

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 4 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06310

研究課題名(和文) 光熱変換ナノ構造薄膜近傍に発生するマランゴニ回転流に関する研究

研究課題名(英文) Studies on Marangoni vortex flows generated by photothermal effect of nano-structured thin films

研究代表者

名村 今日子 (Namura, Kyoko)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：20756803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、水を局所的に加熱することでナノ構造を持つ薄膜上に小さな気泡を発生させ、その気泡を部分的に加熱することで発生する対流の発生原理解明と制御を行なった。気泡の大きさや加熱位置、加熱の度合いが対流発生に与える影響を明らかにし、それらの知見をもとに水中に分散した小さな粒子を濃縮・輸送する流れや粒子輸送方向の動的な制御などを実現した。特に、水から溶けている気体を取り除くことで水蒸気の小さな気泡を発生させ、それを使って非常に急激な攪拌流を発生できることを発見した。また、気泡周辺のナノ構造が気泡への熱の伝わり方を変化させ、対流発生に大きな影響を与えていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, manipulation and mixing of small amount of water has been demonstrated by using surface tension of a tiny bubble. By focusing a laser onto a nanostructured thin film, the local temperature of water on the laser spot rises and a bubble is generated. The localized heat generation disproportions the surface tension of the bubble and induces flow around it. By tuning the laser spot position and power, the flow has been controlled to demonstrate particles focusing and flow direction switching in a small fluidic cell. In addition, by eliminating dissolved gasses in water, we successfully demonstrated generation of a tiny water vapor microbubble in the water. The water vapor microbubble involves rapid flow with flow speed of more than 1 m/s. Because the water vapor bubble exists only during the local heating of the water, it is useful as a micro-mixer that is producible and removable in any places and any time in the micrometer-size channel.

研究分野：ナノ構造薄膜, 光熱変換

キーワード：マランゴニ対流 マイクロバブル 金ナノ粒子 光熱変換 熱プラズモニック効果 マイクロ流体

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年デバイスの小型化が進む中、マイクロメートルスケールの流路の中で流体を駆動する技術が求められている。微小空間では流体が壁面からの影響を大きく受け、流体の駆動や混合が困難となる。この問題を解決する一つの流体駆動方法として注目されているのがマランゴニ対流である。2種類の流体の界面に温度勾配があると、表面張力に不釣り合いが生じて界面に沿った力が発生する。この力によって周囲流体が引きずられ発生する流れが熱誘起マランゴニ対流である。

(2) これまで研究代表者は、金ナノ粒子薄膜の光熱変換特性について研究を行ってきた。この金ナノ粒子薄膜は、その薄い (~10 nm) 層で光を吸収して熱に変換できるためバルクの光吸収体に比べて発生する熱の広がり少なく、一般に利用されている光熱変換の手法よりも局所的な加熱が可能である。研究代表者は研究を進める中で、薄膜がマイクロバブル周辺のマランゴニ回転流制御に最適であることを発見した。さらに発生した回転流を用いると、マイクロ粒子を流路底面近傍に収集したり、直径の異なる粒子を分離したりできることがわかった。しかし、この急激な回転流の詳しい発生原理や機能性についてはまだ不明な点が多い。

## 2. 研究の目的

本研究では、熱を使ったマランゴニ回転流の挙動制御をマイクロ流体駆動の基盤技術として確立することを目的とする。熱源には独自に開発した光熱変換特性を有するナノ構造薄膜を用い、局所的な温度勾配制御と流路壁面近傍の流体の流れやすさの制御を実現する。マイクロ流体の駆動力には、気液界面に温度勾配があるときに発生するマランゴニ対流を利用する。具体的には、マランゴニ回転流の特性と制御方法の解明およびナノ構造が近傍流体の流れにおよぼす影響の解明を研究目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 水中の金ナノ粒子薄膜にレーザーを集光すると、薄膜が光を熱に変換して水が局所的に温められ、マイクロバブルが発生する。このマイクロバブル表面の温度勾配をナノ構造薄膜の光熱変換特性を用いて制御することで、水中にマランゴニ回転流を発生する。ナノ構造薄膜の光熱変換を活かしたマランゴニ回転流による底面近傍への粒子捕捉の特性と制御方法を多面的な実験から明らかにし、マイクロ流体駆動の基盤技術として確立するために以下の観点から研究を行う。

(2) マランゴニ回転流による薄膜近傍への粒子捕捉能力の把握するため、発生するマランゴニ回転流が、どのような大きさ・材質の粒子を捕捉できるのか実験的に調べる。得ら

れた結果から、薄膜(流路底面)近傍の流速分布と回転流の圧力分布を見積もる。また流路やバブルのスケールが粒子捕捉能力に与える影響も調べる。

(3) これまでの実験で、照射する光の強度がある閾値を越えると発生する回転流が突然急激になることがわかっている(未発表)。そこで、「照射する光の強度」と「バブルの体積変化」や「発生する回転流の強さ」の関係性を明らかにし、急激な回転流の発生原理を明らかにする。

(4) 回転流によって粒子は薄膜近傍に集められ運動するため、観察される粒子の動きは薄膜近傍の流れを強く反映する。そこで、壁面のナノ構造を様々に変化させ、粒子の捕捉に最適な構造を明らかにするとともに、ナノ構造が境界層流に与える滑りの効果を明らかにする。

## 4. 研究成果

(1) 金ナノ粒子薄膜の光熱変換特性を用いて水中に発生させるマランゴニ回転流に対する流路形状の影響を調べるため、対流観察用のセルの高さを系統的に変化させて流れの変化を観察した。その結果、マランゴニ回転流を発生し、その流れの中にマイクロ粒子を捕捉するためには、50  $\mu\text{m}$  程度の高さのセルが適当であることを明らかにした。これはセルの高さをマイクロバブルの直径程度とすることで、高さ方向の流れを制限し、面内方向に急激な回転流を発生させることができるためである。本成果は SPIE Micro+Nano Materials, Devices, and Applications 2015 において発表をおこなった。

(2) マイクロバブル上に温度勾配を作製するためのレーザーの照射強度がマイクロバブル周辺に発生するマランゴニ対流に与える影響について系統的に調べた。その結果、レーザー照射強度が高いほど、粒子は回転流の外側に近いところに集まった。これはマランゴニ回転流中の流速が大きくなり、回転流中で運動する粒子に働く遠心力が強くなったためだと考えられる。さらに、照射光強度を時間的に変化することで、回転流の中で粒子がトラップされる位置を数マイクロ秒オーダーで時間的に変化することに成功した。この成果はマイクロ粒子の動的制御や流れの方向のスイッチングへの応用が期待できる。本成果は SPIE Micro+Nano Materials, Devices, and Applications 2015 において発表をおこなった。

(3) マイクロバブル上に温度勾配を作製するためのレーザーの照射位置がマイクロバブル周辺に発生するマランゴニ対流に与える影響について系統的に調べた。その結果、バブルに対するレーザーの照射位置を変化

させていくと、発生する対流のモードが大きく変化することがわかった。レーザー照射位置がバブル中心の場合はセル高さ方向の上昇流が生じる。一方で、レーザー照射位置がバブル中心から約  $5 \mu\text{m}$  の範囲の場合は粒子収束流が(図1),  $5 - 30 \mu\text{m}$  程度の範囲では2つの回転流が観察された。新たに観察された粒子収束流は、流路底面に対して垂直方向の温度勾配と水平方向の温度勾配によって発生する対流がバランスすることによって、新しいモードの流れであることがわかった。この粒子収束流は特別な流路形状を必要としないマイクロ粒子濃縮・運搬として非常に有用である。本成果は2016年春季第63回応用物理学会春季学術講演会において発表をおこなった他、国際会議GFMAT2016において招待講演を行った。また、国際論文誌Applied Physics Lettersに掲載された。

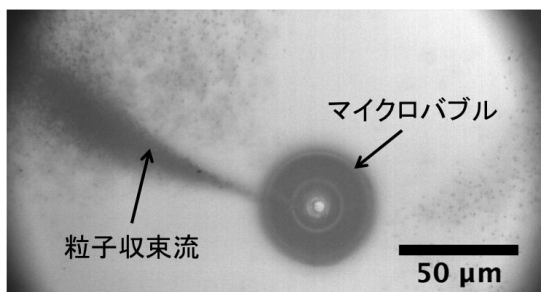


図1 マランゴニ効果を用いた粒子収束流の発生

(4) マイクロバブルの大きさがマランゴニ対流に与える影響について明らかにするため、脱気した水中でマランゴニ対流を発生する実験を行った。純水製造機で処理した水中には数十  $\text{mg/L}$  の気体が溶けている。水中のマイクロバブルを加熱すると、これらの気体がバブルの中に析出してくる。そのためマイクロバブルの大きさを一定に保つことが難しい。そこで、水を脱気することで水に溶けている気体を取り除いてから、マイクロバブルおよびマランゴニ対流発生の実験を行なった。その結果、脱気水中で直径  $10 \mu\text{m}$  程度の非常に小さい水蒸気マイクロバブルを安定して生成し、さらにそのバブル周辺に  $1 \text{m/s}$  を超える急激なマランゴニ対流を発生できることを発見した(図2)。このバブルの直径は加熱のために照射するレーザー光の強度によって制御できる。発生する対流はマイクロ流体攪拌技術などへの応用も期待できる。本成果は2016年秋季第77回応用物理学関係連合講演会において発表をおこなった他、国際会議CICMT2017において招待講演を行った。また、国際論文誌Scientific Reportsに掲載された。

(5) 流路壁面形状が対流に与える影響を明らかにするため、セルの底面にナノ構造を持つ薄膜を作製し、その上でマランゴニ対流を発生する実験を行なった。その結果、ナノ構

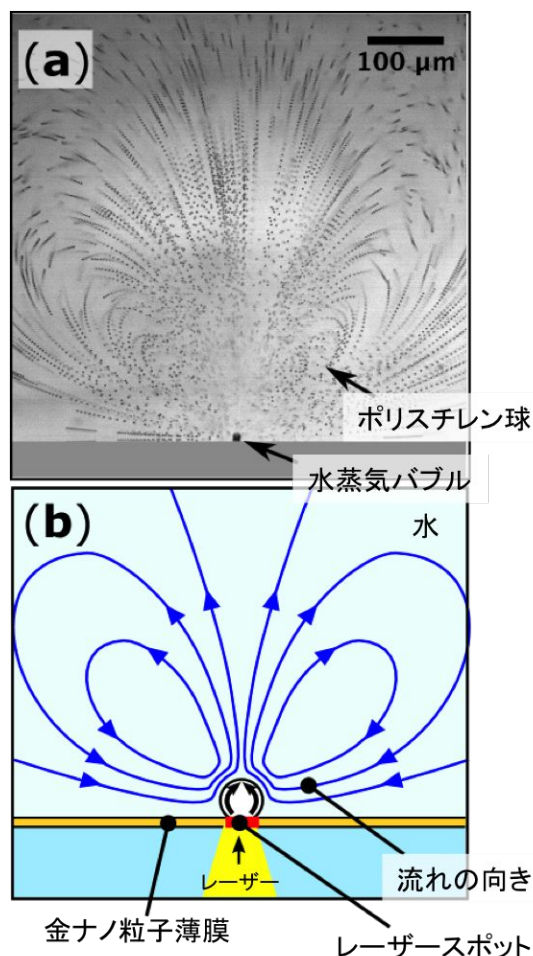


図2 脱気水中で発生する水蒸気バブルとマランゴニ対流の(a)顕微鏡像と(b)流れの模式図

造中の熱の移動が対流に大きな影響を与えることがわかった。本研究で流路底面はマイクロバブルの気液界面に熱を伝える重要な役割を持っている。ナノ構造がその熱の伝える向きを制御し、対流の強さを決定する。本研究成果はナノメートルスケールの熱輸送に関する新たな知見を与える。

#### <引用文献>

K. Namura, K. Nakajima, K. Kimura, and M. Suzuki, Photothermally controlled Marangoni flow around a micro bubble, Applied Physics Letters, 106 巻, 2015, 043101

K. Namura, K. Nakajima, K. Kimura, M. Suzuki, Sheathless particle focusing in a microfluidic chamber by using the thermoplasmonic Marangoni effect, Applied Physics Letters, 108 巻, 2016, 071603

K. Namura, K. Nakajima, M. Suzuki, Quasi-stokeslet induced by thermoplasmonic Marangoni effect around a water vapor microbubble, Scientific Reports, 7 巻, 2017, 45776

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

K. Namura, K. Nakajima, M. Suzuki, Quasi-stokeslet induced by thermoplasmonic Marangoni effect around a water vapor microbubble, Scientific Reports, 査読有, 7巻, 2017, 45776  
DOI: 10.1038/srep45776

K. Namura, K. Nakajima, K. Kimura, M. Suzuki, Sheathless particle focusing in a microfluidic chamber by using the thermoplasmonic Marangoni effect, Applied Physics Letters, 査読有, 108巻, 2016, 071603  
DOI: 10.1063/1.4942601

〔学会発表〕(計10件)

K. Namura, Microfluidic control by using thermoplasmonic Marangoni effect around a microbubble, CICMT2017, 2017年4月21日, 東大寺ミュージアム(奈良県・奈良市)

K. Namura, K. Nakajima, M. Suzuki, Photothermally induced Marangoni flows around a water vapor microbubble on gold nanoisland films, SSSN2017, 2017年1月25日, kokoka 京都市国際交流会館(京都府・京都市)

K. Namura, K. Nakajima, M. Suzuki, Microparticle Manipulation Using Thermoplasmonic Marangoni Flow, MRS2016, 2016年12月1日, Boston (USA)

K. Namura, K. Nakajima, M. Suzuki, Thermoplasmonic Marangoni flow around a microbubble in degassed water, MNC2016, 2016年11月8日 2016年11月11日, ANA Crown Plaza Kyoto (京都府・京都市)

名村今日子, 中嶋薫, 鈴木基史, 金ナノ粒子薄膜の熱プラズモニック効果を使ったマランゴニ・マイクロ回転流の制御, 流体力学会年会, 2016年9月26日 2016年9月29日, 名古屋工業大学(愛知県・名古屋市)

名村今日子, 中嶋薫, 鈴木基史, マイクロバブル周辺の熱プラズモニック・マランゴニ対流に対する脱気の効果, 2016年秋季 第77回応用物理学関係連合講演会, 2016年9月13日 2016年9月16日, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)

K. Namura, M. Suzuki, Plasmonic thin films structured by Glancing Angle Deposition and their applications to

optofluidics, GFMT2016, 2016年6月26日 2016年7月1日, Toronto (Canada)

名村今日子, Gregory A. Pilgrim, 中嶋薫, 鈴木基史, 熱プラズモニック・マランゴニ対流を用いた微小粒子収束, 2016年春季 第63回応用物理学学会春季学術講演会, 2016年3月19日 2016年3月22日, 東工大(東京都・大岡山)

K. Namura, K. Nakajima, K. Kimura, M. Suzuki, Micro vortex flows induced by thermoplasmonic Marangoni effect, SPIE Micro+Nano Materials, Devices, and Applications, 2015年12月6日 2015年12月9日, Sydney (Australia)

T. Sono, K. Namura, and M. Suzuki, Vortex Flows Pulsated by Thermoplasmonic Marangoni Effect, MNC2015, 2015年11月10日 2015年11月13日, Toyama International Conference Center (富山県・大手町)

〔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〕

ホームページ等

研究室ホームページ

<http://www.mpe.me.kyoto-u.ac.jp>

研究成果データベース

<https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/u/Z7qY>

京都大学広報研究成果欄

[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2016/170331\\_3.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2016/170331_3.html)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

名村 今日子 (NAMURA, Kyoko)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20756803

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし