

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709013

研究課題名(和文) 局所物性分布の複合的利用による新規熱物質輸送手法の提案

研究課題名(英文) A novel heat and mass transport based on local property modulation

研究代表者

元祐 昌廣 (Motosuke, Masahiro)

東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号：80434033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、微小空間での粘性、界面張力、電気特性などの物性を局所的に変化させることで、マイクロ空間で顕在化する物性の影響を積極的かつ複合的に利用する熱物質輸送技術を体系化させ、新たな工学的応用を提案する。熱・光・電場などの外部刺激に応答する物性の局所変化を利用することで、マイクロ流路内の流れ、粒子、液滴を制御することに成功し、外部環境の変化に適応してその熱物質輸送特性や性能を著しく変化させる、新たな物性利用スマート熱物質輸送制御技術の体系化を行った。また、熱流動場を定量化するための3次元計測法の開発も併せて実施した。

研究成果の概要(英文)：This study investigated a potential of local property modulation for a novel heat and mass transport scheme in microscale. Thermal, optical and electric field were used as external sources to modulate the viscosity, interfacial tension or electrical properties of the system. The control of fluid flow, particle and droplet in microfluidic platform was confirmed. Also, measurement techniques of three-dimensional flow and liquid temperature were developed as the evaluation method of the property-induced phenomena. As a result, the concept of the property-induced transport control was verified.

研究分野：マイクロ熱流体工学

キーワード：物性制御 マイクロナノ伝熱 マイクロデバイス

1. 研究開始当初の背景

微細加工技術を用いたマイクロ熱流体デバイスは、環境分析、生化学や医療診断等の応用を目指して活発に研究が行われており、高い関心を集めている。超小型の測定・分析装置は、高度高齢化社会における低リスクでのヘルスマonitoring、あるいは災害後の状況での環境変化や健康被害の詳細な管理や、分散型環境モニタリングなどに不可欠であり、安全・安心な将来社会の実現のためには、マイクロ熱流体デバイスを用いたポータブル機器に対する期待・必要性はさらに高まることが予想される。それに伴い、超微細デバイスにおける熱物質輸送技術もより多彩かつ効率的な制御が求められる。シンプルな構造で熱物質輸送を制御するには、従来の MEMS 応用型ではなく、新たな発想に基づいた制御手法が必要だと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、微小空間での粘性、界面張力、濡れ、電気特性などの物性を局所的に変化させることで、マイクロ空間で顕在化する物性の影響を積極的かつ複合的に利用する熱物質輸送技術を体系化させ、新たな工学的応用を提案することを目的とする。熱・光・電場などの外部刺激に応答する物性の局所変化を利用することで、外部環境の変化に適応してその熱物質輸送特性や性能を著しく変化させる、新たな物性利用スマート熱物質輸送制御技術体系の新機軸を世界に先駆けて打ち出す。

3. 研究の方法

まず、基本的な実験装置の開発及び計測装置の高度化を重点的に実施し、熱流動場の 3 次元計測を通じて各種現象のモデリングを行った。そして、開発した実験・計測装置のさらなる高度化、そして多彩な物性分布制御の可能性検証として、界面操作ならび物質構造変化の操作を行った。最終的には、物性分布利用による熱流動制御を新規技術として体系化させるとともに、研究成果を社会に広く公開することを目標とした。

4. 研究成果

以下に、研究成果を簡単に述べる。

・任意パターン光照射装置の開発

微小空間内に任意形状の光パターンを照射して、対応した温度分布を形成するため、フォトマスクによるパターン光をデバイスに集光照射できるような顕微光照射システムを開発した。それを既存の温度・速度場計測用マイクロ PIV/LIF システムに開発した側方観察光学系を組み込み、3 次元計測用に発展させ、同一装置で水平・垂直方向の 3 次元現象の計測が可能な系を構築した。デバイスには、透明導電膜 ITO をパターンニングした電極基板と PDMS 流路でデバイス作成することで、光照射と電場印加を同時に可能とした。

・3次元熱流動場の計測

下方観察による微粒子画像からデフォーカス度より流路内の微粒子の 3 次元位置を再構成する 3 次元計測に関して、予備の実験を行い、その有効性を明らかにした。液中の物性分布および誘起流動場のシミュレーションを実施し、電極形状や光照射位置を変化させた場合の影響を明らかにした。その際、電気・光単体では実現できないような、電極基板へ流れ込むような、表面反応の促進になるような循環流の形成が可能であることを見出した。また、LIF はプローブ分子濃度や照射光ムラの影響を受けやすいため、偏光解消を用いた温度測定の可能性について検討を行い、流体温度分布の計測が可能であることを示すことに成功した。溶媒粘度の影響や、分子サイズの依存性などを温度依存性ととも調べた。また、従来の単色 LIF では計測が困難な複雑形状流路や、異なる pH 溶液の合流部での温度分布計測を実施し、その有用性を評価した。

・光・電場誘起熱流動場の定量化

櫛歯型 ITO 電極に交流電場を印加し、そこへスポット状、ライン状の加熱光パターンを照射したときに誘起される流動を可視化し、電気・光熱変化の複合利用による流動の存在を確認した。また、光照射の ON/OFF や強度の時間変化など、過渡状態について、液中の熱拡散時間を基準として熱流動場の時間応答を調べた。照射光のパターンを多点スポットや縞状などに変化させ、併せて電界強度や印加周波数も変化させて熱流動場を計測し、物理現象のモデリングを行った。

・界面操作による液滴制御

液液界面に温度分布を付与した場合に誘起されるマランゴニ対流を利用し、光加熱を用いたりモート液滴操作を行い、分散相をオレイン酸、連続相を水とした場合の直径 10-50 μm の液滴に加熱光パターンを照射することで、液滴の移動が可能であることを示した(図 1)。そして、その際に液滴に作用する力を導出する物理モデルを構築し、計測した温度場より駆動力分布を定量化することができた。

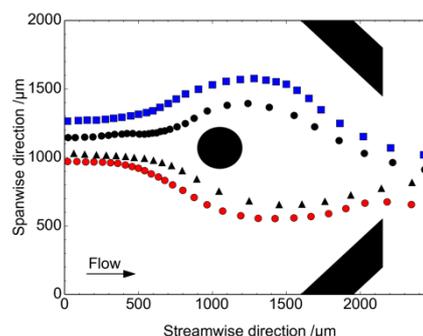


図 1 光熱効果による液滴軌道制御

また、加熱に依らず光に由来したシス-トランス間分子構造変化で界面張力が変化する界面活性剤を用いた液滴のリモート操作についても取り組み、マイクロ流路において界面が移動の様子を計測した。この活性剤は照射光の波長で界面張力を可逆的に変化させることが可能であり、液滴の光輸送としての可能性を有することを見出した。

・刺激応答性物質を用いた能動的熱流動制御

カチオン性界面活性剤と対イオンを混入した ppm オーダーの希薄高分子水溶液において、局所加熱によるミセル構造変化に伴う粘性変化が引き起こす流動場の変化を実験的に計測し、速度場が大きく歪むことを明らかにした(図2)。

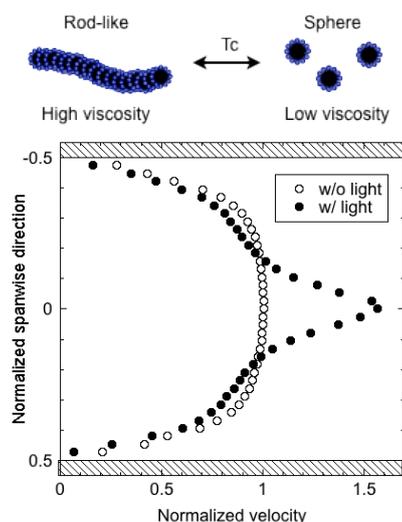


図2 光熱誘起物性分布によるマイクロ流動変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- [1] 武藤真和, 星麻美, 山本誠, 元祐昌廣, 光熱界面流れによる微小液滴の操作, *可視化情報学会論文集*, 査読有, Vol. 36, pp. 219-225 (2016) DOI: 10.3154/tvsj.36.8
- [2] M. Muto, M. Yamamoto, M. Motosuke, A noncontact picoliter droplet handling by photothermal control of interfacial flow, *Analytical Sciences*, 査読有, Vol. 32, pp. 49-55 (2016) DOI: 10.2116/analsci.32.49
- [3] H. Kotari, M. Motosuke, Simple applications of microparticle transportation by tender optical scattering force, *Microfluidics and Nanofluidics*, 査読有, Vol. 18, pp. 549-558 (2015) DOI:10.1007/s10404-014-1459-y
- [4] T. Iwana, K. Suenaga, H. Shirai, Y. Kameya, M. Motosuke, S. Honami, Heat transfer and

fluid flow characteristics of impinging jet using combined device with triangular tabs and synthetic jets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 査読有, Vol. 68, pp. 322-329 (2015)

DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.05.007

- [5] Y. Koide, R. Sasaki, Y. Kameya, M. Motosuke, A burst wave-induced plasma actuator for controlling separated flow over a backward-facing step at low Reynolds numbers, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 査読有, Vol. 66, pp. 72-78 (2015) DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.03.016
- [6] M. Motosuke, K. Yamasaki, A. Ishida, H. Toki, S. Honami, Improved particle concentration by cascade AC electroosmotic flow, *Microfluidics and Nanofluidics*, 査読有, Vol. 14, pp. 1021-1030 (2013) DOI: 10.1007/s10404-012-1109-1
- [7] H. Kotari, M. Motosuke, S. Honami, Particle sorting by optical radiation pressure with low energy density, *La Houille Blanche*, No. 4, pp. 72-78 (2013) DOI: 10.1051/lhb/2013036

[学会発表] (計 49 件)

- [1] S. Nomura, Y. Yoshida, M. Motosuke, Wall shear stress modulates rolling behaviors of U-937 cells on E-selectin, *8th MMB*, 2016.4.21, Seoul (Korea).
- [2] 執行悠太, 相田拓也, 元祐昌廣, 蛍光異方性を用いた流体温度マッピング, 化学とマイクロ・ナノシステム学会 第33回研究会, 2016.4.26, 東京大学生産技術研究所 (東京)
- [3] 重田晃佑, 西分康次郎, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 2層マイクロ流路を用いた3次元粒子集束法の開発, *日本機械学会流体工学部門講演会*, 2015.11.8, 東京理科大学 (東京)
- [4] 西山想, 鳥越幹二郎, 酒井健一, 酒井秀樹, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, ナノ粒子の反応制御のための安定した濃度勾配場の形成, *日本機械学会流体工学部門講演会*, 2015.11.8, 東京理科大学 (東京)
- [5] 吉田佳広, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 白血球の回転挙動計測, *日本機械学会流体工学部門講演会*, 2015.11.7, 東京理科大学 (東京)
- [6] 相田拓也, 執行悠太, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 蛍光異方性を利用した微小流体温度場イメージング法の開発, *日本機械学会流体工学部門講演会*, 2015.11.7, 東京理科大学 (東京)

- [7] T. Shimizu, M. Tsujimori, Y. Kameya, T. Suzuki, R. Abe, M. Motosuke, Two-step dielectrophoresis for improved separation of cancer cells with similar size based on dielectric properties, *19th micro-TAS*, 2015.10.27, Gyeongju (Korea)
- [8] T. Aida, Y. Kameya, M. Motosuke, Microfluidic temperature imaging based on fluorescent anisotropy, *19th micro-TAS*, 2015.10.26, Gyeongju (Korea)
- [9] 元祐昌廣, マイクロ流路での界面流れ制御の可能性, 第5回CSJ化学フェスタ, 2015.10.13, タワーホール船堀 (東京)
- [10] M. Muto, Y. Kameya, M. Yamamoto, M. Motosuke, Picoliter droplet control by photothermal interfacial flow, *Droplet 2015*, 2015.10.7, Enschede (Netherlands)
- [11] Y. Yoshida, Y. Kameya, M. Motosuke, Evaluation for rolling behavior of cell-sized particle by lateral observation in microchannel, *11th PIV*, 2015.9.15, Santa Barbara (USA)
- [12] 荻野哲也, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, レーザ誘起光熱効果を利用した液体マニピュレーション, 日本流体力学会年会, 2015.9.27, 東京工業大学 (東京)
- [13] 清水孝充, 辻森昌義, 鈴木利宙, 亀谷雄樹, 安部良, 元祐昌廣, 2段階誘電泳動を用いた腫瘍細胞の連続的分離, 第43回可視化情報シンポジウム, 2015.7.21, 工学院大学 (東京)
- [14] 相田拓也, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 蛍光異方性を用いた流体温度場イメージング法の開発, 第52回日本伝熱シンポジウム, 2015.6.3, 福岡国際会議場 (福岡)
- [15] M. Tsujimori, T. Shimizu, Y. Kameya, T. Suzuki, R. Abe, M. Motosuke, Separation of cells using two-step dielectrophoresis, *7th ISMM*, 2015.6.9, Kyoto University (Kyoto)
- [16] M. Motosuke, H. Kotari, Fuss-free microfluidic particle transportation by optical scattering force, *4th μ Flu*, 2014.12.11, Limerick (Ireland)
- [17] 市村大亮, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 表面反応促進のためのエレクトロサーマル効果とフォトサーマル効果の複合利用, 日本機械学会熱工学コンファレンス, 2014.11.9, 芝浦工業大学 (東京)
- [18] 相田拓也, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 温熱治療用金ナノロッドのフォトサーマル効果の評価, 日本機械学会熱工学コンファレンス, 2014.11.9, 芝浦工業大学 (東京)
- [19] Y. Koide, R. Sasaki, Y. Kameya, M. Motosuke, Effect of applied voltage of burst wave induced plasma actuator on backward-facing step flow control, *25th ISTP*, 2014.11.6, Krabi (Thailand)
- [20] M. Muto, M. Motosuke, Visualization of manipulation force field for microfluidic droplet by photothermal interfacial flow, *18th micro-TAS*, 2014.10.27, San Antonio (USA)
- [21] 重田晃佑, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 光ファイバーが不要なフローサイトメーターチップの開発, 第6回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2014.10.22, くにびきメッセ (松江)
- [22] 砂田大樹, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 液体光スイッチング機構を備えた光放射圧による粒子輸送デバイスの開発, 第6回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2014.10.22, くにびきメッセ (松江)
- [23] 西分康次郎, 重田晃佑, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 結像異方性を利用した粒子の3次元追跡法の開発, 化学とマイクロ・ナノシステム学会第30回研究会, 2014.10.3, 北海道大学 (札幌)
- [24] 西分康次郎, 若山寛武, 亀谷雄樹, 元祐昌廣, 結像異方性を利用したマイクロ3D3C流速測定法の校正関数に関する検討, 日本流体力学会年会, 2014.9.15, 東北大学 (仙台)
- [25] M. Muto, M. Motosuke, Microfluidic droplet control by photothermal interfacial flow, *4th MNF*, 2014.9.9, London (UK)
- [26] D. Sunada, M. Motosuke, Optofluidic particle transportation by radiation pressure with switching functionality, *5th ISMM*, 2014.7.31, Singapore (Singapore)
- [27] 西山想, 山崎慶一, 元祐昌廣, 交流電気浸透流を用いたナノ粒子濃縮デバイスの性能評価, 第42回可視化情報シンポジウム, 2014.7.22, 工学院大学 (東京)
- [28] 吉田佳広, 元祐昌廣, 微小流路内を流れる粒子の並進及び回転挙動の計測, 第42回可視化情報シンポジウム, 2014.7.22, 工学院大学 (東京)
- [29] Y. Yoshida, M. Motosuke, Measurement of particle rolling behavior in microchannel by

- lateral observation, *16th ISFVI6*, 2014.6.27, Okinawa Convention Center (Okinawa)
- [30] K. Nishiwake, H. Wakayama, M. Motosuke, A simple 3D3C velocimetry in microscale using single camera based on anisotropic defocus method, *16th ISFVI6*, 2014.6.26, Okinawa Convention Center (Okinawa)
- [31] 武藤真和, 元祐昌廣, 光熱界面流れによる微小液滴操作, 第51回日本伝熱シンポジウム, 2014.5.21, 浜松アクロシティ (浜松)
- [32] M. Motosuke, An optical toolbox for controlling bubbles and droplets in microfluidic system, *AnalytiX-2014*, 2014.4.26, Dalian (China)
- [33] M. Motosuke, A potential of light-induced non contact control of droplet in microfluidic platform, *ICSS 2013*, 2013.12.16, Las Vegas (USA)
- [34] M. Motosuke, M. Muto, Estimation of manipulation force for droplet in O/W system under photothermal interfacial control, *66th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics*, 2013.11.24, Pittsburg (USA)
- [35] M. Muto, M. Motosuke, An evaluation of manipulation force for droplet by photothermal Marangoni effect, *The 12th FLUCOME*, 2013.11.22, Nara (Japan)
- [36] 神足英春, 元祐昌廣, 広域照射による光放射圧を用いた簡易微粒子輸送法, 第5回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 2013.11.7, 仙台国際会議場 (仙台)
- [37] K. Yamasaki, M. Motosuke, Continuous concentrator for nanoparticle based on cascade AC electroosmotic flow, *17th micro-TAS*, 2013.10.29, Freiburg (Germany)
- [38] M. Muto, M. Motosuke, On-demand photothermal patterning of pathway for picoliter droplet, *17th micro-TAS*, 2013.10.29, Freiburg (Germany)
- [39] H. Wakayama, M. Motosuke, Defocusing characteristics in anamorphic and isotropic imaging of particles in microchannel for three-dimensional flow measurement, *4th ISMNT*, 2013.10.11, Shanghai (China)
- [40] 元祐昌廣, 市村大亮, 流体物性の温度依存性を利用したマイクロ対流現象, 日本流体力学会年会, 2013.9.13, 東京農工大学 (東京)
- [41] M. Motosuke, H. Kotari, Colloidal particle sorting with scattering force via planar waveguide, *IEEE Optical MEMS and Nanophotonics*, 2013.8.21, Kanazawa (Japan)
- [42] H. Kotari, M. Motosuke, Simple particle sorting in microfluidic system by optical scattering force with large area irradiation, *3rd International Conference on Optofluidics*, 2013.8.15, Hong Kong (China)
- [43] 武藤真和, 元祐昌廣, 光熱マランゴニ効果を用いた微小液滴操作時における駆動力の評価, 第41回可視化情報シンポジウム, 2013.7.16, 工学院大学 (東京)
- [44] A. Ishida, D. Ichimura, M. Motosuke, 3D velocity measurement by orthogonal-plane micro PIV for electrokinetic enhancement of surface reaction, *ASME 11th ICNMM*, 2013.6.19, Hokkaido University (Sapporo)
- [45] M. Motosuke, Photothermal actuation for flexible control of microfluidic bubbles and drops, *ASME 11th ICNMM*, 2013.6.19, Hokkaido University (Sapporo)
- [46] 塚田拓也, 元祐昌廣, プレーナー光学素子を用いた微粒子からの光散乱検出デバイスの開発, 第50回日本伝熱シンポジウム, 2013.5.31, トラストシティカンファレンス・仙台 (仙台)
- [図書] (計 0 件)
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)
- [その他]
- 元祐研究室ホームページ
<http://www.rs.tus.ac.jp/motlab/jp/html/achievement.html>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
 元祐 昌廣 (MOTOSUKE, Masahiro)
 東京理科大学・工学部・准教授
 研究者番号: 80434033
- (2) 研究分担者
 なし
- (3) 連携研究者
 なし