

# 波面合成法による立体音響において チャンネル数が音場知覚に及ぼす影響\*

木村敏幸(名古屋大), 筧一彦(中京大), 武田一哉(名古屋大), 板倉文忠(名城大)

## 1 はじめに

波面合成法 [1, 2] は Huygens の原理に従って制御領域内の波面を再生領域内に合成する立体音響技術である。この方法では複数の聴取者が再生領域内のどこに居ても構わないし、頭部も自由に動かすことができる。しかしながら、この方法によって波面を合成するためには非常に多くのチャンネルが必要になる。そのため、チャンネル数がどのような影響を及ぼすのかを検討することは非常に重要である。

従来の見解では波面を忠実に合成するためにはスピーカ間の間隔を波長の 1/2 以下に設定することが必要であり [3], システムの構築は非常に困難であるとされていた。一方、チャンネル数が音場知覚に及ぼす主観的な影響はあまり検討されていないので、本報告ではチャンネル数が音場知覚に及ぼす影響を検討するため、主観評価実験を実施する。Morimoto は音場知覚は方向感、距離感、空間印象に大別されるとしているので [4], 本報告では特に方向感と空間印象に着目し、2 種類の主観評価実験によってチャンネル数による方向感及び空間印象への影響を検討する [5]。

## 2 主観評価実験 1 - 方向感への影響 -

### 2.1 チャンネル信号の作成

方向感は主に音源からの直接音が作用している。従って、原音場は Fig. 1 に示すような自由空間とし、その中に半径  $r (=2 \text{ m})$  の制御領域を想定した。各マイクロホンの指向性は制御領域の外側に向いている。聴取位置による影響も検討するために、本論文では 4 箇所の聴取位置(中心, 前方, 後方, 側方)を設定した。このとき、中心から正面方向への聴取位置の移動距離を  $\Delta_x$ , 左側方向への移動距離を  $\Delta_y$  とすると、4 箇所の聴取位置の座標は以下のように表わされる。即ち,  $(\Delta_x, \Delta_y) = (0, 0), (0.5, 0), (-0.5, 0), (0, 0.5)$ 。但し, 単位は m である。灰色の円は仮想音源を表す。 $\phi$  は聴取位置における音源の方位角,  $d (=3, 4 \text{ m})$  は音源から聴取位

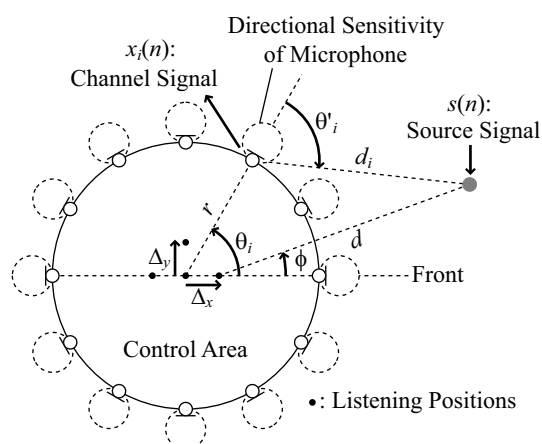


Fig. 1 主観評価実験 1 の原音場

置までの距離である。 $\theta_i (i=1 \dots M)$  は  $i$  番目のマイクロホンの方位角で,  $M$  はマイクロホンの総数である。音源から  $i$  番目のマイクロホンまでの距離  $d_i$  は (1) 式によって算出される。

$$d_i = \sqrt{d_{ix}^2 + d_{iy}^2}$$

$$d_{ix} = d \cos \phi + \Delta_x - r \cos \theta_i \quad (1)$$

$$d_{iy} = d \sin \phi + \Delta_y - r \sin \theta_i$$

従って、音源から  $i$  番目のマイクロホンまでの室内インパルス応答  $g_i(n)$  は (2) 式のように表される。

$$g_i(n) = \frac{D(i)}{d_i} \delta[n - \text{round}\left(\frac{d_i F_s}{c}\right)] \quad (2)$$

但し,  $\delta(n)$  は Dirac のデルタ関数,  $F_s (=48 \text{ kHz})$  はサンプリング周波数,  $c (=340 \text{ m/s})$  は音速を表す。また,  $D(i)$  は  $i$  番目のマイクロホンの指向性関数であり, (3) 式のように超指向性とした。

$$D(i) = \begin{cases} \cos \theta'_i & (|\theta'_i| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta'_i| > 90^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

但し,  $\theta'_i$  は Fig. 1 に示すように  $i$  番目のマイクロホンにおける音源の入射角を表す。

ドライソース  $s(n)$  にはサンプリング周波数 48 kHz, 長さ 1 s の白色雑音と音声を用いた。白色

\* Effect of the Number of Channel Signals on Sound Field Perception in Spatial Audio by Wave Field Synthesis. by T. Kimura, K. Kakehi, K. Takeda and F. Itakura (Nagoya Univ.)

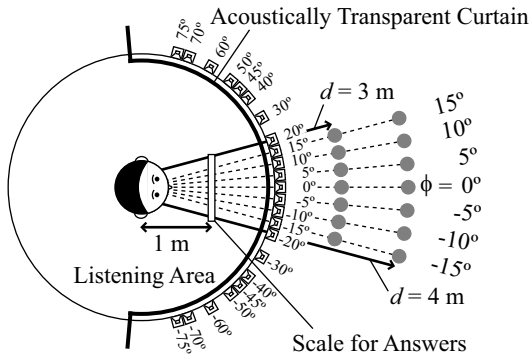


Fig. 2 主観評価実験 1 の環境 (中心位置)

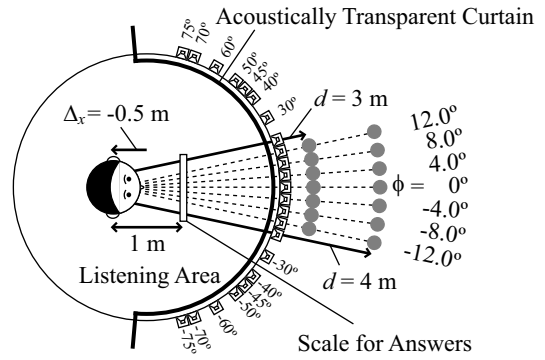


Fig. 4 主観評価実験 1 の環境 (後方位置)

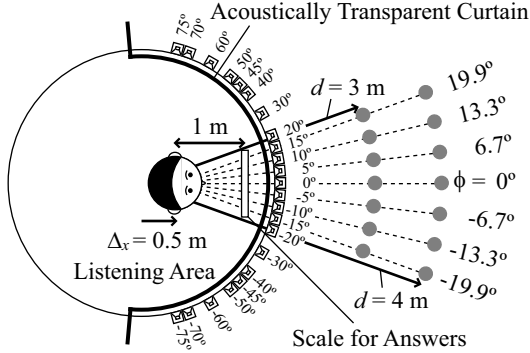


Fig. 3 主観評価実験 1 の環境 (前方位置)

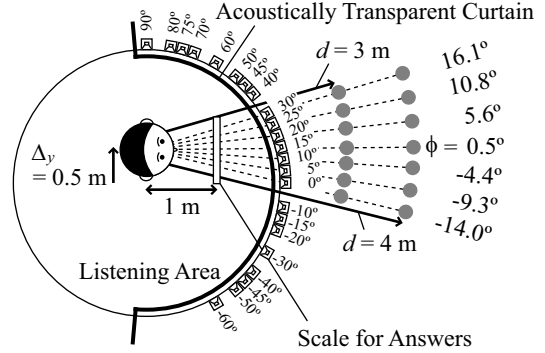


Fig. 5 主観評価実験 1 の環境 (側方位置)

雑音は MATLAB 上で作成し，音声は SQAM-CD [6] の音声サンプルから抜粋した．そして， $s(n)$  と  $g_i(n)$  から (4) 式に従って  $i$  番目のマイクロホンのチャンネル信号  $x_i(n)$  を作成した．但し， $*$  は畳み込み演算を表す．

$$x_i(n) = g_i(n) * s(n) = \frac{D(i)}{d_i} s[n - \text{round}(\frac{d_i F_s}{c})] \quad (4)$$

## 2.2 実験環境

主観評価実験は本来なら無響室で行う必要があるが，実験設備の都合上，残響時間が短い部屋 (約 80 ms の低残響室) で行った．Figs. 2–5 に示すように聴取者の正面方向の半径 2 m の円周上に計 23 個のスピーカを配置し，さらに 4 箇所の聴取位置を設定した．灰色の円はスピーカアレーによって再生される音像を表す．音像を正面方向に配置した場合，マイクロホンの指向性関数によって後方のチャンネル信号は零信号になるので，後方にスピーカを配置する必要はなくなる．部屋の暗騒音レベルは 25.0 dB(A) で，音圧レベルは円の中心において約 70 dB(A) に設定した．また，聴取者にスピーカアレーを見せないようにするため，照明を薄暗くし，スピーカアレーの前方には音響透過カーテンを設置した．

本実験ではチャンネル数に関する条件を 5 種類

設定した．実験条件を Fig. 6 に示す．条件 (a)–(e) における灰色のスピーカは先に述べた理由により配置しなかったスピーカを表す．これらの条件においては 23 個のスピーカの中から選ばれた 3, 5, 7, 11, 15 個のスピーカから (4) 式で算出されたチャンネル信号を同時に再生させた．その際，選ばれなかったスピーカには零信号を割り当てた．その結果，聴取者は Fig. 6 中の灰色の円で示された位置に音像を感じることになる．(f) に示す統制条件は従来から行われている音源定位の実験条件と同じである．ゆえに条件 (a)–(e) の実験結果を統制条件と比較してチャンネル数が方向感に及ぼす影響を検討する．但し，聴取位置が変わると統制条件における提示方向が変わるので，その際には合成音像の提示方向  $\phi$  を (5) 式によって変化した．

$$\phi_{\text{for,back,late}} = \tan^{-1} \left[ \frac{r \sin \phi_{\text{cent}} - \Delta_y}{r \cos \phi_{\text{cent}} - \Delta_x} \right] \quad (5)$$

ここで  $\phi_{\text{cent}}$ ,  $\phi_{\text{for}}$ ,  $\phi_{\text{back}}$ ,  $\phi_{\text{late}}$  は中心，前方，後方，側方位置における提示方向を表す．本実験では  $\phi_{\text{cent}} = 0, \pm 5, \pm 10, \pm 15^\circ$ ,  $\phi_{\text{for}} = 0, \pm 6.7, \pm 13.3, \pm 19.9^\circ$ ,  $\phi_{\text{back}} = 0, \pm 4.0, \pm 8.0, \pm 12.0^\circ$ ,  $\phi_{\text{late}} = -14.0, -9.3, -4.4, 0.5, 5.6, 10.8, 16.1^\circ$  に設定した．

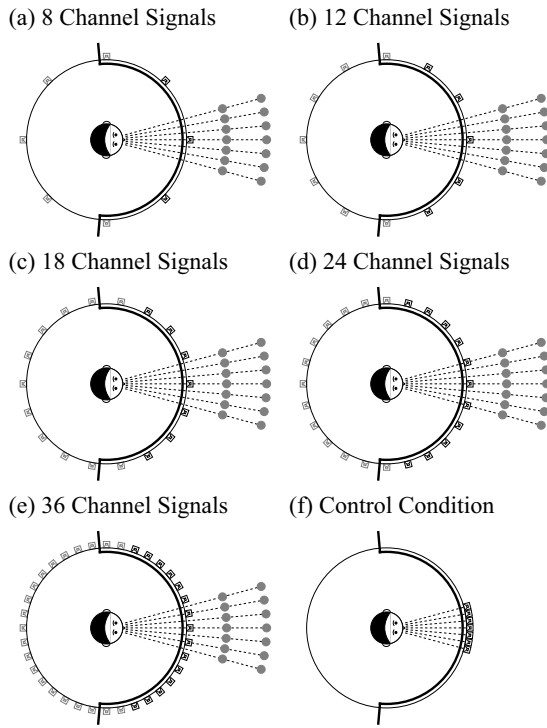


Fig. 6 主観評価実験 1 の条件 (中心位置)

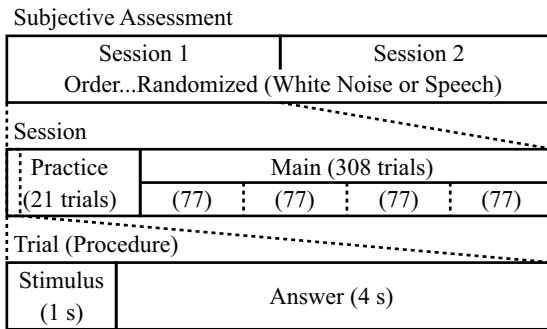


Fig. 7 主観評価実験 1 の流れ図

### 2.3 実験計画

聴取者は日常生活において聴力に異常の見られない12名の学生(うち男性10名,女性2名)である。1箇所の聴取位置あたり3名ずつの被験者で実験を行った。主観評価実験の流れ図を Fig. 7 に示す。まず,実験全体をドライソースごとに2つのセッションに分割した。その際,ドライソースの提示順序は被験者ごとにランダム化した。各セッションにおいて21回の練習試行の後,308回の本試行を行った。その際,77試行ごとに休憩時間を設けた。練習試行及び本試行の条件を Table 1 に示す。聴取者には音を聞いた後に音の聞こえた方向を回答するように教示した。その際, Figs. 2-5 に示すように聴取者の1 m 前方に配置した目盛りに従って回答させた。この目盛りは $-25^{\circ}$  から  $25^{\circ}$  まで  $2.5^{\circ}$  間隔で刻まれている。

Table 1 主観評価実験 1 の試行条件

	要因	備考
練習試行 (21)	= 提示方向 (7) × [チャンネル数 (1) × 距離 (2) + 統制条件]	条件 (e) 3, 4 m 条件 (f)
本試行 (308)	= 提示方向 (7) × [チャンネル数 (5) × 距離 (2) + 統制条件] × 繰り返し (4)	条件 (a) ~ (e) 3, 4 m 条件 (f)

また,回答の際には聴取者は頭部を自由に動かすことができた。

### 2.4 実験結果及び考察

聴取位置ごとの実験結果を Figs. 8-11 に示す。統制条件の場合は全ての聴取位置において回答方向が提示方向とほぼ同じである。すなわち,聴取者は音源の方向を正しく定位できているので,その他の条件における回答方向のずれはチャンネル数の変化によるものとみなすことができる。

チャンネル数が8, 12, 18の場合には全ての聴取位置において回答方向が提示方向と異なる条件が存在する。これはチャンネル数が少なすぎると,所望の方向へ音像を定位させることができなくなることを示している。一方,チャンネル数が24, 36の場合には全ての聴取位置において回答方向は全て提示方向とほぼ同じである。そこで,より定量的な評価を行うために,(6)式に示すような平均二乗誤差(MSE)を聴取位置ごとに算出する。

$$MSE[^{\circ}] = \sqrt{\frac{1}{7} \sum_{\phi} \{\psi(\phi) - \psi_{\text{control}}(\phi)\}^2} \quad (6)$$

ここで, $\phi$ は提示方向, $\psi_{\text{control}}(\phi)$ は統制条件における $\phi$ に対する回答方向, $\psi(\phi)$ はその他の条件における $\phi$ に対する回答方向を表す。チャンネル数に関する条件ごとに算出したMSEを Fig. 12 に示す。チャンネル数が24, 36の場合,MSEの値はどの聴取位置においても $3^{\circ}$ 以下である。これは正面方向における広帯域雑音の方向弁別限[7]よりも小さい。よって,方向感に及ばず影響という観点に基づいて波面合成法による立体音場再生システムを構築する場合,従来の検討[3]によれば約300-400Hz以下の範囲でしか波面が忠実に合成されていないような場合においても方向

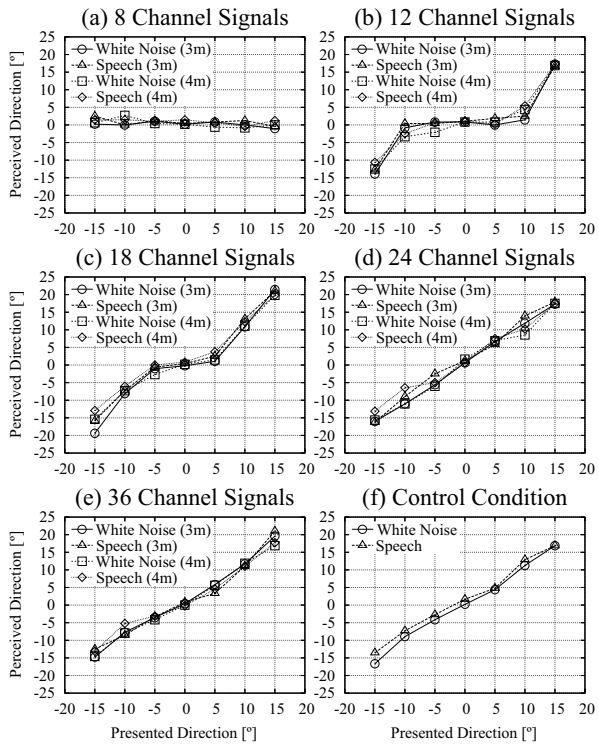


Fig. 8 主観評価実験 1 の結果 (中心位置)

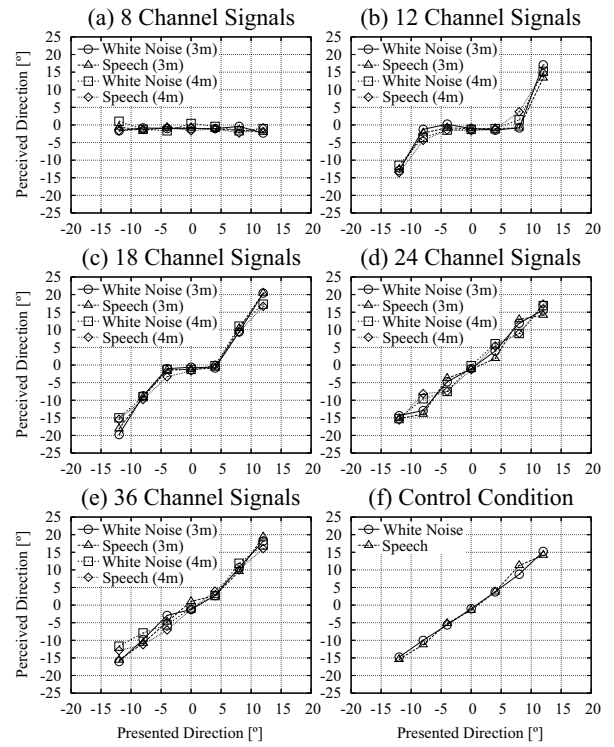


Fig. 10 主観評価実験 1 の結果 (後方位置)

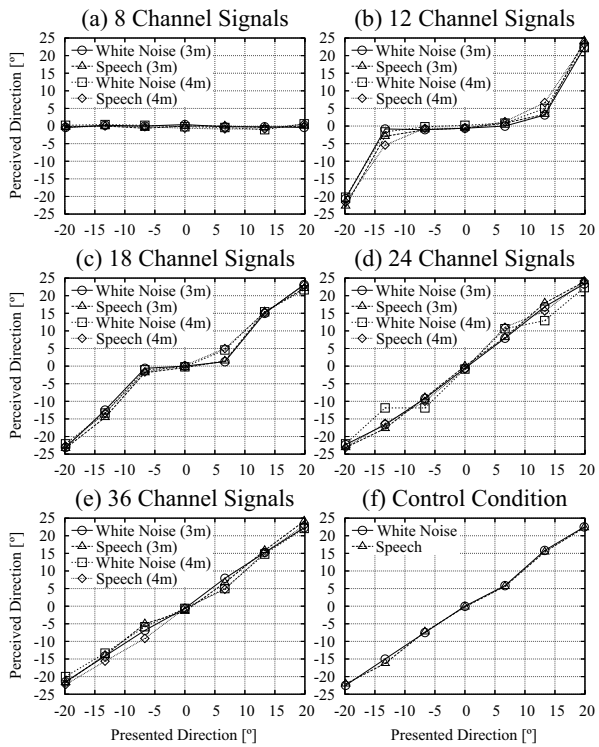


Fig. 9 主観評価実験 1 の結果 (前方位置)

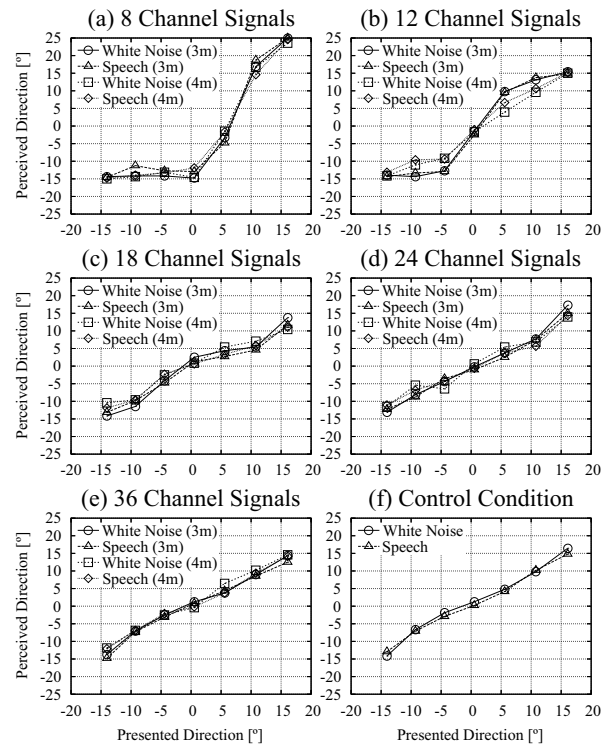


Fig. 11 主観評価実験 1 の結果 (側方位置)

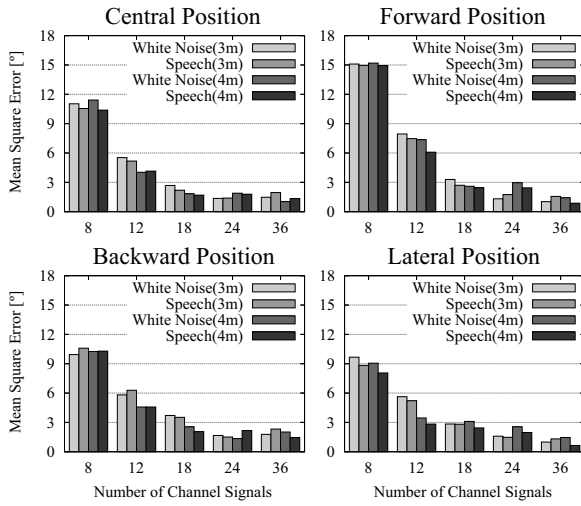


Fig. 12 主観評価実験1の平均二乗誤差

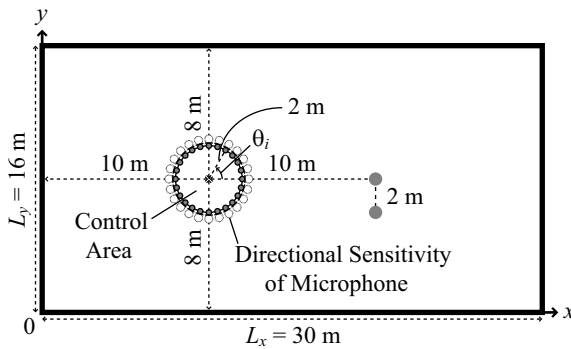


Fig. 13 主観評価実験2の原音場

感は十分に再現することができると考えられる。

### 3 主観評価実験2 - 空間印象への影響 -

#### 3.1 チャネル信号の作成

空間印象は主に音源からの反射音が作用している。従って、原音場は残響空間とし、虚像法 [8] を用いて1個の音源からマイクロホンまでの室内インパルス応答を計算機上で作成した。原音場の様子を Fig. 13 に示す。各マイクロホンの指向性は制御領域の外側に向けている。虚像法によると、 $x=0, x=L_x, y=0, y=L_y$  に壁面  $x_1, x_2, y_1, y_2$  を配置し、 $\mathbf{s}=(s_x, s_y)^T$  に無指向性音源、 $\mathbf{r}_i=(r_{ix}, r_{iy})^T$  に  $i$  番目の指向性マイクロホンを配置した場合の室内インパルス応答  $g_i(n)$  は (7) 式のように表わされる。

$$g_i(n) = \sum_{\mathbf{p}} \sum_{\mathbf{q}} D(i)B(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \frac{\delta[n - \text{round}(\frac{|\mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})|F_s}{c})]}{4\pi|\mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})|} \quad (7)$$

但し、 $\sum_{\mathbf{p}} = \sum_{p_x=0}^1 \sum_{p_y=0}^1$ 、 $\sum_{\mathbf{q}} = \sum_{q_x=-\infty}^{\infty} \sum_{q_y=-\infty}^{\infty}$ 、 $B(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \beta_{x1}^{|q_x-p_x|} \beta_{x2}^{|q_x|} \beta_{y1}^{|q_y-p_y|} \beta_{y2}^{|q_y|}$  ( $\beta_{x1}, \beta_{x2}, \beta_{y1}, \beta_{y2}$

は壁面  $x_1, x_2, y_1, y_2$  の反射係数) を示し、 $\delta(n)$  は Dirac のデルタ関数、 $F_s (=48 \text{ kHz})$  はサンプリング周波数、 $c (=340 \text{ m/s})$  は音速を表わす。また、

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}) &= \mathbf{s}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) - \mathbf{r}_i \\ &= \begin{pmatrix} (1-2p_x)s_x + 2q_xL_x \\ (1-2p_y)s_y + 2q_yL_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r_{ix} \\ r_{iy} \end{pmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

で、 $\mathbf{s}(\mathbf{p}, \mathbf{q})$  は虚像音源の位置ベクトルを表わす。一方、 $D(i)$  は  $i$  番目のマイクロホンの指向性を表わす関数であり、(9) 式に示されるような超指向性に設定した。

$$D(i) = \begin{cases} \frac{\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})}{|\mathbf{u}_i| |\mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})|} & (\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \geq 0) \\ 0 & (\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}) < 0) \end{cases} \quad (9)$$

但し、 $\mathbf{u}_i$  は  $i$  番目のマイクロホンの指向ベクトルである。

本実験では  $\mathbf{s}, \mathbf{u}_i, \mathbf{r}_i$  は以下のように設定した。

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} 20 \\ 8 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u}_i = \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi(i-12)}{12} \\ \sin \frac{\pi(i-12)}{12} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_i = 2\mathbf{u}_i + \begin{pmatrix} 10 \\ 8 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$\beta_{x1}, \beta_{x2}, \beta_{y1}, \beta_{y2}$  は同一の値とし、原音場をコンサートホールと想定するため、値を 0.75 とした。 $p_x, p_y, q_x, q_y$  の値は以下の条件を満たす全ての組み合わせを用いた。

$$|q_x - p_x| + |q_x| + |q_y - p_y| + |q_y| \leq R \quad (11)$$

但し、 $R (=50)$  は設定した壁面反射回数の最大値である。その結果、残響時間を Schroeder 法 [9] によって算出したところ、1.3 s であった。ドライソース  $s(n)$  にはサンプリング周波数 48 kHz、長さ 4 s の音声とフルートを用いた。音声は無響室内にて録音し、フルートは MIDI 音源から作成した。そして、 $s(n)$  と  $g_i(n)$  から  $i$  番目のマイクロホンのチャネル信号  $x_i(n)$  を (12) 式によって作成した。

$$\begin{aligned} x_i(n) &= g_i(n) * s(n) \\ &= \sum_{\mathbf{p}} \sum_{\mathbf{q}} D(i)B(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \frac{s[n - \text{round}(\frac{|\mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})|F_s}{c})]}{4\pi|\mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})|} \quad (12) \end{aligned}$$

#### 3.2 実験環境

実験は残響時間が短い部屋 (約 80 ms の低残響室) で行った。Figs. 14–17 に示すように半径 2 m の円周上に計 24 個のスピーカを配置し、さらに 4 箇所の聴取位置を設定した。灰色の円はスピー

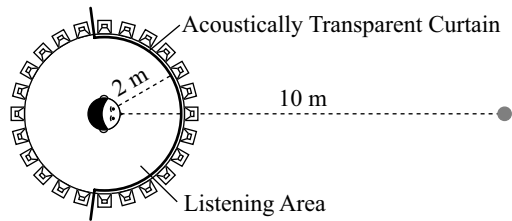


Fig. 14 主観評価実験2の環境(中心位置)

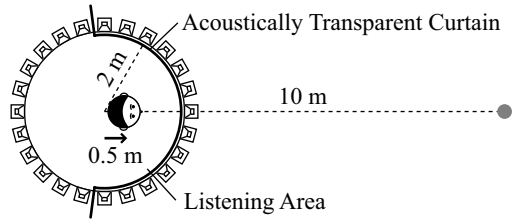


Fig. 15 主観評価実験2の環境(前方位置)

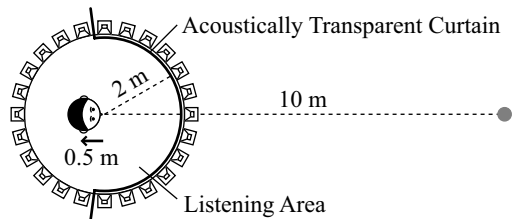


Fig. 16 主観評価実験2の環境(後方位置)

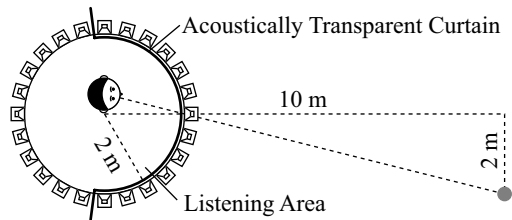


Fig. 17 主観評価実験2の環境(側方位置)

カアレーによって再生される音像を表す．部屋の暗騒音レベルは 25.0 dB(A) で，音圧レベルは円の中心において約 70 dB(A) に設定した．また，聴取者にスピーカアレーを見せないようにするため，照明を薄暗くし，スピーカアレーの前方には音響透過カーテンを設置した．

本実験ではチャンネル数に関する条件を 7 種類設定した．実験条件を Fig. 18 に示す．条件 (a) は典型的なモノニックとして設定した条件である．一方，条件 (b)–(g) では 24 個のスピーカの中から選ばれたスピーカから (12) 式で算出されたチャンネル信号を同時に再生した．その際，選ばれなかったスピーカには零信号を割り当てた．これらの条件では従来の検討 [3] より，チャンネル数が多くなるほど波面を忠実に合成することができる周波数帯域が広がっていきと考えることができる．

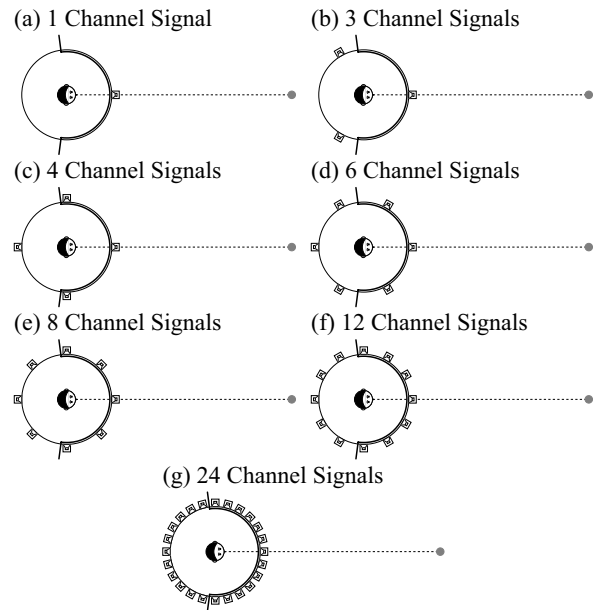


Fig. 18 主観評価実験2の条件(中心位置)

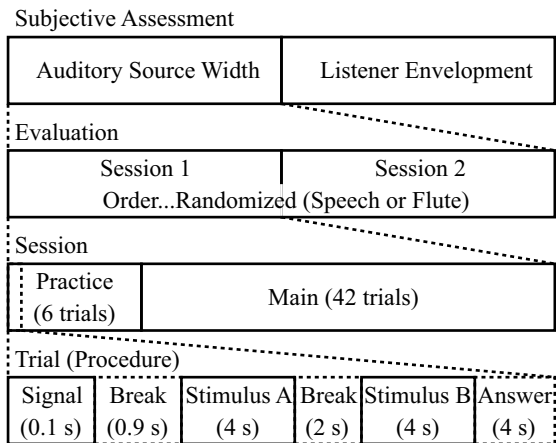


Fig. 19 主観評価実験2の流れ図

### 3.3 実験計画

聴取者は日常生活において聴力に異常の見られない 16 名の学生 (うち男性 12 名，女性 4 名) である．1 箇所の聴取位置あたり 4 名ずつの被験者で実験を行った．評価手法には Scheffé の一対比較法 (浦の変法)[10] を用いた．主観評価実験の流れ図を Fig. 19 に示す．Morimoto は空間印象は少なくとも 2 つの要素 (見かけの音源の幅 [Auditory Source Width, ASW] と音に包まれた感じ [Listener Envelopment, LEV]) に分類されている [4]．そこで，本実験においても ASW と LEV を別々に評価することで空間印象への影響を検討することにした．まず，実験全体を評価尺度ごとに 2 つに分割し，それぞれの評価においてドライソースごとに 2 つのセッションに分割した．その際，ドライソースの提示順序は被

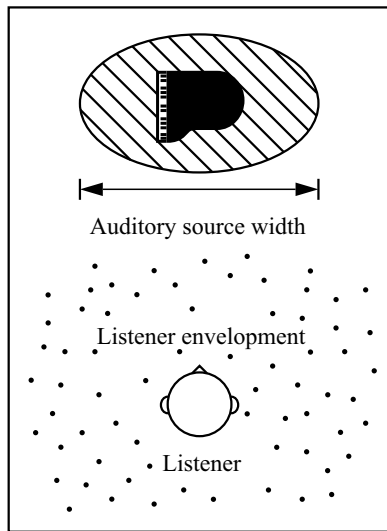


Fig. 20 ASW と LEV の概念図

Table 2 一対比較法の評価表

評価	ASW	LEV
3	非常に広い	非常に包まれている
2	かなり広い	かなり包まれている
1	少し広い	少し包まれている
0	同じ	同じ
-1	少し狭い	少し包まれていない
-2	かなり狭い	かなり包まれていない
-3	非常に狭い	非常に包まれていない

験者ごとにランダム化した。各セッションにおいて6回の練習試行の後、42回の本試行を行った。練習試行はFig. 18における3つの実験条件[条件(a), (b), (g)]の順列の総数(3×2=6)であり、本試行はFig. 18における7つの実験条件[条件(a)–(g)]の順列の総数(7×6=42)である。

主観評価実験に入る前に、聴取者にはFig. 20を見せてASWとLEVの定義について理解してもらった。この図は文献[4]から引用したものである。その後、先に提示した刺激音(A)を基準にして後に提示した刺激音(B)を聴取者に評価させた。その際、評価はTable 2に示すような7段階とした。また、評価の際には聴取者は頭部を自由に動かすことができた。

### 3.4 実験結果及び考察

Fig. 18で示した実験条件のうち、条件(a)は単に聴取者の正面方向から音源信号が再生されているだけなので、ASWやLEVは非常に小さいと考えられる。一方、条件(g)は聴取者の周りから反射音が再生されているので、ASWやLEV

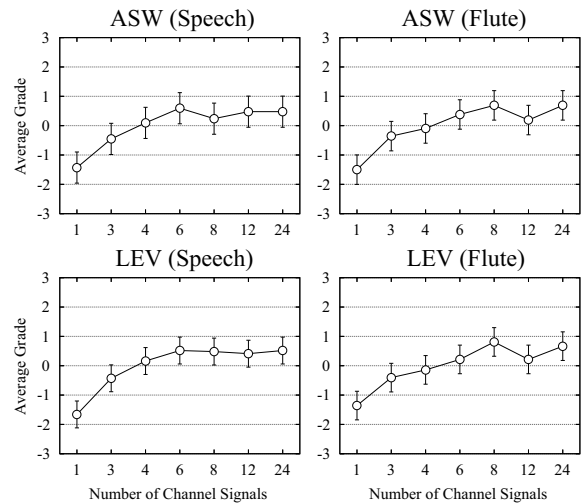


Fig. 21 主観評価実験2の結果(中心位置)

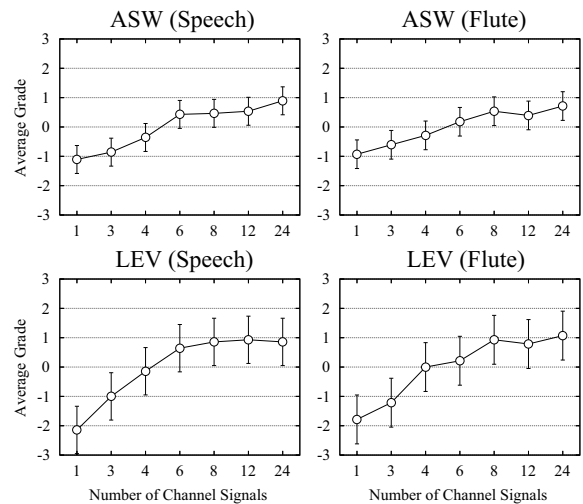


Fig. 22 主観評価実験2の結果(前方位置)

は非常に大きいと考えられる。ゆえに、聴取者がASWやLEVを正しく識別しているとするならば、条件(g)の評価値は条件(a)の評価値よりも非常に高くなることが予測される。そこで、聴取者ごとにSchefféの一対比較法(浦の変法)に基づいて平均評価値を算出し、条件(g)の評価値が条件(a)の評価値よりも有意に高いかどうかを調べることで、聴取者の選別を行った。そして、結果の分析にはASWやLEVを正しく識別できていると判定された聴取者のデータのみを用いることにした。

チャンネル数に関する条件ごとの平均評価値を聴取位置ごとにFigs. 21–24に示す。エラーバーはヤードスティックによる99%信頼区間を表す。検討したチャンネル数に関する条件の中で最も原音場に近いと言える24チャンネルを基準としてチャンネル数による空間印象への影響を検討する。チャ

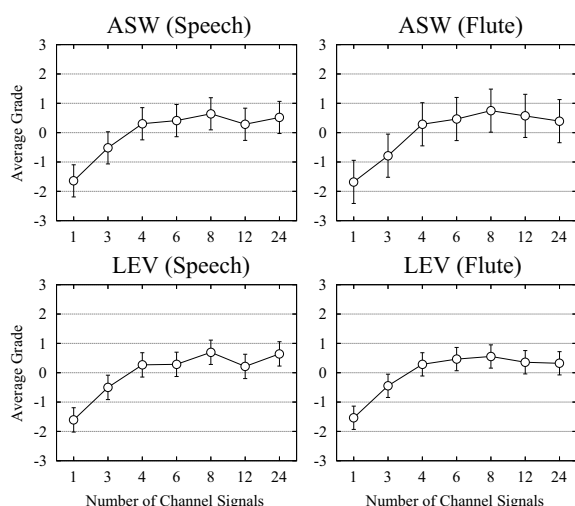


Fig. 23 主観評価実験 2 の結果 (後方位置)

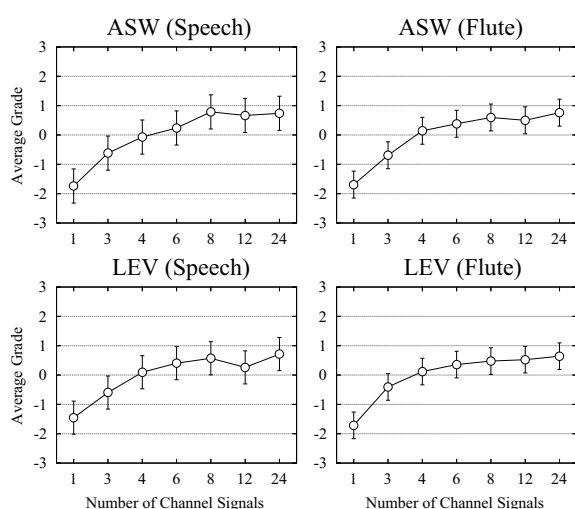


Fig. 24 主観評価実験 2 の結果 (側方位置)

ネル数が 1, 3, 4 の場合はチャンネル数が 24 の場合よりも平均評定値が低いことが多い。一方、チャンネル数が 6, 8, 12 の場合はチャンネル数が 24 の場合と平均評定値が同じ程度であることが多い。つまり、チャンネル数が 6 以上の場合は ASW や LEV に関する平均評定値に対するチャンネル数による影響はないと言える。従って、空間印象への影響という観点によって波面合成法による立体音場再生システムを構築する場合、従来の検討 [3] によれば約 100Hz 以下の範囲でしか波面が忠実に合成されていないような場合でも空間印象は十分に再現することができると考えられる。また、2 章で得られた結果と照らし合わせると、方向感が十分に再現されていないような場合でも空間印象は十分に再現することができると考えられる。

## 4 まとめ

本報告では波面合成法による立体音響システムにおいてチャンネル数が音場知覚に及ぼす影響を検討するために、方向感と空間印象に着目した 2 種類の主観評価実験を行った。その結果、正面付近に音源が存在する場合には従来の波面の物理的な再現精度による観点では非常に低い周波数帯域でしか波面が再現されていないにもかかわらず方向感や空間印象は十分に再現されていることが分かった。

実際に音場再生システムを構築する場合、制御領域は半径 2 m の円に設定できないことの方が多いため、今後は制御領域を別の形状 (例えば長方形など) にした場合においてチャンネル数が及ぼす影響を検討する必要がある。また、3 次元空間の音場再生システムを構築することも可能であるので、今後は 3 次元の場合についても検討を行う必要がある。

## 参考文献

- [1] M. Camras, J. Acoust. Soc. Am., 43 (6), 1425-1431, 1968.
- [2] A. J. Berkhout *et al.*, J. Acoust. Soc. Am., 93 (5), 2764-2778, 1993.
- [3] D. B. Ward *et al.*, IEEE Trans. SAP, 9 (6), 697-707, 2001.
- [4] M. Morimoto, Proc. of Int. Conf. on Auditory Display, 297-306, 2002.
- [5] 木村ら, 日本 VR 学会論文誌, 10 (2), 257-266, 2005.
- [6] EBU, "Sound Quality Assessment Material - Recordings for Subjective Tests", 1988.
- [7] J. Blauert, "Spatial Hearing", MIT Press, 1997.
- [8] J. B. Allen *et al.*, J. Acoust. Soc. Am., 65 (4), 943-950, 1979.
- [9] M. R. Schroeder, J. Acoust. Soc. Am., 37, 409-412, 1965.
- [10] 日科技連官能検査委員会, "官能検査ハンドブック", 日科技連出版社, 1973.