

変幻自在のマイクロミキサー —水蒸気マイクロバブルを使った少量流体の高速攪拌に成功—

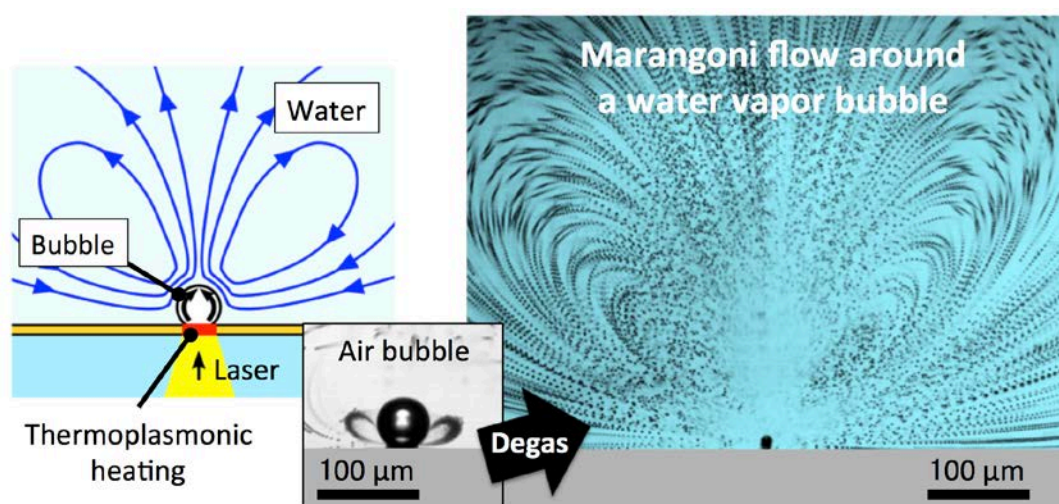
概要

京都大学大学院工学研究科マイクロエンジニアリング専攻の 名村 今日子（なむら きょうこ）助教、鈴木 基史（すずき もとふみ）教授らのグループは、水から溶けている気体を取り除き（脱気）局所的に加熱することで水蒸気の小さな気泡（マイクロバブル）を発生させ、それを使って非常に急激な攪拌流を発生させることに成功しました。

血液検査装置などの液体を扱う装置の小型化が急速に進む中、ごく少量の液体を動かしたりかき混ぜたりする技術の開発が急務となっています。しかし、マイクロメートルスケールの小さい容器の中では、水などの液体は壁面からの力を受けて非常に動きにくい状態にあります。

名村助教らの研究グループは水蒸気マイクロバブルの表面に働く力を使い、少量の水を高速で攪拌できることを発見しました。一般的に水中のバブルの表面に働く表面張力は加熱すると弱くなります。そのため、バブル表面上に温度差を設けると表面張力に不釣り合いが生じて力が発生します。同研究グループは、脱気した水を局所的に加熱することで直径 10 μm 程度の小さな水蒸気マイクロバブルを発生させ、その表面上に数百度もの温度差を作ることに成功しました。その結果、バブル表面で非常に強い力が発生し、バブル周辺の水が 1 m/s を超える速さで駆動・攪拌されることがわかりました。バブルとその周辺の流れは水を加熱している間だけ発生するため、任意位置で任意時間の間だけ流体を攪拌できる強力で画期的なマイクロミキサーとして有用です。さらに、複数の水蒸気マイクロバブルを使うことで、マイクロメートルスケールの流路の中で複雑にデザインされた流れを発生することもできると期待されます。

本研究成果は 3 月 31 日、Nature Publishing Group のオンライン科学誌 *Scientific Reports* に掲載されました。



1. 背景

ごく少量の液体を使い化学反応や分析を行う手法は、化学反応にかかる時間の短縮や検体の少量化などの観点から近年盛んに研究されています。少量の液体を扱う際には、それをどうやってかき混ぜるかが重要な問題になります。一般的にマイクロメートルサイズの狭い流路の中では、水などの液体は壁面からの力を受けて非常に混ざりにくい状態にあります。また、狭い流路の中に攪拌棒のようなものを思い通りの位置に入れてかき混ぜるとするのは困難です。そこで少量の液体をかき混ぜる力として最近注目されているのが、マランゴニ力です。マランゴニ力というのは液体表面の表面張力の不均一性によって働く力で、100年以上前からその存在が知られています。例えば気体と液体の界面（表面）に働く表面張力は温度によって変化します。気液表面上に温度の分布がある場合、表面張力が弱い部分から強い部分に向かってマランゴニ力が働きます。この力は気液表面の近くの流体を動かし、マランゴニ対流と呼ばれる流れを発生させます。

これまでの研究を通じて、マイクロバブルを作りマランゴニ対流を発生・制御させることには成功していましたが、より強いマランゴニ力と対流を得るために薄膜に照射するレーザー光の強度を上げると、バブルがどんどん大きくなってしまおうという課題がありました。バブルの成長は流路の封鎖等を引き起こすので、液体を攪拌するうえで好ましくありません。バブル成長の原因は水中に溶けている窒素や酸素などの気体にあります。これらは水中溶存気体と呼ばれ、水中でバブルを作るとその中に出てきます。

そこで今回の研究では水の脱気に着目しました。脱気して水中溶存気体の量を減らした水を加熱すると、主に水蒸気でできたバブルが発生し、さらにバブルの成長が抑制されることが知られています。このように大きさや内部気体の組成の異なるバブルを使えば、空気ですでできたバブルを使った場合と比べて性質の異なる対流が発生することが期待されます。本研究では、十分に脱気した水の中でバブルを生成し、その周辺にどのようなマランゴニ対流が発生するのかを明らかにしました。

2. 研究手法・成果

まず、真空超音波脱気という方法で水中に溶けている気体を取り除きました。次に、ガラス基板上に金ナノ粒子薄膜を作製しました。この薄膜は10 nm程度の非常に薄い層で光を効率よく吸収し、熱に変換することができます。そのため、薄膜にレーザー光を集光するとその部分が局所的に発熱します。この発熱を使って脱気した水を局所的に温め、バブルを発生させました。

図1に脱気していない水中と脱気している水中で発生するバブルとその周りの対流の様子を示します。黒い粒は流れを可視化するために加えられた直径2 μmのポリスチレン球です。流れの様子をわかりやすくするために0.2秒間の間に撮影された20枚の顕微鏡像を重ねてあります。脱気していない水の中では直径40-50 μm程度の大きさの空気ですでできたバブルが生成します。バブルの周りには緩やかな回転流が発生します。これはレーザー光を照射している間、バブル表面の薄膜に近い部分の温度が高くなり、図1(c)中の黒い矢印で示した方向にマランゴニ力が働

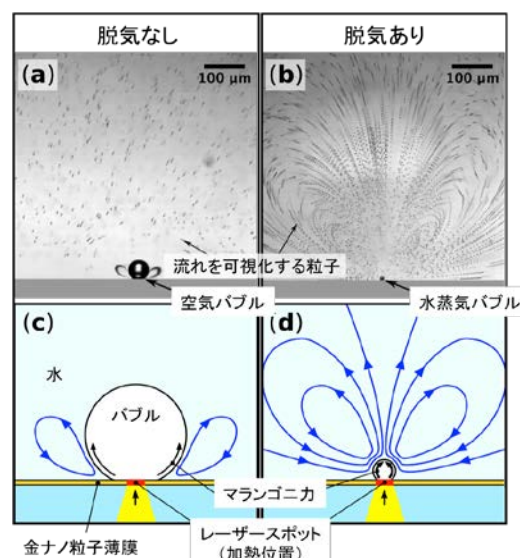


図1:(a)脱気していない水と(b)脱気した水の中でできるバブルとその周辺の対流。小さな黒い点々は流れを可視化するために加えた粒子。(c)脱気していない水と(d)脱気した水の中で発生する対流の模式図。

いたためだと考えられます。一方で、脱気した水を加熱すると、直径が $10\ \mu\text{m}$ 程度の水蒸気でできたバブルが生成し、それ以上大きくなりません。注目すべきは、水蒸気バブルの周りに発生する対流の強さです。水を脱気していない場合は気泡から数十 μm 離れたところまでしか対流が発生していないのに対して、脱気している場合は気泡から数百 μm 離れたところでも mm/s オーダーの速さの流れが発生しています。バブルのごく近傍では流速が速すぎて使用していた CCD カメラでは捉えることができないほどでした。観察された流れはマイクロ流路の中で発生する流れとしては非常に早く、新たな流体駆動源として有望です。また、生成した水蒸気バブルはレーザー照射を止めると同時に消滅するため、流路の妨げになりません。

では水蒸気バブルはどのくらいの力を水にかけることができるのでしょうか。バブルの表面に働いている力を積分すると、基板に対して垂直な向きの力として表すことができます。この力が、水中のバブルのある位置にかかっているとします。このようなある点に力がかかっている状態を「点力」と呼びます。この点力の周りに発生する流れを計算すると、実験結果と非常によく一致することがわかりました (図 2)。計算結果から、水蒸気バブルを使って水にかけられる力は $0.7\ \mu\text{N}$ 程度であり、バブルから $50\ \mu\text{m}$ 程度以内の範囲では流速が $1\ \text{m/s}$ を超えているということがわかりました。このような非常に強い力の発生を実現しているのは、水を脱気したことによるバブル成長の抑制と、金ナノ粒子薄膜を使った局所加熱がバブル表面につくる数百度もの温度差です。

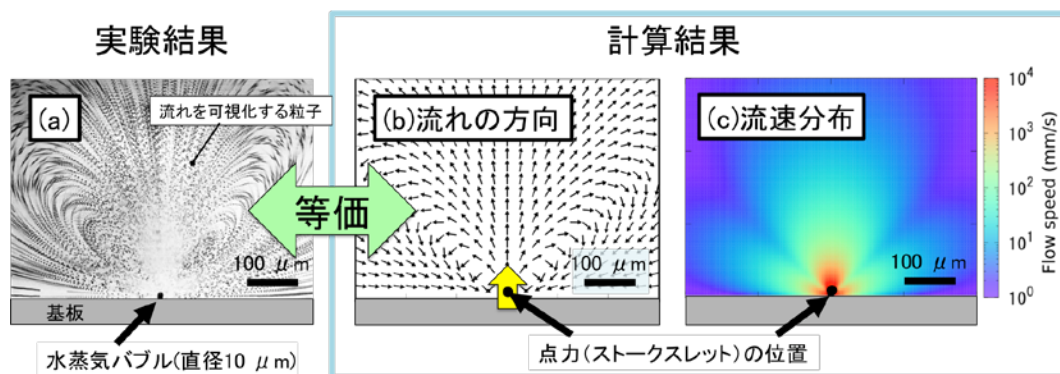


図 2 : 水蒸気マイクロバブルの周りに発生する流れの(a)実験結果と、(b)(c)計算結果との比較。(b)は流れの方向を、(c)は流速を示している。

3. 波及効果、今後の予定

本研究で著者らは、流路壁から数十 μm の領域で $1\ \text{m/s}$ を超える非常に急激な流れを安定して発生することに成功しました。この手法は、マイクロメートルスケールの流路が張り巡らされたチップ上の任意位置で流体を高速攪拌する技術として期待できます。さらに、発生した流れは「点力」と呼ばれる流体力学の基礎的な要素で表すことができます。流体中を動く物体の周りの流れがこのような要素の足し合わせに分解できることを考えると、流体の攪拌だけではなく複数の水蒸気バブルを並べることでチップ上の流れを任意に操作できる可能性があります。このことはマイクロ流体駆動技術に全く新しい流体駆動手法を与えるだけでなく、流体力学分野での「点力」周辺流れの実験的解釈にも役立つと考えられます。さらに、本研究で熱源として使われている金ナノ粒子薄膜は、表面増強ラマン散乱などを利用したセンシング技術の基板としても働きます。つまり、流体駆動とセンシングの両方を一度に実現する技術を確立できたといえます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、独立行政法人日本学術振興会の研究活動スタート支援（15H06310）および、公益財団法人マツダ財団のマツダ研究助成（15KK-280）の支援を受けて行われました。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Quasi-stokeslet induced by thermoplasmonic Marangoni effect around a water vapor microbubble

著者：Kyoko Namura, Kaoru Nakajima, and Motofumi Suzuki

掲載誌： *Scientific Reports*