

波面合成におけるチャンネル数の主観的影響 - 音源が正面付近にある場合 -

木村 敏幸^{*1} 笥 一彦^{*2} 武田 一哉^{*1} 板倉 文忠^{*3}

Subjective Effect of the Number of Channel Signals in Wave Field Synthesis
- in the Case of Sound Sources of Frontal Direction -

Toshiyuki Kimura^{*1} Kazuhiko Kakehi^{*2} Kazuya Takeda^{*1} Fumitada Itakura^{*3}

Abstract – It is important to evaluate the effect of the number of channel signals in the sound field auralization system based on wave field synthesis. Although the effect of the number of channel signals on the physical accuracy of wave fronts was investigated, the effect of the number of channel signals on sound field perception was not evaluated. In this paper, two subjective assessments were performed for evaluating the effect of the number of channel signals on directional perception and spatial impression. The results of the two subjective assessments showed that there was no perceptual difference of the directional perception and spatial impression even if the wave fronts were reproduced in the very low frequency range.

Keywords : Wave field synthesis, Subjective assessment, Sound field perception, Directional perception, Spatial impression

1 はじめに

近年、離れた場所にいる人々が同じ室内で会議を行ったり、自分の居る場所で離れた場所のコンサートを聴いているかのように思わせるようなシステムを実現するために、音場再生技術が盛んに研究されている。このような聴覚バーチャルリアリティシステムが実用化されると、テレビ電話のような従来の音響システムとは比べ物にならないほどの臨場感を与えることができるため、遠隔コミュニケーションがより一層活発になっていくことが期待される。

波面合成法 [1–6] は制御領域の境界面上に配置したマイクロホンアレーで収録したチャンネル信号を制御領域と同じ形状をした再生領域の境界面上に配置したスピーカアレーで再生すると、Huygensの原理によって制御領域内の波面が再生領域内に再現される音場再生技術である。この方法は無響室などの音響的設備を必要とするが、音場再生技術として他に提案されているバイノーラル方式 [7, 8] やトランスオーラル方式 [9, 10] とは異なり、受聴者にとっての聴取位置や身体に関する制約がほとんどないため、複数の受聴者が再現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信号が必要になる。そのため、チャンネル数が波面合成法による音場再生システムに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と考えられる。

従来よりチャンネル数が波面合成法にどのような影響を及ぼすかについては合成された波面の物理的な再現精度の観点から検討されている。例えば、Wardらは球面上もしくは円周上に配置したスピーカアレーによって平面波を合成する際のスピーカの数による影響を検討し、波面を再現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ると報告している [11]。この場合、音場再生システムを構築する際に必要なチャンネル数は対象とする音の周波数帯域に依存することになる。しかしながら、コンサートホールのように帯域が少なくとも16 kHzであるような楽音を対象としたシステムを構築する場合には設定すべきスピーカ間の間隔は約1 cmになるため、実際に用いるスピーカの大きさを考慮すると、システムの構築は非現実的である。

一方、チャンネル数が音場知覚に及ぼす主観的な影響を検討することも考えられる。過去に神沼ら [12] やTakaneら [13] は提案した音場再生システムの主観的性能を評価している。しかし、従来の研究ではチャンネル数の条件は1種類に限定していた。また、方向感への影響のみを検討していたため、音場知覚への影響に関する全ての側面については検討していなかった。

^{*1}名古屋大学大学院 情報科学研究科

^{*2}中京大学 情報科学部

^{*3}名城大学 理工学部

^{*1}Graduate School of Information Science, Nagoya Univ.

^{*2}School of Computer and Cognitive Sciences, Chukyo Univ.

^{*3}Faculty of Science and Technology, Meijo Univ.

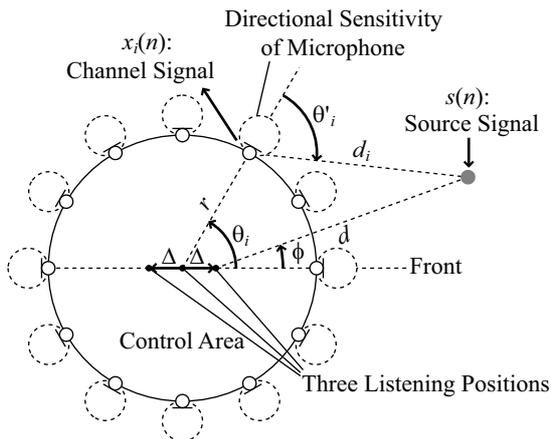


図1 方向感の主観評価における原音場
Fig.1 Original sound field in the subjective
assessment for directional perception.

そこで本論文では波面合成法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、チャンネル数に関する条件を複数設定した主観評価実験を行う。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 [14]、本論文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した。音源が 3 m~15 m 離れている場合、距離感は音の大きさに依存する [15]。従って、上記の音源距離を想定している音場再生システムにおいては音の大きさを制御するだけでチャンネル数に関係なく距離感が十分に再現されると考えたので、本論文では距離感については検討しなかった。また、従来の音場再生システムは主に 2 次元平面を想定しているため、本論文においても制御領域は 2 次元平面とした。また、波面合成法は聴取位置が制限されていないことが特徴なので、本論文では複数の聴取位置を設定し、聴取位置による影響の有無についても合わせて検討した。

2 主観評価実験 1 - 方向感の検討 -

2.1 マルチチャンネル信号の作成

方向感には主に音源からの直接音が作用している。従って、原音場は図 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 3 箇所の聴取位置 (中心 $[\Delta=0 \text{ m}]$, 前方 $[\Delta=0.5 \text{ m}]$, 後方 $[\Delta=-0.5 \text{ m}]$) を設定した。灰色の円は仮想音源を表す。 ϕ 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。

$$d_i = \sqrt{(d \cos \phi + \Delta - r \cos \theta_i)^2 + (d \sin \phi - r \sin \theta_i)^2} \quad (1)$$

従って、音源から i 番目のマイクロホンまでの室内伝達関数 $g_i(n)$ は (2) 式のように表される。

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

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、 $D(\theta'_i)$ は i 番目のマイクロホンの指向性関数であり、(3) 式のように定義される。

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

但し、 θ'_i は図 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。この指向性関数は超指向性マイクロホンの指向特性である。Hulsebos らはマイクロホンアレーを構築する際に超指向性マイクロホンを用いれば無指向性マイクロホンよりも波面が正確に再現されると報告している [16]。よって、本論文においてもマイクロホンの指向性は超指向性とした。超指向性マイクロホンはガン・マイクロホンとして実用化されているので、実際にマイクロホンアレーを構築する際にはガン・マイクロホンを用いれば実環境におけるマイクロホンアレーを構築できると考えられる。

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。白色雑音は MATLAB 上で作成し、音声は SQAM-CD [17] 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。

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

2.2 実験環境

波面合成法による音場再生システムにおける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。図 2 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 3 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

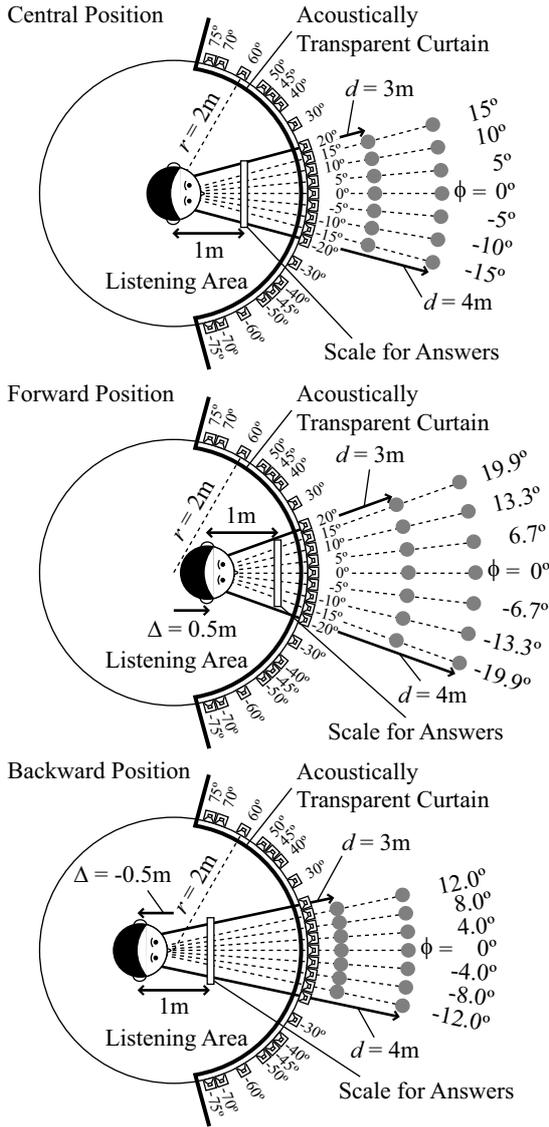


図2 方向感の主観評価における実験環境
Fig.2 Experimental environment in the subjective assessment for directional perception.

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。実験条件を図3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、聴取者は図3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

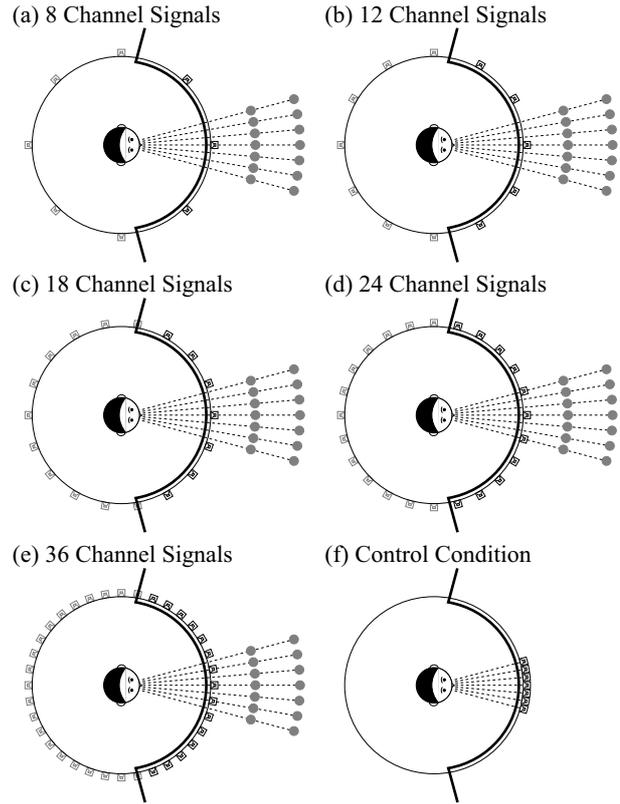


図3 方向感の主観評価における実験条件 (中心位置の例)

Fig.3 Experimental conditions in the subjective assessment for the directional perception (Central position).

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 ϕ を(5)式によって変化させた。

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

ここで ϕ_{cent} , ϕ_{for} , ϕ_{back} は中心, 前方, 後方位置における提示方向を表す。本実験では $\phi_{\text{cent}}=0, \pm 5, \pm 10, \pm 15^\circ$, $\phi_{\text{for}}=0, \pm 6.7, \pm 13.3, \pm 19.9^\circ$, $\phi_{\text{back}}=0, \pm 4.0, \pm 8.0, \pm 12.0^\circ$ に設定した。

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9名の学生(うち男性8名, 女性1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図4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表1に示す。

Subjective Assessment

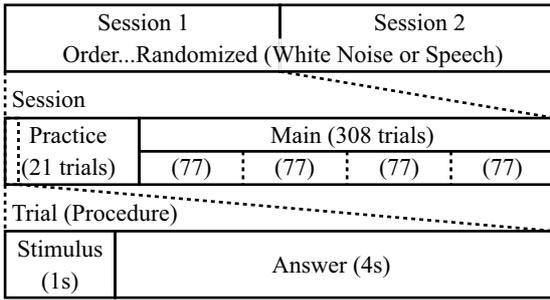


図4 方向感の主観評価の流れ図

Fig. 4 Flowchart of the subjective assessment for the directional perception.

表1 方向感の主観評価における試行条件

Table 1 Trial conditions in the subjective assessment for the directional perception.

	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]	図3の条件 (e) 3, 4 m 図3の条件 (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)	図3の条件 (a)~(e) 3, 4 m 図3の条件 (f)

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、図2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°から25°まで2.5°間隔で刻まれている。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図5~7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0°に変位しているような提示方向が存在する。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。この理由を図8を用いて説明する。

図8は中心位置に聴取者を配置し、チャンネル数が8, 提示方向が15°の場合である。この場合、聴取者は音源信号に距離 d_1, d_2, d_3 に相当した遅延を設けた3つのチャンネル信号 $x_1(n), x_2(n), x_3(n)$ により合成された音

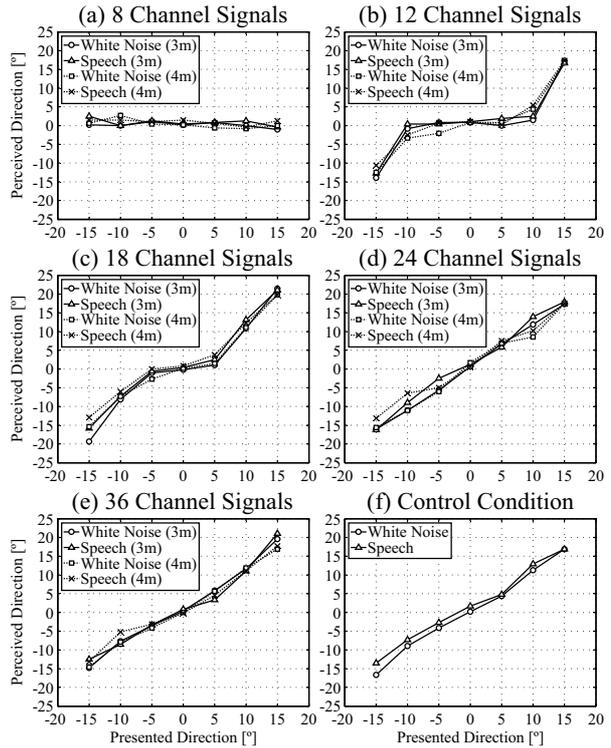


図5 方向感の主観評価の実験結果：中心位置
Fig. 5 Results of the subjective assessment for the directional perception (Central position).

像を定位することになる(図8(A)を参照)。但し、チャンネル信号のインデックスと各スピーカの方位角は以下のように割り当てている： $\theta_1=0^\circ, \theta_2=45^\circ, \theta_3=-45^\circ$ 。言い換えると、聴取者は音源信号に距離 $d_1+d'_1, d_2+d'_2, d_3+d'_3$ に相当した遅延を設けた3つの音を聞くことになる。ここで、 d'_1, d'_2, d'_3 は各スピーカから聴取者までの距離である。このうち、 $d_1+d'_1$ が最も短い距離であるので、聴取者が最初に聞く音は $x_1(n)$ である。一方、 $d_2+d'_2, d_3+d'_3$ が $d_1+d'_1$ に比べて $0.001 \times c \text{ m}$ (c は音速)以上長くなると、聴取者は $x_1(n)$ から1 ms以上遅れて $x_2(n), x_3(n)$ を聞くことになる(図8(B)を参照)。すると、 $x_1(n)$ に対する先行音効果[18]が生じるので、 $x_2(n)$ と $x_3(n)$ は音像の定位に全く寄与しなくなる。その結果、 $x_1(n)$ のみを聞いた場合と同じ方向(本実験においては 0°)に音像が定位することになる(図8(C)を参照)。このことは聴取者が前方や後方にいる場合でも同様に導き出される。従って、与えられた音源、聴取者、スピーカアレーの位置関係から聴取者が最初に聞く音に比べて他の音が1 ms以上遅れているかどうかを判定することによってチャンネル数による方向感への影響を検討することができると考えられる。

一方、チャンネル数が24, 36の場合には上記のような

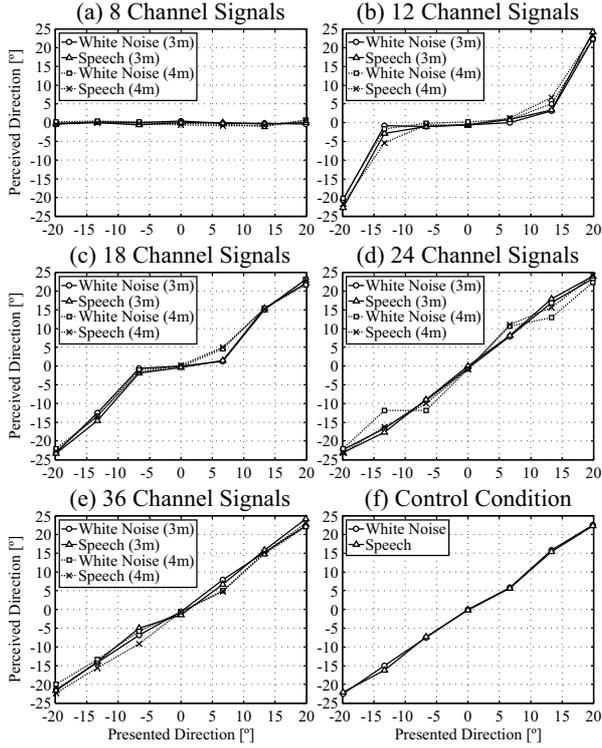


図6 方向感の主観評価の実験結果：前方位置
Fig.6 Results of the subjective assessment for the directional perception (Forward position).

現象は生じないので、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。

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

ここで、 ϕ は提示方向、 $\psi_{\text{control}}(\phi)$ は統制条件における ϕ に対する回答方向、 $\psi(\phi)$ はその他の条件における ϕ に対する回答方向を表す。チャンネル数条件ごとに算出した MSE を図9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° 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 [19] よりも小さい。よって、方向感に及ぼす影響という観点に基づいて波面合成法による音場再生システムを構築する場合、Wardら [11] の1/2波長説に基づけば約300~400Hz以下の範囲でしか波面が正確に再現されていないような場合においても方向感是十分に再現することができると思われる。

3 主観評価実験2 - 空間印象の検討 -

3.1 マルチチャンネル信号の作成

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 [20] を用いて

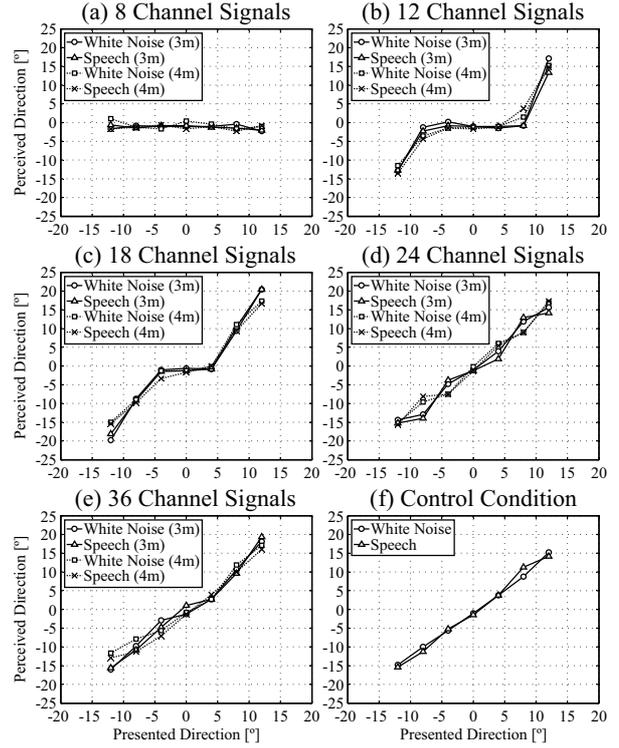


図7 方向感の主観評価の実験結果：後方位置
Fig.7 Results of the subjective assessment for the directional perception (Backward position).

音源からマイクロホンまでの室内伝達関数を計算機上で作成した。2次元平面上の残響空間中に半径 r ($=2$ m) の制御領域と1個の音源を想定した原音場の様子を図10に示す。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伝達関数 $g_i(n)$ は(7)式のように表わされる。

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

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 ($=48$ kHz) はサンプリング周波数、 c ($=340$ m/s) は音速を表わす。また、

$$\mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \mathbf{s}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) - \mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} (1-2p_x)s_x + 2q_x L_x \\ (1-2p_y)s_y + 2q_y L_y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r_{ix} \\ r_{iy} \end{pmatrix} \quad (8)$$

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、 $D[\mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})]$ はマイクロホンの指向性を表わす関

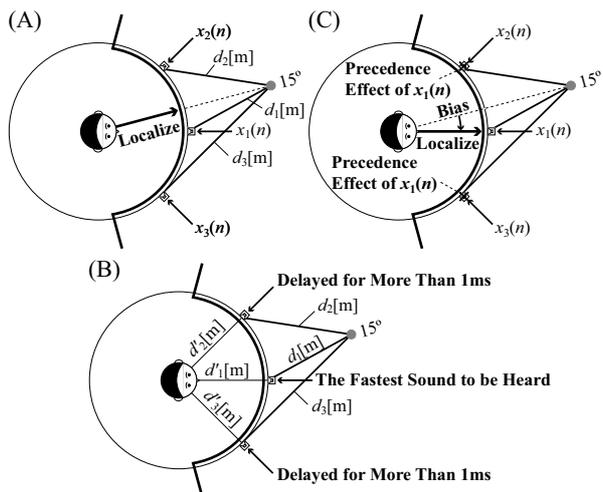


図8 定位方向の変位：中心位置，チャンネル数8，提示方向 15°

Fig. 8 Bias of localization (Central position, 8 channels and 15° presented direction).

数であり，本実験では方向感の主観評価実験と同じように (9) 式に示されるような超指向性型に設定した。

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

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。

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} 20 \\ 8 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{u}_i = \begin{pmatrix} \cos \frac{\pi(i-12)}{12} \\ \sin \frac{\pi(i-12)}{12} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{r}_i = 2\mathbf{u}_i + \begin{pmatrix} 10 \\ 8 \end{pmatrix}$$

β_{x1} ， β_{x2} ， β_{y1} ， β_{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 [21] 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ンネル信号 $x_i(n)$ を (12)

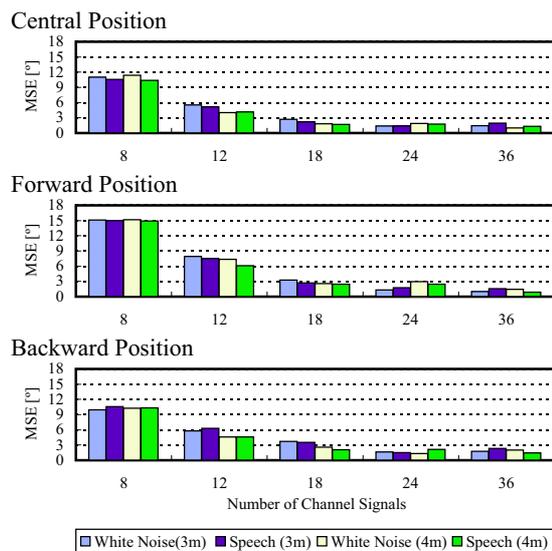


図9 方向感の主観評価の平均二乗誤差

Fig. 9 Mean square errors for the directional perception.

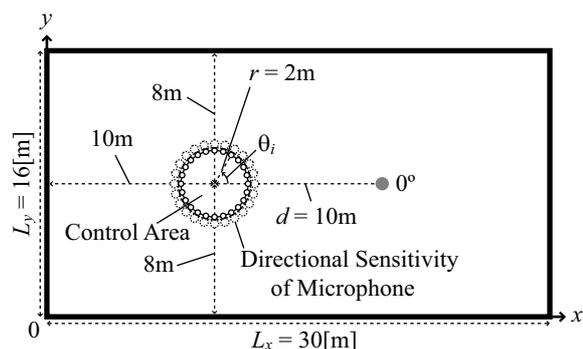


図10 空間印象の主観評価における原音場

Fig. 10 Original sound field used in the subjective assessment for the spatial impression.

式によって作成した。

$$x_i(n) = g_i(n) * s(n)$$

$$= \sum_{\mathbf{p}} \sum_{\mathbf{q}} D[\mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})] \quad (12)$$

$$B(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \frac{s[n - \text{round}(\frac{|\mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})| F_s}{c})]}{4\pi |\mathbf{d}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})|}$$

3.2 実験環境

実験は 2 章で用いた部屋と同じ部屋 (約 80 ms の低残響室) で行った。図 11 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 3 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。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

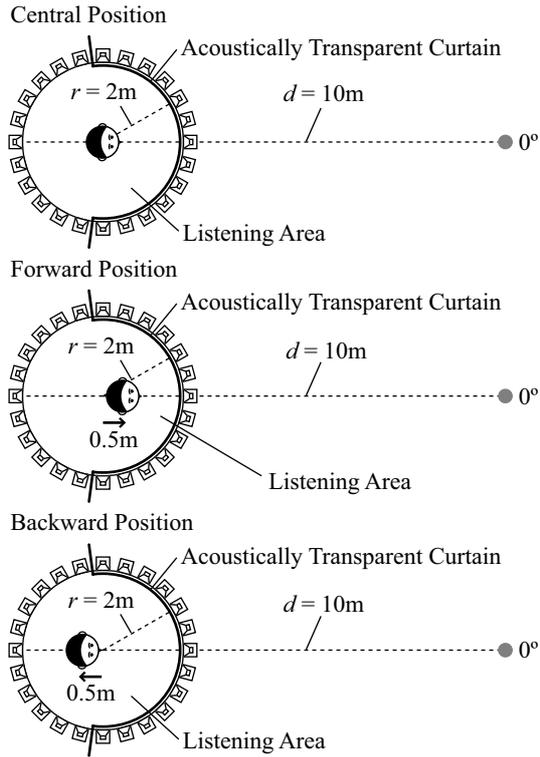


図 11 空間印象の主観評価における実験環境
Fig. 11 Experimental environment of the subjective assessment for the spatial impression.

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。実験条件を図12に示す。条件(a)は典型的なモノホ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。本実験では従来の波面の再現精度の観点に基づく検討と同じように空間分解能を全方位に対して均等にするため, 円周上の等間隔のスピーカを選定した。これらの条件ではWardらによる従来の検討[11]より, チャンネル数が多くなるほど波面を再現することができる。

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9名の学生(うち男性6名, 女性3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。評価手法にはSchefféの一对比較法(浦の変法)[22]を用いた。主観評価実験の流れ図を図13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])に分類されるとし

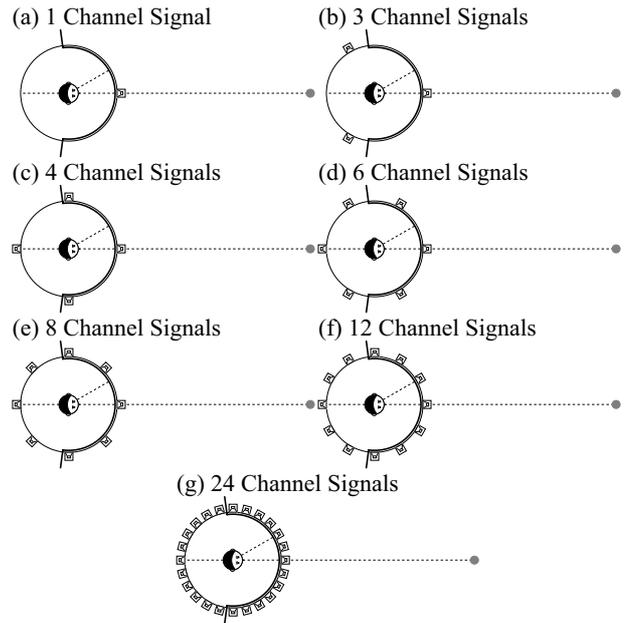


図 12 空間印象の主観評価における実験条件 (中心位置の例)

Fig. 12 Experimental conditions in the subjective assessment for the spatial impression (Central position).

ている[14]。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。練習試行は図12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, 本試行は図12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, 聴取者には図14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[14]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)を聴取者に評定させた。その際, 評定は表2に示すような7段階とした。また, 評定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

得られた実験結果を12種類 [=聴取位置(3)×評価尺度(2)×ドライソース(2)]のセッションごとにSchefféの一对比較法(浦の変法)に基づいて分散分析を行ったところ, 全てのセッションにおいてチャンネル数に基づく主効果が0.1%有意であった。その結果, チャンネル数の変化による空間印象への影響に有意差が見られると判断されたので, チャンネル数条件ごとに平均評定値

Subjective Assessment

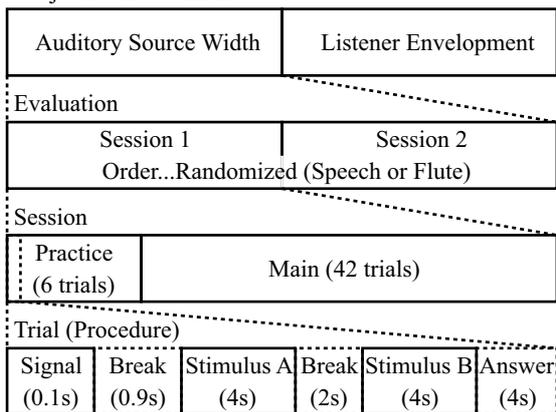


図 13 方向感の主観評価の流れ図
Fig.13 Flowchart of the subjective assessment for the spatial impression.

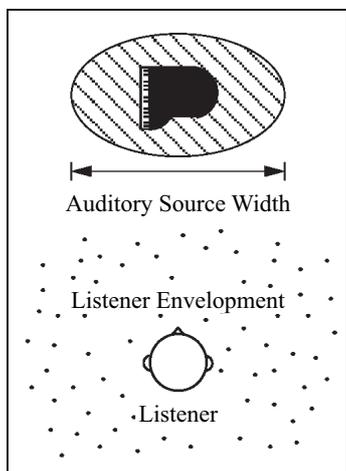


図 14 見かけの音源の幅 (ASW) と音に包まれた感じ (LEV) の概念図 ([14] より引用).
Fig.14 Concepts of Auditory Source Width (ASW) and Listener Envelopment (LEV) (referred from [14]).

を算出し、評定値の差によってチャンネル数による影響を検討することにした。

チャンネル数条件ごとの平均評定値を聴取位置ごとに図 15~17 に示す。エラーバーはヤードスティックによる 95%信頼区間を表す。チャンネル数が 1 の条件は単なるモノラル信号を聞いているだけなので、明らかに他の条件よりも平均評定値が低くなっている。ゆえに、この結果から見ると聴取者は ASW や LEV を正しく聞き分けていると考えられる。

検討したチャンネル数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。チャンネル数が 1, 3, 4, 6 の場合は 24 チャンネルよりも 5%有意で平均評定値が低い場合が存在する。一方、チャンネル数が 8 と 12 の場

表 2 Scheffé の一対比較法の評定表
Table 2 Scale of Scheffé's paired comparison.

評定	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

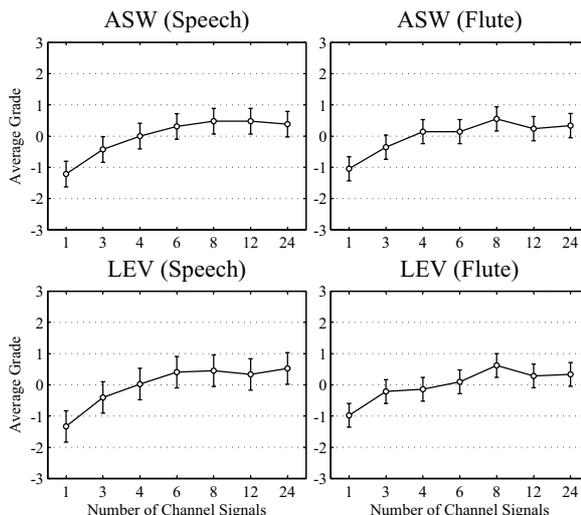


図 15 空間印象の主観評価の実験結果: 中心位置
Fig.15 Results of the subjective assessment for the spatial impression (Central position).

合は全ての実験条件において平均評定値の 24 チャンネルとの有意差は見られない。つまり、チャンネル数が 8 以上の場合には ASW や LEV に関する平均評定値に対するチャンネル数の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音場再生システムを構築する場合、Ward ら [11] の 1/2 波長説に基づけば約 100Hz 以下の範囲でしか波面が正確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。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

本論文では波面合成法による音場再生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おいては従来の波面の物理的な再現精度による

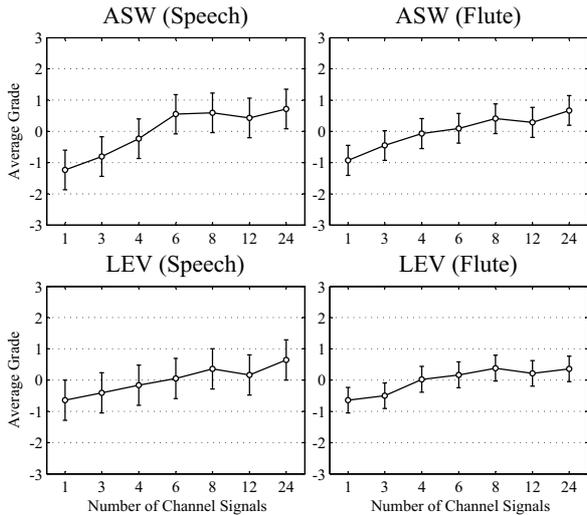


図 16 空間印象の主観評価の実験結果: 前方位置
Fig. 16 Results of the subjective assessment for the spatial impression (Forward position).

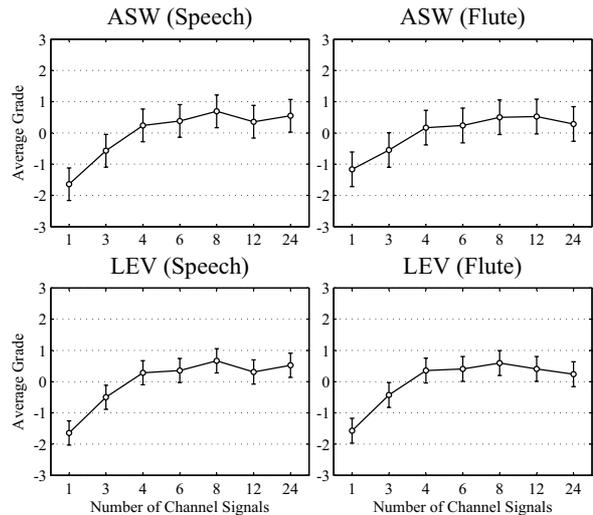


図 17 空間印象の主観評価の実験結果: 後方位置
Fig. 17 Results of the subjective assessment for the spatial impression (Backward position).

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くても方向感や空間印象は十分に再現されることが分かり, このことを考慮すれば実用的なチャンネル数による音場再生システムでも主観的には十分な性能が得られる可能性が示された。

本論文では実験設備の都合上, 制御領域は半径 2 m の円に設定した。しかし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が多い。ゆえに, 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, 本論文では 2 次元平面上で検討を行ったが, もちろん 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。今後は 3 次元の場合についても検討を行う必要がある。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金 COE 形成基礎研究費 (課題番号 11CE2005), 基礎研究 B (課題番号 11480075) 及び基盤研究 B (課題番号 14380159) の一部の補助を受けて行われた。

参考文献

[1] M. Camras: "Approach to recreating a sound field", *J. Acoust. Soc. Am.*, **43**, pp. 1425-1431 (1968).
[2] A. J. Berkhout, D. de Vries and P. Vogel: "Acoustic control by wave field synthesis", *J. Acoust. Soc. Am.*, **93**, pp. 2764-2778 (1993).
[3] S. Ise: "A principle of sound field control based on the Kirchhoff-Helmholtz integral equation and the theory of inverse systems", *Acustica - Acta*

Acustica, **85**, pp. 78-87 (1999).
[4] S. Takane, Y. Suzuki and T. Sone: "A new method for global sound reproduction based on Kirchhoff's integral equation", *Acustica - Acta Acustica*, **85**, pp. 250-257 (1999).
[5] 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 VR 学会論文誌*, **5**, 3, pp. 919-926 (2000).
[6] 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).
[7] 浜田晴夫: "バイノーラル音場再生系について", *日本音響学会誌*, **48**, 4, pp. 250-257 (1992).
[8] S. Takane, Y. Suzuki, T. Miyajima and T. Sone: "A new theory for high definition virtual acoustic display named ADVISE", *Acoust. Sci. and Tech.*, **24**, pp. 276-283 (2003).
[9] 安藤四一, 設楽貞樹, 前川純一, 城戸健一: "電子計算機による室内音響設計法に関する二, 三の基礎的考察", *日本音響学会誌*, **29**, 3, pp. 151-159 (1973).
[10] J. Bauck and D. H. Cooper: "Generalized transaural stereo and applications", *J. Audio Eng. Soc.*, **44**, pp. 683-705 (1996).
[11] D. B. Ward and T. D. Abhayapala: "Reproduction of a plane-wave sound field using an array of loudspeakers", *IEEE Trans. SAP*, **9**, pp. 697-707 (2001).
[12] 神沼充伸, 伊勢史郎, 鹿野清宏: "受聴者の頭部の動きを考慮した多チャンネル音場再現システム", *日本 VR 学会論文誌*, **5**, 3, pp. 957-964 (2000).
[13] S. Takane, S. Takahashi, Y. Suzuki and T. Miyajima: "Elementary real-time implementation of a virtual acoustic display based on ADVISE", *Acoust. Sci. & Tech.*, **24**, pp. 304-310 (2003).
[14] M. Morimoto: "The relation between spatial impression and the precedence effect", *Proc. of International Conf. on Auditory Display*, pp. 297-306 (2002).
[15] J. Blauert: "Spatial Hearing", p. 118, MIT Press, Cambridge, Mass., revised edition (1997).

- [16] E. Hulsebos, D. de Vries and E. Bourdillat: "Improved microphone array configurations for auralization of sound fields by wave-field synthesis", J. Audio Eng. Soc., **50**, pp. 779-790 (2002).
- [17] Technical Centre of the European Broadcasting Union (EBU): "Sound Quality Assessment Material - Recordings for Subjective Tests".
- [18] H. Wallach, E. B. Newman and M. R. Rosenzweig: "The precedence effect in sound localization", Am. J. Psychol., **62**, pp. 315-336 (1949).
- [19] J. Blauert: "Spatial Hearing", p. 39, MIT Press, Cambridge, Mass., revised edition (1997).
- [20] J. B. Allen and D. A. Berkley: "Image method for efficiently simulating small-room acoustics", J. Acoust. Soc. Am., **65**, pp. 943-950 (1979).
- [21] M. R. Schroeder: "New method of measuring reverberation time", J. Acoust. Soc. Am., **37**, pp. 409-412 (1965).
- [22] 日科技連官能検査委員会: "官能検査ハンドブック", pp. 366-374, 日科技連出版社, 東京都渋谷区, 新版 (1973).

板倉 文忠



1963 年名大・工・電気卒。1968 年同大学院博士課程満了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 武蔵野通研入所。音声処理の研究に従事。1973-1975 年ベル研究所にて音声認識・音声分析の研究を行う。1984 年名大・工・教授。1998 年名大・情報メディア教育センター教授。2004 年名城大・理工・教授。工博。1970 年, 1978 年, 1981 年度電子情報通信学会論文賞, 1972 年, 1981 年度同業績賞受賞。1996 年 IEEE Signal Processing Society Award 受賞。2000 年 IEEE Third Millennium Medals 受賞。電子情報通信学会フェロー。2003 年紫綬褒章受章。2004 年朝日賞受賞。日本音響学会, 電子情報通信学会, IEEE 各会員。

(2005 年 2 月 7 日受付)

[著者紹介]

木村 敏幸 (正会員)



1998 年名大・工・物化卒。2000 年同大学院・人間情報・修士課程了。2003 年同大学院・人間情報・博士課程了。同年日本学術振興会特別研究員 (特別推進研究 COE)。2004 年名大・情報科学・研究員。立体音場再生, 空間知覚に関する研究に従事。日本音響学会, 電子情報通信学会各会員。

箕 一彦



1965 年早大・理工・電気卒。1967 年同大学院修士課程了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社。通話品質, 聴知覚の基礎研究に従事。1994 年名大・人間情報・教授。2003 年名大・情報科学・教授。2004 年中京大・情報科学・教授。工博。現在, 音声知覚・理解・コミュニケーションの研究を行う。マルチモーダルな音環境認知, 視聴覚情報の分離・統合の処理過程にも興味。1981 年度日本 ITU 賞, 1984 年度電子情報通信学会論文賞, 1985 年度科学技術庁長官賞受賞。日本音響学会, 電子情報通信学会, 日本認知科学会, 日本音聲学会, 日本高次脳機能障害学会, 日本言語学会等会員。

武田 一哉



1983 年名大・工・電気卒。1985 年同大学院博士 (前期) 課程了。同年国際電信電話株式会社入社。ATR 自動翻訳電話研究所, KDD 研究所において音声合成・認識システムの研究を行う。1994 年名大・工・助教授。2003 年名大・情報科学・教授。工博。日本音響学会, IEEE, 電子情報通信学会, 情報処理学会各会員。