

# 強力な音波によって引き起こされる干渉現象の研究

4年B組 黒川 陸

指導教員 藤野 智美

## 1. 要約

本研究では、強力な音波が別の音波と干渉するときの振る舞いについて考える。一般に、音波は振幅が十分小さいときに独立性を有する。しかしその振幅が大気圧に対して無視できない程大きいときには異なる振る舞いをする事が知られており、これに起因する様々な音響現象が報告されている。そこで、複数の振動子から発される超音波を収束させた強力な超音波に対して別の音波を入射させ、その様子を観察することを目指した。本論文では、強力な超音波を発生させるために試作した実験装置を紹介する。

キーワード：干渉, 波の独立性, 固有音響インピーダンス, 振幅, 超音波

## 2. 研究の背景と目的

私は再生音楽とその音響テクノロジーに興味があり、「パラメトリックスピーカアレーを用いた壁面反射型オーディオスポット領域の拡大」(永翔平, 生藤大典, 中山雅人, & 西浦敬信, 2013)といった壁面反射を利用する音響システムに高い関心を持った。これらの研究について学ぶ過程で、コンクリートや木壁などの固体の壁がなくても反射波を生成できないか考え、強力な音場を作り出せば壁のように振る舞い、反射が観測できるのではないかと予想した。しかし、一般に高校物理の範囲で学習する波の反射は、音波が異なる媒質へ入射する際に、媒質の固有音響インピーダンスの違いに起因して生じる。媒質の密度変化がさほど大きくない音場とそこへ入射する音波に媒質の固有音響インピーダンスの違いはないが、強力な音場内では密度や音速の変化が起きているので固有音響インピーダンスが変化したことに相当するのではないかと推察した。そして、強力な音場が、そこに入射する別の

音波に対して固体の壁と同じ作用をすると想定し、固体の壁を用いない反射音響システムを実現させようと思った。

## 3. 研究方法

強力な二つの音波が干渉する際、反射に相当する現象が生じると予想した根拠を以下に示す。まず、音波の音速はその音圧によって変化することが知られている(式1)。

$$c_1 = c_0 + \frac{P_1}{\rho_0 c_0} \quad (1)$$

微小振幅音波の音速: $c_0$ [m/s]      進行波1の音圧: $P_1$ [Pa]  
媒質の静音時の密度: $\rho_0$ [kg/m<sup>3</sup>]

次に、音波は疎密波であるから、その音場では周期的に媒質の密度が変化している。この媒質の密度変化と音速の変が周囲と比べて大きい音場は、同じ空気が媒質である場合でも、異なる媒質とみなせるのではないかと予想する。つまり、強力な音場がそこに入射する別の音波に対して異なる媒質であるかのように振る舞う、ということである。

ある。この予想が正しい場合、次に述べるような、音波が異なる媒質に入射する場合の反射や透過の現象が観測できるかもしれない。音波の反射は、媒質の境界面で、固有音響インピーダンスの差異により起きる(図1)。その際の反射率  $R$  は次のように与えられる(式2)。

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

媒質1の固有音響インピーダンス: $Z_1$  [Pa・s/m]

媒質2の固有音響インピーダンス: $Z_2$  [Pa・s/m]

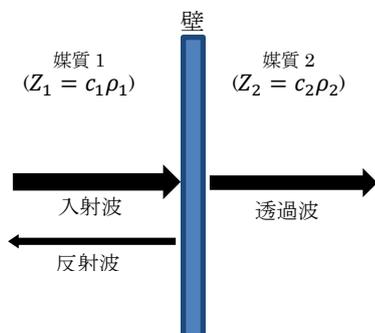


図1 波の反射と透過

上記の反射と透過が、媒質の密度と音速に関連した固有音響インピーダンスの差異に影響されることから、強力な音波に入射する音波についても同様の関係が成り立つのではないかと予想する。つまり、振幅が大気圧に対して無視できない程大きな音波は、固有音響インピーダンスの増加に相当する変化が生じるため、壁に近い作用を及ぼし反射が起きると予想した(図2)。

実際に強力な音波で反射が起きることを確認するために、強力な音波を生成する実験装置を製作することにした。本項では4つの試作品(装置1~4)を紹介する。なお、音源には十分大きな振幅と高い指向性を得るために超音波を利用した。

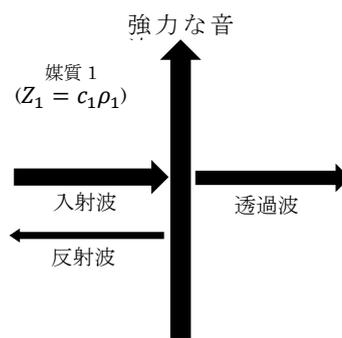


図2 強力な音波による反射のイメージ

### 3. 1 装置1の作成

【目的】装置1では、空中超音波振動子(以下、振動子、図3)を複数個並べた。この配置により、狙った点で大きな振幅を得ることを目指した。

【結果】この装置では、3Dプリンタで専用のケースを作ったものに3つの振動子を並べている(図4)。マイクロホンで音波を測定し、オシロスコープで振幅を見たところ、振動子を3つ近接設置しているので振幅は向上したが、振動板の面積も増加しているので指向性は低くなった。また音源が三か所になっているため、それぞれの振動子から出た音波の干渉も実験に影響する可能性があるため、注意したい。



図3 超音波振動子  
中心周波数: 40KHz±1KH  
音圧: 116dBm min@10Vrms,30cm



図4 装置1

### 3. 2 装置2の作成

【目的】装置2では、19個の超音波振動子を曲面に並べて、焦点を形成する装置を製作した。(図5)。焦点の形成によって、装置

1 よりも大きな振幅を得ることを目指した。

【結果】焦点位置の振幅を調べたところ、中心の振動子から 10cm 上に焦点があり、すべての振動子から出る音波が同位相で干渉しているため、大きな振幅を得られた。

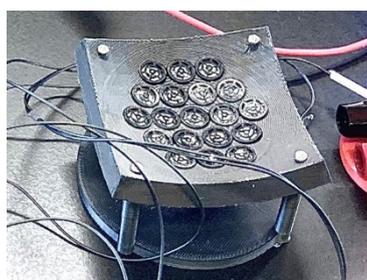


図 5 装置 2

### 3. 3 装置 3 の作成

【目的】2 つの振動子を向かい合わせに設置することで定在波を生成する装置を作った(図 6)。定在波を作ることで、腹の位置に大きな振幅を得ることを目指した。

【結果】振幅分布を測定したところ、定在波の腹と節を確認することができ、腹の位置では振動子 1 つ分の振幅より大きな振幅を測定できた。

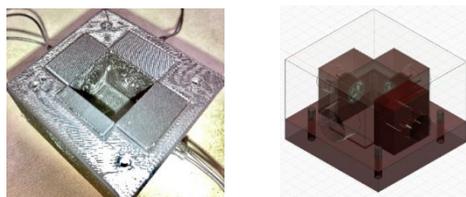


図 6 装置 3 の写真(左)と断面図(右)

### 3. 4 装置 4 の作成

【目的】反射波を測定する際に、反射波と入射波及び強力な超音波の音場が干渉してしまうと正確な振幅を調べにくいいため、極力高い指向性を得ることを目指した。そこで、振動子に開放口の面積が小さくなるようなホーンをつけた(図 7)。

【結果】ホーンによる指向性と振幅への影

響を調べるために、振動子単体とホーンをつけた振動子で振幅分布を測定し比較した(図 8)。図 8 の振幅分布図の横軸と縦軸の目盛は共に 1cm であり、振動子には 23.2V を入力した。ホーンをつけることによって開放口の辺りに焦点のようなものが確認できたが、振幅はホーン無しの振動子単体より小さくなった。ホーン内で起きる音波の反射を考慮の上、開放口に同位相の音波が集まるようにして、より高い振幅を狙いたい。



図 7 装置 4

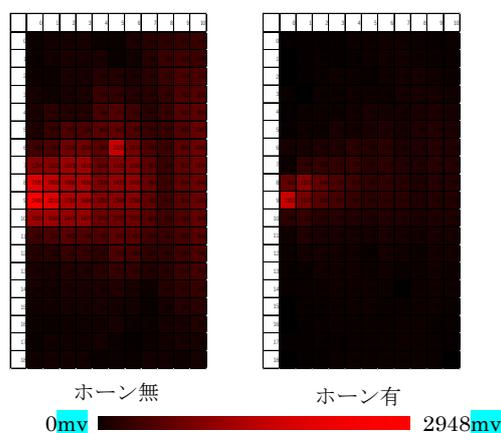


図 8 振幅の測定結果

## 4. 実験結果

- ・ 複数の振動子を曲面状に並べることで、焦点位置に大きな振幅を得た。一方、複数の振動子は取り付け角度が異なるため、焦点を通り過ぎた音波が拡散した。
- ・ 振動子を対面に配置することで定在波を作り、腹で大きな振幅を得た。
- ・ 振動子にホーンをつけることで、開放口辺りに振幅の強度が集中した。しかし、ホ

ーンを付けていない振動子単体よりも振幅が小さくなった。ホーン内で音波が多重反射し、その損失で振幅が減少したと予想したが、現段階では検証できていない。

## 5. 考察と今後の展望

4つの試作品を作ることによって、振動子の構成や配置による影響を把握することができた。今後の展望として次の3つの課題に取り組みたい。

### ① 定在波を利用した焦点の形成

より大きな振幅を得るために、振動子を曲面状に並べたものを2つ作り、それらを向かい合わせに配置して実験を行う。

### ② 指向性が高く振幅が大きな音波の生成

ホーンを付けた振動子を向かい合わせに配置することで、指向性と振幅が共に高くなるような装置も作りたいと考えている。

### ③ ボルト締めランジュバン型振動子の利用

超音波振動子について、上記の実験装置では空中超音波振動子を使っていたが、今後はボルト締めランジュバン型振動子(図9)も利用していきたい。ボルト締めランジュバン型



図9 ボルト締めランジュバン型振動子

振動子は圧電素子がボルトで機械的に固定されているため、高い振幅で駆動することができる。

### ④ 実験装置の構成の統一

今後は実験装置の構成を統一することで、実験結果の比較を容易にしたい。ファンクションジェネレータで超音波信号を生成し、アンプで増幅した後、振動子から出力する構成である(図10)。振動子から出る音波は超音波用のマイクロホンで測定し、

アンプから振動子への出力と、マイクに入力された振動子からの音波を同時にオシロスコープで観察できるようにしたい。

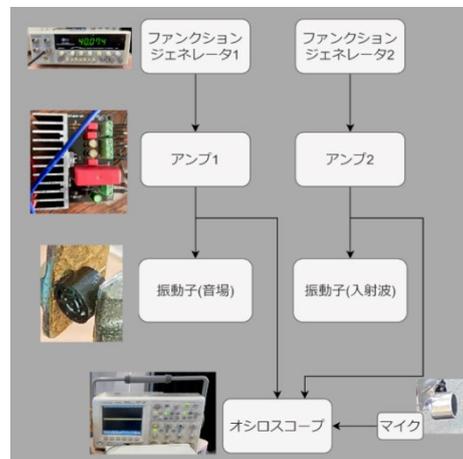


図10 実験装置の構成図

## 6. 参考文献

- [1]益永翔平, 生藤大典, 中山雅人, & 西浦敬信. (2013, July). パラメトリックスピーカアレーを用いた壁面反射型オーディオスポット領域の拡大. In 回路とシステムワークショップ 論文集 Workshop on Circuits and Systems (Vol. 26, pp. 431-435). [電子情報通信学会].
- [2]渡辺好章. (2007). 非線形音響と超音波エレクトロニクス. 応用物理, 76(7), 741-750.
- [3] 森栄司. (1970). 強力超音波の発生と応用. 実務表面技術, 17(9), 2-8.
- [4]Prof.J.Tsujino.(2000.5.30).音波の反射と透過.音響・超音波工学.  
<http://tsujino-www.ee.kanagawa-u.ac.jp/~TSUJINO/print/soundref.pdf>

## 7. 謝辞

今回の研究を行うにあたり、顧問の藤野先生、米田先生には多大なご指導を賜りました。また、同研究会の先輩方に多くの助言をいただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。