

# 異なる放射特性を持つ球形スピーカによる再生音場の数値解析

## ～音源探査による演奏者の音像の大きさと形の推定～

木村 敏幸<sup>†</sup> 山肩 洋子<sup>†</sup> 勝本 道哲<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 独立行政法人情報通信研究機構ユニバーサルメディア研究センター

〒 184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail: †{t-kimura,yamakata,katumoto}@nict.go.jp

**あらまし** 存在感を表現することのできる立体音響システムとして、我々は今までに異なる放射特性を持つ球形スピーカを開発している。本報告では、球形スピーカが再生する放射音場を計算機シミュレーションによって数値的に解析した。音源探査技術を用いて複数の点音源の位置を推定することにより、球形スピーカによって表現される演奏者の音像の大きさや形を評価した。その結果、演奏者の音像の全体的な大きさは球形スピーカの大きさに縮小し、個々の点音源の大きさは非常に大きくなるのが分かった。また、スピーカユニットの放射指向特性を球形スピーカの外側に鋭く設定すれば、演奏者の音像の形が正しく保持されることが分かった。

**キーワード** 立体音響, 放射音場, 放射指向特性, 計算機シミュレーション, 音源探査

## Numerical Analysis of Sound Field Radiated by Multi-dimensional Loudspeaker with Frequency Dependence of Directivity

### – Estimation of Size and Shape of Musician’s Sound Image by Sound Source Search –

Toshiyuki KIMURA<sup>†</sup>, Yoko YAMAKATA<sup>†</sup>, and Michiaki KATSUMOTO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Universal Media Research Center, National Institute of Information and Communications Technology

4-2-1, Nukui-kitamachi, Koganei, Tokyo, 184-8795 Japan

E-mail: †{t-kimura,yamakata,katumoto}@nict.go.jp

**Abstract** As the 3D audio system reproducing the presence, we have been developed the multi-dimensional loudspeaker with frequency dependence of directivity. In this report, the 3D sound field reproduced by the loudspeaker is numerically analyzed by the computer simulation. The size and shape of musician’s sound image depicted by the loudspeaker was evaluated by using the sound source search technique and estimating the position of multiple point sound sources. As a result, it was indicated that the general size of musician’s sound image was scaled down to the size of the loudspeaker and that the size of individual point sound sources was extremely scaled up. It was also shown that the shape of musician’s sound image was accurately maintained if the radiation directivity of loudspeaker units was sharply set toward the outside of the loudspeaker.

**Key words** 3D audio, Radiated sound field, Radiation directivity, Computer simulation, Sound source search

### 1. はじめに

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]. これにより、今までの映像・音響技術では実現できなかったより臨場感、あるいは存在感を感じ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ている。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。

超臨場感コミュニケーションを実現する要素技術の一つである超臨場感音響技術として現在盛んに研究されているものとしては、WFS システム [2]~[4] や 22.2ch システム [5] といったように、スピーカで空間の周りを囲むことによって映画館などの大規模な空間における臨場感を表現することを目指したものが多い。一方、我々の研究は空中に立体物を提示することによって、提示した場所に立体物の存在感を表現することを目指している。これにより、人々は立体物から 1 m 程度離れた近接な場

所において立体物を前後、左右もしくは上下から鑑賞することが可能になると考えられる。

このような存在感を表現することのできる立体音響システムとして、我々は今までに異なる放射特性を持つ球形スピーカを開発し [6], 3 台の球形スピーカで 3 名の演奏者による合奏を表現するというデモ展示を CEATEC JAPAN [7] や NAB show [8] といった展示会において行って来た。本報告では、今までに開発してきたスピーカによって再生される放射音場を計算機シミュレーションによって数値的に解析する。

ところで、我々が今までに行ってきた研究では球形スピーカ 1 台につき 1 名の演奏者を表現しているが、1 名の演奏者が発する音源の数は必ずしも 1 個だけとは限らない。例えば、楽器そのものが複数の発音源 (弦楽器の場合、弦自体の発振や共鳴胴からの放射など) を持っていることもあるし、演奏者そのものが複数の発音源 (衣擦れの音や足を踏み鳴らす音など) を持っていることもある。ゆえに、演奏時にはさまざまな場所において複数の音源が音を鳴らしていると考えられる。従って、これらの複数音源が球形スピーカによって表現された際にどこにあるかを推定すれば、演奏者が出す音像の大きさや形が球形スピーカによってどう変化するかを評価することが可能になると考えられる。

そこで、本報告では音源探査技術を用いて複数の点音源の位置を推定することにより、球形スピーカによって表現される演奏者の音像の大きさと形を評価する。2 章では、今までに開発してきた球形スピーカと、それを 3 台用いて 3 名の演奏者による合奏を表現するまでの手順について記述する。3 章では、本報告において実施した計算機シミュレーションの実施条件と、得られた結果から球形スピーカによって表現される演奏者の音像の大きさと形について考察する。

## 2. 球形スピーカを用いた立体音響システム

球形の筐体、26 個のスピーカユニット、スタンドより構成されている異なる放射特性を持つ球形スピーカのイメージを図 2 に示す。筐体は ABS 樹脂を材料として三次元造形装置により作成している。筐体の直径は 17 cm であり、下側にはオーディオケーブルを通すための穴が開いている。大きさ 1 インチのスピーカユニット (AURASOUND: NSW1-205-8A 相当品) を 26 個筐体に直接取り付け、26 ch 分のプリアンプ (特注品) に直結している。その際、筐体の中心を原点とした場合、表 1 に示すような方位角及び仰角となるようにスピーカユニットを配置している。開発した球形スピーカでは演奏者 1 名につき球形スピーカを 1 個必要とするので、3 名による演奏を実現しようとする場合、必要となるチャンネル数は  $78 (= 26 \times 3)$  となる。

3 名の演奏者による合奏の表現手順は以下の通りである。まず、低残響室 (残響時間: 180 ms) において計 3 個の球形のマイクロホンアレイを構築する。その際、各マイクロホンアレイにおいて図 3 に示すように半径 0.8 m の球面上に 26 個のミニチュアマイクロホン (DPA: 4060) を配置し、各マイクロホンの方位角及び仰角は表 1 に示すようなスピーカユニットの場合と同じにする。次に、3 名の演奏者がそれぞれのマイクロホンアレイ

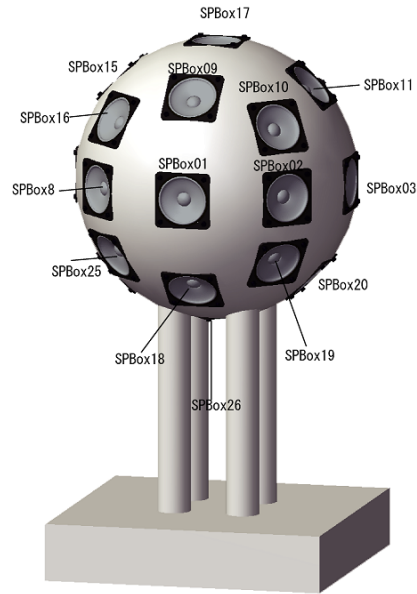


図 1 異なる放射特性を持つ球形スピーカのイメージ

図 2 Image of multi-dimensional loudspeaker with frequency dependence of directivity.

表 1 スピーカユニットの方位角及び仰角

Table 1 Azimuth and elevation angles of loudspeaker units.

$i$	$\theta_i [^\circ]$	$\phi_i [^\circ]$	$i$	$\theta_i [^\circ]$	$\phi_i [^\circ]$	$i$	$\theta_i [^\circ]$	$\phi_i [^\circ]$
1	0	0	9	0	45	18	0	-45
2	45	0	10	45	30	19	45	-30
3	90	0	11	90	45	20	90	-45
4	135	0	12	135	30	21	135	-30
5	180	0	13	180	45	22	180	-45
6	-135	0	14	-135	30	23	-135	-30
7	-90	0	15	-90	45	24	-90	-45
8	-45	0	16	-45	30	25	-45	-30
			17	-	90	26	-	-90

の中に入り、3 名で同時に行った演奏を計  $78 (= 26 \times 3)$  個のマイクロホンと 78 ch 分のマイクロホンプリアンプ (特注品) と 1 台の収録装置 (Digidesign: ProTools HD) で収録し、78 ch (サンプリング周波数: 96 kHz, 量子化ビット: 24 bits) の音響信号を得る。

最後に、得られた 78 ch 音響信号を 3 台の球形スピーカで再生装置 (Digidesign: ProTools HD) よりそのまま再生し、球形スピーカ 1 台につき 1 名の演奏者を表現する。その際、26 ch ずつのグループを各演奏者ごとに構成し、スピーカユニットの方位角及び仰角が各演奏者を収録したときのマイクロホンの方位角及び仰角と同じになるようにチャンネルの割り当てを行っている。これにより、例えば球形スピーカと球形スピーカの間に立つと、演奏者の間にいるような音響表現が可能になる。

## 3. 計算機シミュレーション

### 3.1 シミュレーション環境

2 章で示した演奏者の表現手順に従って、図 4 に示すように

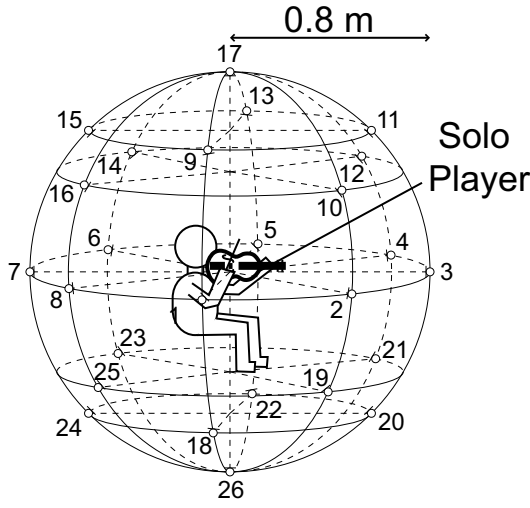


図3 収録時における演奏者ごとのマイクロホンの配置

Fig. 3 Microphone arrangement around each players during the recording for the multi-dimensional loudspeaker.

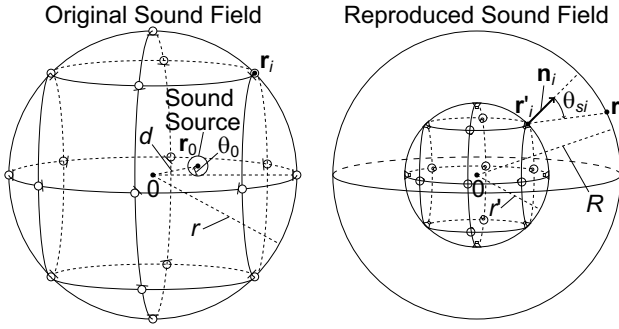


図4 計算機シミュレーションに用いたマイクロホン，スピーカユニット，観測点の位置

Fig. 4 Positions of the microphones, loudspeaker units, and observation points used in the computer simulations.

半径  $r(=0.8)$  m の球面上の点  $\mathbf{r}_i$  に  $M(=26)$  個のマイクロホンを，半径  $r'(=0.085)$  m の球面上の点  $\mathbf{r}'_i$  に  $M(=26)$  個のスピーカユニットを配置した．また，近接した場所において演奏を鑑賞するという当初の研究目的から，半径  $R(=1)$  m の球面上の点  $\mathbf{r}$  に  $N(=162)$  点の観測点を配置した．

音源信号  $s(t)$  は以下の式のように振幅  $A$ ，周波数  $f$  の正弦波信号とした．

$$s(t) = A \sin 2\pi f t \quad (1)$$

この場合， $i$  番目のマイクロホンで収録する信号  $x_i(t)$  は以下のように表される．

$$\begin{aligned} x_i(t) &= \frac{1}{d_{i0}} s\left(t - \frac{d_{i0}}{c}\right) \\ &= \frac{A}{d_{i0}} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{d_{i0}}{c}\right)\right\} \end{aligned} \quad (2)$$

但し， $d_{i0}(=|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|)$  は音源から  $i$  番目のマイクロホンまでの距離， $\mathbf{r}_i$  は  $i$  番目のマイクロホンの位置ベクトル， $\mathbf{r}_0$  は音源の位置ベクトル， $c$  は音速を表す．従って，再生音場において観測点  $\mathbf{r}$  で合成される音圧  $p(\mathbf{r}, f, t)$  は  $x_i(t)$  から以下のように表さ

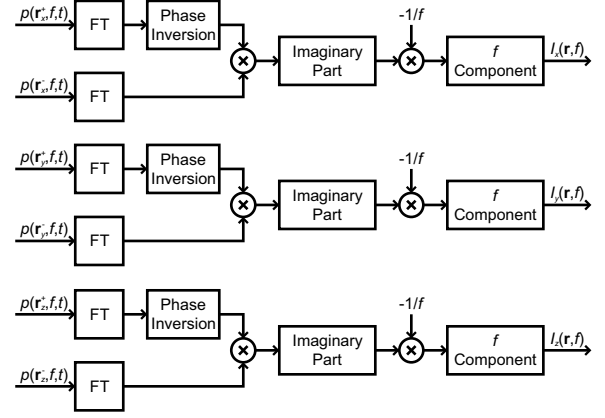


図5 計算機シミュレーションにおける音響インテンシティ算出のブロック図

Fig. 5 Block diagram of the calculation of sound intensity in computer simulation.

れる．

$$\begin{aligned} p(\mathbf{r}, f, t) &= \sum_{i=1}^M \frac{D_{si}}{d_i} x_i\left(t - \frac{d_i}{c}\right) \\ &= \sum_{i=1}^M \frac{D_{si} A}{d_i d_{i0}} \sin\left\{2\pi f\left(t - \frac{d_i + d_{i0}}{c}\right)\right\} \end{aligned} \quad (3)$$

但し， $M$  はスピーカユニットの総数， $d_i(=|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_i|)$  は  $i$  番目のスピーカユニットから観測点までの距離， $\mathbf{r}'_i$  は  $i$  番目のスピーカユニットの位置ベクトル， $D_{si}$  は  $i$  番目のスピーカユニットの放射指向特性を表す．

観測点  $\mathbf{r}$  における音圧  $p(\mathbf{r}, f, t)$  を算出するだけでは観測点における音源の到来方向を評価することはできない．一方，音響インテンシティの方向は単一音源の到来方向に相当するので [9]，今回のシミュレーションでは，音源の到来方向を評価するために，観測点  $\mathbf{r}$  における音響インテンシティもさらに算出した．

音響インテンシティは図5に示すようなクロススペクトル法により算出した [10]．但し，図5中の  $I_x(\mathbf{r}, f)$ ， $I_y(\mathbf{r}, f)$ ， $I_z(\mathbf{r}, f)$  は音響インテンシティベクトル  $\mathbf{I}(\mathbf{r}, f) = \{I_x(\mathbf{r}, f), I_y(\mathbf{r}, f), I_z(\mathbf{r}, f)\}^T$  の  $x$ ， $y$ ， $z$  成分を表し，図5中の  $p(\mathbf{r}_x^+, f, t)$ ， $p(\mathbf{r}_x^-, f, t)$ ， $p(\mathbf{r}_y^+, f, t)$ ， $p(\mathbf{r}_y^-, f, t)$ ， $p(\mathbf{r}_z^+, f, t)$ ， $p(\mathbf{r}_z^-, f, t)$  は6点 ( $\mathbf{r}_x^+$ ， $\mathbf{r}_x^-$ ， $\mathbf{r}_y^+$ ， $\mathbf{r}_y^-$ ， $\mathbf{r}_z^+$ ， $\mathbf{r}_z^-$ ) における音圧を表す．6点の位置ベクトルは以下の式のように設定した．

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_x^+ &= \mathbf{r} + (\Delta, 0, 0)^T, \mathbf{r}_y^+ = \mathbf{r} + (0, \Delta, 0)^T, \mathbf{r}_z^+ = \mathbf{r} + (0, 0, \Delta)^T, \\ \mathbf{r}_x^- &= \mathbf{r} - (\Delta, 0, 0)^T, \mathbf{r}_y^- = \mathbf{r} - (0, \Delta, 0)^T, \mathbf{r}_z^- = \mathbf{r} - (0, 0, \Delta)^T \end{aligned} \quad (4)$$

但し， $\Delta$  は  $0.001$  m とした．

計算機シミュレーションに使用したパラメータ条件を表2に示す．音源  $\mathbf{r}_0$ ，マイクロホン  $\mathbf{r}_i$ ，スピーカユニット  $\mathbf{r}'_i$ ，観測点  $\mathbf{r}$  の位置ベクトルは3次元座標上で以下のように設定した．

表2 計算機シミュレーションにおけるパラメータ条件

Table 2 Parametric conditions in computer simulation.

Sound source amplitude ( $A$ )	1
Sound source frequency ( $f$ )	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Hz
Distance of sound sources ( $d$ )	0, 0.2, 0.4, 0.6 m
Azimuth angle of sound source ( $\theta_0$ )	0, 45°
Sound velocity ( $c$ )	340 m/s
Number of microphones and loudspeaker units ( $M$ )	26
Radius of microphone array ( $r$ )	0.8 m
Radius of loudspeaker array ( $r'$ )	0.085 m
Normal unit vector of loudspeaker units ( $\mathbf{n}_i$ )	$\mathbf{r}'_i/ \mathbf{r}'_i $
Radiation directivity of loudspeaker units ( $D_{si}$ )	Omnidirectional, Decay 6 dB, Decay 12 dB, Real
Number of observation points ( $N$ )	162
Radius of observation points ( $R$ )	1 m

$$\mathbf{r}_0 = (d\cos\theta_0, d\sin\theta_0, 0)^T \quad (5)$$

$$\mathbf{r}_i = (r\cos\theta_i\cos\phi_i, r\sin\theta_i\cos\phi_i, r\sin\phi_i)^T \quad (i = 1\dots M) \quad (6)$$

$$\mathbf{r}'_i = (r'\cos\theta_i\cos\phi_i, r'\sin\theta_i\cos\phi_i, r'\sin\phi_i)^T \quad (i = 1\dots M) \quad (7)$$

$$\mathbf{r} = (R\cos\theta_j\cos\phi_j, R\sin\theta_j\cos\phi_j, R\sin\phi_j)^T \quad (j = 1\dots N) \quad (8)$$

但し,  $\theta_i, \phi_i$  は  $i$  番目のマイクロホン及びスピーカユニットの方位角と仰角を表す. 過去の球形スピーカに関する研究 [6] に従い, 球の中心を原点とした場合, マイクロホン及びスピーカユニット位置の方位角及び仰角は表 1 に示すように設定した. 一方,  $\theta_j, \phi_j$  は  $j$  番目の観測点の方位角と仰角を表す. 観測点は正 20 面体 4 分割による接地ドームの頂点位置に相当する [11].

スピーカユニットの放射指向特性  $D_{si}$  は以下の式に示すような 4 種類の指向特性に設定した.

$$\text{(Omnidirectional)} \quad D_{si} = 1 \text{ (in all } f\text{)}$$

$$\text{(Decay 6 dB)} \quad D_{si} = \frac{3 + \cos\theta_{si}}{4} \text{ (in all } f\text{)}$$

$$\text{(Decay 12 dB)} \quad D_{si} = \frac{5 + 3\cos\theta_{si}}{8} \text{ (in all } f\text{)}$$

$$\text{(Real)} \quad D_{si} = \begin{cases} 1 & (f = 125, 250, 500) \\ \frac{3 + \cos\theta_{si}}{4} & (f = 1000, 2000) \\ \frac{5 + 3\cos\theta_{si}}{8} & (f = 4000, 8000, 16000) \end{cases} \quad (9)$$

但し,  $\cos\theta_{si} = \frac{\mathbf{n}_i \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}'_i)}{|\mathbf{n}_i| |\mathbf{r} - \mathbf{r}'_i|}$  である. Omnidirectional は正面方向への放射振幅に対して反対方向への放射振幅が全く減衰しない条件である. 一方, Decay 6dB と Decay 12 dB は反対方向への放射振幅が正面方向への放射振幅に対して 6 dB 及び 12 dB 減衰する条件である. ゆえに, Omnidirectional, Decay 6 dB, Decay 12 dB となるほど球形スピーカの外側に鋭い放射指向特性を持っていると言える. これらは実際に球形スピーカに装着されているスピーカユニットを模擬した放射指向特性に近い条件となっており, 過去の球形スピーカに関する研究 [6] による

と, 440 Hz の場合に Omnidirectional, 1000 Hz の場合に Decay 6dB, 4000 Hz の場合に Decay 12dB に近い放射指向特性となっている. また, Real は実際のスピーカユニットと同じように反対方向への振幅減衰が周波数によって異なるように設定している.

算出した音圧  $p(\mathbf{r}, f, t)$  及び音響インテンシティベクトル  $\mathbf{I}(\mathbf{r}, f)$  から, 以下の式のように音像位置  $\mathbf{r}_E$  を推定した.

$$\mathbf{r}_E = \frac{1}{FN} \sum_f \sum_{j=1}^N \left\{ \mathbf{r}_j + \frac{\mathbf{I}(\mathbf{r}_j, f)}{p(\mathbf{r}_j, f)} \right\} \quad (10)$$

但し,  $N (= 162)$  は観測点の数,  $F (= 8)$  はシミュレーションに用いた周波数条件の数,  $\mathbf{r}_j$  は 162 点の観測点  $\mathbf{r}$  のうちの  $j$  番目の点の位置ベクトル,  $\mathbf{I}(\mathbf{r}_j, f)$  は  $\mathbf{r}_j$  において算出した音響インテンシティベクトル (但し,  $|\mathbf{I}(\mathbf{r}_j, f)| = 1$ ) を表す. また,  $p(\mathbf{r}_j, f)$  は  $\mathbf{r}_j$  における音圧  $p(\mathbf{r}_j, f, t)$  から, 以下の式によって算出した平均二乗音圧を表す.

$$p(\mathbf{r}_j, f) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{p(\mathbf{r}_j, f, t)\}^2 dt} \quad (11)$$

但し,  $T$  は周期を表す. また, 推定した音像位置の分散が最小となるように  $p(\mathbf{r}_j, f)$  を正規化してから  $\mathbf{r}_E$  を算出している. 一方, 音源探査技術の性能を評価するために, 音源位置  $\mathbf{r}_0$  に配置した音源を観測点  $\mathbf{r}$  において直接探査するという条件も同時に実施した.

### 3.2 シミュレーション結果

まず, 音源位置  $\mathbf{r}_0$  に配置した音源を観測点  $\mathbf{r}$  において直接探査した場合の推定位置結果を図 6 に示す. 但し,  $\mathbf{r}_E$  の  $z$  軸座標の値はほぼ 0 に等しかったので, これ以降の図は三次元空間のうち XY 平面のみをプロットしている. 図中の  $\times$  印は推定した音源位置  $\mathbf{r}_E$  を表す. また, 図中の灰色の円及びマイクロホンはマイクロホンアレイ (半径 0.8 m) を表す. 図 6 から,  $\mathbf{r}_E$  は入力した音源位置と同じ位置に推定されていることが分かる. 従って, 今回の計算機シミュレーションに用いた音源探査技術は正確に音源の位置を推定できると言える.

次に, 実際の球形スピーカによる影響を評価するために, 表 2 における Real 条件の場合の推定位置結果を図 7 に示す. 図中の  $\times$  印は推定した音像位置  $\mathbf{r}_E$  を表し, その周りの黒色の楕円は推定した音像位置  $\mathbf{r}_E$  の 95% 信頼区間を表す (横の長さが  $x$  軸方向の信頼区間, 縦の長さが  $y$  軸方向の信頼区間に相当する). また, 図中の灰色の円及びスピーカユニットは球形スピーカの大きさ (半径 0.085 m) を表す.

音源をマイクロホンアレイの中心に配置した場合 ( $d = 0$  m), 音像の位置は球形スピーカの中心 ( $\mathbf{r}_E = (0, 0, 0)^T$ ) に推定される. ゆえに, マイクロホンアレイの中心点と球形スピーカの中心点は不動点であるとみなせるので, この点を基準に演奏者の音像の大きさや形がどう変化しているかを評価することができる.

図 7 において, 推定された音像位置  $\mathbf{r}_E$  と球形スピーカ中心との距離は球形スピーカの大きさよりも小さくなっている. 従って, 球形スピーカによって演奏者を表現した場合, 演奏者の音像の全体的な大きさは球形スピーカの大きさに縮小されている

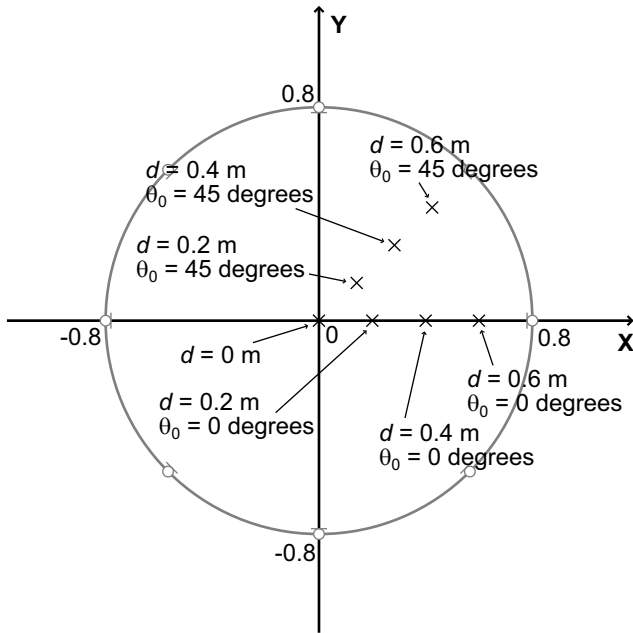


図6 XY平面上における推定された音源の位置座標

Fig.6 Position coordinates of estimated sound sources in the XY plane.

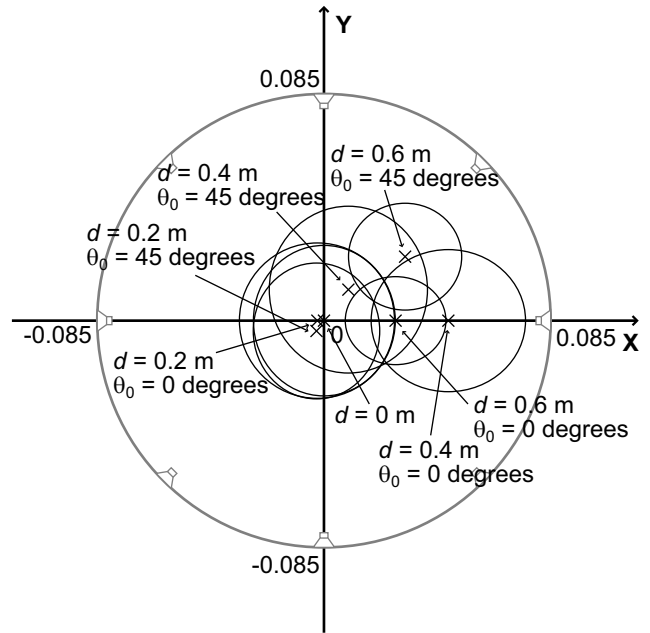


図8 XY平面上における推定された音像の位置座標及び95%信頼区間 ( $D_{si}$ : Omnidirectional)

Fig.8 Position coordinates and 95% confidential intervals of estimated sound images in the XY plane ( $D_{si}$ : Omnidirectional).

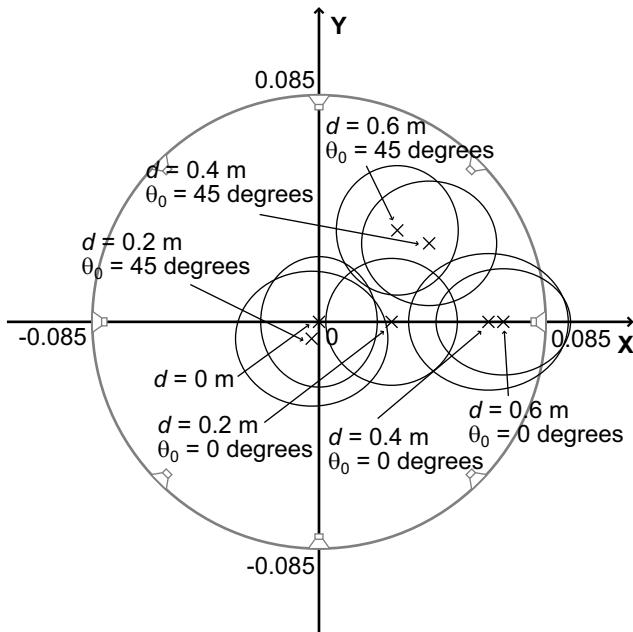


図7 XY平面上における推定された音像の位置座標及び95%信頼区間 ( $D_{si}$ : Real)

Fig.7 Position coordinates and 95% confidential intervals of estimated sound images in the XY plane ( $D_{si}$ : Real).

と言える。また、推定した音像位置の信頼区間に着目すると、全ての音像位置において球形スピーカの1/4程度の大きさになっている。ゆえに、球形スピーカによって複数の点音源を表現した場合、個々の点音源の大きさが非常に大きくなっていると言える。

また、スピーカユニットの放射指向特性による影響を評価するために、放射指向特性条件ごとの推定位置結果を図8-10に示す。

スピーカユニットの放射指向特性がOmnidirectionalの場合、

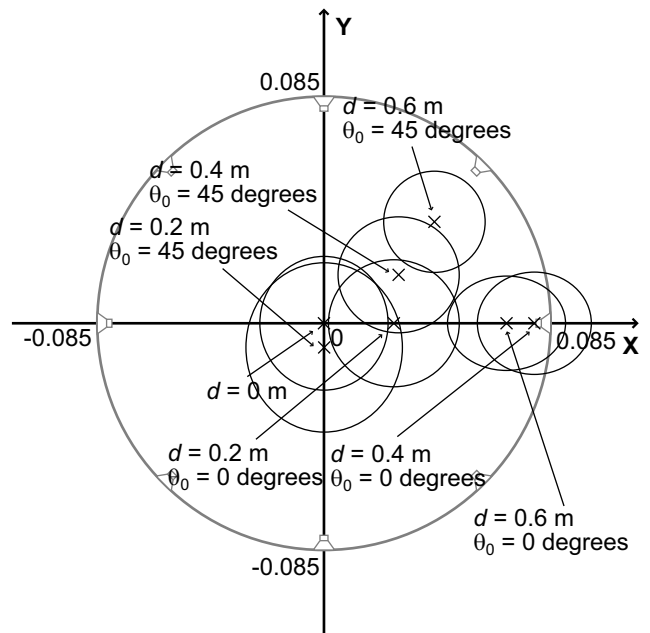


図9 XY平面上における推定された音像の位置座標及び95%信頼区間 ( $D_{si}$ : Decay 6 dB)

Fig.9 Position coordinates and 95% confidential intervals of estimated sound images in the XY plane ( $D_{si}$ : Decay 6 dB).

推定した音像位置は球形スピーカの中心に集中している傾向が見られるが、スピーカユニットの放射指向特性がDecay 6 dBやDecay 12 dBの場合、推定した音像位置は $d$ 及び $\theta_0$ の関係と相似形になっている傾向が見られる。従って、球形スピーカにおいてスピーカユニットの放射指向特性をより鋭くすれば、演奏者の音像の形が正しく保持されて演奏者が表現されるということが言える。

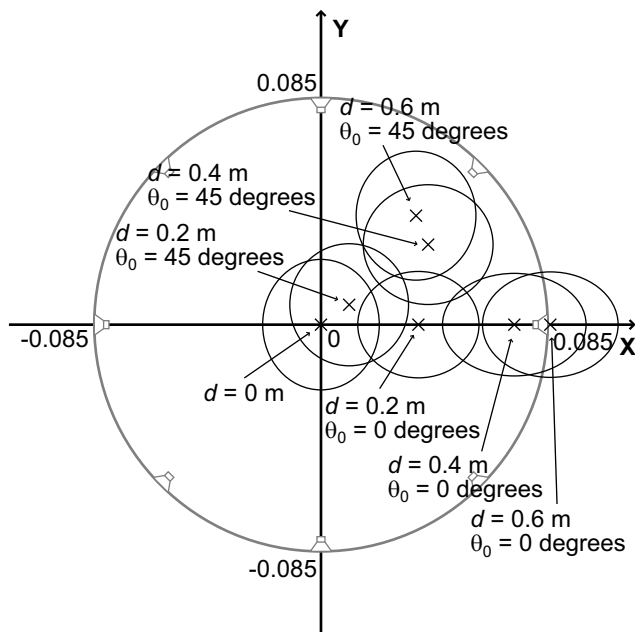


図 10 XY 平面上における推定された音像の位置座標及び 95%信頼区間 ( $D_{st}$ : Decay 12 dB)

Fig. 10 Position coordinates and 95% confidential intervals of estimated sound images in the XY plane ( $D_{st}$ : Decay 12 dB).

#### 4. ま と め

本報告では、我々が今までに開発してきている異なった放射特性を持つ球形スピーカによって再生される放射音場の数値解析を計算機シミュレーションを行うことによって実施した。音源探査技術を用いて複数の点音源の位置を推定することにより、球形スピーカによって表現される演奏者の音像の大きさと形を評価したところ、演奏者の音像の全体的な大きさは球形スピーカの大きさに縮小し、個々の点音源の大きさは非常に大きくなるということが分かった。また、スピーカユニットの放射指向特性を球形スピーカの外側により鋭く設定すれば、演奏者の音像の形が正しく保持されて表現されることが分かった。

今後は複数の点音源自身が放射指向特性を持つ場合を検討し、球形スピーカによって音場を再生した際に演奏者の音像の放射指向特性がどのように変化するかを検討する必要があると考えられる。

#### 文 献

- [1] 榎並和雅：“超臨場感システムの研究推進に向けて - (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 -”，画像ラボ, **18**, 9, pp. 41-45 (2007).
- [2] 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).
- [3] 及川靖広, 馬場貞如, 山崎芳男：“人間の聴覚を考慮した波面合成法による音場制御と音場再現”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **5**, 3, pp. 919-926 (2000).
- [4] 平井徹, 本地由和, 池田雅弘, 清水寧, 川上福司, 東山三樹夫：“遠隔地音楽レッスン用 AVW システムとその原理”，応用音響研究会技術報告 EA2000-17, 電子情報通信学会 (2000).
- [5] 火山浩一郎, 濱崎公男：“走査線 4000 本級超高精細映像のための 3 次元音響システム”，日本音響学会講演論文集, No. 2-10-12, pp. 567-568 (2004).
- [6] M. Katsumoto, Y. Yamakata and T. Kimura: “Realization of multi-

dimensional speaker with frequency dependence of directivity”, *Proc. AES Japan Sect. Conf.*, No. PS08, Osaka, Japan, pp. 1-6 (2008).

- [7] CEATEC JAPAN Website. <http://www.ceatec.com/>.
- [8] NAB show Website. <http://www.nabshow.com/>.
- [9] F. J. Fahy: “Sound Intensity”, Spon Press, UK (1995).
- [10] 橋秀樹, 矢野博夫：“環境騒音・建築音響の測定”，pp. 20-23, コロナ社, 東京 (2004).
- [11] H. Kenner: “Geodesic Math and How to Use It”, University of California Press, Berkeley, CA, second paperback edition (2003).