

2023年7月21日

報道関係者各位

国立大学法人筑波大学
国立大学法人北海道大学

空中超音波で液滴をジャンプさせるマイクロ流体操作基盤を開発

撥水メッシュ上に置いた液滴に対して、超音波を集束させて位置を制御することで、液滴の動きやジャンプを制御するマイクロ流体操作基盤を開発しました。この基盤上では、複数の液滴の並列操作、合体、分割などの基本的な操作が可能であり、また化学や生物学等の実験への応用の可能性が示されました。

科学実験の自動化・高速化において、ピコリットル～マイクロリットル程度の少量の液体（液滴）を並列的に扱う必要が生じる場合があります。また、液滴を空間的に離れた基盤装置・容器へ移動させる際には、液滴をジャンプさせる必要がありますが、平面上で液滴を操作するデジタルマイクロ流体技術では、最大で5 mm程度の高さに限られていました。

本研究では、超音波の遠隔力（音響放射力）を利用して液滴を操作する新たなマイクロ流体基盤を開発しました。撥水加工を施したメッシュを用いると、音波を透過させつつ、液滴を支えることができ、空中でも音圧が高いところに液滴が引き寄せられる性質があることを見だし、超音波ビームによってメッシュ上の液滴の操作が可能になりました。

これにより、液滴のジャンプの高さは最高で128 mmにまで達します。ジャンプする方向も制御できるため、液滴を隣の装置や別の段に移動させることも可能だと考えられます。また、デジタルマイクロ流体基盤に必要な基本的な機能として、複数の液滴の水平移動、合体、分割を実現しました。さらに、科学実験への適用例として、この基盤上で鈴木・宮浦クロスカップリング反応を実施するとともに、生物実験にも適していることを示しました。

本研究成果により、立体ディスプレイや実験自動システムなどの開発が期待されます。

研究代表者

筑波大学図書館情報メディア系

伏見 龍樹 助教

北海道大学創成研究機構化学反応創成研究拠点（WPI-ICReDD）

長田 裕也 特任准教授

研究の背景

科学研究において、生産性や実験データの品質を向上させるために、研究や実験、分析を自動化する取り組みが行われています。特に生物学、薬学、化学、材料科学などでは、自動化により大量のデータを迅速に取得・解析することで、新たな発見や物質の開発が加速すると考えられています。自動化において実験や分析を高速化するには、ごく少量の試料を並列的に扱う仕組みが重要です。その中でも、ピコリットル～マイクロリットル程度の液体を操作する技術はマイクロ流体操作と呼ばれます。また、マイクロ流体操作において、平面上で液滴を駆動するデジタルマイクロ流体技術^{注1)}では、エレクトロウェットティングという電氣的に濡れを制御する技術が用いられてきましたが、平面上の操作だけでは、液滴を空間的に離れた基盤・装置・容器へ移動させることが困難であることから、近年のデジタルマイクロ流体技術では、液滴を基盤からジャンプさせることが求められています。しかしながら、エレクトロウェットティングでは、液滴のジャンプ高さは液滴の変形による弾性に依存するため、最大で 5 mm 程度が限界となっていました (Langmuir, 2014)。一方で、デジタルマイクロ流体技術の新たな手法として、焦電効果や光起電力効果による表面電荷密度の制御技術が登場しています。これらの手法は液滴の変形を必要とせず、それぞれ 16 mm、50 mm 程度のジャンプが可能となっています (ACS Applied Materials & Interfaces, 2021)。このように、液滴の弾性に依存せずに、より強力で液滴を操作できる手法の開発が進められています。

研究内容と成果

本研究では、超音波の遠隔力 (音響放射力^{注2)}) を利用して液滴を操作する新たなマイクロ流体基盤を開発しました。研究の鍵となったのは、撥水メッシュです。これは市販のステンレスメッシュに撥水加工を施したもので、音波を透過させる一方で、液滴を漏れ落ちることなく支えることが可能です。これにより、超音波フェーズドアレイ^{注3)}によって動的に集束超音波ビームを生成し、メッシュ上の液滴を操作することが可能になりました (参考図)。さらに、空気中に伝搬する集束超音波ビームが平面内で液体を引き付ける性質を発見し、ビームの進行方向にも力を加えることで、メッシュから液滴をジャンプさせることにも成功しました。その結果、マイクロ流体基盤からの液滴のジャンプ高さとして報告されている中では最も高い 128 mm を達成しました。

このマイクロ流体基盤は、平面内での液滴の移動、複数の液滴の並列操作、液滴の合体や分割といった基本的な機能を持ち、操作する物体の物性に依存せずに超音波操作ができます。この特性を利用し、液滴と同じように、ナイロンの固体球を平面内で操作したり、ジャンプさせたりすることができました。

また、生物分野へのデジタルマイクロ流体装置の応用においては、装置表面へのタンパク質の付着が問題となります。しかし、本装置では、特殊な加工や工夫を施さずに、エレクトロウェットティングでは操作できない高濃度のタンパク質溶液を動かすことができます (先行研究 0.005 mg/mL に対して 1.0 mg/mL, Langmuir, 2008)。さらに、メッシュにはプロジェクターで映像を投影できるため、液滴を動かす経路や情報の提示が可能な拡張現実としても機能します。

さらに、有機合成において不可欠で、産業界でも広く用いられる鈴木・宮浦クロスカップリング反応を、このマイクロ流体基盤上で実施し、この装置の化学分野への応用可能性も示しました。

今後の展開

今後、本研究で発見した、空中超音波が高音圧場に物体が引き寄せられる、という特性を活用し、立体ディスプレイや実験自動システムなどの開発が期待されます。さらに、液滴のジャンプの方向も制御できるため、隣接する分析装置への液滴の直接移動や、複数段階に分けた実験工程の自動化など、新たな実験自動化の可能性を開くと考えられます。

参考図

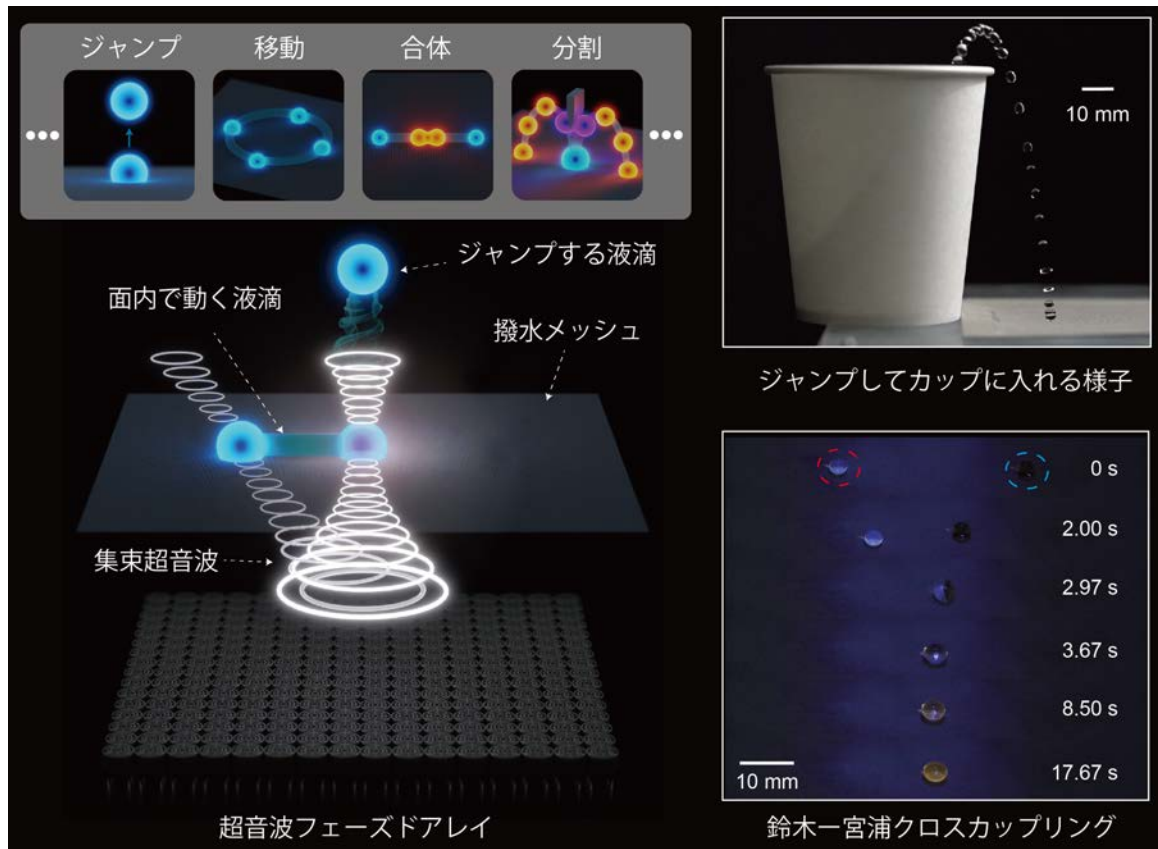


図 今回開発したマイクロ流体基盤の概要（左）および、これを用いて行った実験の様子（右）

左図：超音波フェーズドアレイによって、撥水メッシュ上の任意の点に焦点を生成する。液滴は焦点に引き寄せられるので、集束超音波を横にずらすと、液滴も焦点に引き寄せられるように横に動く。また、十分に強い集束超音波を液滴に当てると、液滴はメッシュからジャンプする。これにより、液滴のジャンプ、移動、合体、分割などの基本的な操作が可能となる。

右図上：本装置では最高で 10 cm 以上のジャンプが可能で、他の容器に液滴を直接飛ばすことができる。
右図下：化学分野への応用を示すため、本装置上で、有機合成において重要な反応である鈴木一宮浦クロスカップリングを行った。反応に必要な二つの溶液を含む液滴を合体させた結果、生成物の存在を示す橙色の蛍光色が確認された。

用語解説

注1) デジタルマイクロ流体技術 (DMF, digital microfluidics)

少量の液体を扱うマイクロ流体技術は、主に、ガラスや樹脂など基盤に微細な流路で流体を操作する場合と、基盤上のデジタルユニットで液滴を操作する場合に分けられる。デジタルマイクロ流体技術は、これらのうち後者を指す。

注2) 音響放射力

本研究では、液滴を動かすために超音波を用いた。超音波は、人間の可聴域を超える周波数の音波で、高周波や大音量の音場中で、液滴が音波を反射すると、その過程で音波の圧力変動が液滴に力を与える。この現象を音響放射力と呼ぶ。

注3) 超音波フェーズドアレイ

超音波振動子をアレイ状にならべた装置。本研究では、40kHz の振動子を 256 個用いた。一つひとつの振動子を駆動する位相をコンピューターで制御することで、任意の音場を提示することができる。

研究資金

本研究は、科研費による研究プロジェクト (JP21K14103)、ERATO (JPMJER1502、 JPMJER1903)、JST 未来社会創造事業 (JPMJMI21G8) の一環として実施されました。また本研究の一部は、ピクシーダストテクノロジーズ株式会社との共同研究契約に基づいて行われました。

掲載論文

- 【題 名】 Microfluidic platform using focused ultrasound passing through hydrophobic meshes with jump availability
(撥水メッシュを透過する集束超音波を用いたジャンプ可能なマイクロ流体プラットフォーム)
- 【著者名】 Yusuke Koroyasu、 Thanh-Vinh Nguyen、 Shun Sasaguri、 Asier Marzo、 Iñigo Ezcurdia、 Yuuya Nagata、 Tatsuya Yamamoto、 Nobuhiko Nomura、 Takayuki Hoshi、 Yoichi Ochiai、 Tatsuki Fushimi
- 【掲載誌】 *PNAS Nexus*
- 【掲載日】 2023年6月19日
- 【DOI】 10.1093/pnasnexus/pgad207
- 【解説動画】 https://youtu.be/zzD_qJXOS00

問い合わせ先

【研究に関すること】

伏見 龍樹 (ふしみ たつき)

筑波大学 図書館情報メディア系/デジタルネイチャー研究開発センター 助教

URL: <https://digitalnature.slis.tsukuba.ac.jp/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp

北海道大学社会共創部広報課

TEL: 011-706-2610

E-mail: jp-press@general.hokudai.ac.jp