

強力な音場を透過した音波の振る舞い

6年D組 黒川 陸

指導教諭 藤野 智美、守本 寛治、米田 隆恒

1. 要約

音源から発射された音波の進行方向を自由に操作する技術は、多くの音響工学の分野にとって重要である。本研究では、強力音場を空気中に作り、その領域で音波を反射させることによる音波の方向操作を検討した。

初めに、強力な定在波に対してインパルスを入射させる有限差分法のシミュレーションを行ったところ、反射波が発生する結果を得た。そして、複数の超音波振動子を用いて空気中に強力音場を発生させ、そこへ別の振動子から音波を入射させるシミュレーション及び実験を行った。双方で同様の結果が得られ、強力音場を透過した音波の強度が減少し、強力音場の外で音波の強度が増加した。これは、強力音場が存在する領域を境界として反射が起こり、反射した音波が強力音場の外に移動したことを示している。以上の結果から強力音場へ入射した音波が反射することが示された。

キーワード 強力音場, 超音波, 反射, 波動方程式, シミュレーション

2. はじめに

音源から発射された音波の進行方向を自由に操作する技術は、多くの音響工学の分野にとって重要である。従来の手法の一つは、物理的な反射板で音波を反射させたり、物理的なレンズで音波を屈折させたりして方向を操作することである。しかし、物理的な構造物の構築には相応の時間と労力が必要とされる。また、物理的な構造物には様々な制約があり、瞬時にその設置位置、サイズ、物理的特性などを変化させることは困難である。

この問題を解決する先行研究として、物理的な構造物を使用せずに音波の進行方向を操作する技術が Kazal DS らによって提案されている¹⁾。彼らは一酸化炭素レーザー光(波長 $5.5\mu\text{m}$,出力 250W)を気体媒質に吸

収させることで空気中に局所的に温度が高い領域を作り出し、その領域が音波に対して90%以上の反射率を持つことを実験で示している。

本研究では、強力音場を空気中に作り、その領域で音波を反射させることによる音波の方向操作を検討する。超音波を用いて強力音場を作ることで、人間にとって無音、無臭、無色透明な反射板を実現することができる。また、レーザー光より強力音場の方がエネルギー的に安全である可能性がある²⁾。本論文の目的は、強力音場が入射波を反射させる能力を持つことの実証である。なお、「強力音場」がどの程度の音圧であるかを具体的に求めることは本研究では行わない。

3. 基本的な考え方

通常、音波の反射は異なる媒質の境界で起きる。ここで、媒質 1 を進行していた音波が媒質 2 へ垂直入射する際に反射が起きる状況を考える。このときの反射率 R は媒質の固有インピーダンスを用いて(1)式で与えられる。

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

媒質 1 の固有音響インピーダンス: Z_1 [kg/sm^2]

媒質 2 の固有音響インピーダンス: Z_2 [kg/sm^2]

固有音響インピーダンス Z_i は媒質の音速と密度の積で与えられる。

$$Z_i = c_i \cdot \rho_i \quad (2)$$

媒質 i の音速: c_i [m/s] 媒質 i の密度: ρ_i [kg/m^3]

例えば、空気中を進行していた音波が、空気の 2 倍の固有音響インピーダンスを持つ媒質へ入射した際の反射率は 1/3 である。

$$R = \frac{2Z_0 - Z_0}{Z_0 + 2Z_0} = \frac{1}{3} \quad (3)$$

空気の固有音響インピーダンス: Z_0 [kg/sm^2]

このときの透過率は 1 から反射率を引いて 2/3 である。

ここで、音波が粗密波であり、媒質の密度変化が伝播する現象であることに注目する。音波の音圧と密度の関係は(4)式で表される。

$$\rho_i = \frac{P_i}{R_0 T} \quad (4)$$

媒質 i の密度: ρ_i [kg/m^3] 媒質の気体定数: R_0 [$\text{m}^2/\text{s}^2\text{K}$]

媒質 i の圧力: P_i [Pa] 媒質の熱力学温度: T [K]

また、音波の非線形特性として、音圧に従い音速が変化することも知られている。³⁾

$$c_i = c_0 + \frac{P_i}{\rho_0 c_0} \quad (5)$$

媒質 i の音速: c_i [m/s] 媒質の静音時の音速: c_0 [m/s]

媒質 i の音圧: P_i [Pa] 媒質の静音時の密度: ρ_0 [kg/m^3]

強力な音場であるほど密度変化と音速変化が大きいと考えられるため、十分強力な音場内では固有音響インピーダンスが無視できないほど変化すると予想できる。つまり、空気中に存在する強力音場の領域は空気とは異なる媒質のように振る舞い、そこへの入射波を反射させることが期待できる。似た現象として、音波による媒質の密度変化が光の屈折率を変化させることは Raman-Nath 回折などで知られている。⁴⁾

近年、大出力の超音波を効率良く空中に発射する技術の開発が進められ、6000Paの超音波音源が報告されている。⁵⁾一例として、1気圧15°Cの空気中に存在する音圧振幅6000Paの強力音場への入射波を考察してみる。音波が存在しない静圧状態での空気の密度を $\rho_0 = 1.22\text{kg}/\text{m}^3$ 、音速を $c_0 = 340\text{m}/\text{s}$ とする。強力音場の音圧に依存して変動する密度と音速を(4)、(5)式より求め、そこから固有音響インピーダンスの変化を計算する。ここで、静圧状態の媒質を進行していた音波が局所的に存在する強力音場に対して垂直入射することを考えると、(1)式より反射率が概算できる。音圧が最小・最大になる瞬間の計算を下表に示す。音圧が最大の瞬間(換言して、密な状態)にちょうど入射した音波は5%程自端反射する。音圧が最小の瞬間(換言して、疎な状態)に入射した音波は5%程固定端反射を起こす。また、ちょうど静圧状態になっている音場へ入射した音波は反射率 0%で完全に透過する。つまり、強力音場はその音圧変化に連動して周期的に反射率が変動する空間であることがわかる。

	最小	静圧	最大
音圧[Pa]	-6000	0.00	6000
密度[kg/m ³]	1.15	1.22	1.30
音速[m/s]	326	340	354
固有音響インピーダンス[kg/sm ²]	375	416	460
反射率[%]	-5.21	0.00	4.95

4. シミュレーション

有限差分法を用いて3次元空間の波動方程式を計算し、強力音場が入射波を反射させることを予測する。強力な音波に関する計算を行う場合、非線形の波動方程式を使用することが好ましいが、本研究では計算を簡略化し、線形の波動方程式に非線形の影響を補正する独自の方法で計算を行う。なお、媒質による音波のエネルギー損失はないものとする。計算は x, y, z 軸から成る三次元直交座標系を対象に行い、入射波の進行方向が z 軸方向になるように音源を設置する。計算結果は xz 平面についてヒートマップで可視化して図として示す。

4.1 シミュレーションの安定性

波動のシミュレーションで計算が発散しないためには、「情報が伝播する速度」が「実際の現象での音速」よりも速い必要があり、具体的な条件はフォン・ノイマンの安定性解析より導かれる。満たすべき条件は(6)式であり、以降のシミュレーションでは安定性を α で評価する。

$$\alpha = c\Delta t \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 1 \quad (6)$$

媒質の音速: c [m/s]

離散格子の時間幅: Δt [s]

離散格子の空間幅: Δx [m], Δy [m], Δz [m]

4.2 シミュレーション手順

本研究のすべてのシミュレーションに共通する手順を以下に示す。

① 強力音場の計算

均一媒質中に任意の音源を設定し、音源から発射される音波が作る音場を計算する。このとき使用する波動方程式では音速を定数 c_0 とする。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_0^2 \nabla^2 u \quad (7)$$

媒質内の微小体積の変位: $u(x, y, z, t)$ [m] 時間: t [s]

媒質の静音時の音速: c_0 [m/s]

② 強力音場が媒質に与える影響の計算

①で計算した強力音場が媒質の音速へ与える影響を(5)式を利用して計算する。(5)式において必要な音圧[Pa]は、(7)式を解くことで得られる変位 u と比例しているため、任意の比例定数 k を用いて与える。さらに密度と音速の定数もまとめて k' とし、 k' のみで強力音場が音速へ与える影響をコントロールする。

$$c = c_0 + \frac{ku}{\rho_0 c_0} = c_0 + k'u \quad (8)$$

強力音場の影響を適用した媒質の音速: $c(x, y, z, t)$ [m/s]

媒質内の微小体積の変位: $u(x, y, z, t)$ [m]

k' は0以上の実数の範囲で設定できるが、安定性の条件よりその値に上限がある。 k' を大きくするにつれ、強力音場の影響による音速変化が顕著になり、ある値以上で安定性の条件を満たさなくなる。

なお、強力音場が媒質密度へ与える影響は、(5)式の導出で考慮されている。

③ 入射波の計算

強力音場の影響による音速変化を適用した媒質中に、入射波の音源を設置

し、この音源から発射される音波の伝播を計算する。このとき使用する波動

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u \quad (9)$$

媒質内の微小体積の変位: $u(x, y, z, t)$ [m]

強力音場の影響を適用した媒質の音速: $c(x, y, z, t)$ [m/s]

方程式は、(8)式の音速が代入されており、これにより強力音場の影響が反映される。

4.3 プログラミング

上で述べたシミュレーションを Python で実装した。有限差分法では計算する空間を離散格子系として扱うため、どの程度の幅で離散化するかが重要である。細かい幅で離散化するほど計算は具体的になるが、計算量が膨大になってしまう。実際のシミュレーションでは 100 億個から 500 億個程の格子点数になり、これはメモリサイズでは 70GB から 350GB 程度である。本研究の実行環境ではシステムメモリが 32GB であるため、それを超える配列は扱えない。そこで、メモリマップ化した全体の配列をハードディスクに保存し、小さなセグメントごとにメモリ上に展開して計算を行い、これを繰り返すことで解決した。

4.4 強力な定在波が成す音場への入射

向かい合わせた二つのスピーカーを用いて定在波を形成し、これが作る音場を強力音場とする(図 1)。実際の実験で再現することを考慮し、強力音場の周波数を 40kHz とした。40kHz の超音波振動子の入手性が高いからである。強力音場に対して垂直にインパルスを入射させた結果を図 2(a)に示す。比較のため、強力音場を放出していない場合の結果を図 2(b)に示す。シミュレーショ

ンの安定性について、 $\alpha = 0.25 \leq 1$ であり条件を満たしている。

(a)と(b)を比較すると、強力音場へ入射したときのみ反射波が確認できる。ここで、入射波はその進行方向に平行な軸で線対称であり、この対称の軸上の変位をグラフにすると結果がわかりやすい(図 3)。強力音場の領域へ入射したことで、入射波の進行方向と逆側に反射波が出現し、透過波の振幅が減少している。

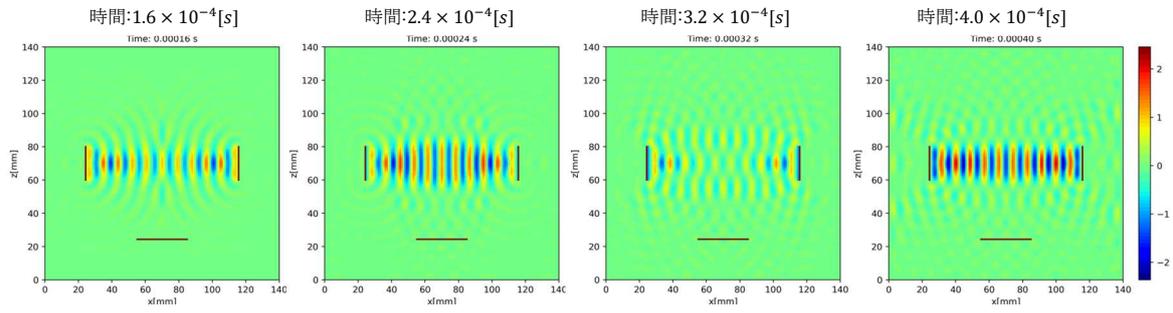
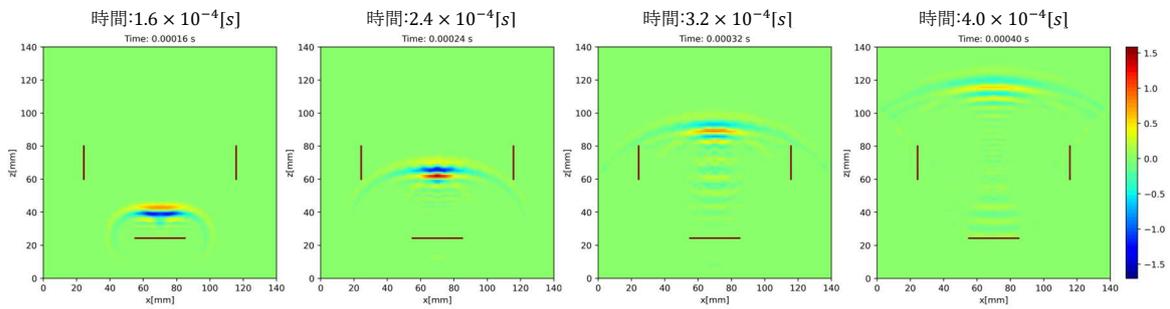


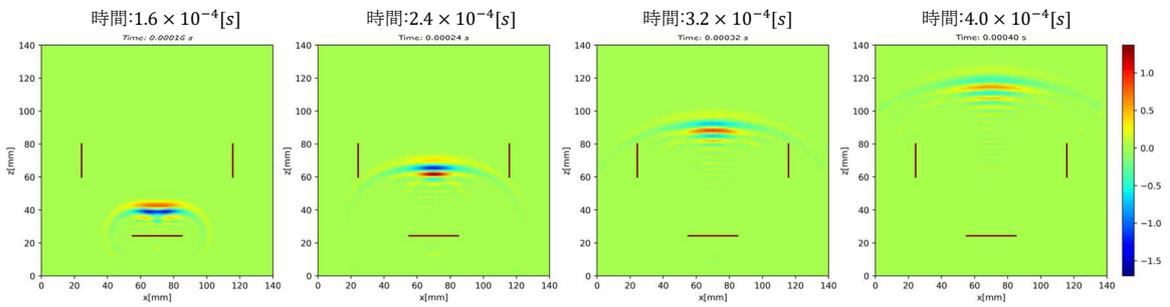
図1 強力な定在波が作る音場

向かい合わせた二つのスピーカーにより 20mm 程度の幅を持つ定在波が形成されている。



(a)強力音場を放出している場合

図の中に強力音場は描画していないが、媒質には強力音場による音速変化が適用されている。強力音場に対してインパルスを垂直入射させたところ、その進行方向と逆側に反射波が発生していることがわかる。



(b)強力音場を放出していない場合

図2 強力音場による反射を調べるためのシミュレーション比較

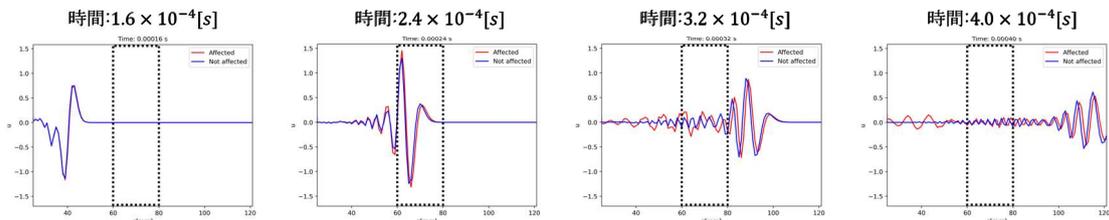


図3 波形グラフによる強力音場の影響比較

図2における $x=70$ の直線上(入射波の対称の軸上)の変位変化をグラフにした。横軸が z 軸方向の距離で、縦軸が変位である。赤色の線が強力音場の影響を受けている場合で、青色の線が強力音場の影響を受けていない場合である。強力音場の領域を点線で図中に示した。グラフより、強力音場の影響で反射波が発生し、透過波の振幅が減少していることがわかる。

4.5 焦点化された強力音場への入射

シミュレーション結果を実験で再現するとき、十分強力な音場を実際に形成する必要がある。シミュレーションにおいては自由に音場の強度を設定できるが、実際は一つの振動子が出力できる音圧に限界がある。そのため、複数の振動子から発射される音波を重ね合わせることで強度を高める必要がある。さまざまな振動子の配置が考えられるが、発射される音波が一つの焦点へ集まるように配置すると効率的である。ここでは、中心に焦点を形成するように半球状に振動子を並べたモデルを扱う(図4)。半球の直径は60mmである。

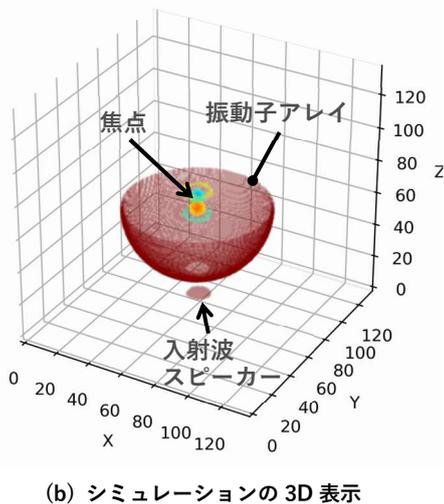
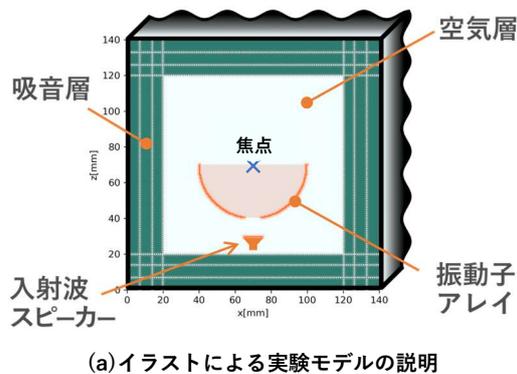


図4 実験のシミュレーションモデル

半球状に並べられた振動子からは42kHzの超音波が発射され、これが作る焦点を強力音場とする。半球状の振動子アレイの底には直径10mmの穴があり、入射波が通過できるようになっている。実際の実験では

FFTを用いて強力音場と入射波を分離して結果を解析するため、強力音場と入射波は異なる周波数でなければならない。そこで入射波は25kHzの正弦波とした。

振動子アレイが形成する強力音場を図5に示す。6mm程度の幅を持つ焦点が形成されていることがわかる。強力音場の有無による入射波の変化を図6に示す。シミュレーションの安定性について、 $\alpha = 0.068 \leq 1$ であり条件を十分満たしている。

実際の実験ではLDV(レーザードップラー振動計)を用いて音波の強度分布を測定する。LDVはレーザー光が音場を通過するときに受ける屈折率変化を測定することができ、この屈折率変化が音場の音圧に比例していることから音圧強度を得ることができる。⁶⁾このとき得られる音場の音圧強度は、レーザー光路上の音圧の積分値の時間微分値である。⁷⁾そこで、シミュレーション結果の音圧強度をレーザー光路方向(y軸)に沿って合計することで実験結果に対応させた(図7)。図7(a)と(b)の違いを分かりやすくするために(a)から(b)を減算した(図8)。これを見ると、強力音場を透過した入射波の強度が減少し(領域A)、強力音場の外で強度が増加していることがわかる(領域B)。このことから、強力音場が存在する領域を境界として反射が起こり、反射した音波が強力音場の外に移動したと考えられる。

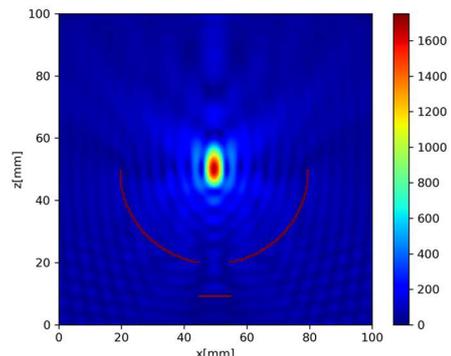


図5 振動子アレイが形成する強力音場

変位を1周期分の時間積分することで得られる強度分布を表示している。

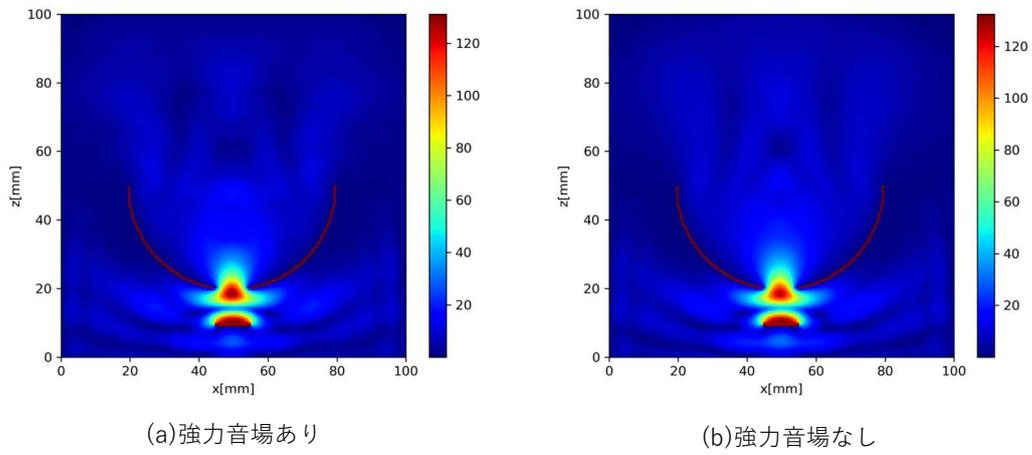


図 6 入射波の強度分布

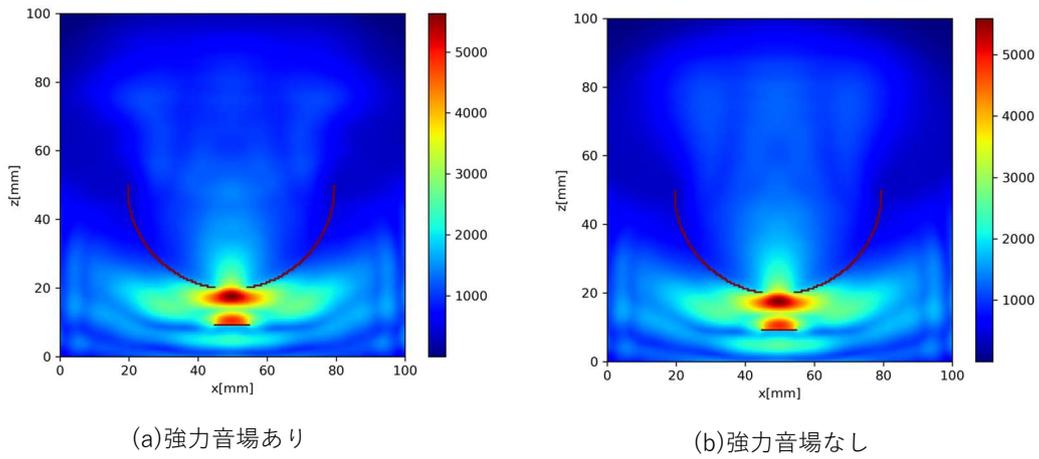


図 7 入射波の強度分布のレーザー光路上積分

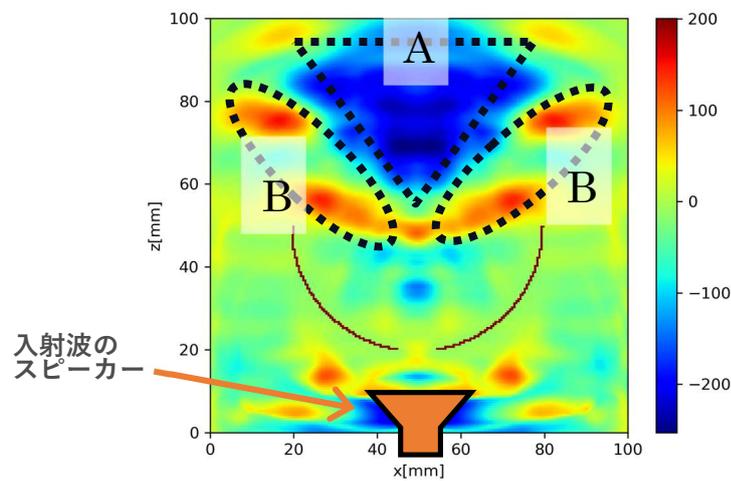


図 8 強力音場による入射波の変化量

5. 実験

シミュレーション 4.5 の結果を検証するために、シミュレーションモデルと同じ実験系を用意する(図 9)。複数の超音波振動子で強力な焦点を形成し、そこへ別の音波を入射させる。このとき入射波が強力音場から受けた影響を LDV で測定する。LDV は音場を乱さずに測定ができる点が優れている。シミュレーションでは半球状の振動子アレイ内部の様子を調べることができたが、LDV はレーザー光が通過できる部分しか測定できないので、測定範囲は振動子アレイの上部となる。

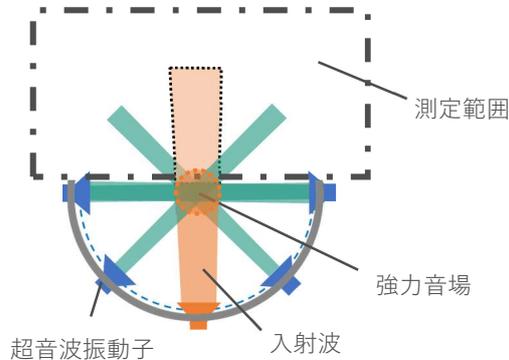
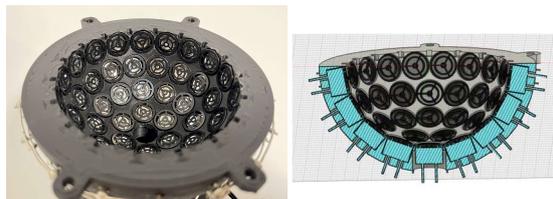


図 9 実験系の概略図

強力音場を形成するための半球状の超音波アレイを 3D プリンターで作成した(図 10)。半球の直径は 60mm である。超音波振動子は SPL 社製の UT1007-Z325R(中心周波数 42kHz)を使用した。



(a)実際の写真

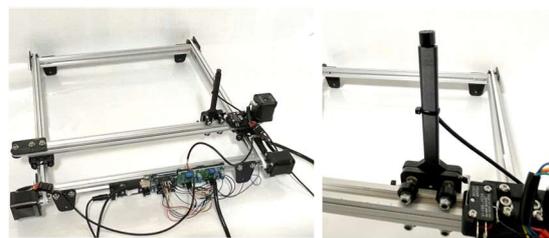
(b)断面図

図 10 製作した振動子アレイ

5.1 焦点が形成されることの確認

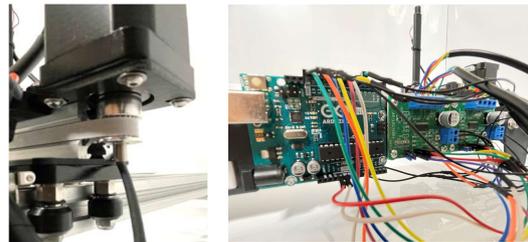
実験の前に、自作した振動子アレイが焦点を形成することを確認する。焦点は振動子アレイの内部に形成されるため、レーザー光が通過できず、LDV を測定に使用できない。そこで、マイクロホントラバースを用いて測定を行った。製作したマイクロホントラバースを図 11 に示す。ステッピングモ

ーターでマイクロホンを動かすことで二次元平面の測定ができる。x軸とy軸のモーターが個別のモータードライバで制御されており、マイコンとデジチェーン接続されている。また、マイクロホンからの信号はオシロスコープで読み取られる。オシロスコープとマイコンは Python に接続されており、自動測定ができる。測定システムの構成図を図 12 に示す。



(a)全体写真

(b)マイクロホン



(c)モーター

(d)制御部分

図 11 製作したマイクロホントラバース

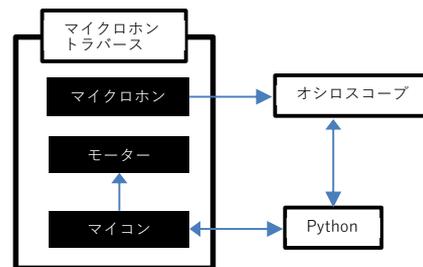


図 12 測定システムの構成図

マイクロホントラバースを用いて測定した音圧強度分布を図 13 に示す。直径 6mm 程度の焦点が形成されていることを確認できる。焦点の音圧を計測用マイクロホンで測定したところ、16400Pa 程度であった(178dB)。マイクロホンを焦点に近づけた影響で音場が乱れるため参考値であるが、強力音場が形成されていることがわかる。

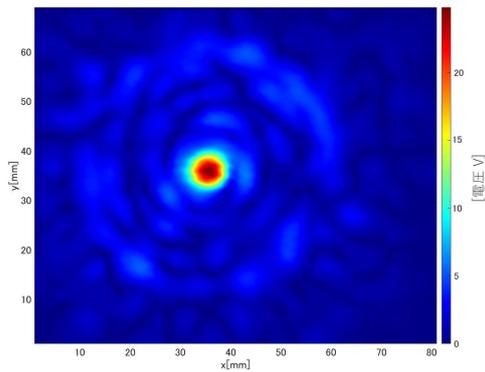


図 13 超音波アレイによる音場の強度分布

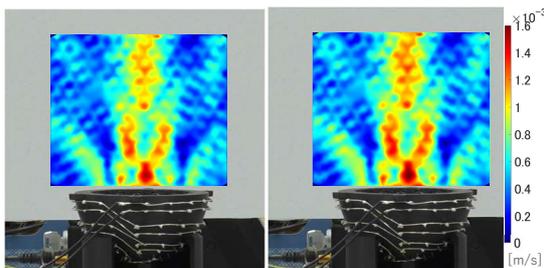
5.2 実験結果

LDV をデジタルネイチャー開発研究センターでお借りし、入射波が強力音場によって受ける影響を測定した(図 14)。



図 14 実験風景

入射波の周波数は 25kHz である。測定データを FFT し、入射波のみの強度分布を図 15 に示す。図 15(a)と(b)の違いを分かりやすくするために、(a)から(b)を減算した(図 16)。図 16 において、領域 A では音圧が 0dB から 10dB 程度減少し、領域 B では音圧が 0dB から 8dB 程度増加している。これはシミュレーション 4.5 と同様の結果を示して



(a)強力音場あり (b)強力音場なし

図 15 入射波の強度分布

おり、強力音場へ入射した音波が反射したため、領域 A で音圧強度が減少し、その反射波が領域 B へ移動したと考えられる。

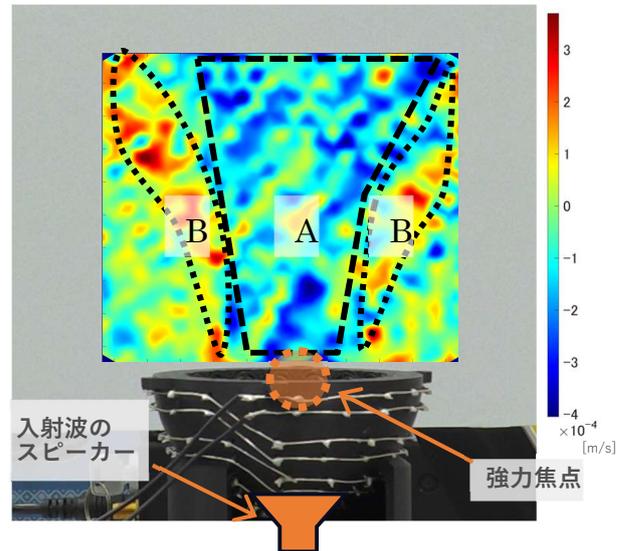


図 16 強力音場による入射波の変化量

6. まとめ

本研究では、強力音場がそこへの入射波を反射させる能力を持つことについて検討を行った。初めに、強力な定在波に対してインパルスを入射させるシミュレーションを行ったところ、反射波が発生する結果を得た。そして、焦点化された強力音場に対する入射波について、シミュレーション及び実験の双方で同様の結果が得られ、強力音場による入射波の反射が可能であることが示された。

7. 今後の展望

7.1 シミュレーションの改良

本研究で行った波動シミュレーションで無視していた条件を新たに組み込むことでシミュレーション結果を実験結果に近づきたい。具体的には、空気の粘性と熱伝導性による音波のエネルギー損失、非線形衝撃波による影響、パラメトリック差音による周波数成分の遷移を計算に適用しようと考えている。また、本論文のシミュレーションは波動方程式を直接差分法を使用して解く方式の FDM(Finite Difference Method) を使用していた。音波の解析でより一般的に使用さ

れている FDTD(Finite Difference Time Domain) 法を既に実装しているが使用していない。この手法の方が PML(Perfectly Matched Layer)といった境界条件の開発が進展している。今まで使用してきた手法と FDTD の精度・位相誤差について比較調査していく予定だ。

また、振動子アレイやマイクロホンといった計測装置のオブジェクトをより扱い易くするため、STL 形式のデータの読み込み機能を実装している(図 17)。3D データの表面を再帰的に三角形のサブディビジョンに分割し、スタガードグリッドと呼ばれる格子上の点に離散化するアルゴリズムだ。今後はこれを強力音場発射装置の音響設計に役立てたい。

さらなる展望として、強力音場の非線形効果を摂動法で解析的に推定し、非線形シミュレーションの整合性を確認することを目指したい。

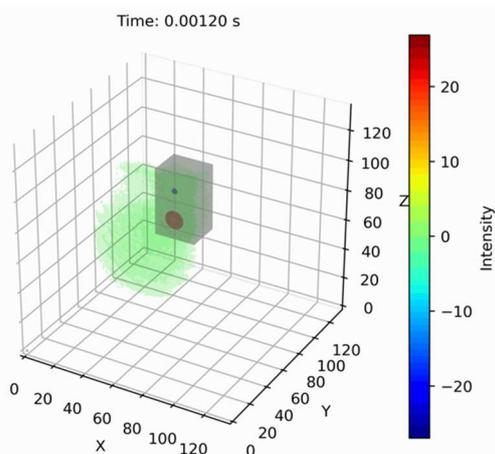


図 17 読み込んだ 3D モデルを用いたシミュレーション

7.2 強力音場の強度と反射の関係の検証

強力音場の強度と反射率の関係を具体的に調べることは重要である。そのために、強力音場を形成する超音波振動子の出力を 0 から最大値まで変化させ、それに伴う反射率の変化を調べる実験を行う。そのための予備実験として、強力音場を透過した音波の透過率と強力音場の強度の関係を調べた(図 18)。なお、計測用マイクは立命館大学の西浦教授にお借りした。

残念ながら予備実験の結果では、強力音場の強度と反射率の関係を示すことはできなかった。その原因は、強力音場の音圧が計測用マイクの最大許容音圧を超えてしまい、そもそも測定できないことだった。本研究には音圧の計測が必須なので、高音圧の入力に耐えられるマイクを調達するか自作する予定だ。



図 18 球状の振動子アレイとマイクロホン

7.3 強力音場の幾何光学特性の検証

強力音場の音圧や周波数と反射率の関係について具体的な関係式を求めたい。また、本研究では強力音場への垂直入射のみを問題としたが、強力音場への斜め入射について、幾何光学のスネルの法則に相当する関係が得られないか検討したい。

今後の実験のために底が抜けたリング型の音場形成装置を作った(図 19)。半球状の音場形成装置に比べて開放的なので、様々な角度から入射波を通す実験が可能である。



図 19 リング型の音場形成装置への斜め入射

7.4 安全性の検証

強力音場による反射技術の安全性について議論する必要がある。強力音場の量子(フォノン)としての安全性や、人間の内部へ透過した際の熱的作用について調べたい。安

全性を明らかにすることができれば、レーザー光を用いた音波操作技術よりも広い場面で使用できる可能性がある。

7.5 多重層を持つ強力音場

本研究で行った概算では、6000Paの音波出力で得られる反射率は約5%であり、これはレーザー光を用いた音波操作技術よりもかなり低い値である。強力音場の出力を高めることによる反射率の向上も期待できるが、強力音場を複数重ねた層を持つ構造を利用し、最大出力を上げることなく反射率を改善できないか検討したい。

7.6 既存の音響技術への応用

音響浮揚や音響ベッセルビームの分野では、複数の振動子を並べてそれぞれの位相を個別に制御するフェーズドアレイ技術が採用されている。フェーズドアレイによる位相制御に加えて、強力音場による空間の固有音響インピーダンス制御を組み合わせることで、形成できる振動モードを拡張できる可能性がある。そこで、強力音場を用いた空間の固有音響インピーダンス制御によって、形成できる振動モードがどのように変化するのか調べたい。

7.7 新しい音響技術の開発

強力音場による音波の方向操作を応用することで、空間内に自由に音源を設置できるスピーカーを開発できないか検討したい。

また、強力音場を用いて騒音を反射させることによる新しい防音技術を開発できるかどうか検討したい。強力音場の音圧分布をコントロールすることで、任意の周波数を選択的に反射・透過できる可能性がある。

8. 参考文献

- 1) D. S. Kazal, A. J. Reardon and B. M. Cullum, *Appl Spectrosc* **76** [11], 1346 (2022).
- 2) 篠田裕之, *日本音響学会誌* **78巻9号**, 502 (2022).

- 3) 渡辺好章, *応用物理* **76巻7号**, 742 (2007).
- 4) 宮木浩仲 and 渡辺好章, *日本音響学会誌* **56巻2号**, 85 (2000).
- 5) 平野翔一 and 伊藤洋一, *日本大学理工学部 学術講演会論文集* 1007 (2010).
- 6) 滝澤俊和, 齋藤直毅, 小西雅 and 山崎芳男 (早大), *日本音響学会研究発表会講演論文集 春季1*, 595 (2003).
- 7) 石川憲治, 矢田部浩平, 池田雄介 and 及川靖広 (早稲田大学表現工学科), *日本音響学会誌* **72巻7号**, 430 (2016).

9. 謝辞

本研究を行うにあたり、サイエンス研究会顧問の藤野智美先生、守本寛治先生、米田隆恒先生にご指導を賜りました。また、同研究会のメンバーやOBには普段から非常に有用なアドバイスをいただきました。また、奈良女子大学の佐藤克成先生には種々貴重なご意見をいただきました。立命館大学の西浦敬信先生、耿毓庭先生には計測用マイクロホンを使用させていただき、研究についての多様なアドバイスをいただきました。筑波大学デジタルネイチャー開発研究センターではLDVを使用させていただき、伏見龍樹先生に装置の使い方やその原理の解説をしていただくなど、大変お世話になりました。この場を借りて皆様に深くお礼申し上げます。