

立体音響への応用を目指した強力な音場の境界作用に関する検証

5年A組 黒川 陸
指導教員 藤野 智美

1. 要約

本研究では、強力な音場が空気中で媒質的な境界として振る舞うという予想の検証を行った。一般的な音波の反射は、音波が二つの媒質の境界を進行する際の固有音響インピーダンスの差異によって起こる。これを発展させ、強力な音場内では固有音響インピーダンスの増減に相当する変化が生じると予想し、そこへの入射波の反射や透過の減少が起きると考えた。この仮説が正しいかどうか調べるために、超音波振動子を104個用いて形成した音場に別の音波を入射させて透過波を測定した結果、透過波が減少することを確認した。この結果は強力な音波が媒質の境界として振る舞う可能性を示している。

キーワード 音波、反射波、透過波、固有音響インピーダンス、超音波

2. 研究の背景と目的

私は映画館やライブ会場で体験できる臨場感の高い音楽再生を、自由な場所で手軽に体験したいと感じていた。ここで述べる臨場感は、多方向からの音声表現による立体音響のことを指す。また、手軽さというのは音楽再生装置の設営コストや携帯可能性のことを指す。既に様々な立体音響技術が開発されているが、高い臨場感と手軽さの両立はまだ実現されていない。そこで、既存システムでは再生不可能な環境でも利用できる新しい立体音響システムを考案した。それは、一つ目のスピーカーから放出した強力な音波で二つ目のスピーカーから放出した音声信号を含む音波を反射させ、その反射音を聴くというシステムである(図1)。このシステムでは二つのスピーカーの放出角度を調節することで音の聞こえる方向を立体的に操作でき、システム自体が反射のための境界を作り出すため、物質的な壁が

ない環境でも反射波を利用できるという利点がある。

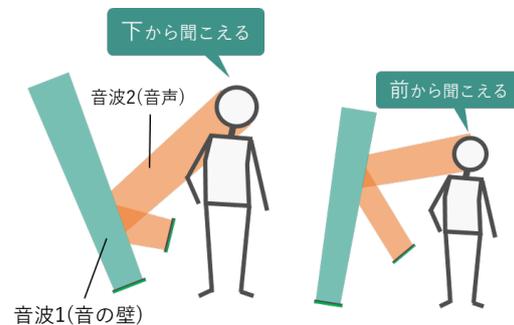


図1 考案した強力音場反射型システム

本研究で考案したシステムと既存システムの違いを簡単に示すために、目安となる分類表を作成した(図2)。分類表に記載したシステムの特徴を簡単に整理する。

① サラウンドシステム

【利点】ある程度広範囲に立体的な音声を送達できる。

【欠点】多数のスピーカーで視聴者を取り囲む必要がある。

② 壁面反射型スピーカー

【利点】単一のスピーカーで利用できる。

【欠点】反射に適した物質的な壁が必要。

③ トランスオーラル再生

【利点】二つのスピーカーで利用できる。

【欠点】視聴者の動きへの追従が必要。

④ バイノーラル再生

【利点】ヘッドホン(イヤホン)で使用するため、携帯利用できる。

【欠点】装置を直接着けるため、閉塞感と耳への負担が大きい。

⑤ 考案した強力音場反射型スピーカー

【利点】音声信号の反射に物理的な壁が不要。単一の装置で利用可能で耳を塞がない。

【欠点】強力な音場の安全性が不明。

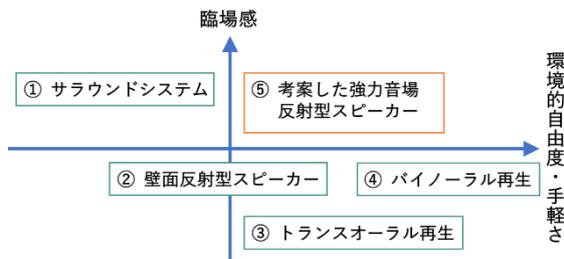


図2 考案したシステムと既存システムの分類目安

考案したシステムは強力な音波による別の音波の反射を前提としているが、非線形音響工学の分野においても、そのような事例について述べた文献は見つからない。そのため、本研究の仮説である、「強力な音場が空気中で媒質的な境界として振る舞うこと」が確認され、「音の壁」のように利用できれば、既存の音の反射システムを刷新し、利用環境を拡張できると考える。

本研究では、考案した強力音場反射型スピーカーの実現と、その基礎技術となる「強力な音場が空気中で媒質的な境界として振る舞うこと」の検証を目的とする。

3. 研究方法

3.1 理論的考察

強力な音場が媒質の境界のように振る舞うことを予想した理論的根拠を示す。一般的に音波の反射は媒質の境界面の固有音響インピーダンスの差異により起きる。例えば、空気を進行していた音波が水面に入射した際の反射がこれに相当する。その際の反射率 R は次の(式1)により与えられる。

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

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は音速と密度の積で与えられる定数で、音の伝播のしやすさを表す(式2)。

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

媒質*i*の音速: $c_i [m/s]$ 媒質*i*の密度: $\rho_i [kg/m^3]$

ここで、音波は疎密波であるため、密度が周期的に変化し(式3)、音波はその非線形性に起因して音圧が高いほど音速が速くなることが知られている(式4)。

$$\rho_i = \frac{P_i}{RT} \quad (3) \quad c_i = c_0 + \frac{P_i}{\rho_0 c_0} \quad (4)$$

媒質*i*の圧力: $P_i [Pa]$

音波*i*の音速: $c_i [m/s]$

媒質の気体定数: R

音波*i*の音圧: $p_i [Pa]$

媒質の熱力学温度: $T [K]$

媒質の静音時の音速: $c_0 [m/s]$

媒質の静音時の密度: $\rho_0 [kg/m^3]$

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、強力な音場内では音速と密度の積である固有音響インピーダンスが無視できないほど変化し、音場外の静かな空気に対する固有音響インピーダンスの差から媒質の境界のように振る舞うのではないかと予想した。

3. 2 実験的考察

強力な音場へ入射した音波が反射するとき、反射した量だけ透過波は減少していると考えられる。ここで反射波の直接的な測定を考えると、現段階では入射角に対して反射角がどのように決定されるか不明であり、反射波が到達する場所を予測してそこにマイクを設置することが難しい。それに対し、透過波は入射波の進行方向上にマイクを設置することで測定できると考え、反射波の直接的な測定よりも透過波の減少を測定する方が簡単であると判断し、今回の研究では透過波の振幅変化を調べた。

強力な音場を透過した別の音波が減少することを調べるため、本研究では、超音波振動子を用いて強力な超音波の音場を生成し、そこへ別の音波を入射させた。入射させた別の音波の透過波をマイクで受信し、透過波の振幅を測定した。その際、強力な音場と透過波は測定位置において重なってしまい、二つの音波の合成波が測定される。そこでオシロスコープの FFT 機能を利用し音波の振幅を分離させて計測するため、二つの音波の周波数を異なるものにした。

A) 予備的実験

強力な音場がそこへの入射波の透過を減少させると仮定したが、どの程度の強度を持つ音場が透過波の減少の確認に必要なか不明であるため、異なる強度の音場生成装置を 3 つ製作し必要な音場の強度の目安を調査した。

① 超音波振動子 1 個での音場形成実験

【方法】超音波振動子 1 個を用いて 40kHz の音波を放出し、そこへ 60kHz の音波を垂直に入射させ、マイクで透過波を受信する(図 3)。マイクで受信した電圧信号をデジタ



図 3 予備的実験①の実験装置

ルオシロスコープへ入力し、FFT 機能を用いて透過波(60kHz)の振幅を調べた。

【結果】音場(40kHz)の振幅が小さく静かな音場であるときに 60kHz の音波を入射した際と、音場(40kHz)の振幅を実験装置の限界まで大きくした際を比較しても、透過波の振幅を表すスペクトラムに変化は確認できなかった。

【考察】超音波振動子 1 個で形成した音場では、透過波の減少が確認できるほどの強度が得られていないと考えた。そこで、超音波振動子を 2 個用いて定在波を形成することでより強い音場を得る実験を行うことにした。

② 超音波振動子 2 個での音場形成実験

【方法】40kHz 振動子を向かい合わせに配置して定在波を作り、そこへ入射波(60kHz)を透過させた(図 4)。

【結果】予備的実験①と同様に透過波の変化は確認できなかった。

【考察】超音波振動子 2 個で形成した音場でも、透過波の減少が確認できるほどの強度が得られていないと考えた。そこで、超音波振動子を 10 個用いてより強い音場を得る実験を行うことにした。



図4 予備的実験②の実験装置

③ 超音波振動子 10 個での音場形成実験

【方法】超音波振動子 10 個を球状に並べることで中心に焦点を形成し、そこへ別の音波を入射させ、マイクで透過波の振幅を測定する。ここで、超音波振動子 10 個で形成する音場の振幅は透過波の振幅より非常に大きい。よって、マイクが受信する信号内において測定目的の透過波より強力な音場の方が大きく受信されてしまい、オシロスコープの特性上、透過波の正確な測定が妨げられてしまう。この問題を回避するため、入射波を 2.3kHz の可聴音にし、可聴音のみに感度が高い可聴音用マイクで透過波を測定することで、マイクにおいて 40kHz の音場の受信を低減させて透過波を正確に測定することにした(図 5)。

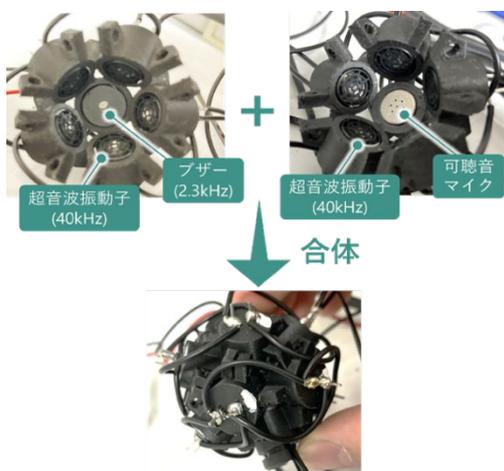


図5 予備的実験③の実験装置

【結果】入射波を 2.3kHz の可聴音にし、可聴音用マイクで透過波を測定することで、マイクでの音場(40kHz)の受信を低減して透過波を測定することに成功した。しかし、超音波振動子 10 個で形成した音場を透過したことによる透過波の振幅変化は確認できなかった。

【考察】超音波振動子 10 個で形成した音場でも、透過波の減少が確認できるほどの強度が得られていないと考えた。そこで、本実験では超音波振動子を 104 個用いてより強い音場を得る実験を行うことにした。

B) 予備的実験をふまえた本実験

超音波振動子 104 個を球状に配置することで中心に強力な焦点(40kHz)を形成し、そこへプザー(中心周波数 2.3kHz)で別の音波を入射させ、マイクで透過波の振幅を測定した(図 6)。

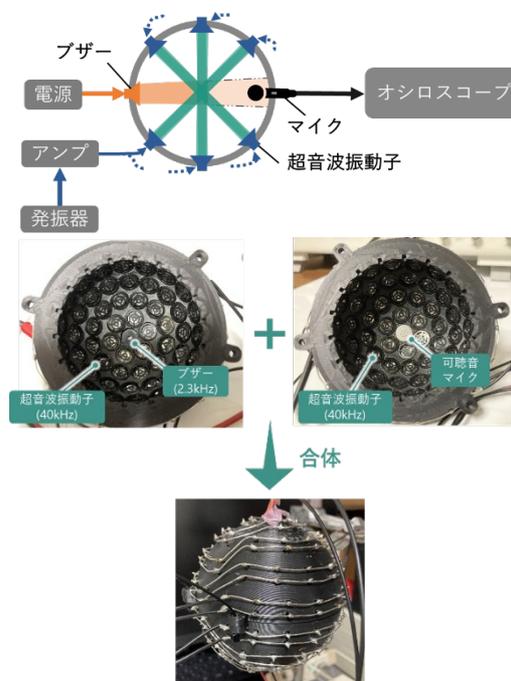


図6 自作した実験装置の写真と構成図

4. 実験結果

音場(40kHz)の振幅を最小にしたときの透過波のスペクトラムを図 7 に、音場(40kHz)の振幅を装置の限界まで大きくしたときのスペクトラムを図 8 に示す。2.3kHz のスペクトラムはブザーからの入射波の基音であり、4.5kHz のスペクトラムはその 2 倍音であると考えられる。図 7 と図 8 のスペクトラムを比較すると、音場(40kHz)の振幅が大きいときに透過波の振幅が減少していることがわかる。スペクトラムが示す電圧から透過率を計算したところ、2.3kHz の透過率が 98%、4.5kHz の透過率が 87%であった。

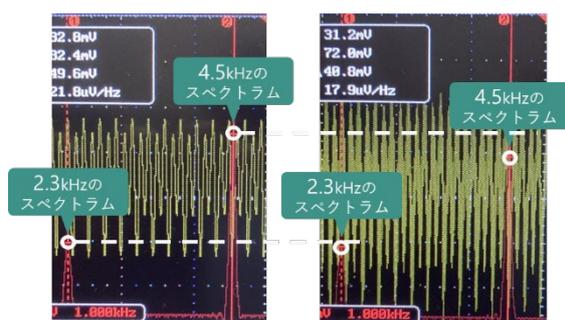


図 7 音場の振幅が最小 図 8 音場の振幅が最大

5. 考察と今後の展望

①結果の信憑性

デジタルオシロスコープ(TEXIO DCS-1054B)を用いてマイクからの信号を解析し、FFT 機能で透過波のスペクトラムを表示した。使用したオシロスコープの周波数帯域は DC~50MHz であり、実験で測定した周波数ピークの中で一番高い周波数は 40kHz なので、周波数帯域には十分余裕がある。また、オシロスコープの有効電圧範囲内に波形を収めて実験を行ったため、オーバードライブによる影響はないと考える。

②結果の解釈

強力な音場へ垂直に入射した音波の透過波が減少した結果から、強力な音場が媒質の境界的な作用を及ぼしている可能性が考えられる。ここで、強力な音場を境界に反射が起きたため透過波が減少した可能性と、強力な音場を境界に屈折が起きたためマイクの受信位置への透過量が減少した可能性が考えられる。

また、2.3kHz と 4.5kHz で透過率が異なった結果から、二つの周波数成分が異なる経路から音場を通過してマイクで受信されたため音場による影響が異なっていた可能性や、入射波の周波数や振幅によって反射率が変化する可能性が考えられる。

③結果の意義と展望

今回の結果から、音場が媒質的な境界として振る舞うことを確認するためには、超音波振動子 104 個で形成する程度の強い音場が必要であることが分かった。今回の結果は強力な音場がそこへの入射波を反射させる可能性を示しているので、今後は反射波を直接測定する実験を行いたい。また、強力な音場からマイクへの影響を減らすために、今後の実験ではロックインアンプ等を使用して透過波を正確に抽出する工夫を施そうと考えている。

また、今回の報告では音場の音圧が最小のときと最大の時の 2 パターンしか検証していないので、その間の音圧ではどのように透過率や反射率が変化しているのか調べたい。

6. 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。この場を借りて深く御礼申し上げます。

7. 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] 中川清隆@立正大学地球環境科学部環境システム学科.密度の計算.

http://www.es.ris.ac.jp/~nakagawa/met_cal/dens.html

[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>