

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

山 肩 洋 子[†] 勝 本 道 哲[†] 木 村 敏 幸[†]

我々は、面が振動することにより音を発する発音体の音響を再生するため、その二次元的な面の振動を再現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し、それにより放射される音響は多様な指向性を持つ。特に発音体から数メートル程度の近距離場ではこの放射指向性の影響が密であり、この音響放射特性を再現することが臨場感の向上につながると考える。本稿ではまず、ヴァイオリンを例に上げ、発音時の表板の振動を計測した波形に基づき放射音を算出することで、その放射音が多様な指向性を持つことを示す。次に、多様な面振動の放射音響を再現することを目的とし、振動板上の複数点に加振装置を設置して同期独立に強制振動させることにより、2次元的な面振動を制御する音響装置の提案を行う。

Characteristic Analysis and Reconstruction of Acoustic Near-field Radiated from an Object Surface

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

We are constructing a sound reproduction system whose diaphragm duplicates a vibration mode of a surface of an original sounding body for reconstructing its sound radiation. When an object makes sounds, the surface vibrates differently from part to part. Therefore the sound has various directivity patterns that may cause the reality of the sound especially in near-field. In this paper, as a concrete instance, we show the sound radiation of a violin in near-field calculated with observed vibration waveform at the surface of the resonant body. Then, we propose a new sound reproduction device whose diaphragm is vibrated by multiple actuators and control the surface vibration mode.

1. はじめに

我々は、面が振動することにより音を発する発音体の音響を再生するため、その二次元的な面の振動を再現する音響装置の研究を行っている。

物体が発音するとき、その物体のどこか1点のみが振動するのではなく、程度の差はあっても物体表面全てが振動する。このときこの表面は、全面が同波形・同位相で振動することはあまりなく、場所によって異なる波形で振動することが多い。このような振動面から放射される音は、周波数によっては角度や数の異なるビーム波を形成する。面の振動の様相は物体の形や

材質によっても変化することから、物体表面から放射される音は多様な放射指向性を持つ。

観測点が1点、あるいは高々両耳間隔程度の狭い範囲であり、発音体が相対的に遠いあるいは小さい場合には、直接波におけるこのような音響放射指向性は無視できるため、発音体は点音源とみなしてよい。しかし、発音体に対し同時に様々な方向から聞く場合や、発音体が相対的に近いあるいは大きい場合、またコンサートホールのように反射波の影響が大きい環境で聴く場合には、発音体の音響放射指向性を再現しなければ、観測者は実音源との相違に気づき、違和感を覚えると考ええる。

そこでまず、面振動を主たる発音原因とするヴァイオリンを例にあげ、実際の発音体が多様な様相の面振動と音響放射指向性を持つことを実測値に基づくシミュレーションにより明らかにする。

その後、多様な面振動の放射音響を再現することを目的とし、振動板上の複数点に加振装置を設置して同

[†] 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

期独立に強制振動させることにより、2次元的な面振動を制御する音響装置の提案を行う。

まず2章では、振動板の振動が放射する音響特性について、進行波と定常波に分けて整理する。3章ではヴァイオリンを具体例に取り上げ、共鳴胴の振動を計測し、放射音をシミュレートする。4章では複数の加振装置を付加した振動板による音響装置の提案を行う。5章では関連研究について述べ、最後に6章でまとめを述べる。

2. 面振動による音響放射

本章では、平板が振動することで発生する音響放射について基本的な解説を行う。波の種類として、進行波と定常波を分けて議論する。

2.1 進行波の音響特性

まず、薄板が無限に広いと仮定し、そこを直進する振動による音響放射について述べる。

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。その角度を θ とすると

$$\cos(\theta) = \frac{v_a}{v_p}$$

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。

共鳴胴のような薄板が音を発生するとき生じる振動は“たわみ波”であるが、このたわみ波の速度は周波数の平方根に比例するため、どのような薄板でも一定値より高い周波数の波は伝搬速度が音速を超える。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、その伝搬速度が $v_p > v_a$ となるより高い周波数の音のみが放射される¹⁾。

2.2 定常波の音響特性

定常波は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も可能であるが、より直観的に理解するため、無限のバツフル面上に周辺を固定した円形の振動板を設置するという想定のもと、その振動板に印加された定常波とその放射音をシミュレートした。

ある振動板について、定常波が発生する周波数を固有周波数と呼び、そのとき面上に印加される振動姿

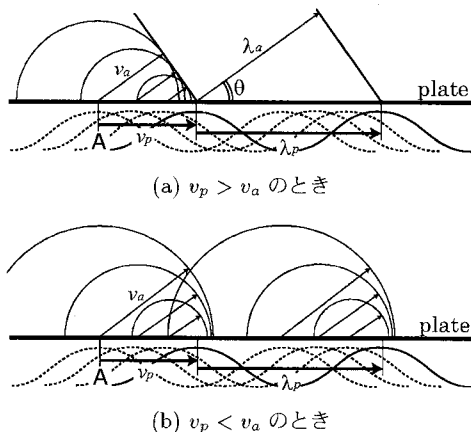


図 1 進行波の放射音

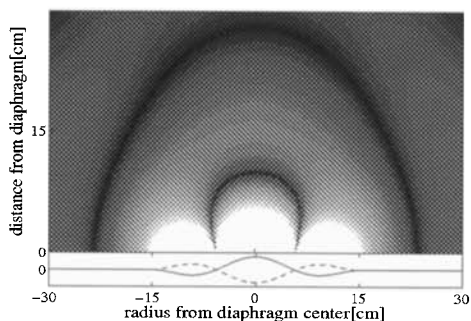
態を振動モードと呼ぶ。周辺固定の円形振動板では、動径方向と偏角方向にそれぞれ $(0,1)$, $(1,1)$, $(2,1)$, $(0,2)$, $(3,1)$ といった数の腹をもつ振動モードが存在する。

²⁾ に基づき算出した円形振動板の固有振動モードとその放射音のシミュレーション結果を図 2(a),(b) に示す。図中、下の線グラフは振動板上に印加された“たわみ波”の様相を示しており、振動板中心から偏角 0 度の軸上における、振動板の面方向の変位を意味する。上の濃淡図はその垂直方向の音響放射を示しており、明度は音圧の絶対値を指し、黒い部分が節、白い部分が腹である。

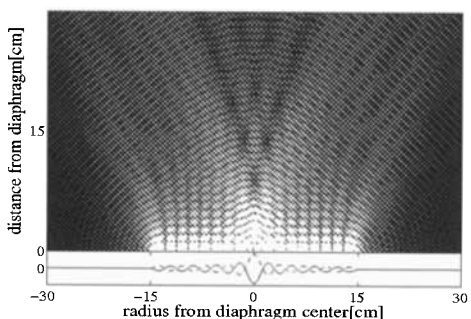
固有周波数や振動モードは振動板の厚みと半径、材質のヤング率、ポワソン比、密度に依存して変化するため、ここで示したシミュレーション結果は一例に過ぎないが、重要なのは、高い固有周波数ほど定常波の腹の間隔は狭まるが、それよりも空気中の波長が短くなる比率のほうが大きいいため、一定値より高い固有周波数では空気中の波長が定常波の腹の間隔より短くなるという点である。これは、前節において“たわみ波”の伝搬速度が音速を超える現象に対応している。

空気中の波長 λ_a が定常波の腹同士の間隔 λ_p より長い場合は図 2(a) のように全方向に音が放射するが、その逆の場合は図 2(b) のようにビーム状に放射し、エネルギーの拡散も少ない。

以上で代表的な 2 種類の波について個別に述べたが、実際の発音体はこれらが周波数ごとに混ざり合った波が振動板上に印加している。よって放射指向性は周波数によってさまざまに変化し、近接における直接音、あるいは遠隔における反射音を聞く際には、聴感



(a) $\lambda_p < \lambda_a$ のとき



(b) $\lambda_p > \lambda_a$ のとき

図 2 進行波の放射音

上にも重要な影響を及ぼすと考えられる。

3. 楽器の共鳴胴の振動と放射音

前章では、振動板が単一周波数で振動するときの音響放射について述べた。しかし楽器に代表される現実の発音体の多くは、基本周波数とその倍音を基本とする複数の周波数の波からなる複合波を振動面に印加しており、その音響放射も複合的なものとなる。そこで面振動を主たる発音源とする発音体が、実際にどのような音波を発するかを議論するため、ヴァイオリンを具体例に取り上げて放射音の分析を行った。

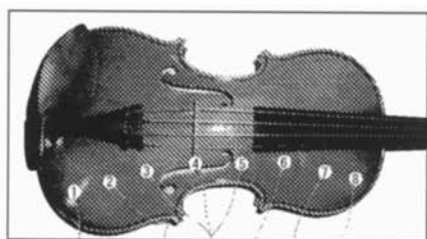


図 3 共鳴胴表面板上の振動計測点

計測実験では、ヴァイオリンの弦の中で最も低音の G 弦 (約 195Hz) と、最も高音の E 弦 (654.4Hz) を、それぞれ開放 (弦を指で押さえない状態) で、音圧ができるだけ一定になるよう一弓で弾いた。このとき、共鳴胴の表面板に生じた振動を、8ch の加速度検出器を用いて計測した。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 形式に変換した。サンプリングレートは 51kHz であった。楽器表面板上における 8 個の加速度検出器の設置位置は図 3 に示すとおりである。

まず、G 弦、E 弦それぞれの開放弦音により観測された波形の一部を図 4 に示す。図中、横軸は加速度検出器のチャンネル番号、縦軸は時間 (サンプル番号) で、濃淡値は振動面に垂直な方向の変位 (黒が正、白が負で、全 8ch のデータ内で正規化した) を表す。この図によると、弦の振動を共鳴胴に伝える役目を持つ”駒”に最も近い ch4 の検出器を中心に、振幅の大きい波が左右に伝搬する様子が見てとれる。これは、振動の位相が場所によってずれていることを意味する。また波形も、4ch は低周波成分が強いが、8ch は高周波成分が強いなど、チャンネルごとに大きく異なっている。

以上のことから、ヴァイオリンの表面板は場所によって異なる波形で振動して音を発していることがわかった。そこで次に、この計測値をもとに、この音源が放射する音が観測者の両耳それぞれに到達したときの波形を算出した。

今回の計測法ではヴァイオリン表面の連続的な振動を計測することはできないため、仮想の発音体として、上で計測した 8ch の振動波形をそれぞれ出力する 8 個の点スピーカを、振動計測時の間隔と同じ約 4.5cm 間隔で無限バツフル面上に並べたラインレイスピーカを想定した。残響はなく直接波のみとすると、観測点での波形は、8 個のスピーカの波形を、そのスピーカからの距離に基づく距離減衰と到達遅延を加味して重ね合わせた波形となる。この条件は実際の環境におけるヴァイオリンのものとは大きく異なるが、ライン音源に直交する方向への放射音であれば条件の違いによる影響は同程度であり、内部比較するには問題ないと考える。

ラインレイ中心からアレイに直交する方向に 10cm 刻みで 200cm までの距離における、17cm 間隔 (両耳の間隔に相当) の 2 点での受信波形のスペクトルを図

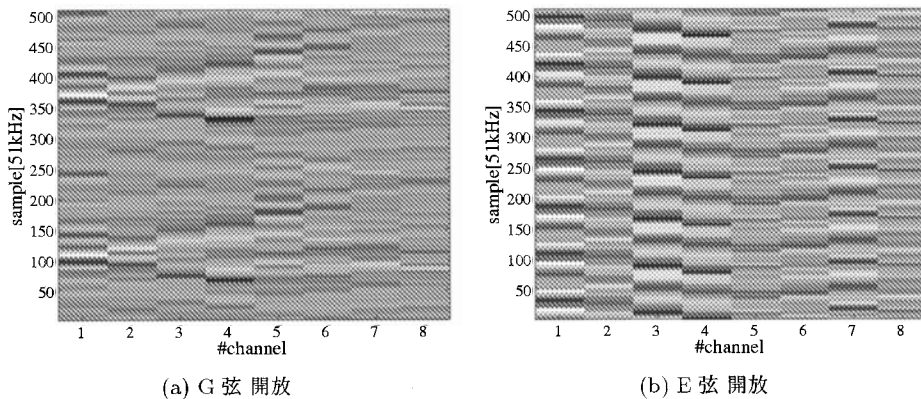


図4 共鳴胴表面板上8点における振動の振幅

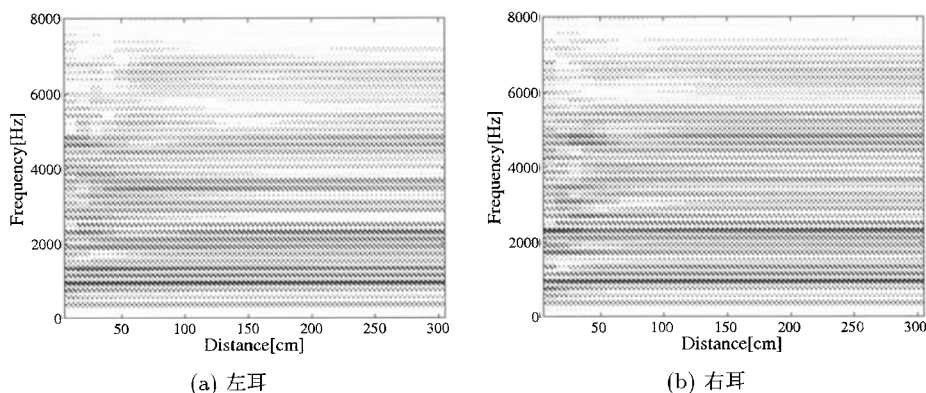


図5 観測点と受音のスペクトル (G弦開放)

5に示す。

どちらの耳の音も距離が50cmまでは距離によってスペクトルが大きく変化する。これは、音源の幅に対して観測点が相対的に近いため、チャンネル間での到達遅延の差が大きく、干渉がおきやすいためであり、これらの距離においては音像中心も定まらない。

さらに50~200cmの間でも、両耳の音のスペクトルが異なる。これは、ヴァイオリン程度の大きさの発音体に対し200cm以内の近距離場では、点音源とみなせないことを意味する。

ここで興味深いのは、片方の耳の音のスペクトルだけに注目した場合でも、距離によってスペクトルが変化することである。例えば図5(a)では、距離が140cm付近で5300Hz付近の周波数成分がなくなるが、距離170cmを過ぎたあたりで再び出現している。アレイのスピーカ間隔は高々4.5cm程度なので、本来連続面である楽器表面の振動を離散的なスピーカアレイで再現したことに起因するビーム放射が起こるのは低くみつ

もっても7kHz以上であることから、これは楽器面自身が持っていたビーム放射指向性と考えることができる*。

以上の分析から、ヴァイオリンの表板は場所によって異なる位相・振幅・周波数で振動し、そのためその放射音を近距離場で観測すると、その波形は両耳間でも異なるし、距離によっても変化することがわかった。この放射特性は音響の臨場感に強い影響を与えると考えられる。このような音響放射はヴァイオリンなどの楽器に限らず、机を叩く音や足音など面振動を発音源の一つとする発音体の多くに日常的に生じており、その再現を可能にすることは重要であると考えられる。

4. 複加振型振動板による音響生成

面が振動することにより音を発する発音体の放射音

* 1) によるとヴァイオリンの境界周波数は楕目で4870Hzとあるため、この推定は従来の計測結果に矛盾しない。

を再現するため、我々は放射音を直接再現するのではなく、発音体表面の二次元的振動様相を再現することを考えた。これを実現するため、加振装置により振動板上の複数点をそれぞれ異なる波形で強制振動させることにより、面上の振動を制御する音響装置の開発を行っている。

振動板の自由振動における固有振動数が振動板の形や材質によって決まるように、振動板を複数点で強制振動させる場合でも任意の面振動が再現できるわけではない。再現したい面振動の多様性に応じて、振動板の形や材質だけでなく加振装置の数や接着場所、加振する波形等を決める必要があるが、これらを直接求めるのは困難である。そこでまず、振動板の形と材質、加振装置の数と設置場所が決まったとき、各加振装置に加える波形を変えることにより面振動がどう変化するかの分析を行っている。装置のプロトタイプとして、厚さ 2mm、半径 150mm のガラスの円形振動板に、動径 r が 75mm、偏角 θ がそれぞれ 0 度、120 度、240 度の位置に ch1, 2, 3 の 3 つの加振装置を接着したものを考える。

この装置を有限要素法を用いた構造解析シミュレータ (ANSYS) によりモデル化した。ガラス板のヤング率は $8.01 \times 10^{10} [Pa]$ 、ポワソンは比 0.25、密度は $2400 [kg/m^3]$ とした。面の各部分の振動波形を比較するため、計測点を p1 ($r = 150, \theta = -\pi/2$)、p2(150, 0)、p3(150, $\pi/2$)、p4(150, π)、p5(0, -) の 5 点に設定した。200Hz の正弦波を (a) 1ch のみ加振、(b) 1,2ch に同相で加振、(c) 1,2ch に位相差 $1/2\pi$ で加振、の 3 つの場合における各計測点の波形を図 6 に示す。

この図によると、(a) から (b) へは加振点が 1 点増えただけにもかかわらず、p4 の位相が反転していることがわかる。また (c) においては、円周上の点である p1, p2, p3, p4 の波形をみると、位相が順番に変化しているのがわかるが、これは波が円周上を 1 周するような様相をとる。

以上で示した一例のように、加振する振動の波形をわずかでも変えれば面振動の様相は大きく変化する。この分析を様々な波形の組み合わせに対し網羅的に行うことにより、面振動の様相と加振波形との対応表を作成する作業を現在進めている。

さらに、上のようなシミュレーション結果が実際に実現可能であることを確かめるため、図 7 に示す試作機を作成した。加振装置には Fostex GY-1 を使い、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。この試作機において振動板上の振動を 8ch 加速度計測器で測定し、

シミュレーション結果と照合することが今後の課題である。

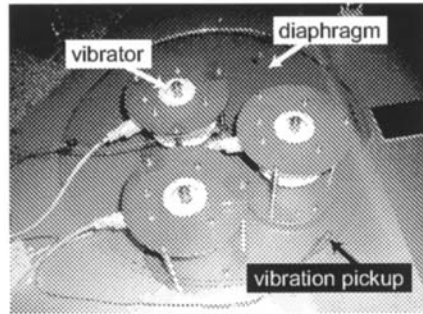


図 7 複数制御音響装置

5. 関連研究

楽器の発音原理やその放射音響特性については文献¹⁾によくまとめられている。この本で紹介されている文献³⁾では、ヴァイオリンやチェロなどの弦楽器の音響放射特性が周波数によって変化するため、弦楽器の配置がコンサートホールにおけるオーケストラ全体の音に影響することを示した。また⁴⁾では、音の高さによってその音の放射方向が変化するため、その反射音がやってくる方向もまたさまざまに変化する様子を "directional tone color" と呼び、これがラウドスピーカを使ってヴァイオリンの音を再生した際の違和感の要因になっていると推察している。我々は、このような音響放射特性の再生不良による違和感は楽器に限ったことではなく、特に近距離にある発音体 (例えば机の上におかれた携帯電話の発信音や、その発信音により印加させる机の振動による音など) の音再生には日常的に生じると考えている。

物体の複数点に振動が加えられた際の物体全体の振動および放射音解析に関する研究としては、騒音低減や構造の疲労・亀裂の回避などの視点から機械工学の分野で盛んに研究が行われている。⁵⁾では、設計段階で機械から発生する音を予測し、騒音の少ない構造あるいは形状に変更することを目的に音響放射パワーの推定を試みている。これらの研究は放射音の周波数や位相を制御することが目的ではないが、応用することは可能であると考えられる。

一般的なラウドスピーカは、振動板全面をできる限り同相で振動させることを目指すが、それとは逆に、振動板にモードをわざと印加させることにより音響放射を制御するスピーカとして、分布振動モード形ス

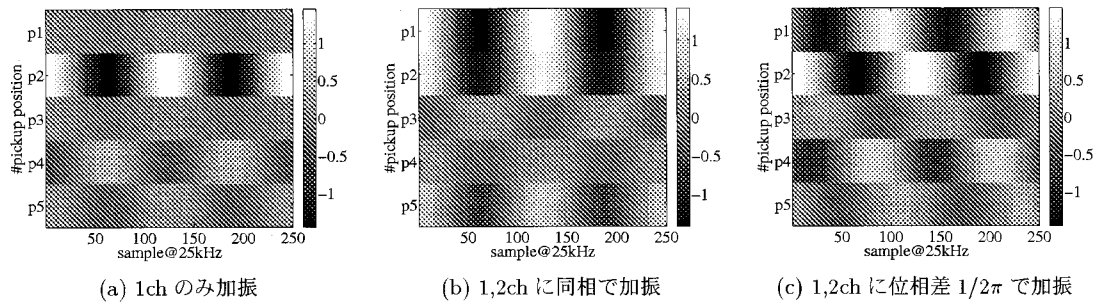


図 6 200 Hz の正弦波を加振した時の観測点波形

ピーカ (Distributed Mode Loudspeaker: DML) がある⁶⁾。このスピーカでは、振動板の形状や材質、また加振装置 (エキサイト) の設置位置に注目している^{8), 7)}では、このスピーカの放射音解析を行っている。我々の提案する音響装置と同様、このスピーカの振動板も複数の加振装置を持ち得るが、すべて同相・同波形で振動することを想定しているようである。

振動板に定常波が印加されたときの音響放射特性は、互いに隣り合うスピーカが逆相のスピーカアレイのそれに似通っている。スピーカアレイにおいて、一定間隔のスピーカおきに音を出力する、あるいはスピーカ間に適切な遅延を与えることにより、音響放射をコントロールする研究がおこなわれている⁹⁾。この方式では、スピーカの幅により音響放射を制御できる周波数が限られることや、スピーカ同士を近づけることによる磁力あるいは内部振動の影響が問題であると考えられる。

6. まとめ

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、それにより放射される音響は多様な指向性を持つ。特に発音体から数メートル程度の近距離場ではこの放射指向性の影響が密であり、それを再現することが臨場感の向上につながると考える。

そこでまず、面の振動を進行波と定常波に分類し、それらが空間中に放射する音響特性について理論を整理した。

次にヴァイオリンを具体例に上げ、発音時の面振動を計測した結果に基づき、近距離場における左右の耳に受音する音波を算出した。これにより、2m 以内の近距離場では左右の耳間で音のスペクトルが大きく異なること、またビーム放射に起因すると思われるスペクトルの欠損が生じることを示した。

最後に、多様な面振動の放射音響を再現することを

目的とし、振動板上の複数点に加振装置を設置して強制振動させることにより、2次元的な面振動を制御する音響装置の提案を行った。円形振動板上の3点に加える振動を変えると、振動板上の振動が多様に変化することをシミュレーション実験により明らかにした。

このシミュレーションを様々な加振波形の組み合わせに対し網羅的に行うこと、また実際に作成した試作機による実験結果と比較することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 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, 2002.
- 2) 早坂寿雄, 吉川昭吉郎: "音響振動論", 丸善株式会社, p.435-453, 1974.
- 3) 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), 1972.
- 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) 香川 美仁, 林 巖, 岩附 信行: "有限要素法による振動モード解析の音響放射パワー推定への応用", 日本機械学会論文集 (C 編), 63 巻 615 号, p. 128-135, 1997.
- 6) 河原 一彦: "Distributed Mode Loudspeaker(DML パネルスピーカ)", 日本音響学会誌 62 巻 11 号, pp. 798-801, 2006.
- 7) 緒方 洋介, 河原 一彦, 澤田 泰輔, 鶴 秀生: "分布振動モード形スピーカの音場解析", 信学技法 EA2004-101, pp.33-38, 2004.
- 8) 発明の名称: 音響装置, 特許権者: ニュートランス デューサーズリミテッド, 公開番号: 特表平 11-512249, 公開日: 平成 11 年 10 月 19 日, 国際出願番号: PCT/GB1996/002145
- 9) Jun Yang, Peifeng Ji, Xiaodong Li, Jing Tian: "TARGET-ORIENTED ACOUSTIC RADIATION GENERATION TECHNIQUES FOR THE SOUND REPRODUCTION" The Japan-China Joint Conference of Acoustics 2007, SS-1-4, 2007.