

## 近接音源に対する聴覚能力測定と近接音場再生手法の検討

山 肩 洋 子<sup>†</sup> 勝 本 道 哲<sup>†</sup>

我々は、観測者から1~2m程度の近接場に位置し、楽器のようにある程度の大きさの振動面をもつ発音体の音を、臨場的に再生できる音響装置の開発を目標としている。発音体の近接場で観測される音波は、発音体の構造を密に反映しており、頭部程度の小さな領域でも人間は発音体の立体感を知覚することができるのではないかと考えた。そこでまず、(i) アコースティックギターを例に挙げ、両耳程度はなれた2点で観測した音波形は、楽器から3.0m離れた地点ではほぼ同じだが、近づくに従い違いが現れることを実験により示す。次に(ii) 人間が音波から発音体の形をある程度言い当てる能力があることを予備実験的に確かめる。以上の結果を受け、最後に(iii) 本研究の目標に特化した音響装置として、音像を直接再現するのではなく、楽器表面の振動を再現することにより、そこから放射される音波を合成する複加振型振動板スピーカの提案を行う。

### A Study of Human Acoustic Sensitivity to Near-field Sound-Source and the Sound-field Reproduction

YOKO YAMAKATA<sup>†</sup> and MICHIAKI KATSUMOTO<sup>†</sup>

We aim to construct a sound system specialized for near-field sound-environment.

When a sound-source is placed near an observer, the sound wave that penetrates to the observer's place keeps the spatial distortion of amplitude or frequency given by the surface of the source. We suggest the possibility that a human has capability to feel the three-dimensional shape of sound-source by the spatial distortion of sound wave.

To verify this hypothesis, in this paper, we conducted pilot studies and showed (i) a sound wave generated by an acoustic guitar has the spatial distortion and (ii) a human can guess the shape of near-field sound-source by its sound. Then, (iii) we propose new style sound equipment for the near-field sound-source.

#### 1. はじめに

立体音響再生に関する従来研究では、観測点からある程度離れたステージ上で演奏する楽器が発する音場や、屋外など広い空間で得た環境音を再生することを目標としていた。この場合、音源は観測点から十分遠いため、観測者から見れば相対的に点音源とみなせる。よって、発音体の位置に音像中心が来るよう、観測点付近に到達する波の位相と振幅を再現することに焦点が置かれた。これに対し我々は、1~2m範囲の近接場において30~60cm程度の振動面を持つ発音体が発した音を臨場的に感じることのできる音響装置を開発することを目標としている。

音源が近い場合、観測者の頭部に到達する直接波は発生時の形を密に保った複雑な形を維持していると考えられる。もし人間がこのような波形から発音体の立体感を知覚する能力があるならば、従来のステレオスピーカで再生したのでは違和感を感じると考えた。

以上の仮説を確かめるため、まず楽器の音を近接で観測した波は、遠隔で観測した音波より複雑な形をしているかを、アコースティックギターを例に挙げ検証する。

次に、発音体の音を近接で聞いたとき、人間が発音体の形を知覚することができるかを予備実験として調べ、遠隔で音を聞く場合との違いについて議論する。

最後に、直径30cm程度の発音面をもつ発音体の音を再現することを目標として、一枚の振動板に複数の加振装置を装着し、その各加振部で発生させた波を振動板上で合成することで、位相や振幅が異なる波が滑らかにつながった波面を空間に形成させる複加振型振動板スピーカの提案を行う。これは、音像を直接再現するのではなく、楽器表面の振動を再現することによ

<sup>†</sup> 情報通信研究機構

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

National Institute of Information and Communication Technology, Japan

4-2-1, Nukui-Kitaachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

e-mail: yamakata@nict.go.jp

り、そこから放射される音波を再現するという発想に基づく。

以降、2 章ではアコースティックギターが放出する音の、近接場と遠隔場における波形の違いについて調べる。3 章では前方の近接垂直平面に配置したスピーカアレイを用いて、近接発音体に対する人間の聴覚能力を予備実験的に調べる。4 章では近接発音体の音場再生に特化したスピーカを提案し、その利点や解決すべき問題点を議論する。最後に 5 章でまとめを述べる。

## 2. ギターにより生成される近接音場

本章では、一般的な楽器であるアコースティックギターを例に挙げ、楽器の音を近距離で観測する場合と遠距離で観測する場合でどのような違いがあるかを議論する。

アコースティックギターやバイオリンなどの弦楽器は、弦の振動を共鳴胴で増幅させることにより音を発する装置である。共鳴胴には響孔やf字孔と呼ばれる空気穴が開けられており、ここから内部で増幅された波が放射される。同時に共鳴胴全体を振動させることにより楽器表面から波が放射される。共鳴胴の振動特性は部位によって異なるため、観測した音波が共鳴胴表面のどの部位から放出されたかによってスペクトルが異なる。Meyeri らは、バイオリンやチェロの放射指向特性パターンが周波数帯域ごとに異なることを示した<sup>2)</sup>。

一人の観測者が音を知覚することのできる範囲は高々体の表面と限られているため、直接音のみを考えるならば、上で述べたような楽器の放射指向特性は楽器から離れることにより相対的に無視できるようになる。しかしながら楽器から近い近接空間で直接音を観測する場合は、その音波は楽器表面で発生した当時の形状を密に保っているため、観測者の頭部という狭い範囲でも楽器の立体構造を感じることのできる波が観測されるのではないかと考えた。

以上の仮説が正しいならば、人間の両耳の位置程度離れた 2 点で音を収録したとき、その 2 つの収録音は、楽器から近い場合は異なり、遠くなるほど似てくると考えられる。そこで、次のような実験を行った。

アコースティックギターの共鳴胴中心より 0.5m, 1.0m, 2.0m, 3.0m の各地点に 2 本ずつマイクを設置した。このとき、一方のマイクは共鳴胴中心の正面、もう片方は楽器に向かって左 17cm の位置にある。このマイクの対を以降“マイク対”と呼ぶ。

マイクの方法は、楽器の正面板に対し垂直方向（グラフでは“Front”で示す）と、右斜め前である 30 度の

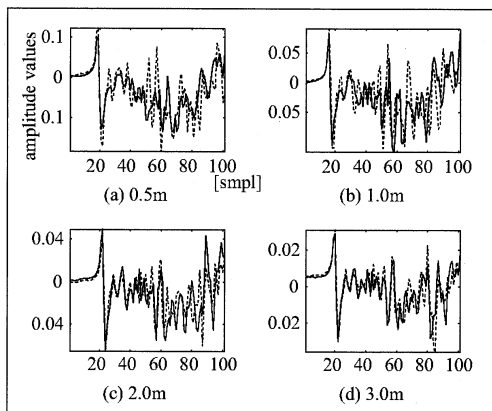


図 1 正面マイク対の波形比較

方向（グラフでは“Side”で示す）の 2 種類測定した。

以上の 4 対 8 本のマイクにより、ギターの単弦を弾いて発生させた音を、量子化 24bit, サンプリングレート 48kHz で同期収録した。

本稿では直接音のみに着目するため、1 本の弦を弾いた音が到達した直後の音を分析対象とした。ここでの目的はマイク対間で収録波の形状を比較することであるから、音の到達距離の違いによる位相のずれを吸収するため、8 本の収録音で音の立ち上がり時刻を手動で調べ、その差をオフセットとした。

収録された音の一例として、ギター正面 (Front) に設置した 8 本 4 対のマイクにより収録した音の波形を図 1 に示す。図中、横軸はサンプル数、縦軸は振幅である。また、楽器に向かって左側のマイクを実線で、右側のマイクを点線で示している。この図によると、0.5m のマイク対では波形が大きく異なるのに対し、楽器から離れるに従って徐々に波形が一致していくことがわかる。

次に、正面 (Front) と右斜め (Side) からの収録音より、単音を観測したセグメントを 12 個ずつ手動で切り出し、マイク対間の収録音スペクトログラムの相関を調べた。その結果を図 2 に示す。図によると、楽器から 1.0m の距離が最も相関値が低いことが見て取れる。これは、楽器から 1.0m 離れた位置にいる観測者は、3.0m 離れた位置にいる観測者に比べて、両耳により形の異なる波を受けることを意味する。

以上の結果が、楽器の近接の音波が遠隔の音波に比べ、楽器の立体的な構造情報を持っていることを直接的に示しているわけではないが、分析した音波が音の立ち上がり直後のものであるため、まだ壁や床での反射の影響を受ける前と考えられること、また実験を

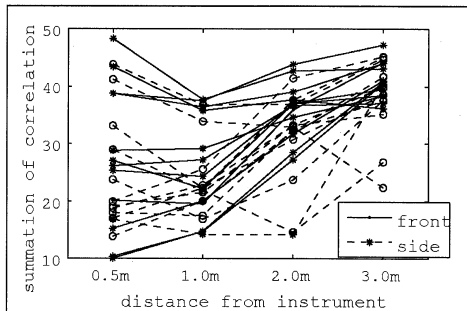


図2 楽器からの距離と収録波のスペクトログラム相関和

行った部屋は低反射音響室で、気流や雑音が低いと考えられることから、波が発生した時点での影響を最も強く反映した結果であると考えられる。

### 3. 近接音源に対する人間の知覚能力

前章では、楽器が発した音を近距離で聞く場合、観測者の頭部に到達する波は楽器の構造に起因すると考えられる複雑な形状をしていることを実験により確かめた。人間の聴覚が、このような波から発音体の立体構造を知覚する能力を持つならば、現在の主要な立体音再生法であるステレオ方式では、物体の体積を感じさせるような音を再生することは難しい。例えば2台のスピーカで音像中心がその中心に結ぶよう位相と振幅を調節した場合、楽器は中心の位置で鳴っているように感じるが、楽器の形は、スピーカ間の距離程度に巨大と感じるか、あるいは体積を持たないように感じるかはわからないが、いずれにせよ直感にあわない。

そこで、人間の聴覚が音像中心の方位だけでなく、発音体の形状までもを感じる能力があるかを調べるため、我々が開発した128chスピーカアレイシステムを用いて、以下のような聴覚実験を行った。

#### 3.1 実験環境

我々の開発したスピーカアレイシステム（以降、これを“同期独立制御スピーカアレイシステム”と呼ぶ）は、8x8個のスピーカからなる88x88cmの正方形平面スピーカアレイ2面を、水平と垂直に連結して設置したシステムである（図3）。このシステムでは、合計128個のスピーカのそれぞれより、同期をとりつつ同時に独立に音を再生することが可能である。詳しい構造については<sup>1)</sup>を参照してほしい。

本研究ではこのシステムの垂直スピーカアレイ面のうち、中央横一列の8個のスピーカを使って実験を行った。この8個のスピーカの位置を図3中グレーで塗りつぶした円で示す。以降、これらの8個のスピーカをそれぞれ図中で示したアドレスX1~X8により

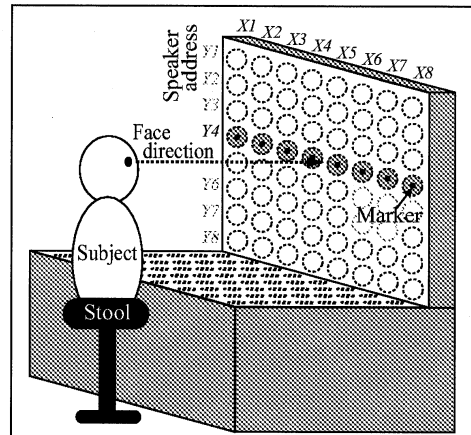


図3 実験環境

指すことにする。

スピーカユニットのダイアフラムは発音する際微小に振動し、特に低周波の場合は肉眼でも確認できてしまう。よって被験者からこの振動が見えないよう、スピーカアレイ全面には音透過スクリーンをがかぶせた。ただし、実験で用いた8個のスピーカの位置はわかるようカバー上にマーカーをつけている。

#### 3.2 実験方法

実験は以下の手順で行った。

まず被験者には、図3に示したように垂直スピーカアレイ面に向かって椅子に座ってもらった。スピーカアレイ面の中心から法線方向に1.2mの位置に被験者の眉間が位置するよう椅子の位置と高さを調節した。被験者には、実験中はアレイ面中心を向き、できる限り顔を動かさないよう注意してもらった。実験を始める前に実験内容のガイダンスを行った。

実験者は実験開始を被験者に告げた後、あらかじめ決めたシナリオに従い、実験で用いる8個のスピーカのうち1つあるいは複数のスピーカより同時に同位相同形の音を再生する。どのスピーカから音が鳴るかは被験者には知らされていない。再生した音はピンクノイズで、被験者の眉間の位置で観測したとき65dBとなるよう発音するスピーカの音量を等しく調節した。1問につき、1秒間継続再生、0.7秒減衰、0.3秒無音を1タームとして、10ターム繰り返す。繰り返しが終わったら、再び実験者が声で合図し、10秒間の休憩に入る。被験者はこの休憩の間に、8個のスピーカのうちどれから音が鳴っていたかを回答用紙に記入する。

回答用紙は1問につき横に8個連なったマスからなり、各マスが各スピーカに対応する。被験者は音が

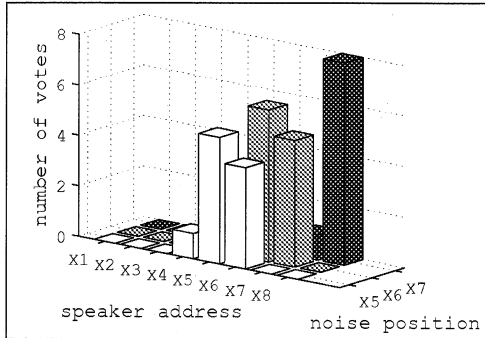


図 4 1 台のスピーカからのノイズに対する回答

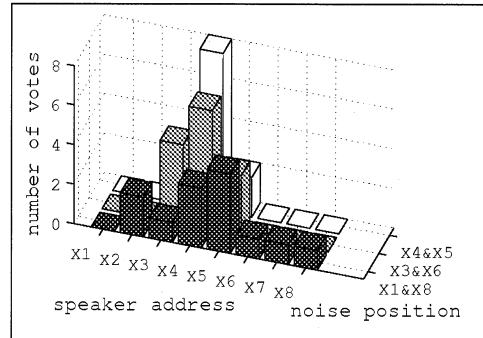


図 5 2 台のスピーカからのノイズに対する回答

鳴ったスピーカに対応するマスに×印を書き込むことにより回答する。

問題は全部で 8 問で、時間は約 4 分間である。被験者数は 8 名であった。

### 3.2.1 1 台のスピーカからのピンクノイズに対する定位精度

まず、比較基準とするため、音源が 1 つならば正しくその位置を見分けられるかを調べた。

1 台のスピーカから音を発したとき、被験者が音が鳴ったと回答した数をスピーカごとに集計した結果を図 4 に示す。音を鳴らしたスピーカのアドレスはグラフの“noise position”で示したとおりで、X5、X6、X7 の 3 種類である。このグラフによると、実際に発音したスピーカに隣接する位置までにすべての回答が収まっていることから、およその位置は判別できているといえる。また、発音したスピーカの位置が中心から外側へ移動するほど、被験者はより外側のスピーカが発音していると感じたことがわかる。これは、定位を間違うとしても、その間違い方はより外側の方向である可能性が高いと言える。

### 3.2.2 2 台のスピーカからのピンクノイズに対する定位

次に、同時に左右 2 台のスピーカから同じ波形を同位相で発したとき、被験者が音が鳴っていると回答した数をスピーカごとに集計した結果を図 5 に示す。音を鳴らしたスピーカは図中“noise position”に示したとおり 3 種類で、それぞれ X4 と X5、X3 と X6、X1 と X8 である。

音像中心はどれもアレイ面の中心にあるため、どの種類でも集計結果は中心付近のスピーカである X4 や X5 を頂点とした山形になっている。しかし、その山のなだらかさは、X4 と X5 のスピーカを鳴らしたときが最も急で、発音スピーカの位置を広げるに従い徐々に

になだらかに広がっている。

また、鳴っていると答えたスピーカの数も、1 台のスピーカから発音したときは平均 1.25 だったのに対し、2 台のスピーカから発音した場合は平均 1.54 と増加した。

以上の結果は、人間の聴覚が、ステレオ方式により結んだ音像中心から音が鳴っていると感じるのと同時に、その音を発したスピーカの配置をも感じることができているを示している。これはすなわち、人間は波形から発音体の形状を知覚する能力があることを示唆する。

## 4. 複加振型振動板スピーカによる発音面の振動再現

前章と本章の結果より我々は、観測者に臨場感を感じさせるためには、楽器の音を近くで聞くと想定する場合と、遠くで聞くと想定する場合とで、音の再生方式を以下のように変える必要があると考えている。観測面が高々人間の頭部全面であると考え、楽器から離れた位置で観測した音を再現する場合は、音像の重心が楽器の本来の位置に一致するよう位相と振幅バランスを制御すればよい。しかし、楽器の近くで観測した音を再現する場合はそれでは不十分で、楽器の構造情報を反映した面として再生しなければならない。

以上の考えに基づき、我々は、発音体の面から発生する波を二次元方向に広がる面として忠実に再現する音響装置の開発を行っている。

始めに述べたように、楽器の共鳴胴は、面の一部分に加えられた振動を内部で増幅し、全面に伝達させることにより音を放射する。このとき、共鳴胴全体が同じように振動するわけではなく、振動が面を伝わる中で干渉や抑圧が生じ、場所によって振幅や周波数、位相が異なる<sup>3)</sup>。しかしながら共鳴胴の表面は物理的に

連続しているため、表面部位による波の変化も連続的であり、したがってそこから発せられる波は、異なる振幅や周波数の波が滑らかに繋がっていると考えられる。

立体的な音の再現法としては、多数のスピーカを使って音像を再構築する方式が一般的であるが、この方式で再生できる音像は1種類の波形の音しか発しない点音源に限られる。前章の実験で用いた同期独立制御スピーカアレイシステムでは、平面状に並んだ多数のスピーカを一つの振動面とみなせば、複数周波数・振幅の波を再現できる。しかし、アレイを構成する各スピーカからはやはり単一の波形しか再生できず、また各スピーカはある程度の面積を占めることから、このスピーカアレイで再生した音波を滑らかに連続しているとみなすには、アレイからある程度離れる必要がある。また、異なるスピーカから発せられた音波との干渉も無視できない。

そこで我々は、発音体が発した音波を直接再現するのではなく、発音体の表面に生じる振動を再現することにより、生成される音波を発音体が発する音波に近づけることを考えた。その第一歩として、振動面上で、場所によって位相・振幅・周波数が滑らかに変化する波を発生させることを目標として、図6に示すようなスピーカを試作した。

このスピーカは、図6(a)に示すように振動板(diaphragm)、加振装置(vibration generator)およびエンクロージャから構成される。振動板には数種類の厚さのガラス板・アクリル板・ラワン合板・MDFボードを用意し、取替えてできるよう設計されている。

エンクロージャは図6(b)で示すように三角柱の形をしており、3つの空間に仕切られている。これらの空間の上面は、それぞれ切り離された3枚の振動板により閉じられており、ガasketにより外との空気の流れを遮断する。これにより、振動板が振動すると空気中に気圧差が生じ、音が放射される。

1枚の振動板には2台の加振装置(Fostex GY-1)を接着し、また1台の加振装置は同時に2枚の振動板を加振する(図6(c))。これらの加振装置は独立10chの同時再生が可能なオーディオインタフェース(EDIROL UA-1000)を介してPCに接続し、それぞれ異なる位相・振幅・周波数の波を加振することができる。振動板の鋭角の角をビスで固定し、振動の固定点とする。

加振装置付近では、その加振装置が与えた振動に従い振動板が振動するため、振動板が物理的に切り離されていても放射される波はある程度滑らかに繋がると考えられる。また、同一の振動板上の波は、加振装置

の接着部から離れるにつれ徐々にその影響が弱まり、もう一方の加振装置に近づくにつれ、そちらの加振による影響が高まると考えられる。図6(b)の破線矢印で示したように、二つの加振装置の波が同形同位相なら振動板は固定点を支点として上下にひずみ、同形で位相が180度ずれるなら固定点を中心としてねじれる。以上のような要素を組み合わせ適切に指定することにより、振動面上の波を制御し、音波を発生させる。

想定するシステムの構成を図6(d)に示す。システムに対する入力音響信号ではなく、振動板上の $N$ 個の制御点において再現したい振動信号であり、行列 $X(\omega)$ で示す。ここで $\omega$ は角周波数である。振動板の伝達関数を $G(\omega)$ 、逆フィルタ係数を $H(\omega)$ で表すと、振動板上の制御点で再現される振動 $\hat{X}(\omega)$ は以下の式で表される。

$$\hat{X}(\omega) = G(\omega)H(\omega)X(\omega)$$

ここで、 $X(\omega) = \hat{X}(\omega)$ となるよう制御することが目的である。

このスピーカの振動面上には任意の波を再生できるわけではない。有限要素法などによる理論的な予測や、振動板の素材や厚さを変えて様々な振動を計測することによる帰納学習により、再生できる波形の性質を明らかにすることが今後の課題である。

## 5. ま と め

本研究では、バイオリンやギターのようにある程度の大きさの面を持つ発音体から発せられる音を、1~2m程度の近接で聞く状況を想定し、臨場感のある立体的な音を再生する音響装置の提案を行った。

まず、楽器の音を近接で観測した際の音波は、遠隔で観測した音波に比べ、楽器の立体的な構造をより密に保持していると予想した。もしそうならば、近接で観測した場合、人間の頭部程度の狭い範囲でも場所によって波形に違いが現れると考えられる。そこで、アコースティックギターで1本の弦を弾いた音を、0.5m, 1.0m, 2.0m, 3.0mの距離から17cm離れた2本のマイクによりそれぞれ観測し、2本のマイク収録音の相関を調べた。この結果、1.0mの地点で最も相関が低く、離れるに従い相関が強くなることがわかった。このことから、楽器の音を近接で聞く場合、人間の頭部に到達する波は楽器の立体構造情報を密に持つことが示唆された。

次に、このような波形の違いから、人間は発音体の構造を知覚することができるかを予備実験的に調べた。同期して独立再生可能なスピーカ8個を被験者の頭部正面1.2cmの位置に横一列に配置し、音像中心がス

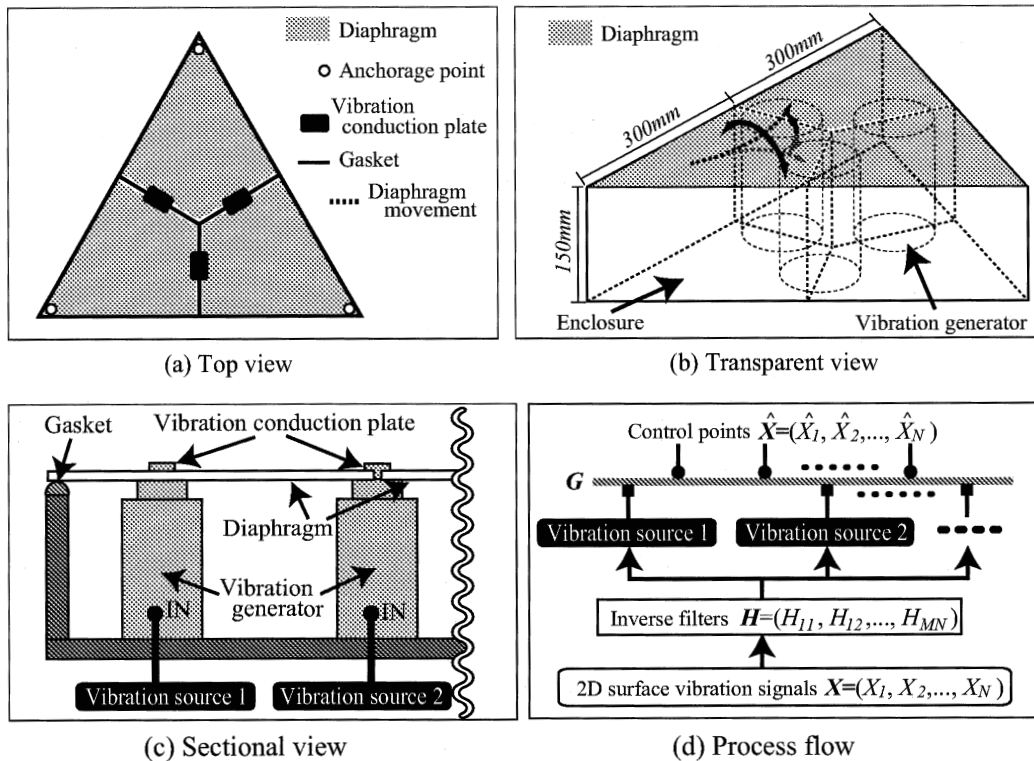


図 6 複加振型振動板スピーカの構造図

ピーカアレイの中心に来るよう左右対称の位置の 2 本のスピーカから、同形同位相のピンクノイズを発音した。スピーカの間隔を広げながら、どのスピーカが発音したかを答えてもらった。その結果、スピーカの位置を広げても、音像中心がアレイの中心であるため、中心付近のスピーカと答えた被験者が最も多かったものの、外側のスピーカと回答えた被験者数が増加した。この結果は、人間が発音体の形をある程度知覚する能力があることを示唆している。

以上の実験結果により我々は、近接で楽器の音を聞く場合、この音波が面方向に楽器の立体構造を反映した情報をもっていなければ、人間は発音体の体積が感じられず違和感を感じると予想した。しかし、楽器から発せられる音は楽器表面の連続性により、連続して変化する波であることから、従来のようなラウドスピーカでは再生が困難である。

そこで、音像を直接再現するのではなく、楽器表面の振動を再現することにより、そこから放射される音波を再現する複加振型振動板スピーカの提案を行った。このスピーカはまだ試作段階であり、その表現能力が

評価できていないが、スピーカを構成する振動板の振動伝達特性や加振制御によって、発生可能な音波が異なると予想される。その表現限界とそれを決めるパラメータを特定し、楽器表面の振動に近づけるための加振方式を確立することが今後の課題である。

## 参 考 文 献

- 1) 勝本道哲, 山肩洋子: "聴覚情報評価のための多チャンネル音響システムの提案と実装", 情報処理学会 第 130 回マルチメディア通信と分散処理研究会, 2006 情報研第 90 号, March 2007 (発表予定)。
- 2) Jurgen Meyer, "Directivity of the Bowed Stringed Instruments and Its Effect on Orchestral Sound in Concert Halls", The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 51, Issue 6B, pp. 1994-2009, 1972.
- 3) H.N. フレッチャー, T.D. ロッシング著, 岸憲史, 久保田 秀美, 吉川 茂訳, "楽器の物理学", シュプリンガー・フェアラーク東京, p.2002.