

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

勝本 道哲 山肩 洋子

独立行政法人 情報通信研究機構

これまでの臨場感音響技術は、VR等垂直面の映像に適合するように奥行き感や音像移動を実現するための技術であったが、本研究では実空間場に表現される映像に適合するための立体音響技術の研究を行っている。そのためには、発音源から全方向に伝搬する凹凸を持った音響再生方法が必要である。しかし、人間の聴覚感度が近接した音場に対してどの程度の感度を持っているかの情報は得られていないので、基本的な音響再生方式の設計も困難である。そこで、垂直及び水平方向に音響が拡散する近接音場での凹凸のある音響を実現し、人間の聴覚情報を計測することも可能な多チャンネル音響システムの設計と実装を行ったので報告する。

Proposal of Ultra Multi-Channel Audio System for 3D Acoustic Audio and Development

Michiaki Katsumoto and Yoko Yamakata

National Institute of Information and Communications Technology

We have been researched and developed near-field three-dimensional acoustic audio for ultra universal media systems. 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 sound surface. 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 ultra multi-channel audio system 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^[1]。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^[2,3,4]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響定位、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、近接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優先課題となっている。

しかし、実空間場における近接音場では、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^[5]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近くできるようになることもわかってきた。従って、近接場で

の音響再生には、立体映像と同期しその表現を阻害せず、スピーカの数や場所を意識せず、視聴位置において体積を持った音の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。

一方、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て超音波の減衰を用いた音響場^[6]等の研究が行われている。しかし、近接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、また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。

そこで、人間の近接音場における音響の感度を測定し、実空間音響実現に求められる仕様を導きだすための多チャンネル音響システムを設計し、構築したので報告する。

本稿では、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

筆者らは、近接場における超臨場感音響として、

- 1 発音源の発音面の表現方法、
- 2 立体映像を阻害せず、発音源の場所を明確に表現する方法、

は重要な技術課題であると考えている。最初のステップとして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る。従って、基礎実験として、ステレオ音源と単一音源の違いに関して調査した。次に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、直径50cm程度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、人間が感じる臨場感の度合いを調査した。その結果、スピーカを意識せずに、視聴位置において面積を持った音響表現が可能なシステムの基本条件がわかってきたので、その点に関して以下に述べる。

2.1 ステレオと単一音源による違和感の認識

ステレオフォーマットの音源を従来のステレオオーディオで再生した場合と、単一スピーカで再生した場合の違いをスピーカから1mの近接にて聞き比べて、その感想を自由フォーマットのアンケートにより調査した。その結果、近接空間では2台のステレオスピーカに違和感を感じる結果の方が多かった。音楽や音響の好みもあり、また厳密かつ精密に実験を行っていないので、結論を出すことはできないが、近接空間においては音源の発音場所は重要な要素であると予測することは可能であると考えている。

2.2 球面音響の有効性

全方向に音響が広がるスピーカ^[3]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ー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の独立音源再生装置を用いて簡単な評価実験を行った。



図1 半球面スピーカアレイ

調査方法は、1本のマイクで音源を一方から収録し、8ch全て同じ音を再生した場合と、8本のマイクを音源の周囲に配置して収録し、それぞれの位置に相当するスピーカから再生した場合を、スピーカから1mの場所で試聴比較を行った。

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は生々しい、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、8chの再生精度が悪くスピーカの存在を意識してしまうことの指摘が多く、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、発音源の発音面の再生には高い精度の再生方式が必要であるが、その精度を上げるには、スピーカの数を増やす等の解決が必要と考える。

2.3 スピーカアレイによる1つの解決法

以上の2つの簡易基礎実験から、発音源の場所を明確に表現し、精度の高い発音面の音響表現が可能な装置の必要性は確認できた。体積を持った音響を表現するためには、一台のスピーカでは困難なことは容易に推測でき、多数のスピーカを用いて、実際の発音源の表面に近い形で音響再生方式、あるいは新規の方式が必要であると考えられる。

本研究では、目的とする発音面の凹凸を表現するための基本情報として、人間がどの程度発音面の認識が可能を調査することを優先し、発音面を表現する方式として独立同期再生型スピーカアレイを用いた発音面の凹凸を表現する方式を実装し、評価実験を行うことにした。

3. 128ch スピーカアレイシステム

本章では、垂直面と水平面をもつ独立同期再生型128ch音響システムの設計と構築に関して述べる。本システムは、音響を表現するスピーカアレイ部、音響を増幅する増幅部、音響を制御、生成する、音響制御・生成部のから構成されている(図2)。本システムの最大の特徴は128チャンネルの位相同期を取りながら独立して稼働させることである。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・

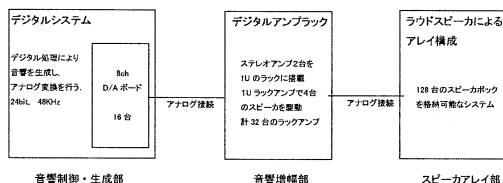


図2 128ch音響システムの概略図

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 スピーカアレイ部

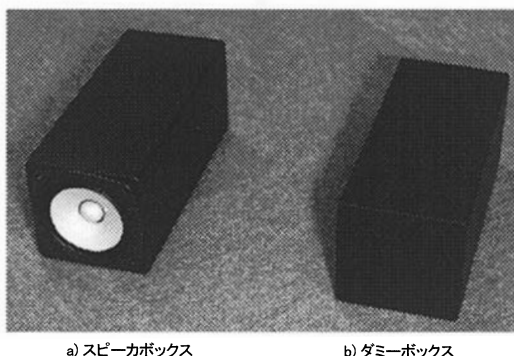
スピーカボックスは、通常のフルレンジラウドスピーカとして8cmのFOSTEX社のFE103E⁷⁾相当品を用いて、幅11cm、高さ11cm、奥行き25cmの自作エンクロージャに格納したものを作成した(図3a)。このスピーカボックスは、単体の組み合わせにより任意形状のスピーカアレイを形成できるようにした。また、ラウドスピーカを内蔵しないダミーボックスも製作した(図3b)。このダミーボックスは、実際には音を発生しない場所に設置し、合成音検証実験時に被験者に対して実際に発音しているように知覚するが、実際にはスピーカはないことを確認する等の用途に用いることが可能である。その際に、スピーカボックス装着時とダミーボックス装着時の発音面での音響特性を揃えるために用い、スピーカボックスと組み合わせることで、様々な音響評価実験に用いることが可能である。

パワースピーカを選択しなかったのは、スピーカアレイを構築する際に、各スピーカのボリュームの調整のしやすさもあるが、放熱問題と電源配線問題の回避が最大の理由であり、巨大配線は信号線のみの方が構築の自由度も増すと考えたからである。

今回の実験では、このスピーカボックスを、垂直面8x8、水平面8x8で構成可能とするマントフレームを製作し、垂

直面64個、水平面64個から構成される波面合成の音響表現が可能なスピーカアレイを構築した(図4)。従って、垂直面で64個の発音源から音響面を合成可能であり、それぞれのスピーカ出力の音圧や音質を変更することで、発音体の表面音響を表現することができる。水平面も同様であり、垂直面と水平面を組み合わせれば、より音響の凹凸を表現することが可能である。実験者が発音させるスピーカを指定しやすいように、図4に示すように垂直面の縦をVX1からVX8、横をVY1からVY8、水平面を同様にHX1からHX8とHY1からHY8と名称づけた。例えば、垂直面の左の一番上のスピーカは、VX1-VY1と呼ぶことにした。複数台のスピーカを発音する場合は、(VX1-VY1, X2-Y2)、とかっこ内に必要台数分を列挙し、移動の場合は、VX1-VY1 → VX2-Y2、と矢印で示すようにした。

また、個々のスピーカをわからなくするために、映画館等で使用している音響透過型スクリーンを設置できるように、



a) スピーカボックス

b) ダミーボックス

図3 自作のスピーカボックス

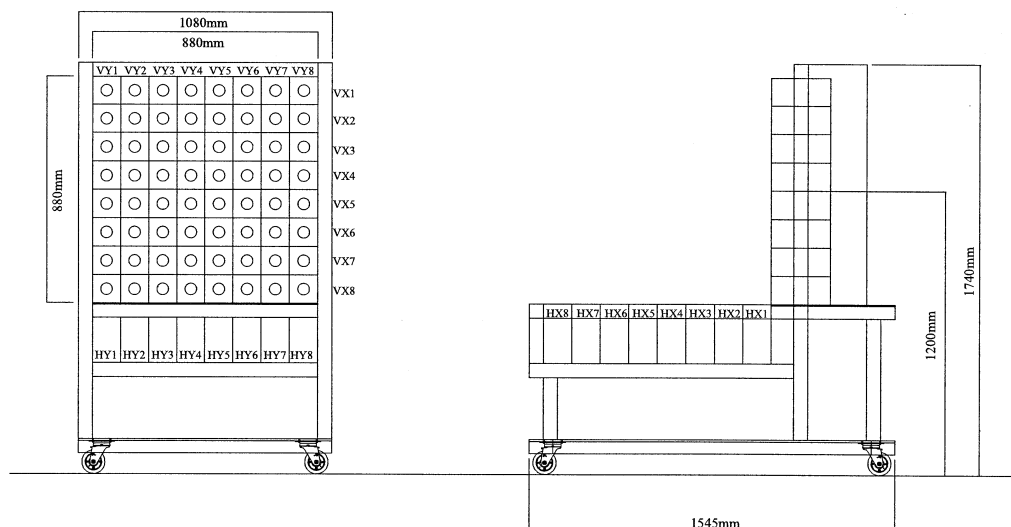


図4 128chスピーカアレイの図面

マウントフレームにはスクリーン装着が可能である。必要に応じて透過型スクリーンを装着すれば良い。また、このスクリーンに映像を映し出すことも可能である。

3.2 増幅部

近接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/8Ω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5a)、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5b)。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ー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。

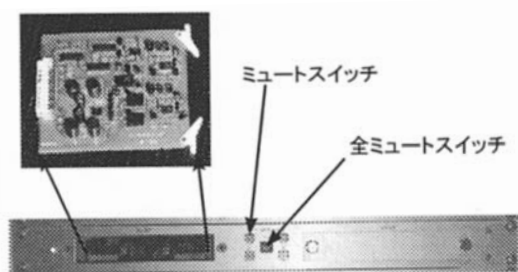


図5a カード型アンプ基盤と1Uシャーシの外観

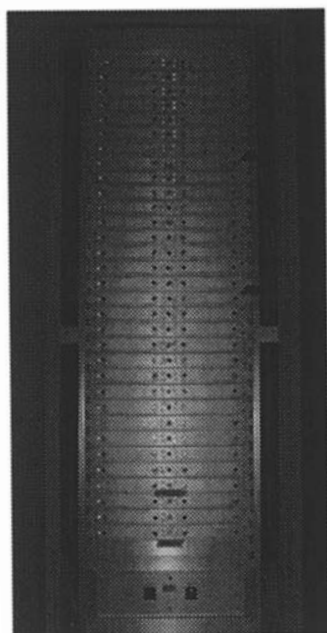


図5b 消音ラック内の32台のアンプ

図5 増幅部の外観と内部

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可能である。今回の実装では、垂直面と水平面に分け、それぞれの面毎のミュートが可能となっている。

3.3 音響制御・生成部

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^[6]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6)。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

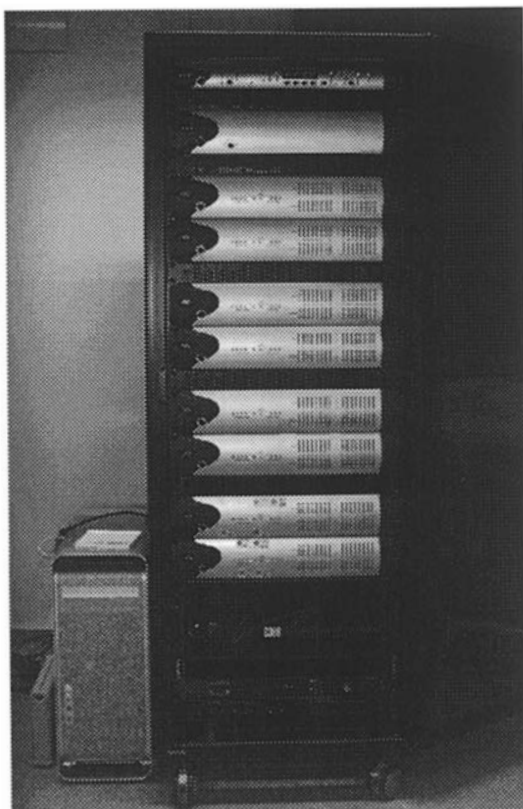


図6 D/A変換ラックとDAWの制御PC

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となり、従来のスピーカアレイとは大きく異なり、音響の凹凸をより表現可能となった。

表現する音響は、通常の音楽や MA 作業と同様に DAW ソフトウェアで製作あるいは録音したものを使用した。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える。

4. 性能評価実験

本システムの性能評価は、単純に個別のスピーカの音響特性を各スピーカの軸上 1.2m の箇所での音響特性計測を行った。一台のスピーカを、それぞれ個別に発音させ、軸上での計測は 128 点全ての音圧が同一となっていることが確認できた。例として、VX1-VY1 で、1k のサイン波を発音した時の周波数特性を図 7 に示す。なお、図中の低域のノイズは実験環境の暗騒音であり、スピーカの特性ではない。128 台全ての周波数特性がそろっているので、DAW 上で理論的に計算して製作した忠実に音響を再生できるこ

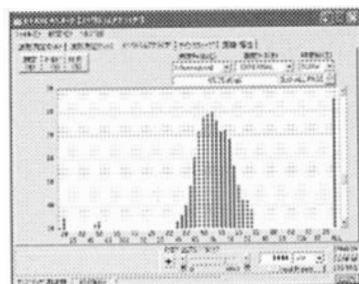


図 7 VX1-VY1 のスピーカボックスにおける音響特性

とを確認した。

次に、複数台のスピーカを発音した場合の音響特性を評価するため、垂直面のスピーカ位置から 1.2m (被験者の耳の位置)、床面から 1.2m の箇所、2本の計測マイクを両耳間の平均距離である 17cm 離して設置し、たまそのマイクの間点(被験者の鼻の位置)に1本のマイクを設置し、計3カ所の音響計測結果を比較するのみを行った。この実験ではピンクノイズを発生させ、耳を位置に相当する点で 60dB の音圧になるよう、同時に発音する各スピーカからの音量を調整した。いずれの組み合わせでも音圧一定であるが、近接するスピーカと距離のあるスピーカでは周波数による伝達速度の違いから若干の音響特性の違いが確認できた。また、本システムの重要な仕様としての定位にも微妙な差が現れていることも確認できた。例として、図 8 に (VX4-VY2, VX4-VY6) と (VX4-VY4, VX4-VY5) の測定結果を示す。これは、ちょうど、単一スピーカとステレオスピーカの違いに

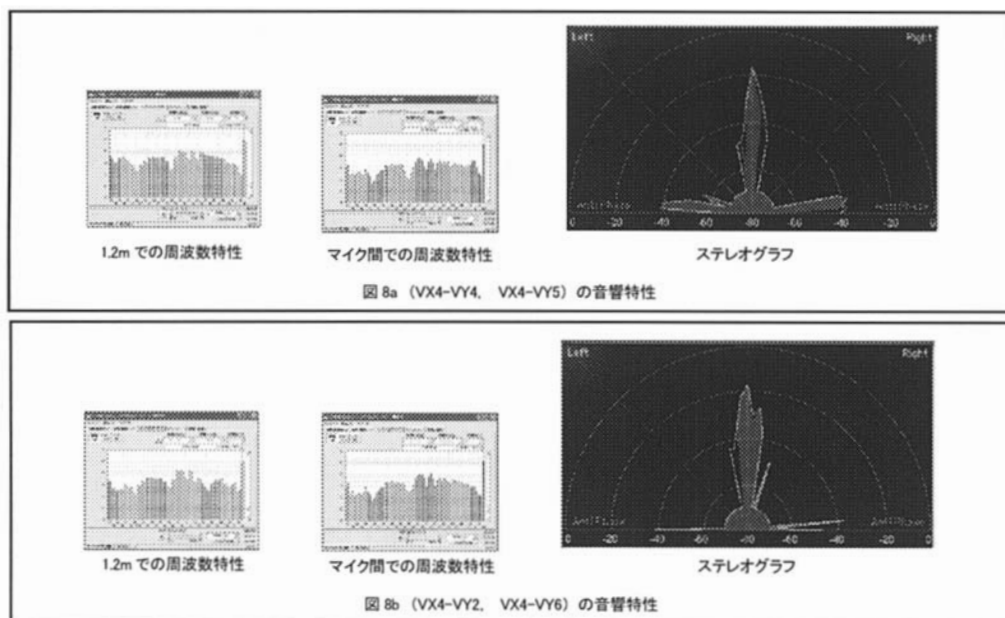


図 8 (VX4-VY2, VX4-VY6) と (VX4-VY4, VX4-VY5) の音響特性の比較

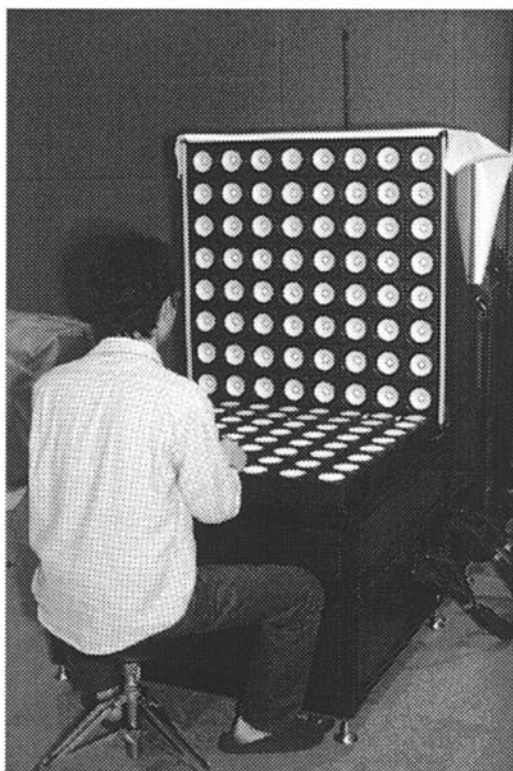


図 9 聴感上の性能確認の試験風景

相当する音響を発音しており、周波数特性図では両者の違いはわずかで、またステレオグラフに若干の違いを確認できた。この結果により、微妙な音源が可能であることが確認できた。実際の聴感、図 9 に示すようにスピーカアレイの前に座り確認を行っている。スピーカに近接しているため、アンプによるヒスノイズを注意深く聞けば聞こえるが、5名の音響専門家のアンケートにより、実験には支障がないレベルであることも確認した。

5. まとめ

本稿では、独立同期再生型 128ch 音響システムの構築に関してのべ、凹凸のある音響を表現可能であることを述べた。これにより、近接音場での人間の音響の感度に関する評価実験により、超臨場感を音響技術で確立するためのデータ取得が可能となった。今後の課題として、システム面としてフルデジタル化、小型軽量化、多チャンネル音響フォーマットの確立、精度の向上等、多々の課題を解決する必要がある。

我々は人間の聴感感度の評価が重要課題としており、発音する音響の形状がスピーカごとに異なる場合、発音スピーカの定位性能は同形の波形を再現する場合よりも向上するが、まったく無関連な波形では発音体の連続性が失われ

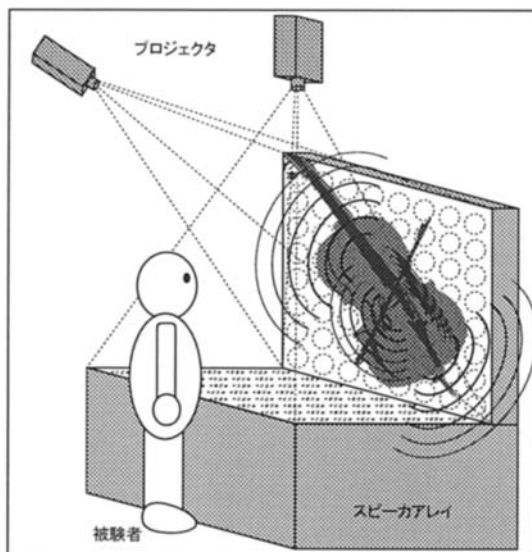


図 10 実験風景風景

ると予想しているので、同時に発音するスピーカのそれぞれの音波形状の違いが、各発音スピーカの定位性能にどのような影響を及ぼすか、また、連続するスピーカで発音する音響形状が連続的に変化することにより、発音体の連続性を感じさせることができるかを調査することを緊急の課題とし、現在評価実験を行っている。

また、被験者に対し実験終了後のヒアリングを行ったところ、事前に発音スピーカの位置がわかる状態で数多くの種類の音を聞いていれば、より正確に位置を答えられると答えた被験者が半数いた。そこで、図 10 に示すようにアレイ面の音響透過スクリーン上にプロジェクタで映像を投影することで、発音スピーカの位置を視覚的に知らせ、音響と発音体の関係を学習してもらい、音から知覚される立体感が向上するかを調査し、新しい応用アプリケーションの創出が今後の課題である。

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, pp675-681, 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 2006 情処研第 90 号, March, 2007 (発表予定) .
- [6] 青木健一, 鎌倉友, 熊本芳, “パラメトリックスピーカー 応用例 一,” 電子情報通信学会論文誌 J76-A 1127 - 1135, 1993.
- [7] <http://www.fostex.jp>
- [8] <http://www.digidesign.com/>