

パラメトリックスピーカを用いたオーディオスポット形成における広帯域信号の安定化の検討

Study of stabilization of wide-band signal in forming audible spot with parametric speakers

袴田拓実^{1*} 干場功太郎¹ 土屋健伸¹ 遠藤信行¹

Takumi Hakamata¹ Kotaro Hoshiba¹ Takenobu Tsuchiya¹ Nobuyuki Endoh¹

¹ 神奈川大学

¹ Kanagawa University

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、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形成について研究を行っている。これまで、再生する可聴音の周波数が変化した際、可聴領域の面積も変化してしまうという問題点を解決するため、可聴領域を安定化させるための音圧制御手法を提案してきた。しかし、単一の周波数のみを可聴音として再生させた場合のみの評価しか行っていなかった。本稿では、提案手法の有効性について、より複雑な条件での評価を行った。2つの周波数成分が含まれる可聴音を再生する場合、提案手法により音圧は安定化されたが、側帯波に含まれる二成分間の差音がエイリアスとして発生することがわかった。また、広帯域の周波数成分が含まれる可聴音を再生した場合、本実験状況では側帯波の周波数帯域の狭かったため提案手法の有効性を確認することができなかった。以上の結果から、提案手法が有効な条件と解決すべき課題が明らかになった。

1 はじめに

1.1 背景

超音波の指向性を用いて、超音波を特定方向に伝搬させることができ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]。パラメトリックスピーカは、高い指向性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。しかし、指向性が鋭いため、床や壁、天井などからの反射の影響が大きく、非対称者にまで音が聞こえてしまう。そこで、音を対象者にのみ届けることができるような局所的な可聴領域を形成する技術が求められている。

1.2 関連研究

以下に可聴領域形成に関するいくつかの研究を紹介する。深澤らは、5m 四方の空間を 128 個からなるスピーカアレイで囲うように設置し、可聴領域を形成するためのシステムを構築している [2]。その大きなシステムでは、5m 四方の空間内に 4 つの可聴領域を形成した。また松井らは、二つのスピーカから、振幅変調した

変調信号を送信することで可聴領域を形成した [3]。しかし、これらの手法では、スピーカの周波数特性を考慮しておらず、再生する可聴音の周波数が変化した際、可聴領域の面積も変化してしまうという問題点があった [4]。

1.3 先行研究

そこでわれわれは、安定した可聴領域の形成を目的に、パラメトリックスピーカの周波数特性を考慮した音圧制御手法を提案した [5]。提案手法では、スピーカから照射する音の音圧を周波数毎で同レベルとなるよう制御することで、スピーカの周波数特性に影響されない、安定した可聴領域形成を実現する。評価実験の結果、可聴音の周波数が変化した場合でも一定の面積を保つことができた。しかし、可聴音が単一の周波数のみの場合でしか検討していなかった。

1.4 目的

そこで本稿では、可聴音が単一周波数でない場合の可聴領域形成における提案手法の有用性について評価を行う。可聴音として、スパイク状の複数の周波数成

*連絡先：神奈川大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻
〒 221-8686 神奈川県横浜市神奈川区六角橋 3-27-1
E-mail: r201870089qz@jindai.jp

分が含まれる信号，そして広帯域の周波数成分を持つ信号の二通りの信号を可聴領域にて再生する．音圧制御の有無による比較を行うことで，提案手法の有効性を確認する．

2 手法

2.1 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形成手法

本研究では，二つのパラメトリックスピーカを用いて局所的可聴領域を形成する．Fig. 1に可聴領域形成の概略図を示す．両スピーカから変調信号を送信し，それらの交差領域にてのみ信号が復調され可聴領域を形成する．

以下に変調手法について紹介する．片方のスピーカから送信するキャリア波 $v_c(t)$ ，可聴信号 $v_s(t)$ を以下の様に定義する．

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

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

A_c ， A_s は，キャリア波と再生される可聴信号の振幅を表しており， f_c ， f_s は，キャリア波と可聴信号の周波数， t は時間を表している．振幅変調の一種であるDSB (Double Side Band) 変調方式 [6] 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，第二項は上側側帯波，第三項は下側側帯波である．第一項と第二項，第一項と第三項の差音として可聴音が復調される．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ため，再生音圧レベルが大きいという利点があるが，高調波歪の発生が原因で音質が劣化してしまう問題点がある．そこで，高調波歪を低減する方法として，SSB (Single Side Band) 変調方式 [7] が用いられる．SSB変調波は次式の様に表される．

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

第一項はキャリア波，第二項は側帯波を表しており，これらの差音として可聴音が復調される．また，SSB変調波はDSB変調波と比べ，可聴信号の振幅が半分になるが，高調波歪が抑制される利点がある．本研究では，変調の簡潔さからSSB変調方式を用いている．キャリア波と側帯波を二つのパラメトリックスピーカから別々に送信することで，送信された二信号の交差領域でのみ可聴領域を形成する．

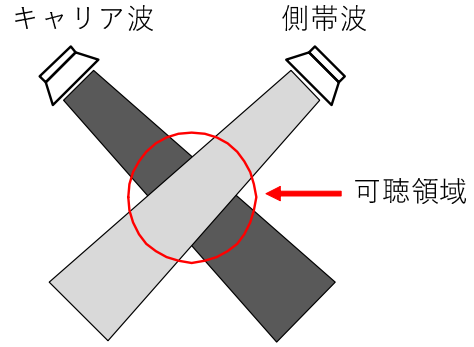


Fig. 1: 2つのパラメトリックスピーカを用いた可聴領域形成の概略図．

2.2 音圧制御手法

スピーカの周波数特性により，可聴信号の周波数 f_s が変化すると，側帯波の振幅 $A_s/2$ が変化する．そのため，可聴領域が変化してしまい，安定した可聴領域を形成することが困難である．そこで，キャリア波の振幅 A_c と側帯波の振幅 $A_s/2$ を，全ての周波数で等しくなるように制御する．送波系統が増幅器とパラメトリックスピーカから構成されていると仮定する．送波系統への入力電圧を V_{in} ，周波数を $f_b = f_c - f_s$ とすると，送波系統の入出力特性は以下のように表すことができる．

$$A_s/2 = \alpha\beta V_{in}(af_b + b) \quad (5)$$

ここで， α は増幅器の増幅率， β はスピーカの電圧から音圧への変換係数， a ， b は定数である．出力音圧は， V_{in} に対して線形であり， $V_{in} = 0$ の場合， $Y = 0$ が成り立つため， V_{in} に対しては定数項のない一次関数であるとみなせる．また， f_b に関しては，大きく周波数が変化しないという仮定のもと，定数項がある一次関数で表している．このように，送波系統の入出力特性は，二変数一次関数で近似することができる．Eq. 5を V_{in} に対して解くと以下ようになる．

$$V_{in} = \frac{A_s}{2\alpha\beta(af_b + b)} \quad (6)$$

A_s に A_c を代入することで，周波数毎で所望の出力音圧を得るための V_{in} を求めることができる．これにより，キャリア波と側帯波の振幅が全ての f_s で同じレベルにすることができ，安定した可聴領域を形成することが可能になる．

3 評価実験

3.1 測定方法

提案手法の有効性を確認するため，可聴領域を形成し評価を行った．実験状況図を Fig. 2 に示す．先行研

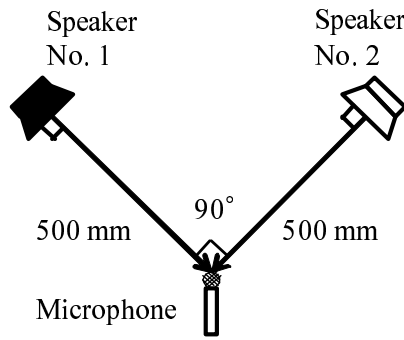


Fig. 2: 実験状況.

究にて、可聴領域の面積変化と、領域の中心音圧に相関性があることがわかっている [5]. そこで、本実験では、領域の中心音圧のみを計測する. スピーカ No. 1 とスピーカ No. 2 を、音軸が垂直に交わるよう、500mm の距離に設置した. また、マイクロホンをそれぞれのスピーカの音軸の交点に設置し、信号を取得した. スピーカ No. 1 からキャリア波を、スピーカ No. 2 から側帯波をそれぞれ送波し、可聴領域を形成する. 再生する可聴音として、二通りの実験を行った. はじめに、2つの周波数成分が含まれる可聴音を再生した (Exp1). キャリア波として $f_c = 40$ kHz の信号、側帯波として f_{b-1} , f_{b-2} の 2つの周波数成分を含む信号を用いた. f_{b-1} は 39 kHz とし、 f_{b-2} は 38~38.8 kHz の間で変化させた. つまり、 f_s として 1 kHz と 1.2~2 kHz の 2つの周波数成分が含まれる可聴音が再生される. 続いて、広帯域の周波数成分が含まれる可聴音を再生した (Exp2). 前実験同様、キャリア波として $f_c = 40$ kHz の信号、側帯波として 39~39.15 kHz の帯域の周波数を持つ信号を用いた. これらの二通りの実験を行い、音圧制御を導入し、その効果を評価する. Fig. 3 に側帯波を送波するスピーカ No. 2 の入出力特性の実測値を示す. 横軸が周波数、縦軸が入力電圧であり、カラーマップにて出力音圧を表している. こちらのデータを用い、Eq. 5 で示した近似式を求めると以下ようになる.

$$A_s/2 = V_{in}(1.02f_b - 36.81) \quad (7)$$

近似式から求めた近似値を Fig. 4 に示す. このように、二変数近似により入出力特性が精度良く近似できていることがわかる. 得られた近似式を用いて制御を行う.

3.2 測定結果

はじめに Exp1 の測定結果を示す. $f_c = 40$ kHz, $f_{b-1} = 39$ kHz, $f_{b-2} = 38.2$ kHz の場合の受信信号の周波数スペクトルを Fig. 5 に示す. つまり、この場合

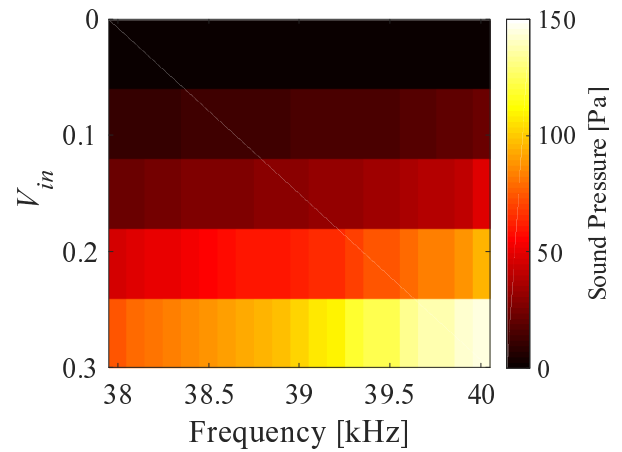


Fig. 3: スピーカ No. 2 の入出力特性の実測値.

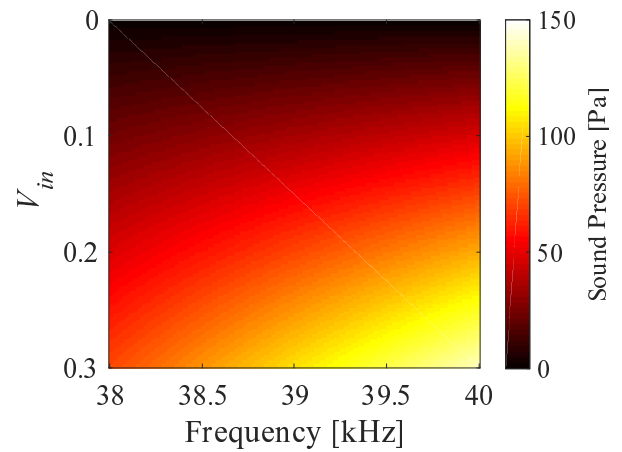


Fig. 4: スピーカ No. 2 の入出力特性の近似値.

1, 1.8 kHz の成分を持つ可聴音が再生される. (a) にキャリア波と側帯波の周波数成分, (b) に再生された可聴音の周波数成分を示す. また, (I) は音圧制御をしていない場合, (II) は音圧制御を導入した場合の結果である. 各周波数における音圧は SPL (Sound Pressure Level) で表している. キャリア波と側帯波の周波数成分を比較すると、音圧制御導入前はキャリア波に比べ側帯波の音圧が低い、音圧制御を導入すると側帯波の音圧はキャリア波と同等となっていることがわかる. 再生された可聴音の周波数成分を比較すると、音圧制御導入前は 1 kHz と 1.8 kHz における音圧の差が大きいが、音圧制御を導入するとその差が小さくなっている. しかし、0.8 kHz にも大きいピークを確認することができる. これは、 $f_{b-1} - f_{b-2}$ 間の差音がエイリアスとして再生されたものである. 同様に $f_c = 40$ kHz, $f_{b-1} = 39$ kHz, $f_{b-2} = 38$ kHz の場合の受信信号の周波数スペクトルを Fig. 6 に示す. Fig. 5 同様、キャリア波と側帯波の周波数成分では音圧制御の効果が確認

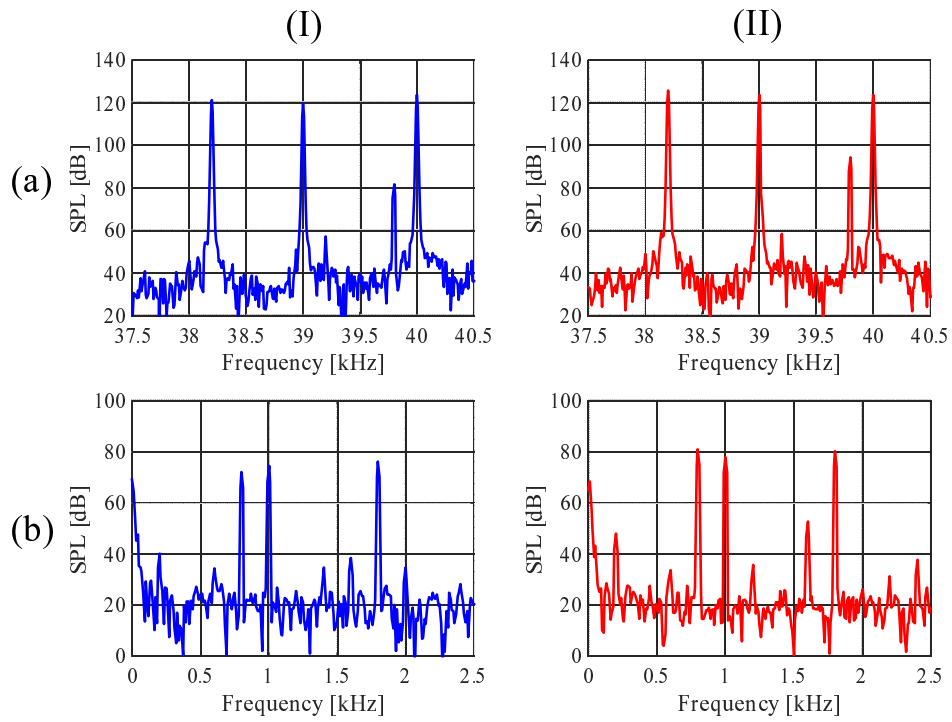


Fig. 5: Exp1: 受信信号の周波数スペクトル ($f_{b-2} = 38.2$ kHz). (a) キャリア波と側帯波の周波数成分, (b) 再生された可聴音の周波数成分. (I) 音圧制御なし, (II) 音圧制御あり.

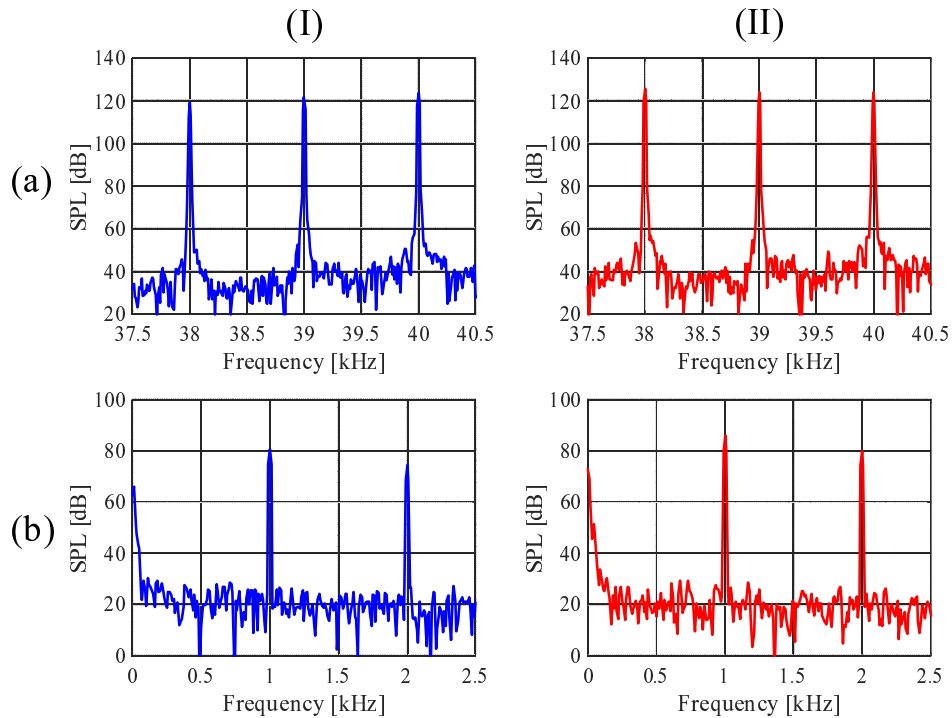


Fig. 6: Exp1: 受信信号の周波数スペクトル ($f_{b-2} = 38$ kHz). (a) キャリア波と側帯波の周波数成分, (b) 再生された可聴音の周波数成分. (I) 音圧制御なし, (II) 音圧制御あり.

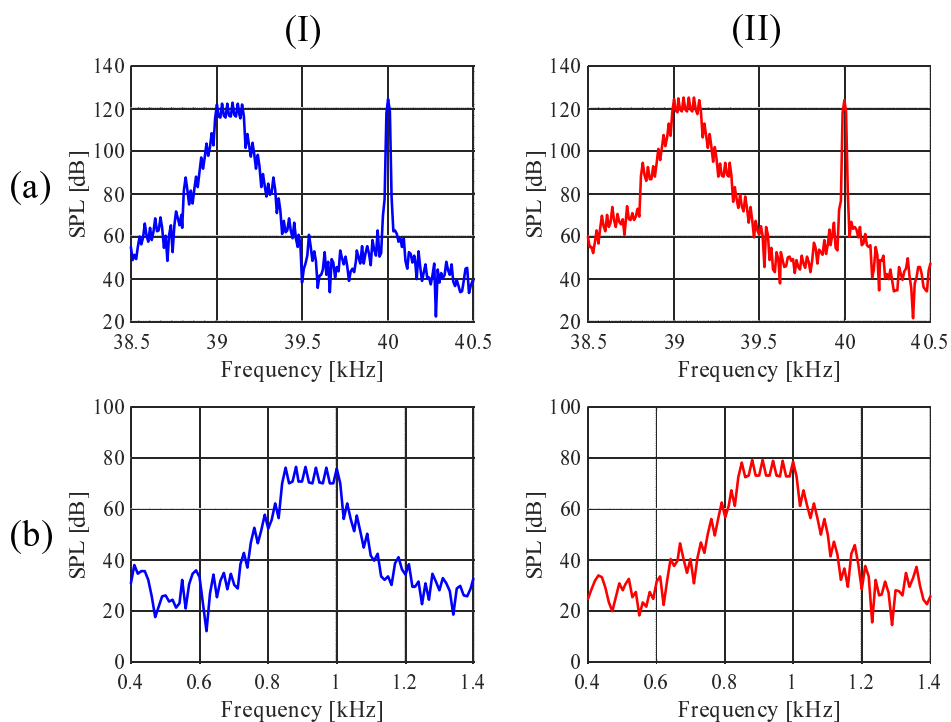


Fig. 7: Exp2: 受信信号の周波数スペクトル. (a) キャリア波と側帯波の周波数成分, (b) 再生された可聴音の周波数成分. (I) 音圧制御なし, (II) 音圧制御あり.

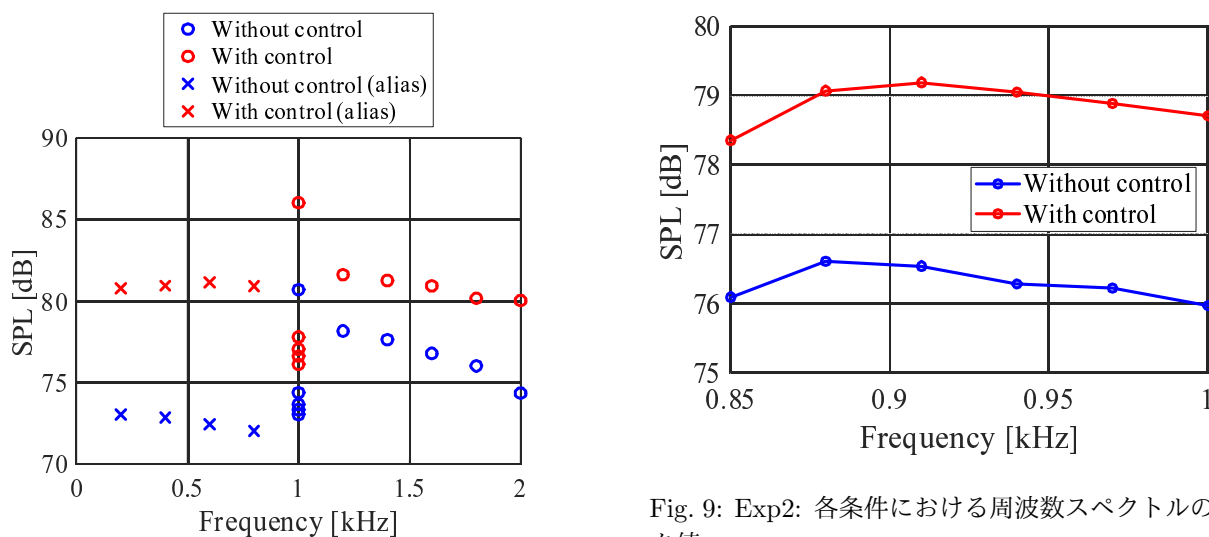


Fig. 8: Exp1: 各条件における周波数スペクトルのピーク値.

できるが、再生された可聴音の成分である 1, 2 kHz における音圧の差は音圧制御を導入しても大きな変化はない。これは、再生したい成分である $f_c - f_{b-1}$ 間の差音 (1 kHz) と、エイリアスである $f_{b-1} - f_{b-2}$ 間の差音

Fig. 9: Exp2: 各条件における周波数スペクトルのピーク値.

(1 kHz) が干渉してしまっている影響だと考えられる。このように、複数の周波数を再生させる場合、エイリアスが発生してしまうという問題点が明らかになった。

続いて、Exp2 の測定結果を Fig. 7 に示す。キャリア波と側帯波の周波数成分を比較すると、39~39.15 kHz にある側帯波成分が、音圧制御導入によりキャリア波

と同等の音圧となったことが確認できる。音圧制御導入前はキャリア波に比べ側帯波の音圧が低いですが、音圧制御を導入すると側帯波の音圧はキャリア波と同等となっていることがわかる。また、再生された可聴音の周波数成分を比較すると、安定化の効果は見られないが、音圧制御導入により可聴音の音圧が全体的に大きく出力されていることがわかる。

3.3 考察

Exp1にて得られた、各条件での受信信号の周波数スペクトルにおける0~2.5 kHzの範囲でのピーク値をプロットしたものをFig. 8に示す。再生させた可聴音の成分である1.2~2 kHzの音圧は、音圧制御をしない場合、周波数が上がるにつれて下がっていくが、音圧制御を導入するとその傾きが小さくなり、有効性が確認できる。しかし、前述したように、1.2~2 kHzの音圧と同程度のエイリアスが0.2~0.8 kHzに発生してしまっている。また、1 kHzの成分もエイリアスにより不安定になっていることがわかる。Exp2における同様の結果をFig. 9に示す。音圧制御導入により可聴音の音圧が全体的に大きく出力されているが、周波数変化による音圧変化の傾きは大きく変わっていない。これは、側帯波の周波数帯域が狭いため、音圧の変化も小さく、音圧制御の効果が表れにくいことが原因と考えられる。以上の結果から、提案手法の有効性と課題が明らかになった。

4 おわりに

本稿では、先行研究にて提案した、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形成における音圧制御手法について、より複雑な条件での評価を行った。2つの周波数成分が含まれる可聴音を再生する場合、提案手法により音圧は安定化されたが、側帯波に含まれる二成分間の差音がエイリアスとして発生することがわかった。また、広帯域の周波数成分が含まれる可聴音を再生した場合、本実験状況では側帯波の周波数帯域の狭かったため提案手法の有効性を確認することができなかった。以上から、提案手法の有用性と課題が明らかになった。今後は、エイリアスを低減させる手法についての検討と、より広帯域な可聴音を再生させた場合の評価を行っていく予定である。

参考文献

[1] T. Kamakura, M. Yoneyama, K. Ikegaya: Developments of Parametric Loudspeaker for Practical

Use, *Proceedings of 10th International Symposium on Nonlinear Acoustics*, pp. 147–150 (1984)

- [2] Y. Fukasawa, K. Shinagawa, K. Horio, K. Mituhashi, A. Deguchi, F. Kusunoki, S. Inagaki, H. Mizoguchi: Loudspeaker array system for exhibition support into museum Effectiveness verification of sound spot for science education, *Proceedings of IEEE International Conference on Systems*, pp. 1175–1180 (2008)
- [3] T. Matsui, D. Ikefuji, M. Nakayama, T. Nishiura: A design of audio spot based on separating emission of the carrier and sideband waves, *Proceedings of Meetings on Acoustics*, pp. 1–9 (2013)
- [4] 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)
- [5] T. Hakamata, H. Yamashita, K. Watanabe, K. Hoshiba, T. Tsuchiya, N. Endoh: Control of sound pressure in audible spot using parametric speakers, *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*, pp. 2690–2695 (2019)
- [6] Y. Wang, M. Chen, H. Li, Z. Zhou: Defining the Parameters of Truncated Square-rooting DSB for Parametric Loudspeaker, *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1689–1693 (2007)
- [7] M. Chen, X. Qin, L. Xu, Y. Du, L. Xu: The Distortion Analysis of the Single Side Band Method for Parametric Loudspeaker Based on Orthogonal Envelope Detection, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, pp. 1–5 (2008)