

超音波フェーズドアレイによる音響浮揚の拡張*

○星貴之 (東京大)

1 はじめに

超音波の定在波を用いた開放空間における音響浮揚はこれまでに多くの報告がなされている^[1]。特に浮揚粒子の移動自由度について考えると、最初の Whymark による報告^[2]は振動子と反射板の組み合わせで粒子を空中に保持するものであった。小塚ら^[3]は振動子を向い合せにした構成で、位相差を制御することにより粒子を一次元的に移動させることを可能にした。Foresti ら^[4]は振動子の配列と反射板の間に水滴を浮揚させ、振動子間の振幅差を制御することにより二次元的に移動させる装置を構築した。

我々はこれらの先行研究に対して、粒子を三次元的に移動させる技術を開発した。従来よく使われてきたボルト締めランジュバン型振動子に替えて、ユニモルフ型振動子を数百個並べてそれぞれの位相を個別に制御する振動子アレイ(フェーズドアレイ)を採用した。位相制御により超音波焦点を任意の位置に形成し、自在に動かすことができる。焦点は数 cm (焦点深度) 程度の長さをもつ超音波ビームとみなせる。このアレイを向かい合わせにして共通の位置に焦点を結びと定在波が形成され音圧の節の位置に粒子を保持する。この技術の特長は以下の通りである。

移動自由度の拡張：焦点位置を連続的に移動させると保持された粒子も追従する。これにより三次元の移動が可能となる。

作業空間の拡張：集束させることにより遠方(1 m 弱、従来の 10 倍弱)まで、十分大きな振幅の超音波を届けることができる。

空間分布の拡張：位相制御により、単一だけでなく複数の超音波ビームや空間的な広がり動的に変化する定在波を形成できる。

本稿では、我々が採用した超音波フェーズドアレイ^[5]について説明し、これによって実現された浮揚粒子の三次元移動^[6]と平面状の空間分布^[7]を紹介する。

2 超音波フェーズドアレイ

我々が採用した超音波フェーズドアレイは 170×170 mm² の正方形領域に共振周波数 40 kHz の超音波振動子 (T4010A1, 直径 10 mm, 日本セラミック社製) を 285 個配列したものである。駆動回路には FPGA が搭載されており、USB インタフェースを介して PC からの指令を受信する。この指令に応じて FPGA は各振動子に対して、個別に適切な位相の駆動信号を生成する。駆動信号は FPGA の電源電圧 3.3 V から 24 V に増幅され HPF により直流成分を除去されたのち振動子に送られる。

各振動子の位相の算出法については以降の章で説明する。なお FPGA 内では、超音波の波長および周期の 16 分の 1 を最小単位として距離および位相の計算を行う。従って、焦点座標は 0.53 mm 刻みで指定される。

振動子から出力される超音波は、位相だけではなく振幅も制御可能である。これは駆動信号(矩形波)の PWM 制御によって行われる。一周期を T [s], パルス幅を W [s], n を整数として、PWM 信号 $V(t)$ [V] を以下のように記述する (Fig. 1)。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 & (nT \leq t < nT + W) \\ 0 & (nT + W \leq t < nT + T) \end{cases} \quad (1)$$

この信号のフーリエ級数展開の基本周波数 40 kHz 成分の振幅 a_1 [V] は次式で表される。

$$a_1 = \frac{2}{\pi} V_0 \sin\left(\pi \frac{W}{T}\right) \quad (2)$$

これは Duty 比 50% ($W = T/2$) で最大値をとる。放射される超音波は、この振幅に比例する。FPGA 内では W を 624 段階で制御できるよう実装されている。

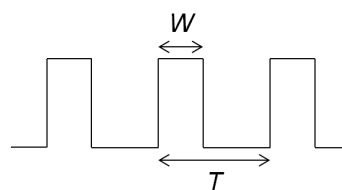


Fig. 1 PWM of 40 kHz rectangular wave.

* Augmentation of Acoustic Levitation by Phased Array of Airborne Ultrasound, by HOSHI, Takayuki (The University of Tokyo).

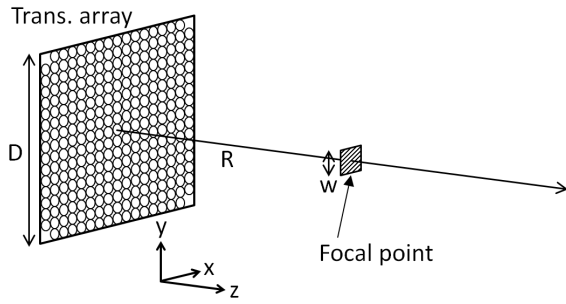


Fig. 2 Focal point.

3 移動自由度の拡張

アレイを向かい合わせに配置して、共通の焦点位置にそれぞれ単一焦点を結び、定在波を形成する。保持された粒子は定在波の移動に追従して移動する。焦点面内の移動も焦点距離の変化も可能であることから、三次元に移動させることができる。

3.1 点集束

単一焦点を結ぶための位相の算出法を以下に示す。焦点座標 (x_f, y_f, z_f) と i 番目の振動子の位置 (x_i, y_i, z_i) が与えられたとき距離 l_i [m] を以下のように計算する。

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2 + (z_i - z_f)^2} \quad (3)$$

この距離にもとづいて、位相 θ_i [rad] は以下のように算出される。

$$\theta_i = k l_i \quad (4)$$

ここで k [rad/m] は超音波の波数である。この位相の分だけ進める。これはすなわち距離が遠い振動子ほど早く超音波を出力することを意味している。

正方形アレイを用いた場合、焦点面内での音圧分布はほぼ sinc 関数に従うことが理論的に導かれている^[5]。アレイの辺と平行な方向の焦点径 w [m] は次式で与えられる。

$$w = \frac{2\lambda R}{D} \quad (5)$$

ここで λ [m] は超音波の波長、 R [m] は焦点距離、 D [m] はアレイの一辺の長さである (Fig. 2)。すなわちアレイサイズと空間解像度はトレードオフの関係にある。我々のアレイでは $\lambda = 8.5$ mm, $R = 200$ mm, $D = 170$ mm であることから $w = 20$ mm である。また焦点の中心における最大音圧を実測したところ 2585 Pa RMS (162 dB SPL) であった。

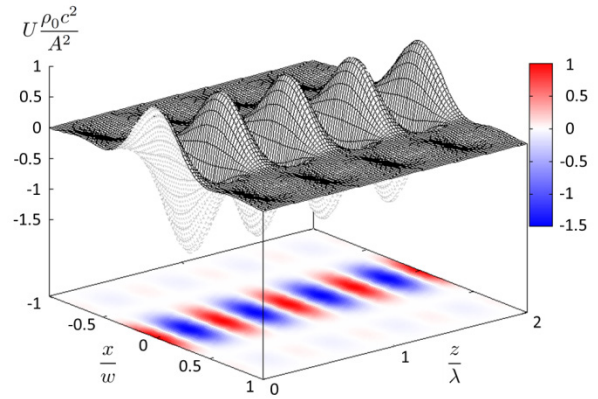


Fig. 3 Potential distribution of linear standing wave of ultrasound.

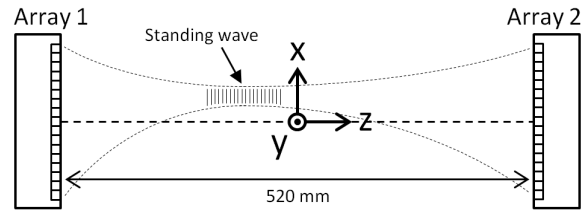


Fig. 4 Setup for linear acoustic levitation.

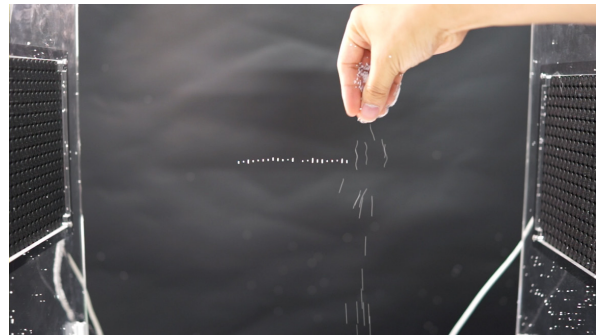


Fig. 5 Polystyrene particles are suspended in air.

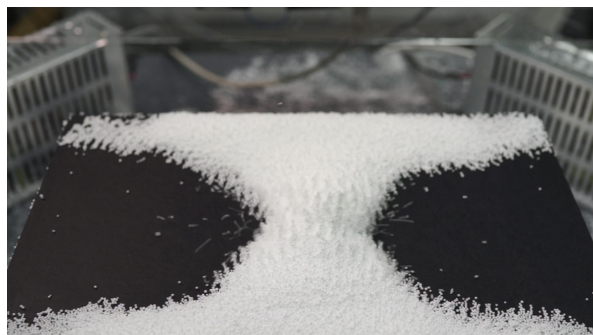
3.2 直線状粒子浮揚と三次元移動

定在波による音響浮揚の原理は Gor'kov^[8] や Nyborg^[9] により示されている。粒子の密度が空気より十分大きく、圧縮率が空気より十分小さいとき、体積 V [m³] の粒子が音場から受ける力 \mathbf{F} [N] は次式で与えられる。

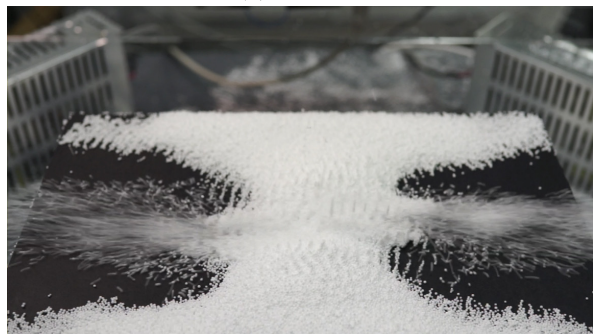
$$\mathbf{F} = -V\nabla U \quad (6)$$

$$U = -\frac{3}{2}\langle K_a \rangle + \langle P_a \rangle \quad (7)$$

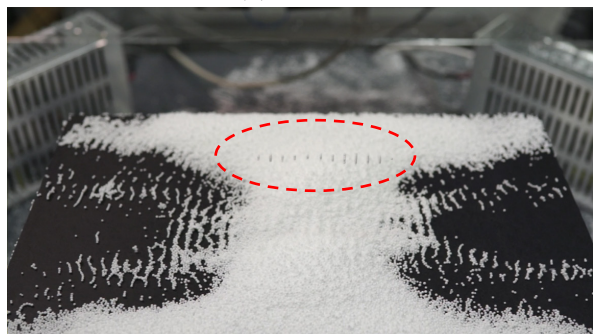
ここで U [J/m³] は力学的ポテンシャルを表し、粒子はポテンシャルが低い方へ向かう力 \mathbf{F} を受ける。 K_a [J/m³] は音場の運動エネルギー密度、 P_a [J/m³] は音場のポテンシャルエネルギー密度である。 $\langle \cdot \rangle$ は時間平均を表す。断面が sinc 関数の超音波ビームによる定在波のポテンシャル分布を Fig. 3 に示す。音圧の節



(a) 0.0 sec.



(b) 0.5 sec.



(c) 1.0 sec.

Fig. 6 Scooping-up sequence. The standing wave moves through the mass of polystyrene particles.

の位置でポテンシャルは極小値をとり、そこに粒子が引き寄せられ、重力に抗して空中に保持される。

アレイを 520 mm の距離で向かい合わせにして (Fig. 4) 直径 0.5 mm のポリスチレン粒子を浮揚させた (Fig. 5)。最大値の 7 割程度の振幅で十分であった。また定在波を下から上へと移動させることにより粒子を持ち上げることができた (Fig. 6)。

4 空間分布の拡張

位相制御の仕方によって様々な空間分布を形成することができる。ここではアレイ四枚それぞれからシートビームを放射することにより平面的な広がりをもつ定在波を形成して粒子を格子状に保持した事例を紹介する。

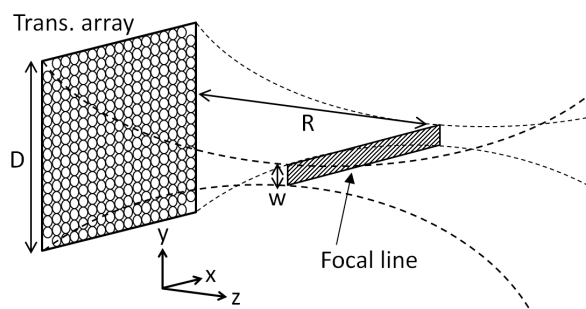


Fig. 7 Focal line.

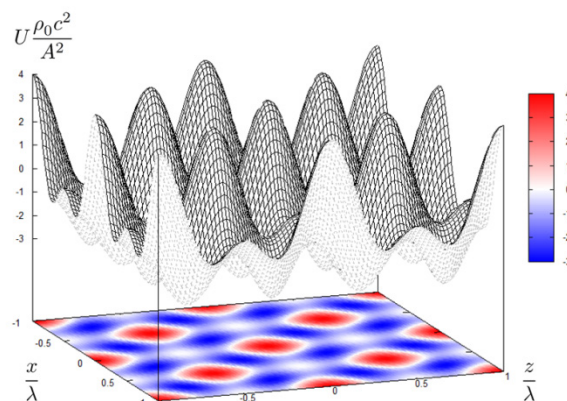


Fig. 8 Potential distribution of planar standing wave of ultrasound.

4.1 線集束

シートビームのための位相の算出法を以下に示す。x 軸方向に長い線状焦点の中心座標 (x_f, y_f, z_f) と i 番目の振動子の位置 (x_i, y_i, z_i) が与えられたとき距離 l'_i [m] を以下のように計算する。

$$l'_i = \sqrt{(y_i - y_f)^2 + (z_i - z_f)^2} \quad (8)$$

これは x 軸方向には集束させないことを表している。この距離にもとづいて、位相 θ'_i [rad] は以下のように算出される。

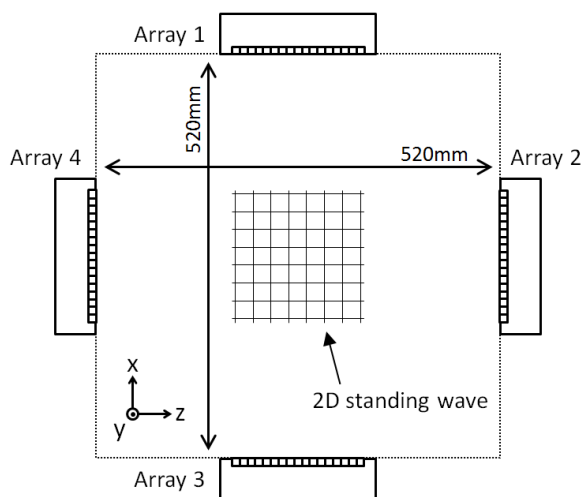
$$\theta'_i = kl'_i \quad (9)$$

この結果、x 軸方向にはアレイとほぼ同じ幅をもち、y 軸方向には式 (5) の厚さ w をもつシートビームが形成される (Fig. 7)。

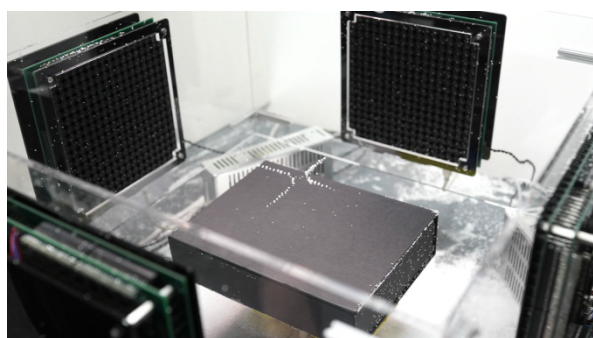
4.2 平面状粒子浮揚

シートビームを放射するアレイを向かい合わせにすると、薄く広い定在波が形成される。二本の定在波を直交させることで平面的な広がりをもつ定在波が形成される。音圧の節は格子状に存在する。この音場中に粒子があるときのポテンシャル分布を Fig. 8 に示す。

アレイ間の距離を 520 mm にして四台配置した (Fig. 9)。それぞれからシートビームを



(a) Illustration.



(b) Photo.

Fig. 9 Setup for planar acoustic levitation.

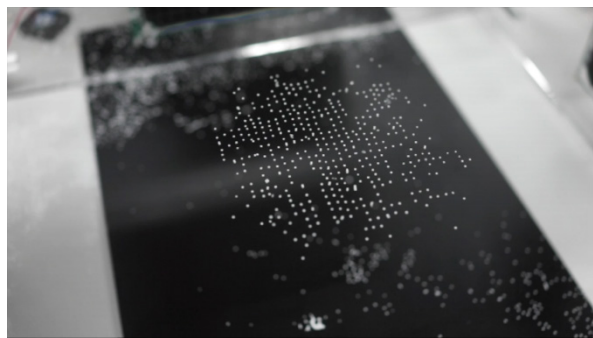


Fig. 10 Grid-like formation of particles.

放射し、ポリスチレン粒子を保持させた様子を Fig. 10 に示す。これらの粒子を保持したまま移動できることも確認した。なお、アレイが放射する超音波の振幅は最大に設定していたが、エネルギーが広く分散されているため粒子を保持する力に余裕がなく気流などの外乱によって容易に落下する様子が見られた。Fig. 10 においてところどころ粒子が抜けているのはこのためである。安定してすべての格子点（音圧の節）に粒子を保持するには、さらに出力の大きいアレイが必要である。

5 おわりに

音響浮揚が超音波フェーズドアレイにより移動自由度、作業空間、空間分布の点で拡張されることを述べた。その実例として三次元音響浮遊と平面状粒子浮揚を紹介した。

二枚のフェーズドアレイを向かい合わせにして定在波を形成するのではなく、一枚のアレイで所望の位置に零点を作ることで粒子を空中に保持する研究も報告されている^[10]。今後、アレイの大規模化と計算機合成ホログラムによる、さらに複雑な操作や分布の実現が期待される。

参考文献

- [1] Zhao and Wallaschek, Arch. Appl. Mech., 81 (2), 123-139, 2011.
- [2] Whymark, Ultrasonics, 13, 251-261, 1975.
- [3] Kozuka *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 46 (7B), 4948-4950, 2007.
- [4] Foresti *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 110 (31), 12549-12554, 2013.
- [5] 星, 計測自動制御学会論文集, 50 (7), 543-552, 2014.
- [6] Hoshi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 53 (7S), 07KE07, 2014.
- [7] Ochiai *et al.*, ACM T. Graphic, 33 (4), article no. 85, 2014.
- [8] Gor'kov, Sov. Phys. Dokl., 6, 773-775, 1962.
- [9] Nyborg, J. Acoust. Soc. Am., 42, 947-952, 1967.
- [10] Marzo *et al.*, Nat. Commun., 6, article no. 8661, 2015.