

# 鉛直壁面付近に生じた定在波による マイクロ粒子の音響マニピュレーション

## Acoustic Manipulation of Microparticles by Standing Wave in Vicinity of Vertical Wall

○正 星 貴之 (名工大) 河野通就 (東京大) 落合陽一 (東京大)

Takayuki HOSHI, Nagoya Institute of Technology, star@nitech.ac.jp  
Michinari KONO, The University of Tokyo  
Yoichi OCHIAI, The University of Tokyo

We previously reported three-dimensional acoustic manipulation. Two opposite ultrasonic phased arrays generate a localized standing wave at an arbitrary position in midair. Submillimeter-sized particles are suspended in the nodes of the standing wave and moved by gradually changing the position of the standing wave. It turned out that the unbalance of the conditions of the ultrasonic phased arrays causes the drift of the standing wave and the particles drop off at the end of the standing wave. In this paper, a standing wave is generated by a single array with a reflection plate. This configuration enables more stable manipulation in the directions parallel to the reflection plate.

**Key Words:** Acoustic levitation, Manipulation, Microparticles, Ultrasound, Phased array

### 1. はじめに

我々は、空中を伝搬する超音波を用いたサブミリメートルサイズの微小粒子の三次元操作の研究を行っている [1]。任意の位置に超音波を集束させるフェーズドアレイ 2 台を向い合せて配置し、共通の位置に超音波焦点を形成する。そこには超音波ビームの太さと焦点深度程度の長さを持つ局在した定在波が生じる。集束された超音波の振幅は十分大きく、定在波の音圧の節に微小粒子を捉えて浮かせることができる。さらに焦点を連続的に移動させることにより、微小粒子を三次元的に動かすことができる。

上述の微小粒子の操作において、定在波の位置が片方のアレイに向かってドリフトしていく現象が確認されている [1]。これは 2 台のアレイの動作条件が完全には同一でないことに起因する。焦点距離の調整によりドリフトを相殺することも考えられるが、微小粒子の位置を計測するカメラなどの追加機材が必要となる。フィードバックなしに安定化することができれば、簡略な構成を維持できる。

ところで我々は、フェーズドアレイ 1 台による二次元操作の研究も行っている [2]。アレイを下向きに設置し、床面付近に焦点を形成する。アレイからの入射波と床面からの反射波が干渉し、床面付近に局在した定在波が生じる。この構成においては床面が常に定在波の音圧の腹となるため捕捉された微小粒子の位置は最初に挿入された節の高さに固定され、床面に平行な二次元の操作が可能である。

本稿では、フェーズドアレイ 1 台と鉛直壁面を用いた上下方向の移動自由度のある音響マニピュレーションについて報告する。超音波ビーム方向の自由度は失われるが、入射波と反射波が同一の波源から供給されているためドリフトの問題が解消され、微小粒子を長時間保持できることが期待される。

### 2. 原理

#### 2.1 集束超音波

本稿で用いるフェーズドアレイは一辺 17 cm の矩形領域内に 285 個の超音波振動子 (T4010A1、日本セラミック株式会社製、共振周波数 40 kHz、直径 1 cm) を配列したものである [3]。内蔵された FPGA が焦点位置の指令値にもとづいて振動子間の適切な位相差を算出し、各振動子に応じた駆動信号を生成する。焦点における音圧の最大値は 2585 Pa RMS である。焦点位置は 0.5 mm 刻みで指定可能である。

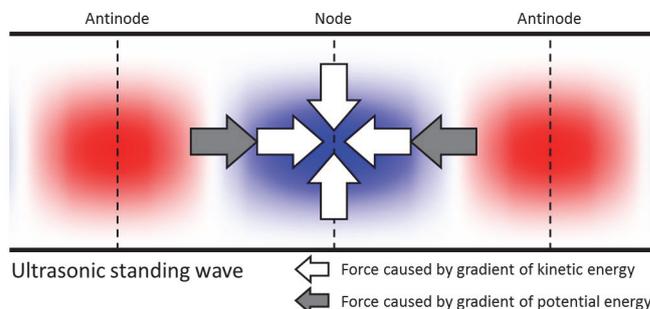


Fig. 1 Potential distribution inside of ultrasonic standing wave and forces acting on particles.

矩形の振動子アレイを用いたとき、焦点面に生じる超音波の音圧分布はほぼ sinc 関数に従うことが理論的に導かれている。メインローブ (焦点) の直径  $w$  [m] は次式で表される。

$$w = \frac{2\lambda R}{D} \quad (1)$$

ここで  $\lambda$  [m] は超音波の波長 (40 kHz の場合 8.5 mm)、 $R$  [m] は焦点距離、 $D$  [m] は矩形振動子アレイの一辺の長さ (今回は 17 cm) である。例えば焦点距離  $R = 15$  cm のとき、焦点径 (すなわち超音波ビームの太さ)  $w = 15$  mm となる。

#### 2.2 音響浮揚

定在波ビームの中で体積  $V$  [m<sup>3</sup>] の微小粒子が受ける力  $\mathbf{F}$  [N] は、微小粒子の密度が空気よりも十分大きく、圧縮率が空気よりも十分小さいことを仮定すると次式で与えられる [4]。

$$\mathbf{F} = -V\nabla U \quad (2)$$

$$U = -\frac{3}{2}\langle K_a \rangle + \langle P_a \rangle \quad (3)$$

$U$  [J/m<sup>3</sup>] は力学的ポテンシャルを表し、微小粒子はポテンシャルが低い方へ向かう力  $\mathbf{F}$  を受ける。 $K_a$  [J/m<sup>3</sup>] は音場の運動エネルギー密度、 $P_a$  [J/m<sup>3</sup>] は音場のポテンシャルエネルギー密度である。山括弧は時間平均を表す。

定在波の音圧の腹において粒子速度が最小、音圧が最大であり、 $U$  は極大かつ正の値をとる。一方、定在波の音圧の節

において粒子速度が最大、音圧が最小であり、 $U$  は極小かつ負の値をとる。また粒子速度も音圧も超音波ビームの外周部より中心部のほうが大きい。すなわち、定在波の音圧の節のビーム中心部がビーム方向にも断面方向にも極小となり、微小粒子を引き寄せる (図 1)。微小粒子にかかる重力  $\rho V g$  よりも  $F$  が大きいとき微小粒子は空中に留まる。ここで  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] は微小粒子の密度、 $g$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] は重力加速度である。

### 3. 鉛直壁面による定在波

#### 3.1 実験系の構成

本稿で用いる実験系を図 2 に示す。文献[1]でフェーズドアレイ間の距離を 520 mm に設定していたことに倣い、フェーズドアレイから鉛直壁面までの距離を 260 mm に設定した。また同様に、焦点距離に 30 mm のオフセットを加え、音圧振幅は最大値の 70% とした。鉛直壁面には幅 20 mm のアクリル板を用いた。今回は特に焦点が静止した状態でのドリフトに着目しており、この板の中央部に焦点を形成して実験を行った。微小粒子には直径 500  $\mu\text{m}$  のポリスチレン球を用いた。

#### 3.2 保持時間

文献[1]では、初期状態で超音波ビームに沿って 30 個の節に微小粒子が捕捉され、時間経過とともに徐々に一方向に移動しながら端から落下していき、12 分後にすべての微小粒子が落下したことが報告されている。

鉛直壁面の場合にドリフトが生じるかについて検証実験を行う。上述のように超音波焦点を形成して、鉛直壁面付近に局在した定在波を発生させる。微小粒子を上から振りかけることで節に捕捉させた。17 個の節にそれぞれ 1~8 個程度の微小粒子が捕捉された。微小粒子はポテンシャルの勾配のため細かく振動しており、通常の露光時間で写真を撮ると各節の微小粒子の集団がひとつかたまりのように見える。

微小粒子を保持した状態のまま、時間経過に従って落下するかどうかを観察した。30 分経過後、微小粒子はひとつも落下していなかった。ドリフトはほぼ生じていないことが確認されたと結論付け、ここで実験を打ち切った。

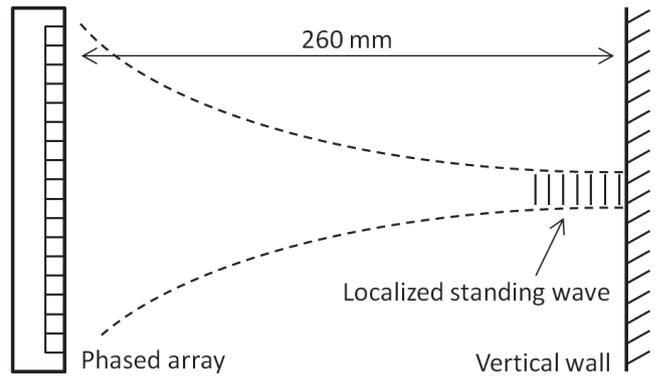
実験中、特定の節に捕捉された微小粒子が 2 カ所を頻りに行き来する様子が観察された (図 3 において左から 3 番目)。これは、フェーズドアレイにより生じる超音波ビームがここで複数に分岐しているためと考えられる。今回の実験の範囲では問題にならなかったが、この不安定性は微小粒子が落下する要因になりうるため実用上は避けることが望ましい。

#### 3.3 上下方向の移動

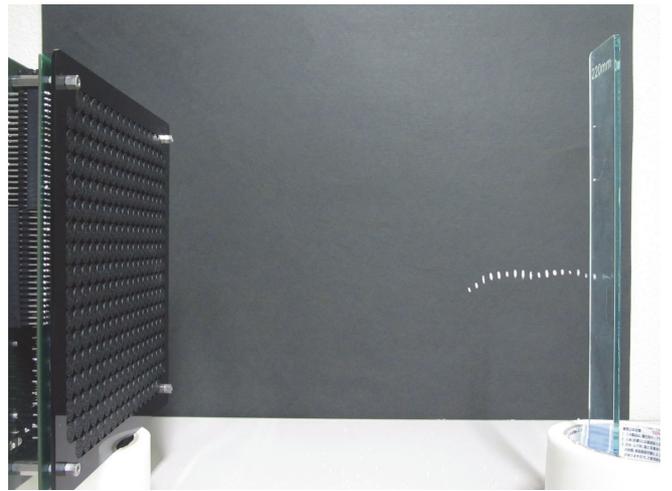
上述の実験後、焦点位置を上下に連続的に変更することで捕捉された微小粒子を移動させられることを確認した。25 mm の距離を 25 mm/s で数秒間往復した限りでは、微小粒子は落下しなかった。移動距離や移動速度、およびひとつの節に捕捉されている微小粒子の個数によっては、移動中に一部が落下する可能性も考えられる。

### 4. おわりに

本稿では鉛直壁面を用いた微小粒子の音響浮揚および操作について報告した。入射波と反射波が同一の波源から供給されることから、従来の波源を対向させる方法よりも定在波の節の位置が安定する。また超音波焦点の移動により微小粒子を上下に移動させることもできる。これらのことを実験的に確認した。上下方向に安定に移動させられることから、物体を非接触で持ち上げて水平に運ぶなどの応用が考えられる。



(a) Illustration.



(b) Photo.

Fig. 2 Experimental setup of acoustic levitation with vertical wall.

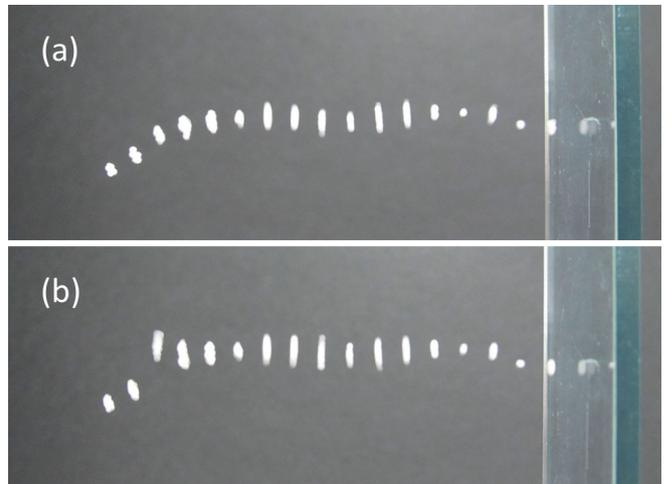


Fig. 3 Close-up of levitated particles. Two states were observed.

### 文 献

- [1] T. Hoshi, Y. Ochiai, and J. Rekimoto: Three-Dimensional Noncontact Manipulation by Opposite Ultrasonic Phased Arrays, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53, 07KE07, 2014.
- [2] 河野, 星, 寛: lapillus bug : 音響浮揚操作に基づいた粒子の生物学的表現とインタラクション, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 19, no. 4, pp. 615-624, 2014.
- [3] 星: 空中超音波触覚ディスプレイの可搬性の向上, ROBOMEC 2012 講演論文集, 1A1-A03, 2012.
- [4] 竹内: 微小物体の超音波マイクロマニピュレーション, 日本音響学会誌, vol. 52, no. 3, pp. 203-209, 1996.