

シンクロする微小なバブルたちの振動

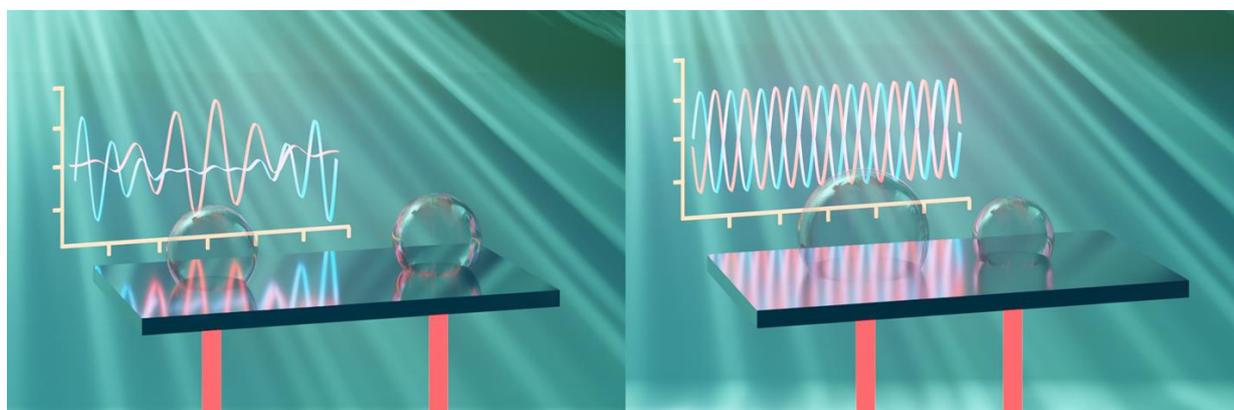
—マイクロバブル同期振動の直接観測に成功—

概要

京都大学大学院工学研究科の張 軒璋（ちょう けんい、Xuanwei Zhang）博士課程学生、名村 今日子（なむら きょうこ）准教授、鈴木 基史（すずき もとふみ）教授、分子科学研究所メゾスコピック計測研究センターの西田 純（にしだ じゅん）助教らのグループは、水中に小さな気泡（マイクロバブル）を2個並べて生成し、それらがサブ MHz オーダーで同期して振動する様子を捉えることに成功しました。

少量の液体を超高速・高周波数で操る技術は、ハイスループットで特徴の違う細胞をソーティングするなど、医療や化学分野で大量のサンプルを処理してデータを取得するために必要な技術です。マイクロバブルの振動は流れや音波を生み出すので、このような液体の操作に適していますが、振動するマイクロバブルを複数個並べたときにどのように振る舞うかわかっていませんでした。本研究では、光熱加熱を用いてサブ MHz オーダーで自発的に振動するバブルを2個生成し、その位置や間隔を精密に制御することに成功しました。そして、隣り合うバブルが同位相や逆位相で同期して振動することを明らかにしました。さらに、バブル間の距離を $10\ \mu\text{m}$ 変えるだけで、バブルの振動周波数が 50%以上も劇的に変化することを見出し、バブルの配置だけで液体の動かし方を大きく変える新しい手法を開発しました。

本研究成果は、2025年4月15日にドイツの国際学術誌「*Small*」にオンライン掲載されました。



バブル間の距離を制御することで、2つのバブルの振動の同期状態や周波数を変えることに成功

1. 背景

少量の液体を超高速・高周波数で操る技術は、ハイスループットで特徴の違う細胞をソーティングするなど、医療や化学分野で大量のサンプルを処理してデータを取得するために必要な技術です。マイクロメートルスケールの気泡（マイクロバブル）の振動は、流れや音波を生み出すので、このような液体の操作に適しています。特に、マイクロバブルをたくさん並べることで、強力な音波や急激で複雑な流れを生み出すことができると期待されます。しかし、複数のマイクロバブルを並べたときに、それらがどう振る舞うのかについてはまだ未解明の部分が多くありました。例えば、バブルが振動すると音波を出すので、隣のバブルの動きを変えると予想されます。この効果はバブル同士の距離に依存するはずなので、バブル間距離とバブルの動きの系統的な調査が不可欠です。しかし既存の方法では、固定された電極ヒーターの上でマイクロバブルを作ったり、あらかじめ形作られた小さな窪みにトラップされたマイクロバブルを使ったりするので、マイクロメートルスケールでバブルの位置をフレキシブルに変えることは簡単ではありませんでした。それだけでなく、マイクロバブルの平均的なサイズや、その振動振幅を長時間一定に保つことは困難でした。このことが、振動する2つのバブルの相互作用を捉えづらくしていました。

本研究では、これらの課題を、脱気水^{注1}を光熱加熱^{注2}するプラットフォームを構築することで乗り越えることに成功しました。そして、サブ MHz で自発的に振動する小さなバブル(直径 10 μm 前後)を2つ生成し、それらの振動がお互いの振動にどのように影響するかを明らかにしました。

2. 研究手法・成果

本研究では、図1(a)に示すような装置を使って、マイクロバブル間距離の精密な位置調整を実現しました。この装置では、レーザー光を使ってマイクロバブルを生成します。まず、光を吸収して熱に変換することができる FeSi_2 薄膜(厚さ 50 nm)をガラス基板の上に準備しました。この薄膜を脱気水で満たされた小さなガラス容器に入れて、図1(a)の“試料”と書いてある位置にセットします。この薄膜にレーザー光を照射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水を温めて、マイクロバブルを生成します。図1(a)の“光熱加熱装置”と書いてあるところが、マイクロバブルを生成するためのレーザーの照射位置を調整する部分です。この部分には、空間位相変調子^{注3}という光学素子を組み込んであります。この部品を使うことで、レーザー光

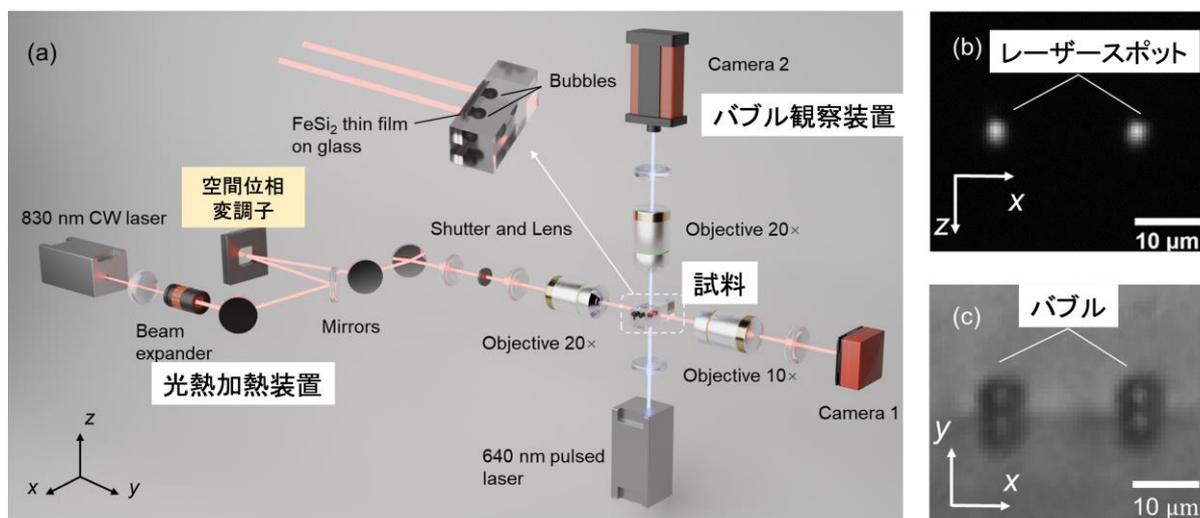


図1: (a)バブル観察装置の模式図。(b)バブルを生成するためのレーザースポット。(c)生成したバブルの様子。(reproduced with permission from X. Zhang, et al., Small (2025) 2408979, Copyright © 2025,

の進み方を空間的に調節し、図 1 (b)に示すような 2 つのレーザースポットを生成できます。これらのレーザースポットを光熱変換用の FeSi_2 薄膜に照射することで、図 1 (c)に示すようなマイクロバブルを生成しました。バブルは全部で 4 つあるように見えますが、これは薄膜の表面に反射したバブルの像と一緒に見えているため、実際には 1 つのレーザースポット毎に 1 つのマイクロバブルが生成しています。さらに、空間位相変調子を使うと、レーザースポット間、つまりバブル間の距離を $1 \mu\text{m}$ オーダーでフレキシブルに調整できます。

図 1(c)ではバブルの動きは止まっているように見えますが、実際にはサブ MHz オーダーの周波数で自発的に振動しています。超高速カメラを用いて観察したバブルの振動の様子を図 2 に示します。縦にバブルの様子が時系列で並べられており、バブルはできて消えてを繰り返すように見えるほど大きな振幅で振動していることがわかります。バブルを 1 つだけ生成した時には、バブルの最大半径が $6.5 \mu\text{m}$ で、振動周波数は 0.55 MHz でした。ところが、バブルを 2 つにして、その間の距離を $60 \mu\text{m}$ 程度にすると、バブルの振動周波数は少し下がり、 0.50 MHz となりました。また興味深いことに、外部から 2 つのバブルの動きを同期させるような操作はしていないにもかかわらず、2 つのバブルは同位相で同期して振動しました(図 2(a))。つまり 2 つのバブルが、同じ時に大きくなって、同じ時に小さくなって、を繰り返す運動をします。一方でバブル間距離を $20 \mu\text{m}$ 程度まで近づけると、逆位相で同期して振動します (図 2 (b))。つまり片方のバブルが大きくなる時はもう片方が小さくなるのです。また、バブルの周波数は 0.81 MHz まで増加しました。さらに詳しい調査の結果、バブル間の距離が $10 \mu\text{m}$ 変化するだけで、振動周波数が 50%以上も劇的に変化することを見出しました。また、理論式との比較によって、それぞれのバブルの振動によって生み出される圧力がこのようなバブル間の相互作用をもたらしていることが明らかになりました。

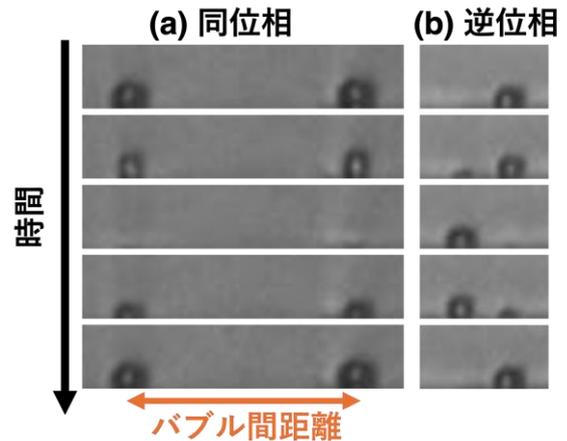


図 2: バブルの振動同期の様子。(reproduced with permission from X. Zhang, et al., Small (2025) 2408979, Copyright © 2025, Wiley-VCH GmbH)

3. 波及効果、今後の予定

本研究では、バブルの配置だけで液体の動かし方を大きく変える、という新しい手法を発見しました。この手法を使えば、サブ MHz オーダーの高速なバブルの動きや周辺の流れをオンデマンドで操作できます。本研究の成果は、高速化が求められている医療・化学分野の分析やデータ取得に新しい流体制御ツールを与えます。本研究では脱気水を使用しましたが、水アルコール混合液などでも同様の現象を起こすことができ、幅広い用途への応用が期待できます。今後は、バブルの振動周波数や振動モード（同位相・逆位相など）の積極的な選択方法の開拓や、より数の多いバブルアレイの制御、さらにはその周辺にできる音波や流れの解析を行なっていく予定です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JST 創発的研究支援事業（助成番号: JPMJFR203N）および JSPS 科研費（助成番号: 21H01784）の支援を受けて実施されました。また、京都大学－三菱電機組織連携「革新的機械システム・機械デバイス論」

からも資金援助を受けました。多点同時レーザー照射のための光学系を改良するにあたり、坂倉政明博士から貴重なご指導を賜りました。また、振動同期現象の解析と理解について、洞察に満ちたアドバイスをいただいた熊谷崇准教授（分子科学研究所）に心より感謝いたします。

<用語解説>

[注 1] 脱気水：溶けている酸素や窒素などの気体の量を減らした水を脱気水と呼んでいます。

[注 2] 光熱加熱：光を吸収して熱に変える薄い膜に光を照射することで、光が当たった部分で熱が発生します。この熱を使って膜自身や周りの水を温めることを、ここでは光熱加熱と呼んでいます。

[注 3] 空間位相変調子：光の波の位相の空間的な分布を変えられる光学部品です。この位相の分布をうまく設定しておく、光をレンズに通した後に複数のスポットに集光されます。

<研究者のコメント>

「水が沸騰したときにできる泡が時々刻々と形や大きさを変えることは、日常的に経験されていると思います。泡の動きは周りの水の動きや熱い固体から水に熱を伝える効率に関係するのですが、変形しやすい泡の動きを制御することは簡単ではありません。本研究では、熱源などを工夫することで、いままで勝手に動いていた泡の大きさや位置を制御しました。すると、泡同士がシンクロして振動し始めたのです。この研究は、泡をたくさん並べて自在に操るヒントを与えてくれました。」（名村 今日子）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Configurable Vibrational Coupling in Laser-Induced Microsecond Oscillations of Multi-Microbubble System（多気泡系におけるレーザー誘起マイクロ秒振動の設定可能な振動カップリング）

著者：Xuanwei Zhang, Ryu Matsuo, Yusuke Yahano, Jun Nishida, Kyoko Namura, and Motofumi Suzuki

掲載誌：Small, Wiley-VCH GmbH

DOI：10.1002/smll.202408979