

非接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発

星 貴 之*

Development of Compact Ultrasound Focusing Device for Noncontact Force Radiation

Takayuki HOSHI*

Our research group has worked on an ultrasound-based noncontact tactile display. It utilizes a nonlinear effect of ultrasound to produce a force in midair. It is known that an object in the ultrasound field suffers a force (acoustic radiation pressure) in the direction of the ultrasound propagation. The position of the force is controlled three-dimensionally based on the phased array focusing technique: A focal point of ultrasound is generated by setting the phases of hundreds of ultrasound transducers adequately. After the presentations and the demonstrations of this tactile display, it gradually came out that some researchers working on research fields other than tactile display liked to use this device for their own issues. But the previous prototype device had a bulky body and complicated wires, and so it took time and labor to carry, setup, and install it. These drawbacks limited the situations in which it could be used and prevented us from giving it a try to use it in other application areas. In order to break through this difficulty, we newly developed a compact device which generates a noncontact force up to 16 mN. It was carried out by integrating driving circuits and cutting out the expandability of the device. This small-sized and light-weighted device is easy to use and so useful for exploring new application areas. In this paper, firstly, the principles of the device are explained. Secondly, the design concept and the specifications of the device are provided. Thirdly, the experiments show that the ultrasound is focused as the theory predicted, the intensity of the output force is surely controlled by PWM, and the frequency characteristics covers up to 1 kHz. Finally, the collaborative researches based on the developed ultrasound device are reported as the evidence of application exploration.

Key Words: airborne ultrasound, acoustic radiation pressure, phased array, noncontact force, tactile display

1. はじめに

対象物体に非接触で力を作用させる技術は、幅広い分野においての活用が期待される。例えば衛生管理が必要な分野では、非接触で物体を操作することができれば汚染の機会を減らすことができる。ロボットアームなどの移動を伴わないため、生産ラインにおいて高速かつ安全な操作を行うことができる。またエンタテインメントやアート作品においては、非接触であること自体が人々の興味を強く惹く要素となる。

これまでに実用化されている非接触作用力としては、磁力とエアジェットが挙げられる。(静電気力も非接触で作用するが、環境との接触により意図せず帯電が発生・消失するなど制御が難しいため、ここでは考慮しない。)磁力は電磁石を用いることにより電氣的に制御でき、また強度も幅広く調節可能である。ただし、対象物体は磁石や鉄など磁性を持つ物質に

限られる。工場では金属類の選別などに用いられている。また磁力を利用したインタフェースとしては ZeroN¹⁾ が発表されている。これは XY ステージに搭載した電磁石によって磁石を内蔵した物体を浮上させ、三次元的に移動させることのできるシステムである。一方、エアジェットは対象物体の材質によらずに力を作用させることができる。ただし、その作用力はノズルの直後から急激に拡散および減衰する。生産ラインでは不良品の排除などに使われている。また応用研究としては、半球形のツールを介してエアジェットを感じる力覚提示²⁾ や、三方向からエアジェットで押すことによる平面上での物体移動³⁾ が報告されている。

まだ広く普及していない原理として、音響放射圧も利用可能である。これは音波が物体を押すという非線形現象であり、対象物体の材質を選ばず作用する。著者の所属する研究グループは、超音波の音響放射圧を利用した触覚ディスプレイの開発を行ってきた^{4)~6)}。超音波振動子アレイを構成する各振動子の位相を制御して超音波を集束させ、離れた位置から手指に触覚刺激を提示する。時間・空間解像度が高いという特長があり、数 10 mN の力を発生させることができる。非接触で触覚を提示できる点が他の研究グループからも評価され、これまでに文献 7)~9) などの応用研究がなされている。ま

* 名古屋工業大学若手研究イノベータ養成センター
名古屋市昭和区御器所町

* The Center for Fostering Young and Innovative Researchers,
Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku,
Nagoya

(Received July 30, 2013)

(Revised January 24, 2014)

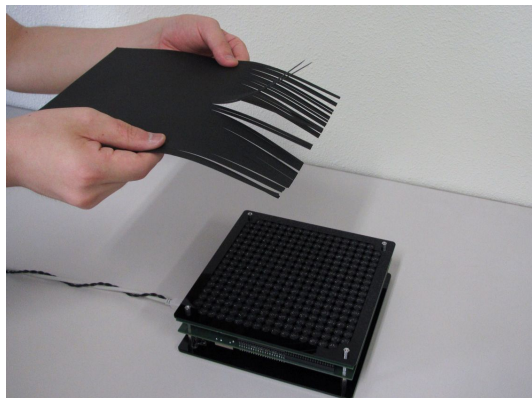


Fig. 1 Compact ultrasound-focusing device. Paper strips are flipped up by focused ultrasound.

たインタフェースへの応用として Ultra-Tangibles¹⁰⁾ が報告されている。これは四方から集束超音波を照射することにより物体に力を加えて平面上で移動させるシステムである。時分割で切り替えることで、複数物体を同時に移動させることもできる。

当初は触覚ディスプレイとして開発された装置であるが Ultra-Tangibles の登場により触覚以外の分野においても需要がある可能性が示された。しかしその可能性を探索するには従来の装置では技術的課題がある。そのひとつに数 100 個の超音波振動子を個別に駆動するため回路と配線が煩雑になることが挙げられる。電子回路が不得意な研究者にとって、このような装置の独自開発は多大な労力がかかるか、もしくは不可能である。この課題が応用研究の妨げになっている可能性がある。潜在的な需要があるにも関わらず研究がなされないという状況は、科学技術にとって損失である。

この課題を解決し、集束超音波の新たな応用を探索するため、著者はユニット化した超音波集束装置 **Fig. 1** を開発した¹¹⁾。これは片手で持てるサイズに必要な回路を集積したものであり、電源と USB ケーブルを接続するだけで素早く手軽に使用を開始できる。小型・軽量であるため、様々な場所に設置することが可能である。

本論文は、この小型超音波集束装置について報告するものである。構成は以下の通りである。最初に第 2 章で本装置の原理について説明する。次に第 3 章で小型化に際しての設計方針、第 4 章で開発した装置の仕様について述べる。そして第 5 章において、本装置の性能評価とその結果を報告する。第 6 章では本装置を用いて実施している共同研究について紹介する。最後に第 7 章で本論文をまとめる。

2. 原 理

本章では本装置に関わる理論について解説する。非接触で力が発生する音響放射圧、超音波を集束させるフェーズドアレイ、PWM による強度制御、の 3 項目について順に述べる。

2.1 音響放射圧

物体が超音波の進行を遮るとき、物体表面に超音波の進行方

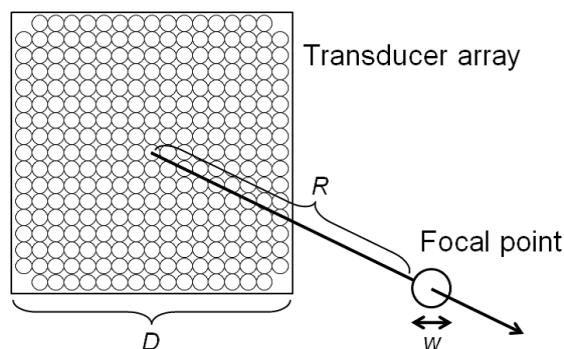


Fig. 2 Array size and diameter of focal point.

向の応力が発生する^{12), 13)}。これは音響放射圧という非線形音響学に属する現象である。慣習的に「圧」と呼ばれるが、スカラーではなくテンソルである。平面波が垂直に入射するとき、物体表面に生じる音響放射圧 P [Pa] は次式で表される。

$$P = \alpha E = \alpha \frac{I}{c} = \alpha \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1)$$

ここで E [J/m³] は超音波の音響エネルギー密度、 I [W/m²] は音響インテンシティ、 c [m/s] は音速、 p [Pa] は超音波の音圧 (実効値)、 ρ [kg/m³] は媒質の密度である。 α は物体表面における反射・吸収・透過の状態によって決まる係数。特に全反射のとき $\alpha = 2$ となる。上式は、超音波 p の時空間パターンの制御により任意の放射圧パターン P が生成可能であることを示している。

2.2 フェーズドアレイ

単独の超音波振動子から生じる音響放射圧は微弱である。数 10 mN 程度の発生力を得るため、数 100 個の超音波振動子を使用する。各振動子の位相を適切に制御し、空中に単一の焦点を結ぶ。また位相を操作することで焦点の位置を変えることもできる。すなわち離れた場所から空間中の任意の位置に力を発生させることができる。振動子 i の位相 θ_i [rad] は次のように算出される。

$$\theta_i = kl_i \quad (2)$$

ここで k [rad/m] は超音波の波数、 l_i [m] は振動子 i から焦点までの距離である。これは焦点からの距離が遠い振動子ほど位相を進めることを意味している。

正方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る (付録 A 参照)。アレイの辺と平行な方向のメインローブの幅 (焦点径) w [m] は次式で与えられる。

$$w = \frac{2\lambda R}{D} \quad (3)$$

ここで λ [m] は超音波の波長、 R [m] は焦点距離、 D [m] は正方形アレイの一辺の長さである (**Fig. 2**)。この焦点径が本手法の空間解像度を与える。上式から、アレイサイズと空間解像度がトレードオフの関係にあることが読み取れる。

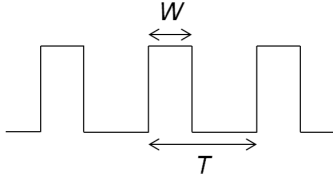


Fig. 3 PWM of 40 kHz rectangular wave.

2.3 PWM による強度制御

超音波振動子の駆動には 40 kHz 矩形波を用いる。これは FPGA のデジタル出力をドライバで増幅したものである。この矩形波に PWM をかけることで音響放射圧の強度制御を行う。通常の PWM ではパルス幅と出力が比例するが、本装置では振動子が狭帯域のフィルタとして作用するため、共振周波数である 40 kHz 成分により強度が制御される。PWM 信号 $V(t)$ [V] を次式のように記述する (Fig. 3)。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 & (nT \leq t < nT+W) \\ 0 & (nT+W \leq t < nT+T) \end{cases} \quad (4)$$

W [s] はパルス幅, T [s] は周期, n は整数である。このとき 40 kHz 成分の振幅 a_1 [V] は, $V(t)$ のフーリエ級数展開の基本周波数の係数である (次式)。

$$a_1 = \frac{2}{\pi} V_0 \sin\left(\pi \frac{W}{T}\right) \quad (5)$$

これは Duty 比 50% ($W = T/2$) で最大値をとる。振動子から放射される超音波はこの電圧振幅に比例する。音響放射圧は超音波の二乗, すなわち $\sin^2(\pi W/T)$ に比例する。

3. 設計方針

従来の装置は回路基板が大きな容積を占め, また煩雑な配線を伴うものであった (Fig. 4)。これは原理検証を優先して回路の最適化を行っていないことと, 超音波振動子アレイの増設を想定し拡張性を持たせたことに起因している。本章では小型化にあたっての設計方針について述べる。

装置の構成は振動子アレイ基板 1 枚と駆動用基板 1 枚の二層とする (Fig. 5)。これは装置前面を振動子で敷き詰めることにより, 小型化した際の面積を最大限に利用することを意図したものである。配線など外部にはみ出すものがないよう, 基板間の接続にはピンコネクタを用いる。装置に必要な回路がすべて内蔵されていることにより, 電源および通信ケーブルを接続するだけで使用を開始することができる。

駆動用基板には制御用 FPGA とドライバ IC を集積して実装する。制御用 FPGA の I/O ピン数および駆動用基板に搭載可能な IC の個数を考慮し, 基板のサイズおよび超音波振動子の個数を決定する。装置には拡張性を持たせず, 設計値を固定とする。

従来の装置では, 制御用 FPGA と PC はデジタル I/O PC カードを介して通信を行っていた。そのため接続可能な PC が限られていた。新たに開発する装置では, USB イン

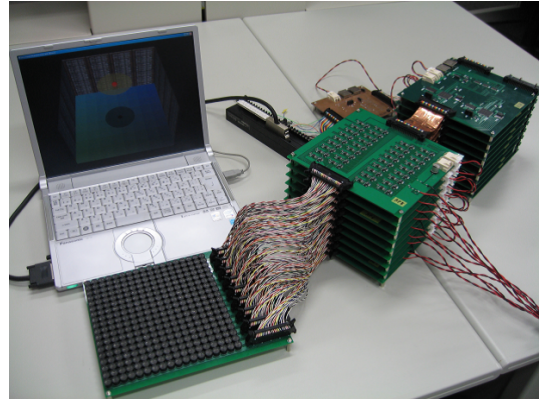


Fig. 4 Previous device⁵⁾. Bulky and complex.

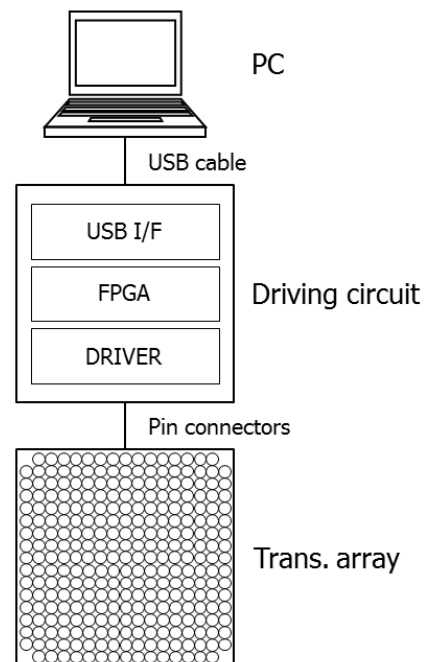


Fig. 5 Block diagram of newly developed device.

タフェースを採用する。PC カードスロットのない PC でも USB ポートが搭載されていることは期待できるためである。

4. 実装

本章では開発した装置について述べる。本装置を構成するアレイ基板と駆動用基板の外観を Fig. 6 に示す。アレイのサイズは $D = 170$ mm であり, その矩形領域内に 285 個の超音波振動子 (T4010A1¹⁴⁾, 日本セラミック株式会社製, 共振周波数 40 kHz, 直径 10 mm) が配列されている。駆動用基板には FPGA がひとつと, 4 チャンネルドライバ IC (L293DD, STMicroelectronics 製) 72 個が搭載されている。FPGA は USB 経由で PC と通信を行い, 指令値 (焦点位置) にもとづいて各振動子の適切な位相を算出し, 駆動信号を生成する (Fig. 7)。その際, 周期および波長の 1/16 を最小単位として位相差および距離の計算を行う。その駆動信号は

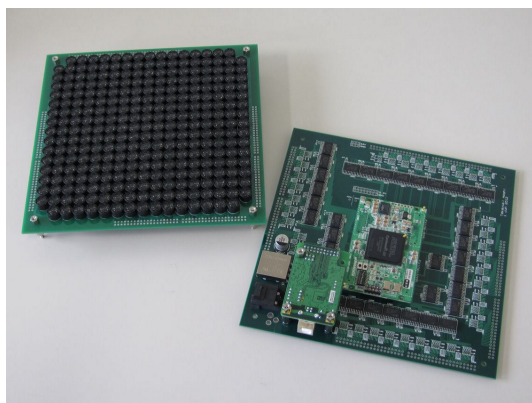


Fig. 6 Transducer-array (left) and driving (right) circuits.

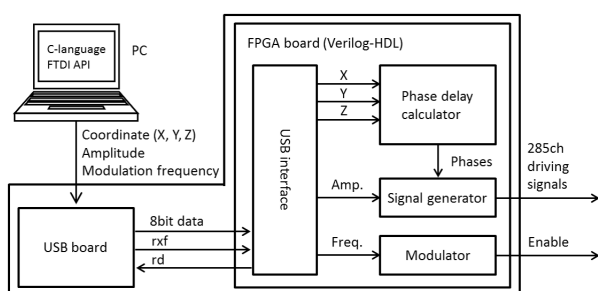


Fig. 7 Dataflow in driving circuit.

ドライバ IC によって 24 Vp-p に増幅され、ハイパスフィルタによって DC 成分をカットされたあと振動子へ送られる。

本装置は 24 V 単電源で動作し、超音波出力時に 100 W の電力を消費する。電源装置を除いた装置本体は 190 mm 角、厚さ 50 mm、重量は 0.6 kg である。片手で持ち運ぶことができるサイズであり、設置の自由度も高い。

本装置の仕様を Table 1 に示す。超音波の周波数は 40 kHz である。焦点径は焦点距離に比例する。例えば焦点距離 200 mm のとき焦点径は 20 mm である。焦点の空間座標は 0.53 mm (波長 8.5 mm の 1/16) 刻みで指定することができる。発生力の最大値は 16 mN (実測値) である。PWM により強度を 624 段階で制御可能である。また強度制御とは別に、1 ~ 1023 Hz (1 Hz 刻み) の矩形波で超音波を振幅変調して振動刺激を出力する機能も備えている。

本装置の時間特性に関わるパラメータとしては、(1) 制御レート (PC, USB, FPGA などを含む)、(2) 超音波振動子の立ち上がり時間、そして (3) 空気中での音速、が考えられる。今回用いた超音波振動子の立ち上がり時間が 1 ms 程度であることが予備実験からわかっており、本装置の制御レートはそれに合わせて 1 kHz に設定してある。FPGA 内での位相計算は十分余裕をもって完了する。また例えば 20 cm 離れた位置まで超音波が届く際、音速 340 m/s より 600 μ s 程度の遅れが生じる。すなわち PC が指令を出してから焦点が生成されるまでの時間遅れは、合わせて最大で 2 ms 程度 (1 ms + 600 μ s 程度) と考えられる。

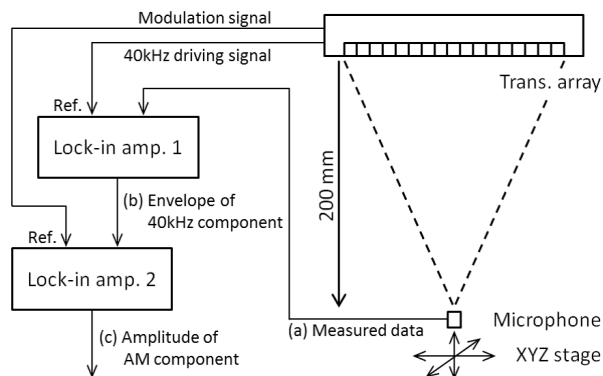


Fig. 8 Experimental setup for measurement of spatial and temporal properties of ultrasound.

5. 評価

本章では、開発した装置による超音波の空間分布、時間波形と周波数応答、および強度制御の評価実験について報告する。

5.1 空間分布

フェーズドアレイによって超音波が集束されていることを確認するため、超音波の音圧分布を計測した。計測系を Fig. 8 に示す。XYZ ステージに市販のコンデンサマイクロフォン (口径 2.5 mm) を取り付け、それと対向するように本装置を配置した。また X 軸および Y 軸を、本装置の各辺と平行になるよう設定した。焦点距離を 200 mm に設定し、本装置の中央に焦点を結ぶものとした。振幅変調なし (DC) で超音波を出力し、40 kHz 矩形波を参照信号としてロックインアンプにより超音波の音圧振幅 (Fig. 8 (b)) を計測した。飽和しないようマイクロフォンに減衰フィルタ (和紙) をかぶせ、その状態で校正 (計測用マイクロフォン ONOSOKKI MI-1531, プリアンプ ONOSOKKI MI-3140, 音響校正器 ONOSOKKI SC-3120 使用) を行い、計測値から音圧振幅の絶対値を算出できるようにした。計測時の気温は 26 $^{\circ}$ C であった。なお計測された音圧振幅には数 % の長周期の変動が見られた。この原因としては、乱流化した音響流¹⁵⁾ が考えられる。今回は厳密な値よりも空間分布に興味があり、走査時間を短縮するため、音圧振幅の瞬時値を読み取るものとした。

焦点面における音圧の二次元分布 (XY 方向) を Fig. 9 に示す。計測は 1 mm 間隔で行った。音圧の最大値は 2585 Pa

Table 1 Specifications of developed prototype.

Carrier wave	40 kHz ultrasound
Diameter of focal point	20 mm (with 20 cm focal length)
Spatial resolution	0.5 mm
Output force	Max. 16 mN (measured)
Modulation freq.	DC and 1 to 1023 Hz
Refresh rate	1 kHz
Power supply	DC 24 V
Power consumption	100 W
Device size	190 × 190 × 50 mm ³
Device weight	0.6 kg

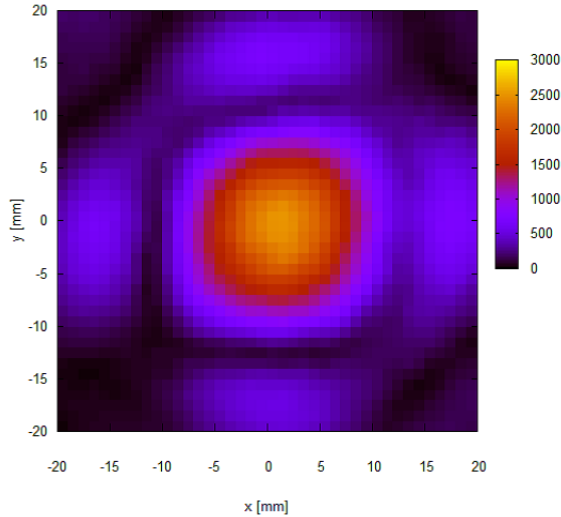


Fig. 9 Distribution of ultrasound [Pa] on focal plane.

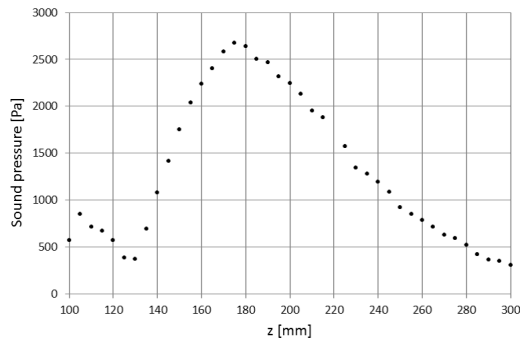


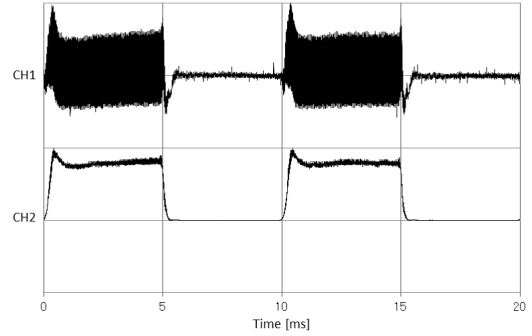
Fig. 10 Distribution of ultrasound along acoustic axis.

RMS (162 dB SPL) であった。メインローブに 4 個のサイドローブが伴うなど、第 2 章で述べた sinc 関数と同様の分布であることが確認された。歪みや暈けは、振動子の個体差や指向性、理論と実際との差 (付録 B 参照)、音速の誤差 (付録 C 参照)、マイクロフォンの口径などの影響と考えられる。

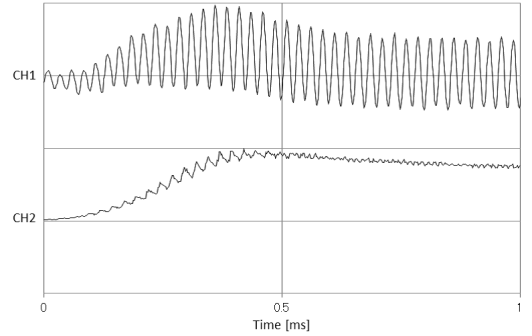
音軸に沿った方向の音圧の一次元分布 (Z 方向) を Fig. 10 に示す。計測は 5 mm 間隔で行った。z = 220 mm のデータは Z ステージの機構上の理由で測定不能であった。また設定した焦点よりも 20 mm ほど手前で最大値をとることが観察された。これは振動子の個体差、理論と実際との差 (付録 B 参照) や、音速の誤差 (付録 C 参照) の影響と考えられる。

5.2 時間特性

超音波音圧と放射圧の時間波形を観察した。Fig. 8 の計測系において、マイクロフォンを焦点位置に固定した。100 Hz 矩形波による振幅変調をかけて計測を行った。計測された超音波音圧と放射圧を Fig. 11 に示す。音圧 (CH1) はマイクロフォン出力 (Fig. 8 (a)) を規格化した波形である。また放射圧 (CH2) は、マイクロフォン出力を入力信号、40 kHz 矩形波を参照信号としてロックインアンプにより音圧振幅 (Fig. 8 (b)) を計測し、それを二乗して規格化した波形である。ロック



(a) 100-Hz modulated waveforms measured at focal point.



(b) Closeup of (a).

Fig. 11 Normalized waveforms of ultrasound (CH1) and radiation pressure (CH2).

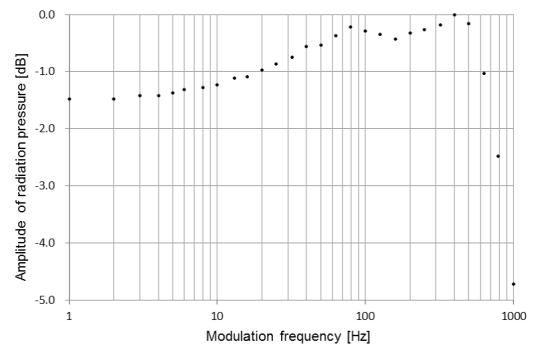


Fig. 12 Frequency characteristics of radiation pressure.

クインアンプに組み込まれている一次ローパスフィルタ (時定数 100 μ s) の影響を補償するため、放射圧の波形を 0.1 ms (100 Hz 成分の時間遅れの理論値) ずらしてプロットした。立上り時および立下り時のオーバーシュートは、マイクロフォンの共振特性によるものと考えられる。結果より、意図した通りの振幅変調が行われていることが確認された。

振幅変調の周波数を 1 Hz から 1000 Hz まで変えつつ計測を行い、本装置の周波数特性を調べた。周波数は対数軸上でのできるだけ等間隔になるよう選んだ。前述の音圧振幅 (Fig. 8 (b)) を入力信号、変調に用いる矩形波を参照信号としてロックインアンプにより変調音圧振幅 (Fig. 8 (c)) を計測し、それを二乗することにより放射圧の振幅を求めた。結果を Fig. 12 に示す。400 Hz における最大値を基準として、1 ~ 1000 Hz の帯域において -5 dB に収まることがわかった。

5.3 強度制御

PWM 制御により作用力が意図した通りに変化することを確認するため、以下の実験を行った。計測系を Fig. 13 に示す。焦点距離を 200 mm に設定し、本装置の中央に焦点を結ぶものとした。焦点位置に電子秤（最小読取値 0.01 g）を設置し、作用力を計測した。強度は 624 段階で指定可能であるが、計測する際には 10 段階ずつ変えることとした。

結果を Fig. 14 に示す。最大値で規格化した値をプロットしている。第 2 章で述べた理論通り、 \sin 関数の二乗に比例して変化することが確認された。

6. 応用例

開発した小型装置を用いることで、当初の狙い通り触覚以外の分野への集束超音波の応用が始まっている。その事例として本章では 4 件の共同研究を紹介する。

6.1 局所励振による静電気分布計測

フィルムシートの帯電状態を高速に可視化することを目指した研究である¹⁶⁾。従来の静電気計測は電位計を数 mm 程度まで対象に近接するものであり、計測距離と空間分解能はトレードオフの関係にあった。これに対して、帯電した対象を励振することで電磁界を変動させ、数 cm 離れたアンテナでその変動の振幅や極性を計測する方法が共同研究先から提案されている。励振の手段として集束超音波を採用することにより、局所的な振動点を発生させ、また走査させることができる。計測距離と空間分解能が独立に扱えるようになった点が画期的である。

6.2 シャボン膜の反射特性の制御

プロジェクタとスクリーンの構成における、光沢など材質感の表現を目指した研究である¹⁷⁾。現在普及しているスクリーンは反射特性が固定であり、プロジェクタの性能によって表現可能な材質感が決定される。これに対して、スクリーンの反射特性を可変にすることで表現を拡張する。共同研究先では、シャボン膜に超音波を照射したとき拡散反射、照射しないとき鏡面反射になることを利用している。これらの状態を時分割で提示すると、金属の光沢などを再現することができる。これには強力な超音波と高速な制御が必要であり、その要求を満たす本装置が採用されている。

6.3 微小粒子の非接触浮上搬送

直径数 mm の微小粒子を床面から数 mm ~ 数 cm 浮上させた状態で移動させる研究である¹⁸⁾。空中で強力超音波の定在波を発生させると、粒子、水滴、虫などが定在波の節に捕捉されることが知られている。それらの先行研究ではボルト締めランジュバン型振動子と反射板を対向させることで定在波を発生させており、周波数変化により節の位置を制御することで粒子を移動させていた。本装置で床面付近に焦点を結ぶと、床面付近には局在した強力超音波の定在波が発生する。これにより粒子を浮上させる。そのまま焦点位置を平行移動させることで粒子を搬送することができる。

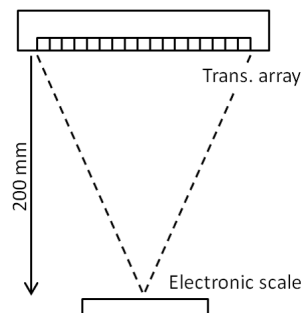


Fig. 13 Experimental setup for measurement of output force.

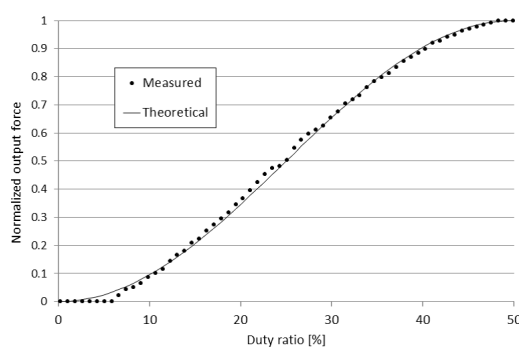


Fig. 14 Duty ratio vs. radiation pressure (normalized).

6.4 微小径孔の脱水

プリント基板のビア（貫通孔あるいは有底孔）から液体を除去する方法についての研究である¹⁹⁾。一般的なビアは直径 $50 \mu\text{m} \sim 2 \text{ mm}$ である。プリント基板製造時にビアに入り込んだ洗浄液は、表面張力のため風圧では除去できず、また熱による気化では化学物質が残量してしまう。この問題に対し、強力超音波を照射して脱水する方法が共同研究先から提案されている。貫通孔の液体は押し出され、また有底孔の液体は霧散する。原理検証ではランジュバン型振動子が用いられ、脱水可能な領域が限られていたが、広い範囲を走査するため現在は本装置が採用されている。

7. おわりに

空中において非接触作用力を発生する、従来より小型かつコンパクトな装置を開発した。本論文ではまず本装置の原理と仕様について述べた。超音波を直径 20 mm 程度の範囲に集束させることにより、焦点において最大 16 mN の力を発生させる。また焦点の三次元位置は最大 1 kHz で更新することができる。次に焦点付近の圧力分布、PWM による強度制御、振幅変調の周波数特性の実験と結果について報告した。超音波の集束と PWM はほぼ理論通りであった。また周波数特性は 1 Hz ~ 1 kHz の範囲で -6 dB に収まっていた。最後に本装置を開発したことの成果として、複数の分野で始まっている共同研究を紹介した。

集束超音波による非接触作用力の長所としては以下の 3 点が挙げられる。

- (長所 1) 空中において非接触で刺激を与えられる,
 (長所 2) 刺激点を高速で走査することができる,
 (長所 3) 振幅変調により振動刺激を生成できる.

一方、短所としては以下の2点が挙げられる。

- (短所 1) 作用力は対象を押し方向のみ(進行波の場合),
 (短所 2) 作用力は高々数 10 mN 程度.

これらの長所が活き、短所が目立たない用途に対して本装置は有効に機能する。すなわち、対象物体としては柔軟あるいは軽量なものが適している。例えば水面に軌跡を描く、煙の流れを変える、紙の薄片を吹き上げる、パーティクルの粗密を操作する、泡を発生・消滅させる、風船を移動させる、などが考えられる。

今後も分野の垣根を越えて応用先を探索していく予定である。従来手法では解決が困難であった問題に対して本装置がその糸口を与えたり、超音波の新たな利用法が見つかったりすることを期待している。

謝辞 本装置の位相計算アルゴリズムは高橋将文氏(東京大学)、PWM アルゴリズムは長谷川圭介氏(東京大学)から提供を受けた。また音圧計測は高崎正也教授、ゲンフ ダン氏、松沢勇作氏(埼玉大学)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. Lee, R. Post, and H. Ishii: ZeroN: Mid-air Tangible Interaction Enabled by Computer Controlled Magnetic Levitation, Proc. UIST 2011, 327/336 (2011)
- 2) Y. Suzuki and M. Kobayashi: Air Jet Driven Force Feedback in Virtual Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, **25**, 44/47 (2005)
- 3) S. Iwaki, H. Morimasa, T. Noritsugu, and M. Kobayashi: Contactless Manipulation of an Object on a Plane Surface Using Multiple Air Jets, Proc. ICRA 2011, 3257/3262 (2011)
- 4) T. Iwamoto, M. Tatzono, and H. Shinoda: Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound, Proc. Eurohaptics 2008, 504/513 (2008)
- 5) T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda: Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, IEEE Transactions on Haptics, **3-3**, 155/165 (2010)
- 6) 長谷川, 篠田: 近接配置した複数アレイの協調動作による大開口空中超音波触覚ディスプレイの性能評価, 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 1328/1333 (2012)
- 7) M. Ciglar: An Ultrasound Based Instrument Generating Audible and Tactile Sound, Proc. International Conference on New Interfaces for Musical Expression 2010, 19/22 (2010)
- 8) J. Alexander, M.T. Marshall, and S. Subramanian: Adding Haptic Feedback to Mobile TV, CHI Extended Abstracts 2011, 1975/1980 (2011)
- 9) 奥成, 木下, 阿部, 池田, 深瀧, 山田, 吉田: バーチャルドクターフィッシュ, 第17回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 332/333 (2012)
- 10) M.T. Marshall, T. Carter, J. Alexander, and S. Subramanian: Ultra-tangibles: Creating Movable Tangible Objects on Interactive Tables, Proc. CHI 2012, 2185/2188 (2012)
- 11) T. Hoshi: Development of Portable Device of Airborne Ul-

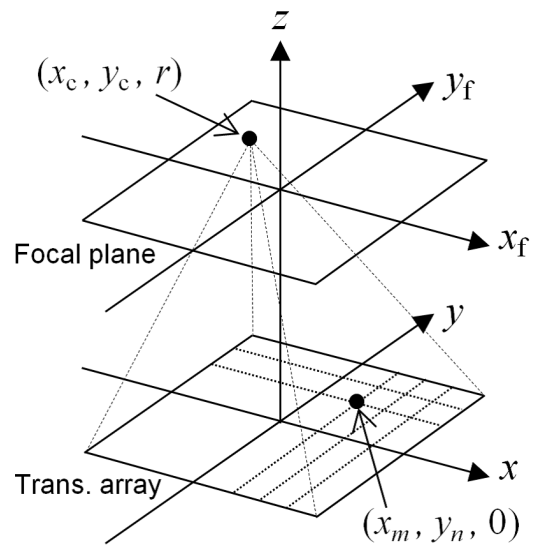


Fig. A.1 Coordinate system on transducer array and focal plane.

trasound Tactile Display, Proc. SICE Annual Conference 2012, 290/292 (2012)

- 12) J. Awatani: Studies on Acoustic Radiation Pressure. I. (General Considerations), Journal of the Acoustical Society of America, **27**, 278/281 (1955)
- 13) T. Hasegawa, T. Kido, T. Iizuka, and C. Matsuoka: A General Theory of Rayleigh and Langevin Radiation Pressures, Acoustical Science and Technology, **21-3**, 145/152 (2000)
- 14) 超音波振動子 T4010A1 (最終閲覧日 2014 年 6 月 7 日), [http://www.nicera.co.jp/pro/ut/pdf/T4010A1\(ENG\).pdf](http://www.nicera.co.jp/pro/ut/pdf/T4010A1(ENG).pdf)
- 15) 三留秀人: 音響流の発生機構について, 電子情報通信学会論文誌 A, **J80-A-10**, 1614/1620 (1997)
- 16) K. Kikunaga, T. Hoshi, H. Yamashita, Y. Fujii, and K. Nonaka: Measuring Technique for Static Electricity Using Focused Sound, Journal of Electrostatics, **71-3**, 554/557 (2012)
- 17) Y. Ochiai, A. Oyama, T. Hoshi, and J. Rekimoto: Theory and Application of the Colloidal Display: Programable Bubble Screen for Computer Entertainment, Proc. ACE 2013, 198/214 (2013)
- 18) 河野, 星, 寛: lapillus bug: 音響浮揚による粒子の空中移動制御とインタラクション, エンタテインメントコンピューティング 2013 論文集, 41/46 (2013)
- 19) N.H. Dang, 高崎, 水野, 星: プリント基板における超音波を利用した脱水に関する研究 - 第3報: 収束超音波による脱水 -, 2013 年度精密工学会春季大会講演論文集, 767/768 (2013)

《付 録》

A. 焦点付近の音圧分布

正方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を導出する。Fig. A.1 の座標系を仮定する。各振動子から球面波が適切な位相差で放射されるとき、焦点面に生じる音圧分布は次式で与えられる。一行目は球面波に位相項をかけた上で足し合わせる操作を表しており、二行目はそれを近似・展開・整理した結果である。

$$\begin{aligned}
p(x_f, y_f) &= \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{2} p_r e^{-jkr'} e^{j(kr'' - \omega t)} \\
&\simeq \sqrt{2} p_r N^2 \frac{\text{sinc}\left(\frac{Nd\nu_x}{2}, \frac{Nd\nu_y}{2}\right)}{\text{sinc}\left(\frac{d\nu_x}{2}, \frac{d\nu_y}{2}\right)} e^{j\{\varphi(x_f, y_f) - \omega t\}}
\end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

ここで r [m] は焦点距離, N は X および Y 方向の振動子の個数である. $\exp(-jkr')$ は超音波を焦点に集束させるための位相項, $\sqrt{2} p_r \exp\{j(kr'' - \omega t)\}$ は各振動子から放射される球面波を表す. p_r [Pa] は距離 r だけ伝搬したときの音圧 (実効値). 焦点面上の任意の点において, すべての振動子から伝搬してきた超音波の音圧は等しく p_r であると近似する (近軸近似).

$$\begin{aligned}
r' &\equiv \sqrt{(x_m - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 + r^2} \\
&\simeq r + \frac{(x_m - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2}{2r}
\end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

は (m, n) 番目の振動子から焦点 (x_c, y_c, r) までの距離,

$$\begin{aligned}
r'' &\equiv \sqrt{(x_m - x_f)^2 + (y_n - y_f)^2 + r^2} \\
&\simeq r + \frac{(x_m - x_f)^2 + (y_n - y_f)^2}{2r}
\end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

は (m, n) 番目の振動子から焦点面上の任意の点 (x_f, y_f, r) までの距離である. これらは比較的近距离においても成立するフレネル近似である. 直径 $d = 10$ mm の超音波振動子を並べたとき (m, n) 番目の振動子の座標 (x_m, y_n) は $(md + \xi, nd + \xi)$ で与えられる (ξ [m] はオフセット). j は虚数単位, k [rad/m] は波数, ω [rad/s] は周波数である. sinc 関数は

$$\text{sinc}(x, y) \equiv \frac{\sin(x) \sin(y)}{xy} \quad (\text{A.4})$$

で定義される. 式 (A.1) の一行目から二行目への計算過程において, 下記の変数変換が施されている.

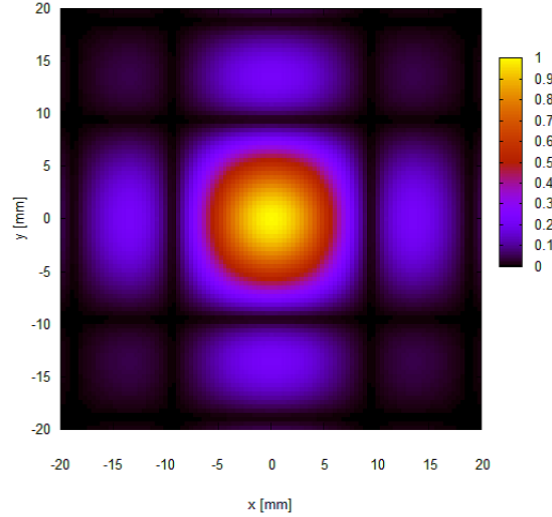
$$\nu_x \equiv \frac{k}{r} (x_f - x_c), \quad \nu_y \equiv \frac{k}{r} (y_f - y_c) \quad (\text{A.5})$$

また

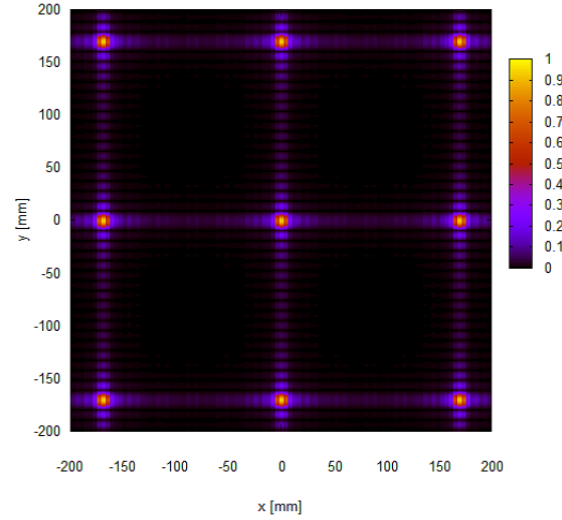
$$\begin{aligned}
\varphi(x_f, y_f) &\equiv \frac{k}{2r} (x_f^2 + y_f^2 - x_c^2 - y_c^2) \\
&\quad - \left\{ \xi + \frac{(N-1)d}{2} \right\} (\nu_x + \nu_y)
\end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

は焦点面上の位置に依存した位相遅れである.

焦点距離 $r = 200$ mm としたときの, 焦点付近の音圧の分布を Fig. A.2 (a) に示す. これは音圧振幅の絶対値を最大値で規格化したものである. 焦点付近の音圧分布については式 (A.1) の分子の sinc 関数が支配的であることが確認できる. これは, フェーズドアレイによる集束は光学におけるレンズと等価な作用を電子的に再現したものであり, レンズのフーリエ変換作用によって矩形関数から sinc 関数が得られたと解釈することができる. なお音響放射圧はこの二乗に比例



(a) Main lobe.



(b) Main and grating lobes.

Fig. A.2 Distribution of ultrasound normalized by maximum value.

するため, さらにメインローブが支配的な分布となる. sinc 関数が最初にゼロになる x あるいは y の値から, 焦点径 w [m] が得られる.

$$w = \frac{2\lambda r}{Nd} \quad (\text{A.7})$$

これが第2章の式 (3) を与える. なお Nd は正方形アレイの一辺の長さ D に等しい.

Fig. A.2 (b) は, 焦点面をより広範囲で見た際の音圧分布である. 焦点 (メインローブ) 以外にも, 大きなピークが格子点状に現れている様子が見られる (グレーティングローブ). これは式 (A.1) の分母の sinc 関数の影響である. 分母がゼロになるとき分子もゼロになるため, 周期的にピークが現れる. ピーク同士の間隔 L [m] は, 分母の sinc 関数が最初にゼロになる x あるいは y の値から得られる.

$$L = \frac{\lambda r}{d} \quad (\text{A.8})$$

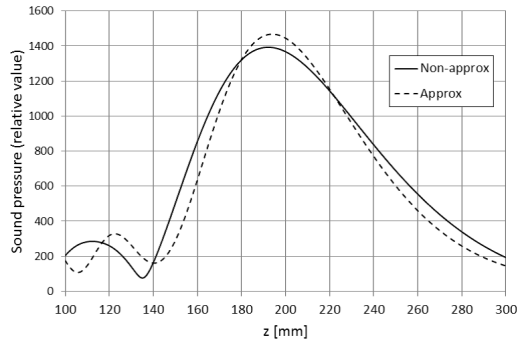


Fig. A.3 Effect of paraxial and Fresnel approximations.

例えば 40 kHz 超音波の波長 $\lambda = 8.5$ mm, 焦点距離 $r = 200$ mm, 振動子の直径 $d = 10$ mm のとき, $L = 170$ mm である. 間隔 L は振動子の直径 d , すなわち振動子アレイの離散化に関するパラメータに依存する. これは, デジタル信号のスペクトルにおいて, 元信号のスペクトルがサンプリング周波数の倍数の位置に複製されることと対応している. 開発した小型超音波集束装置においても, 約 40 deg 方向への力が観察されている. これは離散的な音源配列を用いるというフェーズドアレイの原理上, 避けられない効果である. ただし超音波振動子には指向性 (半減半角 50 deg) がある¹⁴⁾ ため, Fig. A.2 (b) の範囲より外側のピークは無視できるほど小さい.

B. 距離の近似の影響

付録 A では距離に関する近似を施して計算を行った. 具体的には, 全ての振動子からの音圧が等しいと仮定する近軸近似と, 距離のテイラー展開の 2 次までで打ち切るフレネル近似である. それぞれの近似の成立条件は以下の式で表される.

$$\frac{r}{r'} \approx 1 \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{1}{8\lambda} \left\{ (x_m - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 \right\}^2 \ll r^3 \quad (\text{B.2})$$

式 (B.1) は近軸近似の条件である. 本装置において焦点距離 $r = 200$ mm として中心に焦点を結ぶとき左辺の値は最小で 0.88 をとり, 1 と 10 % 以上の差が生じる. また式 (B.2) はフレネル近似の条件である. 左辺の値は最大で 1.9×10^{-3} m³ 程度, 右辺の値は 8.0×10^{-3} m³ であり同じオーダーである. すなわちどちらの近似も十分に成立しているとは言い難く, 無視できない誤差が生じている可能性がある.

本章では理論計算における距離の近似の影響を数値シミュレーションにより検証する. 条件を以下に示す. 焦点座標 $(x_f, y_f, r) = (0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 200 \text{ mm})$, 振動子間隔 $d = 10$ mm, X および Y 方向の振動子の個数 $N = 17$, オフセット $\xi = -8$ mm. (m, n) 番目の振動子から座標 $(0, 0, z)$ に届く超音波について, 距離の近似を施さない (non-approx) 場合の音圧 p_n および近似を施す (approx) 場合の音圧 p_a を以下の式で定義する. なおこれらの絶対値は意味を持たず, 相対的な比較のみを行う.

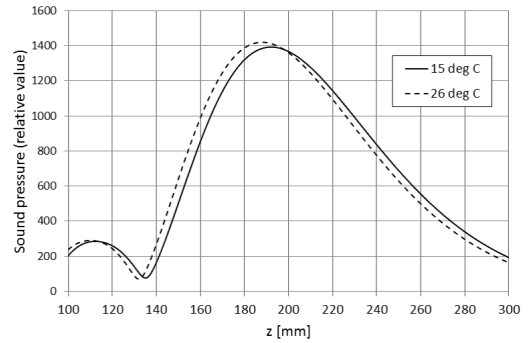


Fig. A.4 Effect of temperature (comparison between 15 and 26 deg C).

$$p_n(m, n, z, t) \equiv \frac{\exp\left\{j\left(k\sqrt{x_m^2 + y_n^2 + z^2} - \omega t\right)\right\}}{\sqrt{x_m^2 + y_n^2 + z^2}} \quad (\text{B.3})$$

$$p_a(m, n, z, t) \equiv \frac{\exp\left[j\left\{k\left(z + \frac{x_m^2 + y_n^2}{2z}\right) - \omega t\right\}\right]}{z} \quad (\text{B.4})$$

式 (B.4) は式 (B.3) の分母に近軸近似, 分子にフレネル近似を施したものである. また集束させるための位相項 f_n, f_a を以下の式で定義する.

$$f_n(m, n) \equiv \exp\left(-jk\sqrt{x_m^2 + y_n^2 + r^2}\right) \quad (\text{B.5})$$

$$f_a(m, n) \equiv \exp\left\{-jk\left(r + \frac{x_m^2 + y_n^2}{2r}\right)\right\} \quad (\text{B.6})$$

全振動子にわたって $f_n p_n, f_a p_a$ の和をとり, 中心軸上の音圧分布を求める.

結果を Fig. A.3 に示す. これは音圧振幅の絶対値を z に対してプロットしたものである. 距離の近似を施した場合でも概形は合っているが, 近似を施さない場合と比較して音圧振幅の最大値が大きく, また奥行方向の分布が狭く見積もられる.

C. 音速の変化の影響

本論文ではここまで, 音速 $c = 340$ m/s を仮定して計算を行ってきた. 空気中の音速は厳密には気温 t [°C] の関数であり, 摂氏 0 °C 付近において

$$c = 331.3 + 0.6t \quad (\text{C.1})$$

で近似される. $c = 340$ m/s は $t = 15$ °C の場合の音速である. 環境によって気温は異なり, それに伴って音速も異なる.

本章では音速の変化の影響を数値シミュレーションにより検証する. 具体的には, 駆動信号の位相を固定したまま, 15 °C の場合と第 5 章での計測時の気温 26 °C の場合について中心軸上の音圧分布を計算する. 距離の近似は施さない (実際の現象に近い) ものとする. その他の条件は付録 B と同様とする.

結果を Fig. A.4 に示す. 気温が上昇すると, すなわち音速が速くなると音圧振幅の最大値がやや大きくなるのが読

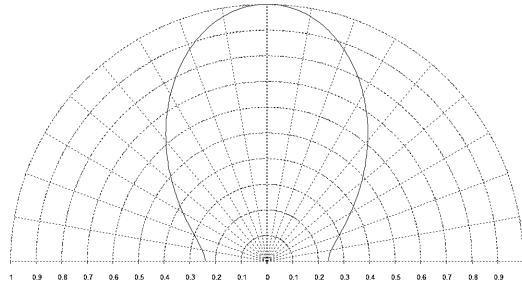


Fig. A.5 Directivity of transducer (circular baffle of radius $a = 4$ mm).

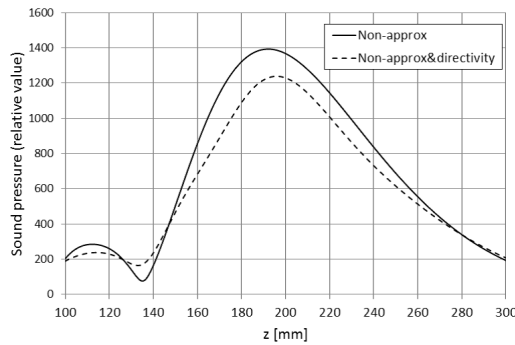


Fig. A.6 Effect of directivity of transducer.

み取れる。またそれと同時に、焦点距離が短くなることもわかる。ただし第5章で見られた“設定した焦点よりも20 mmほど手前で最大値をとる”現象は、試算したところ気温60℃程度に相当する。すなわち温度変化だけでは説明がつかず、振動子の振幅・位相特性のばらつきなど他の要因があると推察される。

D. 振動子の指向性の影響

本論文ではここまで、振動子から球面波が放射されると仮定して計算を行ってきた。実際の振動子には指向性 $D(\theta)$ があり、それは円形バツフルを仮定すると以下の式で表される。

$$D(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \quad (D.1)$$

ここで J_1 は第一種一次ベッセル関数、 a [m] は円形バツフルの半径、 θ [rad] は振動子の中心軸からの角度である。本論文で用いた振動子内部の振動板は半径4 mm程度である。このときの指向性を Fig. A.5 に示す。このグラフから振動子の半減半角 $50 \text{ deg}^{14)}$ も確認できる。

本章では振動子の指向性の影響を数値シミュレーションにより検証する。具体的には、球面波の場合と指向性がある場合について、中心軸上の音圧分布を計算する。距離については近似を施さず、気温は15℃とする。その他の条件は付録Bと同様とする。

結果を Fig. A.6 に示す。球面波の場合と比較して指向性を考慮した場合は焦点距離がやや長くなり、音圧振幅が10%程度小さくなるのが読み取れる。

[著者紹介]

星 貴之 (正会員)



2008年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。日本学術振興会特別研究員、熊本大学助教を経て、2011年名古屋工業大学若手研究イノベータ養成センター特任教員(テニューア・トラック助教)、現在に至る。触覚デバイスの研究に従事。