

DIY 音響浮揚装置を作ってみた (第2報)

星 貴之^{1,a)}

概要：音響浮揚は強力な超音波を発生させる装置が必要であることから、これまで研究所など限られた場所でのみ行われていた。本研究では、一般人にも購入可能な材料を用いた音響浮揚装置の実現を目指す。前報において、市販の超音波実験キットの駆動回路をそのまま使用し、超音波振動子を球面に配列することによって、ポリスチレン粒子を浮揚できることを示した。本報では、3D プリンタを用いて作製した球面アレイについて報告する。

Could Not Help Making Do-It-Yourself Acoustic Levitation Device (2nd Report)

TAKAYUKI HOSHI^{1,a)}

Abstract: Acoustic levitation has been a specialized experiment in a laboratory because it requires an ultrasonic device that radiates an intense ultrasonic wave. This research aims to democratize this attractive technology by realizing an acoustic levitation device consisting of off-the-shelf components. In the previous report, it was demonstrated that polystyrene particles are suspended in air by a hand-made transducer array on a spherical surface with a commercially-available driving circuit of a parametric speaker experiment kit. This paper discusses and reports a 3D-printed spherical transducer array.

1. はじめに

音波の力学的作用のひとつとして音響浮揚が知られている。これは空気中で音波の定在波を発生させたとき、その音圧の節が物体を引き寄せる作用により、物体が捉えられ宙に浮かぶ現象である。可聴音を用いる場合は密閉された容器内で行われることが多い。例えば、立方体の容器に三方向から音を導入して物体を浮揚させる方法 [1] や、クント管を縦向きに設置した実験 [2] が報告されている。一方、超音波を用いる場合は直進性が良く波長が短いため、開放空間における浮揚が可能となる。もっとも多くの研究が行われているのは、ランジュバン振動子と反射板の間に定在波を立てる構成 [3] である。通常はポリスチレン球など軽いものが用いられるが、金属球 [4] や小動物 [5] などの浮揚も報告されている。ランジュバン振動子二個を対向させても定在波を立てることができる。この場合、振動子同士

の位相差を変えることにより浮かせた物体を音軸に沿って（一次的に）動かすことが可能となる [6]。またランジュバン振動子と反射板の構成において振動子を複数個に拡張し、それらの強度差によって水滴や固体を水平に（二次元的に）動かし、衝突させて混ぜ合わせて化学反応させる研究も行われている [7]。

筆者は超音波フェーズドアレイの応用研究を行っている [8]。これは数百個の超音波振動子を配列した装置であり、それぞれの位相を個別に制御することで三次元空間中の任意の位置に超音波焦点を形成する装置である。このフェーズドアレイを床や壁などの平面に向け、その平面近傍に焦点を形成すると、入射波と反射波の重ね合わせにより定在波が形成される。この定在波の位置は位相制御で決定されるため、浮かせた物体を平面に沿って（二次元的に）動かすことができる [9], [10]。また複数のフェーズドアレイを対向させることにより空中の任意の位置に定在波を発生させることもでき、これにより浮揚させた物体を三次元的に操作することが可能となる [11]。さらにこの研究は、浮揚させた物体をピクセルとみなすことによって実世界コ

¹ 名古屋工業大学
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8555, Japan
^{a)} star@nitech.ac.jp

ンピュータグラフィクス [12] へと発展している。

国内外の学会・イベントにおいて研究成果のデモ展示を多数行ってきて中で、筆者は、開放空間において物体が宙に浮くこと自体が人の心を惹き付けることに気付いた。磁石を用いて物体を浮かせる卓上玩具は存在するが、音響浮揚にもとづく玩具は現在のところ市販されていない。また上述のような研究に使われる実験装置は特殊かつ高価であり、一般人にとっては入手が困難である。もし音響浮揚装置が彼ら自身で製作可能であれば、家庭や小中学校でも実験を行うことができ、子供の科学への興味を養うなどの教育的効果が期待される。

前報 [13] において筆者は、市販されているパラメトリック・スピーカー実験キット(トライステート社製)[14]を用いて音響浮遊装置が自作可能であることを示した(図1)。このキットは平面基板に50個の超音波振動子を配列し、同梱の回路によってFM変調された信号で駆動することにより、ごく狭い範囲にのみ可聴音を届けるスピーカーを製作するものである。さらに超音波振動子50個を追加できる拡張キットも用意されている。これらの超音波振動子と駆動回路を利用する。パラメトリック・スピーカー用の駆動回路は1チャンネルしかもたないため位相制御することはできない。そこでプラスチックの半球を加工して振動子を配列することにより、全ての振動子を同位相で駆動しても超音波焦点が形成されるようにした。この球面超音波振動子アレイを2個作成し、それぞれの焦点が重なるように向い合わせるにより、中央にビーム状の定在波が形成される。研究に使われるものより出力が弱いですが、直径0.5mmのポリスチレン粒子を浮かせられることを確認した。

本報では、この振動子アレイの安定性を向上させる。前報の音響浮揚装置は振動子アレイの両端を支える機構を設計しておらず、テープで固定あるいは手で支えるなど不安定なものであった。玩具として楽しむためには安定していることが望まれるため、改善を目指す。具体的には一般人向け3Dプリントサービスを利用して、固定用の縁をもつ球面を作製し、そこに振動子を配列する。配線の手間を軽減するため、プリント基板製造サービスを利用したフレキシブル基板の導入も試みる。

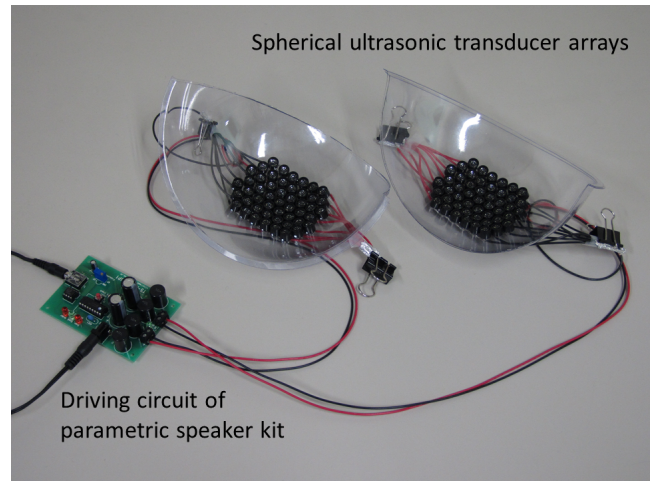
2. 音響浮揚の原理

本章では音響浮揚の原理について説明する。微小な球体が音場中で受ける力 F [N] は以下の式で表される [15]。

$$F = -V\nabla U \quad (1)$$

$$U = -B\langle K_a \rangle + (1 - \gamma)\langle P_a \rangle \quad (2)$$

ここで V [m³] は微小球体の体積、 U [J/m³] はポテンシャル、 K_a [J/m³] と P_a [J/m³] は音場の運動エネルギー密度と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。また B と γ はそれぞれ以下の式で定義される。



(a)



(b)

図1 前報の音響浮揚装置。(a) ハードウェア構成。(b) ポリスチレン粒子の浮揚。

Fig. 1 Acoustic levitation device reported in previous study. (a) Hardware. (b) Levitation of polystyrene particles.

$$B \equiv \frac{3(\rho - \rho_0)}{2\rho + \rho_0} \quad (3)$$

$$\gamma \equiv \frac{\beta}{\beta_0} \quad (4)$$

ここで ρ [kg/m³] と ρ_0 [kg/m³] は微小球体と媒質の密度、 β [N/m²] と β_0 [N/m²] は球体と媒質の圧縮率である。媒質が空気の場合は $\rho \gg \rho_0$ および $\beta \ll \beta_0$ が仮定できることから、 $B \approx 3/2$ および $\gamma \approx 0$ とみなしてよい。

三次元空間の Z 軸方向に沿った定在波を仮定する。その音圧分布 p [Pa] は以下の式で表される。

$$p = \sqrt{2} A g(x, y) \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) e^{-j\omega t} \quad (5)$$

ここで A [Pa] は振幅の実効値、 $g(x, y)$ は超音波ビームの断面形状、 λ [m] は波長、 ω [rad/s] は角周波数である。この定在波の $\langle K_a \rangle$ と $\langle P_a \rangle$ は以下のように記述される。

$$\langle K_a \rangle = g(x, y) \frac{A^2}{\rho_0 c^2} \sin^2\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \quad (6)$$

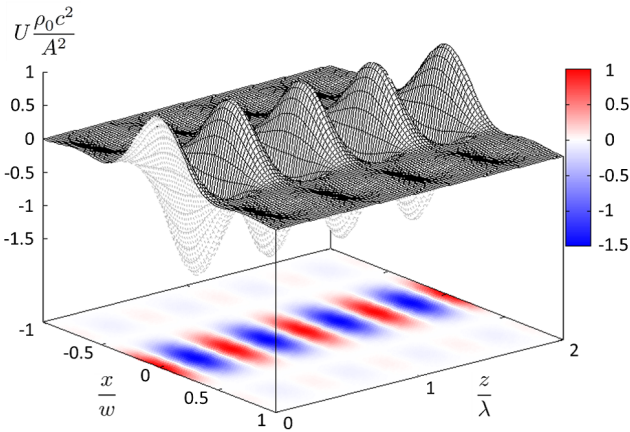


図 2 正方形振動子アレイを用いて発生させた定在波のポテンシャル分布 .

Fig. 2 Distribution of potential in standing wave generated by square ultrasonic transducer array.

$$\langle P_a \rangle = g(x, y) \frac{A^2}{\rho_0 c^2} \cos^2\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \quad (7)$$

ここで $c = 340 \text{ m/s}$ は空気中の音速である . 式 (6) , (7) を式 (2) に代入することで次式が得られる .

$$U \simeq g(x, y)^2 \frac{A^2}{\rho_0 c^2} \left[-\frac{3}{2} + \frac{5}{2} \cos^2\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \right]. \quad (8)$$

超音波ビームの断面形状 $g(x, y)$ は振動子アレイの形状や制御法に依存する . 位相制御によって単一の焦点を結ぶ場合 , 光学系のレンズと同様 , 焦点面における断面は振動子アレイの形状のフーリエ変換によって近似的に記述できる . 例えば振動子アレイが正方形の場合 , 断面形状は次式で表される .

$$g(x, y) \simeq \text{sinc}\left(\frac{2\pi x}{w}, \frac{2\pi y}{w}\right) \quad (9)$$

ここで $\text{sinc}(x, y) = \sin x \sin y / xy$ は二次元 sinc 関数である . また $w \text{ [m]}$ はメインローブの幅であり次式で定義される .

$$w \equiv \frac{2\lambda R}{D} \quad (10)$$

ここで $R \text{ [m]}$ は焦点距離 , $D \text{ [m]}$ は正方形アレイの一辺の長さである . これを用いた場合の焦点付近の定在波のポテンシャル分布を図 2 に示す . 超音波ビームの中心軸上 , 定在波の節の位置にポテンシャルの谷が形成されており , ここに微小球体が引き寄せられて浮揚する .

3. パラメトリック・スピーカー実験キット

本研究で採用するパラメトリック・スピーカー実験キットについて説明する . これは超音波振動子アレイと駆動回路からなる , 狭い範囲にのみ可聴音を届けるスピーカー (超指向性スピーカーとも呼ばれる) [16] の組立てキットである . 振動子の共振周波数は 40 kHz である . 振動子アレイ

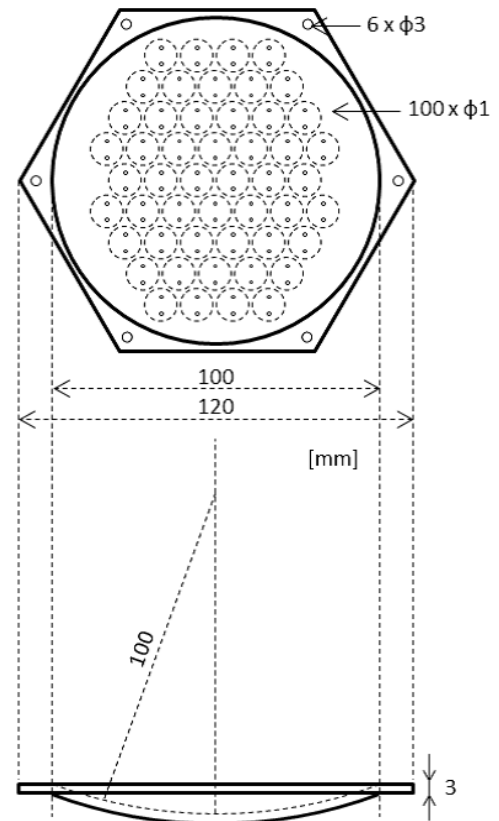


図 3 設計した振動子アレイ用の球面の寸法 .

Fig. 3 Dimensions of designed transducer array.

イは平面基板に振動子 50 個を搭載し , 同相で駆動されることにより直進性のよい超音波の平面波を出力する . また駆動回路はオーディオ入力に応じて超音波の波形を FM 変調する機能を持ち , 空気の自己復調作用により変調成分が可聴音として放射される . これにより超音波ビームに沿った仮想的な可聴音の音源アレイが空気中に形成され , 結果として可聴音のビームが形成される . また , この駆動回路は別売りの振動子アレイをもう 1 個接続できるように設計されている .

4. 球面超音波振動子アレイ

4.1 設計

パラメトリック・スピーカー実験キットの出力する超音波は比較的弱い . 集束させて焦点を形成することにより音響浮揚に必要な音圧を得る . 振動子それぞれの位相を個別に制御することで焦点を形成する方法が考えられるが , 多チャンネルの振動子アレイと駆動回路が必要となり , その製造は一般人にとって大きな困難が伴う . 一方 , 振動子アレイを平面ではなく球面にすることで , 同相駆動で焦点を形成する方法もある . この場合 , 実験キットの駆動回路をそのまま用いることができるのが利点である . 前報と同様 , 本報でも後者の方法を採用する .

本報では , 振動子を搭載する球面を 3D プリンタによ

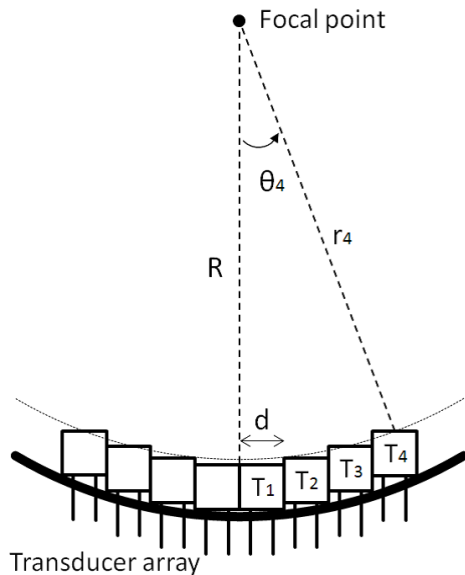


図 4 振動子アレイの断面 .

Fig. 4 Cross section of ultrasonic transducer array.

て作製する．設計した振動子アレイの寸法を図 3 に示す．曲率半径 10 cm の球面に，直径 $d = 1$ cm の振動子 50 個を挿し込むため直径 1 mm の端子孔が並んでいる．また球面の周囲には縁が配置され，治具を固定するための直径 3 mm の孔があけられている．面の厚みは 3 mm である．

振動子はすべて水平面に対して垂直に設置することとした (図 4)．前報のように球面に沿わせて (球面に対して垂直に) 設置するには，モデル作成時に，球面上の位置によって端子孔の角度を適宜設定する必要がある．この設計コストを下げることを目的としている．また水平面に垂直な孔は，3D プリントの機種による位置決め精度や積層ピッチの違いの影響を受けにくいという利点もある．

振動子を設置する角度が前報と異なるため，指向性による焦点での音圧低下と球面との段差による集束精度の劣化を考慮する必要がある．以下，これらについて検討する．

4.2 振動子の指向性の影響

振動子は正面を最大とする指向性をもつ．前報の振動子アレイではすべての振動子が焦点を向いており，焦点では振動子の個数倍の音圧が得られた．一方，本報の振動子アレイでは，振動子の中心軸と焦点の方向のなす角度 (方向角) によって焦点に寄与する音圧が低下する．本節ではこの指向性の影響を見積もる．

半径 a [m] の円形ピストンの指向性係数 $D(\theta)$ は次式で表される [17]．

$$D(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \quad (11)$$

ここで J_1 は第一種一次ベッセル関数， k [rad/m] は波数である．式 (11) は ka が大きいほど，すなわちスピーカーの半径が同じならば周波数が高い音ほど，強い指向性をもつ

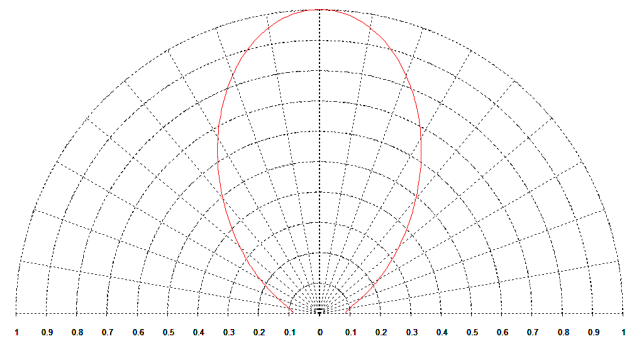


図 5 超音波振動子の指向性係数 .

Fig. 5 Directivity of ultrasonic transducer.

ことを表している．パラメトリック・スピーカー実験キットに同梱されている超音波振動子 UT1007-Z325R (SPL 社製) は，データシート [18] によると半値全角 80 deg である．これは理論上 $a = 4.7$ mm に相当する．その指向性係数を図 5 に示す．

設計した振動子アレイの断面を，図 4 に示した断面で近似して考える．振動子 T_1 表面から $R = 10$ cm の高さに焦点が形成されることを想定し， T_n の方向角 θ_n を次式により算出する．なお，厳密には振動子アレイの中央において $R - \sqrt{R^2 - d^2}$ だけ振動子が球面から離れているが，0.05 cm 程度と微小 (R の 1% 未満) なので無視しても大きな影響はない．

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{nd - \frac{d}{2}}{\sqrt{R^2 - (nd)^2}} \quad (12)$$

振動子 T_1, T_2, T_3, T_4 の方向角および指向性係数を表 1 に示す． T_1, T_2, T_3 は焦点を向いた場合の 90% 以上， T_4 も 82% は寄与することが読み取れる．平均すると前報の 90% 程度の音圧が得られると期待される．

4.3 段差による誤差の影響

振動子表面の中心が球面上に並べられたとき理論通りに集束した焦点が得られる．しかし本報においては，設計コストを下げるため球面に沿わず振動子を設置している．球面上に並ぶのは振動子の外側のエッジであり，振動子表面の中心は所望の球面と異なった曲面に載る．このため，焦点において位相が一致しないことが考えられる．本節ではこの段差の影響を見積もる．

振動子表面の中心が球面に載っている場合，焦点までの距離はどれも等しく R である．一方，球面に振動子のエッジで接している場合，振動子表面の中心から焦点までの距

表 1 振動子から焦点への方向角および指向性係数 .

Table 1 Direction angles and directive gains.

	T_1	T_2	T_3	T_4
Direction angle [deg]	2.9	8.7	14.7	20.9
Directive gain [-]	0.996	0.966	0.906	0.820

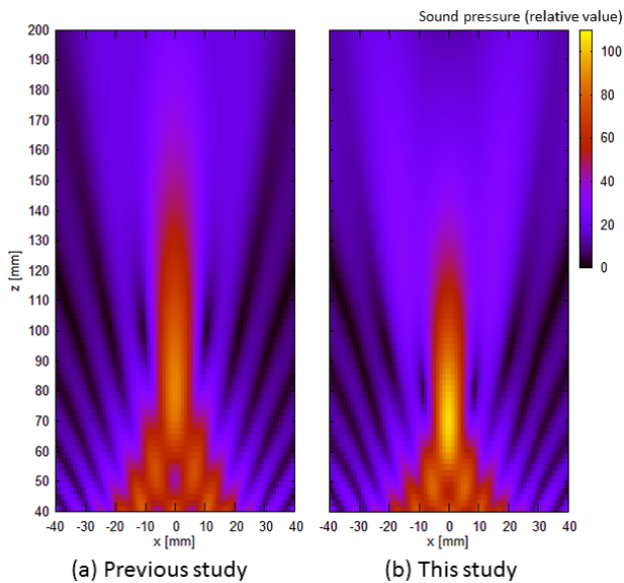


図 6 シミュレーション結果（音圧振幅の相対値）. (a) 前報の場合 . (b) 本報の場合 .

Fig. 6 Simulation results on focusing (relative values of sound pressure). (a) Previous study and (b) this study.

離は R よりも短くなる．振動子 T_n の表面の中心から焦点までの距離 r_n [m] は次式により算出される．

$$r_n = \sqrt{R^2 - (nd)^2 + \left(nd - \frac{d}{2}\right)^2} \quad (13)$$

振動子 T_1, T_2, T_3, T_4 から焦点までの距離を表 2 に示す．最大で 1.9 mm の距離の誤差がある．これは 40 kHz の超音波の波長 8.5 mm の 4 分の 1 以下であり，焦点において逆位相になる（集束を阻害する）ほどの誤差ではないことが読み取れる．

また，集束の様子についてシミュレーションを行った．一列に並んだ 8 個の超音波振動子を考え，それらの表面の中心が (a) 前報のように球面上に並ぶ場合と (b) 本報のように段差のため球面から乖離した場合を比較する．球面の半径，すなわち焦点距離は 100 mm である．なお，ここでは指向性を考慮せず計算した．

シミュレーション結果を図 6 および図 7 に示す．プロットされた音圧振幅の数値は相対値であり，物理的意味を持たない．前報の場合には $z = 80$ mm 付近で音圧振幅のピークを迎える．一方，本報の場合には，段差の影響によりピークが $z = 70$ mm 付近と振動子アレイに近づく．また，そのピーク値は前報より 20% ほど大きくなる．

表 2 各振動子から焦点までの距離．

Table 2 Distance from each transducer to focal point.

	T_1	T_2	T_3	T_4
Distance [cm]	9.96	9.91	9.86	9.81

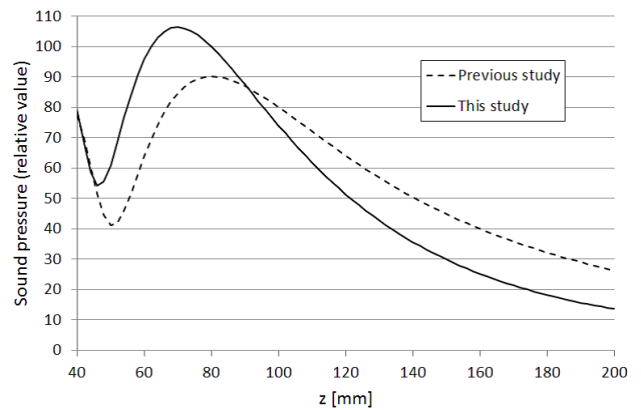


図 7 シミュレーション結果（音圧振幅の相対値）. 中心軸上の分布 . Fig. 7 Simulation results on focusing (relative values of sound pressure). Distribution along Z axis.

4.4 製造

DMM.make [19] の 3D プリントサービスを利用して振動子アレイの球面を造形した．石膏，アクリル，ナイロンなど金属以外の材料の中で，もっとも耐熱温度が高く（80）製造費を抑えられるナイロンを選択した．端子孔は当初の通り直径 1.0 mm で設計したところ，端子を通せる仕上がりと化した．また M3 ネジを通すことを意図した孔は，直径 3.2 mm で設計する必要があった．

3D プリンタ uPrint (ABSplus 樹脂，積層ピッチ 0.254 mm，Stratasys 社製) による造形も試みた．こちらも直径 3.2 mm の設計で M3 ネジを通すことができた．また端子孔については，直径 1.5 mm と実際より大きめに設計することで適切な径の端子孔が出力された．このことは，使用する 3D プリンタの方式や性能に応じた穴径の調整が必要であることを示している．

4.5 配線用フレキシブル基板

P 板.com [20] の基板製造サービスを利用して配線用フレキシブル基板を製造した．前報では，球面に挿した振動子の各端子に導線を巻き付けたのちに半田付けしていた．この作業コストを下げるため，本報では導線の代わりに基板を使用することを試みた．球面に沿わせるため細長い構造をフレキシブル基板として製造した．振動子間隔を 10 mm とした．厳密には球面に沿った距離はこれよりも長い，その誤差には端子孔を直径 1.1 mm とやや大きく設計することで対処した．

超音波振動子を球面に挿し，フレキシブル基板を半田付けした振動子アレイを図 8 に示す．上記の設計によりすべての振動子に配線することができたが，フレキシブル基板に張力がかかった状態になっている．フレキシブル基板への負荷を軽減するため，端子孔を直径 1.2 mm にする，球面上の端子間距離を考慮する，などにより張力を緩和することが望ましい．

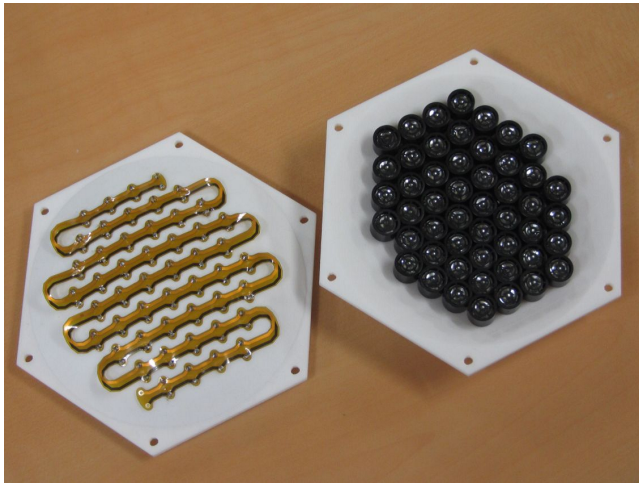


図 8 試作した球面振動子アレイ．左：裏面，右：表面．

Fig. 8 Transducer arrays. Left: back side and right: front side.

5. 実験

5.1 音響浮揚

試作した振動子アレイを向い合せにし，中央に定在波を形成した．パラメトリック・スピーカー実験キットの駆動回路に音量の小さいオーディオ信号を入力し，周波数変動の小さい超音波信号を出力させた．この駆動回路は FM 変調方式であるため，超音波信号の振幅は一定（常に最大）である．振動子アレイ間の距離を 12.5 cm に設定したとき，直径 0.5 mm のポリスチレン粒子が定在波に捉えられる様子が観察された（図 9）．振動子アレイ同士をスペーサで固定することにより，当初の目的であった音響浮揚の安定化が達成された．装置全体が軽量かつコンパクトであるため，粒子を捉えたまま装置を持ち上げたり回転させたりする把持操作も可能であった．

また振動子アレイ 1 個を手で把持し，lapillus bug [9] のように床面との定在波を発生させる方法も試みた．床に置かれていたポリスチレン粒子が定在波によって浮き上がり，振動子アレイを動かすと追従して動く様子が観察された（図 10）．

5.2 音響放射力

振動子アレイ 1 個が非接触でものを押す力（音響放射力）を電子秤により測定した．音圧のピークにあたる 70 mm の距離において，力は 4.1mN であった．前報の振動子アレイ 1 個についても同様の測定を行ったところ，80 mm の距離において 3.2mN であった．第 4.3 節の結論の通り，本報のほうが前報より力が強いことが確かめられた．

この力は微弱であるが，焦点をなでるように手のひらを動かすとかすかな触感を得ることができた．また振動子アレイを上向きに設置し，細長い付箋（幅 13 mm，長さ 75 mm）を焦点にかざすと下から押されて持ち上がる様子が



図 9 対向した振動子アレイによる音響浮揚．

Fig. 9 Acoustic levitation by face-to-face arrays.

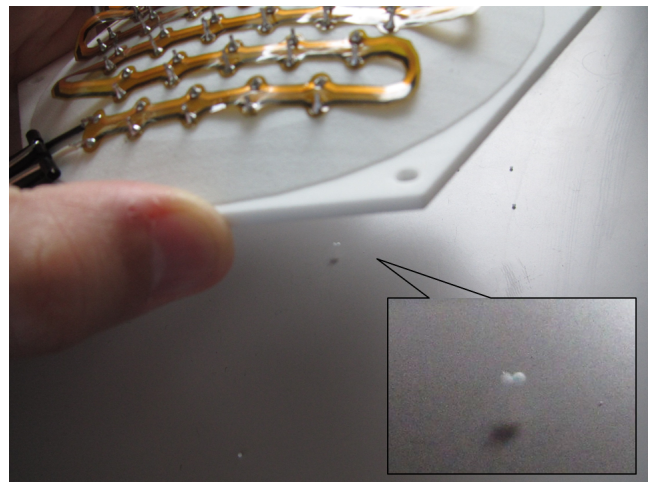


図 10 単一の振動子アレイによる音響浮揚．

Fig. 10 Acoustic levitation by single array.

観察された．これらのことから，試作した装置は音響浮揚のみでなく，音響放射力を体験する玩具としても使用可能であると言える．

6. 考察

6.1 製作コスト

本研究は音響浮揚を一般人にも体験できるように玩具化することを目指したものである．その目的のため，製作コストについて議論する．本報で使用・製造した部品とその価格を以下に示す．

- パラメトリック・スピーカー実験キット(1組 11,800 円)
- パラメトリック・スピーカー増設キット(1組 8,000 円)
- スイッチング AC アダプター (1 個 1,100 円)
- 振動子アレイ用の球面 (2 個 8,522 円)
- 配線用フレキシブル基板 (2 枚 68,249 円)
- その他 (半田，導線，スペーサなど電子工作材料)

製作コストは総額 10 万円程度であった．このうち配線用

フレキシブル基板は導線で代用可能であるため必須ではなく、その場合には総額 3 万円程度となる。

上述のように配線用フレキシブル基板は高価であり一般人が自ら製造することは困難である。しかし大量に製造すれば単価が下がり、例えば 100 枚製造時には 1,368 円/枚になる。このことから、配線用フレキシブル基板は実験キットの追加部品としての販売提供が想定される。

6.2 多チャンネル化

試作した振動子アレイは、パラメトリック・スピーカー実験キットの駆動回路での使用を想定し、すべての振動子が 1 チャンネルにまとめられている。これは駆動回路をそのまま使うための設計であり、自ら回路を製作するのであればこれに限らない。例えば振動子を同心円状に 4 組に分け、4 チャンネルの位相制御により焦点距離を可変にする、などの発展が考えられる。

6.3 高出力化

より大きな音響放射力を得る方法として、超音波振動子の駆動電圧を上げることが考えられる。データシート [18] によると振動子の最大入力電圧は 70 V_{p-p}、またパラメトリック・スピーカー実験キットの駆動回路は 12 V_{p-p} であり、駆動電圧を上げる余地はある。放射力は音圧の二乗に比例する。音圧が電圧に比例することを仮定すると、例えば 17 V_{p-p} の駆動回路を自作したときには 2 倍の音響放射力が見込まれる。

7. おわりに

本報では、音響浮揚の玩具化を目指し、市販の実験キットと 3D プリントされた部品によって構成される装置を試作した。音響浮揚の理論を解説し、球面振動子アレイの設計および理論的検討を行った。超音波振動子の指向性の影響で前報の 90% 程度の音圧が見込まれること、球面との段差の影響で焦点距離が設計値より近くなりピーク値が大きくなることを述べた。試作した装置により直径 0.5 mm のポリスチレン粒子の音響浮揚が可能であり、また音響放射力も体験できることを報告した。本研究が科学の面白さを人々に伝える一助となれば幸いである。

謝辞 振動子アレイ用の球面の 3D モデルデータ作成は福田智弘氏（名古屋工業大学）により実施された。感謝の意を表し、ここに記す。

参考文献

- [1] J.C. Fletcher, T.G. Wang, M.M. Saffren, D.D. Elleman: Material suspension within an acoustically excited resonant chamber, United States Patent, no. 3,882,732, 1975.
- [2] Styrofoam chips levitating in a vertical Kundt's tube, <http://www.physics.ucla.edu/demoweb/>

demomanual/acoustics/effects_of_sound/kundts_tube.html.

- [3] R.R. Whymark: Acoustic field positioning for containerless processing, *Ultrasonics*, vol. 13, pp. 251-261.
- [4] W.J. Xie and B. Wei: Parametric study of single-axis acoustic levitation, *Applied Physics Letters*, vol. 79, pp. 881-883, 2001.
- [5] W.J. Xie, C.D. Cao, Y.J. Lu, Z.Y. Hong, and B. Wei: Acoustic method for levitation of small living animals, *Applied Physics Letters*, vol. 89, 214102, 2006.
- [6] T. Kozuka, K. Yasui, T. Tuziuti, A. Towata, and Y. Iida: Noncontact acoustic manipulation in air, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 46, no. 7B, pp. 4948-4950, 2007.
- [7] D. Foresti, M. Nabavi, M. Klingauf, A. Ferrari, and D. Poulikakos: Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air, *Proc. National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 110, no. 31, pp. 12549-12554.
- [8] 星貴之: 非接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発, *計測自動制御学会論文集*, vol. 50, no. 7, pp. 543-552, 2014.
- [9] 河野通就, 星貴之, 筑康明: 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.
- [10] 星貴之, 河野通就, 落合陽一: 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, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集*, 1P2-W08(1-2), 2015.
- [11] Takayuki Hoshi, Yoichi Ochiai, and Jun Rekimoto: Three-Dimensional Noncontact Manipulation by Opposite Ultrasonic Phased Arrays, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 53, 07KE07, 2014.
- [12] Yoichi Ochiai, Takayuki Hoshi, and Jun Rekimoto: Pixie Dust: Graphics Generated by Levitated and Animated Objects in Computational Acoustic-Potential Field, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 33, article no. 85, 2014.
- [13] 星貴之: DIY 音響浮揚装置を作ってみた, 第 6 回ニコニコ学会 β シンポジウム, 研究してみたマッドネス, no. 25, https://www.youtube.com/watch?v=fy6D6Z2_11A, 2014.
- [14] パラメトリック・スピーカー実験キット, <http://www.tristate.ne.jp/parame.htm>.
- [15] 小塚晃透, 辻内亨, 三留秀人, 福田敏男: 集束超音波による定在波を用いたマイクロマニピュレーション, *電子情報通信学会論文誌 A*, vol. J80-A, no. 10, pp. 1654-1659, 1997.
- [16] M. Yoneyama, J. Fujimoto, Y. Kawamo, and S. Sasabe: The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 73, pp. 1532-1536, 1983.
- [17] 大賀寿郎, 斎藤繁実, 鎌倉友男, 武田一哉, 音響エレクトロニクス —基礎と応用—, 培風館, 2005.
- [18] 超音波振動子 UT1007-Z325R, http://akizukidenshi.com/download/ds/spl/UT1007-Z325R_r1.pdf.
- [19] DMM.make, <http://make.dmm.com/>.
- [20] P 板.com, <http://www.p-ban.com/>.

(URL resources last accessed on 22 July 2015.)