

# パラメトリックスピーカを用いた局所的可聴領域形成における領域制御の検討

Study of control with audible spot using parametric speakers

袴田拓実<sup>\*1</sup>, 渡邊圭祐<sup>\*1</sup>, 干場功太郎<sup>\*1</sup>, 土屋健伸<sup>\*1</sup>, 遠藤信行<sup>\*1</sup>

Takumi HAKAMATA<sup>\*1</sup>, Keisuke WATANABE<sup>\*1</sup>, Kotaro HOSHIBA<sup>\*1</sup>

Takenobu TSUCHIYA<sup>\*1</sup>, Nobuyuki ENDOH<sup>\*1</sup>

神奈川大学<sup>\*1</sup>

Kanagawa University<sup>\*1</sup>

{r201870089qz, r201503845cn}@jindai.jp, {hoshiba, kenshin, endoh}@kanagawa-u.ac.jp

## Abstract

われわれは、特定領域にのみ音を再生させることを目的に、パラメトリックスピーカを用いた局所的可聴領域形成についての研究を行っている。これまで、2つのパラメトリックスピーカのみを用いて局所的可聴領域を形成する手法を提案してきた。しかし、スピーカの周波数特性を考慮していなかったため、可聴信号の周波数を変化させた際に、可聴領域の面積が安定しないという問題点があった。この問題点を解決するため、本稿ではスピーカの周波数特性を考慮し、スピーカからの出力を制御することで可聴領域の面積の一定化を図った。評価実験の結果、安定した可聴領域を形成することができ、出力の制御による可聴領域の制御の有効性が確認できた。

## 1 はじめに

### 1.1 背景

超音波の指向性を用いて、特定方向にのみ超音波を伝搬させるパラメトリックスピーカという音響デバイスがある [1]。また、空気非線形性を利用したパラメトリックスピーカでは、指向性の鋭さ故にビーム状に可聴音を形成することができ、直線状に音を届けることが可能である。その特徴から、博物館などの音声案内で使用されている。しかし、放射される音の直進性の影響で、壁や天井などによる反射の影響が大きくなるため、特定の位置にのみ音を届けることは困難である [2]。そこで、局所的な可聴領域を形成する手法が検討されている。

### 1.2 関連研究

楠らは、5 m 四方の空間を囲うように 128 個からなるスピーカアレイを設置し、局所的な可聴領域を再現している [3]。可聴領域の音圧レベル向上のため、松井らは、6

つのパラメトリックスピーカを異なる角度から照射し、局所的可聴領域を形成する手法を提案している [4]。また小辺らは、パラボラ型リフレクタを組み合わせた手法を提案し、音圧の向上を図っている [5]。しかしこれらの手法は、実用化するには設置が困難という問題点があった。

### 1.3 先行研究

そこでわれわれは、2つのパラメトリックスピーカのみを用いて局所的可聴領域を形成する手法について検討を行ってきた [6]。本手法は、後述する2種類の超音波信号を別々のパラメトリックスピーカから照射し、その交差点において、復調された可聴信号が再生されるという原理である。しかし、スピーカの周波数特性を考慮していなかったため、可聴信号の周波数を変化させた際に、可聴領域の面積が安定しないという問題点があった。Fig. 1 に可聴信号の周波数に対する可聴領域の面積の変化を示す。このように、可聴信号の周波数を大きくした場合、可聴領域の面積が減少する様子が確認できる。この要因としては、可聴信号の周波数を変化させる場合、各スピーカから照射する信号の周波数を変化させるが、スピーカの周波数特性により放射音圧に差が出たためと考えられる。安定した可聴領域を形成するためには、各スピーカの周波数特性を考慮した出力信号の制御が必要である。

### 1.4 目的

前節で述べた問題点を解決するため、本稿では各スピーカの周波数特性を考慮し、可聴領域の面積の一定化を図った。はじめに、各スピーカの周波数特性を計測する。その結果を用い、放射される超音波信号の振幅を調整し、周波数を変化させた場合でも可聴領域の面積が一定となるよう制御を行う。実際の環境で評価実験を行い、その有効性を確認する。

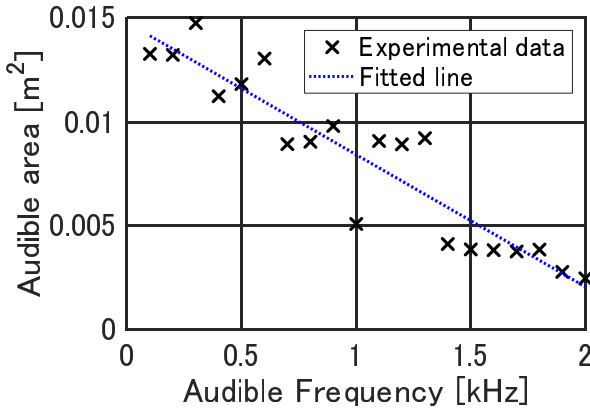


Fig. 1: 可聴信号の周波数に対する可聴領域の面積変化.

## 2 2つのパラメトリックスピーカを用いた局所的可聴領域形成手法

本研究では、二つのパラメトリックスピーカから超音波を照射し、その交差点でそれらを復調させ可聴領域を形成する手法 [4] を用いている。以下にその手法について述べる。一方のスピーカから照射するキャリア波  $v_c(t)$ 、再生させる可聴信号  $v_s(t)$  を以下のように定義する。

$$v_c(t) = A_c \sin 2\pi f_c t \quad (1)$$

$$v_s(t) = A_s \sin 2\pi f_s t \quad (2)$$

$t$  は時刻、 $A_c$ 、 $A_s$  はそれぞれキャリア波と可聴信号の振幅、 $f_c$ 、 $f_s$  はそれぞれキャリア波と可聴信号の周波数である。Eq. 1, 2 から、DSB (Double Side Band) 変調方式 [7] を用いた場合の変調波は次式の様に表すことができる。

$$v_{dsb}(t) = A_c \sin 2\pi f_c t + \frac{A_s}{2} \sin 2\pi(f_c + f_s)t + \frac{A_s}{2} \sin 2\pi(f_c - f_s)t \quad (3)$$

第一項はキャリア波であり、第二項は上側側帯 (Upper Side Band: USB) 波、第三項は下側側帯 (Lower Side Band: LSB) 波である。この第一項と第二項および第三項の差音として可聴信号が復調される。2つのパラメトリックスピーカを用いる場合、一方のスピーカからキャリア波である第一項を、もう一方のスピーカからは側帯波として第二項、第三項を照射することとなる。このDSB変調方式は、キャリア波と両側波帯との差音を利用する方式であり、両側波帯を利用するため再生音圧レベルが大きい、高調波歪の発生が原因で音質が悪化してしまう問題点がある [2]。そこで、高調波歪を低減する手法としてSSB (Single Side Band) 変調方式が提案されている [8]。SSB変調方式を用いた場合の変調波  $v_{ssb}(t)$  は次式の様に表すことができる。

$$v_{ssb}(t) = A_c \sin 2\pi f_c t + \frac{A_s}{2} \sin 2\pi(f_c - f_s)t \quad (4)$$

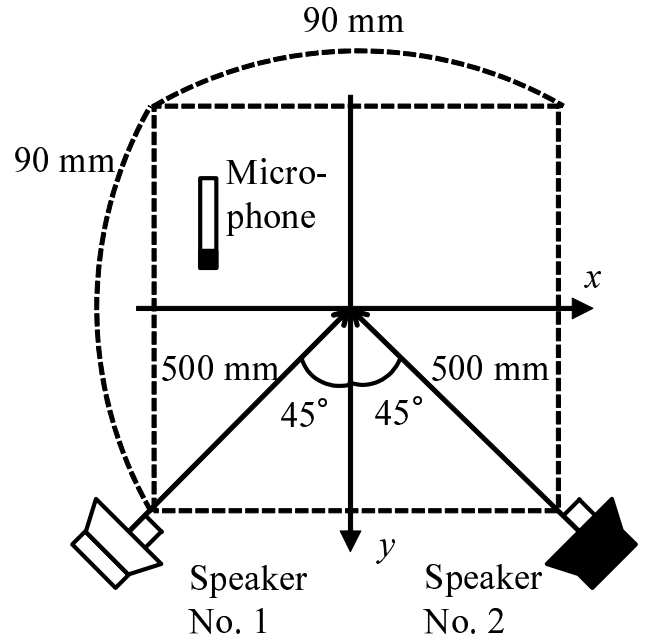


Fig. 2: 実験状況.

Eq. 4 は、Eq. 3 から USB 波を除去したものであり、キャリア波と LSB 波の差音が可聴信号として復調される。SSB変換方式では、キャリア波と単側波帯との差音を利用するため、再生音圧レベルがDSB変調方式と比較して小さいという欠点があるが、高調波歪を抑制できるという利点がある。以上の理由から、本研究ではSSB変換方式に基づく可聴領域形成を行っている。

先行研究では、1.3節で述べたように、スピーカの周波数特性を考慮した  $A_c$  および  $A_s$  の制御を行っていなかった。そこで本稿では、周波数特性を考慮して  $A_c$  および  $A_s$  を適切に設定し、放射されるキャリア波および側帯波の振幅を制御することで、可聴領域の面積を一定化した。

## 3 評価実験

### 3.1 実験方法

前章の手法を用い、実際に評価実験を行った。実験状況を Fig. 2 に示す。スピーカ No. 1 および No. 2 を Fig. 2 のように設置する。それぞれから放射される超音波の放射方向の交点を原点とし、 $x = -45 \sim 45$  mm、 $y = -45 \sim 45$  mm の範囲で各点での信号をマイクロホンにて取得し、可聴信号成分の音圧分布を測定した。

本実験で使用する各スピーカの周波数 - アドミタンス特性は Fig. 3 のようになっている。Fig. 3 から、各スピーカの共振周波数が約 40 kHz であることがわかる。そこで、キャリア波の周波数  $f_c$  を 40 kHz としてスピーカ No. 1 から、側帯波の周波数  $f_c - f_s$  を 39, 38 kHz としてスピーカ No. 2 から照射することで、 $f_s = 1, 2$  kHz の可聴信号を再生させる。実際に各スピーカの周波数 - 音圧特性を

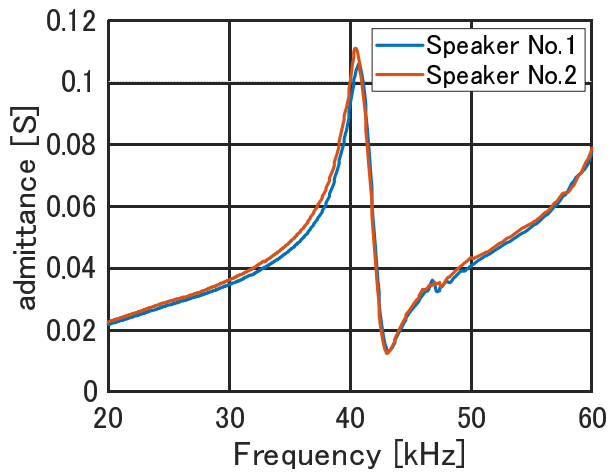


Fig. 3: スピーカの周波数 - アドミタンス特性.

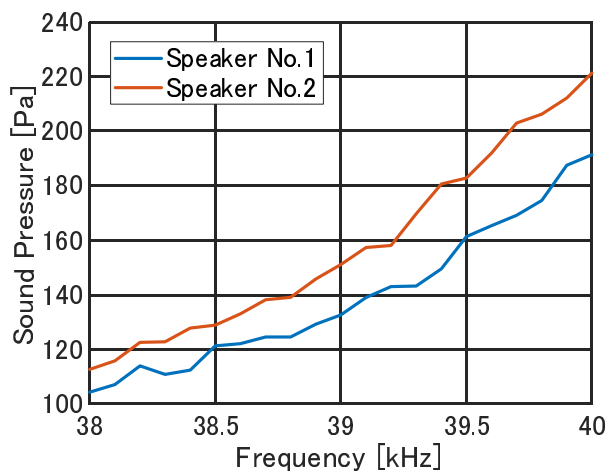


Fig. 4: スピーカの周波数 - 音圧特性.

測定した結果が Fig. 4 である．周波数およびスピーカの  
違いにより，音圧の差が生じていることがわかる．また，  
各スピーカの放射音圧分布を測定した結果を Fig. 5 に示  
す．(a) はスピーカ No. 1 から 40 kHz の信号を，(b) はス  
ピーカ No. 2 から 39 kHz の信号を，(c) はスピーカ No. 2  
から 38 kHz の信号を送波した際の結果である．スピーカ  
の位置は  $x' = 0$  mm,  $y' = 0$  mm の地点であり，カラー  
マップにて各地点の SPL (Sound Pressure Level) を表し  
ている．全体的な振幅が Fig. 4 に従って変化しているこ  
とがわかる．また，振幅は変化するが，ビームの形状は大  
きく変化しないことがわかる．よって，各スピーカから照  
射する信号の振幅のみを制御することで，可聴領域の面積  
を一定化することができると考えられる．そこで，Fig. 4  
の結果を用い，Eq. 2 における  $A_s$  が一定となるよう，各  
スピーカへの印加電圧を制御し，可聴領域の面積を一定  
化を図る．

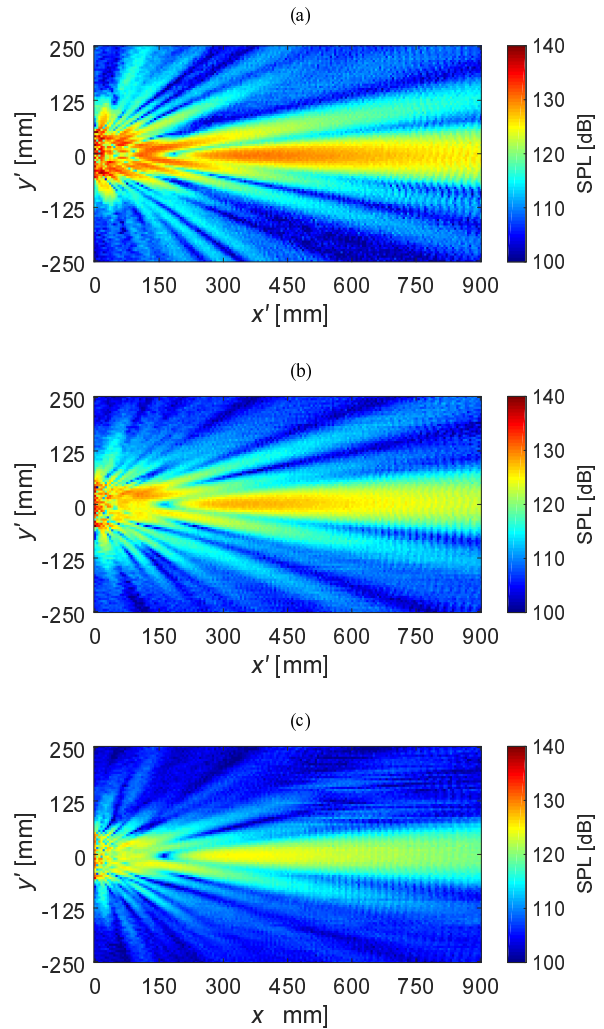


Fig. 5: スピーカの放射音圧分布．(a) 40 kHz 送波時 (ス  
ピーカ No. 1)，(b) 39 kHz 送波時 (スピーカ No. 2)，(c)  
38 kHz 送波時 (スピーカ No. 2)．

### 3.2 測定結果

交差領域における音圧分布を測定した結果について述べ  
る．測定結果を Fig. 6 に示す．(a) が  $f_s = 1$  kHz の結果，  
(b) が  $f_s = 2$  kHz の結果である．Fig. 2 に示す座標系に  
従ってプロットされており，カラーマップで各地点の SPL  
を表している．これらの結果から，SPL60 dB 以上の領域  
がほぼ同程度の大きさで局所的に形成できていることが  
わかる．また，交差領域の対角方向にも音圧の高い領域  
が現れていることがわかる．これは，Fig. 5 の結果か  
ら，スピーカ No. 1 のメインローブとスピーカ No. 2 の  
サイドローブ，スピーカ No. 1 のサイドローブとスピー  
カ No. 2 のメインローブにより形成された可聴領域だと  
考えられる．

### 3.3 考察

定量的な評価のために，可聴領域の面積を算出し，比較  
を行った．可聴領域は，SPL が 60 dB 以上の領域と定義し

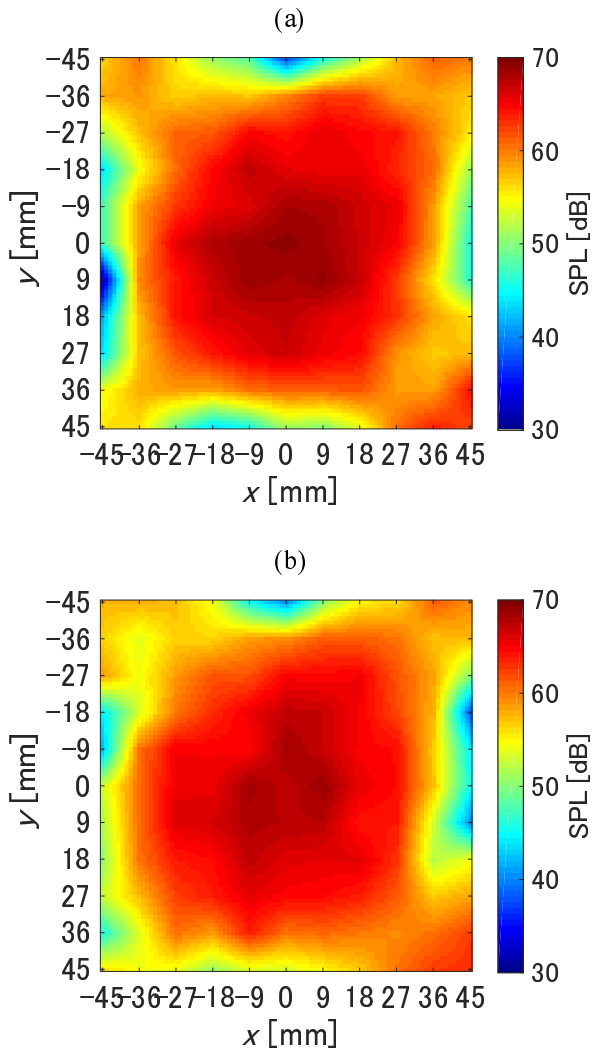


Fig. 6: 可聴領域形成結果. (a)  $f_s = 1$  kHz, (b)  $f_s = 2$  kHz.

Table 1: 可聴領域の面積変化.

$f_s$ [kHz]	面積 [m <sup>2</sup> ]
1	0.0045
2	0.0046

た. 面積の算出結果を Table 1 に示す. 結果から,  $f_s$  を変化させた場合でも面積変化はほぼなく, 安定した可聴領域を形成できていることがわかる. また, この面積は直径約 70 mm 程度の円だと近似することができ, 人の各耳を別々に狙って局所的ステレオ空間を形成することも可能である. 以上の結果から, 振幅制御の有効性が確認でき, 可聴領域の制御が可能であることがわかった. 本実験では振幅制御を手動で行っていたが, 今後は制御の自動化について検討を行っていく. また, 本稿の結果から, より広範囲の可聴領域の制御が可能であると考えられるため, そちらについても検討を行っていく予定である.

## 4 おわりに

本稿では, 二つのパラメトリックスピーカを用いた局所的可聴領域の形成における, 各スピーカの周波数特性を考慮した出力の制御を行うことによる, 可聴領域の面積の一定化について検討を行った. 評価実験の結果, 可聴周波数を変化させた場合でも可聴領域の面積変化はほぼなく, 局所的な可聴領域の制御が可能であることが確認できた. 今後は, 制御の自動化およびより広範囲での制御の検討を行っていく予定である.

## 参考文献

- [1] 鎌倉友男, 米山正秀, 池谷和夫, “パラメトリックスピーカ実用化への検討”, 日本音響学会誌, Vol. 41, No. 6, pp. 378-385, 1985.
- [2] 西浦敬信, “高臨場音場再現: パラメトリックスピーカを用いた最新の研究動向”, 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ, Vol. 10, No. 1, pp. 57-64, 2016.
- [3] 楠房子, 佐藤一郎, 溝口博, 稲垣成哲, “サウンドスポット: 博物館の展示支援向け局所音声再生システム”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J91-D, No. 2, pp. 229-237, 2008.
- [4] 松井唯, 生藤大典, 中山雅人, 西浦敬信, “キャリア波と側帯波の分離放射によるオーディオスポット形成”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J97-A, No. 4, pp. 304-312, 2014.
- [5] 小辺亮介, 松井唯, 生藤大典, 中山雅人, 西浦敬信, “キャリア波と側帯波の分離放射におけるパラボラ反射型オーディオスポット形成による音圧改善”, 第 27 回回路とシステムワークショップ, pp. 357-362, 2014.
- [6] 袴田拓実, 干場功太郎, 土屋健伸, 遠藤信行, “パラメトリックスピーカを用いた局所的可聴領域形成の検討”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, p. 17, 2018.
- [7] 愛甲英寿, 野村建太, 青木健一, 鎌倉友男, 酒井新一, 吉田俊治, “パラメトリックスピーカ駆動用デジタル変調器の検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 107, No. 20, pp. 29-34, 2007.
- [8] 酒井新一, 鎌倉友男, 野村英之, 吉田俊治, “パラメトリックスピーカ用ダイナミック SSB 変調器”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J91-A, No. 12, pp. 1166-1173, 2008.