

# 電子工作キットで自作するインタラクティブ音響浮揚装置

星 貴之<sup>1,a)</sup>

受付日 2015年11月28日, 採録日 2016年9月6日

**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安定な球面アレイと, それを用いて実現された浮揚現象とのインタラクションについて報告する.

**キーワード:** 音響浮揚, 超音波, 定在波, 可視化, DIY

## Interactive Acoustic Levitation Device Using Electronic Hobby Kit

TAKAYUKI HOSHI<sup>1,a)</sup>

Received: November 28, 2015, Accepted: September 6, 2016

**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 spherical transducer array with a driving circuit of a commercially-available electronic hobby kit. This paper discusses and reports a 3D-printed spherical transducer array and realized interaction with acoustic levitation.

**Keywords:** acoustic levitation, ultrasound, standing wave, visualization, do it yourself

### 1. はじめに

空气中を伝搬する音波は, 通信や計測など, 情報の授受に使われることが多い. 一方で, 音波は空気の圧力変動であるため, 振幅が大きくなると物体に対して力学的作用を及ぼすようになる. その1つとして音響浮揚が知られている. これは空气中で音波の定在波を発生させたとき, 音圧の節が物体を引き寄せる作用によって物体がとら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. たとえば, 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. 最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2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, 振動子どうし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

<sup>1</sup> 東京大学  
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan  
<sup>a)</sup> star@star.rcast.u-tokyo.ac.jp

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見なすことによって実世界コンピュータグラフィクス [12] へと発展している。

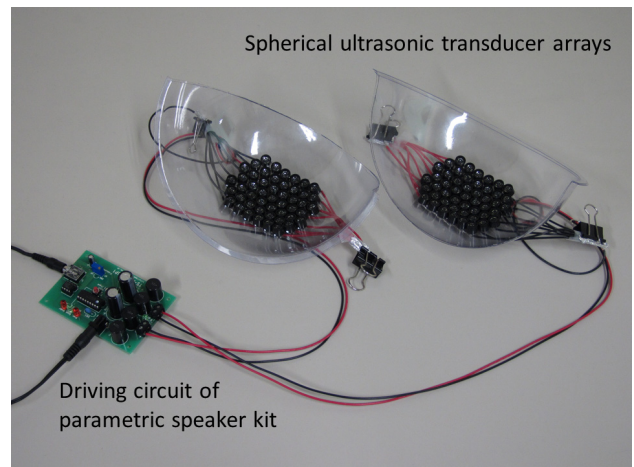
国内外の学会・イベントにおいて研究成果のデモ展示を多数行ってきたなかで、筆者は、開放空間において物体が宙に浮くこと自体が人の心を惹き付けることに気付いた。磁石を用いて物体を浮かせる卓上玩具は存在するが、音響浮揚に基づく玩具は現在のところ市販されていない。また上述のような研究に使われる実験装置は特殊かつ高価であり、一般人にとっては入手が困難である。もし音響浮揚装置が彼ら自身で製作可能であれば、家庭や小中学校でも実験を行うことができ、子供の科学への興味を養うなどの教育的効果が期待される。

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・スピーカ用の駆動回路は 1 チャンネルしか持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、すべ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かい合わせることで、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 0.5 mm 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、固定用の縁を持つ球面を作製し、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。なお本報は、学会発表 [15] とその後得られた成果をまとめたものである。

## 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



(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.

が音場中で受ける力  $F$  [N] は以下の式で表される [16]。

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

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

ここで  $V$  [m<sup>3</sup>] は微小球体の体積、 $U$  [J/m<sup>3</sup>] はポテンシャル、 $K_a$  [J/m<sup>3</sup>] と  $P_a$  [J/m<sup>3</sup>] 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  $\gamma$  はそれぞれ以下の式で定義される。

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

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

ここで  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] と  $\rho_0$  [kg/m<sup>3</sup>] は微小球体と媒質の密度、 $\beta$  [N/m<sup>2</sup>] と  $\beta_0$  [N/m<sup>2</sup>] 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  $\gamma \approx 0$  と見なしてよい。

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,  $\lambda$  [m] は波長,  $\omega$  [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.

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

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

ここで  $c = 340$  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. たと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  $w$  [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  $R$  [m] は焦点距離,  $D$  [m] は正方形アレイの 1 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.

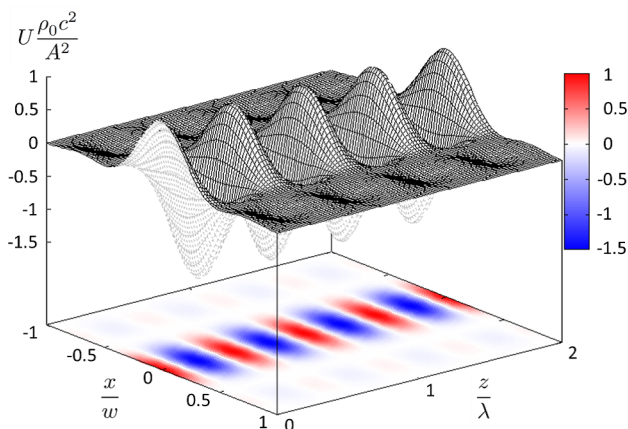


図 2 正方形振動子アレイを用いて発生させた定在波のポテンシャル分布

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

### 3. 球面超音波振動子アレイ

#### 3.1 パラメトリック・スピーカ実験キット

本研究で採用するパラメトリック・スピーカ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 (超指向性スピーカとも呼ばれる) [17] 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良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.

#### 3.2 設計

パラメトリック・スピーカ実験キットの出力する超音波は比較的弱いいため, 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ともなう. 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 プリンタによって作製する. 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 の孔がつけられている. 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 プリンタ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. すなわち曲面に沿わせて振動子を配置するためには, 端子孔を 2.9 deg 以下の角度解像度で作成することが求められる (後述) が, これは積層ピッチ 0.254 mm のとき水平位置決め精度 12.7  $\mu$ m 以下に相当し, 一般には達成が困難な精度である.

振動子を設置する角度が前報と異なるため, 指向性によ

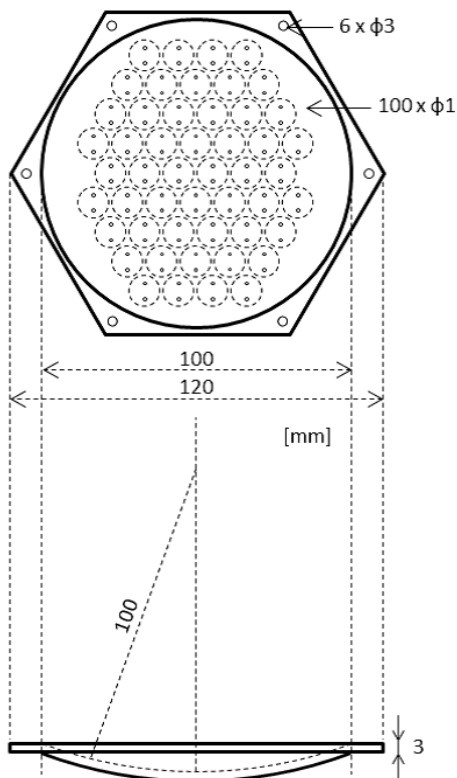


図 3 設計した振動子アレイ用の球面の寸法  
 Fig. 3 Dimensions of designed transducer array.

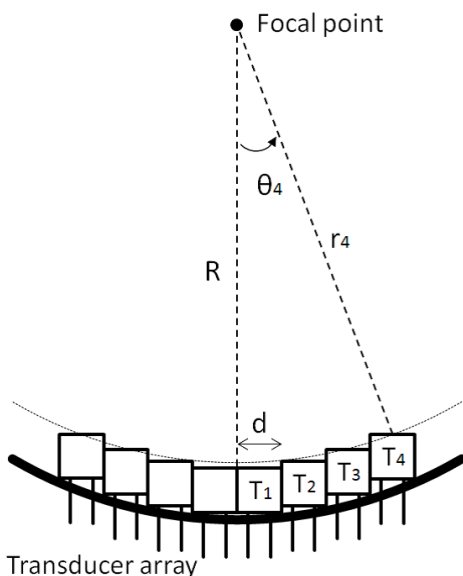


図 4 振動子アレイの断面  
 Fig. 4 Cross section of ultrasonic transducer array.

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。

### 3.3 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持つ。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

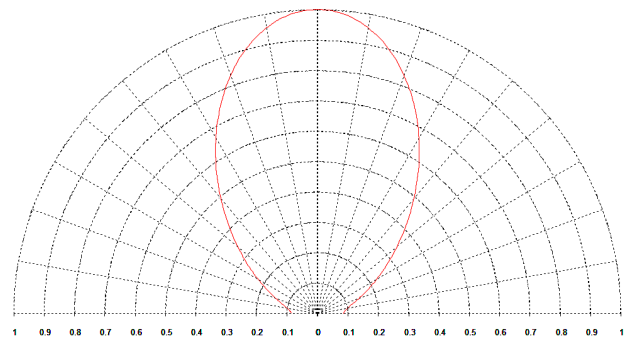


図 5 超音波振動子の指向性係数  
 Fig. 5 Directivity of ultrasonic transducer.

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 <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
Direction angle [deg]	2.9	8.7	14.7	20.9
Directive gain [-]	0.996	0.966	0.906	0.820

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 [18]。

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

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、すなわちスピーカの半径が同じならば周波数が高い音ほど、強い指向性を持つことを表している。パラメトリック・スピーカ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 [19] 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<sub>1</sub> 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<sub>n</sub> の方向角  $\theta_n$  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<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> の方向角および指向性係数を表 1 に示す。T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> は焦点を向いた場合の 90%以上、T<sub>4</sub> 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。

### 3.4 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どおり

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 <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
Distance [cm]	9.96	9.91	9.86	9.81

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上に載る。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上に載っている場合、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。

### 3.5 3D プリントによる球面の製造

DMM.make [20] 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、最も耐熱温度が高く (80°C) 製造費を抑えられるナイロンを選択した。端子孔は当初のとおり直径 1.0 mm で設計したところ、端子を通せる仕上がりとなった。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

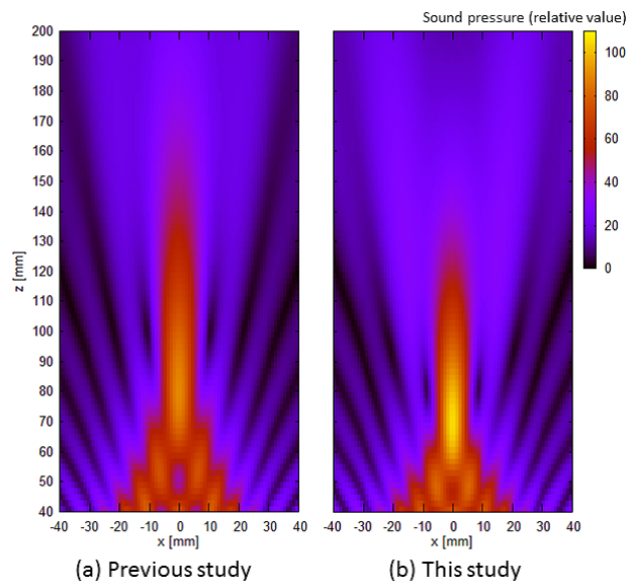


図 6 シミュレーション結果 (音圧振幅の相対値). (a) 前報の場合, (b) 本報の場合

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

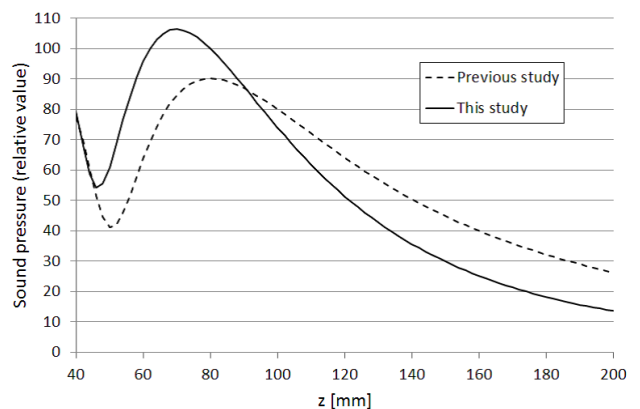


図 7 シミュレーション結果 (音圧振幅の相対値). 中心軸上の分布  
Fig. 7 Simulation results on focusing (relative values of sound pressure). Distribution along Z axis.

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。

### 3.6 配線用フレキシブル基板

P 板.com [21] 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が、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。

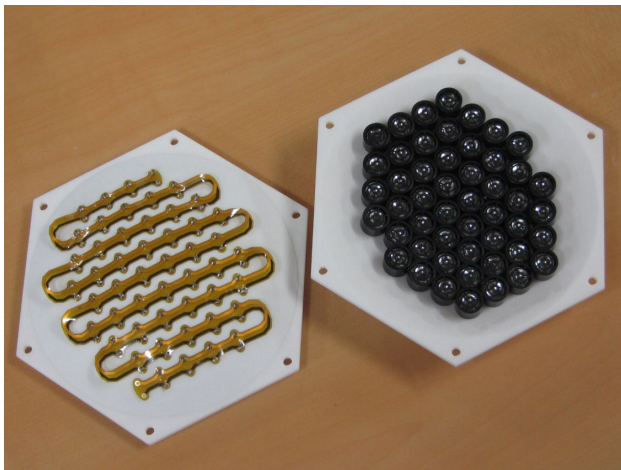


図 8 試作した球面振動子アレイ. 左:裏面, 右:表面

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

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 1.2mm 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.

なお, 自由曲面に配線を設置する方法としては銀インクを用いた印刷 [22] も考えられる. ただしこれは半田付けに対応していないため, 振動子を曲面に固定する方法を別途用意する必要がある.

## 4. 振動子アレイの評価実験

### 4.1 音響浮揚

試作した振動子アレイを向かい合わせにし, 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 (つねに最大) 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とらえられる様子が観察された (図 9). 振動子アレイどうし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, 粒子をとら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. 床面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).

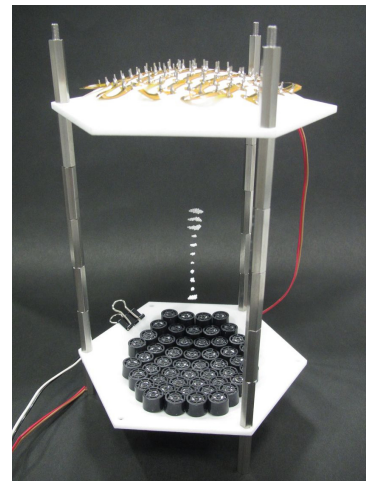


図 9 対向した振動子アレイによる音響浮揚

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

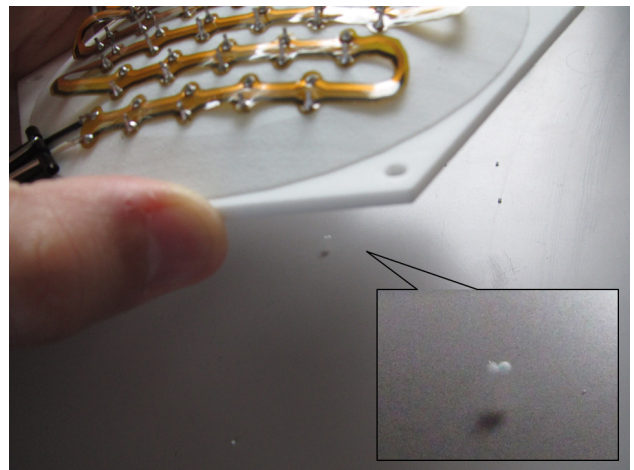


図 10 単一の振動子アレイによる音響浮揚

Fig. 10 Acoustic levitation by single array.

### 4.2 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 4.1 mN 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 3.2 mN であった. 3.4 節の結論のとおり, 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いえる.

## 5. 体験型展示

### 5.1 エンタテインメントコンピューティング・デモ展示

試作した音響浮揚装置のデモ展示を, 情報処理学会エン



図 11 エンタテインメントコンピューティングでのデモ展示  
Fig. 11 Demo at Entertainment Computing Symposium.



図 12 寄せ集められた粒子の塊  
Fig. 12 Gathered particles.

タテインメントコンピューティング研究会シンポジウムで行った [15]. 硬い素材で作製したことにより片手で容易に把持することができるようになった利点を強調するため、床面との定在波を発生させる体験型展示とした (図 11). 片手で振動子アレイを把持するという自由度の高さから、展示体験者によって複数の新たな遊び方が創出された。

- **連れ回す** 振動子アレイを平行移動させると、浮揚させられたポリスチレン粒子も追従して移動する。これは前章の実験から筆者が意図していた遊び方である。粒子が軽い慣性の影響が小さく、ある程度素早く振動子アレイを動かしても追従する。
- **拾い集める** 床面に散乱した粒子の上を通過するように定在波を移動させると、条件にもよるが、50 個程度まで 1 つの節にとらえられる (図 12)。なお超音波出力を停止するととらえられていた粒子が自然に落下して散乱することから、静電気などではなくポテンシャルの谷 (図 2) によって塊をなしていたことが分かる。
- **回転させる** 振動子アレイの高さによって、粒子数個の塊が超音波ビームの中心軸回りに回転し始める場合がある。これは振動子アレイの高さが焦点距離と同程度にしたとき、ポテンシャルの谷 (図 2) が急峻になり向心力が増加するためである。
- **多層にする** ここまでの浮揚は床面に最も近い節でのみ行われていたが、学会パンフレットと床面の段差を利用することで 2 番目 3 番目の節にも粒子を浮揚させた体験者が現れた。また、浮揚させられた粒子の塊が何らかのきっかけではじけたとき、跳ね上げられた粒子が偶発的に上方の節にとらえられる場合もあった。
- **縞模様にする** 振動子アレイを床面から焦点距離よりも遠く離して斜めに傾けると、超音波が照射された範囲内のポリスチレン粒子が超音波ビームに直交した縞模様をなした (図 13)。これは床面付近に形成された定在波によるものと考えられる。

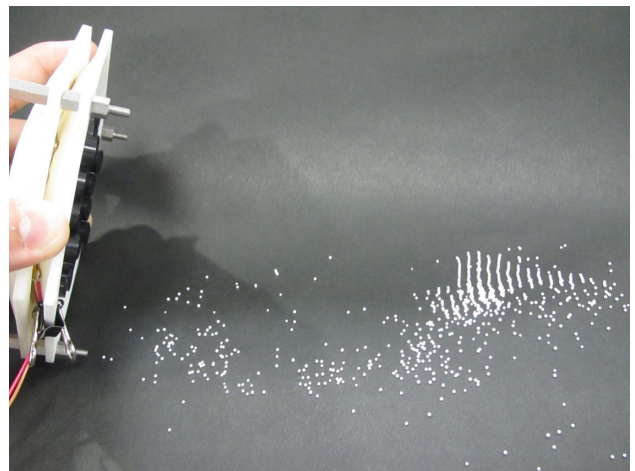


図 13 床面に形成された縞模様  
Fig. 13 Stripe pattern on floor.

- **横向きにする** 床面に反射させて定在波を形成する代わりに、鉛直壁面に反射させた横向きの定在波でもポリスチレン粒子を浮揚・移動させることができた。研究用アレイで同様の構成は試みられている [10] が、本報の振動子アレイでも可能であることが分かった。また展示体験者の 1 人から「床面に置かれていた粒子が浮き上がる瞬間に驚きがある」というコメントが得られた。これは床面との定在波を利用する構成に特有の効果である。一方、振動子アレイを対向させる構成においては、上からふりかけたポリスチレン粒子の一部が定在波にとらえられて空中にとどまる様子に驚く体験者が多く見られた。これらの事例は「状態の変化」が特に人々の興味を惹くことを示唆している。

## 5.2 サイエンスアゴラ・デモ展示

2 回目のデモ展示を、科学技術振興機構サイエンスアゴラで行った [23]。この展示では新たな試みとして、前回発見された遊び方のうち「多層にする」を容易に体験可能と

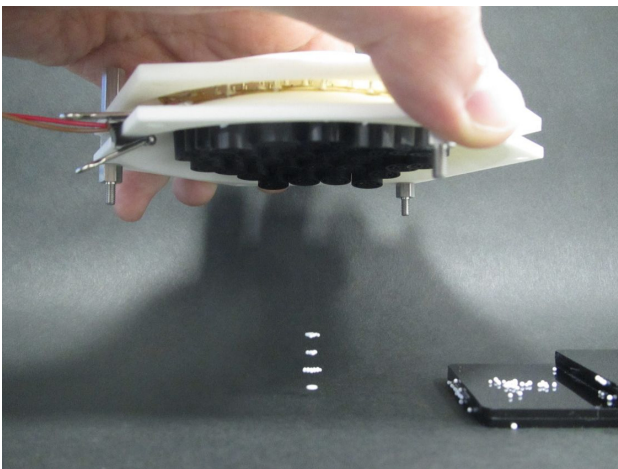
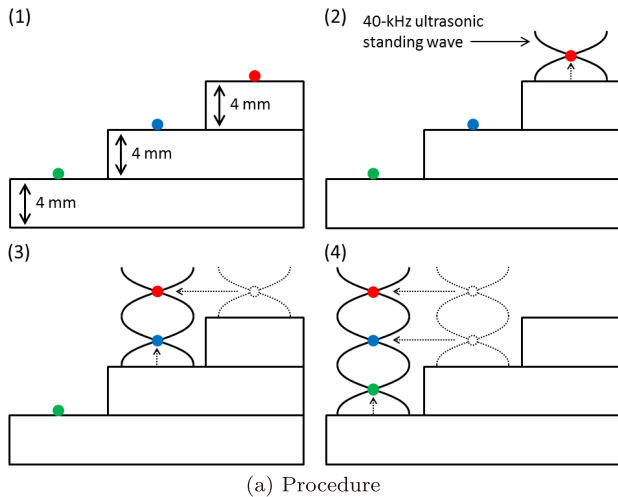


図 14 階段模型による多層音響浮揚

Fig. 14 Multi-layered acoustic levitation with step model.

する仕組みを導入した。40 kHz 超音波（波長 8.5 mm）を床面に照射したとき定在波の節は、床面から 2.125 mm, 6.375 mm, 10.625 mm, … の高さに生じる。これに合わせて 4 mm の段差を持つ階段模型を製作した。この階段模型の上にポリスチレン粒子を散乱させておき、最上段から定在波を移動させていくことにより各節に粒子がとらえられる（図 14）。

子供の体験者も多かったが 1 度やり方を示すとほとんどの体験者が現象を把握し、多層の音響浮揚を問題なく体験していた（図 15）。振動子アレイを床面と平行にすると多層に成功しやすい、節にとらえられた粒子が多いと次の段への移動時にはじけやすい、などのノウハウを発見的に体得していた。1 度遊んだ子供がしばらくして友だちを連れて再び訪れたり、小学校低学年と思われる子供が 10 分以上練習したりする様子も見られた。

## 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玩具化す



図 15 サイエンスアゴラでのデモ展示

Fig. 15 Demo at Science Agora.

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・スピーカ実験キット（1 組 11,800 円）
- パラメトリック・スピーカ増設キット（1 組 8,000 円）
- スイッチング AC アダプタ（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、たとえば 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。

一方、振動子アレイ用の球面は 3D プリンタ出力であるため、大量に製造しても単価は下がらない。また製造業者に問い合わせたところ、金型による樹脂成型は数万個の販売見込みがなければ採用できないとの回答を得た。

上記の議論から、筆者は配線用フレキシブル基板および振動子アレイ用曲面を製造・販売することを断念し、振動子アレイ用曲面の 3D モデルデータを DMM.make クリエイターズマーケットで公開している [24]。入手希望者はここから注文（筆者への入金にはゼロに設定してあり製造費のみで購入可能）、あるいは STL ファイルをダウンロードすることができる。

### 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．たと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 [19] によると振動子の最大入力電圧は 70 V<sub>p-p</sub>，またパラメトリック・スピーカ実験キットの駆動回路は 12 V<sub>p-p</sub> 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，たとえば 17 V<sub>p-p</sub> 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．

### 6.4 音の可視化

家庭や小中学校において市販の超音波実験キットを用いて音響浮揚装置が実現できることには，子供の科学への興味を養う効果が期待される．ポリスチレン粒子が浮いている様子が面白いというだけでなく，節に粒子がとらえられることで定在波が可視化されることにも意味がある．すなわち，節が周期的に現れることや，節と節の間隔が半波長に相当する (図 16) ことを，間近で観察することができる．

音を可視化する装置としては，クラドニ図形 [25] が有名である．これは振動板とそれを振動させるスピーカから構成されており，振動板の共振周波数において，表面に撒かれた砂粒が節に集まる様子を観察するものである．クント管 [2], [26] もよく知られている．透明な管の中に微粒子を封じ，スピーカから音を導入することで定在波の周期構造を可視化する．集束させた超音波を粘性流体に照射して断面分布を観察することも提案されている [27] が，放射圧で流体表面を凹ませられるほど強力な超音波に限定される．また媒質の密度分布を可視化するシュリーレン法 [28], [29]

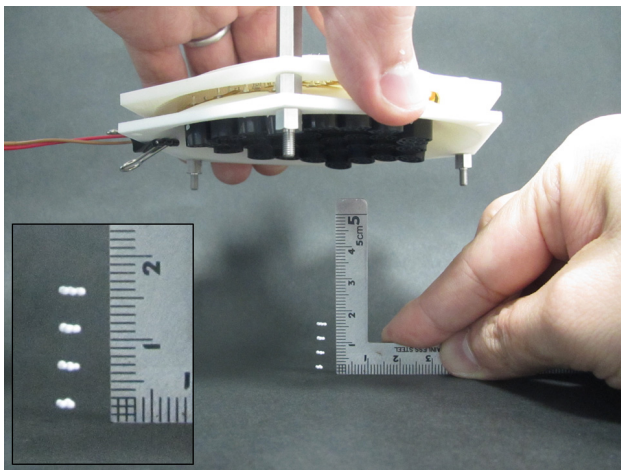


図 16 半波長 (4.25 mm) の間隔で浮く粒子

Fig. 16 Particles levitated at half-wavelength intervals.

も考えられるが，精密な光学系を構築する必要がある．

### 6.5 把持する音響浮揚の特長

従来の超音波による音響浮揚は，装置が環境に設置され，距離や角度もあらかじめ調節され，体験者に許されるインタラクションは定在波に粒子を差し入れる程度であった [3], [4], [5], [6], [7], [9], [10], [11], [12]．これに対して本研究の体験型展示は，片手で超音波振動子アレイを把持し，床面からの距離や角度により音響浮揚の安定性が変わるといふ，体験者の自由度が高いものである．展示では，新たな遊び方やノウハウを発見したり，個人的な記録を達成したり，他人と競ったりする様子が見られた．これらは本研究の展示の自由度の高さによってもたらされた面白さである．

一方で，子供でも 1 度見れば遊び方が分かり実践できることから，自由度が高いとはいえ難しくはないことが示された．これは床面からの反射波を利用する音響浮揚のロバスト性によるものと考えられる．2 個の振動子を向かい合わせにする方法 [6], [11] では，振幅・位相が揺らぐと定在波の位置が変動して不安定になる．しかし反射波を利用する場合，入射波と反射波の振幅・位相はずれることがない．たとえば振動子アレイと床面の距離が時間的に変動しても，下から 1 つ目の音圧の節は必ず床面から 1/4 波長の高さに生じる．すなわち初めての体験者で振動子アレイの扱いが最適でなくても，床面付近に定在波が生じ，少なくとも数個のポリスチレン粒子が浮揚する．これによって体験者は現象の本質を最初に把握することができる．その後，床面からの距離や角度などを試行錯誤する段階へと移る．ノウハウや巧拙の差が現れるのはこの段階である．

## 7. おわりに

本報では，音響浮揚の玩具化を目指し，市販の超音波実験キットと 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．学会発表時のデモ展示で粒子を多層に浮揚する遊び方が創出された．これを容易に実現する階段模型を作製し，一般向けイベントのデモ展示に使用した．子供も含め多くの人にインタラクティブな音響浮揚を体験してもらうことができた．今後は科学の面白さを人々に伝える 1 つの手段として本研究を活用していく予定である．

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] Fletcher, J.C., Wang, T.G., Saffren, M.M. and Elleman, D.D.: 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, available from <http://demoweb.physics.ucla.edu/content/100-kundts-tube>.
- [3] Whymark, R.R.: Acoustic field positioning for containerless processing, *Ultrasonics*, Vol.13, pp.251–261 (1975).
- [4] Xie, W.J. and Wei, B.: Parametric study of single-axis acoustic levitation, *Applied Physics Letters*, Vol.79, pp.881–883 (2001).
- [5] Xie, W.J., Cao, C.D., Lu, Y.J., Hong, Z.Y. and Wei, B.: Acoustic method for levitation of small living animals, *Applied Physics Letters*, Vol.89, 214102 (2006).
- [6] Kozuka, T., Yasui, K., Tuziuti, T., Towata, A. and Iida, Y.: Noncontact acoustic manipulation in air, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.46, No.7B, pp.4948–4950 (2007).
- [7] Foresti, D., Nabavi, M., Klingauf, M., Ferrari, A. and Poulikakos, D.: 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 (2013).
- [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, 笈 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] Hoshi, T., Ochiai, Y. and Rekimoto, J.: Three-Dimensional Noncontact Manipulation by Opposite Ultrasonic Phased Arrays, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.53, 07KE07 (2014).
- [12] Ochiai, Y., Hoshi, T. and Rekimoto, J.: Pixie Dust: Graphics Generated by Levitated and Animated Objects in Computational Acoustic-Potential Field, *ACM Trans. Graphics*, Vol.33, Article 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  $\beta$  シンポジウム, 研究してみたマッドネス, No.25 (2014).
- [14] パラメトリック・スピーカー実験キット, 入手先 <http://www.tristate.ne.jp/parame.htm>.
- [15] 星 貴之: DIY 音響浮揚装置を作ってみた (第 2 報), エンタテインメントコンピューティング 2015 論文集, pp.100–106 (2015).
- [16] 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).
- [17] Yoneyama, M., Fujimoto, J., Kawamo, Y. and Sasabe, S.: 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).
- [18] 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).
- [19] 超音波振動子 UT1007-Z325R, 入手先 [http://akizukidenshi.com/download/ds/spl/UT1007-Z325R\\_r1.pdf](http://akizukidenshi.com/download/ds/spl/UT1007-Z325R_r1.pdf).
- [20] DMM.make, available from <http://make.dmm.com/>.
- [21] P 板.com, 入手先 <http://www.p-ban.com/>.
- [22] AgIC, available from <https://agic.cc/ja/>.
- [23] 星 貴之: 超音波のちから—手で感じる, ものが浮く, サイエンスアゴラ 2015, Aa-010 (2015).
- [24] 振動子アレイ用曲面 3D CAD データ, 入手先 <http://make.dmm.com/item/273960/>.
- [25] 坂上公博: 連載企画—音の博物館—クラドニパターン, 日本音響学会誌, Vol.65, No.6, p.337 (2009).
- [26] 上野佳奈子: 連載企画—音の博物館—クントの実験による定在波の可視化, 日本音響学会誌, Vol.63, No.2, p.116 (2007).
- [27] 星 貴之: 粘性流体を用いた空中超音波触覚ディスプレイの圧力分布の可視化, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, pp.2A2-B04(1)–2A2-B04(3) (2013).
- [28] 宮下英樹, 工藤信樹, 山本克之: 超音波音場可視化のための簡易型シュリーレン法に関する研究—強力超音波音場の可視化, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.106, No.127, pp.5–8 (2006).
- [29] 渡辺好章, 大谷隆彦, 卜部泰正: 火花放電および細線爆発により発生する衝撃波のシュリーレン法による観測, 日本音響学会誌, Vol.37, No.6, pp.267–273 (1981) (参照 2016-09-08).



星 貴之 (正会員)

1980 年生. 2003 年東京大学工学部計数工学科卒業. 2005 年同大学大学院修士課程修了. 2008 年同大学院博士課程修了. 博士 (情報理工学). 日本学術振興会特別研究員, 熊本大学助教, 名古屋工業大学特任教員 (テニュア・トラック助教) を経て, 2016 年東京大学先端科学技術研究センター助教, 現在に至る. 触覚デバイスの研究開発と集束超音波の応用開拓に従事. 文部科学省 NISTEP 科学技術への顕著な貢献, 経済産業省 Innovative Technologies 特別賞ほか受賞多数. 計測自動制御学会, 日本ロボット学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 日本機械学会各会員.