

## 4 立体音響技術

### 4 Spatial Audio Technology

#### 4-1 3D オーディオ・ディスプレイによる超臨場感 3次元音響の実現

##### 4-1 Ultra-Realistic Audio by 3D Audio Display

勝本道哲 山肩洋子 木村敏幸

KATSUMOTO Michiaki, YAMAKATA Yoko, and KIMURA Toshiyuki

##### 要旨

これまで筆者らは、物理法則に可能な限り忠実に音源を再現するための技術として、前後、上下、左右など全ての方向に異なる放射指向性を持つスピーカを試作し、楽器の音表現を立体的に再現するシステムを構築してきた。この過程の中で、スピーカによる音源の忠実再現度だけではなく、音源の存在感が音の印象を左右する重要な要因の1つではないか、という仮定を導きだした。そこで、試作したスピーカの性能評価を含め、音源の存在感がどれだけあるのかを検証するために試聴実験を行った。試作したスピーカと実験結果について報告する。

We have developed a special speaker with different radiation directivity for any direction such as front, rear, upper, lower, left and right, as a technology to reproduce the sound source in laws of physics as faithfully as possible, and have constructed the 3D audio system that can reproduce the sound expression of musical instruments. In this process, we derived assumption that not only a faithful reproducibility of the sound source by loudspeaker, but also a sense of existence of the source is one of the major factors which decide impression of the sound. Therefore, we did a listening test to verify how much there is a sense of existence, including the performance assessment of the developed speaker. We report the developed speaker and the results of the test, in this paper.

##### [キーワード]

立体音響, 放射特性, 球形スピーカ, 臨場感

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

### 1 まえがき

近年、立体映像や立体音響を用いて超臨場感コミュニケーションを実現する研究が行われている[1]。このように、3次元空間上に映像や音響をよりリアルに立体表現し、周囲から鑑賞することができるようになれば、今までの映像・音響メディアでは実現できなかったより臨場感、あるいは存在感のあるコミュニケーションやサービスが

可能になると期待される。そのためには、これまで以上に物理的に忠実な映像や音響を再現する技術が必要となる。

映像分野においては、空間中に映像を結合させるために電子ホログラフィを用いた立体映像の研究が行われている[2][3]。また、複数の人が周囲のあらゆる方向から立体映像を観察することのできるキューブ型立体ディスプレイも開発されている[4]。

そこで、それらの映像システムに適応し、物理的に可能な限り忠実な再現を可能とする音響技術が必要となる。本稿では、忠実な音響の表現法として、3次元音場再生技術の1つである波面合成法[5]-[8]に着目し、全ての方向に異なる指向性をもつ3Dオーディオ・ディスプレイの実現とその評価に関して報告する。

## 2 超臨場感立体音響の実現

空間中に立体情報を提示するとは、その物体の表裏、上下、左右を提供しなければならないことを意味している。現実の世界では発音体の音は、そこからすべての方向に発せられており、楽器に関しては文献[9]に報告されている。さらに、人間の視覚能力として、立体として認識され、立体情報の有効活用はきわめて近い距離、すなわち手を伸ばした範囲内ではないか、と考えている。

従って、従来のステレオ方式やサラウンド方式ではない、すべての方向に音を発音する音源そのものを、人に対して近接した環境で、可能な限り物理的に忠実な表現を可能とすることとなる放射指向性を持つ音響方式の研究開発が必要である。

ここで、忠実な音響の表現が期待される波面合成法は、原音場内に設定した制御領域の境界面上に配置したマイクロホンアレイで音を収録し、再生音場内に設定した聴取領域の境界面上に配置したスピーカアレイで収録した音をそのまま再生することによって、Kirchhoff-Helmholtz 積分方程式に基づき制御領域の波面を聴取領域で忠実に合成する3次元音場再生技術である。

筆者らは超臨場感立体音響技術として、前後、上下、左右など全ての方向に異なる放射指向性を有するスピーカと波面合成法を用いることによって聴取者が音源の周囲で音を聞くことができる近接3次元音場再生技術を先に提案し、忠実に波面が合成できる条件を計算機シミュレーションによって検討してきた[10]。本報告では、最も簡単な実現法として、実際にマイクロホンアレイとスピーカアレイを構築することによってシステムを試作し、提案した技術が実現可能であるかを検討したことに関して報告する。

## 3 提案システムの概要

先に提案した近接3次元音場再生システム[11]の構成を図1に示す。まず、原音場において音源の周りの境界面上に多数の無指向性マイクロホンで構成された包囲型マイクロホンアレイを配置し、音  $x_i(t)$  を収録する。次に、再生音場においてマイクロホンと同じ数の指向性スピーカで構成された3Dオーディオ・ディスプレイを配置し、収録した音  $x_i(t)$  をそのまま再生する。その際、各スピーカユニットはマイクロホンと同軸上で同じ位置に配置し、向きは境界面の外側に向けてようにする。すると、境界面の外側で波面が忠実に合成されることにより、境界の外側にいる聴取者は外側のどこにいてもあたかも境界内で音源が鳴っているように感じるようになることが期待される。

図1の例では、ピアノの近くにいる聴取者はピアノが近くで鳴っているように感じることが可能であり、ヴァイオリンの近くにいる聴取者はヴァイオリンが近くで鳴っているように感じるようになることが期待される。

そこで、提案した異なる指向性をもつ音響システムの有効性を検証するために、異なる放射指向性を実現する球形の3Dオーディオ・ディスプレイを試作した。

## 4 球形スピーカの試作

### 4.1 球形スピーカの構造

球形スピーカは、単一の音源、例えばヴァイオ

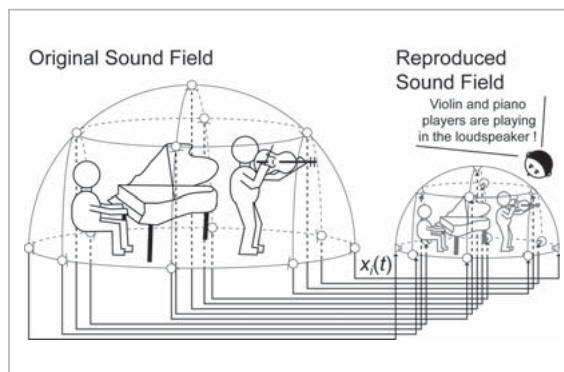


図1 異なる指向性を持つスピーカを用いた3次元音響システムの概念図

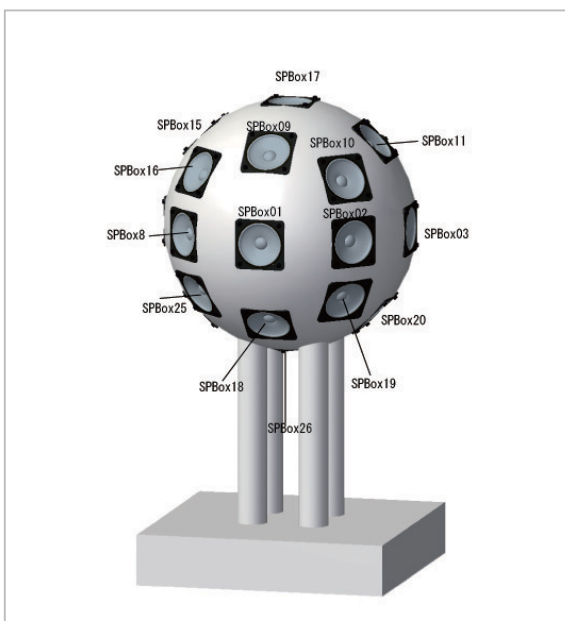


図2 球形エンクロージャとスピーカユニットの概略図

表1 球形エンクロージャへのラウドスピーカの配置情報

Horizontal plane				Northern hemisphereplane				Southern hemisphereplane			
SP BOX	r [cm]	$\theta$ [°]	$\varphi$ [°]	SP BOX	r [cm]	$\theta$ [°]	$\varphi$ [°]	SP BOX	r [cm]	$\theta$ [°]	$\varphi$ [°]
1	8.5	0	0	9	8.5	0	45	18	8.5	0	-45
2	8.5	45	0	10	8.5	45	30	19	8.5	45	-30
3	8.5	90	0	11	8.5	90	45	20	8.5	90	-45
4	8.5	135	0	12	8.5	135	30	21	8.5	135	-30
5	8.5	180	0	13	8.5	180	45	22	8.5	180	-45
6	8.5	-135	0	14	8.5	-135	30	23	8.5	-135	-30
7	8.5	-90	0	15	8.5	-90	45	24	8.5	-90	-45
8	8.5	-45	0	16	8.5	-45	30	25	8.5	-45	-30

Top				Bottom			
SP BOX	r [cm]	$\theta$ [°]	$\varphi$ [°]	SP BOX	r [cm]	$\theta$ [°]	$\varphi$ [°]
17	8.5	---	90	26	8.5	---	-90

リン等を表現するために、図2に示すように、球形のエンクロージャに26個のラウドスピーカユニットを配置し、それぞれは、26台のアンプ(特注品)により異なる音響信号をそれぞれ発音できる構造となっている。直径17cmのエンクロージャは、3次元造形装置により一体形成されたABS樹脂で作成した。また、ラウドスピーカユニットは、1インチのAURASOUND: NSW1-205-8A同等品を使用した。それぞれの、ラウドスピーカユニットを、放射指向性が最大になるよう表1に示すように配置した。

## 4.2 コンテンツの収録と評価

コンテンツとして単一の楽器を収録するため

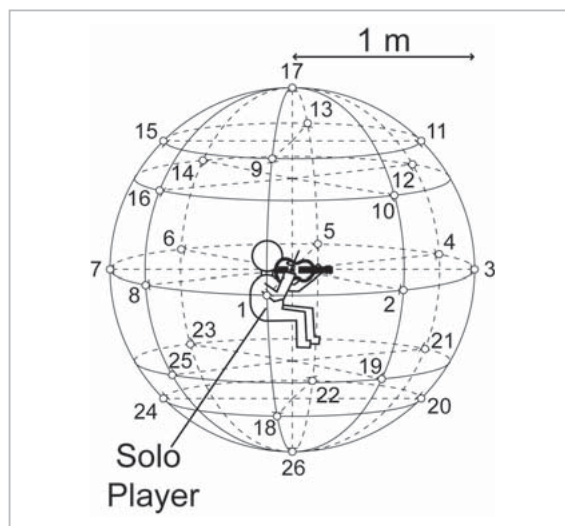


図3 マイクロホンの球形配置の概略図

に、無響室にて、演奏者を取り囲むようにマイクロホンを設置し、演奏そのものを収録することとした(図3)。このとき、26本のマイクロホンのそれぞれの位置は、楽器の中心から半径1mで、ラウドスピーカユニットの配置と相似になるよう設置した。収録には、26本のDPA4060マイクロホン、Millennia社のHV-3D不ヘッドアンプ、収録機材としてDigidesign: ProTools HDを使用し、ヴァイオリン(曲目: El Choclo)とアコースティックギター(オリジナル楽曲)をサンプリング周波数96kHz、量子化ビット24bitで収録した。

この音源を、そのまま本システムで再生し、演奏者を含め音響に従事する人と、従事していない人での試聴実験をしたところ、音源の形状等詳細はわからないが、音源の存在感が高いとの評価を得た[12]。

## 5 実験システムと環境

### 5.1 実験システム

実際にどの程度の存在感であるかを検証するために、実際の演奏と球形スピーカの主観的実験を行った。この際に、実演奏と球形スピーカの試聴を連続して行うために、実演奏を試聴中にその演奏を収録し、その収録を即座に再生するシステムを構築した。

実演奏者の収録は、音響中心から0.8mの位置に球形スピーカのスピーカユニットと相似な位置





図4 マイクロホンの球形配置の写真

関係に DPA 社のミニチュアマイク 4060 を配置した(図 4)。この状態をヘッドアンプに Millennia 社の HV-8D を 4 台用い、その出力を Digidesign: ProTools HD3 を用いて 26 ch 同期収録した。録音フォーマットは PCM WAVE で、サンプリング周波数 96 kHz、量子化ビット 24 bit である。

再生は、収録したデータを実演奏と同じ音圧となるよう調整し、球形スピーカと特注のデジタルアンプを用いて 26 ch 同期再生した。

## 5.2 実験環境

球形スピーカと従来のスピーカの最大の相違点は、球形スピーカは異なる音響信号を全方向に放射することであり、特に背面への放射は従来のスピーカとまったく異なり、その違いの影響が大きいのではないかと推測している。そのため、今回の実験でその影響が確認できるかどうかを確認するため、演奏者と球形スピーカの背後に反響板と吸音板をそれぞれ配置し、2つのパターンの実験を実施できるよう環境を構築した。この時の、残響時間は反響板の時 228 ms、吸音板の時 224 ms であった。また、両者からのそれぞれの板の距離は 1.2 m であった。

演奏者と球形スピーカを明確に区別できないよう、また音響特性が変化しないように配置するのが好ましいが、マイクスタンド設置、及び演奏者が移動することによる雑音を避けるため、可能な限り近くに両者を配置することにした(図 5)。このとき演奏者と球形スピーカの距離は 1.2 m であった。

また、被験者に視覚的な印象を与えないために、試聴する音源と被験者の間に音響透過スクリーンを配置した。これにより、被験者は実演奏



図5 演奏者と球形スピーカの配置



図6 実際の実験環境写真

と球形スピーカを視覚的に識別ができないような環境とした(図 6)。各音源からスクリーンまでの距離は、1.2 m で、被験者はスクリーンから 2 m の位置で、実演奏と球形スピーカの真ん中の位置に椅子に座って試聴することとした。従って、被験者と音源の距離は 2.2 m となる。この時の被験者側の残響時間は、反響板の時 209 ms、吸音板の時 193 ms であった。

## 6 試聴実験

今回の実験は、5で述べた環境において、両者を聞き比べ音の印象について感想を述べてもらい、その後インタビューによる聞き取り調査を行うこととした。この時、被験者には、AとB、及びDとCの音源を聞き比べて感想を述べてもらうことだけを伝えた。つまり、被験者には片方が実演奏で片方がスピーカであることを伝えずに実験を行った。また、録音しながらの実験であるため、最初に実演奏、次に球形スピーカによる試聴の順で試聴してもらうこととした。

### 6.1 演奏者の準備

この実験にあたり、演奏者への要望として、演奏中は普段通りに、演奏をしていない時は可能な限り気配を消して音を出さないことを説明し、さらに実験の十分な趣旨説明を行い、賛同していただいた方をお願いすることとなった。実験に先駆け、普段弾きなれていて同じような演奏が可能な3分程度の曲を選曲してもらい、十分な実験練習を行った。

実際の実験においては、全て同じ曲であったが、生演奏であるため、それぞれの実験毎に若干の違いが生じていたが、ほぼ同様な印象であった。

### 6.2 被験者

被験者は、音に関して的確な表現ができること、及び実際の楽器の音を聞いている、20~30代の音楽関係者及び音楽家6名の男女をお願いすることとなった。また、これらの被験者は、球形スピーカの存在は知っていたが、実際に体験したことがない方を選定した。従って、被験者は球形スピーカの試聴実験と思い実験に参加したこととなる。

### 6.3 実験

実験は、A(実演奏：約3分、反響板)、3秒おいて、B(球形スピーカ：演奏と同時間、反響板)を第1試聴とし、その後10分間のインタビュー1、続いて、C(実演奏：約3分、吸音板)、3秒おいて、D(球形スピーカ：演奏と同時間、吸音板)を第2試聴とし、その後10分間インタビュー

2、最後に実際の実験方法を告げた後の任意時間インタビュー3とした。実験の手順を以下に示す。

1. 被験者への実験の説明を待合室(通常の居室)で実施、
2. 第1試聴：実験室へ移動し試聴、
3. 待合室に戻り、感想の記述とインタビュー、
4. 第2試聴：実験室へ移動し試聴、
5. 待合室に戻り、感想の記述とインタビュー、
6. 最終説明：この時、片方が実演奏であることを述べる。その結果を踏まえ、インタビューを行った。

以上の手順を合わせ、1人の被験者に対して30分弱の実験であった。なお、実験室には研究員が被験者とともに入室し、研究員は、演奏者の気配や不要な雑音の確認を行った。

## 7 実験結果と考察

### 7.1 第1試聴直後の結果

反響板のある音源を試聴した直後、つまりAとBの試聴の感想は、6名中、4名が球形スピーカの方が音の印象が良いとの結果を得た。この時点では、6名とも実演奏の方が大きい、例えば、身長の高いラインアレイスピーカで聞いている感じがする、と音源の大きさの感じ方で、善し悪しを選んだと推測できる。

### 7.2 第2試聴直後の結果

吸音板のある音源を試聴した直後、DとCの試聴の感想は、やはり6名中4名が球形スピーカの方が良いとの結果を得た。第1試聴との差は、音像が中心によった感じ、つまり、スピーカの位置をずらして試聴したと感じていることが推測できる。

### 7.3 最終インタビューの結果

最終的に、被験者に片方が実演奏であることを述べた後の結果として、第1、第2とも実演奏を良しとしたうち、1名が最初から「人が居る」ことを感じていたことを述べ、聴覚的にも気配的にも実演奏が勝っていることを述べた。もう1名は、「もしかして、実演奏ではないか、と疑っていた」が、告げられてから実演奏であることを実感

し、納得したようであった。

残りの4名は、告げられても納得できなかったようであるが、音色は確かに実演奏の方が良かったと述べたが、音像の大きさに違和感を感じていたことが、推測できた。

#### 7.4 考察

試聴実験の結果、明らかとなった点は、球形スピーカの再生能力は高そうであると考えられる。しかし、実際には音像の大きさと位置の再生に関しては大きな課題となった。しかし、なぜ実演奏と球形スピーカの違いに気がつかれなかった、あるいは、何を聞いていそう感じたのかは不明のままである。

一方、1名の被験者は実験室に入った時から、人の気配を感じ、「少し怖かった」と述べていることから、逆説的な考えとして、他の被験者たちは、自身では気がつかないが、人の気配を感じていて、無意識に実演奏に「恐れを感じた」ことで、無害と感じる球形スピーカの方を良しと判断

したとするならば、球形スピーカの再生能力は低いとも考えられる。

また、背面への放射の影響は、今回の実験では、単に背面の反射がなくなり、正面からの音圧が強くなり、位置がずれて聞こえただけであると推測する。

## 8 まとめ

今回の実験では、単純に評価結果を見ただけで、球形スピーカの性能の高さを十分に示す結論に至ることができないと考える。その理由は、最初から人の気配を感じていた被験者のインタビュー後の考察による。実際のその被験者が最後の被験者であったため、実験方法を変えることができなかったため、この結果を踏まえ、追加の実験をする予定である。

課題として音像の大きさに関する結果を基に球形スピーカの改良と改善、また音源の反響を制御した実験法の確立を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1 榎並和雅, "超臨場感システムの研究推進に向けてー(独)情報通信研究機構の研究と産学官フォーラム URCFの活動ー," 画像ラボ, 18, 9, pp. 41-45, 2007.
- 2 大井隆太郎, 三科智之, 奥井誠人, 野尻裕司, 岡野文男, "実写ホログラムの高速な計算方法の検討," 映像情報メディア学会, Vol. 61, No. 2, pp. 198-203, 2007.
- 3 K. Yamamoto, T. Mishina, R. Ooi, T. Senoho, and M. Okui, "A Real-Time Color Holography System for Live Scene," Proc. SPIE, Vol. 7233, No. 723310, pp. 1-9, 2009.
- 4 吉田俊介, R. Lopez-Gulliver, 矢野澄男, 井ノ上直己, "gCubik: 手に持ち複数人で鑑賞できるキューブ型立体ディスプレイの開発," 3D映像, 22, 3, pp. 25-28, 2008.
- 5 H. Fletcher, "Symposium on wire transmission of symphonic music and its reproduction on auditory perspective: Basic requirement," Bell System Technical Journal, 13, 2, pp. 239-244, 1934.
- 6 伊藤毅, "音響工学原論," pp. 587-589, コロナ社, 1973.
- 7 M. Camras, "Approach to recreating a sound field," J. Acoust. Soc. Am., 43, 6, pp. 1425-1431, 1968.
- 8 A. J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel, "Acoustic control by wave field synthesis," J. Acoust. Soc. Am., 93, 5, pp. 2764-2778, 1993.
- 9 H. N. 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," シュプリンガー・フェアラーク東京.
- 10 木村敏幸, "波面合成法による立体音場再生における情報量削減手法に関する研究," 博士論文, 名古屋大学大学院人間情報学研究科, 2005.
- 11 木村敏幸, 山肩洋子, 勝本道哲, "波面合成法を用いた近接三次元音場再生の理論的研究," 応用音響研究会技術報告 EA2008-4, 電子情報通信学会, 2008.

- 12 勝本道哲, 山肩洋子, 木村敏幸, "異なる放射特性を持つ球形スピーカの実装," 日本音響学会聴覚研究技報, 37(10), pp. 837-842, 2007.
- 13 T. Okamoto, R. Nishimura, and Y. Iwaya, "Estimation of sound source positions using a surrounding microphone array," Acoust. Sci. & Tech., 28, 3, pp. 181-189, 2007.



かつもと みちゆき

**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



やまかた よしこ

**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



きむら としゆき

**木村敏幸**  
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専攻研究員  
工学博士  
立体音響