

4-2 複加振方式による指向性音響装置の実現

4-2 Simulation of Bending Vibration for Sound Radiation Controlling

山肩洋子 勝本道哲

YAMAKATA Yoko and KATSUMOTO Michiaki

要旨

この論文では音の放射指向性を制御するための新しい方法を提案する。提案するシステムは、複数のバイブレータを用いて、平面ダイアフラムを振動させることによって、人工的に曲げ振動を発生させる方式である。この曲げ振動は1つの振動だけでなく、複数の振動で決定するので、それらの振動波形を複数のバイブレータで振動させることにより、ダイアフラムの振動モードを周波数ごとに制御することが可能となる。その結果、放射音の指向性を変えることが可能となる。この方法に関する実現可能性を調査するために、我々は、平板振動について議論するための最も典型的な形の1つである円平面板ダイアフラムと3個のバイブレータを用いてプロトタイプ装置を開発した。そのプロトタイプの計測データを可視化することにより、放射指向性の変化を確認した。

We have developed a sound reproduction system that is able to control the directivity of the radiated sound. In the system, a bending vibration is artificially induced on a large planar diaphragm using multiple vibrators. Because the direction of the sound depends on the propagation direction of the bending vibration, the system is able to control the sound directivity by controlling the propagation direction of the bending vibration. In this paper, we demonstrated that (i) the bending vibration of the diaphragm is controllable by adjusting the phase of vibrations with each other and (ii) the radiated sound obtains directivity by a user using the algorithm we proposed.

[キーワード]

立体音響, 放射指向特性, 指向性制御, 忠実再生

3D audio, Multi-radiated acoustic, Multi-radial loudspeaker, Presence

1 まえがき

ほとんどの研究者は、スピーカが無指向性であることを必要とする。なぜならば、そのようなスピーカを点音源であると仮定し、それが音響学で最も重要な物理的なモデルの1つであるからであると考えているからである。しかし、実際にはバイオリンやギターを含むほとんどの楽器が、そのような無指向性の音を発生させることはなく、音を発生させると共鳴ボディーなどの響板は表面上の各場所で異なった振動が発生し、いろいろな方向に異なる放射指向性を持つことが確認されている[1]。すなわち、各場所から発生した音は他の場

所からの発生した音と競合し、響板から放射された全ての音は、方向と周波数において異なる様々なスペクトルパターンを発生させることになる。この指向性放射により、壁や他の物で反射した音が、様々な異なる方向から音が伝達してくるようには人は知覚する。Weinreichはこの特徴を「方向の音色」と命名した[2]。彼は「方向の音色」で周波数ごとに放射指向性パターンが異なるので、音を連続して発音する既存の一般的なスピーカでは現実的なバイオリン音を再生するのが難しいと述べている。

このような放射指向性を実現するために、Mayerはスピーカアレイの導入を試みた[3]。各ス

ピーカから発音された音は、他の発音された音で妨げられることにより、放射指向性ビームが形成されると考えた。しかし、この方式のスピーカアレイシステムでは、すべてのスピーカユニットが完全に同じ周波数特性である必要があり、それは非常に困難であり、実現不可能と考えられている。さらに、各スピーカユニットの位相を同期し、発音制御が可能なマルチチャンネルオーディオ・システムは、まだ非常に大きく高価である。この問題に対して、我々は大きな平面ダイアフラム上に曲げ振動を発生させることにより、音の放射指向性を実現するシステムを開発した。

本システムは、複数のバイブレータを同期し、独立にダイアフラムを振動させ、周波数ごとに曲げ振動を変化させ、この曲げ振動の変化により、放射音の指向性を変化させることが可能となる。この方式により、あらかじめ振動させている振動と放射音の指向性の間の関連性の参照テーブルを得ることができれば、その参照テーブルに従って対応する振動を制御することにより、放射音の指向性を制御できると考えられる。

本研究の第一歩として、平板振動について議論するための最も典型的な形の1つである円板を有するプロトタイプ装置を構築し、本方法に関する実現の可能性を調査した。その結果、3個のバイブレータによりその振動位相を変化させ、ダイアフラムの表面振動と放射音を測定し、振動している振動モードにより、その表面振動と放射指向性が変化するのを目視により確認したので報告する。

2 平板振動による音の放射指向性

ここでは、平板の伝搬波と定常波に関する2つの曲げ振動より放射された音の方向性に関して議

論する。波が無限板で伝播されていると仮定すると、デカルト座標系 (x, y, z) において、板の表面座標を $z = 0$ と定義すると、波の進行は角速度 ω で x 方向に伝播する。

板の伝播波速を v_p (波長は λ_p と等しい)、音速を v_a (波長は λ_a) とする。波が板を λ_p でポイント A から移動している間、ポイント A で放出された波は、 v_a を移動する。 v_p が v_a より大きいとき、放出された波は $\cos \theta$ が v_a/v_p と等しいときの音として指向性放射を形成しているのが図 1(a) に同じ線で補強され示してある。逆に、 v_p が v_a より小さいとき、放出された音は均等し、その音は図 1(b) に示されているようにほとんど放射されない。

定常波は、逆位相の2つの進行波の組合せで、一定の位置に残っているように見なされる波である。従って、2つの進行波による放射の組合せにより音の放射を得ることができる。 v_p が v_a より大きいとき、先に述べたように、進行波は角度 θ により音を放射する。2つの進行波が定常波を形成するとき、その放射は空気に干渉してビーム放射を形成する。逆に、 v_p が v_a より小さいとき、その放射は非常に少ない。

バイオリンの共鳴ボディのような薄板の波は「屈曲波」とされている [4][5]。その運動方程式は、

$$\nabla^4 \eta \frac{3\rho(1-s^2)\partial^2 \eta}{Qh^2} = F \quad (1)$$

であり、ここで、 ρ は素材の密度、ポアソン比 s 、ヤング率 Q 、 h はプレートの厚さの半分、時刻 t 、 F はプレートに作用する力とする。 $\nabla_4 = \nabla_2 \nabla_2$ であり、 ∇ は 2 がラプラシアンオペレータであり、板が自由に振動するときの方程式は (1) において、 $F = 0$ である。倍音を決定する、 η は (x, y) をデカルト座標系とし、 ω は角速度である $Z(x, y) e_{j\omega t}$

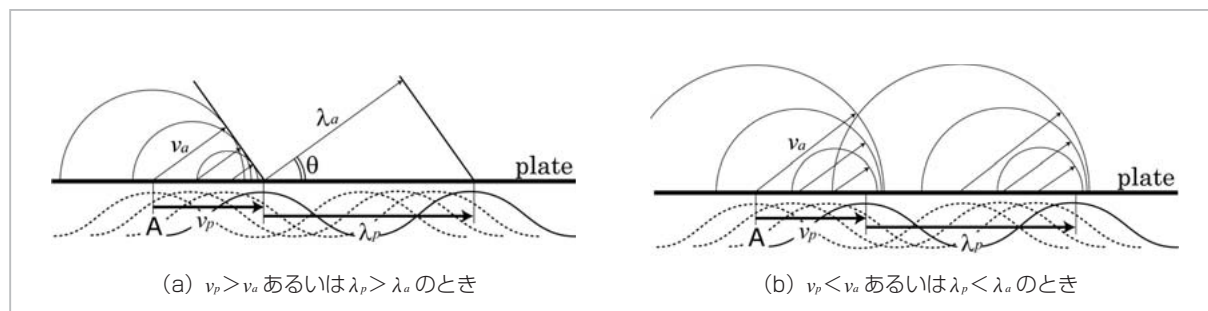


図 1 板上の曲げ振動による音の指向性

と等しく、 Z は微分方程式(2)で示され、

$$\nabla^4 Z - \frac{3\rho(1-s^2)\omega^2}{Qh^2} Z = \nabla^4 Z - k^4 Z = 0 \quad (2)$$

となり、

$$k^2 = \frac{\sqrt{3}\omega}{h} \sqrt{\frac{\rho(1-s^2)}{Q}}$$

である。

板の屈曲波は負荷が少なく、それらの速度 v は周波数に依存し、

$$v(f) = \frac{\omega}{k} = \sqrt{2\pi fh} \left(\frac{Q}{3\rho(1-s^2)} \right)^{-1/4} \quad (3)$$

で表される。

従って、そのような薄板の屈曲波の速度はそれらの周波数の平方根に比例する[4]。よって、そのような板上で伝播する複合波がしばしば発生する。そして、そのような板は、同時に異なった周波数の強さと放射パターンを放射する。我々は、このような音を放射するために。これらのメカニズムを用い、図2で示すシステムとして、複数のバイブレータを用い、ダイアフラムにおける人工的な曲げ振動を構築した。振動させる振動波形を制御することによりダイアフラムの振動モードを制御し、さらに、この曲げ振動が1だけではなく、振動全てでも制御可能とした。その結果、音の放射指向性を、上で述べたメカニズムにより実現させることが可能となった。

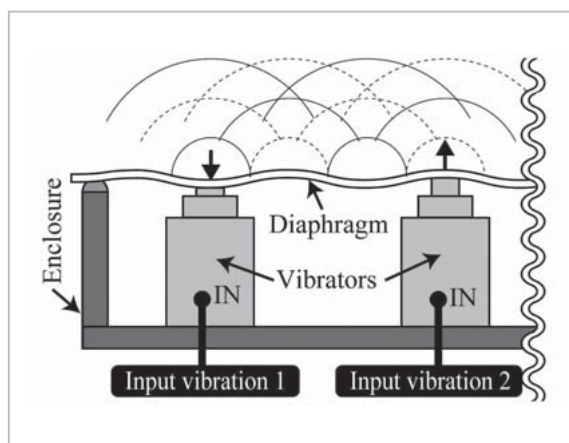


図2 複数の振動子を用いた曲げ振動発生装置

3 システム構成

提案した方法を評価するため、我々はプロトタイプ装置を構築した。図3(a)にプロトタイプ装置の画像を示す。このシステムは半径150 mm、厚み2.9 mmの単一円形ガラス板からなるダイアフラムを有する。また、図3(b)に示したとおり、お互いから等しい距離間隔で半径75 mmの磁歪振動子(Fostex GY-1)を3個有し、それはナットによりしっかりとダイアフラムに固定させている。本システムは、同期独立した信号を再生可能なオーディオ装置(ローランドUA-1000)により稼働し、ASIOを通してコンピュータ制御可能である。そして、PC上のMATLAB(各バイブレータのために I_1 、 I_2 、および I_3 を定義した)を使用することで振動子を振動させ波を発生させた。

ダイアフラムの後部から漏れる、位相が異なる音の干渉を防ぐために、本システムは深さ150 mmのエンクロージャを有する。ここで、ダイアフラムの縁を自由に振動させるため、ダイアフラムとエンクロージャには0.5 mのギャップを存在させた(将来、このギャップは一般的なスピーカのように封をされるべきである)。また、ダイアフラムはバイブレータだけで支えられている。

4 ダイアフラムの曲げ振動の測定

3個のバイブレータが異なった位相で作動したとき、ダイアフラムの曲げ振動がどう変化したかを調査するため、 19×15 マトリクスポイントを、ダイアフラム面から1.5 cm離れた地点を2 cm間隔で、その音圧を測定した。

図4から図7は、バイブレータ1(I_1)とバイブレータ2(I_2)のみが作動し、バイブレータ3(I_3)は停止している状態時の測定面に関する音圧マップ

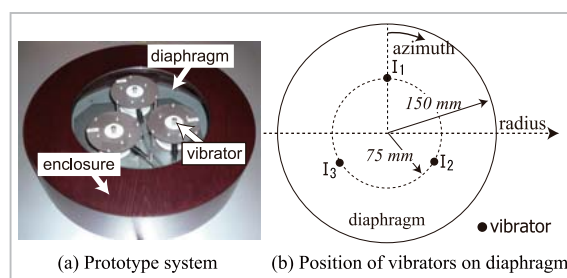


図3 構築したプロトタイプシステム

ング(以降、SPMとする)を示している。測定面がダイアフラム面に非常に近いので、ダイアフラム面の振動速度に比例している値として測定音圧を想定した。図4と図5は、 I_1 と I_2 が1 kHzの正弦波とその逆位相で、それぞれ動作したある期間のSPMの変化を示してある。図6と図7は、 I_1 と I_2 が2 kHzの正弦波とその逆位相で、それぞれ動作した期間のSPMの変化を示してある。 I_3 はすべての場合で動作させていない。これらの図では、黒線で示された領域はダイアフラムに対応し、ラベルされた位置はパイプレータ設定位置に対応している。赤、緑色、そして青い領域は、振幅が特定の瞬間にそれぞれ標準位置、それよりマイナス、そし

てそれよりプラスであることを意味する。図4と図5、あるいは図6と図7のいずれかを比較すると、SPMがかなり大きく変化していることがわかる。 I_1 と I_2 が1 kHzの同位相で動作したとき、ダイアフラムのセンター部はかなり振動した、また I_1 と I_2 が逆位相で動作したときは、センター部はほとんど同位置であった。 I_1 と I_2 が2 kHzの同相で動作したとき、平板振動は6つの山があるが、 I_1 と I_2 が逆相で動作したときは4つの山しかなかった。

これらの結果は、加えている振動の位相変化でダイアフラムの曲げ振動を変えることができるという事実の結果と考えられる。ダイアグラム上に起こる振動モードの変化をダイアフラムの形

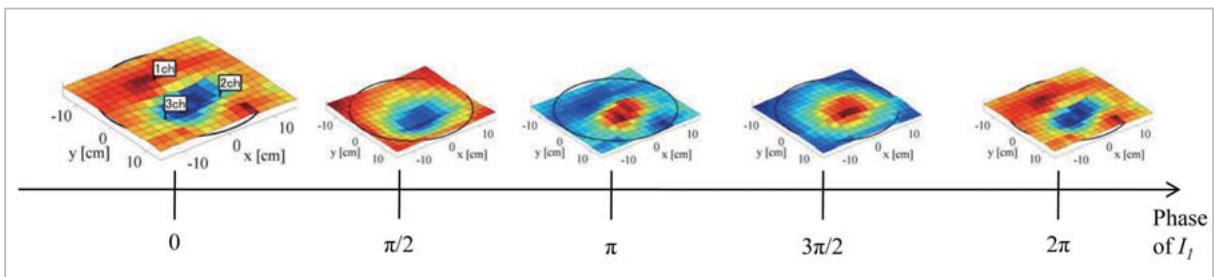


図4 I_1 と I_2 が1 kHzの同位相で動作した時の音圧分布

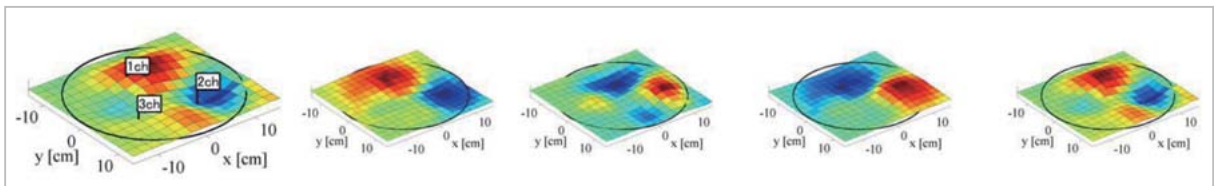


図5 I_1 と I_2 が1 kHzの逆位相で動作した時の音圧分布

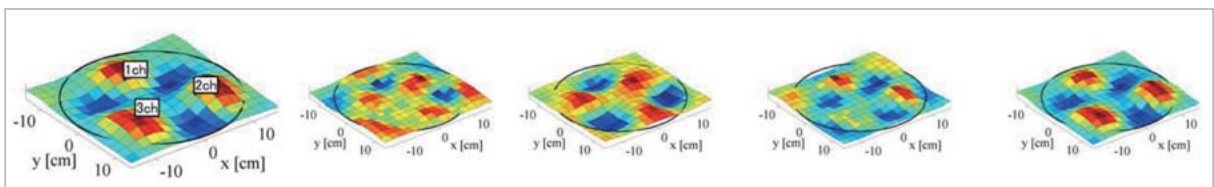


図6 I_1 と I_2 が2 kHzの同位相で動作した時の音圧分布

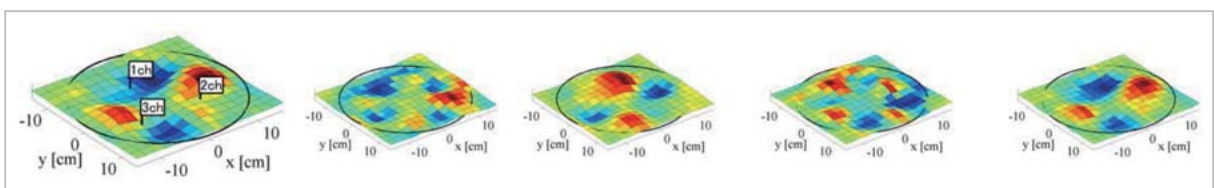


図7 I_1 と I_2 が2 kHzの逆位相で動作した時の音圧分布

状、バイブレータの数、および振動の設定位置に依存すると仮定することが可能であることが容易にわかる。多数のバイブレータがダイアフラム上で、より多くの種類の振動モードを発生させることが期待できる。近い将来、我々はユーザがシステムに対して、右から左に音が放射するように指定できるように、これらのパラメタを決定する要因を発見する必要がある。しかしながら、この研究の第一歩として本論文では、図3で示したプロトタイプ装置を用いて、特定のパラメタの下で放射音指示の制御可能性を明らかにする。

5 ダイアフラム面からの放射音の測定

加振している振動位相を変化させたとき、ダイアフラムの振動モードが変化することを先に述べた。では、この場合、変えられた放射音はどのようなになっているのであろうか？

そこで、ダイアフラム面の中心から半径 50 cm の半球上の境界面でその放射音を測定した。測定位置は 10 度間隔で高度角度、5 度間隔で円周とし、合計 720 点を測定した。

図8はその測定実験の写真である。図8に示されているように、10個のマイクロホン(DPA 無指向性小型マイクロホン Type4060)を、高度角度にダイアフラムの中心から高度角度 10 度ごとに配した。これら 10 個のマイクロホンにより、放射音を加振した振動と同時性に記録した。このプロトタイプ装置は回転テーブルに設置され、そのテーブルを 5 度ずつ回転させることによって、全ての測定点を測定した。

放射音の音圧マッピング(以後、RSPMs とする)を図9と図10に示す。図9は、 I_1 と I_2 が

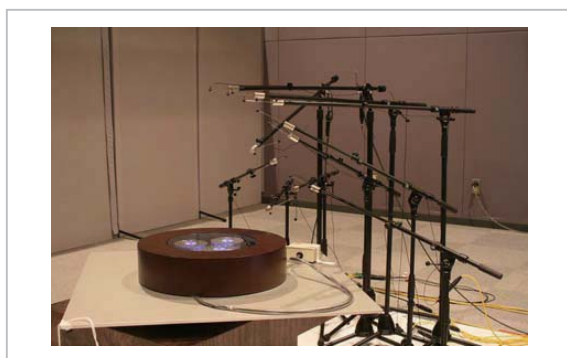


図8 ダイアフラムからの放射音を測定する装置

1 kHz の (a) 同位相の正弦波、(b) 位相差 $3/4 \pi$ 、(c) 逆位相で動作させたときの 1 kHz のサブサウンドの RSPMs を示している。図10は、 I_1 と I_2 が 2 kHz の (a) 同位相の正弦波、(b) 位相差 $3/4 \pi$ 、(c) 逆位相で動作させたときの 2 kHz のサブサウンドの RSPMs を示している。いずれの場合も、 I_3 は動作させていない。これらの図中において、有色の領域は測定半球の表面を表している。図中において、バイブレータ I_1 、 I_2 、および I_3 の位置 (x, y, z) は、 $(0, 7.5, 0)$ 、 $(7.5 \times \sin(1/3 \pi), -7.5 \times \cos(1/3 \pi), 0)$ 、および $(-7.5 \times \sin(1/3 \pi), 7.5 \times \cos(2/3 \pi), 0)$ をそれぞれ表している。赤、緑、そして青い領域は音圧をデシベルで表し、それぞれ境界面から高い、同位置、低いを表している。青い領域は、赤い領域の音圧レベルより 10 dB 高いことを意味する。

それぞれの図中において、(a)、(b)、および(c)を比較すれば、RSPMs が変化していることがわ

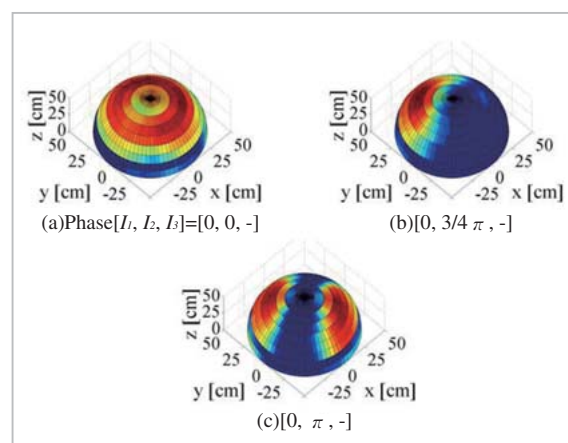


図9 1 kHz における放射音の音圧分布

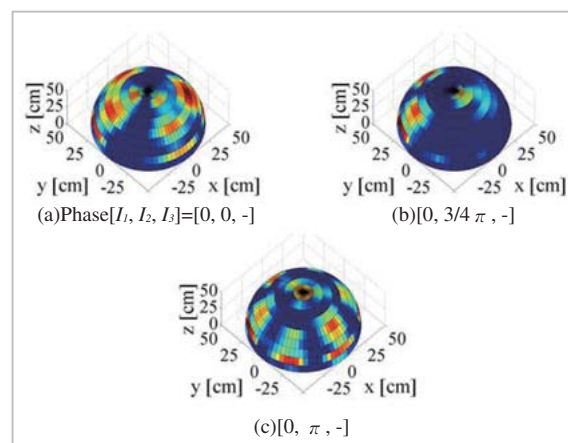


図10 2 kHz における放射音の音圧分布

かる。図 9 において、1 kHz のサブサウンドに関して示されているように、(a) I_1 と I_2 を同位相で動作させたときは、ほとんど同じ音圧レベルで全ての方向に向かって音が放射され、(b) I_1 と I_2 が $3/4\pi$ の位相差で動作させたときは、左側は右側より音圧レベルが大きく音が放射されていることがわかる。図 10 において、放射音の音圧レベルは 2 kHz のサブサウンドは、1 kHz よりきめ細かく異なっていることがわかる。図 10 において、(a) I_1 と I_2 を同位相で動作させたとき、同じ音圧レベルで 6 つの方向に向かって音が放射され、(b) I_1 と I_2 が $3/4\pi$ の位相差で動作させたときは、左側が右側よりかなり大な音を放射していることがわかる。

これらの結果は、加振する振動の位相変化で放射音の指向性を変えることができるという結果と考えられる。さらに、1 kHz と 2 kHz のサブサウンドの RSPMs を比較すると、より高周波のほうが変化させやすいことがわかる。

6 考察

6.1 放射音の特性

現在のところ、ほとんどの音響研究者が要求しているひずみなしであらゆる音を再生させるスピーカとして、提唱しているシステムは適切ではない。提唱したこのシステムにおける放射音の波形と周波数スペクトルを図 11 に示しておく。この図は、バイブレータ I_1 と I_2 を 1 kHz の正弦波を同位相で動作させたとき、ダイアフラム面の中心から 50 cm 離れた距離における値である。図 11 に示すように、再生する音は 1 kHz の正弦波にも

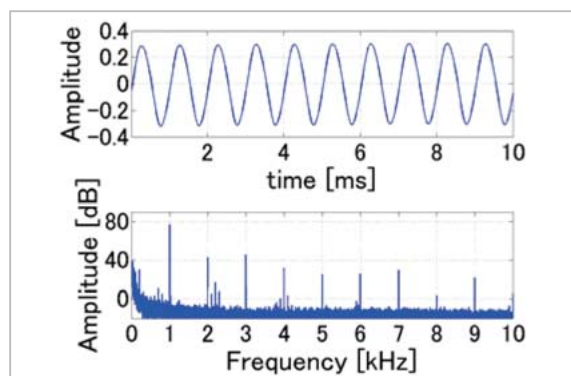


図 11 I_1 と I_2 を 1 kHz の正弦波により振動させた時の放射音

かわらず、その発音は倍音も付加されていることがわかる。この倍音は、正弦波において 200 Hz から 2 kHz まで常に発生することがわかった。

従って、提唱したシステムは人間の言葉のような、あるいは楽器と同じ音の発生メカニズムを持っているので、そのような音を再生させるのに利用できるのではないかと考えている。

6.2 倍音の放射指向性制御

倍音の放射指向性制御は、他の倍音と独自に制御することが可能である。バイブレータがある位相違いの PD_m により F_m Hz で振動させたとき、振動モード M_m がダイアフラム上を F_m Hz で振動すると仮定する。さらに、振動モード M_{mn} ($n = 2, 3$) でダイアフラムは倍音を含み、 $n \times F_m$ Hz で振動する。

ここで、バイブレータが PD_p で F_p Hz、および PD_q で $F_q = 2 \times F_p$ Hz の両方の正弦波で振動するならば、2 の異なった振動のモードの M_{p2} と M_q は同じ周波数 $F_q = F_{p2}$ で衝突する。しかし、図 11 で示されているように、倍音の強さは基本周波数より低いことがわかっている。従って、周波数 F_q がダイアフラムの固有振動の 1 つである場合を除いて、バイブレータはそのダイアフラムを PD_q において M_q で十分な音圧で振動させることが可能である可能性がある。

この仮定を確認するため、1 kHz と 2 kHz の単一の正弦波による振動で RSPMs を比較した。この実験では、測定 RSPMs のために以下の振動を加えた。

[A-1. S-1-norm] I_1 と I_2 を 1 kHz の同位相で振動させたとき。

[B-1. S-1-rev] I_1 と I_2 を 1 kHz の逆位相で振動させたとき。

[A-2. S-2-norm] I_1 と I_2 を 2 kHz の同位相で振動させたとき。

[B-2. S-2-rev] I_1 と I_2 を 2 kHz の逆位相で振動させたとき。

[C. M-1-norm-2-norm] I_1 を 1 kHz の同位相、 I_2 を 2 kHz の同位相で振動させたとき。

[D. M-1-rev-2-norm] I_1 を 1 kHz の逆位相、 I_2 を 2 kHz の同位相で振動させたとき。

[E. M-1-norm-2-rev] I_1 を 1 kHz の同位相、 I_2 を 2 kHz の逆位相で振動させたとき。

表 1 1 kHz のサブサウンドにおける測定 RSPMs 間の相関係数

	A-1	B-1	C	D	E	E
A-1	1.000	0.172	0.964	0.225	0.964	0.224
B-1	0.172	1.000	0.127	0.905	0.128	0.900
C	0.964	0.127	1.000	0.171	0.999	0.170
D	0.225	0.905	0.171	1.000	0.12	0.999
E	0.964	0.128	0.999	0.172	1.000	0.171
E	0.224	0.900	0.170	0.999	0.171	1.000

イタリック体（アンダーラインにおいても）は、バイブレータは 1 kHz の同位相（逆位相においても）で動作していることを表す。

表 2 2 kHz のサブサウンドにおける測定 RSPMs 間の相関係数

	A-2	B-2	C	D	E	E
A-2	1.000	0.112	0.870	0.869	0.147	0.158
B-2	0.112	1.000	0.140	0.139	0.891	0.896
C	0.870	0.140	1.000	0.997	0.170	0.183
D	0.869	0.139	0.997	1.000	0.169	0.182
E	0.147	0.891	0.170	0.169	1.000	0.995
E	0.158	0.896	0.183	0.182	0.995	1.000

イタリック体（アンダーラインにおいても）は、バイブレータは 2 kHz の同位相（逆位相においても）で動作していることを表す。

[F. M-1 -rev-2 -rev] I_1 を 1 kHz の逆位相、 I_2 を 2 kHz の逆位相で振動させたとき。

I_3 はすべての場合で動作させていない。1 kHz と 2 kHz のサブサウンドにおける測定 RSPMs 間の 2 次元相関係数は表 1 と表 2 に、それぞれ示されている。表に示した通り RSPMs により、バイブレータが 1 kHz (2 kHz においても) の同位相で動作させたとき、その 1 kHz (2 kHz においても) のサブサウンドと他の倍音との位相変化は、互いに非常に強い相関関係を持っていることがわかる。これは、放射音が多く倍音で構成されるとき、他の倍音からそれぞれの指向性を独自に制御できると考えられる。

参考文献

- 1 Kenneth D. Marshall, "Modal analysis of a violin," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 77, pp. 695-709, 1985.
- 2 G. Weinreich, "Radiativity revisited: theory and experiment ten years later," *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference*, pp. 432-437, 1994.
- 3 D. G. Mayer, "Multiple-beam, electronically steered line-source array for sound-reinforcement applications," *Journal of the Audio Engineering Society*, pp. 347-249, 1990.

7 まとめ

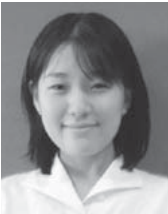
本論文において、放射音の指向性を制御するための新しい方法を提案した。提唱したシステムは、複数のバイブレータを用いて、円形平面ダイアフラムを振動させることによって、曲げ振動を人工的に発生させることを可能とした。さらに、この曲げ振動だけではなく、振動させる振動波形を全て制御することによってダイアフラムの振動モードを制御する方式とした。その結果、放射音の指向性を変化させることを実現した。

平板振動について議論するための最も典型的な形の 1 つである円板を用いて、円形平面ダイアフラムと 3 個のバイブレータによるプロトタイプ装置を構築し、本方式に関する実用可能性を調査した。

その 3 個のバイブレータにより振動位相を変化させ、そのダイアフラムの表面振動を測定した結果、振動モードの変化により、表面振動と音の放射指向性が変化することを確認した。

本システムにおける放射音は、常に倍音を含んだ音の発生メカニズムを有しているため、提唱したシステムは、楽器や人間の言葉等の発音メカニズムによる発音を再生させるのに利用することが可能である。さらに本論文では、振動させる振動モードを変化させることにより、それぞれの倍音を含んだ周波数の放射指向性をほぼ独自に制御できる可能性を示した。我々は既に [6] において位相変調アルゴリズムを提案している。今後の課題として、本方式の実用化のため、ダイアフラムのサイズを含むシステムのより良い構成として、形状、厚さ、および材料を決定する方法論、バイブレータの個数、およびその設定位置などを研究する予定である。

- 4 Neville H. Fletcher and Thomas D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, 2nd edition, Springer, pp. 76–78, 2005.
- 5 Lord Rayleigh, *The Theory of Sound*, Vol. I, p. 352, 1894.
- 6 Yoko Yamakata, Michiaki Katsumoto, and Toshiyuki Kimura, "Directional sound radiation system using a large planar diaphragm incorporating multiple vibrators," *Proceedings of ICASSP2008*, AE-P6.D4, 337–340, 2008.



ヤマカタ ヨコ
山肩洋子

京都大学 博士(情報学)
立体音響、映像情報システム



カツモト ミチアキ
勝本道哲

ユニバーサルメディア研究センター
超臨場感基盤グループ主任研究員
工学博士
立体音響