

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いえない。本プロジェクトにおいて次世代反応性流体科学の学理構築を推進するためには、既存の単一領域の発展型研究から脱却し異分野融合型の新しい発想からなる研究を推進する必要がある。そこで本研究においては、現在の先進流体科学をベースとした上記3研究領域の異分野融合の発想から成る先進的アプローチを行い、次世代反応性流体科学の創成を目指すものである。

2. 研究成果の内容

本年度は研究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）

- [1] 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

- [1] 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] 富田 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 回バイオフィ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 Symposium 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)

- [1] 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.

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)

- [1] 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 CATV 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

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攪拌・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攪拌・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)

- [1] 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: オンウェハセンサー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、富田）、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。

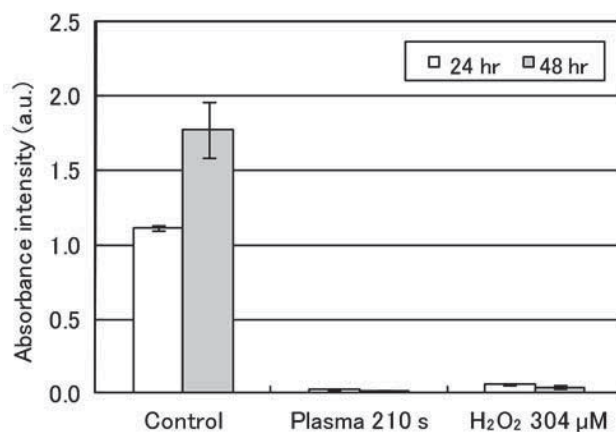


図1：プラズマ照射培地と過酸化水素添加培地に60分暴露した時の細胞生存率

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。

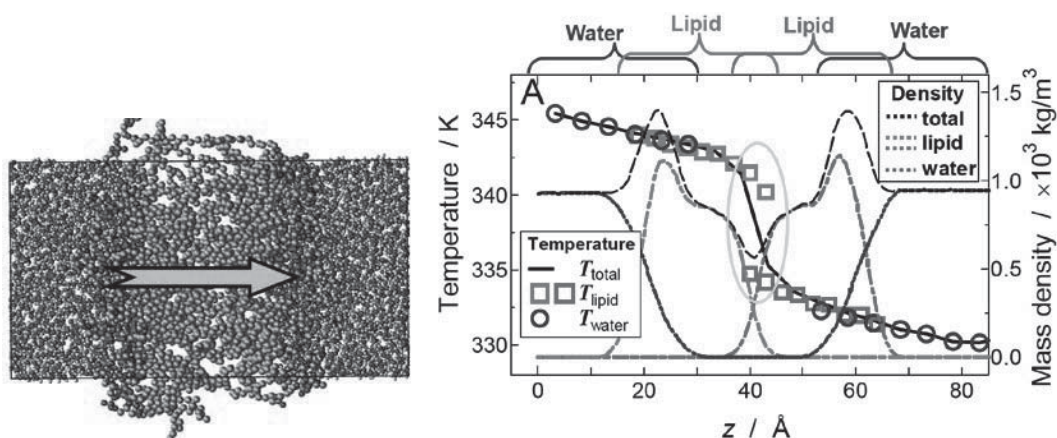


図2：水－脂質単層膜－脂質単層膜－水系の膜面垂直熱伝導. (左) 系のスナップショットと熱伝導流束, (右) 温度分布及び密度分布

③生体適合材料と細胞の相互作用 (太田, 富田)

生体適合性材料を用いた生体軟組織の生体外循環システムモデル開発のため, 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).

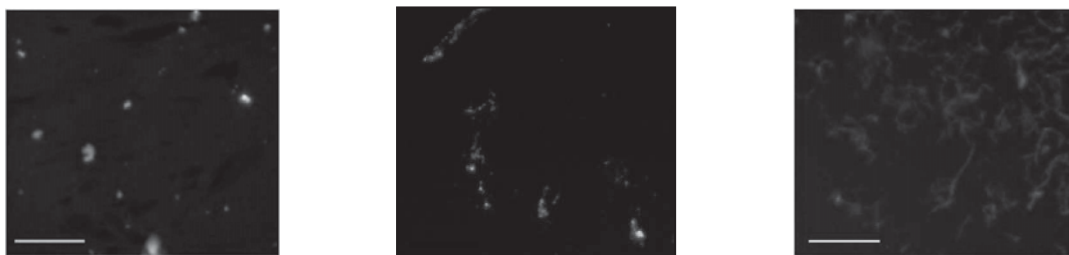


図3：種々の細胞外基質による PVA-H 上の接着の様子

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.

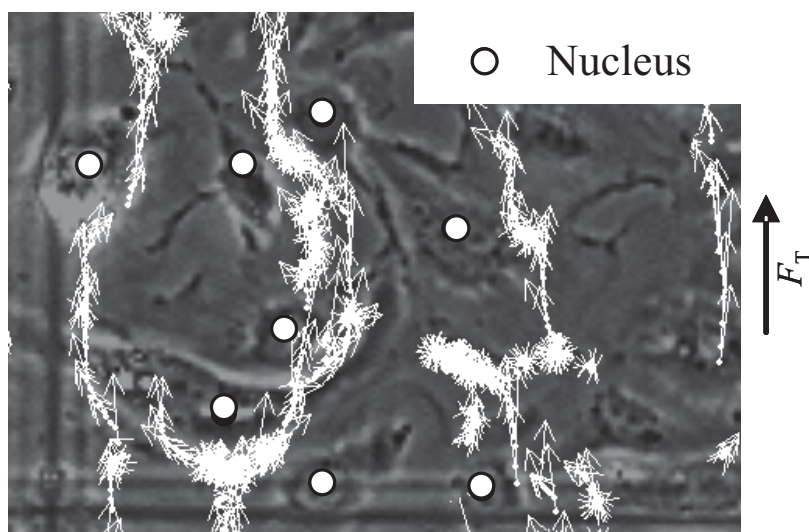


図4：PTVによる瞬間速度ベクトルを用いて描いたHL60の軌跡

⑤物質・熱の細胞膜輸送現象の実験的研究（小宮）

流体研既有的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い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。

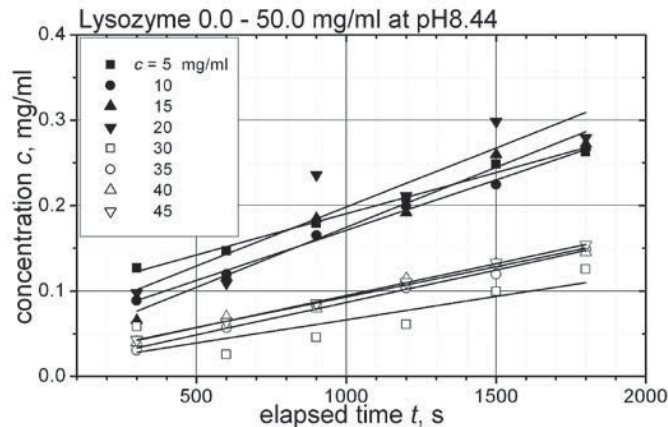


図5：Relationship between elapsed time and the value of $x^2/4\xi^2$.

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，富田）

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，富田）

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）

- [1] 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

- [1] 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] 富田 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 回バイオフィ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 Symposium 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]

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

丸田 薫^{1†}, 小林 秀昭¹, 大上 泰寛¹, 中村 寿¹,
店橋 護², Sergey Minaev³, Yiguang Ju⁴
¹東北大学流体科学研究所, ²東京工業大学,
³SB 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階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。

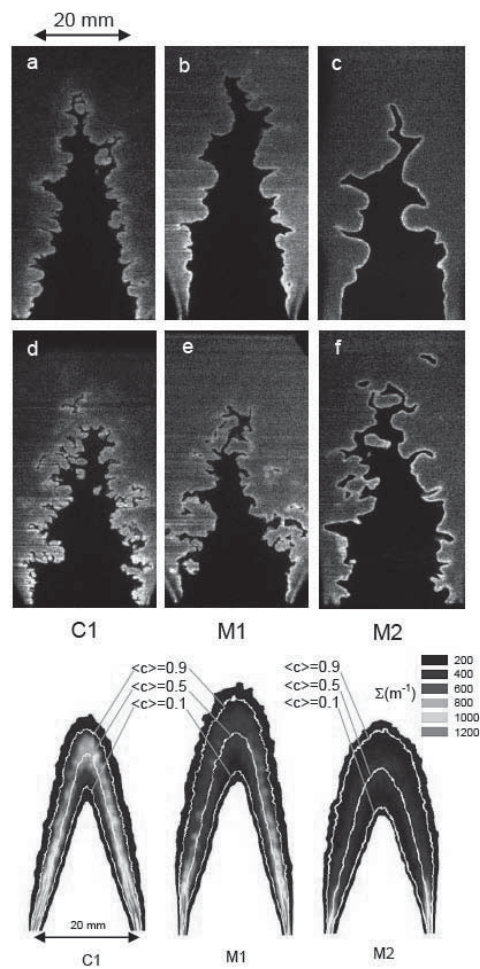


図 1：高圧乱流火炎のレーザー計測と画像解析

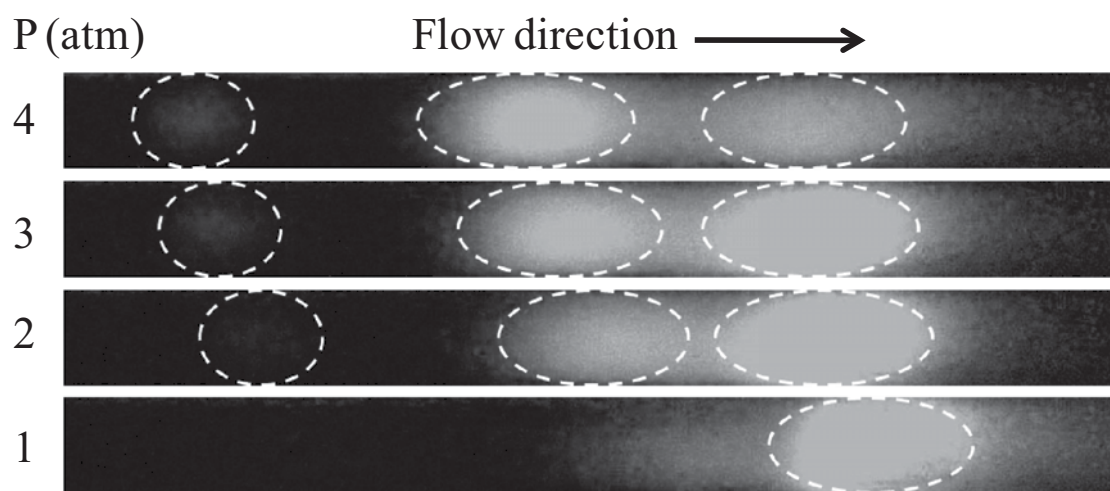


図 2：n-Heptane の多段酸化反応の圧力依存性

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）

- [1] 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.

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]

高応答性流体の異分野融合展開

Development of the different academic field integration of high responsible fluid

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

¹⁾東北大流体研, ²⁾IR4TD, 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⁾東北大学流体研, ²⁾IR4TD, 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

†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、 10^4 W/m^2 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 SN₂ 粒子の直接接触による熱伝達向上、2) SN₂ 粒子の衝突反射による強制対流熱伝達促進、さらには、3) SN₂ 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。SN₂ 噴霧と LN₂ 噴霧の熱伝達特性の相違は、SN₂ 粒子径がミクロンオーダーであるため固相-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。

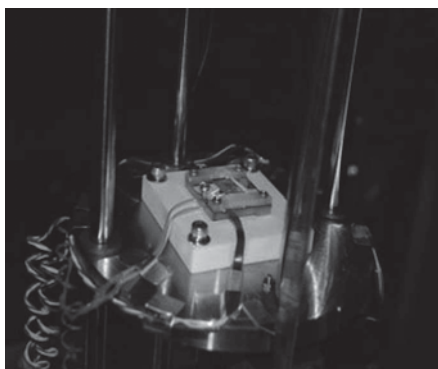


図1 マイクロ固体窒素噴霧流超高熱流束計測用センサー

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、 10^4 W/m^2 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徐々に減少しているが、SN_2 噴霧は、粒子がミクロンオーダーであるため固相－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）

- [1] 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 CATV 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攪拌・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、微粒子の攪拌・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、局部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攪拌・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攪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攪拌・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

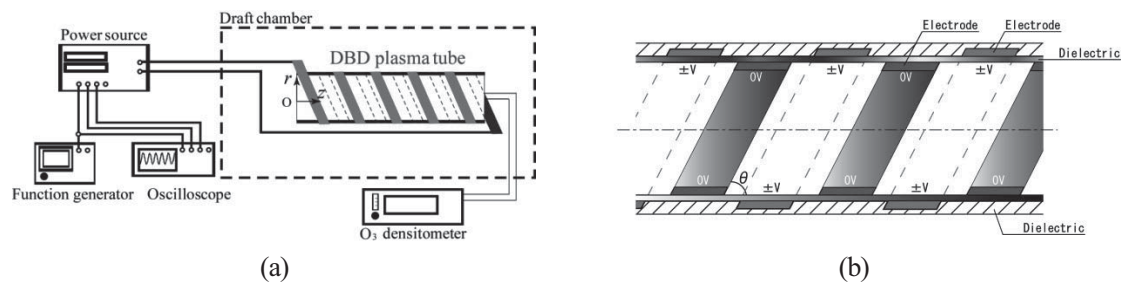


図 1 (a) 実験装置の概略図 (b) DBD プラズマチューブ断面図

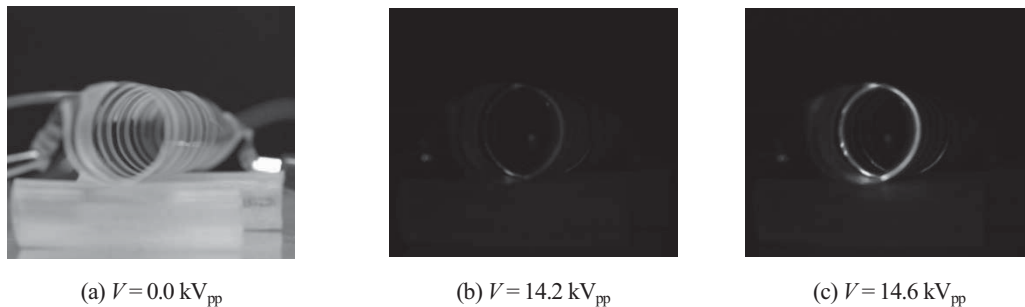


図 2 DBD プラズマチューブの発光写真



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攪拌・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攪拌・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

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^{1)†}, 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が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。計算系は担持カーボン、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、担持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。

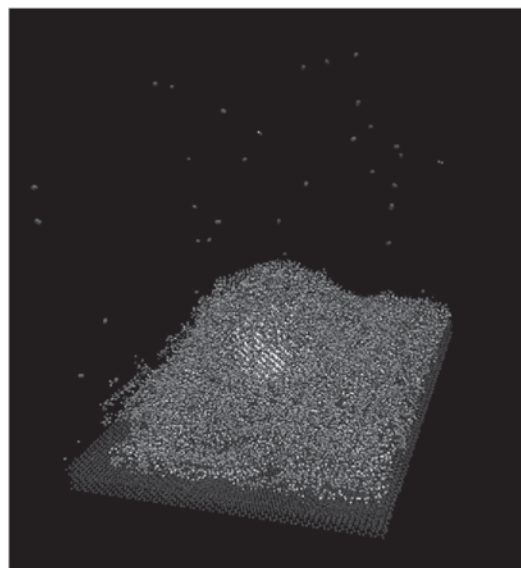


図 1: 分子動力学法によるプロトン輸送、酸素透過現象のシミュレーションの概念図

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。多孔体は担持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ク

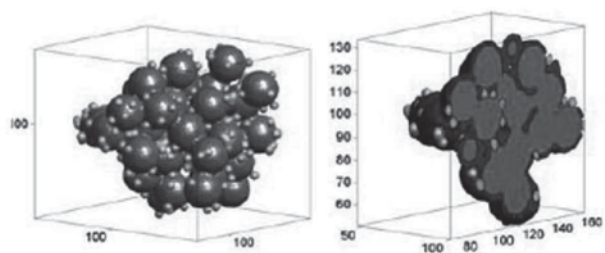


図2: 触媒層多孔体のモデリング

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

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

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).

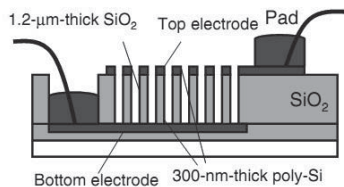


図1: オンウェハ電荷蓄積量センサの構造

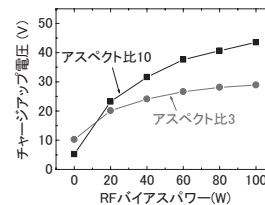


図2: チャージアップ電圧測定結果

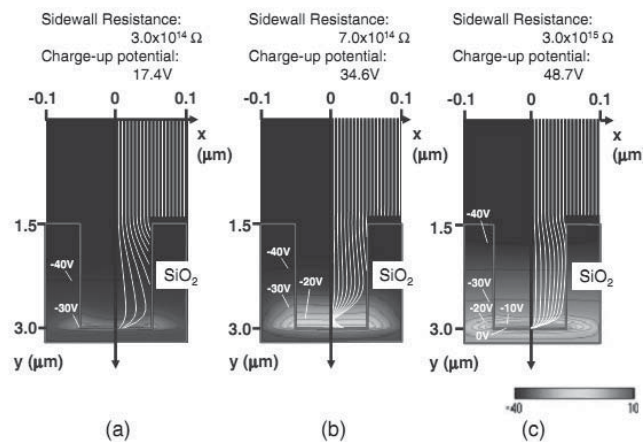


図3: オンウェハセンサの測定結果から計算したコンタクトホール内電位分布とイオン軌道

紫外光照射損傷センサ（図 4）は、紫外線照射により SiO_2 , Si_3N_4 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）。

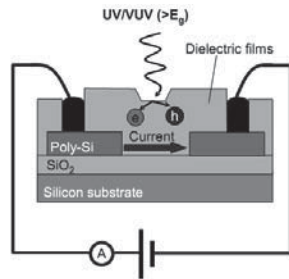


図 4：紫外線照射損傷センサ

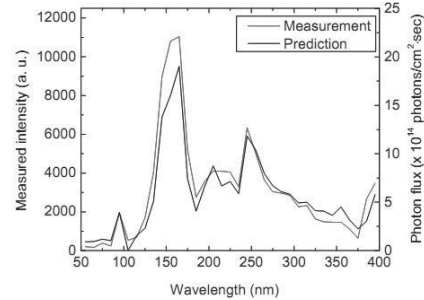


図 5：紫外スペクトルの予測結果と実測

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）

- [1] 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: オンウェハ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