

## 音響放射力と音響流れを併用した微小物体の操作

Manipulation of micro/nano particles  
by combining acoustic radiation force with acoustic streaming

○学 平田 菜摘 (中央大) 学 吉越 孝樹 (中央大) 正 早川 健 (中央大)

Natsumi HIRATA, Chuo university, natsumi\_natsumi@mnrobo.mech.chuo-u.ac.jp  
Kouju YOSHIKOSHI, Chuo university, yoshikoshi\_kouju@mnrobo.mech.chuo-u.ac.jp  
Takeshi HAYAKAWA, Chuo university, hayaka-t@mech.chuo-u.ac.jp

In this study, we propose a manipulation method of micro/nano particles based on an acoustic radiation force and an acoustic streaming. In recent years, analyses of micro/nano particles are attracting large attention in the fields of medicine or biology. In a manipulation of micro/nano particles, acoustofluidics is a strong candidate because of its high throughput, low invasiveness and simple systems. Manipulation methods based on acoustofluidics consist of acoustic radiation force and acoustic streaming. Acoustic radiation force can arrange microparticles with high precision. On the other hand, acoustic streaming can manipulate nanoparticles with strong force. Thus, we can manipulate both micro and nano particles by combining acoustic radiation force and acoustic streaming. In this study, we fabricated a device to manipulate micro/nano particles by combining acoustic radiation force and acoustic streaming. As a result, we manipulated micro particles by using acoustic radiation force and we observed acoustic streaming were generated.

**Key Words:** Microfluidics, Micromanipulation, Acoustofluidics

## 1. 緒言

近年, 医学や生物学などの分野において, CTC[1]やエクソソーム[2]といったマイクロ・ナノ粒子の解析が盛んに研究されている. CTCは血液中を移動し, がん転移を引き起こす腫瘍細胞である. また, エクソソームは細胞間の情報伝達を行う細胞外小胞であり, これらの細胞を解析することで, 病気の早期発見に貢献できると考えられる. マイクロ・ナノ粒子を解析するためには, 不要な粒子の分離や希薄な粒子の濃度を高める濃縮といった操作が必要である. 従来のマイクロ・ナノ粒子の操作原理として, 光ピンセット, 磁気力, 電気力, 音響力等が挙げられる[3]. なかでも, 音響力を用いた操作方法は高スループットかつ低侵襲で, シンプルなチップ構造であるため, マイクロ・ナノ粒子の操作に適している.

音響力による操作原理として, 音響放射力と音響流れの2つがある[4]. 音響放射力は粒子が音響波の節に集まる力であり, マイクロ粒子の高精度な位置決めを得意とするが, ナノ粒子の操作では十分な操作力が得られない. 一方, 音響流れは音響圧力の差により生じる局所的な流れである. その流れの流体力を用いるため, ナノ粒子に対しても強い力で操作できるが, 粒子の高精度な位置決めは困難である.

そこで本研究では, マイクロ粒子とナノ粒子を同時に操作するために, 音響放射力と音響流れを同時に扱うことのできるデバイス設計を目的として研究を行う.

## 2. 方法

本研究では, 図1のような音響放射力と音響流れを同時に扱うことのできるデバイスを提案する. このデバイスに圧電素子から発生する音響波を印加することで, 液体中に定常波が生じる. その定常波によって液体中の粒子には音響放射力が働き, マイクロ構造体周囲には音響流れが発生する. 音響放射力はサイズの大きい粒子に強く作用するため, マイクロ粒子のみを高精度に配列させることができる. 一方, 音響放射力の影響をうけにくいナノ粒子に対しては, マイクロ構造体周囲に発生する音響流れによって, マイクロ構造体周囲に留めることができる. したがって, このデバイスを用いることで異なるサイズの粒子に対して別々の操作を行うことが可能となる.

実験デバイスの材料は音響波の伝播効率を考え, (1)式で表される音響波の透過率  $T$  に影響を与える音響インピーダンスを考慮して決定した[5].

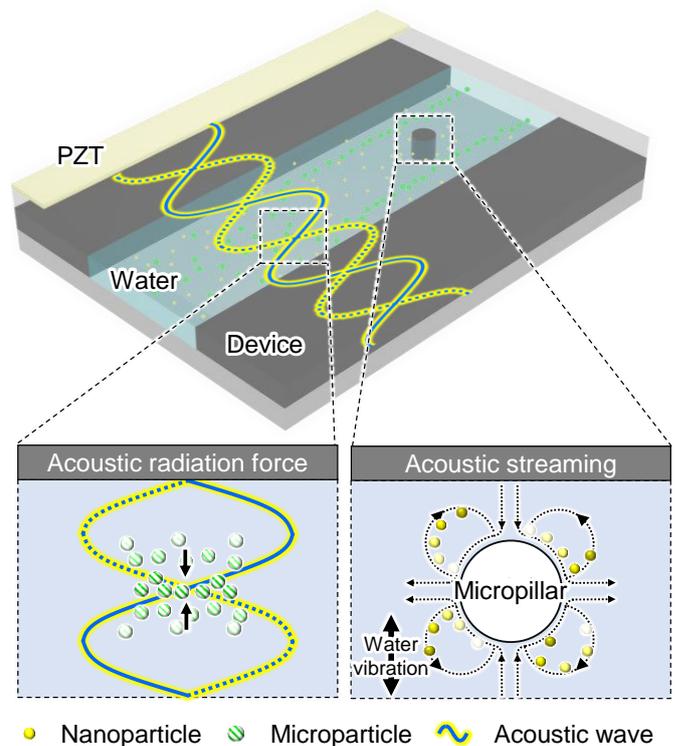


Fig. 1 System by using acoustic radiation force and acoustic streaming

$$T = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (1)$$

ここで, 入射側と透過側の物質の音響インピーダンスをそれぞれ  $Z_1$ ,  $Z_2$  とする. 式(1)より音響波が透過する二つの物質の音響インピーダンスが近いほど透過率  $T$  が高くなることが分かる. したがって, 圧電素子と音響インピーダンスが近いシリコンを用いてデバイスを作製した. また, 本研究では, 図2のような正方形チャンバーを用いる.

$$L = \lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

チャンパーの一边の長さ $L$ の設計値は式(2)より決定した。水温を 35 °Cとした際に水中での音速 $c$ は 1520 m/s であり[6], 周波数 $f$ を 3.0 MHz とすると, 音響波の波長 $\lambda$ は 506.7  $\mu\text{m}$ となる。よって, チャンパーの一边の長さ $L$ を音響波の一波长である 506.7  $\mu\text{m}$  とする。以上の結果より設計したデバイスを図 3 に示す。

### 3. 実験

#### 3.1. 音響放射力の観察

本実験では音響放射力と音響流れを同時に評価するために, まず直径 5  $\mu\text{m}$  の粒子を用いて音響放射力を観察した。なお, 図 3 に示すようにデバイスに圧電素子を貼り付けることにより振動を印加した。

#### 3.2. 音響流れの観察

次に, マイクロ構造体周囲における音響流れを観察した。マイクロ構造体は高さと直径をそれぞれ 200  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  とする円柱であり, 音響流れの確認には直径 1  $\mu\text{m}$  の粒子を用いた。また, 音響流れの評価は粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry, PIV)を用いて解析を行った。

### 4. 実験結果

#### 4.1. 音響放射力の観察

圧電素子に電圧を 20 V, 周波数を 4.206 MHz で振動を印加した際のチャンパー内の様子を図 4 に示す。また, 音響波を印加する前と音響波を印加した際の粒子の様子をそれぞれ図 4(a), (b)に示す。この結果より, 粒子が横に 3 列で並んでいることが分かる。音響波の節に粒子が捕捉されていると考えられるため, チャンパー内に 1.5 波長分の定常波が発生したと推察される。

#### 4.2. 音響流れの観察

次に, 電圧を 20 V, 周波数を 2.99 MHz で印加した際の音響流れの様子と PIV 画像をそれぞれ図 5 (a), (b)に示す。図 5 より, マイクロ構造体周囲で最大流速 240  $\mu\text{m/s}$  程度で左右方向から吸い込み, 上下方向に放出する流れが発生したことが分かる。また, マイクロ構造体周囲で 4 つの渦を確認できる。したがって, この流れを用いることで粒子を構造体周囲に留めることができると考えられる。

### 5. 結言

本研究では, 音響放射力と音響流れを併用した微小物体の操作手法を提案した。まず, マイクロ粒子を用いて音響放射力を観察した。次に, よりサイズの小さい粒子を用いて音響流れの観察と評価を行った。今後は, 音響放射力と音響流れを同時に発生させることでマイクロ粒子とナノ粒子を同時に操作する予定である。また, 作製したデバイスを用いて細胞の分離・ナノ粒子の濃縮などの操作へ応用する予定である。

### 謝辞

本研究は中央大学基礎研究費及び JST A-STEP (JPMJTM20LX) の研究助成により行われた。

### 参考文献

- [1] Yu, M., Stott, S., Toner, M., Maheswaran, S., and Haber, D. A., *Journal of Cell Biology*, vol. 192.3, pp. 373-382, 2011
- [2] Li, P., Kaslan, M., Lee, S. H., Yao, J., and Gao, Z., *Theranostics*, vol. 7-3, pp. 789, 2017.

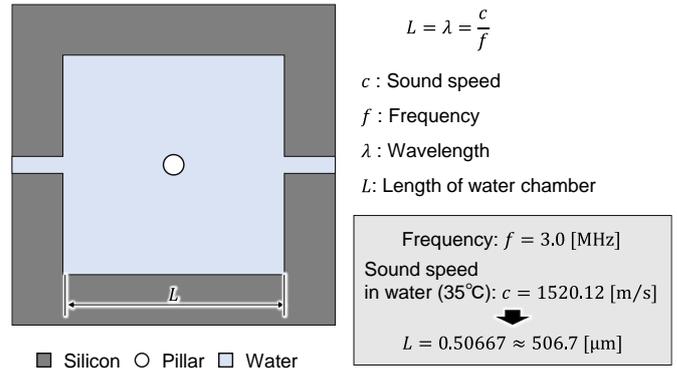


Fig. 2 Device parameter

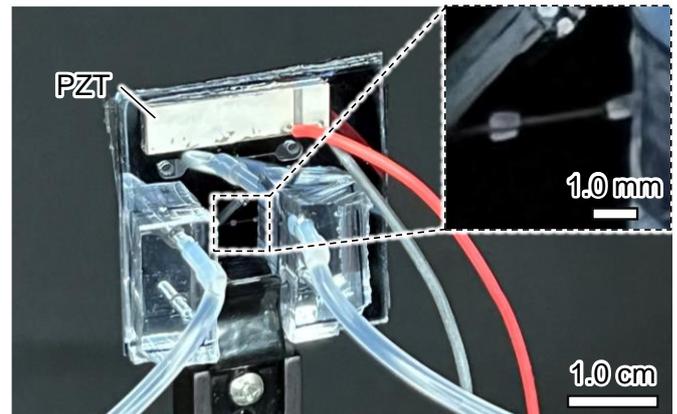


Fig. 3 Experimental device

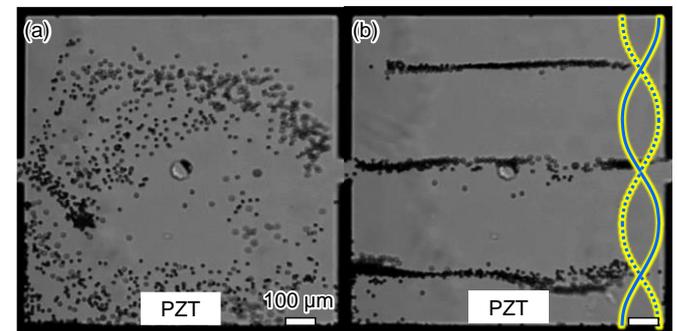


Fig. 4 Observation of acoustic radiation force (a)before, (b) after

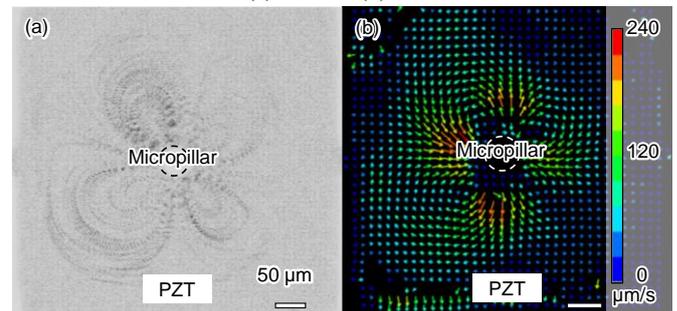


Fig. 5 Acoustic streaming around the micro pillar (a) acoustic streaming, (b) PIV

- [3] Salafi, T., Zeming, K. K., and Zhang, Y., *Lab on a Chip*, vol. 17.1, pp. 11-33, 2017
- [4] Gu, Y., Chen, C., Mao, Z., Bachman, H., Becker, R., Rufo, J., and Huang, T. J., *Science advances*, vol. 7.1, pp. eabc0467, 2021
- [5] Lenshof, A., Evander, M., Laurell, T., and Nilsson, J., *Lab on a Chip*, vol. 12.4, pp. 684-695, 2012
- [6] Greenspan, M., and Tschiegg, C., E., *Journal of Rese arch of the National Bureau of Standards*, vol. 59-4, 1957