

タイトル

波面合成法におけるトランスデューサの指向特性

サブタイトル

立体音場再生による超臨場感コミュニケーションの実現のために

筆者者名

1. 木村敏幸 (きむらとしゆき)
2. 山肩洋子 (やまかたようこ)
3. 勝本道哲 (かつもとみちあき)

勤務先 1.

勤務先: (独) 情報通信研究機構

所属: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

役職: 専攻研究員

住所 (勤務先):

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

T E L : 042-327-7261

F A X : 042-327-6902

e-mail : t-kimura@nict.go.jp

勤務先 2.

勤務先: (独) 情報通信研究機構

所属: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

役職: 専攻研究員

住所 (勤務先):

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

T E L : 042-327-5409

F A X : 042-327-6902

e-mail : yamakata@nict.go.jp

勤務先 3.

勤務先: (独) 情報通信研究機構

所属: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

役職: 主任研究員

住所 (勤務先):

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

T E L : 042-327-6425

F A X : 042-327-6902

e-mail : katumoto@nict.go.jp

内訳

原稿用紙 4 枚, 図 10 点, 表 2 点

データ

有

ソフト名: Microsoft Word 2000

ファイル名: 原稿.doc

出来上がりページ数

6 ページ

図・写真返却について

不要

キーワード

超臨場感コミュニケーション

五感やそれ以上の情報を提示することで, あたかもその場にいるような高い臨場感を感じ, より大きな感動や深い理解を得ることができる技術.

立体音場再生

ある三次元空間の音響情報を忠実に別の三次元空間で再生することで, あたかもその場で音を聞いているような臨場感を感じさせる技術.

トランスデューサ

本解説ではマイクロホンとスピーカを指す.

波面合成法

マイクロホンアレイとスピーカアレイを用いて立体音場再生を実現する技術.

アブストラクト

波面合成法による立体音場再生によって超臨場感コミュニケーションを実現することができると期待されている. 本解説ではマイクロホンやスピーカにどのような指向特性を設ければ波面が忠実に合成できるのかを計算機シミュレーションによって検討する.

はじめに

独立行政法人情報通信研究機構(NICT)では、「ユニバーサル・コミュニケーション技術に関する調査研究会」の報告[1]を受け、2006年4月から超臨場感コミュニケーション技術に関する研究を進めている[2-3]. 超臨場感コミュニケーションの将来イメージを図1に示す。

(図1を挿入)

このように、立体映像技術や立体音場再生技術によって3次元空間上の映像や音響をよりリアルに表現することができれば、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のあるコミュニケーション(立体テレビや立体遠隔通信会議など)が可能になる。このような超臨場感コミュニケーションを聴覚的に実現するための立体音場再生技術としてはバイノーラル[4]、トランスオーラル[5-10]、ステレオダイポール[11]、波面合成法[12-18]、境界音場制御[19-23]が挙げられるが、本解説では波面合成法の原理や最近の研究成果について述べる。

図2に波面合成法の原理を表した模式図を示す。

(図2を挿入)

まず、図2(a)に示すように、原音場内にマイクロホンアレイを配置し、音源(図2の場合はバイオリン)からの音波を収録する。次に、図2(b)に示すように、再生音場内にスピーカアレイを配置し、マイクロホンアレイで収録した音波を再生する。すると、各スピーカから発生された音波(図2(c)中の点曲線)が合わさって、もう一つの別の音波(図2(c)中の実曲線)が合成される(この現象のことを「ホイヘンスの原理」という)。このとき、各スピーカの位置を各マイクロホンと同じ位置に対応させておけば、マイクロホンアレイで収録した音波と全く同じものがスピーカアレイから再生されるので、図2(d)に示すように、スピーカアレイの前にいる人はマイクロホンアレイで収録した際の音の位置で音が鳴っているように聞こえる。このように、マイクロホンアレイとスピーカアレイを用いれば、好きな位置(図2(e)の場合は左側でピアノ、右でバイオリン)で音が鳴っているように聞こえさせることができる。

波面合成法に関する理論的な検討は従来から行われてきていたが、今までの検討は図3に示すように自由音場においてマイクロホンアレイ及びスピーカアレイを直線状に配置した場合を対象としていた[13, 15-17].

(図3を挿入)

一方、最近では5.1chや7.1chといったサラウンドシステム[24]が実用化されており、更なる臨場感を表現するために波面合成法を適用する試みもなされている[25]. このような場合、従来の検討では聴取者の前方にしかスピーカが存在しないのに対して、サラウンドシステムでは聴取者の全ての方向にスピーカが存在することになる。つまり、図4に示すようにマイクロホンアレイ及びスピーカアレイを領域の周辺に配置し、マイクロホンアレイで収録した音をそのままスピーカアレイで再生する

ことになる。

(図4を挿入)

しかし、自由音場という反射音がない状況において、マイクロホンやスピーカに指向特性を設けずに波面合成法による立体音場再生をしようとする場合、全てのマイクロホンが音源からの音波を収録するため、音源が前方にしかなくともかかわらず聴取領域では音が全方向から再生されることになる。このため、聴取者は空間的に反射のある音場にいると感じるようになってしまう。このような聴感上の問題を解決するためには、マイクロホンやスピーカに指向特性を設けて前方から聞こえる音は前方からしか再生されないようにする必要がある。

そこで、マイクロホンやスピーカにどのような指向特性を設ければ波面がより忠実に合成されるかを計算機シミュレーションによって検討した結果について述べる。なお、以下の内容は文献[26]を要約したものであるため、詳細については文献[26]を参照されたい。

計算機シミュレーション実験環境

原音場は反射音のない自由音場とした。制御領域及び聴取領域は半径2mの円及び一辺4mの正方形とした。図5, 6に示すように1個の音源を配置した。また、マイクロホンの配置は隣り合うマイクロホン間の距離が一定になるようにし、スピーカの位置はマイクロホンの位置と同じにした。

(図5を挿入)

(図6を挿入)

音源信号 $s(t)$ は周波数 f の正弦波信号 $(=\sin 2\pi f t)$ とした。制御領域内における任意の点の位置ベクトルを \mathbf{r}_a とすると、原音場における \mathbf{r}_a での音圧 $p_o(\mathbf{r}_a, f, t)$ は以下のように表わされる。

$$p_o(\mathbf{r}_a, f, t) = \frac{1}{d_{ao}} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{d_{ao}}{c} \right) \right\} \quad (1)$$

但し、 $d_{ao} (=|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_o|)$ は音源から任意の点までの距離、 \mathbf{r}_o は音源の位置ベクトル、 c は音速である。一方、 i 番目のマイクロホンで収録する信号 $x_i(t)$ は以下のように表わされる。

$$x_i(t) = \frac{D_{im}}{d_{io}} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{d_{io}}{c} \right) \right\} \quad (2)$$

但し、 $d_{io} (=|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_o|)$ 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 ($i=1 \dots M$)、 M はマイクロホンの総数、 D_{im} は i 番目のマイクロホンの指向特性を表わす。従って、再生音場における \mathbf{r}_a での音圧 $p(\mathbf{r}_a, f, t)$ は $x_i(t)$ から以下のように算出される。

$$p(\mathbf{r}_a, f, t) = \sum_{i=1}^M \frac{D_{is}}{d_{ai}} x_i \left(t - \frac{d_{ai}}{c} \right) \\ = \sum_{i=1}^M \frac{D_{is} D_{im}}{d_{ai} d_{io}} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{d_{ai} + d_{io}}{c} \right) \right\} \quad (3)$$

但し、 $d_{ai} (=|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_i|)$ は i 番目のスピーカから任意の点までの距離、 D_{is} は i 番目のスピーカの指向特性

を表わす。

シミュレーションに使用したパラメータ条件を表 1,2 に示す。

(表 1 を挿入)

(表 2 を挿入)

マイクロホン及びスピーカの間隔は約 2 cm であり、周波数が 8000 Hz の場合の波長(= 340/8000 = 4.25 cm)の 1/2 以下である。従って、波面を忠実に合成するための空間サンプリング定理条件は満たしている。また、 \mathbf{r}_o , \mathbf{r}_a , \mathbf{r}_i は 2 次元座標上で以下のように設定した。

(円形の場合)

$$\mathbf{r}_o = (d \ 0)^T \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_a = (r_x \ r_y)^T$$

$$\mathbf{r}_i = \left(r \cos \frac{2\pi i}{M} \quad r \sin \frac{2\pi i}{M} \right)^T$$

(正方形の場合)

$$\mathbf{r}_o = (d \cos \theta \quad d \sin \theta)^T$$

$$\mathbf{r}_a = (r_x \ r_y)^T$$

$$\mathbf{r}_i = \begin{cases} \left(-r + \frac{ri}{100} & -r \right)^T & (i=1-200) \\ \left(r & -r + \frac{r(i-200)}{100} \right)^T & (i=201-400) \\ \left(r - \frac{r(i-400)}{100} & r \right)^T & (i=401-600) \\ \left(-r & r - \frac{r(i-600)}{100} \right)^T & (i=601-800) \end{cases} \quad (5)$$

シミュレーションに用いた 3 種類のマイクロホン及びスピーカの指向特性を図 7 に示す。

(図 7 を挿入)

マイクロホン及びスピーカの指向特性 D_{im} , D_{is} は以下の式によって設定した。

(無指向性)

$$D_{im} = 1$$

(単一指向性)

$$D_{im} = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta_{im})$$

(超指向性)

$$D_{im} = \begin{cases} \cos \theta_{im} & (|\theta_{im}| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta_{im}| > 90^\circ) \end{cases}$$

(無指向性)

$$D_{is} = 1$$

(単一指向性)

$$D_{is} = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta_{is})$$

(超指向性)

$$D_{is} = \begin{cases} \cos \theta_{is} & (|\theta_{is}| \leq 90^\circ) \\ 0 & (|\theta_{is}| > 90^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

但し、 θ_{im} , θ_{is} は \mathbf{r}_{im} と \mathbf{r}_{oi} 及び \mathbf{r}_{is} と \mathbf{r}_{ai} がなす角度、 \mathbf{r}_{oi} ($= \mathbf{r}_o - \mathbf{r}_i$) は i 番目のマイクロホン位置から音源

位置までのベクトル、 \mathbf{r}_{ai} ($= \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_i$) は i 番目のスピーカ位置から任意の位置までのベクトルである。また、 \mathbf{r}_{im} , \mathbf{r}_{is} は i 番目のマイクロホン及びスピーカの指向性ベクトルであり、以下の式によって設定した。

(円形の場合)

$$\mathbf{r}_{im} = \mathbf{r}_i \quad (8)$$

$$\mathbf{r}_{is} = -\mathbf{r}_{im}$$

(正方形の場合)

$$\mathbf{r}_{im} = \begin{cases} (\delta(i-200) \ 1)^T & (i=1-200) \\ (1 \ \delta(i-400))^T & (i=201-400) \\ (-\delta(i-600) \ 1)^T & (i=401-600) \\ (-1 \ -\delta(i-800))^T & (i=601-800) \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{r}_{is} = -\mathbf{r}_{im}$$

計算機シミュレーション実験結果

定量的な評価を行うために、以下の式で示される SNR を算出する。

$$\text{SNR} = \frac{\sum_f \left[10 \log_{10} \frac{\sum_{\mathbf{r}_a} \{p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)\}^2}{\sum_{\mathbf{r}_a} \{p(\mathbf{r}_a, f, 0) - p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)\}^2} \right]}{F} \quad (10)$$

但し、 $F(=13)$ は実験に用いた周波数値の総数である。また、 \mathbf{r}_a の範囲は円形の場合は半径 1 m の円内 ($r_x^2 + r_y^2 < 1$)、正方形の場合は一辺 2 m の正方形内 ($|r_x|, |r_y| < 1$) とし、これらの範囲で $p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)$ 及び $p(\mathbf{r}_a, f, 0)$ の値を正規化してから SNR の算出を行った。マイクロホン及びスピーカの指向特性ごとの SNR 値を図 8-10 に示す。但し、エラーバーは 95% 信頼区間を表わす。

(図 8 を挿入)

(図 9 を挿入)

(図 10 を挿入)

正方形における $d=3$ m, $\theta=45^\circ$ の場合を除き、無指向性マイクロホンをを用いた場合の SNR よりも単一指向性や超指向性マイクロホンをを用いた場合の SNR の方が有意に高い値を示している。これは、無指向性マイクロホンの場合には、制御領域の周りに配置した全てのマイクロホンが音を収録してしまうのに対して、単一指向性や超指向性のマイクロホンをを用いた場合には、マイクロホンに指向特性を設けることによって、音源の存在しない方向に向いたマイクロホンでは音が収録されないようになったためであると考えられる。ゆえに、単一指向性マイクロホンや超指向性マイクロホンをを用いれば、波面をより忠実に合成することができると考えられる。また、単一指向性や超指向性マイクロホンをを用いれば常に 15dB 以上の SNR を得ることができると言える。

一方、スピーカの指向特性についてはどの指向特性を用いても SNR の結果に違いは見られない。これは(7)式から \mathbf{r}_a が円の中心付近にある場合はスピーカの指向特性 D_{is} の値がほとんど変化しないためであると考えられる。従って、領域をマイクロホンアレイやスピーカアレイで囲むシステムを構築す

る場合、マイクロホンの指向特性の方が波面の合成精度により大きく寄与していると言える。

まとめ

本論文では波面合成法を適用したサラウンドシステムを構築するにあたって、マイクロホンやスピーカの指向特性が波面の合成精度に及ぼす影響を検討するために、計算機シミュレーションを行った。領域が円形の場合と正方形の場合で検討した結果、どちらの場合においても、スピーカの指向特性は波面の合成精度にはほとんど影響がなく、マイクロホンの指向特性を無指向性よりも単一指向性や超指向性にすれば波面がより忠実に合成されることが分かった。また、単一指向性や超指向性マイクロホンを用いた場合には、多くの場合において SNR を 15dB 以上にすることができることも示された。

本論文ではサラウンドシステムに波面合成法を組み込むことを目的としたために、2次元平面上に円や正方形といった制御領域及び聴取領域を設定して計算機シミュレーションを行った。一方、波面合成法は制御領域及び聴取領域を3次元空間上に設定することも可能なので、今後は制御領域及び聴取領域を球や立方体などに設定して、3次元空間上においてマイクロホンやスピーカにどのような指向特性を設ければ波面がより忠実に合成されるかを検討する必要がある。

また、実際にサラウンドシステムを構築する場合はスピーカアレイを本論文で検討したような自由音場ではなく、部屋の反射や残響が伴った空間に配置することが多い。ゆえに、波面合成法を適用したサラウンドシステムを実用化するためには、スピーカアレイを部屋のような残響空間に配置した場合の波面の合成精度を今後検討する必要があると考えられる。

謝辞

計算機シミュレーション実験の実施の際にご支援下さった中京大学情報理工学部 眞一彦教授に心より感謝の意を申し上げます。

参考文献

- [1] ユニバーサル・コミュニケーション技術に関する調査研究会（座長，原島博），最終報告，http://www.soumu.go.jp/s-news/2005/pdf/051215_3_2.pdf
- [2] 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ホームページ，<http://www2.nict.go.jp/x/x171/>
- [3] 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).
- [4] 岡部馨：“ダミーヘッドを用いた音場再生”，日本音響学会誌，**46**, 8, pp. 650-656 (1990).

- [5] 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).
- [6] M. R. Schroeder, D. Gottlob, and K. F. Siebrasse: “Comparative study of european concert halls: Correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters,” *Journal of Acoustical Society of America*, **56**, 4, pp. 1195-1201 (1974).
- [7] M. Miyoshi and Y. Kaneda: “Inverse filtering of room acoustics,” *IEEE Transaction on Acoustics, Speech and Signal Processing*, **36**, 2, pp. 145-152 (1988).
- [8] 三好正人，小泉宣夫：“多数のスピーカを用いたトランスオーラル系の構成について”，日本音響学会春季研究発表会講演論文集，1-7-1, pp. 371-372 (1991).
- [9] 神沼充伸，伊勢史郎，鹿野清宏：“周波数領域における最小ノルム解を利用した多チャンネル音場再現システムにおける逆フィルタの設計”，日本音響学会誌，**57**, 3, pp. 175-183 (2001).
- [10] 古見芳幸，穂刈治英，島田正治：“立体音像再生に関するスピーカ配置の検討”，電子情報通信学会論文誌，**J83-A**, 7, pp. 920-923 (2000).
- [11] 浜田晴夫，得能宏則，O. Kirkeby, P. A. Nelson：“新しい音場再生方式(Stereo Dipole)に関する研究”，電子情報通信学会技術研究報告，EA96-2, pp. 9-17 (1996).
- [12] 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).
- [13] 伊藤毅：“音響工学原論”，pp. 587-589，コロナ社，東京(1973).
- [14] M. Camras: “Approach to recreating a sound field,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **43**, 6, pp. 1425-1431 (1968).
- [15] A. J. Berkhout, D. de Vries and P. Vogel: “Acoustic control by wave field synthesis,” *Journal of Acoustical Society of America*, **93**, 5, pp. 2764-2778 (1993).
- [16] 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).
- [17] 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”，電子情報通信学会技術研究報告，EA2000-17, pp. 25-32 (2000).
- [18] S. Takane, Y. Suzuki, T. Miyajima, and T. Sone: “A new theory for high definition virtual acoustic display named ADVISE,” *Acoustical Science & Technology*, **24**, 5, pp. 276-283 (2003).
- [19] 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**, 1, pp. 78-87 (1999).
- [20] 古家賢一，一ノ瀬裕：“境界面音圧による閉空間の音場制御”，電子情報通信学会技術研究報告，EA90-15, pp. 25-32 (1990).

- [21] 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”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **5**, 3, pp. 957-964 (2000).
- [22] S. Takane, Y. Suzuki, and T. Sone: “A new method for global sound reproduction based on Kirchhoff’s integral equation,” ACUSTICA - Acta Acustica, **85**, 2, pp. 250-257 (1999).
- [23] 伊勢史郎, 豊田政弘, 榎本成悟, 中村哲: “深いコミュニケーションを可能とする空間創造の試み—プロジェクトの基本方針—”, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 2-1-20, pp. 585-586 (2007).
- [24] ITU-R Recommendation BS.775-1: “Multichannel Stereophonic Sound System with and without Accompanying Picture” (1992-1994).
- [25] IOSONO ホームページ, <http://www.iosono-sound.com/>.
- [26] 木村敏幸, 箕一彦: “波面合成法による立体音場再生におけるマイクロホン及びスピーカの指向特性による波面の合成精度への影響”, 日本 VR 学会論文誌, **12**, 2, pp.191-198 (2007).



図1 超臨場感コミュニケーションの将来イメージ [2]

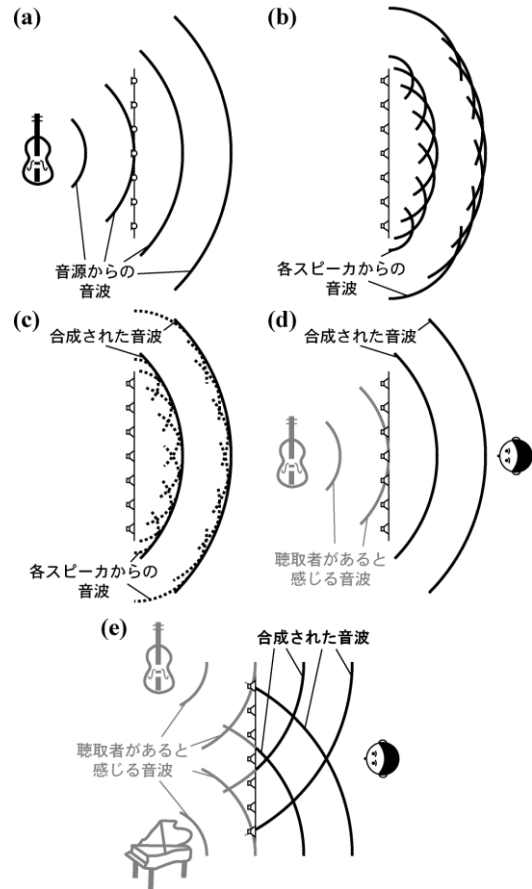


図2 波面合成法の原理

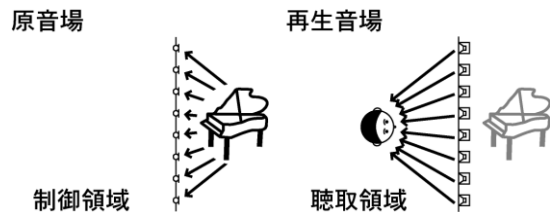


図3 従来の検討における原音場及び再生音場

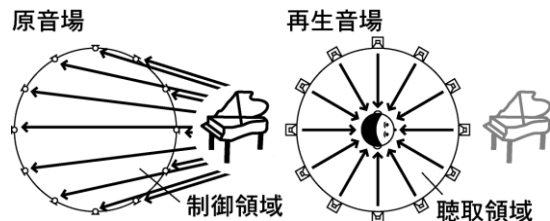


図4 サラウンドシステムにおける原音場及び再生音場

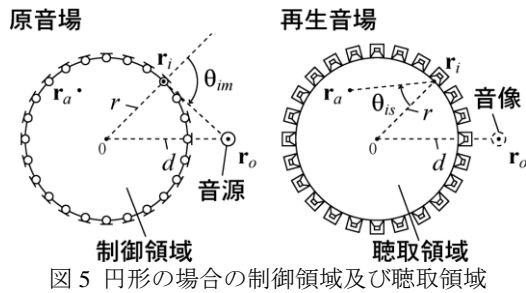


図5 円形の場合の制御領域及び聴取領域

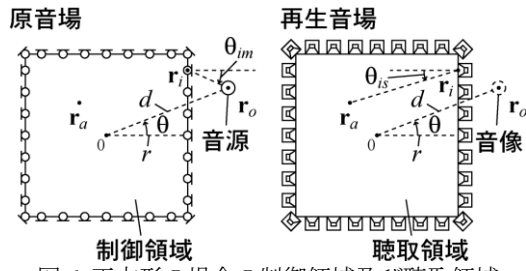


図6 正方形の場合の制御領域及び聴取領域

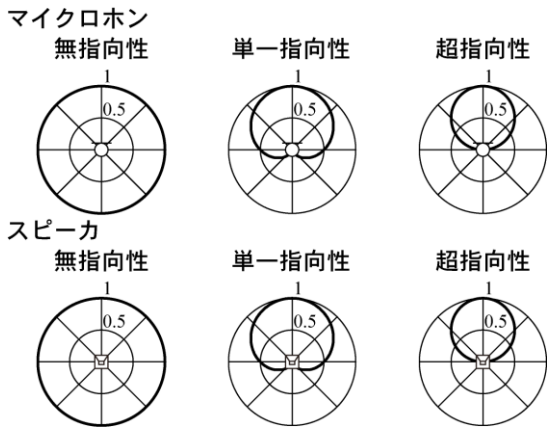


図7 マイクロホン及びスピーカの指向特性

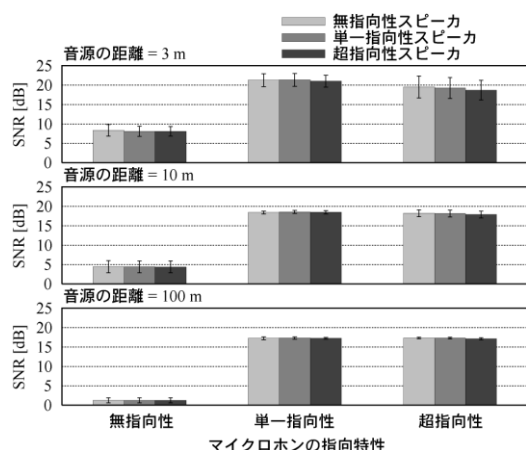


図8 円形の場合のSNR

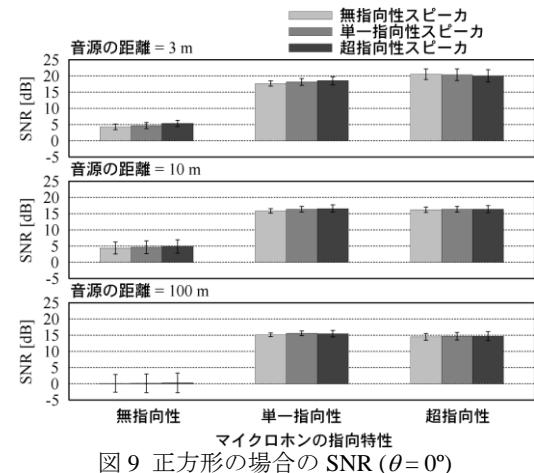


図9 正方形の場合のSNR ($\theta = 0^\circ$)

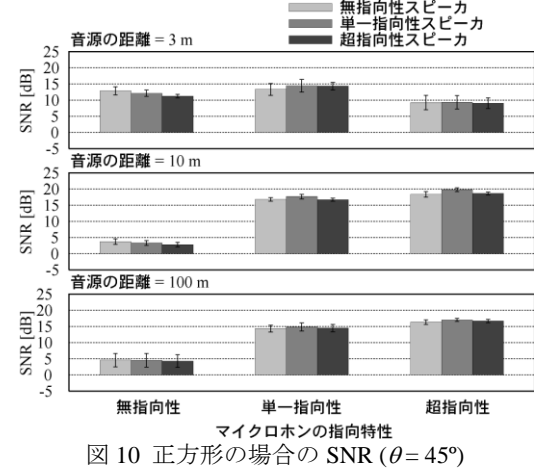


図10 正方形の場合のSNR ($\theta = 45^\circ$)

表1 円形の場合のパラメータ条件

総数(M)	630
音源の周波数(f)	125, 177, 250, 354, 500, 707, 1000, 1414, 2000, 2828, 4000, 5657, 8000 Hz
音源の距離(d)	3, 10, 100 m
音速(c)	340 m/s
指向特性(D_{im}, D_{is})	無指向性, 単一指向性, 超指向性

表2 正方形の場合のパラメータ条件

総数(M)	800
音源の周波数(f)	125, 177, 250, 354, 500, 707, 1000, 1414, 2000, 2828, 4000, 5657, 8000 Hz
音源の距離(d)	3, 10, 100 m
音源の方位角(θ)	$0, 45^\circ$
音速(c)	340 m/s
指向特性(D_{im}, D_{is})	無指向性, 単一指向性, 超指向性