

複数の加振装置を備えた振動板による音響放射再生装置の提案

山 肩 洋 子[†] 勝 本 道 哲[†] 木 村 敏 幸[†]

我々は、面の振動により発生する音の放射特性を再現するため、その放射音を直接再生するのではなく、振動面の二次元的な振動様相を再生する音響装置の開発を行っている。本稿では、一枚の振動板に複数の加振装置を設置し、それらよりそれぞれ位相を変えた振動を加振することで、振動板上に印加される振動様相を制御する手法を提案する。まず、振動板の振動を8個の加速度検出器で計測し、加振する振動の位相により振動様相が変化することを示す。次に、その計測波より振動板の放射音をシミュレートすることで、振動板の振動様相が変わると放射音の指向特性が変化することを示す。最後に放射音を実際に計測してシミュレーションどおりに変化することを確認し、この放射特性が人間の耳でも知覚できることをアンケートにより示す。

Sound radiation reproduction system with a diaphragm vibrated by multiple actuators

YOKO YAMAKATA,[†] MICHIAKI KATSUMOTO[†]
and TOSHIYUKI KIMURA[†]

We are constructing a sound system that aims to reproduce a sound radiation which originally emitted by a plane vibration. Our system does not reproduce the radiation directly, but is intended to emulate the surface vibration with a diaphragm of the system.

In this paper, we propose a method for controlling a surface vibration of a diaphragm using multiple vibrators that is accelerated with different phases. First, we measure vibration waveforms of eight points on the diaphragm using vibration pickups, and show the waveforms change according to the accelerated phase shifts. Second, we simulate its sound radiations with the measurement waveforms and show the radiation also change due to the acceleration phases. Finally, we show actual observed radiations follow the simulation results and the radiation change is effective as people can perceive.

1. はじめに

我々は、面が振動することにより発生する音の放射特性を再現するため、その放射音を直接再生するのではなく、振動面の二次元的な振動様相を再生する音響装置の開発を行っている。

物体が発音するとき、多くの場合その表面は場所によって異なる波形で振動する。そのそれぞれの場所から放射された音波は空間中で干渉し合い、全体としては多様な指向性をもった音波となる。このような音響放射指向性は、直接音を1点で聞く限りでは音の違いとしてしか知覚されないが、音源の近くや残響のある部屋で聞く場合には、異なる音が異なる方向から到達することとなり、聴感に強い影響を与えられられる。よって本研究では、このような音響放射指向性を

再生することを目的とする。

我々は、このような音響放射指向性は、そもそも振動面が振動することにより生じたのであるから、音響を直接再生するのではなく、この振動面の振動を再生するのがよいと考えた。しかし、あらゆる発音体は固有の振動特性をもち、再生装置の振動板もまた固有の振動特性を持つが、通常これらは一致しないため、発音体に加えられた振動と同じ振動を振動板に加振したのでは、同じ振動様相は再現できない。

そこで、一枚の振動板に複数の加振装置を設置し、それらよりそれぞれ波形の異なる振動を加振することで、加振点を強制振動させ、振動板上に印加される振動様相を制御する手法を提案する。この振動様相は振動板の形状や材質、加振点の位置等に依存し決まるため、どの程度制御できるかは明らかではない。そこで本稿では、最も基本的な波形であるサイン波を加振波形とし、加振装置ごとの波形の相違を位相差で表すことで、本手法の実現可能性を評価する。

[†] 情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications
Technology, Japan

まず、振動板上の分散した8点に加速度検出器を設置することにより、振動板の振動様相を計測し、加振装置で加振する振動間の位相差を変えると、振動板の振動様相が変化することを示す。次に、その計測波よりそのときの振動板の放射音をシミュレートすることで、振動板の振動様相が変わると放射音の指向性が変化することを示す。ここで、振動板の振動様相は離散点でしか計測されていないが、実際の放射音は振動板上のあらゆる点から放射された音波が干渉して形成されるため、シミュレーション結果は実際の放射音とは異なる恐れがある。そこで最後に、実際の放射音をマイクで計測して、その波形がシミュレーションで得た放射指向性どおりに変化することを確認する。また、この放射特性が人間の耳でも知覚できる程度の効果を持つことを、9名の被験者に対するアンケート結果により示す。

以降、2章では面が振動することにより生じる放射音の性質について述べる。3章では提案手法による実験システムの構成を述べ、加振振動に対する振動板の振動様相を分析する。4章では実測値に基づきシステムの放射音をシミュレートし、5章で実際の放射音の計測と聴覚実験の結果を述べる。最後に6章でまとめを述べる。

2. 面振動を行う振動板の放射音特性

本章では、面が振動することにより放射される音の指向性について整理する。

まず、無限に広い薄板上を直進する進行波の音響放射について考える。 x, y, z 直行座標系において、薄板の表面を $z = 0$ とし、 x 軸方向に角周波数 ω の波を伝搬させるとする。ここで y 軸方向には変位の変化はないとする。薄板のたわみ波の伝搬速度を v_p 、空気中の音速を v_a とすると、薄板上を地点 A から横波が v_p 進む間に、地点 A から放射された音波は v_a 進み、 $v_p > v_a$ の場合、その間に放射した波は図 1(a) のように一直線上で互いに強めあふ。これが全体としての放射音であり、その放射方向 θ は $\cos(\theta) = \frac{v_a}{v_p}$ となる。一方 $v_p < v_a$ の場合は図 1(b) に示すように波は強めあふことはなく、よって放射音はほとんど発生しない。

次に、振動板の振動を理解するうえでもう一つ重要な波に定常波がある。定常波は同じ場所にとどまって振動しているように見えるが、逆方向に進む同形の進行波が干渉して生じ、その特性も進行波の和として解釈することができる。上で述べたように $v_p > v_a$ の場合、進行波は放射角 θ の音波を発生させるが、定常波

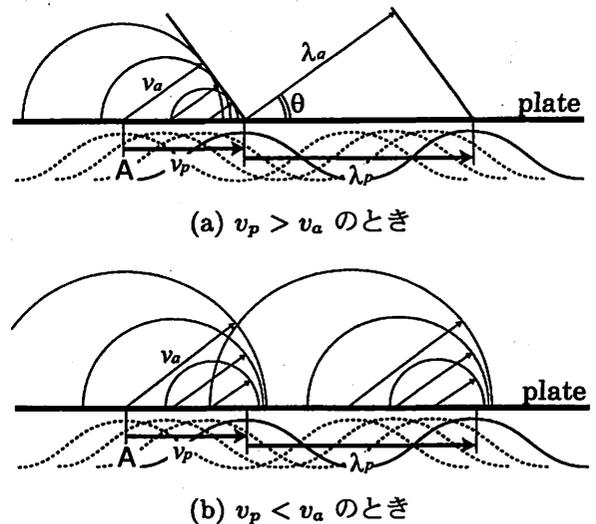


図 1 進行波の放射音

においてはそれらが干渉しあい、ビーム状の放射音となる。一方 $v_p < v_a$ の場合、全方向に広がる拡散波となり、放射エネルギーは大きく減退する。

楽器の共鳴胴や本システムの振動板のような薄板が音を発するときには生じる振動は“たわみ波”であるが、このたわみ波の伝搬速度は周波数の平方根に比例することが知られている¹⁾。よって楽器の共鳴胴に見られるように、薄板上に複数の周波数からなる複合波が印加される場合は、周波数ごとに異なるエネルギーやビーム指向性で音響放射することになる。

直接音のみを考えれば、これらの放射指向性の差は単に音の差にとらえられるかもしれない。しかし実際には、観測者がいない方向へ放射された音波も部屋のいたるところで反射し観測者へと到達するため、観測者からすれば、音源とは異なる様々な方向から、異なる音が到達するように感じられる。このような放射指向性はヴァイオリンのように共鳴胴を持つ楽器でも同様に生じており²⁾、Weinreich は、これが通常のラウドスピーカによりヴァイオリンの音を再現することを困難にしていると述べている⁴⁾。

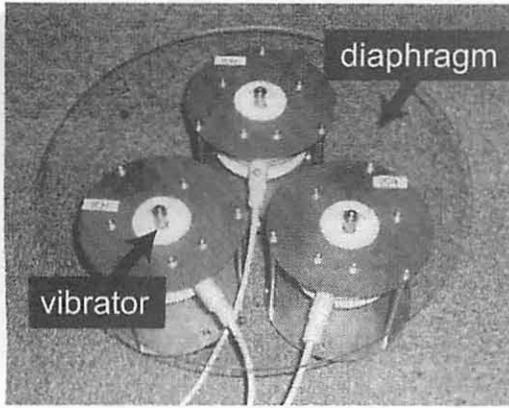
3. 複数の加振装置を備えた振動板による音波再生

本章ではまず、今回作成したシステムの構成を述べる。その後、システムの各加振装置に様々な波形を入力したときの、振動板上に現れる応答振動を分析することで、システムの表現能力を明らかにする。

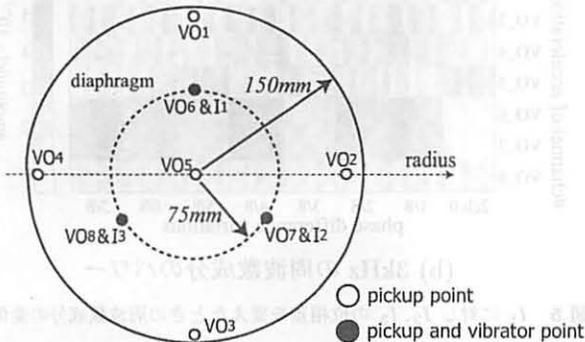
3.1 システムの構成

システムの写真と構成図を図 2 にしめす。

振動板は厚さ 3mm、半径 150mm の真円のガラス板である。加振装置は 3 つで、振動板中心を原点とし



(a) 装置の写真



(b) 構成図と加振点および振動計測点

図2 複数の加振装置を備えた振動板による音波再生装置

た極座標系において、動径 r が 75mm 、偏角 θ がそれぞれ 0 度、 120 度、 240 度の位置に設置した。以降、これらの加振装置より加える振動をそれぞれ I_1, I_2, I_3 とする。加振装置の振動板への固定は、振動板の該当部分に直径 3mm の穴をあけ、加振装置の可動部に連結したボルトを通し、振動板表よりワッシャーをはさみナットで締めこむことを行っている。

加振装置には Fostex GY-1 を用い、 10ch まで同期独立再生可能なオーディオ装置 (ROLAND UA-1000) を介して PC で制御する。制御プログラムは PortAudio³⁾ が提供する API を使って、ASIO ドライバを介しマルチチャンネル再生するプログラムを作成し、これを MATLAB で呼び出すことにより実装している。

3.2 加振する振動とそれによる振動板の振動様相

前節で述べたシステムにおいて、3つの加振装置それぞれよりさまざまな位相差を加えたサイン波を加振し、これにより振動板上に生じた振動を8個の加速度検出器により測定した。具体的には、小野測器の NP-2000 シリーズ 電荷出力型加速度検出器 (NP-2110) 8個を1台の Graduo [DS-2000 シリーズ] に接続し、そのデータを PCMCIA カードバスを通じてノートパソコンで ORF 形式で収録し、収録後に WAV 形式に変

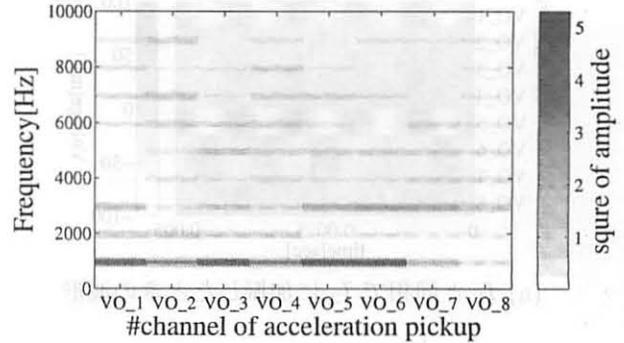


図3 I_1 のみ 1kHz のサイン波を加振したときの検出波のスペクトル

換した。サンプリングレートは 51.2kHz であった。8個の加速度検出器の設置位置を図2の(b)に番号で示す。以降、これらの加速度検出器より検出された振動波形をそれぞれ VO_1, \dots, VO_8 とする。

3.2.1 加振装置1台のみで加振する場合

まず、 I_1 に 1kHz のサイン波を加振したとき、8個の検出器で計測された波形 OV_1, \dots, OV_8 のスペクトルを図3に示す。図中、濃淡値は濃いほどパワーが強い。この図によると、加振した点である V_6 以外の計測点でも、 V_6 と同等、もしくはそれ以上のパワーが検出されることから、本システムが振動板全体で音を放射することがわかる。

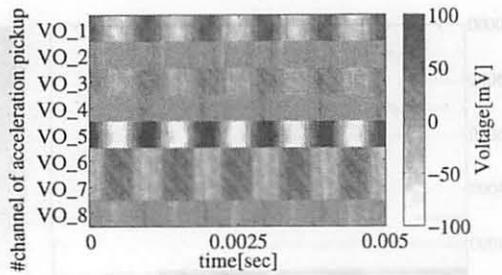
また、加振した 1kHz 以外にも、その倍音に相当する周波数が数多く現れている。これは、本システムの出力音が入力音と異なる波形となり、したがって期待する音を出力するためには、それに合わせた入力音を別に用意しなければならないことを意味する。

3.2.2 加振装置2台で加振する場合

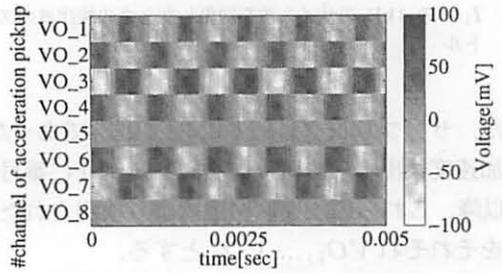
次に、 I_1, I_2 に 1kHz のサイン波を加え、かつ I_1 に対する I_2 の位相を同相および π としたときの、8個の検出器で計測された波形 OV_1, \dots, OV_8 を図4に示す。図中、濃淡値は計測点の面と垂直の方向の変位 (黒が正、白が負) を表す。この図によると、同相のときは振動板中心が大きく振動するのに対し、位相差 π のときは周辺が大きく振動するなど、2つの加振装置に加える振動の位相差により振動板上の振動は大きく変化することがわかる。

3.2.3 加振装置3台で加振する場合

最後に、 I_1, I_2, I_3 に 1kHz のサイン波を加え、かつ I_1 に対し I_2, I_3 の位相差をそれぞれ $(n/4)\pi (n = 0, \dots, 7)$ としたとき、8個の検出器で計測された波形 OV_1, \dots, OV_8 それぞれのスペクトルより、周波数が 1kHz と 3kHz のパワーをそれぞれ抜き出したものを図5(a)(b)に示す。図中、濃淡値は濃いほどパワーが



(a) I_1 と同相で I_2 に加振したときの波形



(b) I_1 に対し位相差 π で I_2 に加振したときの波形

図 4 I_1, I_2 に 1kHz のサイン波を加振したときの振動振幅

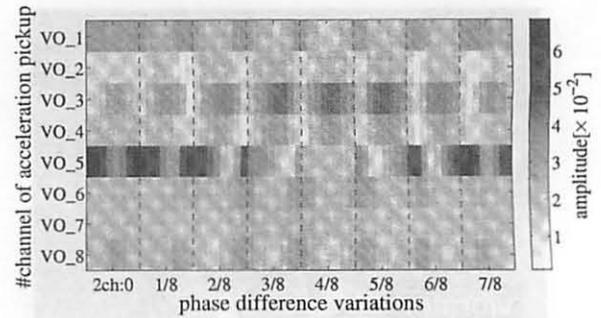
強い。また、横軸の目盛りおよび図内の点線は I_2 の位相差での区切りを示しており、各区切りの中にはさらに I_3 に位相差を変えたときの 8 個のデータが示されている。

この図によると、各計測点における 1kHz やその倍音である 3kHz のパワーのあらわれ方にはある程度バリエーションがあることがわかる。同様の分析を、加振するサイン波の周波数を 200~2000Hz の間で 200Hz 間隔で変えて行ったが、すべての周波数において 1kHz の場合と同様、各検出器における基音およびその倍音のパワーの現れ方は、加振振動の位相に従い変化し、かつバリエーションがあることを確認した。

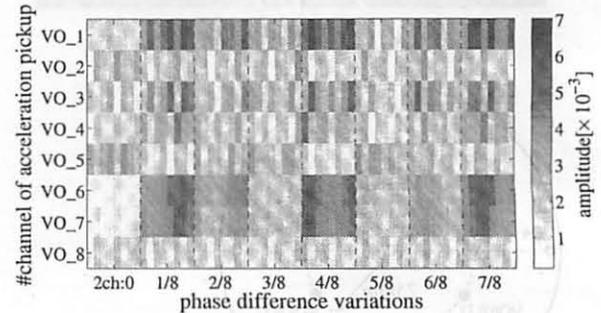
これはすなわち、あらゆる周波数の音について、各加振装置に加える振動の位相差を適切に変えることにより、振動板上の各部分より放射する音波の周波数成分をある程度制御できることを意味する。

ただし、加振する周波数や位相差の組み合わせによっては、聴感上明らかにノイズと感じられる、倍音成分以外の周波数成分が現れる場合も多く、特に加振振動の周波数が低い、すなわち波長が長い場合において頻繁に観測された。このように、すべての周波数・位相差の組み合わせが音楽的な意味での音響再生に利用できるわけではない。

また、今回調査したすべての周波数・位相差の組み合わせにおいて、加振振動の周波数以外に、その倍音やその他のノイズが必ず検出された。これは、今回構



(a) 1kHz の周波数成分のパワー



(b) 3kHz の周波数成分のパワー

図 5 I_1 に対し I_2, I_3 の位相差を変えたときの周波数成分の変化

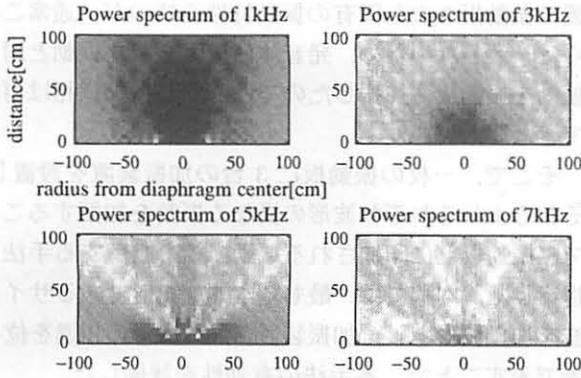
成したシステムは少なくとも単一周波数からなる純音は出力できないことを意味する。

本システムは、従来のラウドスピーカーが目指しているような、任意の入力音をできるかぎりひずませずに再生するという目的には適していない。本システムはヴァイオリンのように、発音原理が似ているためそもそも倍音成分を含む音の再生において、その音響放射指向性を再生することによる聴感上の効果を期待して利用すべきであると考えられる。

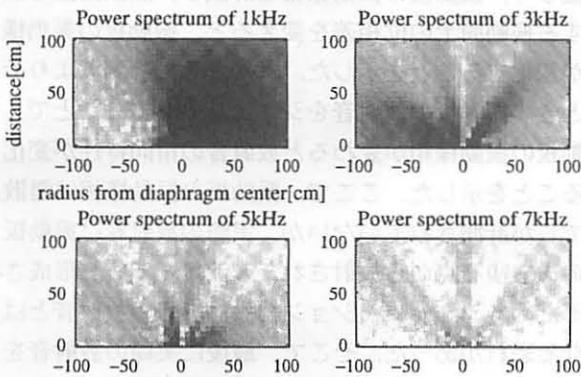
4. 振動板の振動による放射音およびその指向性

前節では各加振装置で加振する振動の位相差を変えると、振動板上に印加される振動様相が変化することを計測データにより示した。そこで本章では、振動板の振動様相が変化すると、その放射音はどのように変化するかを、前章の計測データに基づくシミュレーション実験により調べた。

3.2.3 節で計測した 8 点の振動波形より、計測点 2, 4, 5 を通る直線上で面と垂直の方向に放射する音響を試算した。振動板を無限の広さをもつ境界面と見立て、検出器で計測した加速度を、その境界面の対応する位置に分布する音源の振動速度と想定し、そこから放射する音をレイリー積分を簡易的に適用して算出した⁵⁾。



(a) 全チャンネル同相で加振



(b) 2ch の位相差 $1/8\pi$, 3ch の位相差 $7/8\pi$

図 6 加振振動の位相差と周波数ごとの放射パワー分布

☆.

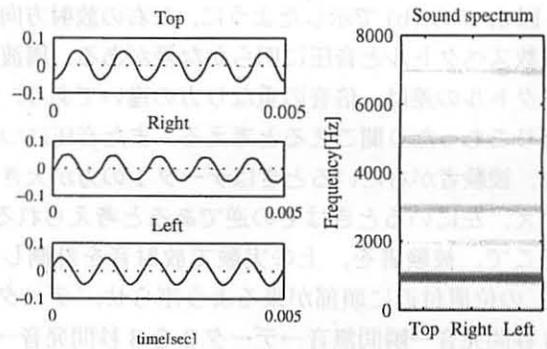
全加振装置が同相で加振する場合と、放射指向性の変化が明らかであった「2ch の位相差 $1/8\pi$, 3ch の位相差 $7/8\pi$ 」の場合で、放射パワーの空間分布を 1, 3, 5, 7kHz の周波数ごとに調べた結果を図 6 に示す。図では濃淡が濃いほどパワーが強い。

この図を見るとによると、本システムの振動板から放射された音は、全方向へ均質に広がるのではなく、周波数ごとに大きく異なる指向性をもつことがわかる。これはすなわち、放射方向によって周波数成分が様々に変化することを意味する。

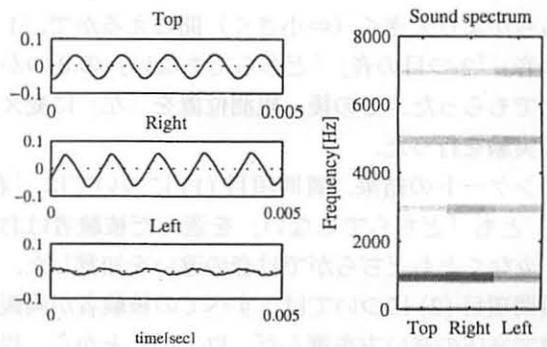
5. 放射音計測および聴覚実験

前章では、振動板上の 8 個の計測点で計測した波形より放射音を算出したが、振動を計測していない点からの放射波は考慮されていない。そこで、実際に放射された音がシミュレーションと同じ性質を持つことを確認するため、実際の放射音との比較を行った。

☆ 本システムはエンクロージャーを備えていないため、振動板の周辺より放射された音波や、波長の長い音波の放射効率は本試算よりも下がると考えられる。



(a) 全チャンネル同相で加振



(b) 2ch の位相差 $1/8\pi$, 3ch の位相差 $7/8\pi$

図 7 振動板より 1m 上方 (Top), 左 (Left), 右 (Right) における収録音の波形とスペクトル

放射音計測は 3 点で行い、それぞれ振動板中心より、振動板に垂直の方向 (Top)、振動板中心より振動計測点 2 の方向に仰角 30 度の方向 (Right)、振動板中心より振動計測点 4 の方向に仰角 30 度の方向 (Left) にそれぞれ距離 1m の地点である。

前節の図 6 で示した位相差で加振したときの放射音波形とその周波数成分 (濃いほどパワーが強い) を図 7 に示す。図 7(a) では、どの方向でも周波数成分に大きな違いは見られないが、図 7(b) では特に振動板の右で計測した音波に 1kHz の周波数成分が強くあらわれている。このような違いは、図 6 で示したシミュレーション結果とほぼ一致する。

さらに、このような放射方向による音圧や周波数スペクトルの違いが、人間の知覚においても明らかであることを確認するため、9 名に対し聴覚実験を行った。実験方法は以下のとおりである。

3 つすべての加振装置より 1kHz のサイン波を加振し、2ch に $1/8\pi$, 3ch に $7/8\pi$ の位相差を加えたものをデータ 1、逆に 2ch に $7/8\pi$, 3ch に $1/8\pi$ の位相差を加えたものをデータ 2 とする^{☆☆}。これらのデータ

☆☆ シミュレーション結果において、データ 2 の放射音は、データ

は、図6, 7の(b)で示したように、左右の放射方向で周波数スペクトルと音圧に明らかな差がある。周波数スペクトルの差は、倍音の重なり方の違いであり、澄んだりこもったり聞こえたと考える。また音圧については、被験者が右にいるときはデータ1の方が大きく聞こえ、左にいるときはその逆であると考えられる。

そこで、被験者を、上の実験で放射音を計測した「右」の位置付近に頭部が来るよう座らせ、「データ1を3秒間発音→瞬間無音→データ2を3秒間発音→1秒間無音」を5回聞いてもらった。質問項目は、(1)どちらがより澄んで(⇔こもって)聞こえるかと、(2)どちらがより大きく(⇔小さく)聞こえるかで、「1つ目の音」「2つ目の音」「どちらでもない」の3つから選んでもらった。その後、観測位置を「左」に変えて同じ実験を行った。

アンケートの結果、質問項目(1)については、「右」「左」とも「どちらでもない」を選んだ被験者はおらず、少なくともどちらかでは音の違いを知覚した。また質問項目(2)については、すべての被験者が両観測位置で音圧の高い方を選んだ。以上のことから、提案手法による音響放射指向性は、人間が知覚できる程度の効果を持つことがわかった。

今回の実験は低残響室で行ったため、ほぼ直接音のみの評価であったが、提案手法は、2章の最後で述べたように、被験者がいない方向へ放射した音波が壁などで反射して被験者へ到達するような、ある程度残響がある部屋のほうがより威力を発揮する。よってそのような環境で、提案手法が再生する音響に対し、聴感上の意味付けを行うことが今後の課題である。

6. まとめ

本稿では、面の振動により発生する音の放射特性を再現することを目的とし、振動面の二次元的な振動様相を再現する音響装置に関する研究について述べた。同様の目的に関する関連研究については⁶⁾で述べている。

物体が発音するとき、多くの場合その表面は場所によって異なる波形で振動し、そのそれぞれの場所から放射された音波は空間中で干渉し合い、全体としては多様な指向性をもった音波となる。

我々は、このような音響放射指向性を再現するため、発音体の振動面の振動を再生することを考えた。しかし、あらゆる発音体は固有の振動特性をもち、再生装

置の振動板もまた固有の振動特性を持つが、通常これらは一致しないため、発音体に加えられた振動と同じ振動を振動板に加振したのでは、同じ振動様相は再現できない。

そこで、一枚の振動板に3台の加振装置を設置し、それらよりそれぞれ波形の異なる振動を加振することで、振動板上に印加される振動様相を制御する手法を提案した。本稿では、最も基本的な波形であるサイン波を加振波形とし、加振装置ごとの波形の相違を位相差で表すことで、本手法の有効性を評価した。

まず、振動板上の分散した8点に加速度検出器を設置して、振動板の振動様相を計測し、加振措置で加振する振動同士の位相差を変えると、振動板の振動様相が変化することを示した。次に、その計測波よりそのときの振動板の放射音をシミュレートすることで、振動板の振動様相が変わると放射音の指向特性が変化することを示した。ここで、振動板の振動様相は離散点でしか計測されていないが、実際の放射音は振動板上のあらゆる点から放射された音波が干渉して形成されるため、シミュレーション結果は実際の放射音とは異なる恐れがあった。そこで、最後に実際の放射音をマイクで計測して、その波形がシミュレーション結果に沿って変化することを確認した。また、この放射特性が人間の耳でも知覚できる程度の効果を持つことを、9名の被験者に対するアンケート結果により示した。

今後の課題は、放射指向性の制御限界を明らかにすることと、少なくとも空間中の離散点での計測において、放射音が期待した指向特性をもつよう制御することである。

参考文献

- 1) 早坂寿雄, 吉川昭吉郎: "音響振動論", 丸善株式会社, p.435-453, 1974.
- 2) Jurgen Meyer: "Directivity of the bowed stringed instruments and its effect on orchestral sound in concert halls", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 51 No. 6(Part 2), p.1994-2009, 1972.
- 3) "PortAudio - portable cross-platform Audio API", <http://www.portaudio.com/>
- 4) G Weinreich: "Radiativity revisited: theory and experiment ten years later", Proc. SMAC 93, Ed. A. Friberg, J. Ewarsson, E. Jansson, and J. Sundberg, Royal Swedish Acad. Music, Stockholm. 1994.
- 5) N.H. 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・フェアラーク東京株式会社, p. 177-178, 2002.
- 6) 山肩洋子, 勝本通哲, 木村敏幸: "物体表面から放射された音波の近距離場における性質分析と再生法の検討", 情報処理学会 第71回音楽情報科学研究会報告, 2007-MUS-71 (12), p.67-72, 2007.

1の放射音を左右反転させたものにほぼ等しいことを確認している。