

携帯型超指向性 スピーカの試作

移動端末大の筐体に搭載する超指向性スピーカを試作し、その音響特性を測定した。秘話性を保った通話や、高いチャンネル分離度による高品質なステレオや3Dの音響サービス提供の可能性を示した。

なかしま ゆうすけ	よしむら たけし
中島 悠輔	吉村 健
なか のぶひこ	おおや ともゆき
仲 信彦	大矢 智之

1. まえがき

移動通信サービスの拡大と移動端末の高機能化に伴い、音声や音楽を聞いて楽しむサービスが普及してきている。これら音響コンテンツを、ディスプレイ上の文字や映像を見ながら、移動端末のスピーカを用いて聞くことも一般化してきた。このような移動通信環境で聞く場合の問題の1つに、再生音が周囲に拡散してしまうことがある。代わりにヘッドホンやイヤホンを利用することもできるが、それほど普及はしていないのが実情である。聞き方の手軽さはそのままに、目的とした場所だけに音を聞かせ、不要な場所には音を聞かせないように、スピーカから再生される音場^{*1}を制御する技術が研究されている[1]。このような技術の1つとして、超音波を利用してビーム状の音場を形成する超指向性^{*2}スピーカが提案されている[2]~[4]。

超指向性スピーカについては理論、実験の両面から長年研究されている。超指向性スピーカの音響特性の報告[5]や、歪みを少なくする変調方式の提案[6]、また、それに基づくデジタル変調器の試作の報告[7]がなされている。さらに、実用化の検討もされてきており[8]、発振器の電気音響変換効率^{*3}が向上したことで、近年商品化もされた[9]。しかし、これらはいずれも比較的大型のスピーカ[9]となっており、ユーザが超指向性スピーカを携帯することはこれまでほとんど検討されていなかった。しかしながら、超指向性スピーカは、波長の短い超音波を利用することで、比較的口径の小さいスピーカで高い指向性の音場を再生できる

*1 音場：本稿では、可聴な音波の存在する空間。

*2 指向性：電波・光波・音波などの強さが特定の方向に強い性質。音波の場合、通常、スピーカの振動面が大きいほど、あるいは周波数が高いほど、指向性が高い。

*3 電気音響変換効率：電気系の信号を音響系の信号に変換する効率。

点で、移動端末への搭載に適している。

本稿では、移動通信環境における超指向性スピーカの利用形態を検討し、その有用性について述べる。また、超指向性スピーカを移動端末大の筐体に搭載し、その音響特性について検証した結果および今後の課題について述べる。

2. 超指向性スピーカの仕組み

超指向性スピーカはパラメトリックスピーカとも呼ばれ、空気の非線形性^{*4}により生じる仮想的な音源（パラメトリックアレイ）と人間の聴覚特性を利用して、指向性の高い音場を形成するスピーカである。超指向性スピーカの原理を図1に示す。超指向性スピーカは、20kHz以上の高い周波数で人間が音として知覚できない超音波を搬送波とし、音声や音楽のオーディオ信号で振幅変調された変調波を、非線形性が生じる大きな振幅で空气中に放射する。変

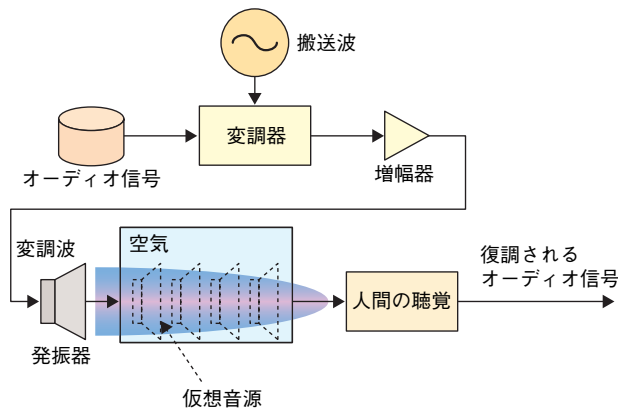


図1 超指向性スピーカの原理

調波が空气中を伝播する過程で空気の非線形性により2次歪み^{*5}を生じる。2次歪みが波長の短い変調波の音場に沿って生じ、仮想的な音源となって指向性の高い音場が形成できる。超音波帯域の音は人間の聴覚特性により聞き取ることができず、2次歪みの中に含まれる可聴帯域^{*6}のオーディオ信号のみが復調され聞き取ることができる。

3. 超指向性スピーカの移動通信環境での利用形態

現在、移動端末に搭載されているスピーカは口径が小さく、また空気を波長の長いオーディオ信号で直接振動させるため、図2(a)に示すように再生音の拡散性が高い。一方、図2(b)に示すように超指向性スピーカを移動端末に搭載すれば、ユーザのすぐ隣にいる人にも再生音が聞こえないようにすることができる。

また、移動端末においてステレオや3Dのオーディオ信号を複数のスピーカで再生するサービスが利用され始めている。しかし、前述のように再生音の拡散性が高いスピーカでは、図3(a)に示すように、片方のスピーカから指向していない方の耳に音波が混入するクロストークが発生するため、再生音場の制御が難しく最適な受聴位置も限られてしまう。これに対し、複数の超指向性スピーカで指向性の高い音場を両耳にそれぞれ形成することで、図3(b)に示すようにクロストークを低減でき、ステレオや3Dの複数チャンネルのオーディオ信号の再生も高精度に実現できるようになると考えられる。また、ビーム上の音場を再生できるため、最適な受聴位置も前後に広く確保できる。

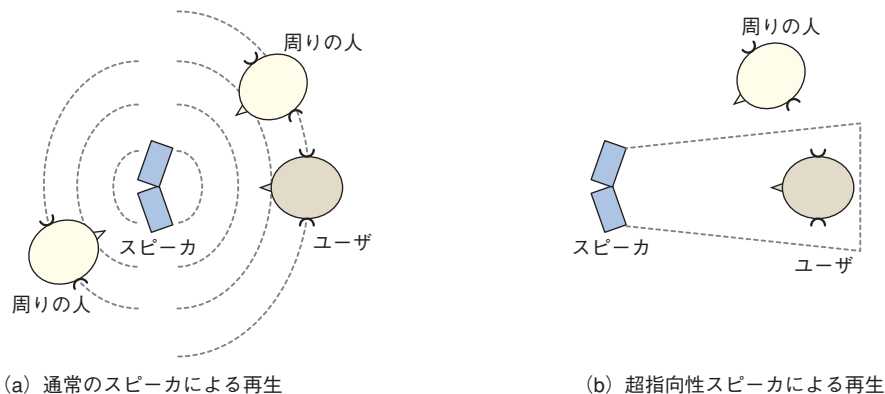


図2 移動端末搭載のスピーカからの音響再生

*4 非線形性：本稿では、入力信号の周波数以外の周波数の信号が出力される性質。例えば、スピーカに1kHzの正弦波を入力した場合、入力信号の2倍や3倍の周波数の信号が出力される性質。

*5 2次歪み：出力信号のうち、入力信号の2倍の周波数成分。例えば、スピーカに1kHzの正弦波を入力した場合、出力信号の中で2kHzの成分。

*6 可聴帯域：正常な聴覚を持つ人間が聞き取ることができる音の周波数の範囲。通常、20Hz～20kHz。

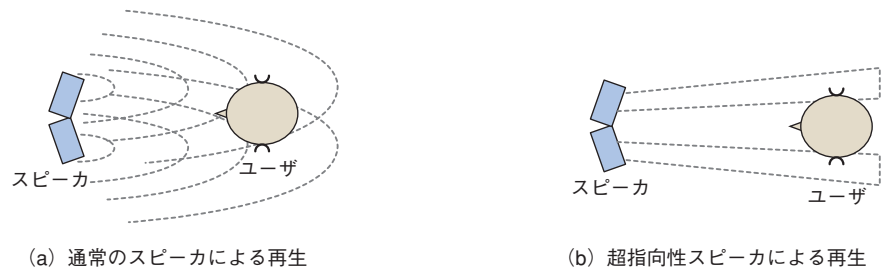


図3 移動端末搭載のスピーカ2チャンネルから左右各耳への音響再生

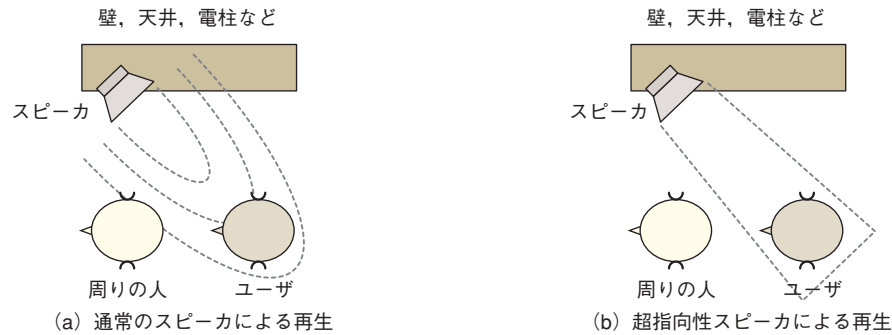


図4 外付けのスピーカから移動中のユーザへの音響再生

移動端末が現状よりさらに小型化すると、図4に示すように、スピーカは移動端末には搭載せず、壁や天井に設置されたスピーカを利用することも考えられる。ユーザの所持する移動端末からユーザの位置を特定し、超指向性スピーカをユーザに向け、指向性の高い音場を再生すれば、周りの人には聞こえにくい音場を形成できる。移動端末が小型化していくなかで、壁や天井などに設置された音響機器からの超指向性音場の再生もより重要になってくると考えている。

本稿では、図2(b)や図3(b)のような利用形態を想定し、移動端末大の筐体に搭載する超指向性スピーカを試作し、その音響特性を測定した結果を述べる。

4. 携帯型超指向性スピーカの試作

4.1 移動端末搭載の必要条件

超指向性スピーカを商用の移動端末に搭載するためには、現在の移動端末に搭載されているスピーカの仕様と性能を参考にすると、少なくとも表1に示す条件を満たす必要がある。聞き取る場所での変調波の音圧が140dB SPL (Sound Pressure Level)^{*7}以上になると、聴力が一時的に低

下するなどの課題があるが[10]、超指向性スピーカは、空気の非線形性を生じさせるために大きな音圧で変調波を放射する必要がある。

4.2 試作機の仕様

超指向性スピーカを搭載した移動端末の音響特性やサービスの可能性を検討するため、試作機（携帯型超指向性スピーカ）を製作した。その仕様を表2に、スピーカの写真を写真1(a)に示す。今回、電源、変調器および増幅器は市販品を使用したため、これらはスピーカ部とは別に設置し

表1 必要条件

内蔵機器	電源、変調器、増幅器、発振器
消費電力	1W以下
変調波音圧	140dB SPL以下
復調波音圧	70dB SPL以上

表2 携帯型超指向性スピーカの仕様

発振器数	2チャンネル
振動子数	16個/チャンネル
外形寸法(W×H×D)	約250×65×20mm

*7 dB SPL：音の強さの単位。人間の感覚では、10dB SPL増加すると音の大きさが2倍になったように感じる。通常の会話は、60dB SPL程度。



50mm
(a) 放射側面



(b) 使用例

写真1 携帯型超指向性スピーカ

ている。写真1(a)に示すように、スピーカ部として、移動端末大の筐体の両端に2つの独立した発振器を設置しており、ステレオや3Dのような2チャンネル以上のオーディオ信号の再生にも対応できるようになっている。発振器1チャンネルは超音波の周波数帯域に共振周波数を持つ圧電振動子^{*8}16個からなり、発振効率を上げるため振動子を密に配置した。さらに、筐体の中間部にヒンジ機構^{*9}を設け、折りたたみ式にすることで発振器の放射面方向の調整を可能とした。

これにより写真1(b)に示すように、ユーザが顔の前方数10cmに筐体を保持して聞く場合に、各発振器をそれぞれの耳へ向けることができる。

5. 音響特性

5.1 自由空間での特性

初めに、試作した携帯型超指向性スピーカの発振器1チャンネルの音響特性を、反射や反響のない自由空間で測定した。発振器の音圧周波数応答特性を図5に示す。発振器に電圧6.35Vrms (root mean square voltage)^{*10}で入力し、発振器の中心軸上、距離50cmで測定している。発振器は、40kHz付近に共振周波数を持ち、共振周波数の前後3kHzでは、120dB SPL以上の音圧が測定された。

次に、超指向性スピーカの復調特性を図6に示す構成を用いて測定した。単一正弦波のオーディオ信号を入力し、

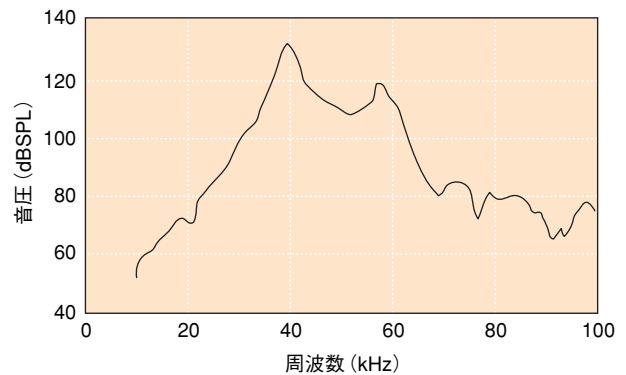


図5 発振器の音圧周波数応答特性

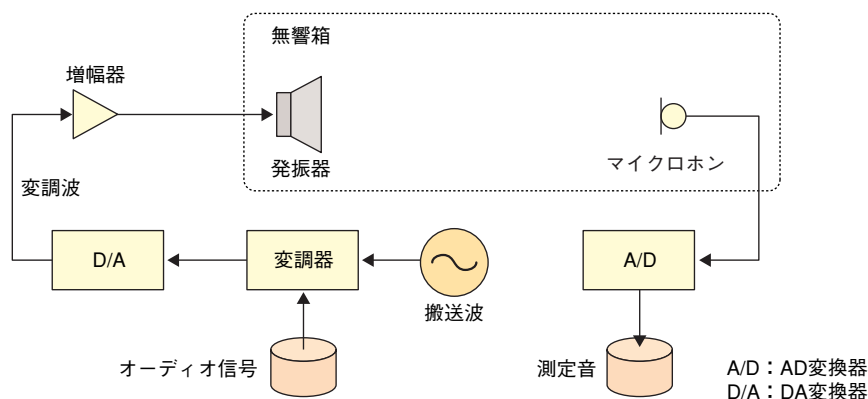


図6 測定構成

* 8 圧電振動子：水晶などが持つ、圧力を加えると電圧が発生する性質、あるいはその逆の性質を利用した素子で発振回路、フィルタなどに用いられる。

* 9 ヒンジ機構：ちょうつがいのように、2つの部品をつなぎ止め開閉できるような構成。折りたたみ携帯電話でも使用されている。

* 10 Vrms：電圧の実効値。

40kHzの搬送波を変調度^{*11}で振幅変調した変調波を、発振器で電気音響変換して出力し、マイクロホンで測定する。測定した音のうち、入力したオーディオ信号と同じ周波数の音を復調波とする。

携帯型超指向性スピーカの復調波の音圧周波数応答特性を距離50cm、指向角0°において測定したものを図7に示す。発振器への変調波の入力電圧は10Vrmsとし、以後同様に設定した。復調波の音圧は、2～10kHzの帯域では70dB SPL程度でほぼ平坦であり、2kHz以下は周波数が半分になると音圧が10dB程度下がる傾向があることを確認した。変調波も含めた全音圧を測定したところ、距離25cmで140dB SPL、距離50cmで134dB SPLであった。

復調波の距離50cmにおける指向性を図8に示す。オーディオ信号として1kHz、2kHz、4kHzの単一正弦波をそれぞれ入力した。2kHzと4kHzの復調波では、角度10°以下で音圧が3dB減少し、市販の超指向性スピーカ[9]と同等以上の高い指向性を示している。

オーディオ信号の正弦波の周波数が2kHzの場合の復調波の音圧空間分布を図9に示す。横軸は発振器の中心軸から垂直方向への距離を示し、縦軸が中心軸方向における発振器からの距離を示している。発振器の放射面において、振動子が線対称に配置されているため、そこから発振される音も線対称になると想定し、指向角は発振器放射面の中心軸に対して片側のみを測定した。測定点間は、対数距離で音圧が線形に減衰すると仮定して線形補間している。図9より、復調波の音圧が中心軸に沿ってビーム状に分布して

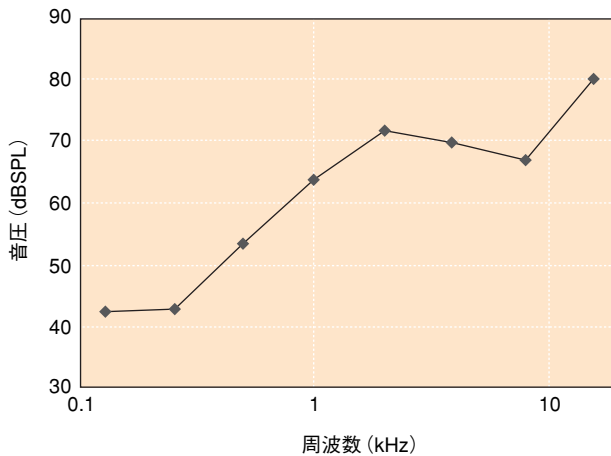


図7 復調波の音圧周波数応答特性

いることが確認できる。発振器から距離1m付近までは、中心軸から距離約5cmの空間で、復調波の音圧が70dB SPL以上を確保できた。発振器から距離50cm付近までは、中心軸から距離20cm離れると10dB以上減衰し、中心軸に沿ってビーム状の音場が形成されているといえる。

5.2 耳付近での音響特性

人が音を聞き取る際の音響特性を測定するために、人の

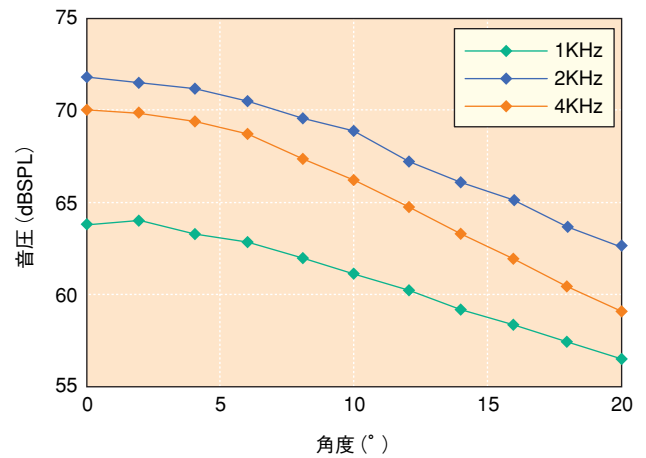


図8 復調波の指向性

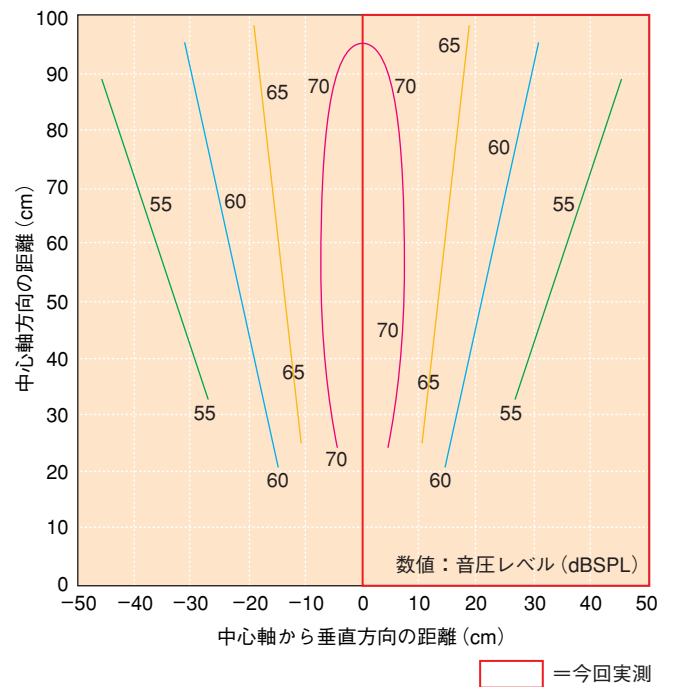


図9 復調波 (2kHz) の音圧空間分布

*11 変調度：変調成分と搬送波成分の振幅のピーク・ツー・ピーク値の比。

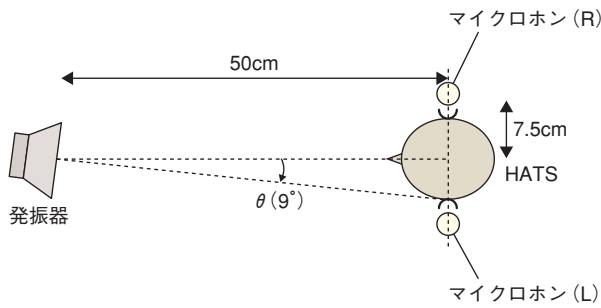


図10 HATSと発振器の配置

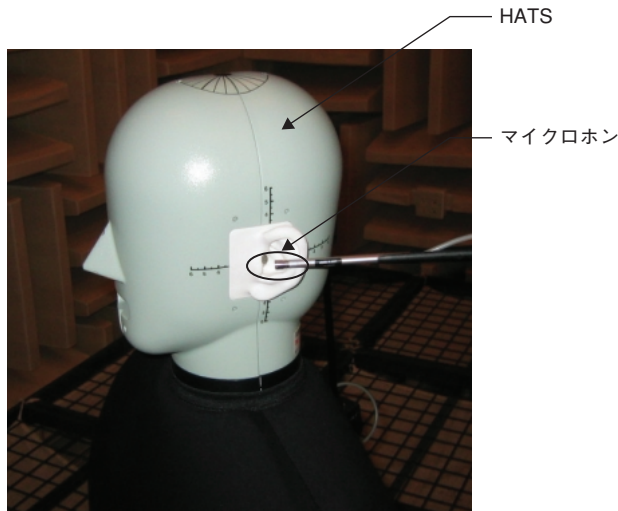


写真2 マイクロホンの配置

頭部と胴での音波の反射や回折を模擬するHATS (Head and Torso Simulator)^{*12}を用いた。図10に示すように、HATSの前方の中心軸上距離50cm、HATSの両耳と同じ高さに発振器を設置し、発振器をHATSの左耳方向に回転させることで、HATSの中心軸と発振器の中心軸とがなす角度 θ を変えながら、外耳道入口付近の復調波の音圧を測定した。測定には、HATSの外耳道入口の横に設置したマイクロホンを使用した(写真2)。

発振器の角度と左耳と右耳での復調波の音圧を図11に示す。左耳での復調波の音圧は、発振器の角度 θ が12°付近で極大となり、2kHzの音圧が左耳で約75dB SPLであったのに対し、右耳では約60dB SPLであり、チャンネル分離度が約15dBであった。

両耳間音圧差が、スピーカからステレオや3Dのオーディオ信号を再生する場合、クロストークキャンセルの処理

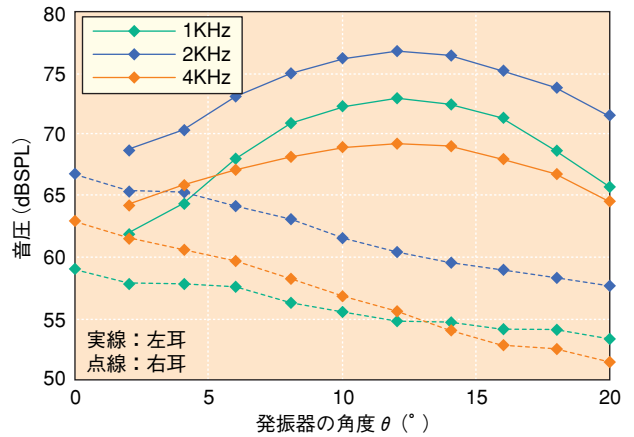


図11 発振器の角度と復調波の音圧

表3 試作機性能

内蔵機器	発振器2チャンネル
消費電力	5W以上
変調波音圧	140dB SPL以下(距離25cm以上)
復調波音圧	70dB SPL以上(2kHz以上)

をしても通常20dB程度であることを考えると、クロストークキャンセルの処理が不要になる可能性もある。

5.3 今後の課題

測定より得られた試作機の性能を表3に示す。超指向性スピーカを移動端末に搭載するためには、表1に示す必要条件と比較し、今後、電源、変調器、増幅器を小型化するとともに、発振器も小型化・薄型化し、また消費電力も低減する必要がある。さらに復調の効率を上げ、変調波をあらゆる位置で140dB SPL以下に保ったまま、2kHz未満の復調波の音圧も70dB SPL以上に上げる必要があると考えている。

6. あとがき

移動通信環境において秘話性の高い音場を実現することを目指し、移動端末大の筐体に搭載する超指向性スピーカを試作し、その音響特性を測定した。発振器から距離50cm付近でスピーカ中心軸の復調音圧を70dB SPL以上確保でき、中心軸から距離20cm離れると10dB程度減衰する高い指向性のビーム上の音場が形成されていることを確認した。また、HATSを用いた実験結果により、両耳間の音圧差が15dB程度という高いチャンネル分離度を実現できるこ

*12 HATS：成人の平均の頭部および胴での音波の反射や回折を模擬したシミュレータ。ITU-T Recommendation P. 58 Head and torso simulator for telephonometryで規格化されている。

とも確認した。一方で、今後超指向性スピーカを移動端末に搭載するには課題もあり、機器の小型化と低消費電力化と同時に発振効率の向上、復調効率の向上、安全性の確保を行う必要がある。

文 献

- [1] 伊勢 史郎：“キルヒホッフーヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理,” 音響学会誌, Vol. 53, No. 9, pp. 706-713, Sep. 1997.
- [2] J. L. S. Bellin and R. T. Beyer: “Experimental investigation of an end-fire array,” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 34, No. 8, pp. 1051-1054, Aug. 1962.
- [3] J. Westervelt: “Parametric acoustic array,” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, No. 4, pp. 535-537, Apr. 1963.
- [4] M. Yoneyama, J. Fujimoto, Y. Kawamo and S. Sasabe: “The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design,” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 73, No. 5, pp. 1532-1536, May 1983.
- [5] 濱田直明, 青木 健一：“パラメトリックスピーカの音響特性について,” 信学技報, US88-14, Jul. 1988.
- [6] 青木 健一, 鎌倉 友男, 熊本 芳朗：“パラメトリックスピーカー音場特性と最適変調方式,” 信学論 (A), Vol. J74-A, No. 3, pp. 332-337, Mar. 1991.
- [7] 栗本 睦仁, 青木 健一, 鎌倉 友男, 吉田 俊治, 酒井 新一：“DSPを用いたパラメトリックスピーカ駆動用包絡変調器の試作,” 信学技報, EA2002-30, Jun. 2002.
- [8] 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,” 音響学会誌, Vol. 41, No. 6, pp. 378-385, Jun. 1985.
- [9] 三菱電機エンジニアリング(株), 超指向性音響システム;
<http://www.mee.co.jp/pro/sales/kokodake/kokodake.html>
- [10] Damage to human hearing by airborne sound of very high frequency or ultrasonic frequency, p. 32, Health & Safety Executive, 2001.