

# 異なる放射特性を持つ音響空間を実現するための球形スピーカの実装

勝本 道哲 山肩 洋子 木村敏幸

独立行政法人情報通信研究機構

本稿では、忠実な音響表現方式に関して述べる。これまでの臨場感音響技術は、音像中心が観測点に達するために研究されており、奥行き感や音像移動を実現していた。しかし、実際の発音体は、全方向に異なる周波数が異なる指向性を持って伝搬するので、その音響表現方法が必要である。そこで、異なる周波数を異なる方向へ放射するスピーカを試作し、その効果を確認した結果、従来の音響表現より現実感を得るには有効であることが確認できたので報告する。

## Development of Multi-Dimensional Speaker with Frequency Dependence of Directivity

Michiaki Katsumoto, Yoko Yamakata, and Toshiyuki Kimura

National Institute of Information and Communications Technology

We have been researched and developed near-field three-dimensional acoustic audio for ultra realistic universal media. Important research issues for near-field three-dimensional acoustic audio are follows, the first is realization of invisible speaker for the user. And the second is realistic acoustic representation of a acoustic audio. However, it is difficult to design of the acoustic system, because of human factor of the near-field acoustic audio sensitivity, and not exists measuring equipment of the human factor. Therefore, in this paper, we propose multi dimensional speaker with frequency dependence of directivity for near-field three-dimensional acoustic audio for the human factor measuring, and we also report development of the system.

### 1. はじめに

これまでの臨場感音響技術は、映画館等の大規模な空間における臨場感の確立を目指し、多チャンネル音響システムやその簡易版として5.1chシステムの研究が行われてきた<sup>[1]</sup>。また没入感システム等の利用を目的とする特殊システム等の研究<sup>[2,3]</sup>が行われてきたが、これらのシステムはある一定の範囲に音像定位、あるいは特殊な装置を装着することで臨場感を確立している。一方、我々の研究は、1mから2mの近距離音場において特殊な装置を装着せずに、原音に忠実な再生を実空間場で体積を持った立体音響を体験可能な超臨場感音響技術の確立を目指している。特に、電子ホログラフィ映像のような実空間場での立体映像再生に適した立体音響の技術の確立が望まれているのでこの技術の確立は重要であると考えている。

しかし、実空間上の立体音響技術の確立は非常に困難と考えられ、従来のラウドスピーカを用いずに実空間場に音場を再生する方式として、パラメトリックスピーカを用いた超音波の減衰を用いた音響場<sup>[4]</sup>等の研究が行われているが、それを検証するための計測技術や装置も存在していない現状では、実空間場で再現される音響に対するシステム実現に向けての要求仕様を決定することが困難であり、それらの技術が有効な解決方法であるかの判断も困難と考えている。また、近距離音場による人間の音響に対する感度の調

査はほとんど行われておらず、それを計測する装置も存在していない現状では、実空間場で再現される音響に対するシステム実現に向けての要求仕様を決定することが困難であり、それらの技術が有効な解決方法であるかの判断も困難と考えている。

一方、物理的に忠実な再現方式も現在さまざまな研究が行われているが、基礎段階であり、確実な発音の実現には至っていない。しかし、実空間上に音響を再現するにあたり、忠実な物理的音響表現が可能な技術は、さまざまな要素技術の解明につながると考えているので、これを解決することが超臨場感音響技術の実現に向けた優先課題であると考えている。

そこで、物理的に忠実な音響表現の人間からみた要求条件は何かを考察するにあたり、簡単な基礎実験を行った。その結果、物理的に忠実な再現は大きな効果が期待できることがわかり、それが超臨場感音響に結びつくのではないかと考えるようになった。

以下、本稿では、物理的に忠実な表現が超臨場感音響技術として有効性が高いことを実証するための基礎実験として、2章で本システムの提案の元となる基礎実験に関して述べ、本システムの要求仕様の考察する。3章では、その要求に基づくシステムの設計と構築、4章で簡易性能評価実験と結果に関して述べ、5章でまとめと今後の課題に関して述べる。

## 2. 基礎実験と考察

実空間場における近距離音場では、これまで視聴者は、ステレオあるいはマルチスピーカ等の音源からある程度の距離を置いて、大きな音圧での環境下にいたため、音像定位感や方向をある程度認識することができ問題はなかった。我々が行った基礎実験<sup>[5]</sup>では、近接になるとスピーカの存在を認識してしまい、自身の既存の知識と物体の形状が合わないことにより、違和感を感じるようになってきた。また、音の凹凸感、つまり発音源の形状も訓練すれば知覚できるようになることもわかってきた。従って、近距離場での音響再生には、物理的に忠実な音響表現が必要で、視聴位置において体積を持った音、例えば、異なる周波数放射指向性を有し、凹凸感を表現可能な音響再生方式を確立しなければならないと考える。

そこで、筆者らは、近距離場における物理的に忠実な音響表現技術として、

- 1 発音源の発音面の表現技術、
- 2 発音源の周波数放射指向性の表現技術、

が重要な技術課題であると考えた。発音源の発音面の表現方法を実現し、その有効性を確認する必要があり、基礎実験として、発音源の発音面の認識が可能かどうかの調査を行おうとしたが、その調査方法がないことがわかった。そこで、独立同期再生型スピーカアレイシステムを構築し、基礎実験を行い、発音面の表現の重要性を確認した<sup>[7]</sup>。次に、周波数放射性的の有効性を確認するために、直径50cmの発音体の表面を擬似的に表現する半球形状のスピーカにより、人間がどの程度周波数放射性的を認識可能かの調査を行った。

### 2.1 球面音響の有効性

全方向に音響が広がるスピーカ<sup>[3]</sup>は、音楽家等からモニタスピーカとして高い評価を受けているので、単一の楽器の演奏会等のモニタとしてある程度有効性があると考えられる。しかし、近接においてはどの程度の有効性があるかを調査する必要があると考え、図1に示すような半球型8chの

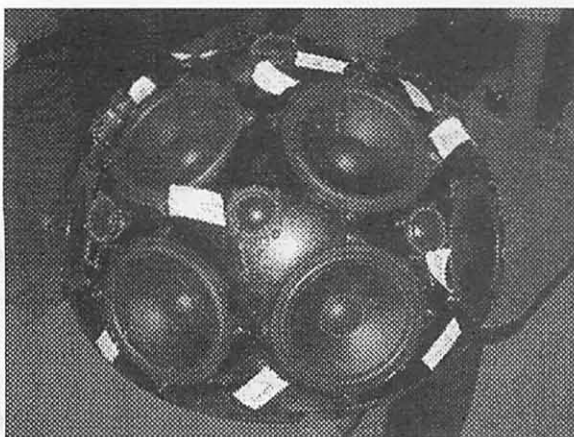


図1 半球面スピーカアレイ

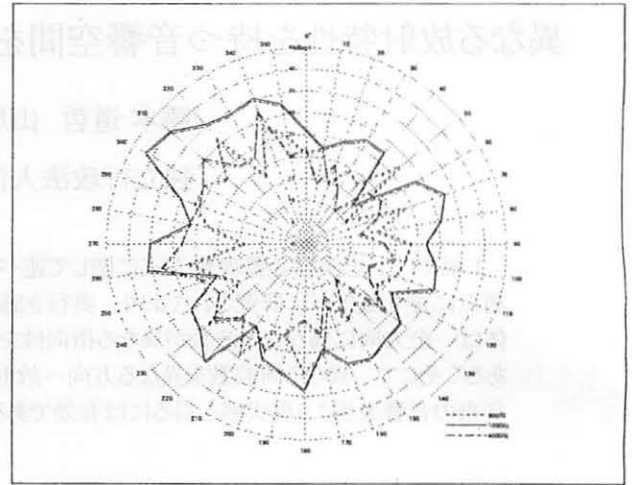


図2 半球面スピーカアレイの水平面の独立8ch再生時の音響情報

独立音源再生装置を試作し、簡単な評価実験を行った。

調査方法は、同一の信号を全てのトランスデューサで再生した場合と、8個の異なる信号を、それぞれのトランスデューサから再生した場合の2通りを、スピーカから1mの場所で試聴比較を行った。その時の音場情報を図2に示しておく。図2では、0度を正面として右側に偏った音響空間を表現していることを表している。

結果、優劣の判定はつかなかった。主な回答として、単一音の方が聴き慣れている音であり、8chは「不思議な感触」、という理由から単一音の方を選択した被験者が多かった。しかし、音響専門家の被験者からは、「そこに音源があるような存在感が高い」、との評価を受け、その再生精度が高ければ独立再生型の方が良いとする意見を得られた。

従って、周波数放射指向性を有した再生方式は有効であり、その精度を高め再度実験することにした。

### 2.2 スピーカアレイによる1つの解決法

以上の簡易基礎実験から、精度の高い発音源の音響表現が可能な装置と異なる周波数放射指向性を有した音響装置の必要性は確認できた。本稿では、異なる周波数放射指向性を有した音響を表現するための技術に関して述べることにする。

一個の発音装置、例えば従来のラウドスピーカトランスデューサを搭載した音響装置では異なる放射指向性を実現することは困難であることは容易に推測でき、多数の発音装置を用いて、実際の発音源に近い形での音響再生装置が必要であると考えられる。

そこで、物理的に忠実な音響表現の必要性をさらに詳細に明確にすることを優先課題とし、簡易に異なる周波数放射指向性を有した装置を実現するために、従来のラウドスピーカトランスデューサを用いたスピーカアレイを実装し、その評価実験を行うことにした。

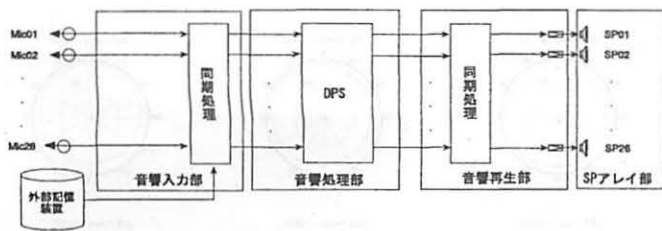


図3 球形音響システムの概略図

### 3. 球形スピーカアレイシステム

本章では、底面を除く全方位に異なる周波数放射指向性を持つ、26チャンネルの球形スピーカの構築に関して述べる。

本スピーカは、独立同期型音響システムで駆動され、音信号を再生・増幅する音響再生部、音信号を制御・生成する音響処理部、マイクからの信号およびハードディスク等からの音響信号を入力する音響入力部から構成されている(図3)。

音響再生部と音響処理部の特徴は最大128チャンネルの位相同期を伴い独立して稼働させることが可能な点である。これを実現するためには、フルデジタル回路の方が制御しやすいが、システムの検証のしやすさと構築の容易さから、音響制御・生成部をデジタルシステムとし、この音響制御・生成部からは位相同期の取れた独立アナログ信号が送出されるようにした。また、アナログ部での遅延を極力避けるため、全てのアナログ接続ケーブル長は同一とし、素材等も均一な物を作成した。アナログ接続と回路による遅延のばらつきが起こった場合は、音響制御・生成部で遅延補正を行い、位相同期の取れた音響を表現するようにした。

#### 3.1 球形スピーカの試作

試作した球形スピーカは計26個のトランスデューサとケーブルを通す配管の役目を果たす穴を有する一体形成のエンクロージャ、および台から構成されている(図4a)。

トランスデューサは可能な限り多数取り付けが可能となるように小口径の、AURASOUND社製1inchのNSW1-205-8A<sup>[9]</sup>相当品を用いた。

エンクロージャは、直径22cmでABS樹脂素材を3次元造形装置を用いて一体形成で制作した。トランスデューサは、このエンクロージャに直接取り付けられている。図4bに完成した試作品を示す。

各トランスデューサは、水平面に取り付けられ、SPBox01を正面とし、赤道上に反時計周りで重心から、45度づつの間隔でSPBox02からSPBox08が取り付けられている。SPBox09は、SPBox01と同じ経度にあい、北緯45度の地点に取り付けられている。同様に赤道線上にあるSPBox03,

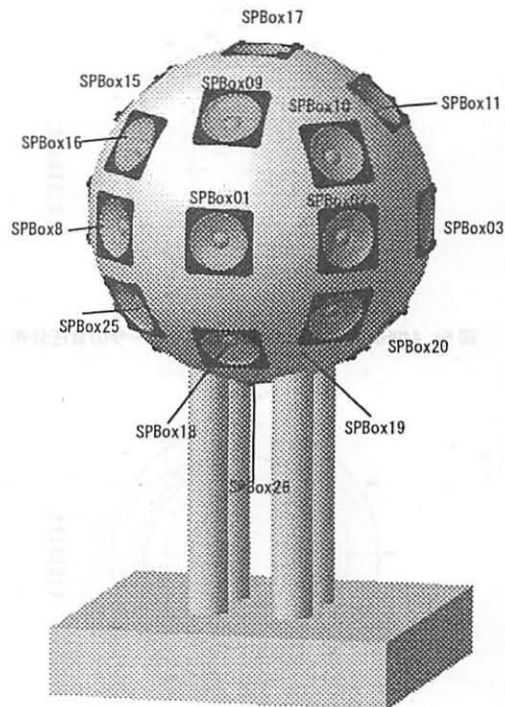


図4a 球形エンクロージャとスピーカユニット位置の概略図

SPBox05, SPBox07に対して、北緯45度にSPBox11, SPBox13, SPBox15が取り付けられている。SPBox10は、SPBox02と同じ経度であり、北緯22.5度に取り付けられている。同様に赤道線上にあるSPBox04, SPBox06, SPBox08に対して、北緯22.5度にSPBox12, SPBox14, SPBox16が取り付けられている。北緯方向と同じ方法で、南緯方向にSPBox18からSPBox25が取り付けられている。さらに、頂点にはSPBox17が、底点にはSPBox26が取り付けられている。ケーブルは、スタンドの径を通り、台座の端子に接続されている。

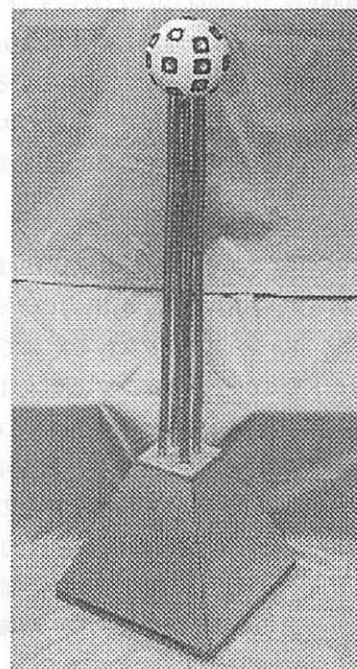


図4b 試作した球形スピーカの写真

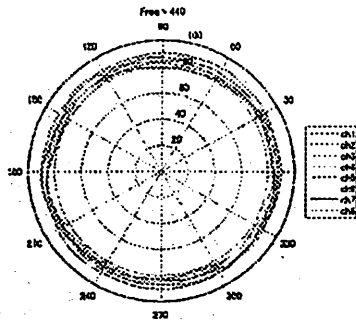


図 6a 440Hz の水平面の各トランスデューサの音圧分布

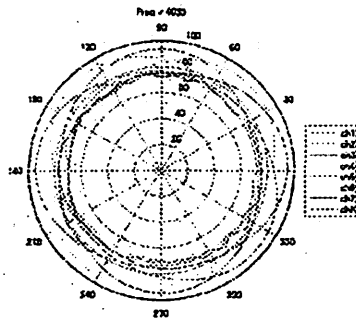


図 6b 4000Hz の水平面の各トランスデューサの音圧分布

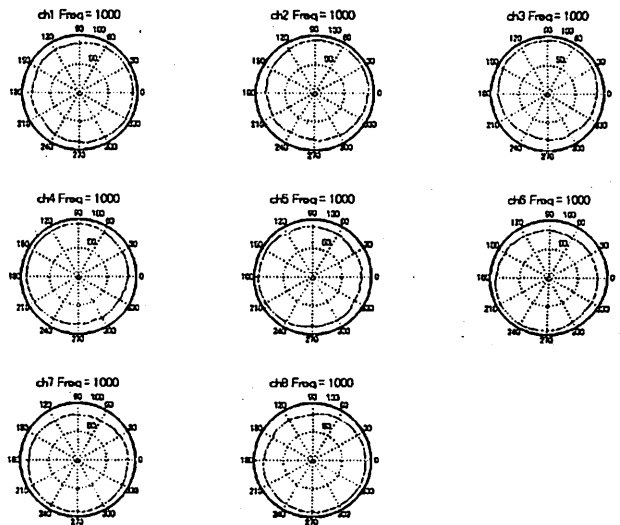


図 6c 1000Hz の水平面の各トランスデューサの音圧分布の個別表示

図 6 試作スピーカの水平面での音響特性

本スピーカの特性を図 6 に示しておく。ここでは、1ch と記述されている値は、SPBox01 に対応し、以下チャンネル番号と SPBox 番号がそれぞれ対応している。図 6a、図 6b、図 6c はそれぞれ、440Hz、4000Hz、1000Hz の音信号をそれぞれのトランスデューサから出力した時の水平面での音圧分を示している。440Hz、1000Hz は発音しているトランスデューサの最高値として円形の音場が形成されており、全てのトランスデューサを同時に発音すると、ほぼ同心である。しかし、4000Hz では同心円とはならずひずむことがわかり、改良する必要がある。理解しやすいように、図 6c は 1000Hz の音圧分布を個別に分けて表している。発音しているトランスデューサの最高値として、球形のエンクロージャを回折して、球形の音場ができていることがわかる。

### 3.2 増幅部

近距離音場の増幅であるため、増幅部には遅延を最小にするためにバッファを用いず、小出力のデジタルアンプを用いた。また、スペースファクタも考慮して、最大出力 10W/8 Ω のカード型のステレオアンプ基盤を 1U のラック内に収まるシャーシに 2 台を格納し (図 7a)、この 1U シャーシで 4ch 分の増幅装置とし、32 台をひとまとめにし、消音ラック内に納めた (図 7b)。アンプ基盤そのものは音を発生しないが、冷却のための空調音の消音を目的とした消音ラックにアンプを納めたのは、可能な限り増幅部とスピーカアレイ部の接続距離を短くするためであり、増幅部も実験環境内に設置することを可能とするためである。

各シャーシには、1チャンネルごとのミュートスイッチとシャーシ内アンプの全ミュートスイッチをもうけた。これにより、チャンネルごと及び2枚の基盤をまとめてミュートが可能である。さらに、全ミュートスイッチは、ラック内のシャーシの全ミュートスイッチとリンクさせることも可能で、任意のシャーシの全ミュートスイッチを押すと連動して、リンクされているシャーシ全てを一気にミュートさせることが可能である。

### 3.3 音響処理部

音源の生成は、デジタル処理システムとし、汎用デスクトップ・オーディオ・ワークステーション (DAW) として、デジデザイン社の ProTools HD システム<sup>[10]</sup> を導入した。この DAW は専用 DSP で音響処理を行い、1台の入出力ハードウェアに 16ch のアナログアウトを装着できるので、この入出力ハードウェアを 8 台接続することで、128ch の出力装置とした (図 8)。この入出力ハードウェアは、同社独自の同期方式を採用しており、各 DSP と D/A カードを搭載したハードウェアにおいて、それぞれのハードウェアの位相同期制御を 1 サンプル単位で行うことが可能である。アナログ出力を各チャンネルごとにオシロスコープで確認するのみで、アナログ出力までの位相同期は比較的容易に実現できた。ただし、DAW からの出力をアナログとするために、D/A カードは全て同一のリビジョンに揃える必要があった。このことにより、最大 128 チャンネルの異なった音響を出力することが可能である。

表現する音響は、通常の音楽や MA 作業と同様に DAW

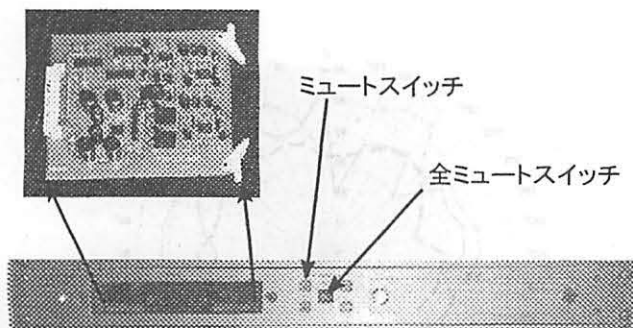


図 7a カード型アンプ基盤と1Uシャーシの外観

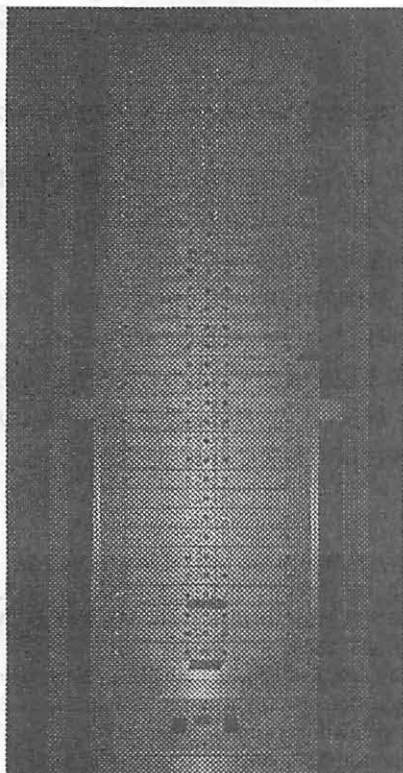


図 7b 消音ラック内の 32 台のアンプ

図 7 増幅部の外観と内部

ソフトウェアで制作あるいは録音したものが使用可能である。また、増幅部や接続線のアナログ部での遅延を補正するために DAW のソフトウェア上で、付属の遅延処理アルゴリズムと波形を直接ずらす方法で遅延補正を行った。128ch の出力を得るためには、24bit/48kHz のサンプリングモードで動作させなければならないので、高音質とは言えないが、実験及び計測用にピンクノイズやホワイトノイズを出力するには十分であると考えた。

#### 4. 評価実験

今回の実験では臍異なる周波数放射指向性を持った発音体として、その指向性の情報がある程度わかっている<sup>[8]</sup>楽器としてアコースティックギターを採用した。

##### 4.1 収録実験

収録は無響室にて行い、マイクはスピーカの位置に対応

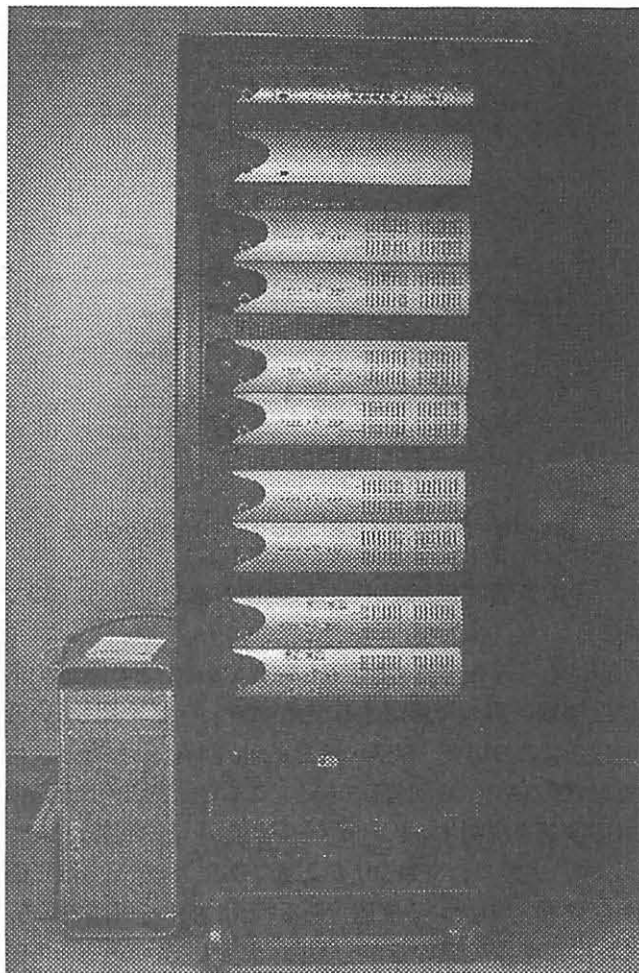


図 8 D/A 変換ラックと DAW の制御 PC

するように、楽器に向かって設置した(図 9)。収録には先の DAW を用いて 24bit/96kHz のサンプリングモードで行った。マイクによる回折を可能な限り回避するために小型のマイクとして、DPA 社のミニチュアマイク 4060 を使用し、ヘッドアンプには、ミレニア社の HV-8D をトランジスタモードで駆動させ、その出力を DAW にて AD コンバートを行いハードディスクに格納した。

##### 4.2 周波数放射指向性の評価

図 10 にアコースティックギターを再生した時の水平面での周波数分布を示す。0 度は楽器正面に設置された Mic01 に対応する SPBox01 からの 420Hz, 1000Hz, 4000Hz の音圧を示している。この図 10 において、水平面において周波数ごとの放射指向性が表現されていることがわかる。特に、楽器を正面から見て右のネック側と左のボディ側では顕著にその特性が違っていることがわかる。

##### 4.3 主観評価

今回の周波数指向性の計測では、忠実性の度合いを確認することはできないが、各楽器の周波数指向性の特徴を表していると考えられるので、試聴による簡単な主観アンケートを実施した。このアンケートは、5人の音響関係者にス

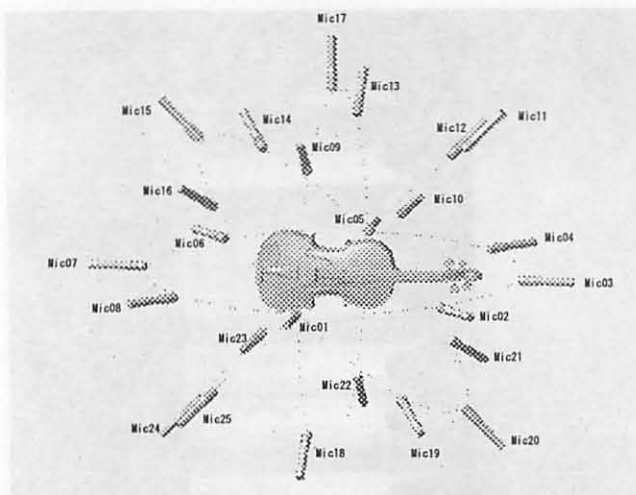


図9 スピーカと対応する位置に発音体に向けたマイクの設置

スピーカの音響評価と説明し、試聴後の感想を聞いたものである。

5人とも「存在感のある生々しい音である」との感想とともに、楽器の裏表を認識することができ、一番楽器らしい音の場所、この場合、SPBox08を正面と回答し、SPBox03付近は「うるさい」と回答している。ここで、実際の楽器との対応関係を説明すると、「イメージと違う」との回答を得た。つまり、実際は、SPBox01が正面であり、SPBox08は正面から45度づれている位置であることに対する相違である。これは、楽器の表の音が一番強く発音していると思っているが、実際は、ボディの楽器から見て右前方への放射指向性がこれまでに聞いた楽器の音に近いことからきている、と考えられる。また、SPBox03の位置はネックからの音であり、特にアコースティックギターでは弦の擦れ音が直接到達し耳障りであると考えられる。しかし、図10の周波数分布とこの調査の関連性を説明することは今回の評価実験ではできなかった。今後は、周波数の分布と聴感上の関連を調査すれば、物理的に忠実な表現が人間にとって与える影響を知ることができるのではないかと考え、今後の課題とする。

## 5. まとめ

本稿では、異なる周波数放射指向性を有するスピーカシステムを試作し、その音響がどのような効果があるかの調査を行った。その結果、物理的に忠実な音響の表現は、音響の存在感を高め、臨場感の向上の効果があると考えてもよいのではないかと、という結論を得た。ここで、この結論を超臨場感音響技術とすぐに結びつけることはできないが、その一部、あるいは必須技術としてとらえてもよいのではないかと考える。その理由は、「生々しい音」が一般の試聴者に対して有効かどうかの調査をする必要があると考えられるからである。また、今回の試作では、忠実に音響に再現しているわけではなく、特徴を捉えたのみであるので、更なる詳細な実験が必要である、と考えるに至った。単純に、

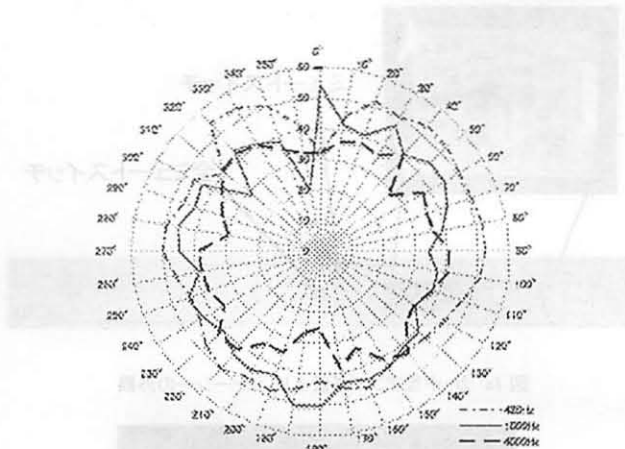


図10 試作スピーカでアコースティックギターを再生した時の周波数分布

物理的に忠実な音響を表現したからと言って超臨場感音響技術であるとは、言えないのではないかと、ということも今回の基礎実験を行ってわかってきた。

今後は、試作前に周知の問題点の他に、試作中に新たな問題も判明したので、それらの問題を解決し、物理的に忠実な音響表現を確立するための行う予定である。それらの、問題を解決し、忠実な音響表現が可能になれば、超臨場感音響技術の発展に役立つと考えている。

## 参考文献

- [1] 音響信号処理特集号, NHK 技法, No.94, Nov. 2005.
- [2] 猿渡洋, 立蔵洋介, 鹿野清宏, “M出力N入力の一般的な制御問題とその解決法”, 日本音響学会, Vol.71, No.7, pp.380-385, 2005.
- [3] Kanako Ueno and Hideki Tachibana, “Experimental study on the evaluation of stage acoustics by musicians using 6-channel sound simulation system”, Acoust. Sci. and Tech. Vol.24, No.3, pp.130-138, 2003.
- [4] 後藤真孝, 平田圭二, “音楽情報処理の最近の研究”, 日本音響学会, Vol.60, No.11, pp.675-681, 2004.
- [5] 山肩洋子, 勝本道哲, “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”, 情報処理学会情処研報, Vol.2007, No.16, pp.61-66, Mar. 2007.
- [6] 青木健一, 鎌倉友, 熊本芳, “パラメトリックスピーカ — 応用例一”, 電子情報通信学会論文誌 J76-A 1127 - 1135, 1993.
- [7] 勝本道哲, 山肩洋子, “聴覚情報のための多チャンネル音響システムの提案と実装”, 情報処理学会情処研報, Vol.2007, No.16, pp.55-60, Mar. 2007.
- [8] H.N. フレッチャー, T.D. ロッソ著, 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.
- [9] <http://www.aurasound.com/> (2007年9月現在)
- [10] <http://www.digidesign.com/> (2007年9月現在)