

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 24 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656049

研究課題名（和文）光熱パターニングによる微小液滴実験プラットフォームの提案

研究課題名（英文）A novel experimental platform of micro droplets based on photothermal patterning

研究代表者

本阿弥 眞治 (HONAMI SHINJI)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：30089312

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、光熱パターニングで誘起される界面張力勾配流の制御によって液滴をリモート操作する技術を開発し、微細流路が不要な微小液滴流体回路用プラットフォームを構築することである。縮小露光によって任意形状の光パターンをマイクロ流路中の液体に照射して光熱効果を生じさせ、パターンに沿った局所界面流動の励起、さらには光で形成した経路に沿った液滴の輸送が可能であることを確認し、その有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：

A technique to control microdroplets in a microchannel network based on the interfacial flow due to interfacial-tension gradient generated by photothermal patterning was investigated. The aim of this study is to suggest a novel 'channel-less' experimental platform of droplet-based microfluidics. Generation of photothermal effect using a reduced-projection exposure system, excitation of local interfacial flow by the patterned light irradiation and transportation of droplet along the light-induced trajectory were confirmed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	0	1,800,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	420,000	3,620,000

研究分野：熱流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：マイクロ流体、混相流、界面張力、界面制御、マランゴニ対流、フォトサーマル効果

1. 研究開始当初の背景

マイクロ流体デバイスは医療・生化学・分析等の広範な分野で注目され、現象解明から応用化へと研究段階が移行しつつある一方、微量・高効率といった特性をさらに活用すべ

く、微小液滴を反応場とするデジタルマイクロフルイディクスが次世代型技術として台頭している。

微小液滴の流動は、表面張力や吸着、固体壁との相互作用、界面安定性等の影響が強く、

数値解析は单相流ほど容易ではないため、実験による解明が望まれる。流路内の液滴輸送には界面の適切な制御が効果的なことが知られている。しかし、電場を利用するには微細電極の設置が必要で、流路壁面の親水/疎水制御を行う場合には液滴の種類毎に壁との相互作用を考慮する必要がある。また、液滴の軌道や操作は、本質的に電極や流路の形状で決定されてしまうため、各種操作を切り替えて同一デバイスで行う、というような柔軟性を有していない。多彩な液滴の操作が可能な実験プラットフォームの実現は必要と考え、本研究課題の提案に至った。

2. 研究の目的

本研究の目標は、光熱パターンニングで誘起される界面張力勾配流の制御によって液滴を操作する技術を開発し、微細流路が不要な微小液滴流体回路（デジタルマイクロfluidics）用プラットフォームを構築し、提案することである。概念図を図1に示す。本研究で提案する実験プラットフォームは以下の特徴を有する。

- ・ 界面張力勾配の制御による液滴の外部からの非接触操作
- ・ 光照射パターンによって液滴軌道を制御可能なため微細流路構造が不要なこと
- ・ 照射パターンの選択によって液滴操作の切り替えが可能な柔軟性
- ・ 広範な流体に適用可能

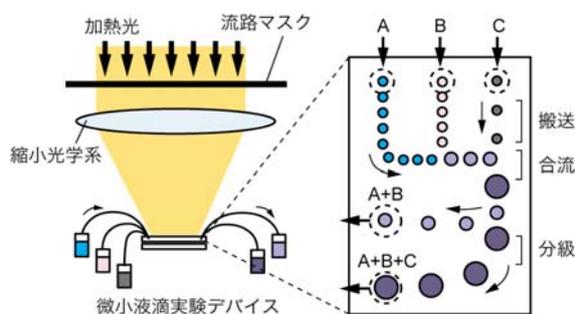


図1 光熱パターンニングによる微小液滴実験プラットフォームの概念図。

3. 研究の方法

光パターン照射に対応した温度場を流体に誘起し、温度差による液液界面張力勾配による対流によって液滴を誘導する、微小液滴操作技術を確立し、微細流路壁を伴わない液滴ベースのマイクロ流体デバイスを開発するため、以下に示す方法で研究を行う。

(1) パターン露光光学系の構築

マイクロ流路中の液体中に任意パターンの光熱効果を生じさせるための光学系を構築する。

(2) 界面熱流動場の計測

光熱効果によって界面に発生するマランゴニ対流を計測し、その温度・速度場を明らかにする。

(3) 液滴操作の特性評価

光熱パターン照射による液滴輸送について、その移動速度や挙動を詳細に計測し、その特性を精密に評価する。搬送・捕捉といった各種操作を行うための光照射パターンを考案し、液滴挙動の観察・計測を通じて最適化を計る。そして液滴の動作より駆動力を求め、本手法の適用範囲を明らかにする。

4. 研究成果

本研究で得られた研究成果は以下のようによまとめられる。

(1) パターン露光光学系の構築

ファイバーレーザーからの光を、フォトマスクを経由して、顕微鏡の焦点面に縮小露光させるための光学系を構築した(図2)。光源には波長532nmのDPSSレーザーを用い、クロム蒸着ガラスに電子線描画装置によってパターンを形成したものをマスクとして用いた。縮小露光率はレンズによって4:1~60:1まで選択可能で、所望の光パターン照射が実現できる構成とした。

光照射時の液中温度分布を、吸収染料を添加した水と感温蛍光色素を用いたmicro-LIFによって計測し、マイクロ流路内の温度場が対流に比べて伝導が支配的であることを実験的に明らかにした。

(2) 界面熱流動場の計測

光熱効果による温度変化で誘起される界面流を把握するため、オレイン酸と水の液

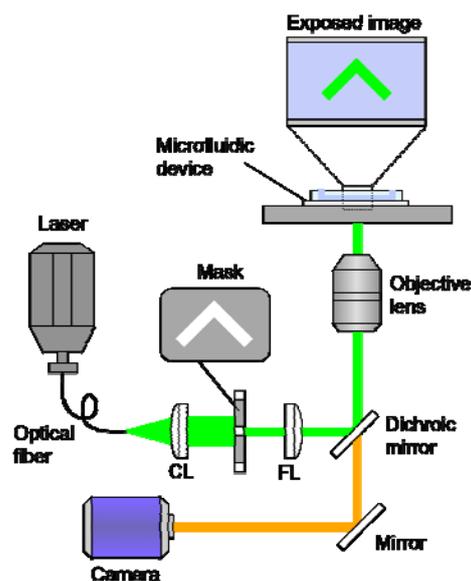


図2 光熱パターンニングシステム。

液界面周辺にレーザー光を集光照射し、その際の界面近傍に誘起される流動を、トレーサ粒子の挙動から micro-PTV によって計測した。その結果、温度分布による界面張力勾配による流動を確認し、フォトサーマル効果による界面流動制御の有効性を確認した。また、液滴安定化のために添加する界面活性剤の種類や濃度によって界面張力の温度依存性が変化し、反転する場合もあることを明らかにし、界面活性剤が液滴操作に多大な影響を与えることを示した。

また、光照射時の界面近傍の温度場を詳細に明らかにするためには、水相だけでなく油相の温度場を計測する必要がある。そこで、一般に作動流体が水に限定されていた LIF の測定対象を拡大すべく、油相の温度場計測法の開発を行った。その結果、蛍光発光強度が室温付近で $-2\%/K$ の温度感度を有する油溶性色素の存在が明らかとなり、染料を溶解させたオレイン酸の温度-蛍光強度の関係の定量化に成功した。しかしながら、研究実施期間内に水相・油相温度場の同時計測にまでは至らなかった。

(3) 液滴操作の特性評価

流体デバイスとして機能の核となる、搬送、捕捉などの操作を行うための光照射パターンを検討し、液滴挙動を詳細に計測した。マイクロ流体デバイスには、独自に開発した、2層の PDMS 流路から構成されるチップを用いた。分散相にオレイン酸、連続相に水を用いて界面活性剤に Tween 20 を添加した場合、界面張力の温度依存性は正となるため、界面は高温部へ移動し、結果として液滴は低温部へと、光から離れるように移動することを確認した。図3に示すように、I型形状の流れに対して斜めに照射すると液滴の連続ソーティングが可能であることを示した。

続いて、各種液滴操作における光出力や液滴サイズ依存性の評価、さらに操作性能の評価を行った。図4に示すように、対向するI型パターンを斜めに照射して液滴を中央へ集合させる操作について、その輸送距離を計測した。結果を図5に示す。光照射によって液滴が中央開口部付近を通過するように輸送されていることを確認し、

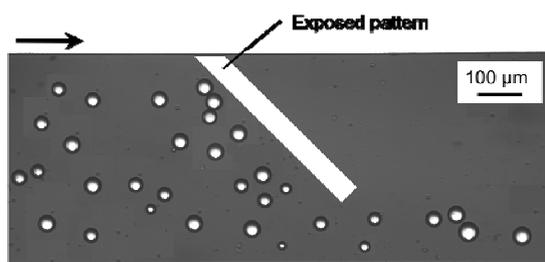


図3 光照射による液滴ソーティングの様子。

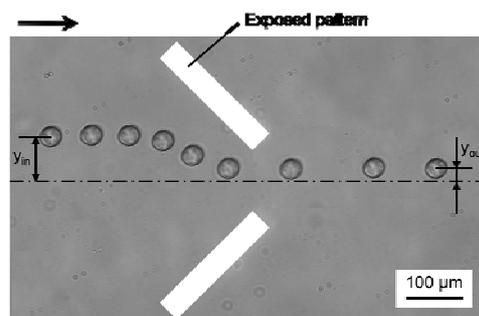


図4 ノズル型光パターン照射時における単一液滴の挙動。

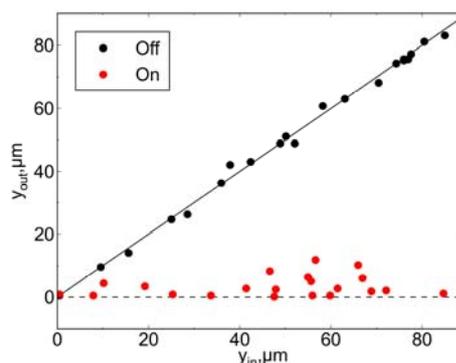


図5 光熱マランゴニ液滴輸送性能の評価。

その各パラメータ依存性も併せて明らかにした。なお、この場合の輸送性能は、移流速度とマランゴニ対流速度との関係から決定される閾値で分類できることを示した。また、下流部が閉じた照射光形状の場合には液滴の捕捉が可能であり、その捕捉性能は、レイノルズ数とマランゴニ数でまとめることができることを見出した。

また、輸送中の微小液滴の位置を精密に計測し、光照射時の挙動及び位置が、重力、浮力と光熱マランゴニ対流による駆動力によって決定されることを示した。micro-LIF によって計測した温度分布から温度勾配を求め、これと液滴の移動方向から液滴に作用する駆動力を導出し、その駆動力が光ピンセットを用いた場合と比べて100倍以上強いことを確認し、本手法の有効性を示した。

本研究を通じて得られた知見及び成果を総括し、光熱効果を用いたリモート液滴実験の可能性を提案することができ、世界初の光による新たな液滴実験プラットフォームの概念設計を提示することができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- [1] M. Motosuke, J. Shimakawa, D. Akutsu, S. Honami, Noncontact manipulation of microflow by photothermal control of

viscous force, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 31, No. 6, pp. 1005-1011 (2010).

- [2] 元祐昌廣, 嶋川純, 本阿弥眞治, 光誘起局所粘性分布下におけるマイクロ流動構造の解明, 日本機械学会論文集(B編), Vol. 76, No. 764, pp. 588-594 (2010).
- [3] H. Takeuchi, M. Motosuke, S. Honami, Noncontact bubble manipulation in microchannel by using photothermal Marangoni effect, Heat Transfer Engineering, Vol. 33, No. 3, pp. 234-244 (2012).
- [4] M. Motosuke, J. Shimakawa, S. Honami, Particle migration by optical scattering force in microfluidic system with light-absorbing liquid, Journal of Heat Transfer, Vol. 34, No. 5, 051025 (2012).

[学会発表] (計 14 件)

- [1] M. Motosuke, D. Akutsu, H. Toki, S. Honami, Lateral micro-PIV for visualization of electrokinetic flow in microfluidic chip, 14th International Symposium on Flow Visualization (ISFV) Daegu, Korea (2010. 6. 21).
- [2] M. Motosuke, S. Honami, Microfluidic flow characterized by light-induced local viscosity distribution, 63rd Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics (DFD), Long Beach, USA (2010. 11. 23).
- [3] H. Toki, M. Motosuke, S. Honami, AC electroosmotic flow for transportation of particle in microchannel, 2nd European Conference on Microfluidics, Toulouse, France (2010. 12. 8).
- [4] M. Motosuke, S. Honami, Effect of photothermal phenomena by focused light on liquid flow and particle behavior in small domain, 2nd European Conference on Microfluidics, Toulouse, France (2010. 12. 9).
- [5] 土岐光, 阿久津大, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, 電気物性の温度依存性を利用したマイクロ流体輸送, 第 47 回日本伝熱シンポジウム, 札幌 (2010. 5. 27).
- [6] 星麻美, 竹内洋之, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, 光熱マランゴニ効果を用いた微小気泡操作へ及ぼす流路の影響, 第 47 回日本伝熱シンポジウム, 札幌 (2010. 5. 26).
- [7] 元祐昌廣, 土岐光, 阿久津大, 本阿弥眞治, 電場誘起流計測のための側方観察マイクロPIV, 第 39 回可視化情報シンポジウム, 東京 (2010. 7. 21).
- [8] A. Ishida, H. Toki, M. Motosuke, S. Honami, Particle accumulation by AC electroosmosis

in microfluidic device with co-planar electrodes, 4th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale (HTFFM-IV), Fukuoka, Japan (2011. 9. 9).

- [9] A. Hoshi, M. Motosuke, S. Honami, Droplet manipulation in microchannel by photothermal Marangoni effect, 22nd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP), Delft, Netherland (2011.11. 9).
- [10] H. Toki, M. Motosuke, S. Honami, Particle focusing by AC electroosmosis in microfluidic system, 22nd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP), Delft, Netherland (2011.11. 9).
- [11] M. Motosuke, H. Toki, A. Ishida, S. Honami, On-chip particle concentrator based on AC electroosmosis, International Workshop on Micro/Nano-Engineering, Kyoto, Japan (2011. 12. 18).
- [12] 石田明彦, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, 蛍光粒子画像に基づく交流電気浸透流を用いた粒子堆積現象の評価, 可視化情報学会全国講演会, 富山 (2011. 9. 27).
- [13] 星麻美, 元祐昌廣, 本阿弥眞治, 光熱マランゴニ効果を用いた液滴コントロール, 第 24 回化学とマイクロ・ナノシステム研究会, 大阪 (2011. 11. 17).
- [14] 元祐昌廣, マイクロ流体デバイス内の流動における物性分布の影響の解析, COMSOLカンファレンス, 東京 (2011. 12. 2).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本阿弥 眞治 (HONAMI SHINJI)
東京理科大学・工学部・教授
研究者番号: 30089312

(2) 研究分担者

元祐 昌廣 (MOTOSUKE MASAHIRO)
東京理科大学・工学部・助教
研究者番号: 80434033

(3) 連携研究者

なし