

小型超音波集束装置の理論と実装

星 貴之* (名古屋工業大学)

Theory and Implementation of Compact Ultrasound-Focusing Device

Takayuki Hoshi* (Nagoya Institute of Technology)

This paper introduces a compact device which generates a force in midair. This small-sized and light-weighted device is easy to use and useful for exploring new application areas. It utilizes a nonlinear effect of ultrasound: Acoustic radiation pressure. The position of the force is controlled three-dimensionally based on the phased array focusing technique.

キーワード：空中超音波，音響放射圧，フェーズドアレイ，非接触作用力，触覚ディスプレイ，インタラクション (Airborne ultrasound, acoustic radiation pressure, phased array, noncontact force, tactile display, interaction)

1. はじめに

超音波を集束させることにより空中において手のひらで感じられる程度の力が発生することが，2008年，岩本ら（東京大学・篠田研究室）によって実証された⁽¹⁾。最初の試作機（超音波振動子 91 個，発生力 8 mN）は同心円アレイの中心軸上に力を発生させるものであった。その開発を筆者が引き継ぎ，同年，任意の位置に超音波を集束させられる試作機（振動子 324 個，発生力 16 mN）を製作した⁽²⁾。篠田研究室では装置の大型化が進められ，2012 年，大開口アレイ（振動子 2241 個）が稼働し始めた⁽³⁾。一方，筆者は装置の小型化を志向し，2012 年，小型超音波集束装置（振動子 285 個，発生力 16 mN）を開発した⁽⁴⁾⁽⁵⁾（図 1）。これは，拡張性のために煩雑な構成となっていた従来の制御用回路を見直し，また振動子数を固定することで省配線化・集積



図 1 小型超音波集束装置

Fig. 1. Compact ultrasound-focusing device.

表 1 小型超音波集束装置の仕様

Table 1. Specifications of developed device.

搬送波	40 kHz 超音波
焦点径	20 mm (焦点距離 20 cm のとき)
位置解像度	0.5 mm
発生力	最大 16 mN (624 段階可変)
振幅変調	DC および 1~1023 Hz 矩形波
通信～出力の 時間遅れ	位相計算時間 25 us + 振動子の立ち上がり時間 1 ms
電源	24 V
消費電力	100 W (超音波出力時)
サイズ	19×19×5 cm ³
重量	0.6 kg

化を行った装置である。当初は非接触の触覚ディスプレイとして開発していたが，小型化によって設置の自由度が高まり，また他分野の研究者も手軽に利用できるようになったという特長を活かし，現在は触覚に限らず幅広い分野への応用可能性を探索している。

本稿では，小型超音波集束装置について紹介する。まず本装置の仕様を説明し，次に空中で力が発生する原理，強度制御の理論，および安全性について述べる。最後に具体的な実装について，製作過程に沿った形で報告する。

2. 仕様

本装置の仕様を表 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 20 cm のとき焦点径は 20 mm である。焦点は 0.5 mm 刻みで空間座標を指定して移動させることができる。発生力の最大値は 16 mN である。PWM により強度を 624 段階で制御可能であ

る。超音波振動子の立ち上がり時間が 1 ms であることから本装置のリフレッシュレートは 1 kHz 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 19 cm 角、厚さ 5 cm、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る。設置の自由度も高い。外部への配線は USB と電源のみであり、セットアップが容易である。

3. 理論

本節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、超音波の安全性、の 4 項目について順に述べる。

〈3・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向の応力が発生する⁽⁶⁾⁽⁷⁾。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。

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

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。

〈3・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。

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。

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

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 (図 2)。この焦点径が本手法の空間解像度である。上式から、アレイサイズと空間

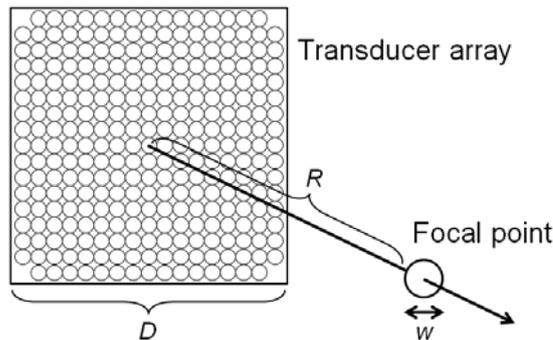


図 2 アレイサイズと焦点径

Fig. 2. Array size and diameter of focal point.

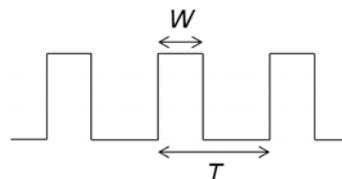


図 3 PWM 波形

Fig. 3. PWM waveform.

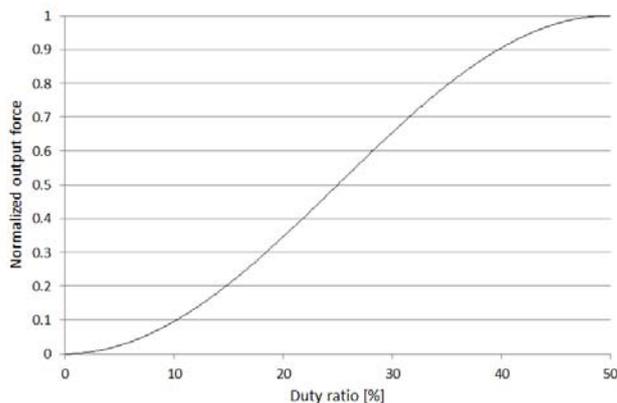


図 4 PWM による強度制御

Fig. 4. PWM-based intensity control.

解像度がトレードオフの関係にあることが読み取れる。 $R=20$ cm のとき $w=20$ mm という仕様は、 $\lambda=8.5$ mm、 $D=17$ cm を用いて算出されている。

〈3・3〉 PWM による強度制御 本装置では超音波振動子に対して 40 kHz 矩形波を入力する。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。PWM では通常、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 [V] を次式のように記述する (図 3)。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 & (nT \leq t < nT+W) \\ 0 & (nT+W \leq t < nT+T) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

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]は次式で表される。

$$a_1 = \frac{2}{\pi} V_0 \sin\left(\pi \frac{W}{T}\right) \dots\dots\dots (4)$$

これはデューティ比 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(図4)。

〈3・4〉 **安全性** 本手法は振幅の大きい超音波を扱うため, 人体への影響を考慮する必要がある。注意すべき項目はふたつある。ひとつは熱による皮膚組織への影響である。これに関して安全基準は複数存在しているが, 文献(8)によると皮膚組織に透過しても安全とされる上限は 100 mW/cm² である。皮膚表面に入射した超音波エネルギーのうち 0.1 % が皮膚内部へ透過することから, 皮膚表面には 100 W/cm² まで入射してよい。このとき発生する放射圧は 6 kPa であり, これが提示可能な放射圧の上限を与える。

もうひとつは耳への影響である。文献(9)で推奨されている上限は 110 dB SPL である。超音波振動子が一個でも数 10 cm の距離において超える値である上, 本手法では数百個の振動子を同時に駆動する。安全性が確認されるまでは, 装置に耳を近づけない, 長時間の使用を避ける, ヘッドフォンで耳を保護する, などの対策をすることが望ましい。

4. 実装

本章では本装置の実装について, 製作過程に沿って紹介する。事前の方針, 部品の選定, 設計の各時期に分けて記述する。

〈4・1〉 **方針** 最初に, 振動子アレイ基板 1 枚と駆動用基板 1 枚の二層構造とすることを定めた。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。またケーブル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こととした(図5)。

筆者はフリーソフト PCBE を用いて基板設計を行っている。基板層数はそれまでに経験のあった 4 層とした。I/O を数百チャンネル持つ FPGA は BGA などピンが高密度配置されたものが多いが, 4 層では配線を引き出しきれないため, あらかじめ I/O を引き出してある製品を用いることとした。基板試作サービス P 板.com を利用するため, その標準仕様(最小線幅 0.127mm, 最小間隙 0.127mm)に従って設計するものとした。

〈4・2〉 **部品** 本節では, 本装置に採用した部品それぞれについて詳述する。これらが入手可能であることを確認したのち, 具体的な設計を行った。

(1) **超音波振動子** T4010A1 (日本セラミック社製)を採用した。共振周波数 40 kHz, 直径 10 mm, 半減半角 50 deg, 距離 30 cm における音圧 121.5 dB SPL である。

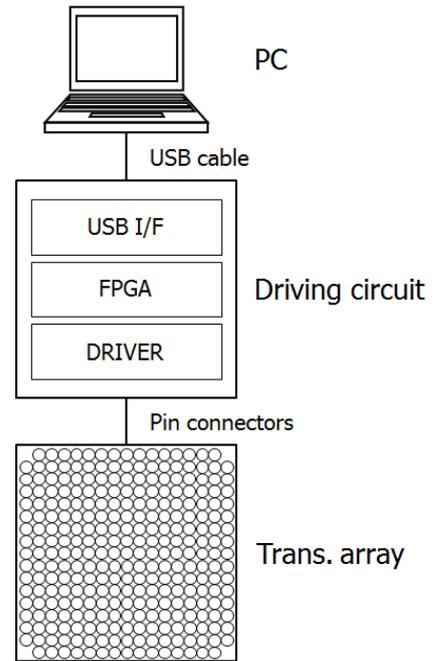


図5 小型超音波集束装置のブロック図
Fig. 5. Block diagram of developed device.

T4010A1 は, 研究開始時において最小径かつ最大出力のものであった。また半減半角も最大であり, 干渉を利用するフェーズドアレイに適していた。ただし現在は, 出力と半減全角が同程度で直径 8 mm の T4008A1 も販売されている。出力が同じならば個数が多い方がより大きな出力が得られるが, 今回は駆動用基板のチャンネル数との兼ね合いも考慮し, 従来と同じ直径 10 mm を採用した。

単独での使用(物体検出, 距離計測, など)が想定されているためか, T4010A1 には極性表示が付けられていなかった。そのため一個一個の極性を手作業で確認した。現在はパラメトリックスピーカ用に, 極性表示のある T4010B4 が販売されている。また, 入力-出力間の位相差には個体差がある。今回は平均から大きく(一周期の 16 分の 1 以上)外れる個体は少数であると考え, 振動子の選別は行わないものとした。

仕様書には 70 Vrms まで入力した際の出力音圧のグラフが掲載されているがその他の電的特性は 10 Vrms で調べられており, これを定格電圧と考える。実効値を最大値に換算するため $\sqrt{2}$ を掛け, 矩形波に含まれる基本周波数成分の振幅 $2/\pi$ で割ると, 入力すべき矩形波の振幅 V_0 は 22 V 程度と算出される。そこで市販されている電源装置の中で値の近い 24 V を電源電圧として採用した。

(2) **ドライバ** L293DD (STMicroelectronics 社製)を採用した。耐圧 36V のプッシュプルドライバが 4 チャンネル集積された表面実装 IC である。立ち上がり時間 250 ns であり, 40 kHz の信号に対して十分な応答速度を持つ。

L293DD は Enable ピンを持ち, 待機時の電力消費を抑えることができる。しかし事前に試したところ, Enable が OFF

であっても IC が温かくなり、Enable を ON にするとさらに熱くなることが確認された。このように発熱についての不安はあったが、調査した限りでは同程度に集積化されたブッシュプルドライバが見つからなかったため、これを採用した。

(3) 信号生成 ACM-202-55C8 (HuMANDATA 社製) を採用した。これは Altera 社製 FPGA Cyclone-III と 50 MHz クロックを搭載した小型基板である。調査した限りにおいて最大の I/O 296 本がコネクタに引き出されている。これらのうち 10 本を通信、1 本を Enable、285 本を振動子の駆動信号に用いることとした。

(4) 通信 USB-011-FIFO (HuMANDATA 社製) を用いて PC から FPGA を制御することとした。これは FTDI 社製 USB インタフェース FT245BL を搭載した小型基板である。従来は DIO PC カードを用いており、接続可能な PC に制約があった。本装置では、その制約をなくすため USB を採用した。なお本稿執筆時において USB-011-FIFO は販売終了になっており、互換性のある後継機として USB-103 が販売されている。

(5) 抵抗・コンデンサ 駆動信号から DC 成分を除去する HPF、リンギング対策の直列抵抗、バイパスコンデンサなどにはすべて、集積化のため 1005 サイズの抵抗・コンデンサを用いることとした。

〈4・3〉 設計 振動子アレイ基板 (図 6 左) は、振動子を 17×17 の正方形に並べて四隅から 1 個ずつ除いた 285 個の配列とした。また制御用基板と接続するためのピンコネクタを四辺に配置した。制御用基板 (図 6 右) は、中央の FPGA から放射状に信号線が伸び、ドライバ IC を介してピンコネクタに至るよう設計した。ドライバ IC 72 個を並べるには片面では面積が足りないため、36 個ずつの両面実装とした。発熱については、製造後に試したところ超音波出力時に 70 deg C 程度で熱平衡に達することが観察された。

位相差、振動子から焦点までの距離にもとづいて FPGA が算出する。時間解像度は 40 kHz の一周期の 16 分の 1 ($1.5625 \mu\text{s}$) とした。また距離に関しては波長 8.5 mm の 16 分の 1 (0.53125 mm) が最小単位となり、これが本装置の位置解像度を与える。PWM の時間解像度は 1 クロック (20 ns) とした。矩形波による振幅変調は、Enable 信号の ON / OFF の切り替えによって行うものとした。

5. おわりに

空中において非接触で力を発生させる小型超音波集束装置について紹介した。仕様、原理に加え、これまで述べる機会のなかった実装の部分についても詳述した。

ここ数年、我々以外の研究グループによる集束超音波の応用研究が報告されるようになった。ジェスチャによる演奏への触覚フィードバックの付与⁽¹⁰⁾、モバイルテレビへの搭載⁽¹¹⁾、軽量物体の非接触操作⁽¹²⁾、特定の触感を再現するエンタテインメント作品⁽¹³⁾、などである。他分野におい

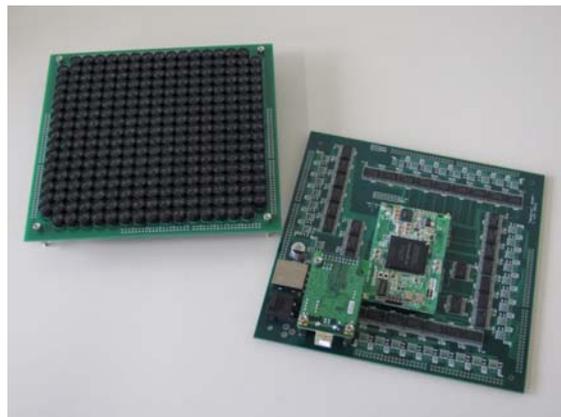


図 6 アレイ基板と制御用基板

Fig. 5. Transducer-array and controller circuits.

て集束超音波を利用するアイデアがあっても、装置製作のコストが高いため断念している研究者もいるのではないかと思われる。本装置は小型・軽量であるため持ち運びが容易であることと、USB と電源を接続するだけで使用できる手軽さが特長である。現在、希望する研究者に貸し出して使ってもらうことにより新たな応用を探索する活動を行っている。本活動をきっかけとして行われた共同研究には、局所励振による静電気分布計測⁽¹⁴⁾、コロイドディスプレイの表現力の拡張⁽¹⁵⁾、などがある。

謝辞

本装置の位相計算アルゴリズムは高橋将文氏 (東京大学大学院情報理工学系研究科)、PWM アルゴリズムは長谷川圭介氏 (同所属) によるものである。彼らの尽力と好意により高精細な制御が可能となった。ここに感謝の意を表す。

文 献

- (1) T. Iwamoto, M. Tatezono, and H. Shinoda: "Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound", Proc. Eurohaptics 2008, pp.504-513 (2008)
- (2) T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda: "Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound", IEEE Transactions on Haptics, Vol. 3, No. 3, pp. 155-165 (2010)
- (3) K. Hasegawa and H. Shinoda: "An Experimental Evaluation of the Large-Aperture Airborne Ultrasound Tactile Display with the Multiple Harmonic Adjacent Phased Array Scheme", Proc. SICE SI 2012, pp. 1328-1333 (2012) (in Japanese)
長谷川圭介・篠田裕之:「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, pp. 1328-1333 (2012)
- (4) T. Hoshi: "Development of Portable Device of Airborne Ultrasound Tactile Display", Proc. SICE Annual Conference 2012, pp. 290-292 (2012)
- (5) T. Hoshi: "Pressing without Touching by Focused Ultrasound". YouTube, <http://youtu.be/zV0kiGweOF8> (2012)
星貴之:「集束超音波を使って触れずに押す」, YouTube 公開動画, <http://youtu.be/CE4WsYncNa4> (2012)
- (6) J. Awatani: "Studies on Acoustic Radiation Pressure. I. (General Considerations)", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 27, pp. 278-281 (1955)

- (7) T. Hasegawa, T. Kido, T. Iizuka, and C. Matsuoka: "A General Theory of Rayleigh and Langevin Radiation Pressures", *Acoustical Science and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 145-152 (2000)
- (8) R.K. Creasy, R. Resnik, and J.D. Iams: *Maternal-fetal Medicine*, Saunders (2004)
- (9) C.Q. Howard, C.H. Hansen, and A.C. Zander: "A Review of Current Ultrasound Exposure Limits", *The Journal of Occupational Health and Safety of Australia and New Zealand*, Vol. 21, No. 3, pp. 253-257 (2005)
- (10) M. Ciglar: "An Ultrasound Based Instrument Generating Audible and Tactile Sound", *Proc. International Conference on New Interfaces for Musical Expression 2010*, pp. 19-22 (2010)
- (11) J. Alexander, M.T. Marshall, and S. Subramanian: "Adding Haptic Feedback to Mobile TV", *CHI Extended Abstracts 2011*, pp. 1975-1980 (2011)
- (12) M.T. Marshall, T. Carter, J. Alexander, and S. Subramanian: "Ultra-tangibles: Creating Movable Tangible Objects on Interactive Tables", *Proc. CHI 2012*, pp. 2185-2188 (2012)
- (13) T. Okunari, M. Kinoshita, S. Abe, T. Ikeda, S. Fukatari, A. Yamada, and S. Yoshida: "Virtual Doctor Fish", *Proc. 17th VRSJ annual conference*, pp. 332-333 (2012)
奥成貴大・木下誠・阿部翔太郎・池田任志・深瀧創・山田彩加・吉田翔:「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, pp. 332-333 (2012)
- (14) K. Kikunaga, T. Hoshi, H. Yamashita, Y. Fujii, and K. Nonaka: "Measuring Technique for Static Electricity Using Focused Sound", *Journal of Electrostatics*, in press (2012)
- (15) Y. Ochiai, A. Oyama, T. Hoshi, J. Rekimoto: "Colloidal Display", *Proc. Laval Virtual 2013, ReVolution*, accepted (2013)

A. 付録

〈A・1〉 超音波焦点の音圧分布 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。図7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時、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て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。音響放射圧はこの二乗に比例する。

$$p(x_f, y_f) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{2} p_r e^{-jkr'} e^{j(kr'' - \omega t)} \dots (5)$$

$$\approx \sqrt{2} p_r N^2 \frac{\text{sinc}\left(\frac{Nd v_x}{2}, \frac{Nd v_y}{2}\right)}{\text{sinc}\left(\frac{d v_x}{2}, \frac{d v_y}{2}\right)} e^{j\{\varphi(x_f, y_f) - \omega t\}} \dots (5)$$

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。

$$r' \equiv \sqrt{(x_m - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 + r^2} \approx r + \frac{(x_m - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2}{2r} \dots (6)$$

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

$$r'' \equiv \sqrt{(x_m - x_f)^2 + (y_n - y_f)^2 + r^2} \approx r + \frac{(x_m - x_f)^2 + (y_n - y_f)^2}{2r} \dots (7)$$

は (m, n) 番目の振動子から焦点面上の点 (x_f, y_f, r) までの距離

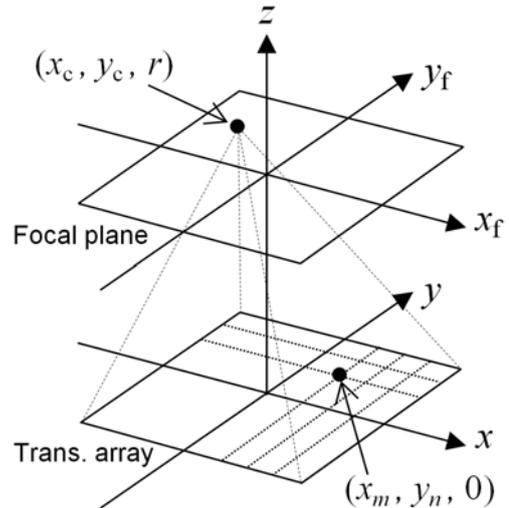


図7 振動子アレイと焦点面の座標系
Fig. 7. Coordinate system on transducer array and focal plane.

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 $(md + \xi, nd + \zeta)$ 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

$$\text{sinc}(x, y) \equiv \frac{\sin(x) \sin(y)}{xy} \dots (8)$$

で定義される。式(5)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。

$$v_x \equiv \frac{k}{r} (x_f - x_c) \dots (9)$$

$$v_y \equiv \frac{k}{r} (y_f - y_c) \dots (10)$$

また

$$\varphi(x_f, y_f) \equiv \frac{k}{2r} (x_f^2 + y_f^2 - x_c^2 - y_c^2) - \left\{ \zeta + \frac{(N-1)d}{2} \right\} (v_x + v_y) \dots (11)$$

は焦点面上の位置に依存した位相遅れである。

焦点距離 $r = 150$ mm としたときの, 焦点付近の音響放射圧の分布を図8(a)に示す。これは音圧分布を最大値で規格化したもの, 二乗したものである。焦点付近の音圧分布については式(5)の分子の sinc 関数が支配的である。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 関数が得られたと説明することができる。 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。

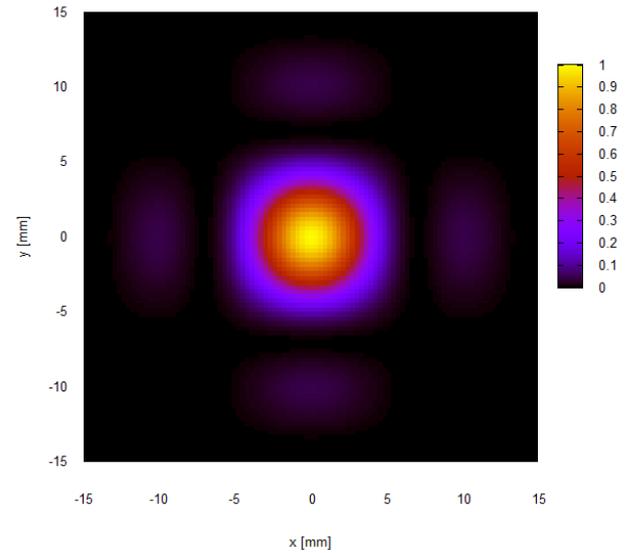
$$w = \frac{2\lambda r}{Nd} \dots (12)$$

これが式(2)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。

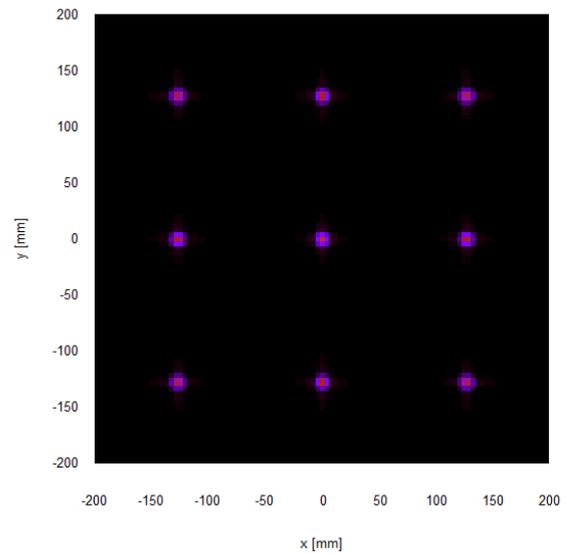
図 8 (b) は、焦点面をより広範囲で見た際の放射圧分布である。焦点（メインローブ）以外にも、ピークが格子点状に現れている様子が見られる（グレーティングローブ）。これは式(5)の分母の sinc 関数の影響である。分母がゼロになるとき分子もゼロになるため、周期的にピークが現れる。ピーク同士の間隔 L [m] は、分母の sinc 関数が最初にゼロになる x あるいは y の値から得られる。

$$L = \frac{\lambda r}{d} \dots\dots\dots (13)$$

例えば 40 kHz 超音波の波長 $\lambda = 8.5$ mm, 焦点距離 $r = 150$ mm, 振動子の直径 $d = 10$ mm のとき, $L = 127.5$ 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）があるため、図 8 (b) より外側のピークは無視できるほど小さい。



(a) 焦点（メインローブ）



(b) メインローブとグレーティングローブ

図 8 焦点面における放射圧の分布（焦点距離 150 mm）

Fig. 8. Distribution of acoustic radiation pressure.