究としても良いシステムと考え	える。
	・予算の申請時に論文投稿料	など記載して良いのかどうか悩みましれ	と。投稿料を含
	めても良いのであれば非常に助かります。また、消耗品の発注を外部研究機関でも		部研究機関でも
	行えるようにしていただけれ	ば、非常に助かります。	
	・本公募共同研究の報告会では、国内はもとより海外の研究者と議論する機会を得		論する機会を得
	ることができ、非常に有意義に感じております。		

表7:公募共同研究についてのアンケート回答結果

6	自由記述
	・若手にとってはチャンスになる制度であります。今後も継続をお願い致します。
	・非常に有効に共同研究を実施できていると思います。今後もぜひ共同研究をさせ
	ていただければと願います。
	・流体研の設備を活用できる有意義な共同研究制度であるので、是非、今後も維持・
	継続していただきたい。
	 ・本共同研究は大いに刺激が得られ意義あるものと思います。
	 ・本事業で修士課程等の学生の旅費をサポートしていただいていることが非常に助
	かります。H23年度課題も採択されましたので、積極的に活用させて頂きます。
	・この公募共同研究をきっかけとして新規治療法開発の上での重要な研究を行うこ
	とができました。
	・現状の公募形式にとても満足しております。今後も現状で継続をお願いできると
	これをきっかけに多くの研究が開始、展開できるものと思われます。
	・本格的共同研究の実施に向けた、より大規模な資金獲得のための準備段階のため
	に置かれるのが適切ではないかと思います。その実績も追跡調査され、今後の採択
	基準に含めていただく方向をご検討いただければ幸いです。2年間ありがとうござ
	いました。
	 ・全て同じような採択率ではなく、テイクオフしそうな共同研究枠、育てたい共同
	研究枠のようなものがあった方が良いかと思います。また、マスターの(海外)旅費
	にも使えるようにして欲しい。
	・特にありません。 今後とも宜しくお願い致します。
	・実際に研究を進めるに当たり、顔を合わせた打ち合わせが絶対に必要であり、そ
	の旅費が出るのが大変ありがたかった。
	 ・共同研究関係を継続するためにこの制度はとても大切だと感じております。経費
	は打ち合わせ旅費程度でも問題ありません。
	・公募共同研究は、大学の枠を超え、設備の利用や定期的に所内対応教員との意見
	交換が効率的に実施でき、研究を行なう上で大いに役立っています。今後も是非こ
	ういう形態での共同研究制度を継続していただきたいと思います。
	 研究成果発表会において、海外の大学の教授クラスの方に、ポスター発表をして
	いただくのは、気が引ける。
	• Now, the budget can be used to buy expendables only for usage in Tohoku
	University except for the travel expenses. It is not helpful for foreign researchers
	because usually foreign researchers can stay in Tohoku University for several
	days. This means they cannot spend this budget for this collaborative research
	in their country. I hope that the budget should have more flexibility.

6	自由記述	
	· We found this Collaborative Research projects to be useful for promoting	
	international collaboration. But we hope to increase the amounts slightly, even if	
	the acceptance numbers will decrease.	
	\cdot I appreciate this support and possibility to do joint research with IFS greatly.	
	\cdot The Collaborative Research projects are very useful for supporting	
	international collaboration. I understand the overall budget must be shared	
	between several projects. Nevertheless, I think the budget of accepted projects	
	should not drop to small amounts, even if it means the acceptance rate must	
	decrease.	

2.研究成果報告書

課題番号	J10001
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	2010.4 ~2011.3

極低温気液二相流体の管内流動・伝熱特性に関する研究

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

大平 勝秀*†,小林 弘明**†† 田口 秀之**,小島 孝之**,本郷 素之**,永井 孝佳*** *東北大学流体科学研究所,**宇宙航空研究開発機構(JAXA) ***東北大学大学院工学研究科博士前期課程 †申請者,††所外対応研究者

1. 研究目的

JAXAでは、飛行速度 Mach 5 の極超音速旅客機を実現するために、液体水素を燃料とする極超音速予冷ターボジェットエンジン技術の開発を進めている。エンジン始動時において配管系は常温であるため、液体水素は気液二相流動状態となる。また、高速飛行時の予冷器では高温空気と液体水素が熱交換を行うので、強制対流沸騰熱伝達状態となり、圧力損失と伝熱性能の関係を把握することが重要となる。本研究では水平伝熱管内を流動する液体窒素気液二相流の流動パターンを加熱部下流で高速度カメラを用いて観察すると共に、試作した2種類の静電容量型ボイド率計でボイド率を測定し、流動パターンと圧力損失、熱伝達特性の関係を明らかにする。

2. 研究成果の内容

実験では、気泡流、プラグ流、スラグ流、環状流、波状流の基本的な沸騰流動パターンと、ボイド率の変化に伴い、気泡流、スラグ流、波状流へと流動パターンが時間的に変動する遷移流が観察された.スラグ流と波状流の高速度ビデオカメラでの観察映像と対向曲板型ボイド率計で測定した静電容量比の時間変化を図1に示す.静電容量比は沸騰気液二相流動時と液体窒素単相時の比(<1)である.測定したボイド率とクオリティの関係を検討した結果、ボイド率が 50%未満では均質流モデルと同様にスリップ比*s*=1となる傾向を示すが、ボイド率が 50%以上になると実験点は均質流モデルとと「私halil のモデルによるスリップ比(*s*>3)の間に分布する.水平管の圧力損失は加速損失と摩擦損失から成り、*s*=1の場合の均質流モデルと、Khalil のスリップ比の式を用いた分離流モデルを用いて実験結果を検討した.図2に熱流束10 kW/m²の実験から得られた圧力損失と両モデルの計算結果の比較を示す.熱流束15,20,25 kW/m²でも同様な傾向を示しており、分離流モデルの場合が実験結果を良く評価している.熱流束5 kW/m²の場合は、両モデルとも実験結果よりも小さく見積る結果が得られた.実験にて得られた管上下部の局所熱伝達率と、常温流体で従来提案されている5 種類の熱伝達式を比較検討した結果、Gungor-Wintertonの関係式に液体単相のSieder-Tate 式を組合せて使用したものが-30%~+20%の範囲で実験結果を良く評価できる.共同研究集会

「JAXA-流体研研究進捗状況報告会」 平成22年12月3日(流体研) 出席者8名

1. 流体研報告内容:液体窒素実験および実験結果の検討状況,得られた成果の報告

2. JAXA 報告内容:液体水素実験および実験結果の検討状況,得られた成果の報告

「JAXA 液体水素実験および検討会」平成23年2月17日(JAXA あきる野市)出席者10名 1. JAXA 液体水素実験設備検討および液体水素実験,検討



3. 研究目標の達成状況

2 種類の静電容量型ボイド率計(対向曲板型,二重螺旋型)を試作し,ボイド率を測定した結果,両者の特性が明らかとなり,高精度なボイド率測定が可能となった.その結果,流速,ボイ ド率,熱流束等をパラメータとした気液二相圧力損失,気液二相強制対流熱伝達率が実験にて精 度良く得られ,従来,常温流体で提案されている圧力損失式,熱伝達係数との比較検討を行い, 極低温気液二相流体への適用および推定精度が明確となった.

4. まとめと今後の課題

極低温流体では温度変化に対する粘性係数の変化が大きく、ボイド率、流動パターンの変化も 含め、加熱量が大きく、高ボイド率条件での実験データ取得と圧力損失、熱伝達率の推定精度向 上が必要となる.加熱量一定条件において、ボイド率、流動パターン、圧力損失が時間的に変動する 遷移流の存在が確認され、現象の解明が必要である.また、JAXA での液体水素実験結果との比較、 検討により、液体窒素と液体水素の物性値による違い、極低温流体への汎用化が課題である.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[1] T. Nagai, R. Shimizu, K. Ohira, K. Takahashi, H. Kobayashi, H. Taguchi, T. Kojima and M. Hongo: Two-phase Pressure Drop and Heat Transfer for Boiling Liquid Nitrogen Flow in a Horizontal Pipe. *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration AFI/TFI-2010*, Sendai, (2010), pp.46-47.
 - [2] K. Ohira, R. Shimizu, K. Takahashi, H. Kobayashi and H. Taguchi: Pressure Drop and Heat Transfer Characteristics of Boiling Liquid Nitrogen in a Horizontal Pipe Flow. *International Cryogenic Engineering Conference 23*, Wroclaw (Poland), (2010), p.115.
 - [3] 永井孝佳、清水領、高橋幸一、大平勝秀、小林弘明、田口秀之:液体窒素の水平管内流動時の沸騰熱・流動特性,第82回2010年度春季低温工学・超電導学会講演概要集(2010), p.205.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J10002
区分	共同研究集会
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

極微細シリコンデバイス特性ばらつきと中性ビームを用いたLSIパターンとの相関関係の研究 Variability Mechanism Study Between Advanced Device Characteristics and LSI Patterning

> 寒川 誠二*††,最上徹**† *東北大学流体科学研究所,**(㈱半導体先端テクノロジーズ(Selete) †申請者,**††**所内対応教員

1. 研究目的

東北大が持つ中性粒子ビームエッチング技術とSeleteにおける極微細シリコンデバイスに 関する技術を融合し、微細加工において用いられる ArF フォトレジストのプラズマエッチ ング中に発生するレジストパターン側壁のラフネス(LER)とデバイス特性との関係をあきら かにするとともに、プラズマエッチングプロセスにおける ArF フォトレジスト劣化機構の 解明と中性粒子ビームエッチングプロセスの優位性を示す.

2. 研究成果の内容

ArF エキシマレーザーを用いたリソグラフィプロセスは半導体デバイスの微細加工に広く 用いられているが、プラズマエッチングによってマスクであるレジストの側壁にラフネスが 発生し、その結果、エッチングされたゲート電極の側壁にもラフネス(半導体業界では Line-Edge-Roughness(LER)と呼ぶ)が転写され、MOS デバイス特性の劣化(閾値電圧の変 化、リーク電流等)を引き起こすことが問題となっている.そこで、本共同研究ではプラズマ エッチング中に発生する LER とデバイス特性の劣化との関係を定量的に解析すると共に、 中性粒子ビームとプラズマエッチングとの違いから LER 発生機構を明らかにすると共に LER 抑制に関する中性粒子ビームエッチングの効果に関して示す.

図1に各デバイス寸法に対してプラズマエッチング後に発生するLER とデバイスOFF 時のリーク電流との関係について示す.プラズマ生成用ガスに Cl2 を用いた.50nm 以下のデバイスでは数 nm 以上のLER が発生することにより,リーク電流が増加しデバイス特性が 劣化していることが分かった.つまり,50nm 以下のデバイスでは数 nm 以下のラフネスの 制御が重要であることがわかった.

次にこの LER の発生機構の解析を行なった.まず,図2に示すようにレジスト側壁のラフ ネス (LER) はプラズマを照射することによって発生するレジスト表面のラフネスに相関が あることを明らかにした.これは、プラズマ照射によりレジスト表面全体にラフネスが発生 し、その結果側壁角のラフネスが大きくなることを示している.そこで、レジストをパター ニングしない塗布した状態で LER の解析ができることが明らかになった.この知見を基に、 Cl2 プラズマおよび Cl2 中性粒子ビームを塗布したレジストに照射し、高精度 AFM にてラ フネスを測定した.各照射条件におけるエッチング深さを 35nm に統一し、エッチング後 のフォトレジスト表面のラフネスを比較した.図3に ArF レジストに対して中性粒子ビー ムおよびプラズマを照射した場合のレジスト表面のラフネスを測定した結果を示す.プラズ マから照射されるイオンフラックスおよびイオンエネルギー、ラジカルフラックスと中性粒 子ビームのビームフラックスおよびビームエネルギー、ラジカルフラックスはほぼ同等であ る.この結果から、中性粒子ビームを照射した場合には表面ラフネスが 1/8 にまで抑制され ることが分かった.

これらの結果から、ArF レジスト表面のラフネスはプラズマから照射される放射光(紫外線)が原因で発生することが推測された.そこで、同じサンプルを FT-IR を用いて構造解析 した結果、塩素プラズマを照射した場合にはラクトン C=O 構造が大きく減少していること が分かった.従って、フォトレジストのラフネスはラクトン基が紫外線照射により優先的に 破壊されることで発生することがわかった.





愛2 レジストLER とレジスト表面ラフネスの関系



図3プラズマおよび中性粒子ビーム照射によるレジスト表面ラフネスの違い

3. 研究目標の達成状況

プラズマエッチング中に発生する側壁のラフネス(LER)量に従ってデバイス特性が変動 することが分かった.その側壁ラフネスはレジスト表面に発生するラフネスと相関があり, 表面ラフネスを測定すればLERを予測できることが分かった.更に,プラズマ中の各照射 活性種がレジスト表面ラフネスにどのように起因しているのか明らかにした.プラズマエッ チングによって生じるラフネスはラクトン基の脆弱性が原因で増大していると考えられる. また,このラフネスを抑制するために,紫外線照射を抑制した中性粒子ビームは有効である ことを示した.

4. まとめと今後の課題

プラズマエッチングにより発生するレジストの LER は中性粒子ビームを用いることで解 決することができることが分かった. 今後は大口径中性粒子ビーム装置を実用化し,実際の デバイスでその効果を実証する必要がある.

- 5. 研究成果
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- B. Jinnai : Decisive factors affecting plasma resistance and roughness formation in ArF photoresist, J. Phys. D: Appl. Phys. 43, (2010), 395204 (8pp).
- [2] B. Jinnai : Improving plasma resistance and lowering roughness in an ArF photoresist by adding a chemical reaction inhibitor, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43, (2010), 465203 (6pp).
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等 なし
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J10003
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	2010.4 ~2011.3

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

齋藤 務*†, 畠中和明*
大林 茂**†, 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

輸送量増加と飛行時間の短縮を目的として超音速旅客機の研究開発が行われて いるが,最大の技術課題のひとつにソニックブームの低減に関する技術開発があ る.本研究では超音速旅客機の静粛性向上を目指して,ソニックブームの発生, 伝播ならびに減衰過程について研究するため,衝撃波関連施設の一つである二段式軽 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.

2. 研究成果の内容

本年度の研究では、バリスティックレンジによる実験で球状飛翔体が空気抵抗により減速 する様子を観測し、数値計算結果との比較によって、モデル減速の定量的な見積もりを行っ た.本研究ではソニックブームの発生と伝播、さらにはその減衰過程における気体力学的メ カニズムが中心テーマになっているので、対象となる飛翔体モデルの速度領域も、低マッハ 数領域である.一般に本研究の様に飛翔体速度領域がマッハ数 1.0 の近傍の場合、解の収束 が悪く、さらに球の減速をも考慮に入れての数値解析の例はない.

昨年度の計算では、球状モデルの減衰要因として圧力抵抗のみを考慮したが、本年度の研 究では、これに粘性抵抗を加え、またモデル座標系で生じる球の減衰に起因する慣性力項を 加えて、より厳密な計算を行った.



図1. 球状飛翔体周りの圧力分布: Ms=1.13

図2. 衝撃波離脱距離

図1は、球状飛翔体モデルのマッハ数が1.13の飛翔体モデルが定常に飛行している場合の モデル周りの圧力分布を示している。図2は、飛翔体が減速しながら飛行した際に得られる 衝撃波離脱距離の数値計算結果と、実験データを比較している。図中比較のために定常計算 の結果及び、粘性抵抗を無視した場合の計算結果も示している。

現在,興味の対象としている速度領域では,粘性抵抗はほとんど無視出来る事.現在行われている実験条件では,飛翔体モデルの加速(減速)による慣性力の影響は非常に小さい事,等を定量的に示す事が出来た.

3. 研究目標の達成状況

予想される効果として「実際には広大な領域で生じるソニックブームを制御された 条件の下で再現する事ができる事はその研究にとって大きなメリットである.また, 流体科学研究所の二段式軽ガス銃は, 亜音速から極超音速までの幅広い速度域で飛翔体を射 出することの出来る国内唯一の実験装置であるが, 今回の提案研究を実施することで,弱い 衝撃波に関連する他の様々な研究を実施する際にも有効な利用技術を蓄積する事ができる.」 としている.

多くのバリスティックレンジ実験では、飛翔体の減速効果を無視してデータの解析を行っ ているのが現状であるが、本研究により、その効果を定量的に把握したうえで、実験データ の考察を行う事が出来る事を示す事が出来た. さらに予想される効果として示したように、 バリスティックレンジによる実在気体効果の計測等,他の実験についても、モデル減速の効 果を定量的に調べる方法を示す事が出来た. これらの点から、初期の目標を達成する事がで きたと考えている.

4. まとめと今後の課題

単純形状モデルによる実験的数値解析的基礎研究は予定通りほぼ終了したと考えている. 今後,複葉モデルなど,実機に近いモデルによる実験および数値解析を行うにあたり,大口 径のバリスティックレンジ及び,複雑形状を扱う3次元数値解析コードの開発が課題である.

研究成果(*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. Hatanaka, T. Saito: Numerical Analysis of Weak Shock Attenuation Resulting from Molecular Vibrational Relaxation, Shock Waves, Vol. 21, No. 2 (2011), pp.121-129.
- [2] 畠中 和明, 齋藤 務: 弱い衝撃波の分子振動緩和による減衰過程に関する数値解析, 日本機 械学会論文集 B編, 76 巻・772 号 (2011), pp.2058-2064.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[3] K. Hatanaka, T. Saito, H. Yamashita, T. Ogawa, S. Obayashi and K. Takayama: Computations of Flow Field around an Object Decelerating from Supersonic to Subsonic Velocity, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.40-41.

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)なし

課題番号	J10004
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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

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

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

図1は、平面火炎の燃焼速度 Suに及ぼす未燃ガス温度 Tuの影響を示したものである.未 燃ガス温度が高くなると共に、燃焼速度は大幅に増加する.これは、未燃ガスの質量流束密 度が大きくなることに加え、未燃ガスの圧力が一定のため温度の上昇と共に密度が低下する からである.また、図中の実線は理論解析(漸近解析)により求められた燃焼速度である. 数値シミュレーションの結果と理論解析の結果は、ほぼ一致している.

図2は、未燃ガス温度Tu=1.0&3.0における分散関係を示したものである、未燃ガス温 度が高くなると、増幅率は増大する、これは、燃焼速度が増加するからである(図1参照). また、増幅率が最大となる波数(特性波数)が存在し、その値は未燃ガス温度が変化しても 不変である、このことは、固有不安定性に起因するセルの大きさが未燃ガス温度に依存しな いことを示している、図中の実線と破線は、理論解析により求められた増幅率と波数の関係 である、理論解析の結果は、波数が充分小さい領域において有効である、この領域において、 数値シミュレーションと理論解析の結果はほぼ一致している。



図3は平面火炎とセル状火炎の燃焼速度を示したものである.未燃ガス温度が高くなると 共に、両火炎の燃焼速度は大幅に増加する.これは、質量流束密度が大きくなること、並び に未燃ガスの密度が減少することに因るものである.また、両火炎の燃焼速度を比較すると、 未燃ガス温度が高くなると共に燃焼速度の増分は若干大きくなり、さらに温度が高くなると それは若干小さくなる.加えて、セル状火炎の燃焼速度と平面火炎の燃焼速度の比は、未燃 ガス温度が高くなると共に単調に小さくなる.これは火炎の不安定性における熱膨張の効果 が弱くなるからである.



図3:平面火炎とセル状火炎の燃焼速度

3. 研究目標の達成状況

本研究により,高温予混合火炎のダイナミクスに及ぼす未燃ガス温度の影響や,不安定性 のメカニズムが明らかになった.従って,高温予混合火炎の不安定性に着目した本研究は, 充分な成果を得ている.

4. まとめと今後の課題

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

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

[1] 門脇敏,八幡将史,小林秀昭,エンタルピーー定条件下における高温予混合火炎の固有不安 定性に関する数値シミュレーション,日本燃焼学会誌,52巻,162号,(2010),pp.329-334.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] Kadowaki, S., Yahata, M., and Kobayashi, H.: Intrinsic instability of high-temperature premixed flames: Formation of cellular flame fronts, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 58-59.
- 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	J10005
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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*,中田 一紀*,五十嵐 誠**,黄 啓賢** *九州工業大学生命体工学研究科,**東北大学流体科学研究所 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

既存のコンピュータでは難しい脳型情報処理を実現するため、発火タイミングで情報処理 を行う積分発火型スパイキングニューロン(IFN)のデバイス化が望まれる.このモデルで は、ニューロン数に比べてニューロン間を結合するシナプスの数が膨大であり、シナプス回 路の面積縮小が課題である.本研究では、ナノディスクアレイ構造と CMOS 集積回路と組 み合わせた新しいシナプスデバイスを提案し、トンネル効果を利用した究極の低消費電力・ 省サイズなスパイキング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、ナノディスク間の電子輸送における抵抗値の温度特性を解析 した.図1 (左) に示すように、ナノディスク膜厚 2nm では、60K 以下の低温では抵抗値 がほとんど変化しないが、それ以上の温度では抵抗値が減少する.図1 (右) では、ナノディスクの膜厚によって活性化エネルギーが制御できることがわかった[1-3].

九州工大においては、PSP 信号のゆらぎが脳型処理に有効に働くことから、ゆらぎ量の制 御電極の配置依存性やナノ構造アレイパターン依存性を回路シミュレーションによって調 べた.その結果、制御電極の位置により電子の存在確率の高い場所が変わり、それにより PSP のゆらぎ量が変化することがわかった.また、図2に示すように、入力電圧(Vin)を 変えることにより、相対的にゆらぎ量を調節できることを見いだした[4-6].さらに、1次元 アレイの方が2次元アレイよりも平均化効果が小さいためにゆらぎを大きくできること、2 次元アレイでも中央部を細らせてナノディスクの数を減らすことにより、ゆらぎを大きくで きることを見いだした.

3. 研究目標の達成状況

ナノディスクアレイ構造を用いたスパイクニューロンデバイス実現のため、ナノディスク アレイ構造の電子輸送特性を解析し、その特性をプロセス条件によりナノディスク径と間隔 で制御できることを明らかにした.また、回路シミュレーション結果から、デバイス構造に より電子輸送のゆらぎを制御できることを明らかにし、スパイクニューロンデバイス実現に 向けた知見を蓄積できた.

4. まとめと今後の課題

ナノディスクアレイの電子伝導特性の実測およびシナプス後電位 (PSP) 生成機能を実現 する構造での電子伝導のゆらぎ特性のシミュレーション検討を行った.

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し、物理特性を明らかにする.



図2 : シミュレーションで得られた PSP 立ち上がりのゆらぎ量

- 5. 研究成果(*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. Igarashi, C.-H. Huang, T. Morie and S. Samukawa: Control of Electron Transport in Two-Dimensional Array of Si Nanodisks for Spiking Neuron Device, *Appl. Phys. Express*, 3, 085202, 2010.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
 - [2] M. Igarashi, C. H. Huang, T. Morie and S. Samukawa: Control of Activation Energy for Electron Transport in Two-Dimensional Array of Si Nanodisks, *Ext. Abstracts of Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM)*, pp. 934-935, Tokyo, Sept. 23, 2010.
 - [3] 五十嵐 誠, 黄 啓賢, 王 宣又, モハマド ファイルズ・ブディマン, 森江 隆, 寒川 誠二: Si 量子ナノディスク 2 次元アレイ構造の電気特性の構造による制御, 第 71 回応用物理学会学 術講演会, 講演番号 14p-NC-7, p. 14-053, 2010.
- *[4] T. Morie, Y. Sun, H. Liang, K. Nakada, M. Igarashi, C. Huang and S. Samukawa: Fundamental Study on Spiking Neuron Devices, *Proceedings of the Tenth International* Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 110-111.
- [5] Y. Sun, H. Liang, T. Morie, M. Igarashi, C. Huang and S. Samukawa: A Si Nanodisk Array Structure for Spiking Neuron Models, *East-Asia Inter-University Workshop on Brain Engineering (EAW2011)*, p. 214, Kitakyushu, Feb. 28, 2011.
- [6] 森江 隆, 梁 海超, 孫 意来, 五十嵐 誠, 黄 啓賢, 寒川 誠二: ノイズを利用する脳型情報処 理回路のためのナノデバイス, 第58回応用物理学関係連合講演会, p. 339, 2011年3月25日.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J10006
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	2010.4 ~2011.3

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

長谷川裕晃*†,橘田征吾* 大林茂**††,村上正秀*** *秋田大学大学院工学資源学研究科,**東北大学流体科学研究所 ***筑波大学 †申請者,††所内対応教員

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

本研究では、シャトルの空力特性を明らかにするために、シャトルを風洞内に設置し、流体力の測定や流れ場の可視化実験を行った。図1に各レイノルズ数における抗力係数 *Cb*を示す. レイノルズ数 *Re*は、シャトルスカート径である 66 mm を代表長さとして定義した.また、シャトル付け根の隙間をから内部への流れが流体力に影響していると考え、シャトルスカート部隙間をテープで完全に塞いだ形態(without gap)でも実験を行なった。通常のシャトル(with gap)で回転がない場合、*Cb*はレイノルズ数の増加にともない、やや減少している. 一方、自動回転するシャトルでは、*Re*=2.1×10⁵を超えると、*Cb*は増加する.シャトルスカート径の変化は、収縮率る(=D'/D)で評価した.ここで、D'は変形後のスカート径、Dは変形前のスカート径を示す。図2に収縮率るを示す。回転していないシャトルでは、レイノルズ数の増加で、るの値は減少していく、レイノルズ数が高くなるにつれ、よりシャトルスカ



Fig. 1 Drag coefficients ($\alpha = 0^{\circ}$). Filled and open symbols denote shuttlecocks with and without gap, respectively



Fig. 2 Shrink ratio variation (α =0°). Filled and open symbols denote shuttlecocks with and without gap, respectively

ート部が、縮んでいく.このことで、*C*_Dがレイノルズ数の増加とともにやや減少することに なる.それに対して、自動回転しているシャトルでは、レイノルズ数が増加しても、スカー ト径の収縮はおきていない.特に、*Re*2.1×10⁵を超えるとスカート径の増大が生じる.これ は、シャトルが高速回転していることでのスカート部の広がりが、主流から受ける力より強 いためである.スカート径が増大することで*C*_Dの増大につながる.

一方,シャトルスカート部隙間を塞ぐと,いずれのレイノルズ数でも Colは大幅に減少する. Coが減少する傾向は、回転の有無にかかわらず、同様である.スカート部に隙間があること で、シャトルまわりの流れは、スカート内部に流れ込む.この流れにより、スカート内部で 圧力の低下が生じる.低圧部の存在で、シャトル前後での圧力差が生じ、抗力を引き起こす. さらに、シャトルまわりの流れを可視化したところ、通常のシャトルでは、シャトルスカー ト直後の下流位置で、強い渦の存在が確認できる.それに対して、隙間を塞いだシャトルで は、渦の存在が確認できるのは、シャトルから離れたより遠くの下流位置である.こうした 後流の違いは、スカート部から流れが放出される際の速度の違いが影響している.通常シャ トルでは、流れの一部が隙間からスカート内部に導かれる.この影響で、シャトルスカート 部から放出される流れの速度低下が起きるものと推測される.このことは、今後シャトルま わりの PIV(Particle Image Velocimetry)測定を実施し、明らかにしていく.

3. 研究目標の達成状況

バドミントンシャトル飛翔時における主軸周り回転の影響やシャトルの空力特 性と渦の挙動の関連についてはある程度明らかになりつつある.しかし,クルリ と回転し方向転換するシャトルのダイナミクスを考慮した実験に関しては,測定 手法の見直しを行い,今後改めて実施する予定である.

4. まとめと今後の課題

シャトルの大きい抗力は、シャトルスカート部隙間に流れ込む流れによって、引き起こさ れていることがわかった.この内部の流れにより、スカート内部の圧力が低下し、シャトル 前後で圧力差が増大し、抵抗を発生する.このことは、今後シャトル内部の PIV 測定、 PSP(Pressure Sensitive Paint)測定を実施し、シャトルの大きい流体力の発生メカニズムをさら に詳しく解明する.また、クルリと回転し方向転換するなどのシャトルのダイナミク スを考慮した状態での空力特性についても解明していく.

- 5. 研究成果(*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] 橘田征吾, 長谷川裕晃: バドミントンシャトルコックの空力特性, 機械学会東北支部第46期 秋季講演会, 秋田, (2010), pp. 51-52.
- [2] 橘田征吾, 長谷川裕晃, 村上 正秀: バドミントンシャトルコック主軸周りの回転が流体力に 及ぼす影響, 流体工学部門講演会, No10-16, 米沢, (2010), pp. 95-96.
- *[3] S. Kitta, H. Hasegawa, S. Obayashi, M. Murakami: Shuttlecock Aerodynamics and Dynamic Behavior Just After Impact, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 44-45.
- [4] 風張弘美, 長谷川裕晃, 村上 正秀: 回転をともなうシャトルコック周りの流れの特徴, スポ ーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2010, 東京, (2010), pp. 18-24.
- *[5] 風張弘美,長谷川裕晃: バドミントンシャトルコックの有する高い減速特性の解明,第41回 学生員卒業研究発表講演会,岩手,(2010), pp. 40-41.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J10007
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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

須藤 誠一*†, 浅野 大作*, 猪股 聡太* 高奈 秀匡**, 西山 秀哉**†† *秋田県立大学システム科学技術学部, **東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

磁気特性の優れた永久磁石に磁性流体を吸着させた磁石一磁性流体系を創製し、その系に 外部からわずかな強さの交流磁界を印加することによって発生する複雑な界面流動現象を、 外部交流磁場の強さの振幅および周波数を変えて、制御するシステムを構築する.

2. 研究成果の内容

数ミリメートルのサイズの磁気特性の優れた小さな永久磁石(円柱状ネッケルコーティン グ NdFeB 磁石)に微小な量(数百マイクロリットル~数千マイクロリットル)の磁性流体 を吸着させた磁石-磁性流体系を構築し、その系全体が外部から一様な磁場強さを受けるこ とができるようにヘルムホルツコイルを使用した電磁石系を創製した.さらに、ヘルムホル ツコイルに交流電圧を印加することにより、周期的に磁場強さを変化させ、磁性流体界面の 流動現象を界面に影響を与えない様な光学計測系により調べた.その結果、磁性流体を数+ Hz から百 Hz 程度まで高速に流動駆動できること、および周波数制御が可能であることが 明らかとなった.特に、外部磁場の周波数が磁石-磁性流体系の固有振動数に近づくと、磁 場強さが微弱であるにもかかわらず、磁性流体界面から極めて細いキャピラリージェットの



図1: 微弱磁場駆動による磁性流体界面流動



図2:磁性流体界面応答の周波数特性

生成されることも明らかとなった(図1参照:図中の数字は時間).このような磁性流体界面の大きな流動を誘起する磁石一磁性流体系の固有振動数は磁性流体の体積に依存し、そのような磁性流体界面流動の外部磁場による周波数特性が定量的に明らかにされた(図2参照:図中のZmaxは界面変動の最大変位、foは外部磁場の周波数、Vmは磁性流体の体積).

3. 研究目標の達成状況

申請書において予想した成果は磁気特性の優れた微小な永久磁石に磁性流体を吸着した系 を構築すること、および磁石一磁性流体系に永久磁石の磁極に対して外部衝突磁場・同極対 向磁場が交互に印加されることによって変動する交流磁場を加えて磁性流体の界面流動を 誘起すること、さらに磁性流体界面流動を外部の微弱な磁場によって制御する基礎的な技術 を開発することにあった.これらの目標は、磁石一磁性流体素子系と外部交流磁場生成系を 構築できて、外部磁場の強さおよび周波数を可変することによって誘起される磁性流体界面 流動の周波数特性も明らかとなったことから、おおむね達成できたと判断される.

4. まとめと今後の課題

磁気特性の優れた Nd2Fe14B 磁石と磁性流体(HC-50)を使用して磁石一磁性流体素子系を 構成し、この素子をヘルムホルツコイルの中心部分に配置することによって素子一外部交流 磁場生成系を構築した.これらの装置系は、前述した通り、百 Hz 以下の周波数において磁 性流体界面の流動を規則的に誘起し、比較的高速で応答制御可能であることが確認できた. 従って、今後は、これらの素子原理を流体マイクロ機器の開発に応用していくために、現在 は一方向に向かう流体流動を2方向にする磁石一磁性流体素子系の構築や永久磁石から離れ た位置で磁性流体を保持する装置の開発を行うことも必要である.また、現在、外部から印 加する磁場の生成は検定用のヘルムホルツコイルであり、コイル直径が 150mm 程度と比較 的サイズが大きい.したがって、微小量の磁性流体と十数ミリメートル程度の小さなコイル に改良する必要があろう.そのため、今後は微小なサイズの磁石一磁性流体素子系の基礎的 な応答特性および外部交流磁場の生成装置系の小型化まで含めた研究展開が必要となろう.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- *[1] S. Sudo, D. Asano, H. Takana and H. Nishiyama: The dynamic behavior of magnetic fluid adsorbed to small permanent magnet in alternating magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.323(2011), pp.1314-1318.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] S. Sudo, H. Takayanagi, T. Yano and H. Nishiyama: The cavity generated with water entry of a magnetic fluid coated cylindrical magnet, *Program of the 12th International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magnetorheological (MR) Suspensions,* Philadelphia, PA, USA, (2010).
- [3] 須藤誠一, 高柳拓吉, 高奈秀匡, 西山秀哉: 球状磁石-磁性流体系のウォーターエントリー現象, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集,No.10-16 (2010), pp.167-168.
- *[4] S. Sudo, S. Inomata, D. Asano, H. Takana and H. Nishiyama: Surface Oscillations of Magnetic Fluid Droplet Adsorbed to Magnetized Needlepoint in Alternating Magnetic Field, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp.152-153.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J10008
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2010.4~2011.3

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*†, 中川 のぞみ*, 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

1. 研究目的

エレクトロレオロジー(ER)効果は、ある流体に外部電場を印加・除去することによって生 ずる見かけの粘度の増加・回復応答現象である. ER 効果が見られる流体は ER 流体と称され ており、機能性流体としての応用が期待されている. 粒径がマイクロメーターオーダーの固 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、粒径がナノメーターオーダーの粒子(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/シリコーンオイル系を中心として、ナノ粒子分散系を調製した. 前年度に得られた知見に基づいて、比較的良好なER特性を示す、平均粒子径が300 nm程度の粒子を中心に、粒子の高充填率化を試み、その効果を検討した.この際、粒子濃度(体積分率 ϕ)を変化させてER流体を調製した.粒子体積分率は、12 vol%を中心として調製した. 調製した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、調製したER流体の無電場における流動特性、電場応答性、及び、時間安定性を評価した.流動特性の評価は、電場印加が可能な平行平板型回転粘度計を用い、平板の間隙 h は、50 μ m とした.



図1: 粒子体積分率 φ= 8.8 vol% (○印),及び,12 vol% (▲印)で調製した試料につい て得られた無電場における流動特性(左),電場応答特性(右)

図 1 (左) に、 φ = 12 vol%で調製した試料について得られた、 無電場におけるせん断応

力のせん断速度依存性を示す. ϕ = 8.8 vol%で調製した試料の結果を合わせて示している. ϕ = 12 vol%で調製した試料について,低せん断速度側の応力値に注目すると,数+ Pa 程 度の平坦部(見かけの降伏応力)が見られる.この値は、 ϕ = 8.8 vol%で調製した試料に おける値より高い.図1(右)に示す応力の電場応答特性については、 ϕ = 12 vol%で調製 した試料では、16 kV/mmの電場印加によって6 kPa 程度の応力応答が得られており、 ϕ = 8.8 vol%で調製した試料より大きな応力値の電場応答が得られた.しかしながら、 ϕ = 12 vol% で調製した試料の応力値はやや不安定な挙動を示しており、この応力値の乱れは、2 次粒子 が強く凝集して高密度に発達した微細構造と密接に関係していると考えられる.

3. 研究目標の達成状況

粒子径 300 nm 程度, 粒子体積分率 ϕ =12 vol%で調製した試料において, 分散安定性, ER 特性において比較的良好な結果が得られており, 6 kPa 程度の誘起せん断応力が得られた.

4. まとめと今後の課題

粒子径 300 nm 程度の流体について、粒子の高充填率効果が認められた. ER 特性の向上に は、さらに高充填率化を行うことが望まれるが、一方において、無電場における見かけの降 伏応力については、 $\phi = 8.8$ vol%の試料より高い値が得られた. この問題点の解決には、 分散剤の使用が一般的であるが、ER 効果の不安定化が危惧され、分散剤を極力用いないこと が望ましい.別の解決案として、分散効果を兼ね備えた分散媒体の探索が期待され、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)

 K. Tanaka, T. Hira, R. Fukui, N. Nakagawa, R. Akiyama, M. Nakano, K. Yoshida and T. Tsujita: Development and Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, *Colloid Polym. Sci.*, DOI 10.1007/s00396-011-2396-x, Published online: 03 March, (2011) (8 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[2] K. Tanaka, T. Hira, R. Fukui, N. Nakagawa, R. Akiyama, M. Nakano, K. Yoshida, and T. Tsujita: Development and Flow Evaluation of Electro-Rheological Nano-Suspensions, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 126-127.
- *[3] K. Tanaka, R. Akiyama, and M. Nakano: Flow Behavior and Microstructure of Electro-Rheological Nano-Suspensions based on Titanium Dioxide Nano-Particles, *Proceedings of the Seventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2010), pp. 286-287.
 - [4] 比良臣伸,福井隆一,中川のぞみ,田中克史,秋山隆一,中野政身,辻田哲平:ナノ粒子 分散系 ER 流体における流動挙動と微細構造,日本レオロジー学会第 37 年会講演予稿集,東 京,(2010), pp. 31-32.
 - [5] 比良臣伸,福井隆一,中川のぞみ,田中克史,秋山隆一,中野政身,吉田圭佑,辻田哲平: ナノ粒子分散系 ER 流体の流動及び微細構造の評価,第 58 回レオロジー討論会講演要旨集, 仙台,(2010), pp. 130-131.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

課題番号	J10009
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	2010.4 ~2011.3

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**†† 小泉 遼**, 早瀬 敏幸**, 山口 済***, 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 ***東北厚生年金病院 循環器科, ****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) MRI による小児先天疾患における心腔内血流計測

長野こども病院と共同で、小児先天性心疾患患者における MRI による心腔内血流計測の可能性 を検証した.小児でも解析可能な MRI データは取得は可能であった(図 1).

(2) 心房内血流シミュレーション

正常例,心房収縮不全例,心房細動例のそれぞれの条件下で心房内血流シミュレーションを行い,左心耳における Relative Residence Time (RRT)を比較した.その結果,高頻度収縮によって,左心耳内で低せん断の血流振動が発生することを確認した(図2).そのために左心耳内で血液がうっ滞し,血栓形成され易い状態になると考えられた.また心耳を切除した場合,左心房内のながれ場および壁せん断応力分布に変化が無いことを確認した(図3).心房細動患者における心房由来の血栓は90%以上左心耳に形成されるため,心房細動患者において開心術の際には左心耳切除を考慮するが,今回の実験結果はその考えを支持する結果であった.



図1. 小児先天性心疾患患者における 心腔内血流ベクトル表示



図 2. 正常例,心房収縮不全例,心房細 動例における RRT の比較



intact

velocity vector field wall shear stress without the LAA



3. 研究目標の達成状況

(1) MRI にて左心房内渦流を計測し、得られた患者データを基に渦形成の比較を疾患別に行う.

長野こども病院と連携し、4 例の先天性心疾患患者の渦流解析を行った.疾患により左心房内 渦流形成に差異があることが観察された(構造が異なることにも起因する).また小児でも解析可 能であると判断した.成人例でも症例の蓄積を行っており、ほぼ目標は達成されたと考える.

(2) 左心房内血栓の 90%が左心耳内で形成される要因を検証するために、左心房の形態を変化 させた場合の左心房内血流シミュレーションを行う.

左心房内血流シミュレーションを用いて、左心耳における Relative Residence Time (RRT)を 比較した. 高頻度収縮によって左心耳内で低せん断の血流振動が発生することを検証した. 心房 細動時には、左心耳内に血栓が形成されやすいと考えられた. また心耳を切除した場合に左心房 内のながれ場および壁せん断応力分布に変化が無いことを検証し、心房細動患者において開心術 時に左心耳を切除することを支持する結果を得た. 血栓形成には流体力学的以外の要素もがある が、目標はほぼ達成されたと考える.

4. まとめと今後の課題

(1) 小児先天性心疾患患者において MRI による心腔内血流計測は可能であることを検証した.平成 23 年度はシミュレーションによる検討も加え,先天性小児心疾患における心腔内血流解析とし,独立して本公募研究に応募することとなった.

(2) 左心耳における Relative Residence Time (RRT)を比較し,高頻度収縮によって左心耳内で低せん断の血流振動が発生することを検証した.また左心耳を切除した場合,左心房内のながれ場および壁せん断応力分布に変化が無いことを検証した.今後はシミュレーションで得られた結果を動物実験にて検証する事を計画している.マイクロバブルをトレーサーとし,超音波断層装置で可視化を行い,洞調律時と心房細動時にマイクロバブルの Residence Time を直接計測する予定である.

5. 研究成果(*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- *[1] 山家智之, 白石泰之, 三浦英和, 馬場敦, 井街宏, 早瀬敏幸, 丸山重直, 柴田宗一, 三引義 明, 大沢上, 佐藤尚. ナノテクノロジーを応用したテーラーメイド人工心筋. 東北医学会雑 誌 122:65-70, 2010.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] Shibata Muneichi: Flow in the Left Atrium MRI Blood Flow Measurement and Numerical Simulations. *BIT's 2nd Annual International Congress of Cardiology*, Shanghai, (2010), p. 253.
- *[3] M. Shibata, T. Yambe, T. Yamaguchi, R. Koizumi, K. Funamoto, T. Hayase: Left Atrial Appendage, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 94-95.

課題番号	J10010
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	$2010.4 \sim 2011.3$

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

> 酒井 康彦*†, 早瀬 敏幸**†† 長田 孝二*, 鈴木 博貴* *名古屋大学工学研究科, **東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

境界層外の乱れが壁面境界層の乱流特性とその中での熱輸送に大きな影響を及ぼすことが国内外 の室内実験によって指摘されている.ところが、そのメカニズムについては、壁面のごく近傍での 乱流計測や瞬間変動圧力場等の測定が非常に困難であることから、実験的解明が極めて難しい.そ こで、本公募共同研究では、実験と同じ乱流格子や他の乱流プロモータによって一様流中に作られ る乱れを高精度に再現できる三次元直接数値計算 (DNS) コードを独自開発し、中立および安定・ 不安定成層境界層乱流に及ぼす境界層外の乱れの影響を数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

まず,境界層外乱れとして用いる格子乱流と乱 流境界層の干渉を解析できるコードを独自開発 し,計算を行った.図1に排除厚さおよび運動量 厚さ基準のレイノルズ数(Re_oおよび Re_o)の主 流方向変化を示す.これまでの実験ではこれらの 主流方向変化は明らかにされておらず,この成果 は速報として機械学会論文集に掲載された.

一方、より高 Re 数乱流場を解析するためには、 計算領域を境界層外乱れの生成部(ドライバ部)と 乱流境界層部(テスト部)に分割し、Poisson 方程 式を直接求解する必要がある.この場合、ドライバ 部とテスト部の接続領域の処理が極めて重要とな る.本研究では、一方向に物理量の一階微分が0と



図1:排除厚さおよび運動量厚さ基準 のレイノルズ数(Re₀および Re₀)の 主流方向変化(Dは計算領域の高さ)

なる特殊なベクトルを定義して導入することで、周期境界またはノイマン境界でない場合でも格子 が等間隔であれば Poisson 方程式の直接求解を可能にする計算アルゴリズムを開発した.

3. 研究目標の達成状況

独自開発したコードを用いて境界層外の格子乱流場,および境界層外乱れの影響を受けた 乱流境界層の直接数値計算を行った.本数値解析は,境界層外乱れの影響受けた乱流境界層 を,境界層外乱れの有無により変化する流れ場のレイノルズ数を一致させて比較を行うこと を可能にした.これらの成果は,速報として機械学会論文集に掲載された.さらに詳細な結 果に関しては現在データの解析および考察を進めているところである. さらに,高 Re 数乱 流場を解析するうえでのボトルネックを解消することに成功した.以上の成果は,当初の研 究目標を達成するものであると評価される.

4. まとめと今後の課題

独自開発したコードを用いて境界層外の格子乱流場,および境界層外乱れの影響を受けた 乱流境界層の直接数値計算を行った.また,高Re数乱流場を解析するうえでのボトルネッ クを解消することに成功した.現在,高Re数場を対象とした計算コードの開発および調整 を行っており,それらが完了次第,大規模計算を行う予定である.さらに,不安定および安 定な温度条件についても計算を進めていく予定である.境界層外乱れによる乱流境界層の構 造の変化については国内外で強い関心をもたれており,一刻も早い数値的解明が必要である.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai and T. Hayase: Direct Numerical Simulation of Regular and Fractal-Grid Turbulence Using the Immersed Boundary Method and Fully Conservative Higher-Order Finite-Difference Schemes, *International Review of Physics*, Vol.4, No.2 (2010), pp.83-90.
- [2] H. Suzuki, K. Nagata, Y. Sakai and T. Hayase: Direct Numerical Simulation of Turbulent Mixing in Regular and Fractal Grid Turbulence, *Physica Scripta*, T142 (2010), 014065.
- [3] 鈴木博貴,長田孝二,酒井康彦,早瀬敏幸: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2報,DNSによる一様等方性と間欠性に及ぼす格子 パラメータの影響の検討)、日本機械学会論文集(B編)、Vol.76, No.772 (2010), pp.2024-2031.
- *[4] 鈴木博貴,長田孝二,酒井康彦,早瀬敏幸:格子乱流の影響を受けた乱流境界層の統計的特性(直接数値計算による空間発展解析),日本機械学会論文集(B編),Vol.77, No.775 (2011), pp.737-748.
- [5] K. Nagata, H. Suzuki, Y. Sakai and T. Hayase: Numerical Simulations, Applications, Examples and Theory, Chapter 3 (*InTech Open Pub.*), (2010), pp.39-62.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[6] K. Nagata, Y. Sakai, H. Suzuki and T. Hayase: Direct Numerical Simulation on the Effects of Free-Stream Turbulence on an Isothermal Turbulent Boundary Layer, Proc. of the 10th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp.148-149.
 - [7] K. Nagata H. Suzuki, Y. Sakai and T. Hayase: DNS of Grid Turbulence with Scalar Transfer Using the Immersed Boundary Method and Fully Conservative Higher-Order Finite-Difference Schemes, *Proc. of International Workshop on Process Intensification* 2010, Fukuoka, (2010), pp.85-86.
 - [8] H. Suzuki, Y. Sakai, K. Nagata and T. Hayase: DNS on Spatially Developing Fractal Generated Turbulence with Heat Transfer, Abstract of the 1st UK-Japan Bilateral Workshop "Turbulent Flows Generated/Designed in Multiscale/Fractal Ways: Fundamentals and Application," London, (2011), p.21.
 - [9] 鈴木博貴,長田孝二,酒井康彦,早瀬敏幸: 拡散項の高次離散化によるスカラー乱流輸送の 有限差分法 DNS の精度向上,日本計算工学会 第15回計算工学講演会 (2010), pp.753-756.
 - [10] 長田孝二,鈴木博貴,酒井康彦,早瀬敏幸:フラクタル格子によるマルチスケール誘起乱 流の特性とスカラー輸送現象,第60回理論応用力学講演会,(2010), CD-ROM.
- 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	J10011
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	2010.4 ~2011.3

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 伸一*** *(㈱IFG, **東北大学流体科学研究所 ***東北大学大学院医工学研究科 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

平成21年度に流体科学研究所,医工学研究科,㈱IFGの共同研究で実施した「目標運動 開始をトリガーとする骨格筋電磁誘導刺激システムの最適化」において,小型の2チャンネ ル磁気刺激装置と筋電位計を設計,製作した.本共同研究の目的は,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分野で利用する新たな医療機器を開発して,製品化 を目指すものである.

2. 研究成果の内容

社会の高齢化が進み,脳血管障害に起因する四肢麻痺患者に対するリハビリテーションの 必要性が増している.従来,損傷を受けた脳組織は回復しないとされていたが,脳組織には可 塑性があって機能回復を促進できることが見出された.これは適切なリハビリテーションに よって,新たな脳神経ネットワーク構築が促進できることを意味する.この観点からリハビ リテーションの分野に新たな理学療法機器の導入が進んでいる.本共同研究では,従来から の他動的なリハビリテーションではなく,患者本人の努力を反映するリハビリテーションに よって,効率的に脳神経ネットワークの再構築を支援する装置の開発を目指した.すなわち, 患者本人の運動努力を筋電位として検出し,その筋電位信号をトリガーに使い目的部位に磁 気刺激を加えることで,麻痺した四肢の動きを増強することを目指した.図1に磁気刺激装 置の電源回路を示す.Aの電源で発生させた1000V程度の高電圧をダイオードB1で整流して コンデンサCに蓄える.サイリスタDにトリガー信号を加えると,コンデンサに蓄えられた 電荷は磁気刺激コイルEに放電されて強い磁界を生じる.





図1 磁気刺激装置の電源回路

図2 手首の筋電位, 左:動き小, 右:動き大

この磁界が末梢神経に誘導起電力を発生させる結果,脳機能障害があっても四肢の動きを 増強できる.磁気刺激のトリガー信号に筋電位を使うと、リハビリの対象となる目的部位の 運動を正確に検出することができる利点がある.図2は手首の筋電位の例であって、左は指 を緩めた状態、右は指を強く握った状態であって、筋電位の強さも発生頻度も増えている.

図3は開発した時期刺激装置の電源部(Powerと表示),筋電位計(EMG),コイルを示 す.筋電位は接触式の2つの電極で検出した.図4は手首に貼った筋電位電極で指の動き を検出し,前腕部に磁気刺激を加えた直後の筋電位を示す.図4Aは単発の磁気刺激を加え た場合であって,磁気パルスに起因する強いノイズ信号Pの80ms以降にCMPA(Compound Muscle Action Potentials)で示される筋運動が誘発されている.図4Bは磁気パルスを2 連発とした場合であり,筋運動が単発の場合よりも増強されている.このようにわずかな筋 肉の運動が磁気刺激によって増強できることが明らかになった.





図3 磁気刺激装置,コイル,筋電位計

図4 誘発筋電位, A:単発, B:連発磁気刺激

3. 研究目標の達成状況

昨年は大脳皮質運動野の磁気刺激によって筋肉の動きを誘発させた.今年度は末梢神経を パルス磁気によって刺激することで、目的部位の筋肉に大きな運動を誘発することができた. さらに磁気パルスのトリガーとして筋電位を使うことに成功し、研究目的を達成した.

4. まとめと今後の課題

目的部位の筋電位を測定し、これをトリガー信号として目的部位に磁気刺激を加えることで、小さな筋肉の動きを増強することができた.本装置の特許出願を行ったので製品化するために、医療機器の許可取得を目指す.

- 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] T. Abe, T. Takagi, S. Izumi and K. Yashima: New Rehabilitation Equipment Using a Magnetic Stimulation Triggered by Electlomyographic Activities. *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 76-77.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) (特許)
- [1] 肉の動きを増強又は回復する方法および装置 阿部、高木、出江、八島他 特開 2010-166971
- [2] 治療用生体磁気刺激方法および装置 阿部、高木、出江、八島他 特開 2010-207268
| 課題番号 | J10012 |
|------|----------------|
| 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 | 2010.4 ~2011.3 |

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

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

1. 研究目的

小児麻痺は全出産の0.3%を占め、その60%が脳出血によるものである.満期で出生した脳障害児の90%が周産期における低酸素・虚血などの急性ダメージに起因すると報告されている.しかし、発症の機構に関しては不明な点が多い.

この研究は妊娠末期のマウス胎仔に対し低酸素負荷を行い、血流変化を計測することにより、脳出血の発症に至るメカニズムを流体力学的に解明することを目的とする.

2. 研究成果の内容

母体栄養制限を利用した胎児脳出血マウスモデルを作成した.本モデルでは、マウスの胎 仔に対し、5分毎に母体からの血液供給を遮断することにより虚血再還流の負荷を与え、脳 出血を発生させる.胎仔心電図による心拍数計測と同時に、高性能超音波画像診断装置を用 いて胎仔脳血流量を計測し、血流に由来する超音波Bモード画像上の輝度の変化を計測した. その結果、出血部位と発症のタイミングを検出でき、特に2回目の再灌流時に脳出血の発症 が多く観察された.このことから、虚血再灌流の繰り返しが脳出血を誘発する可能性が示唆 された.



図1:胎仔心拍数変動と脳出血発症タイミング

3. 研究目標の達成状況

高性能超音波画像診断装置を用いて胎仔脳出血の瞬間を観察することに成功した.し かしながら、本手法は脳血流量に相関する輝度変化を指標としている.そのため、脳血管を描 出し、血管内の血流評価(拍動など)には成功していない.

本研究の最終目標である脳出血発症メカニズムの流体力学的な解明には,更なる計測技術と解析技術の進歩が必要である.



図2:超音波Bモード画像による高輝度部位(左)と脳出血部位(右)

4. まとめと今後の課題

母体栄養制限を利用した胎児脳出血マウスモデルを用いて胎児心拍数と脳血流量の同時計 測に成功した.今後は胎仔脳血流計測技術と画像解析技術の改善により血流量と拍動の評価 を可能にする必要がある.

- 5. 研究成果 (*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] T. Ito, K. Funamoto, K. Funamoto, K. Tanabe, A. Nakamura, T. Hayase and Y. Kimura: Fluid Analysis of The Mechanism of Fetal Brain Hemorrhage, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.78-79.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J10013
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2010 ~ March 2011

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

Sergey Minaev*†, Kaoru Maruta**†† Hisashi Nakamura**, Roman Fursenko *, Evgeniy Sereshchenko*, * ITAM SB RAS, **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The project is directed toward solving a fundamental problem of mechanics of reactive flows and combustion related with description of combustion waves propagating in micro channels with elevated temperature of the wall within an universal model. Solution of this problem will promote development of eco-friendly technologies of gas burning, energy saving and conversion on the basis of micro channel technologies.

2. Details of program implement

In the course of project implementation Russian project members (R.Fursenko, S.Minaev, E. Sereshchenko) have visited Institute of Fluid Science, Tohoku University. During the visit Japanese and Russian groups had fruitful discussions on the results obtained in the frame of the project and formulated plans of the future research. Project members took part in the 10th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration and presented the results of the project.

3. Achievements

The objective of the present study is the formulation of the model of the flame front evolution that is able to capture extinction, ignition and flame as well as the conventional regime of flame propagation similar to the "flamelet" model. The basic equations constituting of the 1D thermo-diffusive model of combustion is reduced to the system of the two ordinary differential equations for the flame front coordinate and the flame temperature that determine the flame front dynamic. We demonstrate application of our method to solution of two different problems of non stationary propagation of reacting fronts. The first problem is concerned the flame propagation in the micro channel with variable cross section and non uniform temperature distribution in the channel walls. Despite of the limited range of its validity imposing by slow evolution approximation and weak nonlinearity, the developed models with inertial effects appear to be able to cover different phenomena including the flame ignition, extinction and the flame oscillations observed in experiments and obtained in previous papers by numerical simulations of full original models. The second problem is concerned the flame front dynamic generated by thermal instability. In this case since the fuel and combustion products are both solid the initial mathematical model involves diffusions equations for temperatures only. This type of combustion is referred to as gasless combustion of condensed systems. The same method as that applied to modeling of flame in micro channel allows derivation of the flame front evolutionary equations within the thermal-diffusion model of gasless combustion of condensed systems. The evolutionary equations for the flame front coordinate and the flame temperature were obtained and these equations reproduce as stable wave as pulsating front motion. We think that the inclusion of the inertial effects in the frontal model of combustion like "flamelet" model can yields principal new possibility for simulations of the combustion wave in complex flows and confined systems because they allows description of flame extinction, ignition and the oscillatory modes of flame propagation. The nonlinear model with inertial effects may be considered as further development of classical concept on burning velocity.

4. Summaries and future plans

The various flame instabilities observed under gas combustion in micro systems will be interpreted within the frame of one theoretical approach. The proposed methods of derivation of evolution equation may be extended in future to the 2D or 3D cases with consideration of the effects of flame front curvature. Experimental data about limits of existence of different combustion regimes will be obtained and the physical mechanisms responsible for formation of these regimes will be distinguished. At the project implementation is planned to continue developed forms of scientific cooperation between Russian and Japanese research teams.

5. Research results (* reprint included)

The novel formulation of the flame front evolution model has been suggested that is able to capture effects of flame initiation and extinction as well as the conventional regime of flame propagation similar to the "flamelet" model. The applications of the new model to the problem of non stationary flame propagation in microchannels have been demonstrated. The characteristics of radiative heat flux from micro channel were numerically investigated and the qualitative agreement between experimental and theoretical results were obtained.

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] R. Fursenko, S. Minaev, K. Maruta, H. Nakamura and H. Yang, Characteristic regimes of premixed gas combustion in high-porosity micro-fibrous porous media, *Combustion Theory and Modelling*, 14 (2010), No 4, pp. 571-581
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[2] S.Minaev, R.Fursenko, K.Maruta, Inertial effects in nonlinear models of flame front evolution, *Proceedings of the 10th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai (2010), pp. 64-65.
- [3] A.V. Menschikov, B.S.Mazurok, B.S.Dolgovesov, R.V.Fursenko and S.S. Minaev, Real Time Modeling of Flame Front Evolution by Kinematic Model, *Proceedings ICMAR 2010 conference*, Novosibirsk, (2010), CD-ROM, 2 pages.
- 3) Patent, award, press release etc.

Project code	J10014
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2010 ~ March 2011

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

Roman Fursenko*†, Kaoru Maruta**†† Hisashi Nakamura**, Sergey Minaev *, Aleksandr Menshchikov***, Boris Mazurok*** * ITAM SB RAS, **Institute of Fluid Science, Tohoku University *** IAE SB RAS †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Development of GPU oriented parallel numerical codes for simulations of combustion processes to facilitate design of advanced combustion technologies.

2. Details of program implement

In the course of project implementation Russian project members (R.Fursenko, S.Minaev, B. Mazurok and A. Menshchikov) visited Institute of Fluid Science, Tohoku University. During the visit Japanese and Russian groups had fruitful discussions on the results obtained in the frame of the project and formulated plans of the future research. Project members took part in the 10th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration and presented the results of the project.

3. Achievements

All results which have been expected in the submitted project were achieved. The fulfillment of the project allows decreasing of computation cost and computation time of simulations of some combustion processes. On the base of numerical simulations new knowledges on dynamical behavior of lean low-Lewis-number premixed flames have been obtained. In particular it was demonstrated that divergent channel is a perspective configuration to investigate characteristics of low-Lewis number flames.

4. Summaries and future plans

A 3D reaction-diffusion model for lean premixed flames with radiative heat losses propagating in divergent channel was studied numerically. Parallel computations on the base of GPU allow us to reach 40 times speedup in comparison with computations on CPU. Effect of inlet gas velocity and heat-loss rate on flame structure at low Lewis number was investigated. It was found that continuous flame front exists at small heat losses and the separate flame balls settled within restricted domain inside the divergent channel at large heat losses. It is shown that the time averaged flame balls coordinate may be considered as important characteristic analogous to coordinate of continuous flame stabilized in divergent channel.

The future research will be directed towards the numerical simulations of nonstationary 3D flame patterns forming during premixed gas combustion of lean low-Lewis-number mixture in stretched flows and in confined geometry. The effective algorithms for GPU will be developed. Comparison of the theoretical results with the experimental data known from the literature, the results obtained by Prof.K.Maruta group, and during "adhoc" experiments put during the course of performance of the project are planned.

The project has been fulfilled successfully. The project results and plans of the future research were discussed with Japanese group. Results of the project have been presented on the 10th International AFI/TFI conference and the paper reported these results have been accepted for publication in Combustion Theory and Modelling journal.



Fig. 1. Cellular flame and flame balls in divergent channel (equiscalar surfaces C=0.2 are depicted) calculated for V0=12.5, Le=0.3 and different heat-loss rates h.

- 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. Fursenko, S. Minaev, K. Maruta, H. Nakamura: Parallel Computations on the Base of GPU for Modeling of Flame Balls Dynamics, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 50-51.

Project code	J10015
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2010 ~ March 2011

Simulations of Convection-Enhanced Delivery in Rat Brain

Joshua H. Smith*†, Kenichi Funamoto**†† Kathleen A. Starkweather*, 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 of CED in realistic brain geometry that includes geometric and material nonlinearities and transport of the infused agent. With this model, we plan to compare numerical results with experimental infusions conducted in rat brain.

2. Details of program implement

This is the second year of research collaboration between Professors Smith and Funamoto. During the first year, Prof. Funamoto reconstructed a geometric model of a rat brain from MR images provided by collaborators at Tohoku University Hospital, and Prof. Smith and Mr. Lefever began improvements to an existing, self-written finite element code for modeling transport in deformable porous media. Specifically, the code was being translated from C++ to MATLAB in order to take advantage of the sparse matrix solvers available within MATLAB.

During the second year, Prof. Smith and Ms. Starkweather completed porting the code to MATLAB but determined that the translated code was too limited to be useful for the complexity of the problem. Specifically, the code (1) could not handle meshes of density needed to successfully resolve the transport of the infused species and (2) would need to be revised significantly to account for material nonlinearities. Since September 2010, Prof. Smith and Mr. Lefever have been exploring the utility of FEBio, an open-source finite element program from the University of Utah that includes geometric and material nonlinearities and support for representing biphasic media.

3. Achievements

There has only been modest progress toward the overall goal of developing a model of CED that includes geometric and material nonlinearities and transport of the infused agent. It was believed that porting our previous self-written code to MATLAB, and taking advantage of the memory management and sparse matrix solvers within that program, would greatly increase the sizes of meshes that could be used. However, after significant effort to translate the code from C++ to MATLAB, this unfortunately determined to not be as significant as thought. Ultimately, it was decided that it would be better to explore commercially written or open-source finite element programs, such as ABAQUS or FEBio, respectively.

Beginning in September 2010, we have been learning FEBio and validating it against the analytical solutions for several simple benchmark problems in porous media. Through this process, it was determined that FEBio did not have a compressible Ogden-type material model consistent with experimental characterizations of brain tissue that is consistent with their biphasic formulation. At the request of Prof. Smith, the authors of FEBio coded and included the appropriate material definition into the program in early March 2011. Since then, we have been testing their formulation to determine that it works correctly.

4. Summaries and future plans

Validation of FEBio will continue over the next two or three months. Concurrent with that effort, Prof. Smith and Mr. Lefever will determine a procedure for developing an anatomically realistic brain mesh that can be read by FEBio. In addition, as FEBio does not have capabilities to model the transport of the infused agent, we will explore possible approaches to use the deformation and fluid velocity results from FEBio as the inputs to a convective-diffusive mass transport code.

- 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, K. A. Starkweather, and T. Hayase: Considerations for simulations of infusion in realistic animal brain geometries, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 96-97.
- 3) Patent, award, press release etc.

(Press release)

Lafayette College Campus News. "Kathleen Starkweather '11 Researches Technique to Treat Brain Cancer in Japan." November 16, 2010.

Project code	J10016
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2010 ~ March 2011

Numerical Studies of the Reacting Rarefied Flows in Tubes

Mikhail Ivanov*†, Kaoru Maruta**††, Yevgeniy Bondar*, Georgy Shoev* *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

A set of DSMC molecular collision models completely consistent with the macroscopic reaction mechanism was developed for the H_2/O_2 mixture and the internal structure of the detonation wave is numerically studied using these models. The main attention was paid to making the models of forward and reverse reactions consistent in terms of detailed balance. The temperatures of different molecular modes obtained in DSMC computations of adiabatic autoignition are shown in Fig. 1 and compared with a solution of equations of chemical kinetics. Modified models are able to accurately reproduce the adiabatic autoignition processes with a correct ignition delay and final equilibrium state.



Figure 1. Temperatures of different modes (left), Kin – solution of equations of chemical kinetics, DSMC – results of DSMC computations. Profiles of atomic hydrogen mass fraction inside the detonation wave front (right), ZND solution and DSMC results for different time instants.

The models were used for DSMC modeling of propagation of a detonation wave initiated by breakdown of the diaphragm between channels with different pressures. An unsupported Chapman-Jouguet detonation was obtained. The simulation results on the internal structure of the detonation wave are in qualitative agreement with the Zeldovich – von Neumann – Doering theory and provide a correct equilibrium state downstream of the wave front. It is demonstrated in Fig. 1 where the profiles of atomic hydrogen mass fraction inside the detonation wave are shown.

The SMILE system was modified for modeling the flow in micro flow reactor in quasi-zero-dimensional formulation and numerical test were performed.

The shock wave entry into a microchannel and its propagation in the microchannel at M=2.03 was studied numerically with the use of the continuum and kinetic approaches. A significant difference between the inviscid and viscous numerical computations was demonstrated. The numerical data obtained show that the shock wave is substantially amplified after it enters the microchannel. After that, the inviscid computation predicts shock wave propagation with a constant velocity, whereas the shock wave in the viscous case starts to attenuate. The results of viscous computations are in qualitative agreement with the experimental data, which show shock amplification after it enters the microchannel and its further attenuation.

3. Achievements

The expected results were achieved completely.

4. Summaries and future plans

At current stage of the project the DSMC chemistry models were modified to obtain the 1D unsupported detonation with the correct conditions downstream of the wave front. A numerical study of the process of shock wave entering into the microchannel was started and qualitative agreement with experimental data was achieved. *Research plan*

1. 2D computations of detonation in microchannel. The detonation wave propagation in microchannel will be studied in two-dimensional formulation at the molecular kinetic level by the DSMC method. The effects of the momentum and heat losses at the channel side walls on the detonation wave propagation will be analyzed.

2. Study of viscous and rarefaction effects on the shock entering and propagating in microchannel. The numerical investigations of entering of the shock wave into the microchannel will be continued. The viscous and rarefaction effects on the process will be analyzed by the validation of numerical results obtained by the Euler and Navier-Stokes equations with different boundary conditions and by the DSMC method against the experimental data. The effect of the channel entrance geometry will be studied.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] Ye. Bondar, K. Maruta and M. Ivanov: Hydrogen-Oxygen Detonation Study by the DSMC Method, *Proceedings of 27th Int. Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Pacific Grove, USA, (2010), online-published, 6 pages.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[2] Ye. Bondar, K. Maruta, and M. Ivanov: Numerical Studies of the Reacting Rarefied Flows in Tubes., Proceedings of the 10th International Symposium of the Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 102-103.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J10017
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2010 ~ March 2011

Investigation of Hypersonic Flows about Leading Edges of Small Bluntness

Mikhail Ivanov*†, Shigeru Yonemura**††, Keisuke Sawada***, Yousuke Ogino***, Yevgeniy Bondar*, Dmitry Khotyanovsky* *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***Department of Aerospace Engineering, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

In the framework of the present project the phenomena of hypersonic flow about the leading edges of the small bluntness are studied. Such leading edges are the elements of the advanced hypersonic air-/spacecraft design. Feature of the high-speed flow about such edges is significant effect of the rarefaction and thermal non-equilibrium even for such parts of the flight trajectory where the flow about the air-/spacecraft is continuum as a whole. The main objective of the present project is to establish the limits of applicability of continuum models add assess the effects of thermal non-equilibrium for such flows. In the present project the extensive numerical studies based on the kinetic (Direct Simulation Monte Carlo method, DSMC) and continuum (Navier-Stokes equations, NS) approaches are conducted. The use of such combined numerical strategy allows the detailed investigation of the rarefaction and thermal non-equilibrium effects on the thermal loads on the leading edge.

2. Details of program implement

The flow structure and surface parameters distribution for the monatomic gas flow in the vicinity of the leading edge of the hypersonic aircraft are obtained for high Mach numbers (M>10) and in the wide range of Knudsen numbers based on the edge radius of curvature. The limits of applicability of the continuum approach to such flows were assessed. It was shown that for Knudsen numbers of the order 0.5 and lower the NS equations with velocity slip and temperature jump boundary conditions provides correct distributions of surface parameters (pressure and friction coefficients, Stanton number) in the vicinity of the leading edge, though the NS equations are not accurate in the flow-field predictions for Knudsen numbers about 0.5.

The flow of chemically reacting and nonreacting CO2/N2 mixture about the blunted leading edge was numerically studied in a wide range of Mach and Knudsen numbers (for conditions of Mars atmosphere entry) and the effects of thermal non-equilibrium were analyzed both at the level of gas dynamics parameters and distribution functions of molecular velocity, rotational energy and vibrational energy. The internal structure of bow shock wave can be demonstrated by the profiles of translational, rotational and vibrational temperature along the stagnation streamline for velocity 5400 m/s shown in Fig. 1. The coordinate is normalized with the mean free path in the free stream. The profiles of the temperatures are similar for different Knudsen numbers and coincide with results of 1D computation. A size of the translation-rotation nonequilibrium zone is close to a size of translation-vibration nonequilibrium zone. Under conditions of Martian entry the bow shock near the leading edge cannot be considered as a thin

translation-rotation shock with a thick attached zone of vibrational and chemical relaxation.



Figure 1: Translational, rotational and vibrational temperature for nonreacting flow. 1 - Kn=0.01, 2 - Kn=0.001, 3 - 1D shock wave.

3. Achievements

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

4. Summaries and future plans

At current stage of the projects the rarefaction effects were investigated for the high Mach number flows about blunted leading edges and the area of applicability of continuum approach for such flows was assessed. A nonequilibrium of the reacting CO2/N2 flow about the blunted leading edge was studied in detail.

Future research plan

- 1. 3D numerical study of the high-speed flow about a delta-wing with blunted leading edge.
- 2. Study of the leading edge bluntness effects on the interaction of entropy layer and boundary layer.
- 3. Study of the leading edge bluntness effect on laminar separated flows.
- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] M. Ivanov, D. Khotyanovsky, A. Kudryavtsev, A. Shershnev, Ye. Bondar and S. Yonemura: Rarefaction and Non-equilibrium Effects in Hypersonic Flows about Leading Edges of Small Bluntness, *Proceedings of 27th Int. Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Pacific Grove, USA, (2010), on-line published, 6 pages.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[2] M.S. Ivanov, S. Yonemura, Ye.A. Bondar, D.V. Khotyanovsky: Investigation of Hypersonic Flows about Leading Edges of Small Bluntness, *Proceedings of the 10th International Symposium of the Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 36-37.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J10018
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2010.4~2011.3

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

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

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

次の項目を実施し、成果を得た.①レーザ誘起熱音響波測定用光学系の設計・製作、②準 定常状態の水温計測による測定精度評価、③衝撃波背後温度計測の予備実験、である.

本年度設計,製作した測定光学系を図1aに示す.励起用レーザにピコ秒パルス Nd:YAG レーザ(波長1064 nm),測定用レーザに半導体励起連続レーザ(波長532 nm)を用いた.測 定精度確認のため,準定常状態の純水温度を室温から約75℃まで変化させ,LITAによる測定結 果と熱電対によるそれを比較した.その結果,測定差異3%程度を得た.測定結果を図1bに示す.



大気中における衝撃波背後温度を測定するため、衝撃波管を用いた衝撃波背後温度計測装置を設計・製作した(図2). 衝撃波管は、高圧室 HR、中圧室 MC、および低圧室 LC で構成されており、各室間は発生させる衝撃波の応じた厚みのマイラ膜で仕切られ、中圧室圧力を減圧することで、任意時刻に破膜させ、衝撃波 SW を発生可能な2 重隔膜式とした. 衝撃波管終端近傍には光学窓を設置し、衝撃波背後での LITA 計測を可能とした. 本年度は、予備的な実験を行い、衝撃波発生と LITA 計測の時間同期、発生させる衝撃波 Mach 数を検討した.



図2:衝撃波管による衝撃波背後温度計測装置

3. 研究目標の達成状況

今年度の研究目標のうち、測定装置の設計・製作および準静的状態における測定精度確認 を行うことができた.しかし、衝撃波背後での温度計測実験は、その準備段階にとどまった.本 研究は、水中衝撃波背後の温度計測を目的としているため、衝撃波背後温度計測を精度・効率共 に十分な程度で実施可能な測定系の確立が必要である.そのため、装置製作過程で設計変更が発 生したため、今年度の目標を一部達成できなかった.

- 4. まとめと今後の課題
 - ・ LITA 測定用光学系を設計・製作した.また、測定精度を、準静的な環境で確認したところ、熱電対の値と約3%以下の差異を示した.
 - 大気中での衝撃波背後温度計測のための実験系を設計・製作し、予備的実験を行った。
 精度および実験効率向上のための検討を行った。
- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] T. Mizukaki and K. Takayama: Instantaneous and remote flow measurement using laser-induced thermal acoustics, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 146-147.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

課題番号	J10019
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	2010.4 ~2011.3

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**;; 松野 隆*,山田 剛治* *鳥取大学工学部,**東北大学流体科学研究所 ;†申請者,;;所内対応教員

1. 研究目的

サイレント超音速複葉翼機の離発着時を想定した低速空力特性を明らかにする.本研究で は三種類の三次元超音速複葉翼モデルを用い、ピッチング運動時の動的特性を実験的に明ら かにする.また CFD による流れ場から実験結果に対する解析を行うことである.



2. 研究成果の内容

図1:ピッチング運動時の迎角に対する揚力の変化

ピッチング運動をするときの揚力特性について、その周波数が小さいほど各翼の動的特性は静 的特性に近ずき、ピッチアップ時とダウン時では迎角に対する空力特性値が異なる軌跡(ヒステ リシスループ)を描く.一方、ピッチング周波数が高くなると、翼形状に起因する傾向の違いが 薄れ、3種の翼とも値は異なるものの同様な空力特性のヒステリシスループ描くようになる.ま た、各翼模型とも主翼のみからなる複葉翼のため縦の静安定性が悪い.

三種類の複葉翼とも迎角 8°付近で(もしく はそれよりやや低迎角で)前縁剥離を起こす薄 翼失速型の空力特性を示し、前縁テーパー複葉翼ではこの失速迎角より大きな迎角で翼面上にデ ルタ翼に見られるような前縁剥離渦が形成される(図2).この前縁剥離渦の存在が他の二つの複 葉翼との空力特性の違い(図1)の原因となっており、他の二つの複葉翼模型に比べて迎角 8r 付近からの揚力傾斜が大きい.



Front view (a) the both-side tapered biplane

(b) the front-side tapered biplane

図2: 複葉翼の上翼と下翼上側の流れ(ピッチング運動なし, α=15rのCFD解析)

3. 研究目標の達成状況

三次元形状のサイレント超音速機の空力特性を実験的に解析した例はこれまでになく, 今後のサイレント超音速機の開発において貴重な資料となる.特に,C1,Cdおよび縦の静 安定に関するCmの迎角に対する挙動を解析することでき目標を十分に達成した.

4. まとめと今後の課題

ロボットを使ったサイレント超音速複葉翼模型の実験解析はこれまでに例がなく貴重 なデータが得られた.今後は他の非定常運動時の空力特性や超音速実験においても簡便に 活用可能な力天秤の開発が必要である.

- 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] H. Kawazoe, S. Abe, T. Matsuno, G. Yamada, S. Obayashi: Unsteady Aerodynamics of a Supersonic Silent Biplane at Low Speed Flight, *Proceedings of the Tenth International* Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 42-43.
- *[2] 川添博光,阿部慎治,松野 隆,山田剛治,大林 茂: Busemann型超音速複葉翼の非定常 低速空力特性,第48回飛行機シンポジウム,静岡市,(2010), CD-ROM講演No. 1D7, pp. 1–10.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J10021
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

鋭敏化した Alloy600 のCr 欠乏領域での局所磁化過程 Local Magnetization Process of Cr Depression Area for Sensitized Alloy600

山口 克彦*†, 高木 敏行**†† 内一 哲哉**, 鈴木 健司***, 大滝 啓太郎**** *福島大学共生システム理工学類, **東北大学流体科学研究所 ***福島大学理工学研究科, ****東北大学大学院工学研究科 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

Ni 基構造材料である Alloy600 は、その強度や耐腐食性の高さから原子力プラントなどに 多く使用されている.しかし、それ故にその劣化度合いの進行度を正確に把握しておくこと が、社会の安全性を維持するために重要である.本研究では Alloy600 の劣化状態である鋭 敏化において生じる Cr 欠乏領域の磁気特性の変化に着目し、劣化度合いの定量的な解析を 可能とするモンテカルロ (MC) 法によるシミュレーションの開発を行う.

2. 研究成果の内容

Alloy 600 は、一定温度条件下において熱時効処理を加えることで処理の継続時間によって 鋭敏化度の異なる試料を得ることができる.これまでの研究でこれらの試料を、超伝導量子 干渉磁力計を用いて磁化の温度依存性を測定すると100K以下の領域で大きな磁化が現れる ことが明らかになった.この現象は室温において常磁性であった結晶粒内の領域が強磁性へ と変化したためであると考えられる.鋭敏化の進行による Alloy 600 の磁気特性の変化をよ り詳細に検証していくために、この室温における結晶粒内の常磁性をパラメータに取り入れ MC 法によるシミュレーションを行った.図1は磁化の温度特性について実験とシミュレー ションの結果を比較したものであり、シミュレーションで温度特性をよく再現している.

さらに結晶粒界の磁気特性について、各温度における磁化率から得られるキュリー点の実 験とシミュレーションにおける結果を比較すると図2のようになり、鋭敏化の進行度合いの 検証に対し新たな視点を与える結果となった.



3. 研究目標の達成状況

鋭敏化の進行度合いが異なる Alloy 600 試料の磁気特性の測定を行い, Cr 濃度分布に加え 結晶粒内の常磁性に着目してモデル化したクラスターを用いて行ったシミュレーション結 果との比較を通して, 鋭敏化度の違いによる温度変化を踏まえた磁気特性について検証を行 うことができた. これにより, 鋭敏化の進行による磁気特性の変化について, 結晶粒界領域 のキュリー点を踏まえて言及することができた.

4. まとめと今後の課題

これまで行ってきた鋭敏化の進行による磁気特性変化における実験とシミュレーションの 比較について、保磁力や残留磁化といったこれまでの要素に加え、キュリー点という新たな 視点を加えた磁気温度特性について言及できた.現在は実際の単位系による MC 法シミュレ ーションを行えるようにモデル化方法やパラメータの調整を進めている段階である.さらな るシミュレーション手法の開発により鋭敏化の進行による原子構造の変化について、磁気特 性の変化から具体的な数値を提示できるようになると考えられる.

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] K. Yamaguchi, K. Suzuki, O. Nittono, T. Uchimoto and T. Takagi: Magnetic dynamic process of magnetic layers around grain boundary for sensitized Alloy 600, *The 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation conference*, Chicago, (2010), p.53.
- [2] K. Yamaguchi, K. Suzuki, T. Takase, T. Takara, O. Nittono, T. Uchimoto and T. Takagi: Local Magnetic Properties and Magnetic Particle Distribution due to Cr Depletion in Sensitized Ni based Alloy, *The 15th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, Szczecin, (2010), pp. 98-99.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] 寶輝之, 鈴木健司, 高瀬つぎ子, 山口克彦, 入戸野修: 鋭敏化した Alloy 600 の粒界における 局所的磁気特性, 第 34 回日本磁気学会学術講演概要集, (2010), p.384.
- [4] 鈴木健司、山口克彦、高瀬つぎ子、寶輝之、入戸野修: 鋭敏化した Alloy 600 における磁性層の磁化過程シミュレーション、第34回日本磁気学会学術講演概要集、(2010)、p.385.
- [5] 高瀬つぎ子, 寶輝之, 鈴木健司, 山口克彦, 入戸野修: Alloy600の鋭敏化による Curie 温度の 変化, 第 34 回日本磁気学会学術講演概要集, (2010), p.386.
- [6] K. Yamaguchi, K. Suzuki, O. Nittono, T. Uchimoto and T. Takagi: Magnetic Hysteresis Simulation of Cr Depleted Grain Boundary for Sensitized Ni-Base Superalloy Inconel 600, Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2010, Tokyo, (2010), p.30.
- *[7] K. Yamaguchi, K. Suzuki, O. Nittono, T. Uchimoto and T. Takagi: Local magnetization process of Cr depression area for sensitized Alloy600, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 74-75.

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	J10022
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2010 ~ March 2011

New Exact Solutions for Vortex Rings with Swirl and Magnetic Field

Stefan G. Llewellyn Smith*†, Yuji Hattori**†† *Department of Mechanical and Aerospace Engineering, UCSD **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

Professor Llewellyn Smith visited the Institute of Fluid Science during the periods August 2-August 6 2011 and November 1-November 5, 2010. He and Professor Hattori both attended the ICFD2010 Seventh International Conference in Flow Dynamics on November. Professor Llewellyn Smith presented a poster in session PS5 (IFS Collaborative Research Forum) at ICFD2011 on November 2, 2010.

During these visits, Professors Llewellyn Smith and Hattori collaborated on combining and extending previous results of Hattori & Moffatt (2006) and of Llewellyn Smith & Morin (unpublished).

3. Achievements

We have obtained new solutions for thin-core axisymmetric vortex rings with magnetic field and swirl, combining and generalizing previous results. We have also completely characterized steady spherical magnetic vortices with linear streamfunction-vorticity dependence. Finally, we have derived a contour dynamics approach for axisymmetric vortex rings with magnetic field and swirl, and shown that a vortex may split into two similar dipolar structures that propagate away from each other. We have submitted a manuscript on these results to *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*.

Figure 1 shows results from the contour dynamics approach that has been developed. This is a situation where swirl and magnetic field balance, leading to the formation of dipolar eddies. Further elucidating the nature of the dipolar eddies is one of the next goals of the project.



Figure 1: Contour dynamics simulation of initially toroidal vortex with swirl, showing how the vortex splits into two contour-propagating toroidal dipolar eddies.

4. Summaries and future plans

The project has so far has led to the discovery of new steady and asymptotic eddies and vortex rings, and shown that a contour dynamics approach is feasible in the presence of both swirl and magnetic field. Future plans include continuing to investigate the contour dynamics system, in particular aiming to characterize steady self-propagating vortices. These are known as V-states in the literature. A compelling question here is how these new V-states are related to the Norbury family of vortices in the case with neither swirl, nor magnetic field: do these new solutions exist for all values of the swirl parameter and magnetic field?

Professors Llewellyn Smith and Hattori have been awarded a continuation grant J11026 and SGLS will visit the Institute of Fluid Science at Tohoku University for ten days during the period April 2011-March 2012.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] S. G. Llewellyn Smith and Y. Hattori: Axisymmetric Steady Magnetic Vortices with Swirl, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 144-145.
 - [2] 服部裕司, Stefan Llewellyn Smith, swirl をもつ磁気渦輪の contour dynamics と定常 進行解,日本物理学会第 66 回年次大会, March, (2011).
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J10023
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	2010.4 ~2011.3

サイレント超音速機の超音速飛行特性に関する研究

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

> 大林 茂*;, 佐宗 章弘**;; 山下 博*, 小川 俊広*, 豊田 篤* *東北大学流体科学研究所, **名古屋大学工学研究科 ;中請者, ;;所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

図1は東北大学流体科学研究所所有の Ballistic range と設計された近傍場圧力測定装置を 示す.本装置の上板には圧力センサが取り付けられており,超音速飛行する模型直下の近傍 場圧力波形を測定することができる.また図2は本バリスティックレンジで実測された圧力 波形である.現在のところ,再現性よく,SN 比の高い波形が獲得できている.今後,実験 装置の信頼性を検証するとともに超音速機の研究開発に活用する.この実験結果は名古屋大 学所有のバリスティックレンジを用いた実験結果と比較検討されており,バリスティックレ ンジによるフリーフライト実験技術の構築が進められている.



図1:Ballistic range 実験装置圧力測定器



図3: Ballistic rangeの実測波形例

3. 研究目標の達成状況

東北大学バリスティックレンジ実験装置を用いて、シンプルな球モデルの光学計測および 圧力計測を実施することができた.これらの技術をもとにより複雑な複葉翼モデルのフリー フライト実験が実施可能であり、超音速複葉翼理論の実験的実証にむけて着実に成果を 挙げている.また、実験的な検証を経たのちに将来の模型飛行機による飛行実証へ向 けて継続した研究が必要である.今後は CFD と EFD の優位性を活かした研究方針を立て、 遂行することが重要である.例えば、実験では細かくパラメトリックスタディできない条件 について CFD 解析で補間し、詳細に現象を考察するといった活用方法などが考えられる. 東北大学 Ballistic range 実験装置は、本研究グループが構想する飛行実証のみならず、JAXA 静粛超音速機実験 D-SEND Project などへ適用できる可能性が高く、我が国の超音速機開発 に大きく貢献することが期待できる.本プロジェクト内では先進的な超音速機開発技術を構 築しつつあり、それらの資産をぜひとも日本・世界の超音速機開発にも活用したい.

4. まとめと今後の課題

東北大学 Ballistic range における近傍場圧力波形の計測技術の構築が課題である. 複葉翼の 低ブーム性能を実証するためには、センサの応答速度や感度に関して適切な計測系を構築す る必要がある. また, 実機に近い形状を用いてフリーフライト実験を実施していく場合には、 サボと模型の分離をスムーズに行うことが可能なサボ設計技術開発に取り組む必要がある.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] 齋藤雄太,豊田篤,山下博,小川俊広,大林茂; 尾翼付き超音速自由飛行試験模型の CFD 解析, 平成22年度衝撃波シンポジウム, 16-C-3-4, 217.
- *[2] A. Toyoda, K. Suzuki, K. Shimizu, A. Matsuda, A. Sasoh and S. Obayashi; Low Boom Characteristic of Supersonic Biplane with Sears-Haack Fuselage, *Proceedings of the 10th International Symposium of the Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 48-49.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J10024
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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

小原 拓*†,芝原 正彦**††,菊川 豪太* *東北大学流体科学研究所,**大阪大学大学院工学研究科 †申請者,††所外対応研究者

1. 研究目的

固液界面における輸送現象、とりわけ、熱エネルギーが界面を通過する特性は、MEMS/ NEMS, 微粒子が懸濁された液体, 生体内の構造など, ナノスケールの液体-固体系が示す 特性を理解し設計するための重要な問題である.従来のマクロな熱流体力学においては、界 面における熱輸送特性を理解するための概念として、界面における温度ジャンプと熱流束と の比として与えられる熱抵抗が広く用いられてきた. 固体-固体界面においては表面粗さを 主な支配因子として熱抵抗がよく観察され、また、近年では固体-液体界面においても熱抵 抗が様々な検討の対象となり、その重要性が広く認識されつつある。この場合は、固体一固 体界面とは異なり、固体-液体間で何らかの熱輸送メカニズムにミスマッチを生じることが 因子となると考えられているが、その分子動力学レベルのメカニズムは未だ詳細な検討が行 われていない、本研究においては、ナノスケールの構造をもつ固体壁表面-液体間の熱エネ ルギー輸送を解析するため、(1)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、界面熱抵抗の値を確定すると共に、バルク液体との特性の違いや固体表面の違いが熱 抵抗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、その相対値αで 表現した.表面ナノ構造ならびにαが、界面熱抵抗値と界面近傍のエネルギー輸送における 分子間エネルギー伝播割合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、界 面ナノ構造ならびに固液間相互作用強さαによって、界面熱抵抗ならびに界面近傍のエネル ギー輸送機構が変化することが分かる.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と関連すると考えられる ため、現在、界面近傍の局所非平衡性と界面熱抵抗の関連を調査中である.

(2)結晶格子界面 FCC(111)面(Wall A)、(100)面(Wall B)及び(110)面(Wall C)を単純液



体に接した系において熱伝導を発生させ, 界面熱抵抗を計測した。液体分子は表1に 示すパラメータによる Lennard-Jones ポテ ンシャルに支配されるものとする。得られ た界面熱流束と界面温度ジャンプの関係 を図2に示す。各直線の傾きが熱抵抗とな るが、おおむね10⁻⁸~10⁻⁷ m²K/W の範囲に あり、水分子に対する(1)の結果と比べて大 きいことがわかる。固体表面(100)面→(111) 面→(110)面の順に熱抵抗が大きいこと、固 液界面の相互作用の強さが大きな影響を もつことがわかる。

	Case 1	Case 2	Case 3
$\sigma_{ m LL}$	$\sigma_{ m Ar}$	$\sigma_{ m Ar}$	$2\sigma_{ m Ar}$
$\sigma_{ m LS}$	$(\sigma_{\rm Ar}+r_{\rm eq})/2$	$(\sigma_{\rm Ar}+r_{\rm eq})/2$	$(2\sigma_{\rm Ar}+r_{\rm eq})/2$
$\varepsilon_{\rm LL}$	$\mathcal{E}_{\mathrm{Ar}}$	$\mathcal{E}_{\mathrm{Ar}}$	$\mathcal{E}_{\mathrm{Ar}}$
\mathcal{E}_{LS}	$\mathcal{E}_{\mathrm{Ar}}$	$\varepsilon_{\rm Ar}/2$	$\mathcal{E}_{\mathrm{Ar}}$
т	m _{Ar}	m _{Ar}	m _{Ar}

表1:液体分子の Lennard-Jones パラメータ



図2: 固体各表面と液体各種の組み合わせに対す

3. 研究目標の達成状況

固液界面ナノ構造が熱輸送特性に及ぼ す影響について、東北大学・大阪大学の連 携の下それぞれの機関において大小2つの スケールから解析を進め、それぞれの界面 において熱抵抗を計測した.このメカニズ ムを探索するべく、鋭意検討中である。

4. まとめと今後の課題

今後は固体表面構造と熱抵抗をつなぐ メカニズムを明らかにすると共に、ポリマ ーなどさらに複雑な系に解析を進める。

5. 研究成果

*[1] M. Shibahara and T. Ohara, Effects of the Nanostructural Geometry at a Liquid-Solid Interface on the Interfacial Thermal Resistance and the Liquid Molecular Non-Equilibrium Behaviors, *Proceedings of* the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference, (2011), CD-ROM, AJTEC2011-44220.

る固液界面抵抗

- [2] M. Shibahara and T. Ohara, Effects of the Nanostructural Geometry at a Liquid-Solid Interface on the Interfacial Thermal Resistance and Liquid Molecular Non-Equilibrium Behaviors, *Proceedings of 7th International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2010), pp.366-367.
- *[3] T. Ohara, G. Kikugawa and M. Shibahara: Transport Phenomena at Nano-Structured Interfaces, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 122-123.

Project code	J10025
Classification	General collaborative research
Subject area	Aerospace
Research period	April 2010 ~ March 2011

Development Optimization Design Method for Low Noise and High Aerodynamic Performance Helicopter

Shinkyu Jeong*†, Kwanjung Yee**†† Sanghyun Chae ** *Institute of Fluid Science, Tohoku University, **Department of Aerospace Engineering, Pusan University †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

One of important issues in helicopter design is to reduce the noise generated from its blades and a lot of studies have been done to improve the noise performance of helicopter. However, most studies have been confined to parametric study. The purpose of this project was to develop the sophisticated optimization design method for a low noise and high aerodynamic performance helicopter blade.

2. Details of program implement

In this project, the high efficient design exploration method is applied to a low noise and high aerodynamic performance helicopter blade design. The previously developed optimization framework that is composed of design optimization and data mining were integrated under the GUI planform. This GUI-based optimization software is easy to use and supports multi-OS planform such as Windows, Mac-OS and linux system. The current version GUI-based optimization software called 'MEDOC' (Multi-purpose Engineering Design and Optimization Code) supplies Kriging model based MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) and two data mining tools. One is ANOVA and the other is SOM. Once user has finished design optimization, result of design optimization can be used to extract design knowledge about the problem. Figure 1-2 shows the result ANOVA and SOM, respectively.



Fig.1 Results of ANOVA



Fig.2 Results of SOM

3. Achievements

Compared with rectangular blade, the blade designed with the current optimization code improved the noise and aerodynamic performance noticeably. Furthermore, the GUI-based optimization code improved the efficiency of design itself.

4. Summaries and future plans

The optimization method developed in this project will be applied to the helicopter blade design under the various mission condition. The GUI-based optimization software will be commercialized in near future.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] S. Chae, K. Yee, C. Yang, T. Aoyama, S. Jeong, S. Obayashi: Helicopter Rotor Shape Optimization of the Improvement of Aeroacoustic Performance in Hover, *Journal of Aircraft*, Vol. 47, No. 5, (2010), pp. 1770-1783.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [2] S. Chae, K. Yee, S. Obayashi and S. Jeong: The Development of Surrogate Model Based MDO Platform - MEDOC, 2010 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Xian, China, (2010), B1 Session.
- [3] S. Chae, K. Yee, S. Obayashi and S. Jeong: Helicopter Rotor Blade Planform Design Using a Newly Developed MDO Platform - MEDOC, *Heli Japan 2010*, Saitama, (2010), T121-3.
- *[4] S. Chae, K. Yee, S. Obayashi and S. Jeong: Rotor Blade Shape Design Using MDO Platform - MEDOC, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 38-39.
- 3) Patent, award, press release etc.
 - (Patent) Not Applicable.
 - (Award) Not Applicable.

(Press release) Not Applicable.

課題番号	J10026
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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(a)および(b)に1気圧および4気圧下におけるメタン・空気混合気中の放電による高 活性化学種の生成過程を示す.なお、いずれの場合においてもガス温度は300 K であり、時 刻0 μ s においてステップ状に100 Td の換算電界(*E/N*)を1 μ s の間与えている.1気圧の条 件下では、放電開始と同時に電子衝突により励起窒素が急激に生成され、放電開始より0.4 μ s に定常となる.一方、4気圧の場合では、1気圧の場合と比較して電子衝突周波数が高いた め、励起窒素の生成率はより高い.図1(a)および(b)より、いずれの圧力下においても酸素 原子の数密度が他の化学種に比べて最も高い.酸素原子は、電子衝突による酸素分子の解離、 もしくは、励起窒素と酸素分子との衝突による励起窒素の脱励起過程において生じる.放電 初期における酸素原子の急激な増加は、電子衝突による酸素分子の解離反応が支配的であり、 その後、N₂($A^3\Sigma_u^1$)がより低い励起準位に脱励起することにより酸素原子が緩やかに増加す る.燃焼促進に寄与する酸素原子の生成量は、1気圧の場合において4.9×10²³ m⁻³である のに対し、4気圧の場合では、6.8×10²⁴ m⁻³となり、1気圧の場合と比較して 13%程度 増加する.

3. 研究目標の達成状況

本研究により,作動条件に応じたメタン・空気プラズマ中の高活性化学種の生成過程をリ アルタイムで解析することが可能となり,反応性非平衡プラズマジェットの応用に資する知



図1:メタン・空気放電による高活性化学種の生成過程(a)1 atm, (b) 4 atm

見が得られたことから、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

本研究では、0次元 Boltzmann 方程式解析コードにより得られた反応速度定数を用い、高 圧下でのメタン・空気プラズマ中における高活性化学種の生成過程を詳細に解明した. 今後 は、非定常2次元計算コードを構築し、プラズマにより生成されるラジカル等の高活性種の 濃度場を明らかにする.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

*[1] H. Takana, Y. Tanaka and H. Nishiyama: Fundamental Study of Methane-Air Plasma Flow at High Pressure, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.56-57.

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J10027
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	2010.4 ~2011.3

次世代プラズマオートクレーブの開発 Development of an Innovative Plasma Autoclave

佐藤 岳彦*†,五十嵐 敬**†† *東北大学流体科学研究所,**株式会社平山製作所 †申請者,††所外対応研究者

1. 研究目的

大気圧水蒸気流中に電極を設置し高電圧を印加することで誘電体バリア放電を生成し、OH ラジカルを発生させ1気圧100℃の100%水蒸気で滅菌ができる技術を開発した.この 技術は、2気圧121℃以上で滅菌を行う高圧蒸気滅菌(オートクレーブ)と比較して低圧 低温で滅菌できることから、高圧容器が不要であり安全簡便な上、近年の低耐熱性材料を利 用した医療器具の滅菌も可能である.本研究では、この技術の基盤となるオートクレーブ内 部の流動場や生成化学種の輸送現象の解明を目指す.

2. 研究成果の内容

本研究では、水蒸気中でプラズマを発生させた時の発生した化学種と滅菌効果について検 証した.実機への応用を目指すために滅菌装置の容器を内径 70 mm,高さ 120 mm と従来 の石英管(内径 10 mm)よりも格段に大きくした.発光分析結果より水蒸気中では OH, H, Oの輝線スペクトルが、大気中では N₂や NOの輝線スペクトルが確認できた.滅菌効果は、 水蒸気中の場合、OH ラジカルの寿命が短く十分な効果が得られなかったが、大気を利用し たばあいは窒素酸化物による殺菌効果により30分以上の放電で滅菌される条件があるこ とが明らかになった.窒素酸化物を利用した殺菌法は、大気圧空気で電気があれば滅菌が可 能なため、低コストであり、災害など緊急時の滅菌法として期待できる.しかしながら、 窒素酸化物を利用した殺菌法は殺菌後の窒素酸化物の処理などの問題を解決する必要があ る.安全性の向上の観点からは、水蒸気のみで滅菌できることが望ましいため、今後は新た に水蒸気プラズマで生成した OH ラジカルの長距離輸送法の開発についても取り組む.



図1:滅菌装置



3. 研究目標の達成状況

本研究では、目的としたプラズマオートクレーブの実証機のプロトタイプを作製し、水蒸 気のみならず大気による滅菌の可能性について検証した.これにより、大気を利用した場合、 簡便、低コストで高い滅菌効果が得られたことより、今後緊急災害用などの用途での応用の 可能性が期待できることが明らかになった.一方、安全性の観点より、水蒸気を利用した滅 菌装置の開発も引き続き取り組むことになった.予算申請については、平成22年度は JST の A-STEP に応募したものの不採択となった.引き続き平成23年度においても JST の A-STEP に申請する予定である.

4. まとめと今後の課題

大気を利用した場合に発生する窒素酸化物の処理方法と水蒸気を利用した新たな滅菌法の 開発が課題として挙げられる.いずれの課題についても,現在継続して取り組んでおり,既 に大気のみを利用した場合,簡便,低コストで高い滅菌効果が得られている.これより,今 後緊急災害用などの用途での応用の可能性が期待できることが明らかになった.一方,安全 性の観点より,水蒸気を利用した滅菌装置の開発も引き続き取り組むことになった.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) 該当無し.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1]Takehiko Sato, Takeshi Furui and Kei Igarashi: Development of Next-Generation Plasma Autoclave, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 90-91.
- [2]佐藤岳彦, 古居剛: 大気圧水蒸気プラズマ流の化学種生成過程と滅菌機構, 日本機械学会第88期 流体工学部門講演会, (2010), pp.595-596.
- [3]石田将之, 佐藤岳彦:プラズマ滅菌装置の開発, 日本機械学会東北支部第46期総会・講演会, (2010), pp.6-7.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) (特許)該当無し.
 (受賞)該当無し.
 (マスコミ発表)該当無し.

課題番号	J10028
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	2010.4 ~2011.3

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

劉 磊*, 小笠原 正文*†, 船本 健一**††, 小澤 桂**, 太田 信**, 早瀬 敏幸** *GE ヘルスケア・ジャパン株式会社, **東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

近年の統計によると欧米諸国では女性の約 10%が一生涯間に乳がんを罹患する可能性があり、日本においてもその罹患率は 4%弱である.また乳がんによる死亡率は約 20%であることが知られている.

乳がんの初期形態として乳房組織の微細石灰化がある.平均粒径が数百マイクロメートルの 微細石灰化の早期発見はきわめて早い段階からの治療を可能とし、乳がんに罹患した女性の QOL向上のみならず、医療現場、一般社会に与える影響も大きい.

近年、生体軟組織内の微細石灰化が超音波計測に対して特異的に反応する"Twinkling sign" 現象が報告されている.この現象は診断に有用であると示唆されているが、そのメカニズムが 十分に解明されていないため広く応用されるに至っていない.本研究では乳房内微細石灰化検 出を研究対象とし、"Twinkling sign"のメカニズムを解明し、同現象を応用した微細石灰化検 出手法を開発する.研究の遂行には実験的手法としてファントムを用いた計測実験を行い、こ れと並行して乳房を模擬した粘弾性体の構造数値シミュレーションを計画している.

2. 研究成果の内容

i.

流体科学研究所においては2010年4月~2011年3月の間にGE研究担当者が計8回訪問し, 共同研究集会および共同実験を行った.2010年度では実験的研究として生体を模擬したファン トムの構築,およびファントムを用いた計測実験を遂行した.

本研究では 2010 年前半に PVA ゲル生体ファントム製作に注力し,後半より同ファントムを 用いた解析実験を行ってきた.本年度の主な成果としては下記アイテムがあげられる.

- ントムの製作.ファントム製作法のノウハウの蓄積(図 1)
- PVA ゲルにガラスビーズを混入し、微細石灰化を含む乳房組織を模擬したファ ントムの製作 ファントム製作法のノウハウの蓄積(図1)

70 80 90 00 110 120 130 140 150 160 170

図 1. ガラスビーズを含む PVA ゲル生体模擬ファントム



図2. ガラスビーズのTwinkling sign

図3.ファントム内ガラスビーズの高速度カメラ写真

- ii. 微細石灰化が超音波に反応する"Twinkling sign"現象を PVA ゲルファントムを 含む実験系で再現(図 2)
- iii. PVA ゲルファントム内のビーズの挙動を観察するためのレーザ計測実験系の 立ち上げ(図3)

同様に,生体組織を模擬した数値シミュレーションに関しても 2010 年度末より起案し,現 在遂行中である.

3. 研究目標の達成状況

本研究は年度計画に記載された研究内容を計画通り遂行した. 研究結果の一部は ICFD2010(研究成果[1])で発表された.また,2011年5月に開催され る日本超音波医学会第84回学術集会にて口頭発表演題として採択された.

4. まとめと今後の課題

本研究は乳がんの早期発見のための検査法開発を目的とし,2010年度にわたり基礎的研究 を遂行してきた. 今後は継続して"Twinkling sign"現象のメカニズム解明を目的とする基礎 的研究を遂行しつつ, 医療応用への展開をはかる予定である.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) 該当なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] L. Liu, M. Ogasawara, K. Ozawa, K. Funamoto, M. Ohta and T. Hayase: Detection of Microcalcification in Soft Tissue, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 80-81.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) 該当なし

課題番号	J10029
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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

服部 裕司*†, 福本 康秀**†† *東北大学流体科学研究所, **九州大学数理学研究院 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

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

2. 研究成果の内容

渦構造の安定性として特に曲率不安定性に着目した.曲率不安定性は曲がりに直接の起源をも つパラメタ共鳴型の不安定性であり、曲がりをもつ最も単純な渦構造である渦輪について初めて 存在が示された(Fukumoto & Hattori, 2005; Hattori & Fukumoto, 2003).曲がりに加えて捩 りをもつらせん渦については短波長安定性解析による結果(Hattori & Fukumoto, 2009)は得ら れているが、モード安定性解析による結果は限定的にしか知られていない.そこで第一に、モー ド安定性解析により、まず軸流をもたないらせん渦について、曲率不安定性に対する捩りの効果 を調べた.不安定成長率の内積による表式を求め、O(c)である成長率に対しO(c²)の修正として 捩りの効果があらわれることを明らかにした.実際に捩りによる成長率の変化を数値的に求め、 短波長極限で短波長安定性解析による結果と一致することを確かめた.

図1に不安定成長率に対する捩りの効果を示す. 曲率不安定性は波数が1 異なる2 個の Kelvin 波が共存するときに (すなわち分散曲線の交点において) おこる. 左図は無限個ある交点の中で, 成長率が一般に大きい principal mode について捩りによる不安定成長率の修正項を示したもの である. 左下の点列が実線で示された短波長安定性解析による値 $-3\sqrt{15}/128$ に収束するのが確認 できる. この収束の程度は右図に示すように $m^{-2/3}$ である.

次に、一般に軸流をもつらせん渦の短波長安定性解析を行った.まず、軸流をもつらせん渦の 定常解(基本流)を漸近展開により求めた.続いて、得られた基本流を用いて短波長安定性解析 の方程式を漸近展開により解いて、流体粒子運動および波数ベクトルの解を得た.振幅の満たす 2自由度の常微分方程式を導き、これを用いて不安定成長率の解析的な表式を得ることに成功した.



図1. 不安定成長率に対する軸流効果

3. 研究目標の達成状況

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

総じて、今年度内の結果としては十分な結果を得たと考える.

4. まとめと今後の課題

回転翼渦のモデルであるらせん渦の曲率不安定性について捩りの効果と軸流の効果を調べた. 軸流をもたない場合についてはモード安定性解析を、軸流をもつ場合については短波長安定性解 析により解析的な結果を得た.今後は軸流をもつ場合のモード安定性解析を行うことにより、軸 流効果を詳細に明らかにすること、直接数値シミュレーションにより非線形性が強くなった場合 の挙動を明らかにすることが課題である.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議,解説等を含む) 該当なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] Y. Fukumoto and Y. Hattori: Normal-Mode Stability Analysis of a Helical Vortex Tube, Proceedings of The Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 136-137.
- [2] 服部裕司,福本康秀「らせん渦の線形安定性解析:ノーマルモード解析と短波長解析の関係」 RIMS研究集会「オイラー方程式の数理:力学と変分原理 250 年」,(2010 年 7 月,京都).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) 該当なし

課題番号	J10030
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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**†† *信州大学工学部, **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

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

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

研究成果の内容

本研究で使用した粉末は水素化脱水素法によって作製された平均粒径 45 μ mの非球形の純 チタン粉末である本研究で用いた実験装置の概観図を図1 に示す.装置は攪拌ツール,コン テナ,アンダーパンチから構成されており,攪拌には立型フライス盤を用いた. 圧縮回転せ ん断法はコンテナに試料粉末を充填し,その後ツールを挿入し,ツールに上から圧縮荷重を 負荷しながら回転させることで,試料粉末に圧縮荷重とせん断力を同時に加えることにより 粉末を固化成形する方法である. 成形条件は圧縮荷重 P を P=4kN,成形時間 t を t=15s と 一定とし,主軸回転数 R を R=250,330,375,540rpm と変化させた. 本研究は,常温,大 気雰囲気中で固化成形を行った.

図 2(a) に作製した試料の代表例回転数 r=330rpm での長手方向断面図を示す.また,図 2(b) に図 2(a) で丸く囲んで示した部分での拡大写真を示す.同図から圧縮回転せん断法を 用いれば, Ti-6Al-4V の合金を用いても純チタン粉末を固化成形することが可能であること がわかった.しかし,回転数が小さい場合では攪拌が不十分となり成形が十分に行えなかった.また,主軸回転数 R が R=540rpm では攪拌ツールに負荷が大きくツールが破断してい る箇所が見られた.

微小硬度計を用いて成形体のビッカース硬さ HV を測定した. 作製された試料の粉末と攪 拌ツールの境目を原点とし半径方向に r, 長手方向に L の座標を定義した. 図 3 に半径方 向 r=0.5mm での長手方向 L=0~6mm でのビッカース硬さの分布を示す. 参考データとし て Ti 圧延材のビッカース硬さを図中に点線で表記する. 本研究で作製した試料は Ti 圧延 材の硬さとほぼ同等の値となった. また, 圧縮回転せん断法により作製された成形体は長手 方向の硬さの違いはなくどの部分でも均質な硬さの材料となった.





図.3 長手方向ビッカース硬さ(r=0.5mm)

3. 研究目標の達成状況

本研究によって開発した成形プロセスを用いることで、今まで成形が困難であった材料を 容易に成形加工することが可能となった.また、本研究で開発する成形プロセスはあらゆる 製造分野、特に医療・福祉分野に使用している Ti 粉末を固化成形することができたので、 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

今後は複合粉末または Ti 粉末にスペーサーを混合することにより, 新しい複合材料の開発 を検討している.

本成果は平成23年8月にカナダで開催されるTHERMEC2011において招待講演を行う.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] S. Kato, N. Nakayama, H. Miki and H. Takeishi: Consolidation of Ti powder by a Compression Rotation Shearing Method under Room Temperature, *Proceedings of The Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 116-117.
- [2] 加藤聡,中山昇,武石洋征,三木寛之: 圧縮回転せん断法を用いた医療用部材の開発への 検討,平成22年度日本非破壊検査協会秋季講演大会講演概要集,(2010), pp. 79-80.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし
| Project code | J10031 |
|-----------------|--------------------------------|
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Fundamentals |
| Research period | April 2010 ~ March 2011 |

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

Vladimir Khovaylo*†, Hiroyuki Miki**††, Toshiyuki Takagi**, Ekaterina Avilova*, Makoto Ohtsuka***, Vasiliy Buchelnikov **** *National University of Science and Technology "MISiS" **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University ***Faculty of Physics, Chelyabinsk State University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

Total entropy change upon temperature and magnetic-field-induced structural (or magnetostructural) first-order phase transition in NiMnX (X = Ga, In, Sn) Heusler alloys has experimentally been studied. Direct measurements of the adiabatic temperature change related to the redistribution of entropy between magnetic and structural subsystems were performed under adiabatic magnetization/demagnetization (Figure 1: Left). Theoretical study of phase transitions, entropy change upon these transitions, and the adiabatic temperature change in external magnetic fields has been performed by Monte Carlo simulations (Figure 1: Right).



Figure 1: Left: Magnetic field dependencies of the adiabatic temperature change in

 $Ni_{50}Mn_{36}Co_1Sn_{13}$ measured upon heating protocol in the vicinity of the reverse martensitic phase transformation. First branch (1) corresponds to the increase of the magnetic field from 0 to 1.93 T whereas second branch (2) corresponds to subsequent decrease of the field from 1.93 to 0 T. Third and fourth branches (3 and 4) correspond to the application and removal of the magnetic field, respectively, for the case of the field polarity reversal. Right: The theoretical and experimental values of magnetic entropy change ΔS_{mag} for Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga (x = 0.18, 0.20, 0.22 and 0.24) when varying the magnetic field from 0 to 5 T.

3. Achievements

The main achievements are as follow

- Reversibility and irreversibility of the adiabatic temperature change and irreversible heat dissipation upon repeatable application of external magnetic field were observed and linked to reversible or irreversible character of magnetic field-induced structural transformation.

- Factors, governing reversible and irreversible character of the adiabatic temperature change in NiMnX were clarified.

- Magnetic and magnetocaloric properties of NiMnX were studied by Monte Carlo method.

4. Summaries and future plans

In summary, entropy change in magnetically ordered Heusler alloys NiMnX (X = Ga, In, Sn) caused by temperature or by an external magnetic field has been studied both experimentally and theoretically. A strong irreversibility of the adiabatic temperature change has been observed in the vicinity of first-order coupled magnetostructural phase transition. The theoretical modeling implies that magnetic entropy change experimentally determined with the help of Maxwell relation is overestimated.

Future plan is to establish the main factors governing behavior of adiabatic temperature change in conventional ferromagnetic (the NiMnGa system) and metamagnetic (e.g. NiMnSn or NiMnIn system) Heusler-based shape memory alloys and to study theoretically adiabatic temperature change in the NiMnGa alloys.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] V. V. Khovaylo, K. P. Skokov, O. Gutfleisch, H. Miki, T. Takagi, T. Kanomata, V. V. Koledov, V. G. Shavrov, G. Wang, E. Palacios, J. Bartolomé, and R. Burriel: Peculiarities of the magnetocaloric properties in Ni-Mn-Sn ferromagnetic shape memory alloys, *Phys. Rev. B*, 81 (2010) 214406 (6 pages).
- [2] V. V. Khovaylo, K. P. Skokov, O. Gutfleisch, H. Miki, R. Kainuma, and T. Kanomata: Reversibility and irreversibility of magnetocaloric effect in a metamagnetic shape memory alloy under cyclic action of a magnetic field, *Applied Physics Letters* 97 (2010) 052503 (3 pages).
- [3] V. Khovaylo, G. Lebedev, D. Zakharov, V. Koledov, E. Perov, V. Shavrov, M. Ohtsuka, V. Pushin, H. Miki, and T. Takagi: Imprinting bias stress in functional composites, *Japanese Journal of Applied Physics* 49 (2010) 100212 (3 pages).
- [4] V. Buchelnikov, V. V. Sokolovskiy, S. V. Taskaev, V. V. Khovaylo, A. A. Aliev, L. N. Khanov, A. B. Batdalov, P. Entel, H. Miki and T. Takagi: Monte Carlo simulations of the magnetocaloric effect in magnetic Ni-Mn-X (X = Ga, In) Heusler alloys, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 44 (2011) 064012 (14 pages).
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[5] V. Khovaylo, K. Skokov, Y. Koshkid'ko, E. Avilova, V. Buchelnikov, S. Taskaev, O.Gutfleisch, H. Miki, T. Takagi: Entropy Change in Heusler Alloys under Influence of a Magnetic Field, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 138-139.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J10032
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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

中野 政身*†,中西 為雄**††,角掛 裕樹** *東北大学流体科学研究所,**山形大学大学院理工学研究科 †申請者,††所外対応研究者

1. 研究目的

インクジェットプリンタは、オン・デマンド方式と連続流方式の2種類に大別される.前 者はOA機器のプリンタとして多用されている.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よく用いられる.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.その際、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、印字乱れの原因となっている.本研究では、ノズル 形状とサテライトの発生し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.② ノズル直管部の長さが出口速度分布に及ぼす影響を明らかにした.
 インク粘度が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た.



図3:ノズル内の速度ベクトル



図4:ノズル直線部長さによる速度分布の違い



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 長さがインクジェットの液滴形成過程に与える影響を定性的に解明した.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

実験と計算結果は定性的に一致したが、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.特に低粘度インクの場合、サテライトが形成され るのはノズル出口からインク直径の200倍よりも下流のところであり、数値拡散の影響は非 常にシビアである.さらに、サテライトは主粒子の約1/10の大きさしかなく、その形状や 運動を精度よく再現することは容易ではない.次年度は静止する計算格子に加え、主粒子や サテライトと共に動く計算格子も同時に使用し、この問題にアタックする.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[1] M. Nakano, T. Nakanishi and H Tunotake: Optimization of Nozzle Shape and Ink Viscosity toward Uniform Droplet Formation of a Continuous Inkjet, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.114-115.
- [2] T. Nakanishi, M. Nakano and H.Tunotake: Influences of Nozzle Shape and Ink Viscosity on Droplet Patterns from a Continuous Inkjet, *Proceedings of the Seventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2010), pp.274-275.
- [3] 中西為雄, 中野政身, 角掛裕樹: ノズル形状が及ぼす連続流型インクジェットの液滴生成パ ターンへの影響, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 米沢, (2010), pp.33-34.
- 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	J10033
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2010 ~ March 2011

Non-destructive Detection of Cracks using Electromagnetic Phenomena

Jinhao Qiu*†, Toshiyuki Takagi**†† Tetsuya Uchimoto**, Jun Cheng* *College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

With the growth of markets for green power, energy that does not create pollution, output from sources of nuclear power is increasing faster in the percentage terms. The cracks in nuclear steam generator tubes, especially those occur in the welding parts may cause the great damage in structures and loss in facilities. Thus the nondestructive detection and assessment of steam generator tubes integrity continues to be an indispensable technical support.

Taking advantage of conventional nondestructive testing method that based on electromagnetic phenomena, known as eddy current testing, the related technique and theory for identifying the location and severity of cracks are to be enhanced in this project, by means of experiment observation and numerical simulation.

2. Details of program implement

Since the applicant's laboratory has few research experience on eddy current testing before, most of the project works are preliminary and were done when Chinese PhD student stayed in Professor Takagi's laboratory from 2009,8 to 2010,2 supported by GCOE's internship program. The works include the validity tests of FEM computation code and software; experiment measurement and numerical analysis of the stainless steel plate specimen with Inconel weld joint and EDM (Electric Discharge Machining) slits, guided by the team workers of Professor Takagi's laboratory; providing and organizing the eddy current testing data on the testpieces with stress corrosion cracking of SCC round-robin test project.

There are various kinds of numerical simulation tools for ECT, the program code and practical software based on Finite Element Method are one of the most popular categories. The agreement between computation signals and actual detecting values is essential to the numerical simulation, otherwise the simulation analysis will make none sense. Figure 1 shows the comparison of numerical results obtained using edge-element FEM code and experiment data. In order to evaluate the validity of the code, ECT benchmark problem concerning the SG tubes with cracks is employed.



Frequency of coil exciting current f=150kHz f=300kHz Figure 1: Comparison of the signals of experiment data and edge-element FEM code The awareness of the positioning and quantifying accuracy of the cracks in the welding components using eddy current testing has practical significance for the integrity of a nuclear power plant. Figure 2 shows the measured signals obtained from absolute double ring coils probe with up-down layout on the stainless steel plate specimen with Inconel weld joint and EDM slits, and probe output variability due to the material composition of the specimen. The measured signals consist of the positional probe values by scanning along the EDM slits with different thickness from 3mm to 20mm and the welding region.



Figure 2: (a) Measured signals of EDM specimen with weld joint and (b) output variability due to the material composition

Besides the above two kinds of works, the author also experiment detected the SCC testpieces using ECT equipments of professor Takagi's laboratory. The testpieces were supplied by Dr. Yusa of Tohoku University, he was organizing a project aiming at the enhancement of NDT&E of stress corrosion cracking. The testpieces were utilized for the round-robin test to measure non-destructive testing signals. Although the author was not very skilled in measurement, some unique characteristics of SCC defects were observed in the experimental process.

3. Achievements

Through this study, we had experiences of the specific process for the laboratory detection and numerical computation, the ECT technique for evaluation of crack information was basically set up. We obtained the experiment results of the metal plate specimens with welding region and some artificial natural cracks, such as SCCs. Despite the problems faced by us and also not achieving the expected results, we still made the effective efforts for the numerical simulation of specimens and cracks with complex shape and electrical property.

4. Summaries and future plans

The applicant's laboratory in China is mainly carrying out the researches related to aeronautic applications. On the basis of the project works of the previous year, we are planning to conduct some exploring studies on the aircraft advanced materials, such as conductive fibre reinforced composites, still using the eddy current method.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] Jun Cheng, Jinhao Qiu, Toshiyuki Takagi and Tetsuya Uchimoto: Reliability Verification of Edge-element FEM Code for ECT Simulation of Steam Generator Tube, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 118-119.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J10034
区分	一般共同研究
課題分野	③ライフサイエンス分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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*, 隈部 俊宏*, 船本 健一**, 早瀬 敏幸**††, 冨永 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,東北大学病院脳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(Convection-enhanced delivery; CED)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.我々はこの薬液 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.この MRI データ解析を通して脳内薬剤注入局所での薬液の流れを解明し,より有効な薬剤 分布を得るための薬液注入部位、薬液注入速度を研究することは本システムの改良のために不可 欠である.今回、我々は東北大学流体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法を開発し,これを用 いた術前シミュレーションによる投薬の改良を試みることを目的とした.

2. 研究成果の内容

サル脳幹に CED 法を用いて注入した MRI 造影剤(ガドリニウム)の分布をリアルタイムにモニ タリングした MRI 画像の 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 ターで薬剤分布の解析を行った. 脳幹注入部位の解剖学的構造をもとにして,また実際の薬剤投 与の際に注入針に沿う逆流が問題になることを受けて注入針挿入路に out flow を設置し,注入針 先端に in flow をベクトルとして与えて薬剤分布のシミュレーション法を開発した. さらに,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 を行った(文献 1,総括したデータを J Neurosurg 誌に投稿中). さらに,脳幹よりも構造的に複 雑 (灰色質、白質の性質の違う構造が混在することによる) な大脳でのシミュレーション開発も 進め,図のようなシミュレーションが可能となった.



図 1: サル大脳へのガドリニウム造影剤 CED 投与時の MRI モニタリング(上段) と分布シミュ レーション(下段)



3. 研究目標の達成状況

実際の CED による抗癌剤投与の臨床研究において標的病変は,主に脳幹部再発神経膠腫もし くは大脳の再発神経膠腫である.本研究により、前臨床試験として実施したサルへの投薬のデー タを用いて,サルの脳幹,さらに大脳への薬剤分布のシミュレーション法を確立した.注入時の 逆流や,注入針の方向もシミュレーションに加えた本シミュレーション技術は実臨床において有 益であると考えられる.今後は,本シミュレーションを実際の臨床試験に導入し,最大の薬剤分 布が得られるカテーテル留置部位を術前シミュレーションにより解析して,有効な投薬につなげ る.さらに,この投薬の改善が,悪性腫瘍治療成績の向上をもたらし得るのかを検討する臨床的 解析を進めることになる.

4. まとめと今後の課題

本研究を通して,現在開発を行っている新規局所脳内薬剤輸送技術である Convection-enhanced delivery 技術の投与前シミュレーション法を開発した.今後は、この シミュレーションを臨床研究に導入し、シミュレーションにより得られた結果から得られた 最良の位置に薬剤注入針留置を行い、投薬を改善する.さらには、これが悪性腫瘍治療成績 の向上に繋がるかを検証する.

- 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] 齋藤竜太, 園田順彦, 隈部俊宏, 冨永悌二: Glioblastoma: 臨床研究と新規治療. 脳神経外科速報 Vol. 20, (2010), pp.559-568.
- [2] 齋藤竜太, 園田順彦, 隈部俊宏, 冨永悌二. 脳腫瘍の外科療法 Convection-enhanced delivery-原理・現状・展望, 日本臨床 68 suppl 10, (2010), pp.388-391.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- *[3] S. Sugiyama, R. Saito, K. Funamoto, Y. Sonoda, T. Kumabe, T. Hayase, and T. Tominaga: Analysis of convective flow during convection-enhanced drug delivery, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.98-99.
 - [4] 齋藤竜太, 園田順彦, 隈部俊宏, 冨永悌二: 脳腫瘍への有効な薬剤送達技術: コンベクション・エンハンスト・デリバリー, 第28回日本脳腫瘍学会学術集会, 軽井沢, (2010).
 - [5] 齋藤竜太,園田順彦,山下洋二,金森政之,永松謙一,隈部俊宏,冨永悌二: Convection-enhanced delivery を用いた悪性神経膠腫新規治療法の開発:現状と展望,第69回日本脳神経外科学術総会, 福岡,(2010).
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) 該当なし

課題番号	J10035
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	2010.4 ~2011.3

Blast Wave / 衝撃波の頭蓋内伝播経路・動態の解析 Propagation Pathway and Dynamics of Blast/Shock Wave: Impact on Traumatic Brain Injury

中川 敦寛**, 高山 和喜****

大谷 清伸**, 山本裕朗**, Alisa Gean***, Rocco Armonda****, 冨永 悌二* *東北大学大学院医学系研究科神経外科学分野, **東北大学流体科学研究所 ***Department of Neuroradiology, University of California, San Francisco ****Walter Reed Army Medical Center †申請者, **计**所内対応教員

1. 研究目的

爆風(blast wave: BW)による脳損傷(blast-induced traumatic brain injury: bTBI)は爆風に伴う見えない圧波により生じる点で従来の外傷性脳損傷とは異なる新しい形態の脳損傷である。紛争形態が変化し、イラク・アフガニスタンでは 即席型爆発装置による bTBI 症例が膨大な数にのぼり、受傷した自覚がないまま 慢性期に高次脳機能障害を起こし得るため、米国では社会問題となり、巨額の研 究費の投入対象となっている。爆風が生体に作用する際の波の伝播経路と頭蓋内 に関する検討を行い病態解析と予防に繋げるのが本研究の目的である。

2. 研究成果の内容

本年度は解析モデルを用いた検討を行った。モデル二次元軸対称系とし、多成分系の解析 に有効な Multiple Material Euler ソルバーを適用して行った. 11mm×10mmの解析範囲をゼ ラチン(20wt%)(脳),水(髄液),アクリル(頭蓋骨),空気から成る多層媒体をメッシュ サイズ 0.05mm/cell でモデル化し, 原点で微小爆薬アジ化銀ペレット (AgNa, 密度 3.8g/cm³) を起爆し発生する衝撃波(shock wave: SW)を伝播させた. 圧力測定ポイントを各モデルに 4 点 (gauge1(7.0, 0), gauge2(7.5, 0), gauge3(8.5, 0), gauge4(9.5, 0)) 設定した. ゼ ラチン,水,アクリルは Mie-Gruneisen 型の線形 Shock Hugoniot 状態方程式,空気は理想 気体状態方程式を用いた. 微小爆薬アジ化銀は JWL 状態方程式を用いて質量 50,100,200 µg で計算を行った.微小爆薬起爆後,SW はゼラチン中を伝播,減衰しながら水界面に到着,ゼ ラチン-水間では音響インピーダンスは差が少ないため、界面で反射はなく透過する、その 後,アクリルへ到達し圧縮波として一部反射,透過し,透過した SW は空気界面に到達し膨 張波として反射、アクリルー水間で膨張波が一部透過、一部は圧縮波として反射して、透過 した膨張波が水、ゼラチン中を伝播して、負圧領域を拡大していく、水-アクリル間で反射 した波は逆転して圧縮波となる.この波はアクリル内で減衰しながらアクリル-空気、アク リルー水の各界面で膨張、圧縮と反転を繰り返す.水、ゼラチン内の負圧領域は気泡が発生 するのに十分な負圧になっている. ゼラチン-水-アクリル-空気モデルの場合, ゼラチンだ けの場合よりゼラチン-水界面で減衰が大きく圧力は低下するが,アクリル面での反射 SW に よる圧力上昇によってアクリル内でも圧力が高くなる.SW が音響インピーダンスの差によっ て反射して発生した膨張波による最低圧力は、膨張波が発生するアクリルー空気界面でゼラ

チン-空気モデルの場合よりも圧力が低下しており、水の部分でも圧力が低くなる傾向があ る. ゼラチンの部分では若干ゼラチン-空気モデルよりも低下圧力が大きくなっているが気 泡発生する飽和水上気圧を下回っており、気泡が発生するのに十分な負圧である.水-アクリ ル界面における反射 SW による最大圧力は、アジ化銀の質量が大きい程最大圧力が高く、反 射面(水-アクリル界面)に近い程最大圧力が高い. ゼラチン-空気モデルの場合に比べゼラ チン-水-アクリル-空気モデルのゼラチン、水の部分の膨張波による最低圧力は高くなるが、 水-アクリル界面での反射 SW 到達直後に膨張波が到達することでこの部分での圧力変動は激 しくなり、この領域の与える負荷が大きいことが予想された.

3. 研究目標の達成状況

今回行った解析モデルを用いた検討結果は動物実験結果に relevant なものであり,当初の課題は概ね達成したものと考えられる.

4. まとめと今後の課題

本年度の検討結果では動物実験で認められた bTBI の特異な画像所見(BW 照射反対側における損傷所見(核の紡錘化,出血))には頭蓋骨経由で伝播した衝撃波の関与が示唆された.今年度得た知見を生かして bTBI の特異な臨床像を解明し,今後の予防,治療研究に展開したい.

5. 研究成果(*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)(合計7件)

- *[1] A. Nakagawa, GT. Manley, AD. Gean, R. Armonda, K. Ohtani, H. Yamamoto, K. Takayama, and T. Tominaga: Mechanisms of primary blast-induced traumatic brain injury: Insights from shock wave research, *J. Neurotrauma*, (Epub ahead of print, Feb 20, 2011)
 - [2] 中川敦寛, 荒船龍彦, 大谷清伸, 山本裕朗, 鷲尾利克, 塚本哲, 中野徹, 仲井正昭, 合田 圭介, 小川欣一, 孫明宇, 隈部俊宏, 芳賀洋一, Bahram Jalali, 牛田多加志, 高山和喜, 西 野精治, 新家光雄, 佐久間一郎, 冨永悌二: blast-induced traumatic brain injury (bTBI): multidisciplinary team による病態解明から機器開発まで. *神経外傷*, 33 (2010) pp. 60-67.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [3] A. Nakagawa, K. Ohtani, H. Yamamoto, K. Takayama, T. Tominaga: Biological and mechanical profile of blast-induced traumatic brain injury model in rat. *Scientific Session. Neurotrauma and Critical Care AANS 2010*, 2010. 5. 3, Philadelphia, PA (講演).
- [4] 中川敦寛.「衝撃波研究」の研究プラットフォーム:生体損傷から機器開発まで. Nibei Doctors Salon 日米(寺崎)財団 Los Angeles 2010 年7月12日(招待講演).
- *[5] A. Nakagawa, T. Arafune, K. Ohtani, H. Yamamoto, T. Washio, A. Tsukamoto, T. Nakano, M. Nakai, C. Sato, K. Goda, Y. Ogawa, M. Sun, T. Kumabe, B. Jalali, T. Ushida, K. Takayama, S. Nishino, M. Niinomi, I. Sakuma, T. Tominaga. Bench top animal model for blast-induced traumatic brain injury using microexplosives: Difference of pathology by the presence of the skull, *Proceedings of the Tenth International Symposium of the Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 82-83.

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(受賞)日本生体医工学学会平成 21 年度荻野賞,細血管温存下に組織破砕・切開可能な内視鏡デバイス:レーザージェットメスの開発,中川敦寛(共同研究者 中野徹,山本裕朗,新家光雄, 松永忠雄,孫明宇), 2010.6.29,日本生体医工学学会.

Project code	J10036
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2010 ~ March 2011

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

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

*Graduate School of Engineering, Yamagata University, **Institute of Fluid Science, Tohoku University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

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

2. Details of program implement

We have implemented a boundary element model of an expansion chamber and a tailpipe into an existing code, based on a fully axisymmetric formulation, which previously has been used for the 'pure' hole-tone problem. The implementation includes an acoustic feedback mechanism. Based on the boundary element pressure analysis, the acoustic velocity field is computed near the jet and added to the non-compressible flow field, which is computed via the discrete vortex method.



Figure 1 : Sketch of the cavity-tone problem. We consider this as the hole-tone feedback problem modified to include a closed cavity and a tailpipe. The dotted line indicates how the surface is closed in the boundary element analysis.

3. Achievements

We have investigated the influence of cavity- and tailpipe-geometry. The initial boundary element model was based on a previous thin-plate formulation which also made use of a multi-pole expansion of the Green's function. Some results were presented at ICFD2010 in Sendai. These results are however not fully satisfactory. We believe the problems are due to some approximations made in the Green's function. A revised implementation is ongoing, based on an exact time-domain Green's function in axisymmetric cylindrical coordinates. This function takes the form

$$G(r, z, r_*, z_*) = \frac{c_0}{\pi} \frac{H\left(\sqrt{c_0^2(t - t_*)^2 - (z - z_*)^2} - |r - r_*|\right) H(r + r_* - \sqrt{c_0^2(t - t_*)^2 - (z - z_*)^2})}{\sqrt{c_0^2(t - t_*)^2 - (z - z_*)^2 - (r - r_*)^2} \sqrt{(r + r_*)^2 + (z - z_*)^2 - c_0^2(t - t_*)^2}}$$

where c_0 is the speed of sound, *H* is the Heaviside unit function, *t* is the time, and *r* and *z* are as defined in Fig. 1. Variables with an asterisk are related to the sources, while those without are related to the observation point.

With a cavity/expansion chamber in place, it is possible to make a closed surface, as indicated by the dotted lines in Fig 1. This makes it possible to use the standard boundary element formulation, rather than the more complicated thin-plate formulation necessary in the canonical hole-tone feedback problem (including a thin end-plate only).

4. Summaries and future plans

We wish to obtain a thorough understanding of the interaction between the unsteady flow and the acoustic standing waves in the expansion chamber and the tail pipe. Once this has been achieved in the axisymmetric case we will move on to the three-dimensional case and implement cavity and tailpipe in an existing 3D Fortran-code. Forced acoustic excitation (for flow- and sound control) will be considered as well.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- K. Matsuura & M. Nakano: Direct Numerical Simulation of a Hole-Tone Feedback System, CD-ROM Proceedings of 3rd Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, Cincinnati, (2010), pp.1-6.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[2] M. A. Langthjem & M. Nakano: The influence of a closed cavity and a tailpipe on the hole-tone feedback cycle, *Proceedings of the Seventh International Conference* on Flow Dynamics, Sendai, (2010), pp.270-271.
- *[3] M. A. Langthjem & M. Nakano: Numerical and experimental research on active control of the hole-tone feedback problem, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.140-141.
- [4] M. A. Langthjem & M. Nakano: Analysis of the hole-tone feedback cycle: on the influence of a cavity and a tailpipe, 88th Meeting of the Fluids Engineering Division of JSME, Yamagata University, Yonezawa, Oct. 30-31, 2010, oral presentation.
- [5] M. A. Langthjem & M. Nakano: Aeroacoustics of a silencer model, 20th Symposium on Flow-Induced Sound (Dai 20-kai Ryuriki-Souon Shinpojiumu), The University of Tokyo, Dec. 10-11, 2010, oral presentation.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J10037
区分	一般共同研究
課題分野	基礎研究分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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**††, 竹島 由里子** *慶應義塾大学理工学部, **東北大学流体科学研究所 †申請者, ††所内対応教員

1. 研究目的

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[6]. 本研究では、専用オントロジー[1]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[2]によってスケーラブルなワークフローのバージョニングと知見獲得 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[5]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

前年度に所内公開を果たした TFI-AS/V (<u>Transdisciplinary Fluid Integration-Archive</u> <u>System/Visualization</u>)システムの初期プロトタイプをさらに発展させるために,今年度は, 以下の2点を中心とした成果をあげた.

- 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し、「予期される現象の 検出だけでなく予期されない現象の発見に資する」視覚分析論(visual analytics: VA) に係る技法の特徴付けと分類について、動脈瘤周りの血流解析や晴天乱気流を主なシナ リオに用いて基本的考察を行った[4].
- 2) スケーラブルな可視化環境の実現に向けて,可視化出自情報の詳細度制御法を提案し, それに基づき,可視化応用変更の価値を,目的,技法,ワークフロー,パラメタ値の変 更や知見獲得等の種々のタスク局所的重要度とその大局的な時空間構成から同定し,

その総合的スコアの閾値処理に よって,対応するバージョンツリ ーを適応的に表示する機構の基 本設計を行った.その効果は2次 元ハイブリッド風洞データを用 いた事前解析によって実証され た[3].

図1に,16ノードからなるバー ジョンツリーが,異なる閾値選択 によって,11ノード(左)もしく は7ノード(右)に濃縮されてい る様子を示す.



図1:バージョンツリーの詳細度制御の例

3. 研究目標の達成状況

流動可視化ドメインオントロジーの確立には、当初計画していた2次テンソル場のような 3次元高階データを対象に加える必要がある.並行して進めている他研究では、その効果的 な可視化法を継続的に開発しているが、それを含む関連可視化技法の分類学的解析は未着手 である.VAのような経時的ドメインの拡張や、可視化パラメタ半自動選択機能の取り込みと 併せて今後鋭意実施すべきである.さらに、中長期的な視覚解析の現場におけるシステムの 実利的効果を検証するために、所内システム運用評価を今後積極的に推進していかなければ ならない.

4. まとめと今後の予定

本年度は、可視化オントロジーの拡張と出自管理の適応化に関するテーマを通じて、 TFI-AS/V システムの拡張を試みた. なお、本プロジェクトは本年度をもって最終年度とし、 今後は科学研究補助金基盤研究(B)22030037「協調的可視化ライフサイクル管理ミドルウェ アの開発」のなかで共同研究をさらに展開していく予定である.

5. 研究成果 (*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

[1] Y. Takeshima, I. Fujishiro, and T. Hayase: GADGET/FV: Ontology-supported design of visualization workflows in fluid science, To appear in *Scientific Programming*, (2011).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] 藤代一成:「見せない可視化:データビッグバンを抑止する微分位相幾何学的アプローチ」 (特別講演),日本計算機統計学会第24回大会論文集,統計数理研究所,(2010), pp. 121-130.
- *[3] I. Fujishiro, Y. Takeshima, Y. Seshita, and T. Hayase: Design of version tree operators for sophisticated visualization provenance, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 134-135.
- [4] 竹島由里子:「Visual Analytics へ向けた協調的視覚解析支援環境 GADGET の拡張」,第2 回視覚協創学ワークショップ,慶應義塾大学日吉キャンパス,(2011).

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(書籍)

*[5] 藤代一成:「協調的可視化」,フルードインフォマティクス ~「流体力学」と「情報科学」の融合~,日本機械学会 編,技報堂,第4章 (pp. 103-124), (2010).

(インタビュー)

[6] 藤代一成:「可視化の未来」,21+10(日本 SGI 機関誌),No.1,インタビュー#2,(2011). (特許)なし

(受賞) なし

(マスコミ発表) なし

課題番号	J10038
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	2010.4 ~2011.3

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.しかしながら、細菌(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

図1に印加電圧の周波数と極性の違いによる過酸化水素濃度の変化について示す.5-7 kHz において特異的に過酸化水素濃度が上昇した.また、図2に示すように電圧を変えた場合、



Fig. 1 Effect of frequency on H_2O_2 concentration.







Fig. 2 Effect of discharge voltage on H_2O_2 concentration.



Fig. 4 Effects of electrode polarity on ORP and pH.

と正極,負極ともに過酸化水素濃度の増加が得られたのは 10 kV の場合である.そこで,周 波数を6 kHz,放電電圧を10 kV に固定し,放電時間の変化に対する過酸化水素濃度を調べ た.計測結果を図3に示す.過酸化水素濃度は放電時間に対し,線形の関係を有することから 一定の割合で生成されていることが示されている.また,印加電圧の極性が正極の場合の方が 負極の場合よりも過酸化水素濃度が大きくなっていることが示された.これは、プラズマの発 生モードが正極と負極で異なるためと考えられる.図4にpH 値と ORP 値の変化についても 示すが、pH 値が変化しないにも関わらず ORP 値が大きく変化している様子が示されたが、 これは溶存水素ガスの生成を示唆しているものと考えられる.

3. 研究目標の達成状況

プラズマ照射により水の性質が大きく変化することが明らかになった.現在,本研究成果を 集約し論文投稿の準備をしている状況である.

4. まとめと今後の課題

本研究により、プラズマ照射による水への干渉機構の解明が進み、本共同研究の一連の成 果を基盤とした、流体研公募共同研究「バイオフィルム産生菌に対するプラズマ殺菌に 関する研究」(加齢研・藤村)、「Analysis of plasma flow at gas-liquid interface for biological interaction」(マックスプランク研究所・Morfill)、「水中におけるプラズマ 熱流動機構の解析」(大分大・金澤)といった新たな共同研究テーマが立ち上がるなど大き な成果となった.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) 該当無し

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[1] Takashi Miyahara, Takehiko Sato, Masanobu Oizumi and Tatsuyuki Nakatani: Water Quality Change Induced by Plasma Formation in Water, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.88-89.
 - [2] 佐藤岳彦,大泉雅伸,宮原高志,中谷達行:水中の放電現象による水質への影響,日本機械 学会第20回環境工学総合シンポジウム2010,(2010), pp. 197-198.

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許) 該当無し

(受賞) 該当無し

(マスコミ発表)該当無し

課題番号	J10039
区分	一般共同研究
課題分野	基盤研究分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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,**トーヨーエイテック株式会社 †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、電極近傍から流れが発生するが、この機構について も十分に解明されていない.そこで、本研究ではプラズマ条件の最適化により任意の気泡を 生成する手法の開発や電極近傍の流動機構の解明を行う.

2. 研究成果の内容



Fig. 1 Experimental setup



Fig. 2 Streamer (a) and schlieren image (b).

本研究では図1に示す実験装置を作 製した. 電極が設置された容器内に超 純水を満たし,高電圧を印加すること で放電を行う. 容器には石英ガラス窓 が取り付けられ、シュリーレン法によ る観察が可能である. 図2に(a)放電時 に形成されるストリーマの発光写真と (b)ストリーマ形成に伴い形成される 気泡群を示す. 多数の短いストリーマ が電極端から伸長し、そのストリーマ に沿って気泡が形成されることが明ら かになった. これらの気泡群は、ほぼ 同じ時間経過で気泡形成・崩壊からリ バウンドに移行し消滅する. これらの 過程は、概ね100 µs程度で終了する. 本研究では、100 Mfps の高速度カメ ラを利用して実験を行ったが、ストリ ーマ生成時の気泡生成現象を捉えるた めにはさらなる高性能な高速度カメラ が必須である.

また,数値解析により,プラズマ発 生機構を検討し,放電開始箇所の検証 を行った.図3に電界分布の数値解析 結果について示す.これより,絶縁物 で覆われていても電極端面の周囲に電



図3 水中放電における電界分布

界が集中し、そこから放電が開始することが明らかになった.これは、実験結果とも一致する. しかしながら、水中放電現象は、液体から気体への相転移を含む気液界面を取り扱う極めて複雑 な問題であり、今後さらなる解明が望まれる.

3. 研究目標の達成状況

対象としている現象は、ナノ秒オーダーの超高速現象な上、極めて小さいなどの計測上多 くの問題があるが、本研究ではこれらの現象を観察することに成功した.

4. まとめと今後の課題

本研究では、ストリーマ形成に伴う気泡の生成消滅過程を観察することに成功したが、こ れに伴う流動現象については、気泡の形成収縮に伴うものと電界により誘起されるものの2 種類について検証する必要があることが明らかになった. 今後は、リバウンド後の残留気泡 の挙動を明らかにすることでこれらの流動現象について詳細な検証を行う.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) 該当無し

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] Takehiko Sato, Masanobu Oizumi, Takashi Miyahara and Tatsuyuki Nakatani: Observation of Streamer and Bubble Generation by Plasma, *Proceedings of the 10th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI2010)*, Sendai (2010), pp.150-151.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
 - (特許)該当無し(受賞)該当無し(マスコミ発表)該当無し

Project code	J10040
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 2010 ~ March 2011

Analysis of Plasma Flow at Gas-Liquid Interface for Biological Interaction

Takehiko Sato*†, Gregor Morfill**†† Yutaka Iwafuchi***, and Tetsuji Shimizu** *Institute of Fluid Science, Tohoku University **Max-Planck Institute for Extraterrestrial Physics ***Graduate School of Engineering, Tohoku University †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

The production and transport of reactive species in atmospheric plasma is a key issue to understand the interaction between the plasma and biological tissues. The biological tissues are often immersed in liquid. In this project, we aim to investigate how the produced reactive species in gas (air) are transported into water. In addition, a flow formation in the water was observed, which is responsible for the transport of reactive species onto the biological tissues.

2. Details of program implement

A dielectric barrier discharge plasma was produced between a metal pin electrode and water surface as shown in fig. 1(a). To the metal pin, a high AC voltage of 7.5 kV_{0p} was applied with respect to aluminum plate below a glass cell, electrically grounded. It was found by optical emission spectroscopy and measurement using a gas detector that reactive species, e.g. NO, NO₂, O₃ were produced. A high-speed Schlieren images show that a thermal flow field from the metal pin toward the water surface was produced. This flow field formation was also observed by a simple smoke test that the flow was produced to the water surface around the metal pin electrode.

Figure 1(b) shows a time series of Schlieren images in the water. At t = 0 s, the discharge was ignited. A thermal field started to build up from the discharge point at the center along the surface due to the friction above the surface produced by the discharge. After 0.7 s, a circulating flow was produced. This flow pattern was also observed by particle image velocimetry using 5 µm microparticles.



Figure 1: (a) Experimental setup. A plasma discharge was produced between the metal pin and water surface. (b) Thermal field in the water measured by Schlieren method.



Figure 2: Temporal change in the water with methyl red.

In the water by the plasma treatment, reactive species were found dissolved. The concentrations of H_2O_2 , O_3 , and HNO_2 increased with the discharge time *t*. To see the transport of reactive species in the water, a solution of methyl red was treated by plasma discharge. Figure 2 shows the temporal evolution of the color change in the solution. The color change is due to a drop in pH. Since this color change pattern closely resembles the thermal field shown in fig. 1(b), we believe that the reactive species were transported mainly by the circulating flow induced by the discharge.

3. Achievements

By the investigation in Institute of Fluid Science, Tohoku University, we clarified the flow formation by the plasma discharge both in the air and water. In the air around the discharge the production of reactive species was observed. In the water the circulating flow was induced and it is shown that the transport of reactive species in the water could by mainly by the circulating flow.

4. Summaries and future plans

The flow formation and production of reactive species were investigated in the dielectric barrier discharge between the metal pin and water surface. The reactive species were produced in the air by the discharge and the discharge could drive a gas flow onto the water surface. In the water, the circulating flow was induced by the flow in the air. This flow in the water could be mainly responsible for the reactive species transport.

In the next step, a planar electrode is used for the discharge to see a geometry effect. It is also interesting to see an effect of water depth on the diffusion velocity of reactive species because there is a very thin layer of water on biological tissues in many applications.

- 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)
- Y. Iwafuchi, T. Shimizu. G. Morfill, and T. Sato: Analysis of Chemical Species in an Air-Water Plasma Flow, *Proceedings of the Seventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2010), pp.554-555.
- *[2] T. Shimizu. Y. Iwafuchi, G. Morfill, and T. Sato: Analysis of Plasma Flow at Gas-Liquid Interface for Biological Interaction, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.92-93.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J10041
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2010 ~ March 2011

Mechanism of Bubble Generation and Disappearance by Plasma

Takehiko Sato*†, Mohamed Farhat**†† Marc Tinguely**, Hidemasa Fujita*** *Institute of Fluid Science, Tohoku University, **Lab. of Hydraulic Machines, EPFL, Switzerland ***Graduate School of Engineering, Tohoku University †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

LHM, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL) is the one of the world center of research in cavitation dynamics. A generation and disappearance process of a bubble by plasma has not clarified yet from a view point of chemical reaction, although the process was already clarified by Prof. Farhat from the LHM group. Prof. Sato from the Tohoku University group has studied plasma in water and clarified generation of chemically active species. The aim of this project is to clarify the mechanism of reactive species generation by focusing on the bubble behavior.

2. Details of program implement

High speed visualizations of bubble collapses showed that the amount of microbubbles remaining after the collapse of a laser-induced bubble is smaller than after the collapse of a discharge bubble as shown in Fig. 1. As the remaining microbubbles are partially composed by gases generated during the bubble generation and collapse process, this result is consistent with the measurements of dissolved hydrogen that showed a larger concentration after the collapse of a discharge bubble than after the collapses of a laser-induced bubble as shown in Fig. 2.



Figure 1: Time evolution of concurrent bubble behaviors in the process of generation, collapse and rebounds for the laser induced bubble (right) and the discharge induced bubble (left).



Figure 2: Concentration of dissolved hydrogen against number of laser pulses (right) and number of discharge pulses.

3. Achievements

We aimed at indentifying the chemical species in the generated bubble, and clarifying collapse or disappearance process of micro bubble in this year. We assessed that the hydrogen gas was partially included in the bubble by measuring the dissolved hydrogen gas in the water and the residual microbubbles depended on the amount of dissolved hydrogen gas.

- Summaries and future plans We are planning to clarify what kinds of gases are mainly composed in the residual microbubbles.
- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] Marc Tinguely, Masanobu Oizumi, Takehiko Sato and Mohamed Farhad: Residual Microbubbles after Collapse of Discharge-Induced or Laser-Induced Bubbles in Water, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp.120-121.
- 3) Patent, award, press release etc.
 (Patent) Not applicable.
 (Award) Not applicable.
 (Press release) Not applicable.

Project code	J10042
Classification	General collaborative research
Subject area	Life Science
Research period	April 1, 2010 ~ March 31, 2011

Study on Friction of Soft Tissue Biomodel by PVA

Makoto Ohta*†, Hiroyuki Kosukegawa** Vincent Fridrici***, Philippe Kapsa ††*** *Institute of Fluid Science, Tohoku University, **Faculty of Engineering, Tohoku University ***LTDS, Ecole Centrale de Lyon †Applicant, ††non-IFS responsible member

- Purpose of the project
 To find the characteristics of friction behaviors on PVA and medical metal and develop a methodology of biomimetic material for human soft tissues.
- 2. Details of program implement



Fig.1 Schematic diagram of ball-on-disc friction apparatus

seconds.

3. Achievements

Stribeck curves of the friction coefficient of four kinds of metallic alloy are obtained (Fig.2). This fact allows us to guess that the Ti-surface alloys have larger polar component in surface free energy in comparison with the Cr-surface alloys. Since various reports indicate that elastic friction is governed by the interaction of the surface characteristics between contacting materials, the difference in the friction coefficient would be influenced by the surface chemical

Friction coefficients between metallic alloys and PVA-H samples were measured by using a ball-on-disc rotating tribometer (Fig. 1). A PVA sample in a petri dish was fixed on the rotation stage of the tribometer, and a 3 ml droplet of pure water was deposited on the surface of the PVA-H. A metallic alloy ball was loaded to the PVA-H sample with a constant normal load FN (from 0.1 to 3.1 N) at a distance of 30 mm from the center of the PVA-H disc. A PVA-H sample was rotated at a constant sliding speed v (from 0.5 to 600 mm/s) in one direction for 30 seconds, and was turned toward the opposite direction every 30



Fig.2 Comparison of friction coefficient between metallic alloys: (\blacksquare) 316L; (\blacktriangle) CoCr; (\Box) NiTi; (\triangle) TiMoSn with P12 at FN = 0.1 N (a) and 1.0 N (b). The abscissa axis is the Sommerfeld number, where P is contact pressure [Pa], and η is viscosity of lubricant

composition of metallic alloys. The polar component in surface free energy can affect the adsorption of polymer because the solid captures lubricant in the gap between the substrate and gel. Therefore, friction behavior in the elastic friction can be influenced by the chemical characteristics of the surface of alloys. These results can serve new guidelines to the development and design of stent. Two phenomena, elastic friction and hydrodynamic lubrication, are observed in the friction behavior between PVA-H disc and metallic alloys used for stent. There is a difference in friction coefficient between the four kinds of alloys in the elastic friction. It can be influenced by the surface characteristics of alloys. The results obtained here can serve new guidelines for the development and design of stent.

4. Summaries and future plans

We will perform friction test with a complicated shape such as stent.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] Keisuke Mamada, Hiroyuki Kosukegawa, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Makoto Ohta, Friction properties of PVA-H/steel ball contact under water lubrication conditions, *Tribology Journal*, (2011), doi:10.1016/j.triboint.2010.12.014
- [2] Keisuke Mamada, Vincent Fridrici, Hiroyuki Kosukegawa, Philippe Kapsa, Makoto Ohta, Friction Properties of Poly(vinyl alcohol) Hydrogel: Effects of Degree of Polymerization and Saponification Value, *Tribol Lett*, DOI 10.1007/s11249-011-9768-8.
- [3] Hiroyuki Kosukegawa, Shuya Shida, Yoko Hashida, Makoto Ohta, Mechanical Properties of Tube-Shaped Poly (Vinyl Alcohol) Hydrogel Blood Vessel Biomodel, Proceedings the 3rd ASME2010 3rd US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, Aug.1-5, (2010), pp. FEDSM-ICNMM2010-30892.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [4] H.Kosukegawa, Y. Hashida, M. Ohta, Flequency-Dependence of Blood Vessel Biomodel Made of Poly(vinyl alcohol) Hydrogel, 23th European Conference on Biomaterials, Sep. 11-15, 2010, p. h3586.
- [5] Hiroyuki KOSUKEGAWA, Vincent FRIDRICI, Philippe KAPSA, Koshi ADACHI, Makoto OHTA, Tribological study on metallic alloy used for stent against blood vessel biomodel, *Swiss/Japan International Seminar on Medical Emgineering Based on Vessel Biology*, in Zurich, Swiss, Nov 15-16, (2010).
- [6] Hiroyuki Kosukegawa, Vincent Fridrici, Philippe Kapsa, Boyko Stoimenov, Makoto Ohta, Friction Properties on Stent Metallic Alloy and Blood-vessel-like Soft Matter, 日本機械学会,第23回バイオエンジニアリング講演会,2011年1月8-9日, p.17.
- [7] Makoto Ohta, Hiroyuki Kosukegawa, Syuya Shida, Kei Ozawa, Noriko Tomita, Chang-Ho Yu, Biomodel for Development of Intracranial Stent, SIRIC International Symposium 2010, July 2, (2010), pp. 126-130.
- *[8] Makoto Ohta Hiroyuki Kosukegawa Vincent Fridrici Philippe Kapsa Keisuke Mamada:Friction Properties of PVA-H for Biomodel and Steel Ball for Medical Devices, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 86-87.
 - Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J10043
Classification	General collaborative research
Subject area	Life science
Research period	April 1, 2010 ~ March 31, 2011

Optimization of Stent Design based on Blood Flow Analysis using LBM Method

Makoto Ohta*†, Hitomi Anzai** Bastien Chopard††***, Toshio Nakayama **** Daniel A. Ruefenacht*****, K. Srinivas***** *Institute of Fluid Science, Tohoku University, **Faculty of Engineering, Tohoku University ***Geneva University ***Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University *****Hirslanden Hospital ******University of Sydney

[†]Applicant, ^{††}non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

To develop a methodology of stent design with optimization.

2. Details of program implement

The open source software Palabos version 0.7, which provides a flexible, highly parallelized and publicly available environment for LB method, was used for computational fluid dynamics(CFD) simulation. Two-dimensional fluid structure was solved based on the nine velocity for the 2D study called as D2Q9 with incompressible lattice Bhatnagar-Gross-Krook(BGK) dynamics in this study. In LB approach, fluid motion was represented by simulating the time and space evolution of kinetic quantities as the particle distribution function $f_i(\vec{r}, t)$. Then LB dynamics was expressed as

$$f_{i}(\vec{r} + \vec{c}_{i}, t + 1) - f_{i}(\vec{r}, t) = \Omega_{i}(f(\vec{r}, t))$$
(1)

where Ω_i was the collision operator, $\vec{c_i}$ was discredited velocity space and $\vec{r},$ t were the discrete position and time, respectively. And the quantity Ω_i was represented as

$$f_i(\vec{r} + \vec{c}_i, t + 1) - f_i(\vec{r}, t) = \Omega_i(f(\vec{r}, t))$$
 (2)

where ω denoted a relaxation parameter and f_i^{eq} was the local equilibrium as a Maxwell-Boltzmann distribution of the fluid velocities. The fluid density ρ , velocity ρu_{α} and momentum flux tensor $\Pi_{\alpha\beta}$ were computed as

$$f_{i}(\vec{r} + \vec{c}_{i}, t + 1) - f_{i}(\vec{r}, t) = \Omega_{i}(f(\vec{r}, t))$$
(3)

The lattice Boltzmann sound speed was $c_s = 1/\sqrt{3}$. The simulation size was 480×168 lattice sites with a parent artery consists of 48 sites, which assumed the parent artery with length of 40 mm and diameter of 4 mm, and an aneurysm shape was defined as same to the model of Srinivas et al. (Fig. 1).



Fig. 1 Geometry of 2D ideal aneurysm

3. Achievements

Optimization program based on LB method combined SA was developed for 2D ideal aneurysm. After execution of this program with four initial conditions, all stents were reformed and obtained over 85% reduction of average velocity inside of an aneurysm.

- Summaries and future plans
 3D modeling will be planned as one of the future plans.
- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- [1] Hitomi Anzai, Toshio Nakayama, Yuriko Takeshima, Makoto Ohta, The Effect of 3D Visualization on Optimal Design for Strut Position of Intracranial Stent, Proceedings the 3rd ASME2010 3rd US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, Aug.1-5, (2010), pp. FEDSM/ICNMM2010-30591.
- [2] Toshio Nakayama, Shinkyu Jeong, Srinivas Karkenahalli, Makoto Ohta, Development of Stent Strut Pattern for Cerebral Aneurysm, Proceedings the 3rd ASME2010 3rd US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, Aug.1-5, (2010), pp. FEDSM/ICNMM2010-30592.
- [3] K. Srinivas, A. Townsend, C.J.Lee, T. Nakayama, M. Ohta, S. Obayashi, T. Yamaguchi, Two-Dimentional Optimization of a Stent for an Aneurysm, *Journal of Medical Devices*, Vol.4, June, (2010), pp. 021003-1 021003-7.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [4] Hitomi Anzai, Toshio Nakayama, Keiko Irie, Makoto Ohta, Analyzing Blood Flow in Bifurcated Artery with Cerebral Aneurysm Using Two Stents, *Seventh international Conference on Flow Dynamics*, Nov. 1-3, (2010), pp. 570.
- [5] 安西 眸,中山 敏男,入江 恵子,太田 信,血流数値解析の 3 次元可視化による効果的 な脳動脈瘤ステント配置の予想,日本機械学会,第 23 回バイオエンジニアリング講演 会,2011年1月8-9日,pp.253.
- [6] 中山 敏男, 鄭 信圭, Srinivas Karkenahalli, 太田 信, 最適化設計法による脳動脈瘤用 ステントのストラットパターンの開発, 日本機械学会, 第 23 回バイオエンジニアリン グ講演会, 2011 年 1 月 8-9 日, pp.251.
- *[7] Toshio NAKAYAMA, Shinkyu JEONG, Srinivas KARKENAHALLI Makoto OHTA: Development of Stent for Cerebral Aneurysm based on Optimization, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 84-85.
- 3) Patent, award, press release etc.
 (Patent) Not applicable.
 (Award) Hitomi Anzai, Outstanding Award, ICFD2010.
 (Press release) Not applicable.

Project code	J10044
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2010 ~ March 2011

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

Masami Nakano*†, Miklos Zrinyi**††, Teppei Tsujita* *Institute of Fluid Science, Tohoku University **Laboratory of Nanochemistry, Semmelweis University †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

Electroactive polymers (EAP) exhibit a change in size and shape when stimulated by electric field. The application of these materials as actuators is based on their ability to induce large actuation strains in form of stretching, contracting, or bending. EAP can be deformed repetitively by applying external voltage, and they can quickly recover their original shape upon reversing the polarity of the applied voltage. Due to this being EAPs are often referred to as artificial muscles in the field of robotics. Despite the great variety of strains induced by shape change, no rotary motion performed by electroactive polymers has been discovered as yet.

The Quincke rotation is spontaneous rotation of small non-conducting objects dispersed in liquid dielectrics and subjected to homogeneous DC electric field exceeding some threshold value. Most of the cases the rotating materials are fragile oxides with poor fabrication possibilities.

Controllable rotation of small materials is of relevance for a range of practical applications, for example in micro-motors or in microfluidics. It is therefore an important task to find proper materials with controllable shape and size in order to perform reliable measurements as well as to use them for any technical applications. The main purpose of the research is to develop electroactive polymer or polymer composite as possible candidate of rotor of micro sized electro-motors.

2. Details of program implement

The basic theoretical approach of Quincke rotation for rigid spherical particles immersed in a dielectric liquid and a uniform electrostatic field predicts that there is threshold electric field strength E_{cr} at which the solid particles begin to rotate as well as the angular frequency does not depend on the particle size. One of our main aims was to check the validity of this prediction.

In our previous study we have found that orthorhombic FeO(OH) particles dispersed in linseed oil show the Quincke rotation phenomenon. We have measured the angular frequency, ω as a function of particle size. These measurements were carried out at three different electric field intensities (0.46 kV/mm, 0.8 kV/mm and 0.7 kV/mm). We have concluded that despite the theoretical approach the angular velocity strongly depends on the particle size.

We have prepared FeO(OH) loaded polyvinyl alcohol (PVA) and gelatine based polymer disks. It was found that that gelatin as a host polymer for the solid particles provides stronger electro-rotation effect. When comparing the angular frequency of solid FeO(OH) particles with the filler loaded circular polymer disks, it was found that at the same electric field intensities the rotation of polymer disk is significantly faster than that of single particle, as shown in Table 1.

diameter/ µm		$\omega_{/rad/sec}$
polymer disk	570	35
FeO(OH)	17	0.8

Table 1 : Comparison of angular frequency of rotating disk and FeO(OH) single particle. The electric field intensity is 1.5 kV/mm.

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 and AC field is accounted for, four regimes have been observed:

- a) Below a threshold value, $(E_o < E_{cr})$ of the electric field, the disk does not show any motion.
- b) At close to the threshold value and slightly above $(E_o \ge E_{cr})$, the disk begins to rotate, but the angular displacement was found to be less than 2π .
- c) At DC field intensities much higher than the threshold value $(E_o > E_{cr})$, continuous rotation was observed. The disk rotates around itself with an axis pointing in any direction perpendicular to the DC field. The speed of rotation was found to be constant.
- d) Under AC field, electro-rotation occurs only at low frequencies (f < 1Hz). In this

case, the degree of rotation exceeds some 2π before alteration in the direction of rotation takes place.

We have studied the micro-fabrication possibilities of the filler loaded samples. The mechanical behaviour of the composites with particular emphasize on rigidity and fragility was investigated. We have found a concentration range, where both the electro-rotation and micro fabrication possibilities meet. It was found that the best mass ratio for FeO(OH) and gelatine is 2.67.

3. Achievements

We have presented the first experimental demonstration of the development of novel electroactive polymer composites and pure polymer which perform controllable rotation in uniform DC and AC electric fields.

4. Summaries and future plans

We plan to prepare electroactive polymers with different size and geometry and study their electrorotation characteristics. Based on our preliminary results, it is possible to prepare polymers without filler particles showing intensive electrorotation effect.

- 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. Zrinyi, M. Gadhvi, M. Nakano, T. Tsujita : Study on Mico-motor Utilizing Quincke Rotation of Novel Smart Polymers, *Proceedings of the Tenth International* Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp.132-133.
- [2] M. Zrinyi, M. Gadhvi, M. Nakano, T. Tsujita : Development of Micro-motor for MEMS Utilizing Novel Smart Polymer: II From Single Particle Rotation to Rotating Polymer Disk, *Proceedings of the Seventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, (2010), pp.284-285.

Project code	J10045
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2010 ~ March 2011

Viscosity Reduction of Complex Fluid with Suspended Particles

Masami Nakano*†, Rongjia Tao**††, Enpeng Du** *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 and bio-diesel fuels to improve the fuel injection. Small devices will be introduced just before the fuel injection for the diesel engine, producing strong electric field to reduce the fuel viscosity. It will result in much smaller fuel droplets in atomization and also lead to cleaner and more efficient combustion.

2. Details of program implement

The proposed project covers the following different aspects of rheology.

- (1) Development of a capillary-type rheometer with two metallic meshes as electrodes which produce strong electric field in testing fluids, in order to measure the viscosity reduction of various complex fluids with suspended particles.
- (2) Study the reducing viscosity of the various diesel and bio-diesel fuels under strong electric field by using the hand-made capillary rheometer.
- 3. Achievements

Here we extend the physics principle of reducing viscosity to refinery fuels. In fact, refinery fuels, such as diesel and bio-diesel fuels, are made of many different molecules, 75% small molecules and 25% large molecules. In addition, it contains other nano-particles such as sulfur. Therefore, diesel fuel can be regarded as a liquid suspension. Under a strong electric field, the large molecules aggregate into small clusters, yielding a lower viscosity. As the diesel fuel flows to pass the electric field, the suspended particles are polarized and aggregate into short chains, leading to a lower viscosity.

In order to do the test, we made a capillary-type rheometer as shown in Fig.1. Inside a container, we placed two metallic meshes to serve as electrodes. During the test, the device is placed vertically. Then we close the flow switch first and fill the container with testing fuel to cover the upper electrode mesh. After the fuel sits in the container still, we apply an electric field for a selected time interval, and then we turn off the electric field and open the switch to let fuel flow down along the capillary tube and measure the flow rate on an electric balance. The comparison of the flow rate determines the viscosity



Figure 1 : Developed capillary rheometer with two metallic mesh electrodes and measurement of flow rate.

For diesel with high sulfur level, application of an electric field of 1kV/mm for 2 seconds can produce significant viscosity reduction.



Figure 2 : Viscosity reduction of bio-diesel fuel by applying strong electric fields.

However, with ultra low sulfur diesel (ULSD), we have to apply much higher electric field. When we apply an electric field of 2 kV/mm for 5 seconds, the flow rate increased about 30%, indicating that the viscosity of treated diesel is reduced by about 30%. However, this viscosity reduction does not last very long. In about 4 minutes, the flow rate of treated diesel and untreated diesel become almost the same, indicating that the viscosity returns to the original value.

As seen in Fig.2, for a bio-diesel fuel with low sulfur level produced by Akita Bio Diesel Fuel Council, we have to apply a high electric field of 2 kV/mm for 11 seconds to increase the flow rate up to 26 %, indicating that the viscosity is reduced by about 26%. However, this viscosity reduction does not last very long. In about 20 minutes, the increase of the flow rate becomes about 10%.

4. Summaries and future plans

The ultra low sulfur diesel fuel's viscosity is reduced by about 30% by applying an electric field of 2 kV/mm for 5 seconds. However, this viscosity reduction does not last very long. In about 4 minutes, the viscosity returns to the original value. For a bio-diesel fuel, the viscosity is reduced to 26% by applying an electric field of 2 kV/mm for 11 seconds. This viscosity reduction lasts for 6 minutes, and becomes 10% in about 20 minutes.

In the next stage, we will apply this novel technology of reducing fuel viscosity to improve the fuel injection.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- *[1] R. Tao and M. Nakano: Viscosity Reduction of Diesel Fuel for Improving Fuel Atomization and Engine Efficiency, *Proceedings of the Tenth International* Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp.70-71.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J10046
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2010 ~ March 2011

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

> Julien Fontaine*†, Toshiyuki Takagi**†† Hiroyuki Miki**, Michel Belin*, Minoru Goto***, Koshi Adachi**** Takanori Takeno*****, Francisco Parazon*

1. Purpose of the project

Innovative Me-DLC films having good electrical conductivity, exhibiting low friction and wear characteristics and high durability under extreme environment – such as that for space applications – will be developed and characterized.

2. Details of program implement

The tribological behavior of optimum Cu-DLC coating has been investigated as a function of theoretical Hertz contact pressure and of environment, which both are known to strongly affect friction coefficient of pure DLC films. The transient evolutions are quite different between ambient air and ultra-high vacuum, with significantly higher transient friction in the latter case. Moreover, the behavior of this tribofilm seems to control the coefficient of friction. Indeed, under high contact pressure in ambient air, a lower coefficient of friction of about 0.13 is observed. SEM images of tribofilms are presented on figure 1 for ambient air experiments. These images clearly evidence a different evolution of the tribofilm: at low contact pressure, the tribofilm looks quite thick, with copper pads remaining within the apparent contact area. The latter reveals the ability of this tribofilm to be easily sheared, accounting thus for a lower coefficient of friction.



Fig. 1: SEM micrographs of tribofilms formed on steel balls after 2000 cycles of sliding against Cu-DLC nanocomposite coating under 0.5 (left) and 10 N load (right).

3. Achievements

Cu-DLC coatings don't exhibit very low friction coefficients, however they seem to be relatively insensitive to contact pressure and environment. The friction coefficients seem to be controlled by metal-rich tribofilm grown on the steel counterface.

4. Summaries and future plans

Based on previous results, we continue the study of these Metal/DLC nanocomposite films. In order to control the friction coefficient with these materials, the choice of the metal has been considered as critical. Nevertheless, the deposition rates of metals vary quite significantly, and growth conditions for the DLC phase must be adjusted in order to keep a small size and quantity for the metal inclusions. Pure and metal-containing DLC will be deposited at IFS with and without underlayers and characterized for optimization and the tribological behavior of the best films will be further studied in various environments and load conditions.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [1] H. Miki, T. Sugawara, M. Ruet, K. Ito, T. Takeno, J. Fontaine, M. Belin, T. Takagi: Tribological behaviour of nanocluster silicon-containing diamond-like carbon coatings under different load conditions, 5th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials, NANOSMAT-5, (2010), CD-ROM.
- *[2] T. Takeno, J. Fontaine, M. Goto, M. Ruet, T. Le. Mogne, H. Miki, T. Takagi, M. Belin: Tribological behavior of Cu-DLC nanocomposite coatings in ultra-high vacuum, 5th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials, NANOSMAT-5, (2010), CD-ROM.
- *[3] Julien Fontaine, Michel Belin, Toshiyuki Takagi, Hiroyuki Miki, Koushi Adachi, Takanori Takeno, Minoru Goto, Kousuke Ito: Triboloical Behavior and Electrical Contact Resistance of Metal-Containing DLC Coating for electrically Conductive Tribo-Elements, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 106-107.
 - [4] F. Palazon, T. Takeno, H. Miki, T. Takagi: Evaluation of adhesive strength of tungsten-containing diamond-like carbon films On NiTi shape memory alloy using film-cracking technique, *Proceedings of Seventh International Conference on Flow Dynamics*, Sendai, 2010.11.2, pp.530-531.
- Patent, award, press release etc. (Award)
 - [5] Best Award, "Evaluation of adhesive strength of tungsten-containing diamond-like carbon films on NiTi shape memory alloy using film-cracking technique", F. Palazon, T. Takeno, H. Miki, T. Takagi, The sixth international students/young birds seminar on multi-scale flow dynamics in the seventh international conference on flow dynamics, 2010.11.2.

Project code	J10047
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2010 ~ March 2011

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

Pei-Si Le*, Zhi-Bin Wang*, He-Ping Li*†, Cheng-Yu Bao*, H. Takana**††, and H. Nishiyama** *Department of Engineering Physics, Tsinghua University **Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

The purpose of this project is (i) to clarify the effect of various kinds of discharge modes on the plasma flow characteristics with the consideration of chemical reactions; and (ii) to explain the innovative applications to combustion enhancement, decomposition of exhaust gas and polluted water and the biological effects by enhancing the chemical reactions.

2. Details of program implement

In this research, the innovative discharge modeling of the RF APGD with the integration of kinetic model and fluid model has been developed in order to reveal the complex physical-chemical processes in an APGD plasma source.

For a radio-frequency, atmospheric-pressure glow discharge produced by a planar-type plasma generator, the discharges region can be divided into two sub-regions along the direction normal to the electrode, i.e., the sheath (Reg. #1) and the quasi-charge-neutrality (Reg. #2) sub-regions, as shown in Fig. 1.



Figure 1: Schematic diagram of a RF APGD.



Figure 2: Spatial profiles of the time-averaged number densities of net charges, electrons, ions, and electron energy.

The assumptions used in this hybrid model are as follows: (1) although macroscopic gas flow exists in the discharge region, the influence of the gas flow on the sheath behavior can be neglected, i.e., the coupling between the sheath and the quasi-charge-neutrality sub-regions is one-way; (2) inside the sheath (Reg. #1), all the chemical reactions [1] are considered, and the plasma is in non-local chemical and thermodynamic equilibrium (Non-LCE/LTE) state with deviations from charge neutrality condition; (3) in the quasi-charge-neutrality sub-region (Reg. #2), only

three species (electrons, ions and atoms) are involved, and the plasma is in LCE state but deviates from LTE state with the consideration of the gas flows.

Based on the preceding assumptions, the kinetic model and two-temperature fluid model are models employed Reg. #1 and Reg. #2, respectively. In this research, the physical parameters inside the sheath are clarified in detail, in order to decide the boundary conditions for the fluid modeling in Reg. #2., as the first step.

Based on the preceding 1-D kinetic model, the calculated time-averaged spatial distribution of the number density of the net charges is shown in Figure 2(a), where the two dashed lines represent the sheath edge, which is defined as the position where the following relationship is satisfied, i.e., $n_{net} \leq 0.1 \max(n_{net})_j$, where n_{net} is the local number density of the net charges, while $\max(n_{net})$ is the maximum value of nnet throughout the discharge space. Thus, the predicted sheath thickness is $d_s=0.56$ mm. The corresponding values used as the boundary conditions for the 2-D fluid model can be obtained from the 1-D kinetic simulation. The time-averaged spatial distributions of the number densities of the electrons, ions and the electron energy are shown in Figure 2(b). It can be seen that the number density of ions is higher than that of the electrons at the vicinity of the electrodes, while they are almost equal in the quasi-charge-neutrality sub-region. And the electron energy in the sheath region is also much higher than that in the quasi-charge-neutrality sub-region, as shown in Figure 2(b).

3. Achievements

Establishing a simplified kinetic-fluid model for simulating the time-averaged, thermodynamic and chemical non-equilibrium features occurring in an atmospheric-pressure glow discharge system.

4. Summaries and future plans

From April, 2010 to March, 2011, we have established the physical-mathematical models for the kinetic and fluid simulations in the plasma sheath and flow-affected regions, especially the inner boundary conditions at the sheath-plasma interface; and obtained the 1-D kinetic modeling of the plasma sheath. At the present time, we are doing the integrated modeling with the consideration of the sheath-bulk region coupling, as well as the corresponding experimental measurements.

- 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] Pei-Si Le, Zhi-Bin Wang, He-Ping Li, Cheng-Yu Bao, Hidemasa Takana, and Hideya Nishiyama: Simulations on a Radio-Frequency, Atmospheric-Pressure Glow Discharge Using an Integrated Kinetic-Fluid Model, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 142-143.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

Project code	J10048
Classification	General collaborative research
Subject area	Fundamentals
Research period	April 2010 ~ March 2011

Development of 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 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 the number of quasiparticles can be significantly reduced having the distribution function 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

A new development of Kinetic Force Method application for modeling rarefied gas flows was suggested. It is founded on a new kinetic equation for auxiliary two-particle distribution function of quasiparticle pairs. One-particle distribution function satisfying the classical Boltzmann equation can be obtained from the auxiliary distribution function by a simple integration. The using of quasiparticle pairs instead of single ones guarantees energy and momentum conservation in the course of the rarefied gas flows modeling automatically. Comparison of the results obtained by Kinetic Force Method and DSMC method is carried out on the examples of the homogeneous relaxation to the equilibrium and the vacuum pump micro flows simulations. The vacuum pump consists of two horizontal plates: one semi-infinite plate is disposed above another infinite plate on the distance h. The lower infinite plate is moving with the speed u = 10 m/s in the right direction. Figures 1(a) and (b) present the evolution of the distribution function $f(v_x)$ to equilibrium obtained by DSMC Method and by Kinetic Force Method. Figures 2(a) and (b) present the results of numerical simulations of the air pressure and number density in the vacuum pump obtained by DSMC Method and by Kinetic Force Method. These results are coinciding well enough.



Figure 1. Homogeneous relaxation of hard sphere molecules mixture having two different temperatures in the initial moment. The velocity distribution functions at the times (t = 0.0, 2.0, 4.0, ...) obtained by (a) DSMC and (b) by Kinetic Force Method.



Figure 2. The averaged over (a) pressure and (b) number density along the channel . Solid lines are obtained by DSMC Method; Dotted lines are obtained by Kinetic Force Method. The Knudsen number $Kn = \lambda / h = 0.1$.

3. Achievements

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

4. Summaries and future plans

The improvement of Kinetic Force Method on the bases of a new two particles kinetic equation have been developed. In the future we will do:

1. Further theoretical substantiation of the Kinetic Force Method for 2D/3D numerical simulations of rarefied gas flows.

2. The further development and testing of the algorithm.

3. We will perform the DSMC simulations of the same problems to compare with the Kinetic Force Method. We will feedback results and improve the Kinetic Force Method.

- 5. Research results (* reprint included)
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper) Not applicable.
- International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- V. L. Saveliev, Kinetic Equation for Two-Particle Distribution Function in Boltzmann Gas Mixtures and Equation of Motion for Quasiparticle Pairs, *Book of Abstracts of 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Pacific Grove, California, USA, (2010), p. RGD 224.
- [2] V. L. Saveliev, S. A. Filko, K. Tomarikawa and S. Yonemura, Kinetic Force Method with Quasiparticle Pairs for Numerical Modeling 3D Rarefied Gas Flows, *Book of Abstracts of 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Pacific Grove, California, USA, (2010), p. RGD 227.
- *[3] V. L. Saveliev, S. A. Filko, K. Tomarikawa, S. Yonemura, Kinetic Force Method with Quasiparticle Pairs for Numerical Modeling Micro Gas Flow in a Vacuum Pump, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.154-155.
- 3) Patent, award, press release etc. Not applicable.
| Project code | J10049 |
|-----------------|--------------------------------|
| Classification | General collaborative research |
| Subject area | Energy |
| Research period | April 2010 ~ March 2011 |

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

Jiří Jeništa*†, Hidemasa Takana**, Hideya Nishiyama**††, Milan Hrabovský*, Tetyana Kavka* *Institute of Plasma Physics ASCR, v.v.i., Czech Republic **Institute of Fluid Science, Tohoku University

†Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Numerical parametric study of the hybrid-stabilized argon-water electric arc under subsonic, transonic and supersonic regimes. Investigation of characteristics and processes in the hybrid arc with the assumption of homogeneous and non-homogeneous mixing of plasma species within the arc discharge. A detailed comparison of the calculated results with experiments.

2. Details of program implement

Further calculations and a numerical study of processes in the hybrid-stabilized electric arc have been carried out:

1) calculation for the assumption of laminar flow regime have been performed using the present numerical model for 300-600 A and 27.5 and 32.5 standard liters per minute (slm) of argon;

2) modification of our former numerical model, based on the SIMPLER iteration procedure with the 1^{st} -order upwind. Calculations for the laminar model have been carried out for currents 300 - 600 A with 22.5-40 slm of argon.



Figure 1: Electric potential drop (V) within the discharge chamber as a function of arc current and argon mass flow rate. Calculation by the former model based on the SIMPLER iteration procedure (left), by the LU-SGS algorithm (middle), and the relative difference between these two calculations (right). Partial characteristics method for radiation is used.

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

1) it was proved that the high-resolution numerical method (LU-SGS) provides somewhat different temperature distribution within the discharge chamber, compared to our former method (SIMPLER). In consequence, the electric potential drop in the discharge region, arc efficiency and reabsorption of radiation differ in both methods. Nevertheless the radial profiles of temperature, velocity and the Mach number at the exit nozzle position are less influenced by different temperatures inside the discharge chamber.

2) The relative difference for temperature and velocity between the laminar and turbulent flow regimes at the nozzle exit are below 7 %, however, the difference for the partial characteristics method is much lower then for the net emission coefficients one. The exact reason for this behavior remains unknown for now.

4. Summaries and future plans

The present numerical model built up in the framework of the current project proves to be an efficient tool for solving compressible and turbulent plasma flow.

Future plans include:

Clarification of small differences between turbulent and laminar flow regimes, mixing of plasma species within the hybrid arc discharge by the binary diffusion coefficients for three species (hydrogen, argon and oxygen), and elaboration and improvements of the existing numerical model.

5. Research results (* reprint included)

- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- *[1] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlová, V. Aubrecht, P. Křenek, V. Sember and A. Mašláni: A comparative numerical study of hybrid-stabilized argon-water electric arc, *Computer Physics Communications* (2011), doi:10.1016/ j.cpc.2011.01.006.
- [2] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlová, V. Aubrecht, P. Křenek, M. Hrabovský, T. Kavka, V. Sember, A. Mašláni: Numerical Investigation of Hybrid-Stabilized Argon-Water Electric Arc Used for Biomass Gasification, (in press, accepted for publication in the electronic open-access book) *Remote Sensing of Biomass: Principles and Applications / Book 3*, ISBN 978-953-307-491-7.
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc. (included international conference without peer review)
- [3] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlova, V. Aubrecht, P. Křenek, M. Hrabovsky, T. Kavka, V. Sember, A. Mašlani: Integrated Parametric Study of Hybrid-stabilized Argon-water Arc Under Subsonic and Supersonic Regimes, *Metacentrum Yearbook 2009* (ISBN 978-80-904173-7-3), (2010), pp. 53-60.
- [4] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama, M. Bartlová, V. Aubrecht, P. Křenek, M. Hrabovský, T. Kavka, V. Sember, A. Mašláni: A comparative numerical study of hybrid-stabilized argon-water electric arc, *CCP 2010 Abstracts (Conference on Computational Physics)*, Trondheim, Norway, (2010), pp. 350-351.
- *[5] J. Jeništa, H. Takana, H. Nishiyama. M. Hrabovský: Investigation of Supersonic Hybrid-Stabilized Argon-Water Arc for Biomass Gasification: A Comparative Numerical Study, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp.54-55.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J10050
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2010/4/1~2011/3/31

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

共同研究における流体研の技術により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て、高い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、その機能性を引き出す ため、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、多入力のデバイスが作製で きることである.加えて、このデバイス構成では、多数のナノディスクを用いるので、多数 の出力端子を取り付けることができる.それぞれの出力は、異なったディスクに取り付けら

れるので、ある程度独立性を 持った出力が得られる.

この構造のデバイスは、多 数の入力と多数の出力を取 り付けることが可能なこと で, 高機能動作が期待される. このとき、一部の入力ゲート は機能を決定する制御ゲー トとして用いる. これらの制 御ゲート、入力ゲートの 電圧 に対し,特性が複雑に変化す るために、どのような機能が 得られるかを知ることが重 - 18 要になる.本研究では、多数・ の入力と出力を有するナノ 216 ディスクアレイデバイスの 特性を簡単に予測する評価 手法について検討した.

ここでは,図1に示すよう な,SOI 基板の上にドットア



図 1 試作したナノドットアレイデバイス模式図





レイをパターン依存酸化法という手法で作製し、その上にアレイを半分覆うように1つの下 層ゲートを取り付けた. 図示していないが、その上にデバイス全体を覆うように上層ゲート を配置した. そして SOI 基板の Si 層をバックゲートとして用いた. 本来は、より複雑なゲ ート配置で行うことが高い機能を得るうえで、効果的であるが、ここでは、もっとも単純な ゲート配置を用いている. すなわち、このゲート配置で、機能性が得られるのであれば、よ り複雑な構造を用いればより高い昨日が得られることになる.

測定温度は 8K, 電圧は、ドレイン電圧 V_d=5mV, 基板(制御ゲートとして用いる) 電圧 V_{bg}=0V とした. 図 2 は、上層ゲート電圧 V_{tg} と下層ゲート電圧 V_{lg}を変えながら Source1 と Source2 に流れる電流 l_{s1}, l_{s2}を測定し、V_{tg}、V_{lg}に対して、それぞれ等高線図に表したも のである. 黒色が 1pA 以下、灰色が 1pA から 5pA, 白色が 5pA 以上の電流領域を示す. 2 つの入力ゲート電圧として V_{tg} が low: 3.7V, high: 3.85V, V_{lg} が low: 1.6V, high: 1.9V を用 いた. それを図 2 に白黒の点で表示した. ls1 が AND を、l_{s2}が XOR を出力し半加算器と して動作できる. 半加算器は、通常のトランジスタを用いると、最低でも 12 個は必要とな る回路であるので、これを 1 つのデバイスで実現できたことになる.

3. 研究目標の達成状況

2入力,2出力のナノディスクアレイデバイスを試作し,加算器という,論理演算回路としては最も重要な回路として動作することを示した.

4. まとめと今後の課題

今後ナノドットの作成技術が向上した場合を想定して、低消費電力性に加えて要求される 高速性への対応など、より高い機能性を求めて、ナノドットの特性評価法の構築と、新たな 機能性の導出の検討が必要となってくる.

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] 高橋庸夫(分担執筆): 単電子デバイス, 越田監修「ナノシリコンの最新技術と応用展開」, pp. 81-92, (ISBN: 978-4-7813-0204-1, シーエムシー出版: 2010.6.25).
- [2] 高橋庸夫(分担執筆):総説:単電子トランジスタの開発の最新動向と課題,「量子ドットエレクトロニクスの最前線」, pp. 377-388, (ISBN: 978-4-86043-376-5, (㈱エヌ・ティー・エス: 2011.3.25).
- [3] Mingyu Jo, et. al: Fabrication of double-dot single-electron transistor in silicon nanowire, *Thin Solid Films,* Vol. 518, (2010), pp.S186-S189.
- [4] S. J. Shin, et. al: Si-based ultrasmall multiswitching single-electron transistor operating at room-temperature, *Applied Physics Letters*, Vol. 97, (2010), pp.103101 (3 pages).
- *[5] Y. Takahashi, et. al: Si Nanodot Device Fabricated by Thermal Oxidation and Their Applications, *Key Engineering Materials*, Vol. 470, (2011), pp.175-183.
- [6] Y. Kato, et. al: Analysis of Tunneling Potential of Si SETs Fabricated by Pattern Dependent Oxidation, 2010 Silicon Nanoelectronics Workshop, pp. 171-172 (2010.6, 13-14, Hawaii).
- 他 合計13件
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

16 件

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

```
なし
```

課題番号	J10051
区分	一般共同研究
課題分野	ナノマイクロ分野
研究期間	2010.4.1 ~2011.3.31

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

山下一郎*†,寒川誠二**†† *奈良先端科学技術大学院大学,**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を目指し、これまで量子井戸となるシリコンナノディスクの作成研究を行い、量子閉じ込めの確認ができるようになって来た.本研究では、蛋白質により合成され自己組織化能により二次元に規則配置された金属微粒子をマスクとした中性粒子ビームによる厚さ数 nmのナノディスクの損傷フリー超高精度加工技術を最適化することで、単独の量子井戸では実現できない、ナノディスクアレイの新規電子構造、ミニバンド、単電子トランジスタの実現をすることを目的とする.

2. 研究成果の内容

球殻状タンパク質フェリチンの内部で酸化鉄ナノ粒子を合成し、タンパク質の外表面を遺伝 子的に改変することと、シリコン基板の最上面の酸化シリコン層を中性粒子ビームにより酸化し て親水性を高めることで,このコア内包フェリチンを基板上に2次元稿密度配置した.その後タ ンパク質を選択除去し、12nm周期の直径約6nmの均一なナノドット配列をシリコン基板上に得 ることに成功した(図1参照). 基板はシリコン薄層を挟んだ酸化シリコンで,このナノドット配列 をマスクとして高精度中性粒子ビームエッチングを行った.またフェリチンの疎水性アミノ酸領 域を制御した変異体フェリチンを作製し,同様のシリコン基板に,周期性の高い2次元配列の 作製も可能になった. (図2参照)これにより, ばらつきの少ないナノディスクが作製でき, 横方 向の電子相互作用(ミニバンド)を期待できる構造が実現している. 現在ミニバンドの形成を確 認すべく詳細に検討を開始しており,23年度には確認ができるものと期待している.また今年 度は単に2次元にナノディスクを作製するだけでなく3次元,立体的なナノディスクの配置を実 現するため,酸化シリコンで挟んだ2層のシリコン薄層をフェリチンコアをマスクとしてエッチン グし, 積層されたシリコンナノディスクを作製することに成功した(図3). この2層ナノディスクの トップとぼっと無の間に電圧を印加して電圧一電流特性を測定したところ良好な量子効果特 性(クーロンステアケース)が測定でき、量子効果素子として利用できることが示された.これに より、バイオテンプレートと中性粒子ビーム極限加工エッチングによる構造制御マルチディスクが 2次元だけでなく3次元方向にも作製できることが示された.



図1. 中性粒子ビーム酸化による2次元配列



図2. 遺伝子改変フェリチンによる2次元配列 (疎水性部位改変フェリチン)





図3. バイオテンプレートで作成された2層ナノディスク

研究目標の達成状況

図4.2層ナノティスクの良好な量子電 気特性(クーロンステアケース)

今年度は良好な量子効果を持つシリコンナノディスクを再現性良く作製できるようになった. これは量子効果半導体デバイスの基本的問題を解決したといえる. さらには 3 次元方向の積 層も実現された. これらのことから良好な電圧-電流特性から推測するに、ミニバンドの形成や 再現性の良いマルチディスク単電子単電子トランジスタの実現が期待できる.

4. まとめと今後の課題

22年度までに良好な量子井戸であるシリコンナノディスクを2次元,3次元で制御して作製 する手法を確立した.23年度はこの制御されて配置された量子井戸の近接効果である電子 ミニバンドの形成を確認し,再現性の良い,実用的な単電子トランジスタの作製につなげる.

研究成果(*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] B. Zheng, N. Zettsu, M. Fukuta, M. Uenuma, T. Hashimoto, K. Gamo, Y. Uraoka, I. Yamashita and H. Watanabe: Versatile protein-based bifunctional nano-systems (encapsulation and directed assembly): Selective nanoscale positioning of gold nanoparticle-viral protein hybrids, *Chem. Phys. Lett.*, 506, (2011), pp.76–80.
- [2] C. H. Huang, X Y. Wang, M. Igarashi, A. Murayama, Y. Okada, I. Yamashita and S. Samukawa: Optical absorption characteristic of highly ordered and dense two-dimensional array of silicon nanodiscs, *Nanotechnology*, 22, (2011), pp.05301.
- [3] M. Igarashi, R. Tsukamoto, C-H Huang, I. Yamashita, and S. Samukawa: Direct Fabrication of Uniform and High Density Sub-10-nm Etching Mask Using Ferritin Molecules on Si and GaAs Surface for Actual Quantum-Dot Superlattice, *Appl. Phys. Express*, 4, (2011), pp.015202.
- [4] M. Okuda, Y. Suzumoto, K. Iwahori, S. Kang, M. Uchida, T. Douglas and Ichiro Yamashita: Bio-templated CdSe nanoparticle synthesis in a cage shaped protein, *Listeria*-Dps, and their two dimensional ordered array self-assembly, *Chem. Commun.*, 46, (2010), pp.8797-8799.
- [5] B. Zheng, M. Uenuma, Y. Uraoka, I. Yamashita: Construction of ferritin dimer by breaking its symmetry, *Nanotechnology*, 21, (2010), pp.045305.
- [6] C. H. Huang, M. Igarashi, S. Horita, M. Takeguchi, Y. Uraoka, T. Fuyuki, I. Yamashita, and S. Samukawa: Novel Si Nanodisk Fabricated by Biotemplate and Defect-Free Neutral Beam Etching for Solar Cell Application, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 49, (2010), pp.04DL16.

- [7] I. Yamashita: Bio Nano Process: A new nanodevice fabrication process by biomineralization and protein self-organization, *Material Research Society 2010*, Boston, (2010).
- [8] I. Yamashita: Wet nanotechnology: Wet nanotechnology: making functional nanostructures by proteins, *Pacifichem 2010*, Hawaii, (2010).
- [9] 山下一郎、「ナノワールドで活用されるバイオ分子」(2011年春季応用物理学関係連合後援会、 東京で開催予定が中止となり、講演予稿集で発表).
- *[10] R. Tsukamoto, I. Yamashita, S. Samukawa: Self-assembled bio-conjugates nano-masks for sub-10nm ultra-fine nano-etching, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 130-131.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J10052
区分	一般共同研究
課題分野	ナノ・マイクロ分野
研究期間	2010.4~2011.3

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*** *東北大学流体科学研究所, **九州工業大学工学研究院 ***信州大学工学部 †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

水素は次世代のエネルギー源として非常に期待されており、特に液体水素のナノスケールでの熱・輸送物性値の予測は工学的にも非常に重要である.しかし水素は低温になると、ド・ブロイの熱的波長が広がるという量子性の影響が現れるため、通常の古典的な取り扱いが難しい.本研究ではこの水素の熱・輸送物性を、量子効果を取り込んだ分子動力学法により解析し、量子効果がナノスケールでの液体水素の熱・輸送物性に与える影響を解明することを目的としている.特にH22年度は従来のMD法を用いて低温水素の熱物性評価を行う事で、その適用限界と水素の量子性が熱物性に与える影響を明らかにすることを目的とした.一方、量子効果とは別の理由により、水素の臨界点近傍での物性推算精度が特に良くないこともわかってきている.そこで、臨界点近傍での推算精度の改良を目的とした試行計算も実施した.

2. 研究成果の内容

これまで私たちのグループは三つの代表的なポテンシャ ルを用いて従来のMD法による低温水素の熱物性評価を行 ってきたが,H22年度はさらに詳細な解析を行うため,高 精度の分子軌道計算より導出したポテンシャルを用いて低 温水素の熱物性評価を行った.図1に高精度のポテンシャ ルを用いて得られた低温水素の飽和線を臨界点で無次元化 した図を示す.この図より高精度のポテンシャルと

Lennard-Jones(LJ)ポテンシャルは同じ傾向を示しており,実 験値を再現出来ていない事が分かる.これより,低温水素 の熱物性に与える分子間ポテンシャルの定性的影響は小さ



Fig 1. Saturation lines for some fluids.

く,高密度領域で低温水素の熱物性を再現出来ない要因は分子間ポテンシャルモデルではない事 が明らかとなった.さらに量子性の影響が大きい液体ほど飽和領域が狭くなっている事より,高 密度領域で水素の熱物性を再現できない要因は,量子性の影響であると考えられる.

一方で、上記のように実験結果との不一致が顕在化する別の原因の一つとして、臨界点近傍に おける物性推算精度がよくないことが挙げられる.これは、臨界点近傍では密度ゆらぎに起因す る相関長が極めて大きくなるため、一般の MD で設けられる 1,000 分子程度の計算領域や小スケ ールのカットオフ距離では誤差が大きくなるからである.しかしながら、既往の研究では特に後 者(カットオフ距離)の影響がよくわかっていないため、その影響度の抽出を目的とした解析を 実施した.その結果、臨界点近傍の熱物性推算においては、従来から指摘されている計算領域の 影響だけでなく、カットオフ距離に対する依存性も非常に大きく、かつ一般に MD 計算で適用される遠距離補正も有効ではないことがわかった.

3. 研究目標の達成状況

分子軌道計算より導出した高精度の分子間ポテンシャルを用いて低温水素の熱物性評価を行った事で、分子間ポテンシャルモデルの影響は小さい事が明らかとなり、従来の MD 法の適用 限界は明確に示された.これより液体水素のナノスケールでの熱流動解析には、水素の量子性 を考慮した手法が必須である事が明確となり、研究目標は順調に達成されていると考えられる. 現在は水素の量子性を考慮した手法について調べている段階である.

また、臨界点近傍における正確な物性推算には、計算領域に対する依存性だけでなく、カットオフ距離に対する依存性も正しく考慮しなければならないことがわかった. そのため、計算 領域依存性とカットオフ距離依存性の双方に対する影響を定量的に明らかにすることが、次の ステップとなっている.

4. まとめと今後の課題

H22 年度の研究により,液体水素のナノスケールの熱流動解析に対する従来の MD 法の適用 限界が明確になった.これより,今後は水素の量子性を考慮した手法を用いて解析を行う事で, 水素の量子性が熱流動特性に与える影響を調べる必要があり,今後の課題である.

また、臨界点近傍の物性推算結果には、計算領域の大きさだけでなく、カットオフ距離に対 する影響が顕著に表れることがわかった。今後は計算領域やカットオフ距離に対する依存性を 定量的に明らかにするために、超大規模計算の実施(1億分子程度の計算)も視野に入れて解析 を進める必要がある。

5. 研究成果

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし

- H. Nagashima, T. Tokumasu, S. Tsuda, N. Tsuboi, M. Koshi A. K. Hayashi, The Molecular Simulation of Cryogenic Hydrogen using Classical Method, *21st IUPAC ICCT*, (2010), TS-3200-1740.
- *[2] H. Nagashima, T. Tokumasu, S. Tsuda, N. Tsuboi, A. Hayashi: A Molecular Study on the thermodynamic properties of cryogenic hydrogen, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 112-113.
- *[3] 永島浩樹, 徳増崇, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 低温水素の熱物性に対する分子間 ポテンシャルモデルの影響, 日本機械学会 2010 年度年次大会, (2010), pp. 89-90.
- [4] 永島浩樹, 徳増崇, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 低温水素の分子シミュレーション に対する古典的手法のアプローチ限界, 第88期日本機械学会流体工学部門講演会, (2010), pp. 115-116.
- [5] 永島浩樹, 徳増崇, 津田伸一, 坪井伸幸, 越光男, 林光一, 古典的分子シミュレーションを用いた低温水素の熱物性評価の限界, 日本航空宇宙学会北部支部 2011 年講演会, (2011), pp. 215-218.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

課題番号	J10053
区分	一般共同研究
課題分野	④ナノ・マイクロ分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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

德增 崇*†, 三好 信哉**, 杵淵 郁也**††,
*東北大学流体科学研究所, **東京大学大学院工学系研究科
*申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

ミクロスケールの熱流動,反応等の現象は,固体壁面や膜近傍など界面近傍における分子の挙 動の影響を強く受ける.したがって分子レベルの挙動を制御することでバルクでは実現できない 流体,イオン輸送特性を発現する新たなデバイスの創成が期待されている.ナノスケールの空間 におけるイオン輸送現象の一例として,固体高分子型燃料電池に用いる電極・膜接合体(MEA: Membrane Electrode Assembly)でのプロトン輸送が挙げられる. MEA を構成する高分子膜内に おけるプロトン輸送特性が電池の性能を大きく左右する.界面近傍でのプロトン輸送はその他 様々なデバイスに関連した現象であり,技術革新の足がかりとして,分子レベルでの輸送特性の 解明が求められている.水溶液中におけるプロトンは通常の拡散機構に加え,隣り合う水分子の 水素結合の間でプロトンを受け渡しする Grotthuss 機構によって輸送されることから,他のイオ ンと比較し高い輸送特性を示すことが知られている.一方,界面近傍でのプロトン輸送に関して は、シリカ表面近傍に構造化された水分子のネットワークにおいて,プロトン輸送現象を実験 によって十分な時空間分解能で計測することは困難が多く,分子スケールの解明すべき点が数多 く残されている.そこで本研究は、分子動力学法を用いて,界面近傍で構造化された水分子ネッ トワークにおけるプロトン輸送特性を解明することを目的とする.

2. 研究成果の内容

本研究は古典分子動力学シミュレーションを用いて、界面近傍において構造化された水分子ネ ットワーク内でのプロトン輸送現象の解明を目指している. プロトン輸送は化学反応の一つであ り、古典 MD シミュレーション上に再現するために Empirical Valence Bond (EVB) 法を使用し た. 固体表面には実験において多くの知見が得られている親水性のシリカを採用した. 界面の影 響を評価するために、バルクと界面近傍双方の計算系を構築し、シミュレーション結果の比較を 行った. まず動的特性の調査を行い、界面近傍で構造化された水分子ネットワークにおいて、プ ロトン輸送の大きな特徴である Grotthuss 機構が数倍程度、促進されることが確認された(図 1). また平均二乗変位を測定し、Grotthuss 機構の促進により、壁面と平行な方向の拡散係数(輸送特 性)が向上する結果が得られた. ホッピング頻度の温度依存性を調査し、活性化エネルギーを求め た. バルクでは 2.0 kcal / mol であった活性化エネルギーは、界面近傍では 1.4 kcal / mol に減少 した. 次に界面近傍で構造化された領域における静的構造の評価を行った. 壁面法線方向の水、 オキソニウムイオンの密度分布や動径分布を測定した. 水分子は壁面の影響を受け、準離散的な 層構造をとり、オキソニウムイオンは親水性界面に局在化することが確認された. 最後にオキソ ニウムイオン周りの水分子の構造を評価するために 2 次元動径分布を測定した. 壁面近傍ほどバ ルクとの差異が大きくなり、構造化の影響が顕著になることが確認された.



図1:プロトンホッピング回数の比較

昨年度は計算系の構築と、重要な要素の抽出を行った.実験で報告されている界面近傍でのプロトンホッピン促進が分子シミュレーションからも確認することができた.また、界面近傍での水素結合ネットワーク内では、Grotthuss 機構の促進が輸送特性の向上に結び付くことが示された.構造の評価から、界面近傍ではプロトン周囲の水素結合のネットワーク構造がバルクとは大きく異なることが分かった. これらの結果から、界面近傍における静的な構造の変化はGrotthuss 機構に大きく寄与していると考えられる.

4. まとめと今後の課題

界面近傍でのプロトン輸送に関する分子動力学シミュレーションを行った結果,界面近傍では プロトンホッピングが促進され,輸送特性が向上することが確認された.これらの性質には水素 結合ネットワーク構造が大きな影響を与えていると考えられ,今後より詳細な調査を行っていき たい.また輸送特性の定量性に関しては,再現できていないことから,プロトンホッピングモデ ルの改善も重要であると考えている.今後は様々な表面近傍でのシミュレーションを行い,プロ トン輸送メカニズムの解明を行う予定である.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[1] N. Miyoshi, I. Kinefuchi, T. Tokumasu, S. Takagi, Y. Matsumoto: Proton Transport in Hydrogen Bond Network of Confined Water, *Proceedings of the Tenth International* Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 108-109.
- *[2] 三好 信哉: 水分子ネットワーク構造におけるプロトン輸送特性の解明, 第二回マイクロ・ナ ノ工学シンポジウム, 松江, (2010), pp. 87-88.
- [3] 三好 信哉:水分子ネットワーク構造におけるプロトン輸送特性の解明,日本機械学会流体 部門講演会,山形大学工学部,(2010), pp.99-100.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

Project code	J10054
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2010 ~ March 2011

Nano-Scale Modeling of Confined Liquid Films and Bridges

Takashi Tokumasu*†, Philippe Vergne**†† Hassan Berro**, Marie-Helene Meurisse**, Nicolas Fillot** *Institute of Fluid Science, Tohoku University, **LaMCoS, INSA-Lyon †Applicant, ††non-IFS responsible member

1. Purpose of the project

In lubricated contacts, when the lubricant supply can be insufficient to fill the gap between the solid surfaces, or when the wettability conditions are bad, the film can fractionate into disjointed liquid bridges. This phenomenon occurs at many places in practical applications. The analysis of the liquid bridge lubrication phenomena is thus very important. Especially, if the width of liquid bridge, or the gap between surfaces, is of nanometer scale, interfacial effects cannot be neglected and therefore the response of the liquid bridge cannot be analyzed from a macroscopic basis.

Similarly in molecular lubrication problems, lubricants are confined to molecular scale thicknesses. Experiments have shown that in such confinements the structure and dynamics of lubricants are greatly influenced by the nature of the confining surfaces. The well-organized surface structure is reflected, through the interfacial interactions, by a set of potential valleys that lubricant molecules are attracted to occupy. Any surface, no matter how geometrically smooth, manifests a sort of a foot-print over the neighboring lubricant layers.

The aim of our research is to investigate the dynamic behavior of liquid bridges and to analyze the effect of surface interaction on the lubrication phenomena by the Molecular Dynamics method.

2. Details of program implement

In this year, two Si walls were excluded from the simulation system and the simulation system is simplified. The system is shown in Fig. 1. Momentum flux was generated in a liquid bridge by controlling the velocity of a part of the liquid bridge. Using the velocity gradient of the liquid bridge and the momentum flux, viscosity coefficients of the liquid bridge were obtained. We analyze the dependence of the width of the liquid



Fig. 1 : Schematic Diagram of Simulation

bridge on the viscosity coefficient and the differences of the viscosity coefficients between liquid bridges and bulk water were confirmed. The results showed that when the width of liquid bridge decreases, the viscosity coefficient of the liquid bridge decreases because the effect of the interfacial region is relatively large. Next the flux is divided into those in bulk region and interfacial region. The results showed that the viscosity coefficient in interfacial region is 1/3 of that of liquid water. On the other hand, a simple method to quantify interfacial effects was proposed. It is inspired by the need for quantitative measurements of adsorption and corrugation potentials. A surface interaction energy scanning method was introduced which allows characterizing and comparing the adsorption and corrugation potentials of different surface types. The method was applied to five realistic surfaces with different densities, crystalline structures, and interaction parameters. The results showed that some surfaces may have a strong adsorption potential with small corrugation and vice-versa (Figure 2).



Fig. 2 : Adsorption and corrugation parameters for five different surfaces determined using the surface scanning procedure. The results are sorted from left to right in the descending order of adsorption.

3. Achievements

In this year we analyzed the dependence of the width of the liquid bridge on the viscosity coefficient in detail. Moreover, we completed to make the simulation program to analyze the momentum transfer in bulk region and interfacial region. On the other hand, we succeeded to evaluate the adsorption and corrugation potential of a surface. We think the goal of this year was achieved.

4. Summaries and future plans

Next year we will introduce the Leeds-Edward method to accelerate the program and make the large scale - large step simulations possible. Moreover, we will analyze the relation between the viscosity coefficient and the radial distribution function in bulk and interfacial region. Moreover, there is a clear need to improve both the determination of the Lennard Jones potential between fluids and solids, the kappa value and thus to become able to model metal to metal contact and wear in the future. Similarly we are interested in generalizing the concepts based on absorption & corrugation components to other lattices, probably would require the redefinition of the corrugation potential (commensurability).

- 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, H. Berro, M.-H. Meurisse, N. Fillot and P. Vergne: Molecular Analysis of Momentum Transport Phenomena in a Nanoscale Liquid Bridge, *Proc. Mechanical Engineering Congress*, 2010 Japan (MECJ-10), pp.77-78 (in Japanese).
- *[2] Berro H., Tokumasu T., Ohara T., Kikugawa G., Fillot N. and Vergne P., Assessment of different thermostating techniques in the simulation of molecular lubrication, *Proceedings of the 10th Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 128-129.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J10055
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2010.4~2011.3

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、乱流伝熱とふく射伝熱の相互作用 (Turbulence/ Radiation Interaction (TRI)) について検証を行う. TRI とはふく射輸送方程 式の乱流変動成分を厳密に扱うことで導かれるものであり、この現象を解明することで高温 燃焼機器などの設計に有用な知見を得ることが出来る.

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. 図1にチャネル乱流の解析領域を示し、上面が高温に下面が低温で一定になるよう境界条件 を定めている.また図2は瞬時温度場である.ふく射強度に及ぼすTRI 効果は、統計的に十 分とされる 300 サンプルを用いてふく射強度を時間平均したものと、時間平均した温度場か ら得たふく射強度との差で検証した.その結果、吸収係数と温度の乱流変動に正の相関があ る場合にTRI 効果が有意に現れてくることが確認された(図3).さらに摩擦レイノルズ数 を増加させることによって、壁近傍において微細な渦構造が形成されることにより、TRIの ピークが壁側にシフトすることがわかった.



Fig.1 Computational domain

Fig. 2 Temperature field



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.特に、ガス濃度と温度の乱流変動に対する相関関係によ って TRI が有意に示されたことに意義がある.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, K. Matsubara, S. Maruyama: Fundamental Study of Turbulence-Radiation Interaction in Turbulent Channel Flow Using Direct Numerical Simulation, *Proceeding of ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference*, Paper no. AJTEC2011-44371; pp. T10047-T10047-7; 7 pages.
- 2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等
- [2] 櫻井 篤, 松原 幸治, 円山 重直, 乱流中におけるふく射輸送現象に関する基礎的研究, 日本 伝熱シンポジウム講演論文集, (2010) pp.193-194.
- *[3] A. Sakurai, K. Matsubara and S. Maruyama: Direct Numerical Simulation of Turbulence-Radiation Interaction in a Turbulent Channel Flow, *Proceedings of the Tenth International Symposium on* Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 66-67.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
 - (特許) 該当なし
 - (受賞) 該当なし
 - (マスコミ発表) 該当なし

課題番号	J10056
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	$2010.4 \sim 2011.3$

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モデル構築を目指す.大気成分の変移や雲等の気象条件を考慮したふく射解析と GPS ラジオゾンデによるふく射観測を行い、それらの結果をシミュレーションモデルにフィードバックする.熱科学のみではなく環境科学の観点からも評価を行っていくことを目的とする.

2. 研究成果の内容

今年度はシミュレーションコードの高速化を重点的に推し進めた.一方,シミュレーショ ンモデルの確度向上と妥当性検証などに必須となるふく射熱流束の大気中での鉛直プロフ ァイル取得を行うため,GPS ラジオゾンデを用いた観測手法を共同で開発した.図1に観 測手法の概要を示す.市街地でゾンデを打ち上げ,海上に落とす間にゾンデに搭載したふく 射熱流束センサーのデータを位置情報と合わせてリモート受信することができる.2011年4 月末頃に流体研付近からの複数打ち上げを予定していた.図2に完成した試作ゾンデの外観 を示す.ゾンデ筐体の上部および下部にそれぞれ下向きおよび上向きにふく射熱流束センサ ーを貼り付け,送信基盤に改造接続した.



🗵 1 : Outline of radiation flux measurement using GPS radiosonde



 \boxtimes 2 : GPS radiosonde with radiation flux sensor

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、世界的に最も厳密且つ高速なメ ガスケール大気環境の数値シミュレーションコードを作成することにある.本年度は高速化 に主眼を置いたコード開発を行い、十分な高速化を達成できた.さらにモデル検証に必須と なる観測の準備を行うことができたという点では、80%の達成度と言える.2011年4月末に 仙台市上空にて観測を行う予定であったが、震災のためにやむなく断念した.

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の開発を押し進めた. 今後は、上記の観測を実施 して、本シミュレーションモデルをより一層精査し, 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きたい. 一連の成果の論文投稿も行う.

- 5. 研究成果(*は別刷あり)
- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) 該当なし

- *[1] N.Yamada, A.Sakurai, A.Komiya, S.Maruyama: Energy Transfer Simulation and Analysis on Mega-scale Environment, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.72-73.
- 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	J10057
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2010.4~2011.3

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、塗膜にマイクロ粒子群を用いた波長選択性を有する機能性膜を製作し、広範 囲にわたる波長領域でのふく射特性、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

マイクロ粒子群に関する高精度ふく射解析コードを用いて、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.薄膜厚、粒子の種類、粒径分布、粒子数をパラメータと した解析を行った.昨年度と同様に、可視領域においては「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.流体科学研究所側では 主として、実験を実施し、上記パラメータの他に基盤を変えた等膜厚サンプルを作成し、そ れらの反射特性を評価した.図1に示すように、広範囲における波長領域で評価を行い、可 視・近赤外領域の両方を評価した.



Fig. 1 : The measurement result of spectral reflectivity of Fe_2O_3 pigmented coating and α -Fe₂O₃ pigmented coating

流体研側で実施したパラメトリックな実験では、マイクロ粒子を含んだ薄膜層を異なった 種類の基板上に設けても、測定波長範囲全体においては基板の反射特性傾向に大きな変化は なく、黒色基板よりも白色基板の反射率が大きいことが観察された.しかしながら、波長領 域ごとに評価をしていくと、可視領域での反射特性を変えることなく近赤外領域の反射を制 御することが可能であることが分かった.すなわち、色を変えることなく近赤外領域の反射 特性を増加することで、高断熱機能を有する塗布膜の生成が可能であることが示唆された. 昨年度の成果より、ベストパフォーマンスを呈する粒子径は数十µm オーダーであることが 分かっている.これは機能性膜が工業的に安価で生産が可能であることを意味しており、建 築物等の外壁に適用できる.実験及び解析結果より、本年度は機能性膜の定量的評価が行え たことから、100%の達成度として位置付けることができる.

4. まとめと今後の課題

「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 した機能膜の定量的評価を行った.最適粒径として計算された粒子径と併せて比較すること で,工業的利用の可能性評価を行った.今後はさらなる最適化を目指した解析,実験の実施 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] 江目宏樹, M. Baneshi, 小宮敦樹, 円山重直: 波長選択性を有した TiO2 ナノ粒子群機能膜の ふく射特性に関する研究, 熱物性, 第24巻4号 (2010), 177-182 頁.
- [2] M. Baneshi, S. Maruyama and A. Komiya : Aesthetic and Thermal Performances of Black Cupric Oxide and Titanium Dioxide Nano-Paarticlate Coatings, *Proceedings of the 6th International Symposium on Radiative Transfer*,(2010), CDROM 81-Paper08.
- [3] H. Gonome, M. Baneshi, A. Komiya and S. Maruyama, Control of Radiative Properties of Nano Particle Coatings Pigmented with Fe2O3 Nanoparticles, *Proceedings of AJTEC2011, ASME/JSME* 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference, CD-ROM.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [4] M. Baneshi, S. Maruyama and A. Komiya, Spectral Radiative Properties of a Polymer Coating Containing Nano-Micro Bubbles, *Proceedings of the Seventh International Conference on Flow Dynamics*, (2010), pp.614-615.
- [5] M. Baneshi, S. Maruyama and A. Komiya, The effect of copper and copper oxide pigment particles on aesthetic and thermal characteristics of pigmented coating, *Proceedings of the 47th National Heat Transfer Symposium of Japan*, Vol. II+III, (2010), pp.577-578.
- 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	J10058
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2010.4~2011.3

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、非等方性複雑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・解析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

近赤外レーザーを用いた生体組織の温熱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)と所外共同研究者 が有している非フーリエ伝熱解析手法のカップリングを行い,コードの評価を行った.特に 近赤外レーザーの生体組織内への透過・吸収についてシミュレーションを行い,深さ方向の 温度分布をレーザーパワーをパラメータとして評価した.計算結果の一例を図1に示す.ま た,実際のレーザー治療に則した計算モデルの構築のために,流体科学研究所においてモデ ルの改良を行った.



I : Temperature distributions in biological tissue with YAG laser irradiation (a) without surface cooling,(b) with surface cooling

近赤外レーザーを用いたレーザー治療では、生体組織を模擬した非等方性複雑媒質内の深 さ方向温度分布は生体組織表面ではない位置に高温のピークを持つことが分かった.これに より、生体表面を適当な方法により局所冷却をすることで、温度ピークを深さ方向にコント ロールすることができ、医療分野における多くの温熱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、皮膚表層付近では特異な温度分布が見受けられたことから、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.本年度の研究は 100%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により、近赤外レーザーを用いたレーザー治療に関す る複雑媒体の伝熱解析を行った.生体表面を局所冷却することで温度のピークを深さ方向で コントロールすることができ、癌細胞などが壊死する温度領域を必要な場所に作り出すこと ができることを示唆した.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) 該当なし

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[1] R. P. Chopade, S. C. Mishra, P. Mahanta, S. Maruyama and A. Komiya, On Location of a Load in a Radiant Furnace for Uniform Thermal Conditions Using REM² and Micro-Genetic Algorithm, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.62-63.
- [2] 円山重直, 佐藤善幸, 小宮敦樹, 櫻井篤: レーザー治療における生体組織内の光伝播・熱 伝導連成解析, 第23回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, (2011), 177-178 頁.
- 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	J10059
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2010.4~2011.3

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

小宮 敦樹*†, Gary Rosengarten**†† *東北大学流体科学研究所, **The University of New South Wales †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

本研究では、マイクロチャネル内における物質拡散現象を実験的に明らかにすることを目 的とし、光学干渉計を用いてサブミリスケールの狭チャネル内での液相内物質輸送現象を可 視化する.物質自由拡散現象に対するチャネル幅の影響を評価することで、物質輸送の能動 制御に向けた知見を獲得する.

2. 研究成果の内容

流体研側が既有している干渉計を用いて狭チャネル内非定常拡散場の可視化を行い、サブ ミリオーダーの拡散現象を評価した.第一段階としては、もっとも簡単な系である一次元自 由拡散を模擬した非定常拡散場の観察を行い、チャネル幅の影響を評価した.実験結果から は、サブミリオーダーのチャネル幅では物質自由拡散には大きな影響を及ぼさないことが明 らかとなった.次に第二段階として、珪藻類が呼吸を行う際の珪藻付近の二酸化炭素分布の 高精度測定を目的とした実験系の確立を図った.珪藻の口腔部は径が 100µm 程度であるこ とから、空間的高解像度な計測が可能なシステムを構築する必要がある.また、実験系の周 囲環境条件(温度や外力等)を換えられるように設計し、併せてチャネル幅の影響評価を行 えるようにした.図1に示すようなシステムの製作を行い、次年度に向けて実験研究の展開 を図ることとした.



(a) Nanoscale effect and filtering method



🗵 1 : Concept of measurement system for nanoscale diffusion in the vicinity of diatom in seawater

計測が困難とされているサブミリオーダーでの非定常拡散場高精度計測を行うことができ、 併せてチャネル幅の影響評価が行えたことから、物質移動現象に関して十分な成果が得られ たと位置づけることができる.また、次年度への研究展開として、観察視野のダウンサイジ ングに伴う解像度の向上を行い、珪藻を用いた非定常物質拡散観察実験のシステム構築がで きた.全体としては目標に対して90%の達成度と言うことができ、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サブミリスケールの非定常拡散場可視化を行い,狭チャネル内での拡 散現象を評価した.チャネル幅の拡散現象に及ぼす影響を定量的に評価し,サブミリスケー ルでは物質自由拡散に影響を及ぼさないことが明らかとなった.また,並行して珪藻類の呼 吸にかかる二酸化炭素物質輸送現象のその場観察セルを開発し,そのシステムの構築を行っ た.今後は開発した観察セルを光学干渉計と合わせ,二酸化炭素物質移動の非定常現象をよ り詳細観察していく.併せて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)

- A. Komiya, J. F. Torres, J. Okajima, S. Moriya, S. Maruyama and M. Behnia : An Investigation of Concentration Dependency of Mass Diffusion Coefficients in Multi-Component Diffusion, *Proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference*, (2010), CDROM IHTC-22501.
- [2] A. Komiya, J. F. Torres, J. Okajima and S. Maruyama : Measurement of the Concentration Dependency of Mass Diffusion Coefficients in Aqueous Binary Solutions by Phase-Shifting Interferometer, *Proceedings of the Ninth Asian Thermophysical Properties Conference*, (2010), CDROM ATPC9-109254.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- *[3] G Rosengarten and A. Komiya : Diatoms, Diffusion and Membranes: *Proceedings of the Tenth International Symposimu on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp.60-61.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) (特許)該当なし

(受賞) 該当なし

(マスコミ発表)該当なし

Project code	J10060
Classification	General collaborative research
Subject area	Nano/micro technology
Research period	April 2010 ~ March 2011

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 investigates the splats formed from the impact of molten tin drops on the stainless steel surfaces comprising micro grooves. The role of drop inertia and surface groove geometry on the splat solidification is examined.

2. Details of program implement

Solidified tin splats were obtained by carrying out experiments of the impact of molten tin drops on grooved stainless steel surfaces kept at ambient temperature in an experimental apparatus with argon as the ambient gas. The roughness factor, r of grooved surface, defined as the ratio of the actual surface area to the projected flat area of grooved surface, and the solid fraction, ϕ of grooved surface, defined as the fraction of the flat projected area occupied by the pillar posts of grooved surface, were estimated from the geometrical parameters. The measured geometrical parameters of the grooved surfaces are given in Table 1.

Grooved	Groove	Pillar	Groove	Pillar		
surfaces	width	width	depth	angle	ϕ	r
	<i>w</i> (µm)	<i>b</i> (µm)	<i>d</i> (µm)	$a (\mathrm{deg})$		
GR1	49	251	77	51	0.16	1.24
GR2	17	231	53	50	0.07	1.20
GR3	65	236	53	50	0.22	1.16

Table 1. Geometrical details of the grooved surfaces

Photographic method, scanning electron microscopy (SEM) and optical surface profilometer were used to characterize the top and bottom surfaces of collected splats. The photographs of tin splats formed from the impact of molten tin drops with different impact conditions on the grooved surfaces show that the impact of molten tin drops on the grooved surfaces develops elliptical splats compared to an axisymmetric splat formed on the smooth surface. Figure 1 shows the images of the bottom surface of splats. For the images, the groove direction is from left to right. The bottom surface of splats given in Fig. 1(a) reveals two regions: a bright zone confined in the central region of the splat, and a relatively darker region surrounding the central bright region. The three dimensional view of surface topography pattern of the bottom surface of splats clearly shows the presence of periodic ridges of solidified tin on the central region of the bottom surface of the splats. The bright patches seen in the SEM images (Fig. 1(b)) are attributed to the light reflection from the inclined surface portions of valleys present in the central region of splats.

Figure 2 shows the comparison of equivalent splat diameter, $D_{s,eq}$ between the splats formed on the grooved surfaces and those on the smooth surface. The impacting molten tin spreading over the grooved surface GR2 undergoes a slower

drop solidification due to the lower value of ϕ . As a result, the impacting molten tin recedes after reaching the maximum spreading diameter on the grooved surface and forms smaller splats as seen in Fig. 2. The grooved surface with larger ϕ (*GR3*) develops a faster solidification, thereby limiting the receding of molten tin on the grooved surface and forms larger splats.

3.0



 $GR1 (\phi = 0.16)$ 0 $GR2(\phi = 0.07)$ 2.5 \triangle GR3 (ϕ = 0.22) Smooth (ϕ = 1.0 2.0 Q° 1.5 □ 1 0 1.0 0.5 0.0 0.3 0.6 0.9 1.2 1.5 U (m/sec)

Figure 1 : The bottom surface of tin splats formed from the impact of tin drops with $D_o \approx 2.75 - 3.01$ mm and $U_o = 1.29$ m/sec on the grooved surfaces. The groove direction is from left to right. (a) Full views, and (b) SEM images of the splat central region.



3. Achievements

The impact of molten tin drops on the grooved surface develops non-axisymmetric drop flow which resulted in the development of eccentric tin splats. The grooved surface with lower solid fraction parameter develops smaller splat.

The bottom surface of tin splat comprised of three surface features: (a) solidified metal ridges in the central region, (b) valleys separating the ridges in the central region, and (c) a planar surface portion surrounding the central region.

4. Summaries and future plans

The solidified tin splats formed from the impact of molten tin drops on the grooved surfaces were characterized using SEM and optical surface profilometer. The grooved surface with lower solid fraction parameter develops smaller splat compared to those formed on the smooth surface owing to the receding of molten tin. A detailed study on the impact of tin drops with varying surface temperature will be carried out.

- 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: Investigation on Splats Formed from the Impact of Molten Tin Drops on Grooved Surfaces, *Proceedings of the Tenth International Symposium of the Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, (2010), pp. 104-105.
- Patent, award, press release etc. Not applicable.

課題番号	J10061
区分	一般共同研究
課題分野	エネルギー分野
研究期間	2010.4 ~2011.3

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**††, Kenneth G. Kreafle** *東北大学流体科学研究所, **IR4TD, University of Kentucky †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

University of Kentucky, USAとのジョイントラボラトリーを双方向型で利用し、「マイク ロ噴霧微粒化プロセスの超並列融合計算」の実施を行う. 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 ューテーションと実験からなる最新の一体型融合シミュレーションが可能なソルバー を開発した.これにより,ガソリン用インジェクターのみならず,噴霧を利用する自 動車塗装,コーティングのバーチャルプランニングに貢献するものと考えられる. 今年度実施したコンピューテーションにより,微小乱流縦渦のエネルギーがマイクロキャビ テーション生成に消費され,界面変形と微粒化挙動に影響していることを明らかにした.



図1 マイクロキャビテーションと微粒化を伴う乱流渦形成プロセスの相互作用に関する融合計算

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,コンピューテーションと実験からなる最新の一体型融合シミュレーションが可能なソルバーを開発した. 特に,マイクロキャビテーション生成と微小乱流渦形成の相互作用に関する知見を得た.

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

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、ベルカップモデルを用いた自動車塗装に関 するシミュレーション、スーパーコンと PC クラスタを用いたスワール微粒化モデル数値計算の 実施と数値計算手法の最適化に関しては来年度に継続して研究の遂行を行う.

5. 研究成果(*は別刷あり)

- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む).
- Jun ISHIMOTO, Fuminori Sato and Gaku Sato: Computational Prediction of the Effect of Micro-cavitation on an Atomization Mechanism in a Gasoline Injector Nozzle, *Trans. ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, Issue 8, (2010), 082801 doi:10.1115/1.4000264.

(Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Top 10 Most Downloaded Articles -- October 2010, 8位にランクイン)

他 合計4件

- [2] Kozo SAITO, Abraham J. SALAZAR, Kenneth G. KREAFLE and Eric A. GRULKE, Hitozukuri and Monozukuri: Centuries' Old Eastern Philosophy to Seek Harmony with Nature, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 2-15.
- *[3] Kenneth G. Kreafle: Lean Product Development, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp. 18-19.
- 他 合計3件
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
- (受賞)日本機械学会流体工学部門フロンティア表彰,マイクロスラッシュ粒子の連続生成技術 開発ならびにマイクロキャビテーションを伴う乱流微粒化の数値予測手法開発,石本淳, 2010.10.30,第88期日本機械学会流体工学部門.
- (マスコミ発表) 仙台 CAT-V のインターネットテレビ番組 COLUMBUS CHANNEL 出演,
 URL: http://cat-vnet.tv/category120/120_005/120_005_0001_a.html (2010 年 11 月).

課題番号	J10062
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	$2010.4 \sim 2011.3$

脆弱性血球モデルの開発 Development of Biomodel for Fragile Blood Cell

Noriko Tomita*, Liviu Movileanu**†† Makoto Ohta*†, *Institute of Fluid Science, Tohoku University **Syracuse University †申請者, ††所外対応研究者

1. 研究目的

膜タンパク質を利用して脆弱化血球モデルを開発する.

2. 研究成果の内容

虚血性心疾患や動脈瘤などの循環器系疾患は、多くの国において最も死亡者数の高い重 大な疾患であり、画期的な診断・治療法の開発が必要とされている.循環器系疾患の低侵 襲的な治療法としてカテーテルや薬剤溶出ステントを用いた血管内治療の導入が増加して いるが、高度な医療技術が求められる一方で、血管内治療の訓練と技術評価は十分ではな く、また、デバイスの接触、留置による血管細胞の傷害、血栓形成、血球の凝集、溶血な ど、血管細胞が受ける影響が問題となっている.これらの問題を解決するために、生体外 で血管の形状や挙動、また生体反応を再現できる血管バイオモデルの開発が急務となって いる.

医療デバイスが血球に与える影響については、これまでに高せん断力マイクロ流路を使 用して血球の変形能を電気的に計測する研究などが行われてきたが、そこで用いられる血 球モデルは、正常の血球やグルタルアルデヒドで硬化させた血球のみであり、血管・血液 疾患患者を想定すれば、より多様な力学的強度をもつ血球モデルを必要としていると考え



図 1. 高精細電子顕微鏡と画像構築ソフトをもと に再構築した膜孔形成タンパク質の構造模式図 本膜孔形成タンパク質は,上部はシリンダー状の 膜外領域,下部は漏斗状の膜貫通領域と推定した. られた.本研究員はこれまでに,赤血 球膜に特異的に作用して,ナノメート ルサイズの孔を開ける膜孔形成タン パク質の構造と作用機序に関する研 究を行っており,本タンパク質を利用 することで,血球膜全体の物性を硬 化・脆弱化させた,膜強度多様化血球 モデルの開発が可能であると考えた.

研究目標の達成状況

平成22年は、膜孔形成タンパク質 の機能をより詳細理解するために、高 精細電子顕微鏡像と2次元および3 次元画像解析ソフトを使用して、本 タンパク質に特徴的な構造と分子配 置をより詳細に定量化することに成 功した(図1).本研究成果は平成22 年5月に名古屋で開催された日本顕 微鏡学会で招待講演として発表し、 また 8 月にポートランドで開催された Microscopy & Microanalysis conference で Outstanding Submission に選ばれるなど,国内外で高い評価を得ている.本研究成果 の一部は既に論文として採択された. (原著論文[1])

4. まとめと今後の課題

血球膜上に形成される孔数については、アメリカシラキュース大学が有する Planar Lipid Bilayer System(PLBS)を使用して定量化する予定である.本システムは平面脂質二重膜上 に形成されるタンパク質濃度に依存したチャネル数をカウントできる.本研究員は現在、3 度目の渡米を遂行中であり、様々な種類の脂質に対する孔数計測を試みている.

5. 研究成果 (* は別刷りあり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

 [1] 冨田典子,安西眸,安部和代,太田信:黄色ブドウ球菌γへモリジンが形成するヘテロ ヘプタマー膜孔複合体の立体構造予測と分子配置解析,顕微鏡 Vol.45, No.4, (2010), pp.223-228.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [2] N. Tomita, H. Anzai, K. Abe, M.Ohta: Analysis of Three-dimetional Structure and Subunit Mismatch in Staphylococcal y-Hemolysin Heterohepameric Transmembrance Pore, *Microscopy and Microanalysis*, Vol.16, Supplement Expo Issue, Aug.1-5, (2010), pp.103-103.
- [3] N. Tomita, H. Anzai, K. Abe, M. Ohta: Molecular Architecture Analysis of Staphylococcal hemolysin Heteroheptameric Transmembrance Pore : Construction of Three-Dimenational Structure with Subunit Arrangement Mismatch Based on High-resolution Electron Microscopic Image, 6th World Congress of Biomechanics, Aug.1-6, (2010), pp.507-507.
- *[4] Noriko Tomita, Yoshiyuki Kamio, Makoto Ohta: Characterization of y-Hemolysin on Liposome, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 100-101.
 - [5] Noriko Tomita, Kazuyo Abe, Hitomi Anzai, Makoto Ohta: 黄色ブドウ球菌 γ ヘモリ ジンが形成するヘテロヘプタマー膜孔複合体におけるサブユニット配置解析, Subunit arrangement analysis of staphylococcal γ-hemolysin heteroheptameric transmembrance pore, 日本生物物理学会第48回年会, 2010年9月20日-22日, pp. s-146-s-147.
 - [6] 冨田 典子, 阿部 和代, 安西眸, 太田信: ブドウ球菌成分性細胞崩壊毒素 γ ヘモリジンが形成するヘテロヘプタマー膜孔複合体における分子配置ひずみの定量的解析, 日本農芸化学会, P281, 3C30p06, (2011).

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

- (特許) なし
- (受賞) Outstanding Submission, Analysis of Three-Dimensional Structure and Subunit Mismatch in Staphylococcal Y-Hemolysin Heteroheptameric Transmembrane Pore, (MandM-00000071-00), Noriko Tomita, *Microscopy and Microanalysis 2010* in Portland, OR.
- (**マスコミ発表**)なし

課題番号	J10063		
区分	一般共同研究		
課題分野	⑤基盤研究分野		
研究期間	2010.4 ~2011.3		

硬式野球ボールの空力特性 Aerodynamical Properties of a Hard Baseball

内菌 謙介*, 福重 貴之*, 宮嵜 武*†, 大林 茂**†† *電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 **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

硬式野球ボールの空力特性を風洞実験,飛翔実験,数値計算によって解明する.縫い目パ ターンが抗力係数や揚力係数に及ぼす影響を調べ,ドラッグクライシスと揚力の生じるパラ メーター領域を確定する.

2. 研究成果の内容

真球と硬式野球ボールの2シームおよび4シームのレイノルズ数 Reに対する抗力係数 Cb, 揚力係数 CLZの依存性を測定した.検定風洞における測定結果を図1に示す.

真球では、抗力係数は CD≒0.45 で一定、揚力係数は CLZ≒0 で一定となった. CD, CLZの どちらも今回測定した Re数領域においては目立った変化は見られなかった.

2シームは $Re \leq 1.4 \times 10^5$ で $C_D \Rightarrow 0.43$, $C_{LZ} \Rightarrow 0.3$ で一定となり, $1.4 \times 10^5 \leq Re \leq 1.7 \times 10^5$ で C_D は減少, C_{LZ} は増加し, $1.7 \times 10^5 \leq Re$ では $C_D \Rightarrow 0.28$, $C_{LZ} \Rightarrow 0$ で一定となった. $1.4 \times 10^5 \leq Re \leq 1.7 \times 10^5$ での C_D の有意な減少はドラッグクライシスを捉えたものと考えられる. また, $Re \leq 1.7 \times 10^5$ では負の揚力が発生している. これは縫い目の非対称性により剥離点の 位置が非対称となっていた為であり, より高い Re 数領域で $C_{LZ} \Rightarrow 0$ になったのは境界層の 乱流遷移に伴い, 上下の剥離点がともに後方に移動したことにより剥離が対称となったため と考えられる.

4シームの場合, *Cp*は *Re*≦1.6×10⁵ で *Cp*≒0.45 で一定となり, 1.6×10⁵≦*Re*≦1.75×10⁵ で減少, 1.75×10⁵≦*Re* では *Cp*≒0.35 で一定となった. *CLz*は複雑な振る舞いを示した. *Re*≦1.75×10⁵の範囲で値が正負にばらつき, 0.95×10⁵≦*Re*≦1.4×10⁵ でほぼ一定(負), 1.4×10⁵≦*Re*≦1.75×10⁵ にかけては値が正から負へと変動した. 1.75×10⁵≦*Re* では *CLz*≒0 で一定となった. 1.4×10⁵≦*Re*≦1.75×10⁵ での *Cp*の減少はドラッグクライシスと連動していると思われる. *Re*≦1.75×10⁵の範囲で *CLz*が正負にばらつくのは縫い目の対称性が完全ではないために, 乱流遷移に伴う剥離点の移動が対称的にはならないためと考えられる.



図 1. 抗力係数 Coおよび揚力係数 CLZのレイノルズ数依存性

硬式野球ボールの2シームと4シームでドラッグクライシスを風洞実験で捉えることができた. 2シームに対する臨界レイノルズ数は $1.4 \times 10^5 \leq Re \leq 1.7 \times 10^5$, 4シームでは $1.6 \times 10^5 \leq Re \leq 1.75 \times 10^5$ の範囲であった.また、2シームは縫い目方向によっては $0.8 \times 10^5 \leq Re \leq 1.7 \times 10^5$ で 負の揚力が発生することが確認できた.4シームの場合は完全な対称性を持っていれば揚力は働 かないはずであるが、硬式野球ボールが持つ微妙な非対称性のために揚力(横力)が不規則に発 生することも分かった.定性的な意味では期待される結果を得ることができた.

4. まとめと今後の課題

風洞実験結果を総括すると,縫い目の有無,縫い目パターンが Cb, CLZに有意な差をもたらす ことが確認された.また,レイノルズ数に対する依存性も異なることが確認された.しかし,得 られた抗力係数は文献値や飛翔実験の結果と定量的な食い違いが見られた.これは風洞実験にお いて支持具干渉の影響を完全に消去できなかったためであり、残念ながら今回の知見は定性的な 段階にとどまっている.今後は,支持具を覆う風防を注意深く用意して,支持具の影響を最小限 に留めるなどの処理を適切に行う必要がある.

5. 研究成果(*は別刷あり)

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし

- *[1] K. Uchizono, T. Fukujyu, T. Miyazaki, R. Himeno, S. Obayashi: DRAG CRISIS OF A HARD BASEBALL, *Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration*, Sendai, (2010), pp. 156-157.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) なし

Project code	J10064
Classification	General collaborative research
Subject area	Energy
Research period	April 2010 ~ March 2011

Evaluation of Surface and Sub-Surface Area of Structural Components

Sung-Jin Song*†, Toshiyuki Takagi**††, Hak-Joon Kim*, Sung Duk Kwon***, Dae-Kwang Kim*, Tetsuya Uchimoto**, Hiroyuki Miki** * School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University **Institute of Fluid Science, Tohoku University ***Department of Physics, Andong National University †Applicant, ††IFS responsible member

1. Purpose of the project

Surface/sub-surface degradation caused by environmental factors or surface treatments, decarburization and etc drive the initial cracks that become crucial problems and contributors to the failure of structural components. From the preliminary study, we found that ultrasonic and electromagnetic parameters have relation with degree of degradation. So, more study for evaluation of surface/sub-surface area of structural components are needed in order to find relation between degradation and coating conditions and develop novel NDE methods.

Thus, major objective of this project is to establish relation between ultrasonic and electromagnetic parameters and changing material properties of surface/sub-surface of decarburized steel of structural components degraded with severe operation condition.

2. Details of program implement

For evaluation of sound velocity and attenuation at surface and/or subsurface area using minimum reflectivity phenomena, "minimum reflection profiles" were measured using the specially designed experimental system as shown in Fig. 1. And, six stainless steel specimens with different composition were fabricated to verified proposed methods. The specimens called as "A1, A2, A3, A4, A5, and A6" in this paper.



Fig. 1 Fabricated system for measuring reflected signals in a pitch-catch immersion setup

Fig. 2 (a) shows calculated angle of incident corresponding to Rayleigh angle of the each specimen based on Snell's law and measured sound velocities. And Fig. 2 (b) shows measured angle of incident corresponding to minimum reflection signals obtained from the specimens using the experimental system. As shown in Fig. 2, measured incidence angles using minimum reflection profiles are agree with estimated one.



Fig. 2 Estimated incidence angle using measured sound velocitites and (b) measured incidence angle corresponding to Rayleigh angle of each specimens

Fig. 3 (a) shows measured attenuation ultrasonic at 20 MHz using conventional method. As shown in Fig. 3 (a), attenuation of ultrasonic for the A4 specimen is larger than the other ones, because the A4 specimen has different composition in C, Ni and Cr. And, Fig. 3 (b) shows measured energy of reflected signal at Rayleigh angle. As shown in Fig. 3 (b), energy of the reflected signal obtained from the A4 specimen is the smallest. From this phenomenon, we found that attenuation of ultrasound and energy of reflected signals at Rayleigh angle has reciprocal proportion.



Fig. 3 Measured (a) attenuation of ultrasound using conventional method and (b) minimum value obtained from the minimum reflection profiles of each specimen

3. Summaries and future plans

In this work, incident angle corresponding to Rayleigh angle and energy of reflected signals at Rayleigh angle were proposed for detection and evaluation of degraded components in nuclear power plants. Using the stainless steel specimens with different composition, attenuation of ultrasound and minimum value obtained from minimum reflection profiles have reciprocal proportion. However, evaluations of degraded materials in the layered structures are not easy at all using the developed methods.

Therefore, major objective of this project will be sifted to the development of nondestructive methods including sensors, signal interpretation techniques, and etc using EMAR (Electromagnetic Acoustic Resonance) method and PEC (Pulsed Eddy Current) method, since EMAR and PEC were claimed that those methods have strong potential for evaluation of CUI, coating, and so on.

- 4. Research results
- 1) Journal (included international conference with peer review and tutorial paper)
- 2) International and domestic conferences, meeting, oral presentation etc.
- *[1] Hak-Joon Kim, Sung-Jin Song, Sung-Duk Kwon, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, Hiroyuki Miki: Nondestructive Method for Evaluation of Surface or Subsurface Area, Proceedings of the Tenth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, Sendai, (2010), pp.68-69.

分野横断プロジェクト		
課題番号	J10B01	
課題分野	次世代反応流体科学	
研究期間	2010.12~2011.3	

[全体概要]

次世代反応流体科学の創成 Frontier Science of Next Generation Reactive Fluid

研究代表者 石本 淳 サブリーダー1 佐藤 岳彦 サブリーダー2 丸田 薫 サブリーダー3 石本 淳

1. 研究目的

ライフサイエンス,燃焼科学,高応答性流体科学の三つの研究領域からなるプロジェクト 推進し,生物・化学・高応答流体の各種反応性流動に関する異分野融合型の学理創成を行う. 近い将来,反応を伴う流動科学領域は次世代流体科学の主要学問領域として重要な地位を占 めることは確実視されていると考えられるが,物理化学的プロセスや熱流動の素過程に多く の未解明な部分を残しているのが現状であり,工学的に十分な検討が行われているとは言い がたい.本プロジェクトにおいて次世代反応性流体科学の学理構築を推進するためには,既 存の単一領域の発展型研究から脱却し異分野融合型の新しい発想からなる研究を推進する 必要がある.そこで本研究においては,現在の先進流体科学をベースとした上記3研究領域 の異分野融合の発想から成る先進的アプローチを行い,次世代反応性流体科学の創成を目指 すものである.

2. 研究成果の内容

本年度は研究開始初年度であるので、次世代反応性流動に関わる3研究プロジェクトの立ち上げと各研究グループによる方針の確認を行った.

ライフサイエンスグループにおいては、細胞・生体組織にかかわる反応・輸送現象をマル チスケールで明らかにし、細胞と流動場の相互作用に関する研究、燃焼グループにおいては 利用技術が高度化する燃焼・反応現象の解明・モデル化・制御を通じて、持続可能な社会構 築に貢献する環境負荷の低い次世代反応流体科学技術の創出に関する研究、高応答性流体グ ループにおいては、外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体・熱流動を 対象とし、その異分野融合型研究開発を開始するための基盤構築を行った.詳しい内容に関 しては次ページ以降の各研究プロジェクト(研究小グループ)の報告内容を参照のこと.

3. 研究目標の達成状況

ライフサイエンス, 燃焼科学, 高応答性流体科学の3プロジェクトにおいて次世代反応性 流動に関連するテーマ設定と研究基盤の整備ならびに導入的研究を実施した. 震災のため研 究の実施が一時的に中断されたが, 徐々に復旧しつつある. 詳しい内容に関しては次ページ 以降の各研究プロジェクト(研究小グループ)の報告内容を参照のこと.

4. まとめと今後の課題

現在のところ、3 プロジェクトが独立で進行しており、次世代反応性流動に関連する先進 的成果を得るに必要な研究体制が整ってきていると言える.現在の研究体制に付加して3プ ロジェクト間の相互連携を行うことが分野横断型研究としての有効性を外部発信すること につながると考えられる.そこで次年度からはプロジェクト間の相互連携研究テーマとして、 高応答性流体プロジェクトを基幹とした、1. iPS 細胞のガラス凍結(ライフと連携)、2. 微小重力液滴燃焼の磁場制御(燃焼と連携)に関する融合研究を推進することを計画してい る.

5. 研究成果

サブテーマ1

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- T. Nakano, G. Kikugawa and T. Ohara: A molecular dynamics study on heat conduction characteristics in DPPC lipid bilayer, *J. Chem. Phys.*, Vol. 133 (2010), 154705.
- [2] Hiroyuki Kosukegawa, Shuya Shida, Yoko Hashida, Makoto Ohta, Mechanical Properties of Tube–Shaped Poly (Vinyl Alcohol) Hydrogel Blood Vessel Biomodel, *Proceedings the 3rd ASME2010* 3rd US–European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, Aug.1–5, 2010, pp. FEDSM/ICNMM 2010, 30892
- [3] A. Shirai and T. Hayase: A Stabilization Technique of Wobbly Images taken by the Inclined Centrifuge Microscope, *IFMBE Proceedings*, Vol. 31 (2010), pp.100–107.
- [4] A. Komiya, J. F. Torres, J. Okajima, S. Moriya, S. Maruyama and M. Behnia: An Investigation of Concentration Dependency of Mass Diffusion Coefficients in Multi-Component Diffusion, *Proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference*, (2010), CDROM IHTC-22501.
- [5] A. Komiya, J. F. Torres, J. Okajima and S. Maruyama: Measurement of the Concentration Dependency of Mass Diffusion Coefficients in Aqueous Binary Solutions by Phase-Shifting Interferometer, *Proceedings of the Ninth Asian Thermophysical Properties Conference*, (2010), CDROM ATPC9–109254.

- T. Sato, M. Yokoyama and K. Johkura: Effect of Culture Medium Exposed to a Plasma Flow on Activity of HeLa Cells, *Book of Abstracts of 3rd International Conference on Plasma Medicine* (*ICPM 3*), (2010), p.29.
- [2] 佐藤岳彦, 横山茉代, 城倉浩平: 大気圧プラズマ流の HeLa 細胞への影響, 第 34 回静電気学会 講演論文集, (2010), pp.151-152.
- [3] 佐藤岳彦, 横山茉代, 城倉浩平: 大気圧プラズマ流の生成化学種による細胞への影響, 日本機 械学会第23回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, (2010), pp.495-496.
- [4] T. Nakano, G. Kikugawa and T. Ohara, Effect of alkyl chain length on molecular heat transfer characteristics in lipid bilayers, Proc. ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference, AJTEC2011, 2011, AJTEC2011-44465.
- [5] T. Nakano, G. Kikugawa and T. Ohara, Molecular momentum transfer characteristics of lipid bilayers in shear flows, *Proc. 7th International Conference on Flow Dynamics*, 2010, pp. 368–369.
- [6] 中野雄大, 菊川豪太, 小原拓: 脂質二重膜の熱伝導特性に対する炭化水素鎖長による影響, 第 47回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. Ⅲ, 2010, pp. 601-602.
- [7] 中野雄大, 菊川豪太, 小原拓: 脂質二重膜の熱輸送特性に対するアルキル鎖界面の影響, 第2 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, 2010, pp. 201-202.

- [8] 中野雄大, 菊川豪太, 小原拓: 脂質二重膜の熱輸送特性に対する脂質分子種の影響, 日本流 体力学会年会 2010 講演論文集, 2010, p. 111.
- [9] 中野雄大, 菊川豪太, 小原拓: せん断流中における脂質二重膜の運動量伝搬特性に関する分 子動力学的研究, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集, Vol. 8, 2010, pp. 81-82.
- [10] N. Tomita, H. Kosukegawa, M. Ohta, Modification of transparent poly(vinyl alcohol) hydrogel with extracellular matrix promotes effective cell adhesion for biomodeling, International Conference on Cellular & Molecular Bioengineering, Aug.1–5, 2010, pp.93–93
- [11] N. Tomita, H. Kosukegawa, M. Ohta, Development of Fundamental Techniques of Cell Adhesion on Transparent PVA-H for Biomodeling, 6th World Congress of Biomechanics, Aug.1-6, 2010, pp.483-483
- [12] N. Tomita, H. Kosukegawa, Makoto Ohta, Cell Adherence on Transparent PVA-H Coated with Extracellular Matrix, 23th European Conference on Biomaterials, Sep. 11–15, 2010, pp. n3484
- [13] Noriko Tomita, Hiroyuki Kosukegawa, Makoto Ohta, Development of Cell-Matrix Adhesion Techniques on Transparent PVA-H for Vessel Biomodeling, Seventh international Conference on Flow Dynamics Nov. 1–3, 2010, pp. 126
- [14] 冨田 典子,小助川 博之,太田 信,透明 Poly (vinyl alcohol) Hydrogel バイオモデル上への血 管細胞の効果的付着技術の開発,日本バイオマテリアル学会,2010年11月29-30日,pp.196
- [15] Noriko Tomita, Cell adhesion on PVA-H for development of biomodel with biological response, International Mini Symposium for Biomechanics and Intracranial Stent, IFS, Tohoku University, Oct.20, 2010, pp.36–37
- [16] Makoto Ohta, Development of in vitro system for intracranial stent evaluation, Swiss/Japan International Seminar on Medical Engineering Based on Vessel Biology, in Zurich, Swiss, Nov 15–16, 2010
- [17] Noriko Tomita, Development of vessel biomodel with dynamic and biological properties by cell attachment on PVA-H, Swiss/Japan International Seminar on Medical Engineering Based on Vessel Biology, in Zurich, Swiss, Nov 15–16, 2010
- [18] A. Shirai, T. Umimoto, H. Uranuma and T. Hayase: Observation of Motion of HL60 Cells on HUVEC Cultured on a Flat Glass Plate using the Inclined Centrifuge Microscope, Proc. ELyT Annual Workshop in Sendai 2011 (2011/2/22-24), USB-memory.
- [19] H. Uranuma, A. Shirai and T. Hayase: Experimental Study on Effect of Direction of Endothelial Cells' Orientation on Motion of HL60 Cells, *Proc. 7th International Conference on Fluid Dynamics* (2010/11/1–3), pp. 620–621.
- [20] H. Sato, A. Shirai and T. Hayase: Observation of Velocity of Antibody-modified HL60 Cells on Glass Plates using the Inclined Centrifuge Microscope, Proc. 4th East Asian Pacific Student Workshop on Nano-Biomedical Engineering (2010/12/15-16), pp. 62-63.
- [21] 白井, 早瀬: 傾斜遠心顕微鏡で撮影された連続画像のぶれ補正手法, 日本流体力学会年会 2010 拡張要旨集 (2010/9/9-11), CD-ROM.
- [22] 浦沼, 白井, 早瀬: 血管内皮細胞の配向が好中球の挙動に与える影響に関する実験的研究, 日本機械学会第21回バイオフロンティア講演会講演論文集 (2010/11/12-13), pp. 45-46.
- [23] 佐藤, 白井, 早瀬: 傾斜遠心顕微鏡を用いたガラス平板上におけるHL60の微視的挙動に関する基礎的研究, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集, Vol. 5 (2010/9/5-8), pp. 9-10.
- [24] G. Rosengarten and A. Komiya: Diatoms, Diffusion and Membranes, Proceedings of the Tenth International Symposimu on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, (2010), pp.60–61.

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)
 (特許)該当なし
 (受賞)該当なし
 (マスコミ発表)該当なし

サブテーマ2

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- M. Kumagami, Y. Ogami, Y. Tamaki, H. Kobayashi: Numerical Analysis of Extremely-rich CH4/O2/H2O Premixed Flames at High Pressure and High Temperature Considering Production of Higher Hydrocarbons, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.5, (2010), pp.109-123.
- [2] Y. Ichikawa, Y. Otawara, H. Kobayashi, Y. Ogami, T. Kudo, M. Okuyama, S. Kadowaki: Flame Structure and Radiation Characteristics of CO/H2/CO2/air Turbulent Premixed Flames at High Pressure, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, (2011), pp.1543-1550.
- [3] Y. Ogami, Y. Tamaki, M. Kumagami, H. Kobayashi: Effects of Pressure on Laminar Burning Velocity for Fuel-rich CH4/O2 Flames with Steam Dilution, *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2010), pp.120-120.
- [4] Akira Yamamoto, Hiroshi Oshibe, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Stabilized three-stage oxidation of gaseous n-heptane/air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33, (2011), 3259-3266.
- [5] Mikito Hori, Akira Yamamoto, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: Multi-stage reactions of PRF / air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2010), pp.1099-1102.
- [6] Hisashi Nakamura, Akira Yamamoto, Mikito Hori, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Zero-dimensional approach for repetitive ignition and stabilized multi-stage oxidation in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2010), pp.1094-1098.
- [7] M. Okuyama, S. Hirano, Y. Ogami, H. Nakamura, Y. Ju, H. Kobayashi: Development of an Ethanol Reduced Kinetic Mechanism Based on the Quasi-steady State Assumption, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.5, (2010), pp.189-199.

- [8] Y. Otawara, Y. Ichikawa, J.H. Wang, Y. Ogami, T. Kudo, M. Okuyama, H. Kobayashi: Turbulent Burning Velocity and Flame Structure of CO/H2/CO2 Premixed Flames in a High Pressure Environment, *The Seventh International Conference on Flow Dynamics*, (2010), pp.636-637.
- [9] 大上泰寛, 熊上学, 小林秀昭: 高圧、高当量比条件下における CH4/O2/H2O 予混合火炎の燃焼反応メカニズムに関する研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2010 講演論文集, (2010), pp.137-138.
- [10] 小林秀昭, 市川泰久, 大田原祐樹, 大上泰寛, 工藤琢, 奥山昌紀, 門脇敏: 高圧環境における CO/H2/CO2/air 乱流予混合火炎の構造に関する研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2010 講演論文集, (2010), pp.121-121.
- [11] 市川泰久, 大田原祐樹, 奥山昌紀, 工藤琢, 大上泰寛, 小林秀昭, 門脇敏: 高圧下における石 炭改質模擬ガスを燃料とする CO/H2/CO2/air 乱流予混合火炎に関する研究, 第48回燃焼シ ンポジウム講演論文集, (2010), pp.80-81.
- [12] Akira Yamamoto, Hiroshi Oshibe, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: Pressure Dependence of Three-stage oxidation of n-Heptane in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *The Seventh International Conference on Flow Dynamics*, (2010), pp.646-647
- [13] 山本 晃, 押部 洋, 中村 寿, 手塚 卓也, 長谷川 進, 丸田 薫: 温度分布制御型マイクロフロ ーリアクタにおけるn-ヘプタン三段酸化反応の圧力依存性, 48回燃焼シンポジウム講演論文 集, (2010), pp.236-237.
- [14] Mikito Hori, Akira Yamamoto, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: Weak flame response to various octane numbers of PRF/air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *The Seventh International Conference on Flow Dynamics*, (2010), pp.640-641
- [15] Hisashi Nakamura, Akira Yamamoto, Mikito Hori, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Simple numerical modeling for repetitive ignition and stabilized multi-stage oxidation in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *The Seventh International Conference on Flow Dynamics*, (2010), pp.434-435
- [16] 堀 幹人,山本 晃, 手塚 卓也,長谷川 進,中村 寿,丸田 薫:オクタン価変化に対する温度 分布制御型マイクロフローリアクタ内 Weak flame の応答,第48回燃焼シンポジウム講演 論文集,(2010), pp.376-377.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許)

該当なし

(受賞)

- [17] Young Investigator Award, Dimension Reduction Model for Auto-ignition in Micro Flow Reactor with Controlled Temperature Profile, Hisashi Nakamura, 発表年月 日:2009.5.26, 授賞式年月日:2010.12.11, The Combustion Institute (Taipei Section)
- [18] ベストプレゼンテーション賞,オクタン価変化に対する温度分布制御型マイクロフロー リアクタ内 Weak flame の応答,堀 幹人,2010.12.2,日本燃焼学会

(マスコミ発表)

- [19] IHI プレスリリース, 燃料特性評価装置「マイクロフローリアクタ」を開発、販売開始~ 自動車用エンジンのノッキングの起こりやすさの測定が容易に~, 2010.12.21
- [20] 東北大学プレスリリース, 燃料特性評価装置「マイクロフローリアクタ」を IHI と共同開発、実用化に成功, 2010.12.21

サブテーマ3石本グループ

- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)
- Jun ISHIMOTO, Fuminori Sato and Gaku Sato: Computational Prediction of the Effect of Micro-cavitation on an Atomization Mechanism in a Gasoline Injector Nozzle, *Trans. ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, Issue 8 (2010) 082801 doi:10.1115/1.4000264. (Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Top

10 Most Downloaded Articles -- October 2010, 8 位にランクイン) pages). 他1件

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Kozo SAITO, Abraham J. SALAZAR, Kenneth G. KREAFLE and Eric A. GRULKE, Hitozukuri and Monozukuri: Centuries' Old Eastern Philosophy to Seek Harmony with Nature, 10th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, AFI/TFI-2010 (2010). 他 4件

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

- (特許)特許出願名称:原子力発電所における配管減肉予測システム(出願中)
 出願番号:特願 2010-230423 (2010 年 10 月 13 日)[特許出願中].
 発明者名・出願人名: 石本 淳(東北大学),河上 晃((株)東北電力)
- (受賞) 受賞名: Cryogenics Best Paper Award 2009 (Elsevier B.V.) (日本人では初)
 受賞者名: 石本淳
 受賞論文: Jun Ishimoto, Numerical study of cryogenic micro-slush particle production using a two-fluid nozzle, *Cryogenics* (Elsevier B.V.), Volume 49, Issue 1, January 2009, pages 39-50.
 受賞年月日: 2010年7月22日, ICEC 23- ICMC 2010 (第23回国際低温工学-2010
 国際低温材料会議, ブロツワフ工科大学, ポーランド).
- (マスコミ発表) 仙台 CAT-V のインターネットテレビ番組 COLUMBUS CHANNEL 出演,
 URL: http://cat-vnet.tv/category120/120_005/120_005_0001_a.html (2010年11月).

サブテーマ3西山グループ

- 1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む) なし
- 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等 篠原圭介,高奈秀匡,西山秀哉:静電効果による管内反応性気体中の微粒子撹拌・搬送特性, 第88期日本機械学会流体工学部門講演会,(2010), pp.165-166.

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許)

微粒子搬送装置及びこの装置を用いた微粒子の浄化,高奈秀匡・篠原圭介・西山秀哉, 2010.10.28,出願(特願 2010-242718).

(受賞)

優秀講演表彰,静電効果による管内反応性気体中の微粒子撹拌・搬送特性,篠原圭介, 2010.10.30,日本機械学会.

(マスコミ発表)

なし

サブテーマ3徳増グループ

なし

サブテーマ3寒川・Huang グループ

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- Butsurin Jinnai, Seiichi Fukuda, Hiroto Ohtake, Seiji Samukawa: Prediction of UV spectra and UV-radiation damage in actual plasma etching processes using on-wafer monitoring technique, *J. Appl. Phys.*, 17(2010), 043302 (6 pages).
- [2] Hiroto Ohtake, Seiichi Fukuda, Butsurin Jinnai, Tomohiko Tatsumi, Seiji Samukawa: Prediction of Abnormal Etching Profile in High-Aspect-Ratio Via/Hole Etching Using On-Wafer Monitoring System, Jpn J. Appl. Phys., 49 (2010), 04DB14 (5 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] 荒木良亮,奥村宏克,陣内佛霖,松永範昭,寒川誠二:オンウェハモニタリングによる PE-CVD プロセスにおけるチャージングダメージの発生メカニズム解明とそのリアルタイ ム評価,2010 年秋季 第71 回 応用物理学会学術講演会.
- [2] 荒木良亮,和田章良,三輪和弘,岩崎拓也,小野耕平,寒川誠二:オンウエハーセンサを用 いたプラズマエッチングプロセスにおけるシース形状およびイオン軌道予測,2011 年春季 第58回応用物理学関係連合講演会.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし

[サブテーマ1]

細胞・生体組織における反応・輸送現象に関する研究 Research on Reaction and Transport Phenomena with Cell/Living Tissue

佐藤 岳彦 ¹[†], 小原 拓¹),太田 信¹), 白井 敦¹),小宮 敦樹¹),富田 典子¹) ¹)東北大学流体科学研究所 [†]サブリーダー

1. 研究目的

細胞・生体組織にかかわる反応・輸送現象をマルチスケールで明らかにし、細胞と流動場の相互作用に関する基礎学理を構築する.本目的を達成するために、①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応(佐藤)、②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究(小原)、③ 生体適合材料と細胞の相互作用(太田、冨田)、④血球と血管内皮細胞との相互作用に関する実験的研究(白井)、⑤物質・熱の細胞膜輸送現象の実験的研究(小宮)の各研究課題について取り組む.

2. 研究成果の内容

本年度は、上記研究課題に対応して下記研究成果を得た.

①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応(佐藤)

プラズマ流の化学種の細胞に与える影響について、プラズマ処理した培地に細胞を暴露す る手法を用いて検証した.図1に示すように60分暴露により、24時間、48時間培養後に細 胞がほぼ死滅することを明らかにした.また、プラズマ照射により培地中に過酸化水素が生 成されるが、同濃度の過酸化水素を培地に添加した場合にも同様に死滅することから、過酸 化水素が一つの要因であることが明らかになった.



図1:プラズマ照射培地と過酸化水素添加培地に60分暴露した時の細胞生存率

②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究(小原)

水中に自己組織化的に形成される脂質二重膜について、その膜面平行/垂直方向の熱伝導 率を計測した.垂直方向では、図2に示すように、脂質二重膜中央の脂質疎水基間でもっと も熱抵抗が大きいことや、脂質単層膜内部では鎖状疎水基が整列して強固な共有結合を用い た分子間エネルギー伝搬を行う結果、高い熱伝導率を示すことなどが明らかとなった.



図2:水-脂質単層膜-脂質単層膜-水系の膜面垂直熱伝導.(左)系のスナップショットと 熱伝導流束,(右)温度分布及び密度分布

③生体適合材料と細胞の相互作用(太田,冨田)

生体適合性材料を用いた生体軟組織の生体外循環システムモデル開発のため,透明ポリビニルアルコールハイドロゲル(PVA-H)上に表面階層性の再現を行った. その結果,細胞外基質の種類によって表面階層性の再現に違いがあることが分かった(図3).







図3:種々の細胞外基質による PVA-H 上の接着の様子

④血球と血管内皮細胞との相互作用に関する実験的研究(白井)

ガラス平板上にヒト臍帯静脈内皮細胞(HUVEC)を培養し、傾斜遠心顕微鏡を用いて、 HUVECに押しつけられながら移動する HL60 細胞(好中球のモデル細胞)の挙動を観察した. その結果,図4に示すように、HL60は、HUVECの核を避けて移動することが確認された. また、培養した HUVEC に流れ負荷を与えて配向させた基板を用いて同様の実験を行った 結果、HL60の挙動は、HUVECの配向にも影響されることが確認された.



図4: PTV による瞬間速度ベクトルを用いて描いた HL60 の軌跡

⑤物質・熱の細胞膜輸送現象の実験的研究(小宮)

流体研既有の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ネル内での拡散現象を評価した.チャ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,装置の解像度を数マイクロメートルまで技術改良し,実験を実施した.図5に示すように,狭チャネル内の測定において,周囲環境である系の平均濃度の違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.



 $\boxtimes 5$: Relationship between elapsed time and the value of $x^2/4\xi^2$.

3. 研究目標の達成状況

本年度の研究目標は概ね達成し,順調に研究を遂行している.各研究課題に対する個別の 達成状況は下記の通りである.

①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応(佐藤)

当初予定では、気泡崩壊時の圧力伝搬の細胞への影響を検証する予定であったが、本年度 はプラズマ流が生成する化学種の影響を明らかにすることに絞り、過酸化水素が細胞の死滅 させる主たる役割を担っていることを明らかにするなど大きな成果を得た.

②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究(小原)

研究計画に沿って順調に進行中である.

③生体適合材料と細胞の相互作用(太田,冨田)

代表的な細胞外基質の生体材料との接着性について研究を行った.その結果,生体材料の 表面環境状態により,生体材料と基質の選択が決定できるなど,当初の目標である材料との 細胞外基質の最適化について,ディシジョンメイキングが可能になった. ④血球と血管内皮細胞との相互作用に関する実験的研究(白井)

当初の目標通りに,HVUEC および HL60 細胞を用いた実験により,血管内皮細胞の核の 存在による血管内皮の凹凸が好中球の挙動に影響を与えることが示唆された. ⑤物質・熱の細胞膜輸送現象の実験的研究(小宮)

計測が困難とされているサブミリオーダーでの非定常拡散場高精度計測を行うことができ, 併せて系の環境が拡散現象に及ぼす影響の評価を行えたことから,生体高分子物質移動現象 に関して有用な知見が得られたと位置づけることができる.全体としては目標に対して 90% の達成度と言うことができ,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

今後の課題については、下記の通りである.

①プラズマ流の物理刺激輸送と細胞反応(佐藤)

過酸化水素が細胞に与える影響について、細胞内でどのような反応経路で細胞が死滅に至ったのかについて詳細に検証する.

②細胞膜輸送と細胞界面流動現象の理論的研究(小原)

分子動力学計算モデルの構築を完了し、熱伝導メカニズムの解析を行った。今後は脂質分子種の違いによる影響やせん断流中の運動量輸送などに解析を進める予定である。

③生体適合材料と細胞の相互作用(太田,冨田)

これまでの結果により, PVA 上に塗布する細胞外基質が特定されたので, 今後血管内皮細胞を接着させ, その強度を測定する.

④血球と血管内皮細胞との相互作用に関する実験的研究(白井)

血管内において血管内皮細胞は常に血流による剪断応力に曝されている.そのため、内皮 細胞は血流方向に配向していると考えられている.本結果は、内皮細胞の配向が好中球の移 動を妨げないように機能していることを表している.ただし、機械的な凹凸の影響と接着分 子の影響を完全に分離できていないので、今後はこれらの影響を分離する必要がある. ⑤物質・熱の細胞膜輸送現象の実験的研究(小宮)

光学干渉計を用いてサブミリスケールの非定常拡散場高精度可視化を行い,狭チャネル内 での拡散現象を評価した.併せてチャネル幅の拡散現象に及ぼす影響を定性的に評価した. 今後は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

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- T. Nakano, G. Kikugawa and T. Ohara: A molecular dynamics study on heat conduction characteristics in DPPC lipid bilayer, *J. Chem. Phys.*, Vol. 133 (2010), 154705.
- [2] Hiroyuki Kosukegawa, Shuya Shida, Yoko Hashida, Makoto Ohta, Mechanical Properties of Tube–Shaped Poly (Vinyl Alcohol) Hydrogel Blood Vessel Biomodel, *Proceedings the 3rd ASME2010* 3rd US–European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, Aug.1–5, 2010, pp. FEDSM/ICNMM 2010, 30892
- [3] A. Shirai and T. Hayase: A Stabilization Technique of Wobbly Images taken by the Inclined Centrifuge Microscope, *IFMBE Proceedings*, Vol. 31 (2010), pp.100–107.

- [4] A. Komiya, J. F. Torres, J. Okajima, S. Moriya, S. Maruyama and M. Behnia: An Investigation of Concentration Dependency of Mass Diffusion Coefficients in Multi-Component Diffusion, *Proceedings of the 14th International Heat Transfer Conference*, (2010), CDROM IHTC-22501.
- [5] A. Komiya, J. F. Torres, J. Okajima and S. Maruyama: Measurement of the Concentration Dependency of Mass Diffusion Coefficients in Aqueous Binary Solutions by Phase-Shifting Interferometer, *Proceedings of the Ninth Asian Thermophysical Properties Conference*, (2010), CDROM ATPC9-109254.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- T. Sato, M. Yokoyama and K. Johkura: Effect of Culture Medium Exposed to a Plasma Flow on Activity of HeLa Cells, *Book of Abstracts of 3rd International Conference on Plasma Medicine* (*ICPM 3*), (2010), p.29.
- [2] 佐藤岳彦, 横山茉代, 城倉浩平: 大気圧プラズマ流の HeLa 細胞への影響, 第 34 回静電気学会 講演論文集, (2010), pp.151-152.
- [3] 佐藤岳彦, 横山茉代, 城倉浩平: 大気圧プラズマ流の生成化学種による細胞への影響, 日本機 械学会第23回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, (2010), pp.495-496.
- [4] T. Nakano, G. Kikugawa and T. Ohara, Effect of alkyl chain length on molecular heat transfer characteristics in lipid bilayers, Proc. ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference, AJTEC2011, 2011, AJTEC2011-44465.
- [5] T. Nakano, G. Kikugawa and T. Ohara, Molecular momentum transfer characteristics of lipid bilayers in shear flows, *Proc. 7th International Conference on Flow Dynamics*, 2010, pp. 368–369.
- [6] 中野雄大, 菊川豪太, 小原拓: 脂質二重膜の熱伝導特性に対する炭化水素鎖長による影響, 第 47 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. Ⅲ, 2010, pp. 601-602.
- [7] 中野雄大, 菊川豪太, 小原拓: 脂質二重膜の熱輸送特性に対するアルキル鎖界面の影響, 第2 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム講演論文集, 2010, pp. 201-202.
- [8] 中野雄大, 菊川豪太, 小原拓: 脂質二重膜の熱輸送特性に対する脂質分子種の影響, 日本流 体力学会年会 2010 講演論文集, 2010, p. 111.
- [9] 中野雄大, 菊川豪太, 小原拓: せん断流中における脂質二重膜の運動量伝搬特性に関する分 子動力学的研究, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集, Vol. 8, 2010, pp. 81-82.
- [10] N. Tomita, H. Kosukegawa, M. Ohta, Modification of transparent poly(vinyl alcohol) hydrogel with extracellular matrix promotes effective cell adhesion for biomodeling, International Conference on Cellular & Molecular Bioengineering, Aug.1–5, 2010, pp.93–93
- [11] N. Tomita, H. Kosukegawa, M. Ohta, Development of Fundamental Techniques of Cell Adhesion on Transparent PVA-H for Biomodeling, 6th World Congress of Biomechanics, Aug.1-6, 2010, pp.483-483
- [12] N. Tomita, H. Kosukegawa, Makoto Ohta, Cell Adherence on Transparent PVA-H Coated with Extracellular Matrix, 23th European Conference on Biomaterials, Sep. 11–15, 2010, pp. n3484
- [13] Noriko Tomita, Hiroyuki Kosukegawa, Makoto Ohta, Development of Cell-Matrix Adhesion Techniques on Transparent PVA-H for Vessel Biomodeling, Seventh international Conference on Flow Dynamics Nov. 1–3, 2010, pp. 126
- [14] 冨田 典子,小助川 博之,太田 信,透明 Poly (vinyl alcohol) Hydrogel バイオモデル上への血 管細胞の効果的付着技術の開発,日本バイオマテリアル学会,2010年11月29-30日,pp.196
- [15] Noriko Tomita, Cell adhesion on PVA-H for development of biomodel with biological response, International Mini Symposium for Biomechanics and Intracranial Stent, IFS, Tohoku University, Oct.20, 2010, pp.36–37
- [16] Makoto Ohta, Development of in vitro system for intracranial stent evaluation, Swiss/Japan

International Seminar on Medical Engineering Based on Vessel Biology, in Zurich, Swiss, Nov 15–16, 2010

- [17] Noriko Tomita, Development of vessel biomodel with dynamic and biological properties by cell attachment on PVA-H, Swiss/Japan International Seminar on Medical Engineering Based on Vessel Biology, in Zurich, Swiss, Nov 15–16, 2010
- [18] A. Shirai, T. Umimoto, H. Uranuma and T. Hayase: Observation of Motion of HL60 Cells on HUVEC Cultured on a Flat Glass Plate using the Inclined Centrifuge Microscope, *Proc. ELyT Annual Workshop in Sendai 2011 (2011/2/22-24)*, USB-memory.
- [19] H. Uranuma, A. Shirai and T. Hayase: Experimental Study on Effect of Direction of Endothelial Cells' Orientation on Motion of HL60 Cells, *Proc. 7th International Conference on Fluid Dynamics* (2010/11/1-3), pp. 620–621.
- [20] H. Sato, A. Shirai and T. Hayase: Observation of Velocity of Antibody-modified HL60 Cells on Glass Plates using the Inclined Centrifuge Microscope, Proc. 4th East Asian Pacific Student Workshop on Nano-Biomedical Engineering (2010/12/15-16), pp. 62-63.
- [21] 白井, 早瀬: 傾斜遠心顕微鏡で撮影された連続画像のぶれ補正手法, 日本流体力学会年会 2010 拡張要旨集 (2010/9/9-11), CD-ROM.
- [22] 浦沼, 白井, 早瀬: 血管内皮細胞の配向が好中球の挙動に与える影響に関する実験的研究, 日本機械学会第21回バイオフロンティア講演会講演論文集 (2010/11/12-13), pp. 45-46.
- [23] 佐藤, 白井, 早瀬: 傾斜遠心顕微鏡を用いたガラス平板上におけるHL60の微視的挙動に関する基礎的研究, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集, Vol. 5 (2010/9/5-8), pp. 9-10.
- [24] G. Rosengarten and A. Komiya: Diatoms, Diffusion and Membranes, Proceedings of the Tenth International Symposimu on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, (2010), pp.60–61.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等) (特許)該当なし

(受賞) 該当なし

(マスコミ発表) 該当なし

燃焼・反応現象の解明と制御に関する研究 Research on Combustion and Chemical Kinetics

丸田 薫¹¹[†],小林 秀昭¹¹,大上 泰寛¹[†],中村 寿¹[†], 店橋 護²⁰, Sergey Minaev³, Yiguang Ju⁴¹[†]</sub> ¹⁾東北大学流体科学研究所,²⁾東京工業大学, ³⁾SB RAS, ITAM,⁴Princeton University, MAE, [†]サブリーダー

1. 研究目的

燃料が多様化し利用技術が高度化する燃焼・反応現象の解明・モデル化・制御を通じて,持続 可能な社会構築に貢献する環境負荷の低い次世代反応流体科学技術の創出を図る.

2. 研究成果の内容

高度化する燃焼・反応現象の高度利用を具現化するため、本サブテーマは①独自の実験手法による燃焼・反応現象の理解、②スーパーコンピューターを用いた詳細数値計算による燃焼・反応現象のモデル化、③融合研究による三次元燃焼現象リアルタイム解析技術を三本の柱として進めている. これら3つの研究項目について、平成22年度は所内および所外共同研究者と準備作業を中心に以下を実施した.

①燃焼・反応現象の理解(乱流燃焼特性)

- 乱流燃焼特性を計測するための標準乱流バーナーを設計・製作した.
- 標準乱流バーナーの乱流特性を計測し、東京工業大学へデータを提供するとともに、打合せ を実施した.
- 高圧下の CO/H2/O2/CO2 乱流予混合気の分光計測および乱流燃焼速度計測を実施した.[1-3, 8-11]
- 将来の乱流燃焼特性の計測に向けて、本研究所大型試験設備の補修と測定機器(ICCD センサ)の点検を実施した.

①燃焼・反応現象の理解(燃料の着火特性)

- 燃料の着火特性を計測するためのマイクロリアクタについて、高圧実験への対応を進め、高 級炭化水素燃料の多段酸化反応の圧力依存性[4, 12, 13]およびオクタン価依存性[5,6, 14-16] を明らかにした。
- IHI と共同開発してきた本マイクロリアクタが商品化され,本田技術研究所に納品された[19, 20].
- マイクロリアクタ内の化学種計測の高度化に向けて、計測手法に関する検討を実施し、ガス サンプリングによる化学種濃度分布の計測準備を実施した。

②詳細数値計算による燃焼・反応現象のモデル化

- 簡略化反応機構を汎用数値計算コードに組み込む研究を進めた. [7]
- プリンストン大学へ博士課程大学院生を派遣し, DNS コードへの詳細反応機構を組み込む 技術および計算速度高速化技術について打合せを行った.

• 各種炭化水素燃料の化学反応機構および熱力学・輸送係数の調査および評価を実施した.

③融合研究による三次元燃焼現象リアルタイム解析技術

• 三次元燃焼現象の標準装置, 粒子法解析, およびリアルタイム三次元描画アルゴリズムについて所外共同研究者(ITAM)と打合せを実施した.



図1:高圧乱流火炎のレーザー計測と画像解析



図2: n-Heptaneの多段酸化反応の圧力依存性

3. 研究目標の達成状況

研究計画に基づき、平成22年度に予定の成果を達成した.

4. まとめと今後の課題

平成22年度は研究計画に基づいた準備作業を主に実施した.平成23年度は準備作業をもとに、 実験・計算を実施することが課題である.

5. 研究成果

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- M. Kumagami, Y. Ogami, Y. Tamaki, H. Kobayashi: Numerical Analysis of Extremely-rich CH4/O2/H2O Premixed Flames at High Pressure and High Temperature Considering Production of Higher Hydrocarbons, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.5, (2010), pp.109-123.
- [2] Y. Ichikawa, Y. Otawara, H. Kobayashi, Y. Ogami, T. Kudo, M. Okuyama, S. Kadowaki: Flame Structure and Radiation Characteristics of CO/H2/CO2/air Turbulent Premixed Flames at High Pressure, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 33, (2011), pp.1543-1550.
- [3] Y. Ogami, Y. Tamaki, M. Kumagami, H. Kobayashi: Effects of Pressure on Laminar Burning Velocity for Fuel-rich CH4/O2 Flames with Steam Dilution, *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2010), pp.120-120.
- [4] Akira Yamamoto, Hiroshi Oshibe, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Stabilized three-stage oxidation of gaseous n-heptane/air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.33, (2011), 3259-3266.
- [5] Mikito Hori, Akira Yamamoto, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: Multi-stage reactions of PRF / air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2010), pp.1099-1102.
- [6] Hisashi Nakamura, Akira Yamamoto, Mikito Hori, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Zero-dimensional approach for repetitive ignition and stabilized multi-stage oxidation in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *Proceedings of the 8th Asia-Pacific Conference on Combustion*, (2010), pp.1094-1098.
- [7] M. Okuyama, S. Hirano, Y. Ogami, H. Nakamura, Y. Ju, H. Kobayashi: Development of an Ethanol Reduced Kinetic Mechanism Based on the Quasi-steady State Assumption, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.5, (2010), pp.189-199.

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [8] Y. Otawara, Y. Ichikawa, J.H. Wang, Y. Ogami, T. Kudo, M. Okuyama, H. Kobayashi: Turbulent Burning Velocity and Flame Structure of CO/H2/CO2 Premixed Flames in a High Pressure Environment, *The Seventh International Conference on Flow Dynamics*, (2010), pp.636-637.
- [9] 大上泰寛, 熊上学, 小林秀昭: 高圧、高当量比条件下における CH4/O2/H2O 予混合火炎の燃焼反応メカニズムに関する研究, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2010 講演論文集, (2010), pp.137-138.
- [10] 小林秀昭, 市川泰久, 大田原祐樹, 大上泰寛, 工藤琢, 奥山昌紀, 門脇敏: 高圧環境における

CO/H2/CO2/air 乱流予混合火炎の構造に関する研究,日本機械学会熱工学コンファレンス 2010 講演論文集, (2010), pp.121-121.

- [11] 市川泰久, 大田原祐樹, 奥山昌紀, 工藤琢, 大上泰寛, 小林秀昭, 門脇敏:高圧下における石 炭改質模擬ガスを燃料とする CO/H2/CO2/air 乱流予混合火炎に関する研究, 第48回燃焼シ ンポジウム講演論文集, (2010), pp.80-81.
- [12] Akira Yamamoto, Hiroshi Oshibe, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: Pressure Dependence of Three-stage oxidation of n-Heptane in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile, *The Seventh International Conference on Flow Dynamics*, (2010), pp.646-647
- [13] 山本 晃, 押部 洋, 中村 寿, 手塚 卓也, 長谷川 進, 丸田 薫: 温度分布制御型マイクロフロ ーリアクタにおけるn-ヘプタン三段酸化反応の圧力依存性, 48回燃焼シンポジウム講演論文 集, (2010), pp.236-237.
- [14] Mikito Hori, Akira Yamamoto, Hisashi Nakamura, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa and Kaoru Maruta: Weak flame response to various octane numbers of PRF/air mixture in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *The Seventh International Conference on Flow Dynamics*, (2010), pp.640-641
- [15] Hisashi Nakamura, Akira Yamamoto, Mikito Hori, Takuya Tezuka, Susumu Hasegawa, Kaoru Maruta: Simple numerical modeling for repetitive ignition and stabilized multi-stage oxidation in a micro flow reactor with a controlled temperature profile, *The Seventh International Conference on Flow Dynamics*, (2010), pp.434-435
- [16] 堀 幹人,山本 晃, 手塚 卓也,長谷川 進,中村 寿,丸田 薫:オクタン価変化に対する温度 分布制御型マイクロフローリアクタ内 Weak flame の応答,第48回燃焼シンポジウム講演 論文集,(2010), pp.376-377.
- その他(特許,受賞,マスコミ発表等) (特許) 該当なし

(受賞)

- [17] Young Investigator Award, Dimension Reduction Model for Auto-ignition in Micro Flow Reactor with Controlled Temperature Profile, Hisashi Nakamura, 発表年月 日:2009.5.26, 授賞式年月日:2010.12.11, The Combustion Institute (Taipei Section)
- [18] ベストプレゼンテーション賞,オクタン価変化に対する温度分布制御型マイクロフロー リアクタ内 Weak flame の応答,堀 幹人,2010.12.2,日本燃焼学会

(マスコミ発表)

- [19] IHI プレスリリース, 燃料特性評価装置「マイクロフローリアクタ」を開発、販売開始~ 自動車用エンジンのノッキングの起こりやすさの測定が容易に~, 2010.12.21
- [20] 東北大学プレスリリース, 燃料特性評価装置「マイクロフローリアクタ」を IHI と共同開発、実用化に成功, 2010.12.21

[サブテーマ3]

高応答性流体の異分野融合展開

Development of the different academic field integration of high responsible fluid

石本 淳 ¹¹, 西山 秀哉 ¹, 高奈 秀匡 ¹, 徳増 崇 ¹, 寒川 誠二 ¹, 久保田 智広 ¹ Kozo Saito², 姫野 武洋 ³, 新城 淳史 ⁴, 岡村 崇弘 ⁵, 松浦 一雄 ⁶, 井上 元 ⁷

¹⁾東北大流体研,²IR4TD, University of Kentucky, USA,³⁾東京大大学院, ⁴⁾JAXA 研究開発本部,⁵⁾KEK 素核研低温,⁶⁾東北大学国際高等,⁷⁾九州大工学研究院 [†]サブリーダー

1. 研究目的

外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体・熱流動を対象とし、その異 分野融合型研究開発手法を通して、ナノ機能性創出、反応性界面物理、環境調和型エネルギ ー、低炭素社会構築、リサイクル科学、流体-固体材料連成科学への学術的貢献と先端応用 展開を目指す.

2. 研究成果の内容

外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体・熱流動を対象とし、その異 分野融合研究を推進する.具体的には、1)サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する 研究(石本グループ)、2)環境浄化・エネルギー促進用反応性混相プラズマ流動システムの 構築(西山・高奈グループ)、3)プラズマ固体相互作用の解明とナノ界面制御(寒川・Huang グループ)、4)燃料電池内部の反応流動現象のマルチスケール解析(徳増グループ)の4グ ループにより研究を実施した.

3. 研究目標の達成状況

高応答性流体において次世代反応性流動に関連するテーマ設定と研究基盤の整備ならびに 導入的研究を実施した.原子力発電における配管内液滴衝撃エロージョン,DBD プラズマ チューブの開発等,PEFC 触媒層性能予測用マルチスケールシミュレータの開発詳しい内容 に関しては次ページ以降の各研究プロジェクト(各研究小グループ)の報告内容を参照のこ と.

サステナブル反応性微粒化・界面現象に関する研究 Study of Sustainable Reactive Atomization and Interfacial Phenomena

石本 淳 ¹[†], Kozo Saito², 姫野 武洋 ³, 新城 淳史 ⁴, 岡村 崇弘 ⁵, 松浦 一雄 ³ ¹)東北大流体研, ²IR4TD, University of Kentucky, USA, ³)東京大大学院, ⁴JAXA 研究開発本部, ⁵ KEK 素核研低温, ⁶)東北大学国際高等 [†]グループリーダー

1. 研究目的

外的要因に対し特有の反応・応答・機能性を表出化する流体の微粒化・界面現象に関して, その異分野融合型研究開発手法を通して,新エネルギー循環科学への学術的貢献と先端応 用展開を目指す.

2. 研究成果の内容

従来型電子冷却システムの限界を打破するため、本研究では、超高熱流束冷却が可能な高 機能性冷媒としてマイクロ固体窒素噴霧流利用型超高熱流束電子冷却システムを提案する. これは断熱二流体ノズル内で極低温ヘリウムガスと過冷却液体窒素を高速で衝突混合、微細 固体窒素噴霧を生成させ、これを次世代プロセッサの超高熱流束噴霧冷却システムへ適用し ようとするものである.マイクロスラッシュ噴霧は液体窒素噴霧と比較して、1.5 倍程度の 限界冷却熱流束を得ることが可能であり、10⁴ W/m² オーダーの限界熱流束値を得た.限界

3. 研究目標の達成状況

本年度の研究成果により、マイクロソリッド噴霧利用型電子冷却システムの超高熱流束冷 却特性に関する検討が行われ、1)マイクロ SN_2 粒子の直接接触による熱伝達向上、2) SN_2 粒子の衝突反射による強制対流熱伝達促進、さらには、3) SN_2 粒子の瞬時蒸発による昇華 潜熱輸送により、冷却熱伝達特性が向上していることが確認された. SN_2 噴霧と LN_2 噴霧の熱伝達特性の相違は、SN_2 粒子径がミクロンオーダであるため固相-気相への相変 化に要する特性時間が非常に短く、膜沸騰状態を噴霧が極力回避可能である点に起因してい ると考えられる.



図1 マイクロ固体窒素噴霧流超高熱流束計測用センサー

4. まとめと今後の課題

マイクロスラッシュ噴霧は液体窒素噴霧と比較して、1.5 倍程度の限界冷却熱流束を得ることが可能であり、10⁴ W/m² オーダーの限界熱流束値を得た. 限界熱流束に達するまでの時間に関しても、SN_2 噴霧により LN_2 噴霧の 1/2 の時間まで短縮可能であることを明らかにした. さらに、LN_2 噴霧の場合、限界熱流束値を達成後に熱流束が除々に減少しているが、SN_2 噴霧は、粒子がミクロンオーダであるため固相一気相への相変化に要する特性時間が非常に短く、膜沸騰状態を極力回避可能であるため限界熱流束値を達成後も冷却効果を持続可能であることが判明した. 今後は、数値解析においては、Euler-Lagrange 熱非平衡二流体モデルに基づいた基礎方程式系を構築し、計測結果の取り込みによる CFD 融合計算を行い、マイクロスラッシュ噴霧流の熱流動特性と微小粒子の噴霧流動特性を解明する予定である.

5. 研究成果

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

 Jun ISHIMOTO, Fuminori Sato and Gaku Sato: Computational Prediction of the Effect of Micro-cavitation on an Atomization Mechanism in a Gasoline Injector Nozzle, *Trans. ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 132, Issue 8 (2010) 082801 doi:10.1115/1.4000264. (Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Top 10 Most Downloaded Articles -- October 2010, 8位にランクイン) pages). 他1件

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

[2] Kozo SAITO, Abraham J. SALAZAR, Kenneth G. KREAFLE and Eric A. GRULKE, Hitozukuri and Monozukuri: Centuries' Old Eastern Philosophy to Seek Harmony with Nature, 10th International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, AFI/TFI-2010 (2010). 他 4 件

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

- (特許)特許出願名称:原子力発電所における配管減肉予測システム(出願中)
 出願番号:特願 2010-230423 (2010 年 10 月 13 日)[特許出願中].
 発明者名・出願人名: 石本 淳(東北大学),河上 晃((株)東北電力)
- (受賞) 受賞名: Cryogenics Best Paper Award 2009 (Elsevier B.V.) (日本人では初)
 受賞者名: 石本淳
 受賞論文: Jun Ishimoto, Numerical study of cryogenic micro-slush particle production using a two-fluid nozzle, *Cryogenics* (Elsevier B.V.), Volume 49, Issue 1, January 2009, pages 39-50.
 受賞年月日: 2010年7月22日, ICEC 23- ICMC 2010 (第23回国際低温工学-2010
 国際低温材料会議, ブロツワフ工科大学, ポーランド).
- (マスコミ発表) 仙台 CAT V のインターネットテレビ番組 COLUMBUS CHANNEL 出演,
 URL: http://cat-vnet.tv/category120/120_005/120_005_0001_a.html (2010 年 11 月).

静電効果による管内微粒子撹拌・搬送特性

Characteristics of Electrostatic Micro Particle Mixing and Transportation in a Tube

西山 秀哉1); 高奈 秀匡1)

1)東北大学流体科学研究所 +グループリーダー

1. 研究目的

近年,自動車の排気ガスや工場から発する煤煙などによる大気汚染は深刻化しており,環境への配慮が責務である産業界にとっては環境汚染対策が急務の課題になっている.

そこで本研究では、大気汚染微粒子の除去ならびに高効率微粒子搬送技術の確立を目指し、 空気を誘電体バリア放電(Dielectric Barrier Discharge)を用いて活性化させた管内において、 微粒子の撹拌・搬送および浄化を可能とする DBD プラズマチューブを提案するとともに、 その特性を明らかにすることを目的とする.

2. 研究成果の内容

図 1(a)に実験装置の概略図を、図 1(b)に製作した DBD プラズマチューブの断面図をそれ ぞれ示す.表裏に幅 5 mm の一対の螺旋状の銅電極を有する内径 12 mm および 20 mm の テフロン製の DBD プラズマチューブを製作し、大気圧・室温の下で放電を行った.なお、 銅電極間隔は 3 mm であり、管長は 100 mm である.電極角度 θ は 75°である.入力電圧波 形は正弦波、周波数 1.0 kHz とし、印加電圧を変化させて流れのない状態で放電を行った.

図 2(a)-(c)に電圧印加時における管内の放電発光写真を示す.印加電圧の増加に伴い,局 所的に放電部の発光が強くなるとともに手前から奥に向かって壁面近傍の空気プラズマの 発光領域が広がる様子が観測された.

図3に14.6 kVppを1.0 kHz で印加した際のDBD プラズマチューブによるアルミナ粒子 搬送の様子を示す. なお,使用したアルミナ粒子の粒径は30 nm であり,放電前に管中央 に配置した.放電を行うことにより粒子が断続的に半径方向に振動しながら軸方向に搬送さ れることが確認された.これは管壁近傍においてDBD 放電による誘起流および静電気力に より帯電微粒子が輸送されたためである.

3. 研究目標の達成状況

本研究では、静電効果を活用した管内微粒子の革新的撹拌・搬送方式を提案し、さらに実 験装置および計測系を構築した. 管内の放電特性を実験により明らかにするとともに、管内 に設置した微粒子が電圧印加時に沿面放電により生じる誘起流および帯電粒子に作用する 静電気力により管半径方向に撹拌されながら軸方向に搬送されることが示された. 以上より、 本研究目的は概ね達成されたと考えられる.

4. まとめと今後の課題

本研究では、管内に誘電体バリア放電(DBD)発生機構を有する DBD プラズマチューブを 製作し、流れがない状態でのプラズマ生成実験および粒子撹拌・搬送実験を行い、高電圧印 加時における微粒子の搬送挙動を明らかにした. 今後は、PIV 計測により、印加電圧・周波



図1(a)実験装置の概略図(b)DBDプラズマチューブ断面図



(a) $V = 0.0 \text{ kV}_{pp}$





(c) $V = 14.6 \text{ kV}_{pp}$

(b) V=14.2 kV_{pp}
 図 2 DBD プラズマチューブの発光写真





(a) V=0.0 kV_{pp}
 (b) V=14.6 kV_{pp}
 図 3 DBD プラズマチューブによるアルミナ粒子搬送の様子

数や粒子径等の作動条件に対する粒子搬送速度を明らかにし、さらに3次元数値解析により、 プラズマアクチュエータ効果および管内での微粒子や液滴の複雑挙動を詳細に解明する.

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

篠原圭介,高奈秀匡,西山秀哉:静電効果による管内反応性気体中の微粒子撹拌・搬送特性, 第88期日本機械学会流体工学部門講演会,(2010), pp.165-166.

3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

(特許)

微粒子搬送装置及びこの装置を用いた微粒子の浄化,高奈秀匡・篠原圭介・西山秀哉,2010.10.28,出願(特願 2010-242718).

(受賞)

優秀講演表彰,静電効果による管内反応性気体中の微粒子撹拌・搬送特性,篠原圭介, 2010.10.30,日本機械学会.

(マスコミ発表)

なし

[サブテーマ3, 徳増グループ]

PEFC 触媒層の酸素, プロトン輸送性能の評価シミュレータの構築 Development of Simulation Method to Evaluate the Performance of Proton and Oxygen Transport in PEFC Catalyst Layer

徳増 崇¹¹,井上 元²⁾ ¹⁾東北大学流体科学研究所,²⁾九州大学 工学研究院 化学工学部門 †グループリーダー

1. 研究目的

固体高分子形燃料電池(PEFC)は化石燃料に代わる次世代電源として期待が大いに高まっ ているが、その利用効率を増加させるには触媒層で十分な反応を生じさせる必要がある.現 在、分極が大きいのはカソード側の触媒層であり、この分極を低下させるにはカソード側触 媒層で触媒表面に十分な量のプロトン、酸素を供給する必要がある.触媒層内では触媒表面 や担持カーボンはアイオノマーと呼ばれる厚さ数 nm の高分子超薄膜で覆われており、プロ トンはこのアイオノマー内を移動して触媒表面に到達し、酸素分子はこのアイオノマーを透 過して触媒表面に到達する.このアイオノマーは厚すぎると酸素透過を阻害し、薄すぎると プロトン輸送を阻害するため、触媒層で効率よく反応を起こすためには、このアイオノマー 内部におけるプロトンおよび酸素のナノスケール輸送現象を解明し、その知見を元に触媒層 の最適設計を行う必要がある.このような理由から、本研究では東北大学側が分子動力学法 を用いてアイオノマー内のプロトン輸送現象、酸素透過現象を解明する.また九州大学側で は触媒層の多孔体構造を数値的に再現してその内部の輸送現象をマクロ方程式により解析 するシミュレータを開発し、最終的にはこのマクロシミュレータに分子動力学法より得られ たプロトン輸送、酸素透過モデルを組み込むことにより PEFC 触媒層の包括的な性能を予測 できるマルチスケールシミュレータを確立することを目的とする.

2. 研究成果の内容

まず東北大学側では, 触媒層アイオノマ ーのプロトン輸送,酸素透過現象を解析す るプログラムのプラットフォームを作成 した. 計算系は担時カーボン、白金粒子、 アイオノマー,オキソニウムイオン,水分 子及び酸素分子で構成され, 担時カーボン はグラファイト,アイオノマーは実用的に 最もよく用いられているナフィオンを想 定した. その概念図を図1に示す. 分子間 ポテンシャルとしては、炭素および白金は バネマス系で表現し, ナフィオンは Dreiding Force Field を,水分子およびオ キソニウムイオンは SPC/E ポテンシャル を用いた.本年度はこの系をアニーリング して平衡状態を作成し、アイオノマーの厚 さの評価や酸素分子の透過数を計算する ところまでを行った.



図 1: 分子動力学法によるプロトン輸送, 酸 素透過現象のシミュレーションの概念図

九州大学側では燃料電池の触媒 層内を忠実に再現できる多孔体 モデルの開発を行った.多孔体は 担時カーボンと白金触媒,アイオ ノマーで構成されており,乱数を 用いて計算領域内に敷き詰めら れる.その概念図を図2に示す. この構造から触媒層内のアイオ ノマーおよび空隙のネットワー



図 2: 触媒層多孔体のモデリング

ク情報を計算し、実効的な長さを求めてこのアイオノマー及び空間における物質輸送現象の シミュレーションを行うこととした.現在のところ、流れを支配する方程式は連続の式など マクロな式であるが、将来的には上述の分子動力学法の知見を元にモデル方程式を構築する 予定である.また、反応はButler-Volmerの式を用いて表現した.

3. 研究目標の達成状況

今年度の成果は研究打ち合わせを重ねることによりお互いの課題を抽出し、共同研究の道 筋を作ることができたこと、またそれに向けてお互いにプログラムのプラットフォームを作 成したことであり、初年度の、特に半ばから共同研究をスタートさせたことを考えると十分 に目標は達成されたと考えている.

4. まとめと今後の課題

今後はお互いにプログラムを完成させ、まず分子動力学法による解析からアイオノマー内 のプロトン輸送や酸素透過現象についてのナノスケールの知見を得ることが目標である.ま た、次のステップとしては、その知見を触媒層多孔体のシミュレータに組み込み、触媒層全 体のシミュレーションを行っていきたいと考えている.

5. 研究成果

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

[サブテーマ 3, 寒川・Huang グループ]

計算と実験の融合によるプラズマとナノ構造表面界面相互作用に関する研究 Research on Plasma-surface Interaction by Combination of Simulation and Experiment

黄啓賢¹⁾,久保田智広²⁾,寒川誠二¹⁾† ¹⁾東北大学流体科学研究所,²⁾東京大学生産技術研究所 †グループリーダー

1. 研究目的

プラズマ固体相互作用の解明とナノ界面制御のため、計算と実験の融合によるプラズマと ナノ構造表面界面相互作用を明らかにし、将来のナノデバイス開発に貢献する.

2. 研究成果の内容

固体表面におけるプラズマ・固体相互作用を直接観測するため,固体表面にセンサを組み込 んだオンウェハセンサを開発した.

電荷蓄積量センサは図1に示すように、現実のコンタクトホールに対応するアスペクト比 (深さ/穴径)2~10のホール形状の上部と下部に電極を設けた構造である.プラズマ照射下 で本センサの上下電極電位差は、コンタクトホールでの電荷蓄積ダメージに対応する.図2 に示すように、電子シェーディング効果により正電荷がコンタクトホール底部に蓄積される 様子を実測できることがすでに実証されている.この測定結果を用いてコンタクトホール内 の電位分布を計算することに成功した.さらに、コンタクトホールにプラズマからイオンが 入射した際にイオンの軌道が電位分布によって曲げられる様子をシミュレーションするこ とができた(図3).





図1:オンウェハ電荷蓄積量センサの構造

図2:チャージアップ電圧測定結果



図3:オンウェハセンサの測定結果から計算したコンタクトホール内電位分布とイオン軌道

紫外光照射損傷センサ(図4)は、紫外線照射によりSiO2、Si3N4などの絶縁膜中に生成 する電荷(電子・正孔対)を電流値として測定するデバイスである。絶縁膜の種類を変える ことで、絶縁膜のバンドギャップ及に対応し、異なる紫外線波長特性を持つセンサが得られ る。各種プラズマ照射下で、複数のセンサの測定値と紫外光分光器によって得られた紫外ス ペクトルを記録してデータベース化しておくことで、未知のプラズマ照射下での紫外スペク トルを,センサ測定値を元にニューラルネットワークを用いて予測することができた(図5).





図4:紫外線照射損傷センサ

図5:紫外スペクトルの予測結果と実測

3. 研究目標の達成状況

各種センサを用いてコンタクトホール内でのイオン軌道や紫外光スペクトルを予測することに成功し、目標を十分に達成することができたと言える.

4. まとめと今後の課題

現在のセンサには電線が接続され、プラズマ装置外部に設置した電源や計測機器との接続 が必要である.計測回路をウェハ上に設置することで電線を不要にすることで実用性をさら に高められると期待される.

5. 研究成果

1) 学術雑誌(査読つき国際会議, 解説等を含む)

- Butsurin Jinnai, Seiichi Fukuda, Hiroto Ohtake, Seiji Samukawa: Prediction of UV spectra and UV-radiation damage in actual plasma etching processes using on-wafer monitoring technique, J. Appl. Phys., 17(2010), 043302 (6 pages).
- [2] Hiroto Ohtake, Seiichi Fukuda, Butsurin Jinnai, Tomohiko Tatsumi, Seiji Samukawa: Prediction of Abnormal Etching Profile in High-Aspect-Ratio Via/Hole Etching Using On-Wafer Monitoring System, Jpn J. Appl. Phys., 49 (2010), 04DB14 (5 pages).

2) 国際会議・国内学会・研究会・口頭発表等

- [1] 荒木良亮,奥村宏克,陣内佛霖,松永範昭,寒川誠二:オンウェハモニタリングによる PE-CVD プロセスにおけるチャージングダメージの発生メカニズム解明とそのリアルタイ ム評価,2010 年秋季 第71回 応用物理学会学術講演会.
- [2] 荒木良亮,和田章良,三輪和弘,岩崎拓也,小野耕平,寒川誠二:オンウエハーセンサを用いたプラズマエッチングプロセスにおけるシース形状およびイオン軌道予測,2011 年春季第58回応用物理学関係連合講演会.
- 3) その他(特許,受賞,マスコミ発表等)

なし