

指向性マイクロホンを用いた波面合成法における波面合成精度

木村 敏幸[†] 筧 一彦^{††} 武田 一哉^{†††} 板倉 文忠^{††††}

[†] 名古屋大学情報連携基盤センター 〒464-8601 名古屋市千種区不老町

^{††} 中京大学情報科学部 〒470-0393 愛知県豊田市貝津町床立101

^{†††} 名古屋大学大学院情報科学研究科 〒464-8601 名古屋市千種区不老町

^{††††} 名城大学理工学部 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501

E-mail: [†]kimura@sp.m.is.nagoya-u.ac.jp, ^{††}kakehik@sccs.chukyo-u.ac.jp, ^{†††}kazuya.takeda@nagoya-u.jp,
^{††††}itakuraf@ccmfs.meijo-u.ac.jp

あらまし 指向性マイクロホンを用いた波面合成法は制御領域の境界上に配置した指向性マイクロホンで収録したチャンネル信号を再生することによって聴取領域内に波面を合成する立体音場再生技術である。しかしながら、この技術に基づいたシステムにおいて波面が忠実に合成される条件は十分に検討されていない。本報告では波面が忠実に合成される条件を検討するために計算機シミュレーションを行い、波面が忠実に合成されるためにはマイクロホンの間隔を波長の1/2以下にすること、単一指向性もしくは超指向性マイクロホンを用いた方が良いことを示す。

キーワード 立体音場再生, 波面合成法, 指向性マイクロホン, 計算機シミュレーション

Accuracy of the Synthesis of Wave Fronts in Wave Field Synthesis Using Directional Microphones

Toshiyuki KIMURA[†], Kazuhiko KAKEHI^{††}, Kazuya TAKEDA^{†††}, and Fumitada ITAKURA^{††††}

[†] Information Technology Center, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601 Japan

^{††} School of Computer and Cognitive Sciences, Chukyo University

Tokodachi 101, Kaizu-cho, Toyota-shi, 470-0393 Japan

^{†††} Graduate School of Information Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601 Japan

^{††††} Faculty of Science and Technology, Meijo University

Shiogamaguchi 1-501, Tenpaku-ku, Nagoya, 468-8502 Japan

E-mail: [†]kimura@sp.m.is.nagoya-u.ac.jp, ^{††}kakehik@sccs.chukyo-u.ac.jp, ^{†††}kazuya.takeda@nagoya-u.jp,
^{††††}itakuraf@ccmfs.meijo-u.ac.jp

Abstract Wave field synthesis using directional microphones is the sound field reproduction technique synthesizing wave fronts at a listening area by playing channel signals recorded by directional microphones at the boundary of a control area. However, the accuracy of the synthesis of wave fronts is not sufficiently investigated in the system based on this technique. This report describes the computer simulation performed for evaluating the accuracy of synthesized wave fronts and indicates that the interval between microphones should be less than half of wave length and the unidirectional or hyperdirectional microphone should be applied in order to synthesize accurate wave fronts.

Key words sound field reproduction, wave field synthesis, directional microphone, computer simulation

1. はじめに

近年、立体音場再生技術が盛んに研究されている。この技術が実用化されると、遠隔通信会議システムや遠隔アンサンブル

システムのように離れた場所にいる人々があたかも同じ会議室内で会議を行ったり、同じコンサートホール内で一緒に演奏したりしているようにすることが可能になる。これらのシステムはテレビ電話や5.1ch オーディオ [1] のような従来のコミュニ

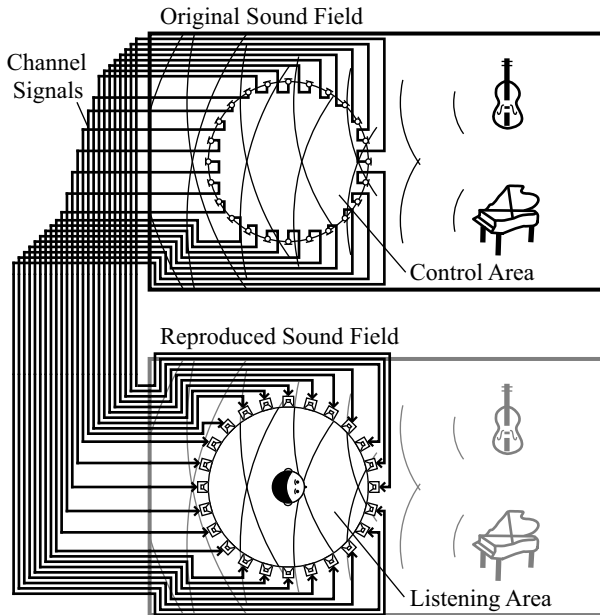


図1 指向性マイクロホンを用いた波面合成法に基づく遠隔コンサートシステムの構成
Fig.1 Configuration of tele-concert hall system based on wave field synthesis using directional microphones.

ケーション手段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、社会全体において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 [2] ~ [5] は原音場に配置したマイクロホンアレーでチャンネル信号を収録し、聴取領域に配置したスピーカアレーでチャンネル信号を再生すると、Huygens の原理によって原音場の波面が聴取領域内に合成される立体音場再生技術である。この技術はバイノーラル [6] やトランスオーラル [7] とは異なり、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というところに特徴がある。

我々は今までに Camras によって提案された指向性マイクロホンを用いた波面合成法 [2] に着目し、図 1 に示すような波面合成法に基づく遠隔コンサートホールシステムを構築し、伝送量を削減するために音源抽出に基づく空間符号化手法を検討してきた [8], [9]。このシステムを構築する場合、どのような条件で波面が忠実に合成されるのかを検討することは非常に重要である。しかし、これまでも波面の合成精度に関する先行研究例はいくつか存在するが [3], [5], [10]、これらの研究例において用いられているシステムは我々の構築したシステムとは構成が異なるので、先行研究例をそのまま我々のシステムにおける波面合成の条件に当てはめることはできない。従って、我々が構築してきたシステムにおいて波面が忠実に合成される条件は十分に検討されていないと考えられる。

そこで、本報告では指向性マイクロホンを用いた波面合成法において波面が忠実に合成される条件を検討する。2 章では波面が忠実に合成される条件を検討するために計算機シミュレーションを行う。

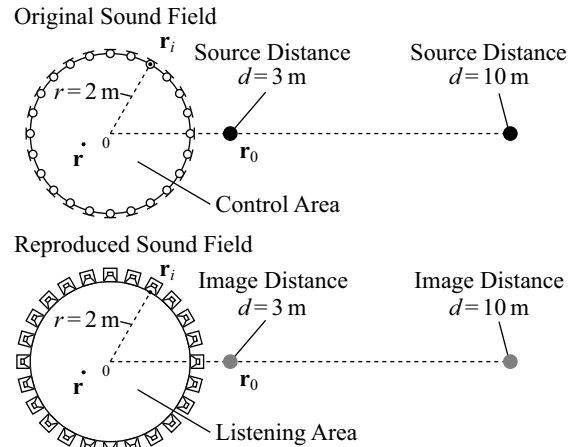


図2 計算機シミュレーションにおける原音場及び再生音場
Fig.2 Sound fields in computer simulation.

2. 計算機シミュレーション

2.1 実験環境

原音場は反射音のない自由空間とした。実験における原音場及び再生音場を図 2 に示す。制御領域及び聴取領域は半径 2 m の円とした。音源は 1 個とし、図 2 に示すように円の中心から 3 m と 10 m の地点の 2 種類を設定した。制御領域の境界線上にマイクロホンを配置する際には隣り合うマイクロホン間の距離が一定になるように円上に均等に配置した。一方、再生音場における聴取領域の境界線上にスピーカを配置した。その際、スピーカの位置はマイクロホンの位置と同じにした。そして、マイクロホンの信号をスピーカから再生し、図 2 中の灰色の円で示される音像からの波面を聴取領域内に合成させた。

音源信号 $s_0(t)$ は周波数 f の正弦波信号 $s_0(t) = \sin 2\pi f t$ とした。制御領域内の任意の点の位置ベクトルを \mathbf{r} とすると、原音場における \mathbf{r} での音圧 $p_0(\mathbf{r}, t)$ は以下のように表わされる。

$$p_0(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|}{c} \right) \right] \quad (1)$$

但し、 \mathbf{r}_0 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。

$$x_i(t) = \frac{D_i}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}{c} \right) \right] \quad (2)$$

但し、 \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_i は i 番目のマイクロホンの指向特性を表わす。従って、再生音場における聴取領域内の任意の点の位置ベクトル \mathbf{r} での音圧 $p(\mathbf{r}, t)$ は $x_i(t)$ から以下のように算出される。

$$\begin{aligned} p(\mathbf{r}, t) &= \sum_{i=1}^M \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|} x_i \left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|}{c} \right) \\ &= \sum_{i=1}^M \frac{D_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|} \sin \left[2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| + |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0|}{c} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

表 1 計算機シミュレーションにおける実験条件

Table 1 Parametric conditions in computer simulation

マイクロホンの数 (M)	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 16, 20, 24, 27, 32, 36, 45, 54, 64, 72, 90, 108, 128, 160, 180, 216, 256, 300, 360, 432, 512
音源の周波数 (f)	125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz
音源の距離 (d)	3, 10 m
制御領域の半径 (r)	2 m
音速 (c)	340 m/s
マイクロホンの指向特性 (D_i)	無指向性, 単一指向性, 超指向性

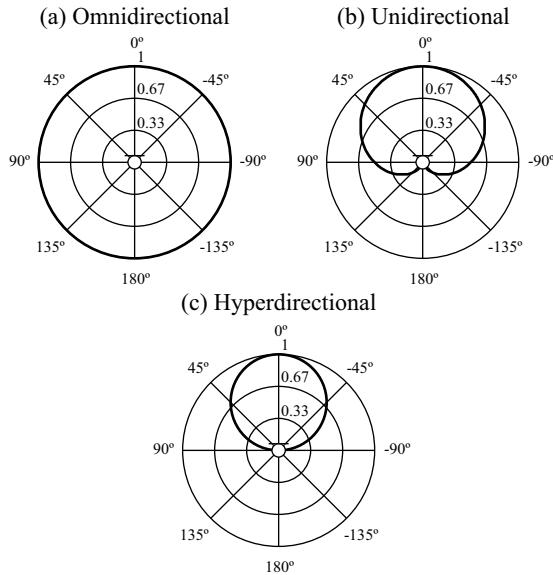


図 3 計算機シミュレーションにおけるマイクロホンの指向特性

Fig. 3 Microphone's directivity in computer simulation.

実験に使用した条件を表 1 に示す．また，本実験では \mathbf{r}_0 , \mathbf{r}_i , \mathbf{r} は以下のように設定した．但し， \mathbf{r} の範囲は半径 2 m の円内 ($r_x^2 + r_y^2 < 2^2$) とした．

$$\mathbf{r}_0 = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} 2 \cos \frac{2\pi i}{M} \\ 2 \sin \frac{2\pi i}{M} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r} = \begin{pmatrix} \sqrt{r_x} \\ \sqrt{r_y} \end{pmatrix} \quad (4)$$

実験に用いた 3 種類のマイクロホンの指向特性を図 3 に示す．これらの指向特性は一般に流通しているマイクロホンが持つ代表的な指向特性である (例えば, ピンマイクロホン, カラオケ用マイクロホン, ガンマイクロホン)．本実験では D_i は指向特性ごとに以下の式によって表わした．

$$D_i = 1 \quad (\text{無指向性}) \quad (5)$$

$$D_i = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_i| |\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} \right) \quad (\text{単一指向性}) \quad (6)$$

$$D_i = \begin{cases} \frac{\mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i)}{|\mathbf{r}_i| |\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i|} & (\mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i) \geq 0) \\ 0 & (\mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_i) < 0) \end{cases} \quad (\text{超指向性}) \quad (7)$$

2.2 実験結果及び考察

合成した波面の一例は付録 A に示す．本報告では以下の式で示される SNR を算出することによって波面が忠実に合成される条件を検討する．

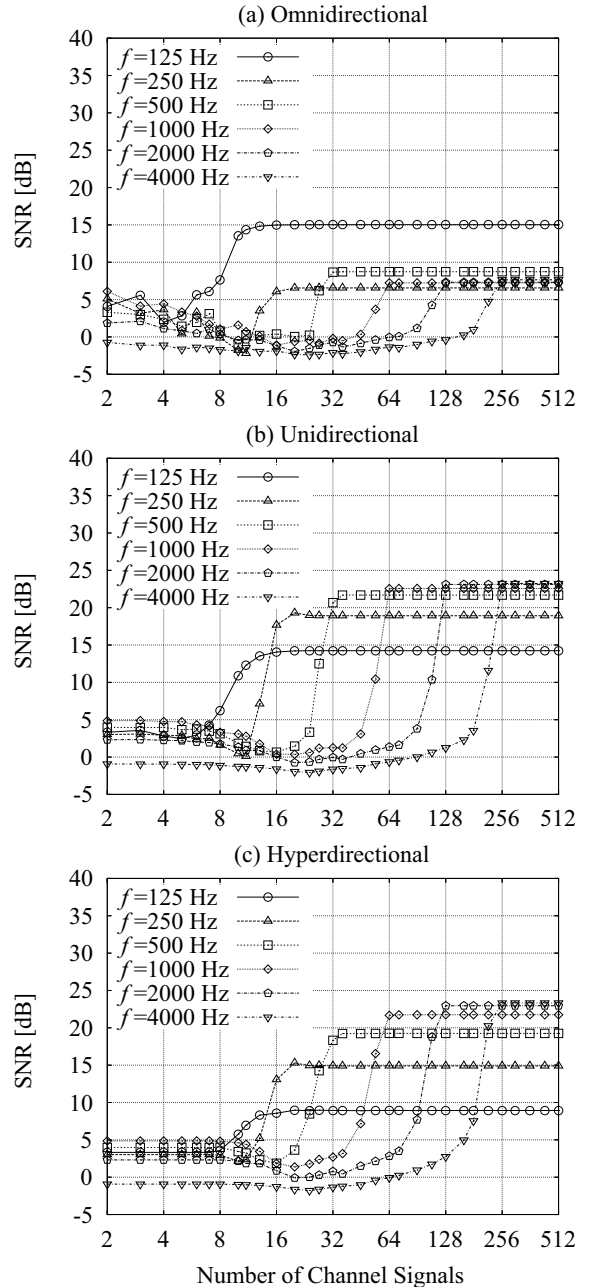


図 4 計算機シミュレーションにおける SNR の結果 (音源距離 3 m)

Fig. 4 SNR results in computer simulation (source distance: 3 m).

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{\mathbf{r}} \{p_0(\mathbf{r}, t)\}^2}{\sum_{\mathbf{r}} \{p(\mathbf{r}, t) - p_0(\mathbf{r}, t)\}^2} \quad (8)$$

但し， \mathbf{r} の範囲は半径 1 m の円内 ($r_x^2 + r_y^2 < 1$) とした．また， $r_x^2 + r_y^2 < 1$ の範囲で $p_0(\mathbf{r}, t)$ 及び $p(\mathbf{r}, t)$ の値を正規化してから SNR の算出を行った．音源の周波数 f 及びマイクロホンの数 M ごとに SNR を算出した結果を図 4~5 に示す．但し，横軸は 2 を底とする対数スケールにしている．全ての図においてマイクロホンの数がある閾値を超えると，SNR はそれ以上マイクロホンの数が増えても変化しなくなる．ゆえに，得られた閾値が波面を忠実に合成するのに必要なマイクロホンの数であると言える．また，その閾値は合成する波面の周波数に依存しており，周波数が 2 倍になると，SNR が一定になり始めるマイクロホンの数も 2 倍になっていることが分かる．従って，

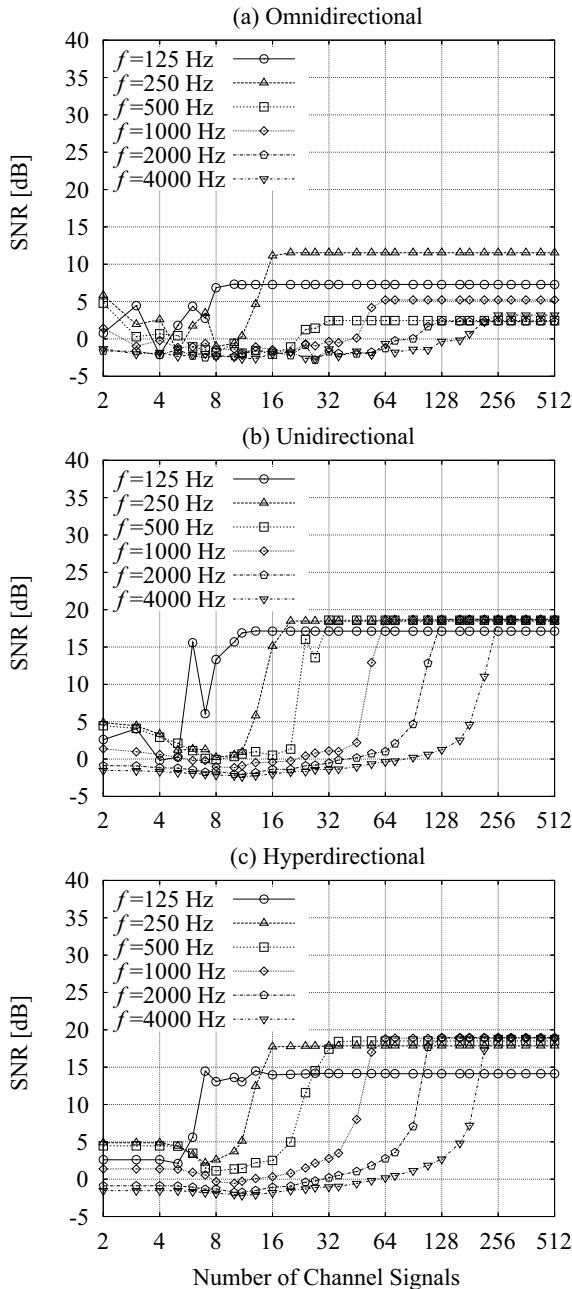


図5 計算機シミュレーションにおけるSNRの結果(音源距離10 m)
Fig. 5 SNR results in computer simulation (source distance:10 m).

以下のような条件を満たせば、波面が忠実に合成されることができる。

$$M \geq 0.064f \left(= \frac{256}{4000}f \right) \quad (9)$$

また、マイクロホンの間隔を Δ とすると、 $\Delta = 2\pi r/M$ (r は制御領域の半径) であり、波長を λ とすると、 $f = c/\lambda$ (c は音速) であることから、(9) 式から以下の関係式が導かれる。

$$\Delta \leq \frac{2\pi r}{0.064c} \lambda \approx 0.57\lambda \quad (10)$$

ゆえに、指向性マイクロホンを用いた波面合成法によるシステムにおいて波面を忠実に合成するためには、マイクロホン及びスピーカ間の間隔を波長の1/2以下にすることが必要であると考えられる。

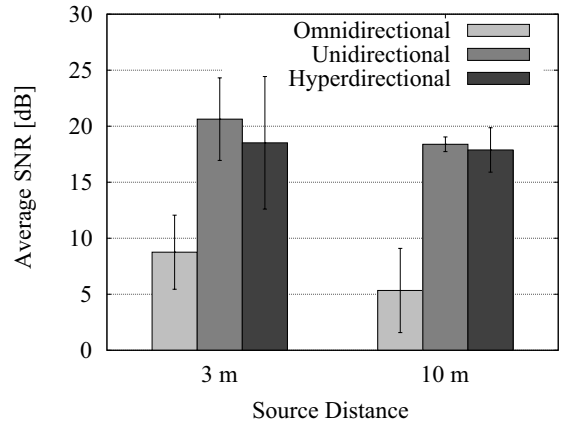


図6 計算機シミュレーションにおける平均SNRの結果
Fig. 6 Results of averaged SNR in computer simulation.

また、マイクロホンの指向特性による影響を考察するため、 $M=512$ におけるSNRの値を音源の周波数全体で平均化したものを図6に示す。但し、エラーバーは95%信頼区間を表わす。どちらの音源距離においても無指向性のときの平均SNRより単一指向性や超指向性のときの平均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を用いた場合には境界面上の音圧のみを制御しているのに対して、単一指向性や超指向性マイクロホンを用いると指向特性によって境界面上の音圧に加えて音圧傾度も制御しているためであると考えられる。ゆえに、指向性マイクロホンを用いた波面合成法によるシステムを構築する際は、単一指向性マイクロホンもしくは超指向性マイクロホンを用いるべきであると考えられる。また、2種類の音源距離においても平均SNRの変化があまりないことから、このシステムは音源の距離に波面合成の精度が依存しないということも言える。

2.3 残響空間における波面合成の条件

計算機シミュレーションで扱った原音場は反射音の存在しない自由空間であった。しかし、実際にシステムを実現するには原音場は会議室やコンサートホールなどの反射音による残響が存在する空間であることが多い。そこで、本報告における計算機シミュレーションの結果から残響空間における波面合成の条件を導くことができるかどうかを検討する。

一般に残響空間における反射音は音源からの音波が壁面に反射したものであると考えることができる。その性質を利用して、反射音を音源の鏡面反射であるとみなして残響空間における室内インパルス応答を算出する手法(虚像法)[11]も提案されている。従って、反射音は虚像音源の位置から壁面に反射した分だけ振幅が減衰されて放射している音であると考えられる。また、このシステムは音源の距離に波面合成の精度が変化することはないので、本報告における計算機シミュレーションにより導かれた波面合成の条件をそのまま当てはめると考えられる。

従って、原音場が残響空間の場合でも波面が忠実に合成されるには計算機シミュレーションの結果と同じようにマイクロホン及びスピーカ間の間隔を波長の1/2以下にし、単一指向性や

超指向性マイクロホンを用いる必要があるということが言える。

3. ま と め

本報告では指向性マイクロホンを用いた波面合成法に基づいた立体音場再生システムにおいて波面が忠実に合成される条件を検討するために、計算機シミュレーションを行った。その結果、波面を忠実に合成するためにはマイクロホン及びスピーカ間の間隔を波長の 1/2 以下にすること、無指向性マイクロホンよりも単一指向性マイクロホンもしくは超指向性マイクロホンを用いた方が良いということが分かった。

本報告では制御領域及び聴取領域は半径 2 m の円とし、2 次元音場において波面を合成する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 次元に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状にして、3 次元音場において波面が忠実に合成される条件を検討する必要がある。

文 献

- [1] ITU-R Recommendation BS.775-1, Multichannel Stereophonic Sound System with and without Accompanying Picture, 1992-1994.
- [2] M. Camras, "Approach to recreating a sound field," J. Acoust. Soc. Am., vol.43, no.6, pp.1425-1431, November 1968.
- [3] A.J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel, "Acoustic control by wave field synthesis," J. Acoust. Soc. Am., vol.93, no.5, pp.2764-2778, May 1993.
- [4] S. Takane, Y. Suzuki, and T. Sone, "A new method for global sound reproduction based on Kirchhoff's integral equation," ACUSTICA - Acta Acustica, vol.85, no.2, pp.250-257, March/April 1999.
- [5] S. Ise, "A principle of sound field control based on the Kirchhoff-Helmholtz integral equation and the theory of inverse systems," ACUSTICA - Acta Acustica, vol.85, no.1, pp.78-87, January/February 1999.
- [6] S. Takane, Y. Suzuki, T. Miyajima, and T. Sone, "A new theory for high definition virtual acoustic display named ADVISE," Acoust. Sci. & Tech., vol.24, no.5, pp.276-283, September 2003.
- [7] J. Bauck and D.H. Cooper, "Generalized transaural stereo and applications," J. Audio Eng. Soc., vol.44, no.9, pp.683-705, September 1996.
- [8] T. Kimura, K. Kakehi, K. Takeda, and F. Itakura, "Spatial compression of multi-channel audio signals using inverse filters," Proc. ICASSP, Orlando, FL, no.AE-SF01.03, IV, p.4175, May 2002.
- [9] T. Kimura, K. Kakehi, K. Takeda, and F. Itakura, "Spatial coding based on the extraction of moving sound sources in wavefield synthesis," Proc. ICASSP, Philadelphia, PA, no.AE-P5.10, III, pp.293-296, March 2005.
- [10] D.B. Ward and T.D. Abhayapala, "Reproduction of a plane-wave sound field using an array of loudspeakers," IEEE Trans. SAP, vol.9, no.6, pp.697-707, September 2001.
- [11] J.B. Allen and D.A. Berkley, "Image method for efficiently simulating small-room acoustics," J. Acoust. Soc. Am., vol.65, no.4, pp.943-950, April 1979.

付録 A. 合成した波面の一例

合成した波面の一例を図 7 ~ 12 に示す。「Original Wavefront」は原音場内における波面を表わす。 M は実験で用いたマイクロホン及びスピーカの数、「Wavefront」は聴取領域内において合成された波面、「Difference」は合成された波面と原音場内の波面との差分を表わす。この差分表示の中心付近が黒いほど波面が忠実に合成されているということを示している。

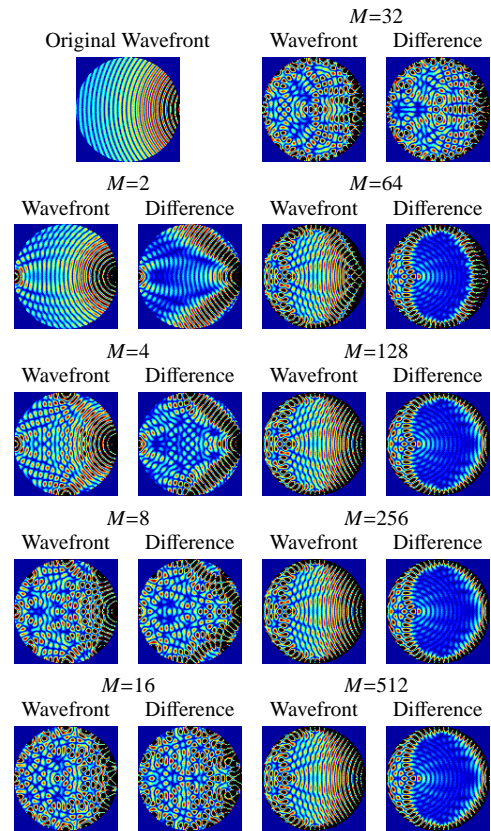


図 7 合成した波面の一例 (無指向性, $f=1000$ Hz, $d=3$ m)
Fig. 7 Examples of synthesized wave fronts
(Omnidirectional, $f=1000$ Hz, $d=3$ m).

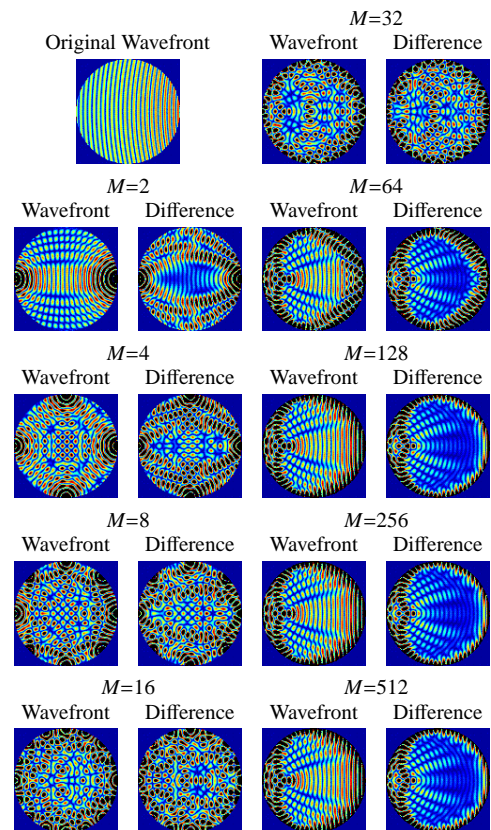


図 8 合成した波面の一例 (無指向性, $f=1000$ Hz, $d=10$ m)
Fig. 8 Examples of synthesized wave fronts
(Omnidirectional, $f=1000$ Hz, $d=10$ m).

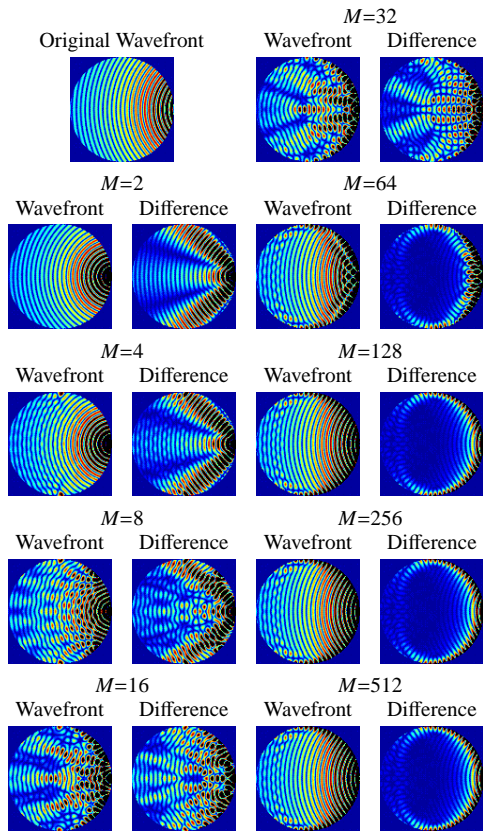


図9 合成した波面の一例(単一指向性, $f=1000$ Hz, $d=3$ m)

Fig. 9 Examples of synthesized wave fronts
(Unidirectional, $f=1000$ Hz, $d=3$ m).

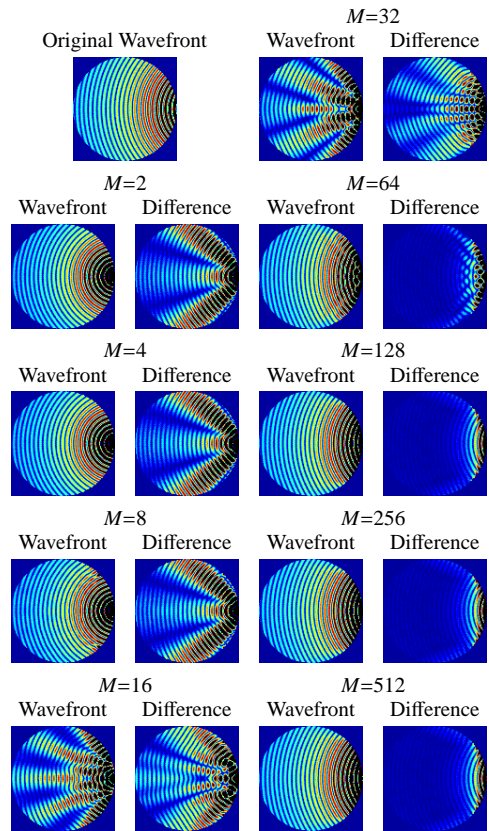


図11 合成した波面の一例(超指向性, $f=1000$ Hz, $d=3$ m)

Fig. 11 Examples of synthesized wave fronts
(Hyperdirectional, $f=1000$ Hz, $d=3$ m).

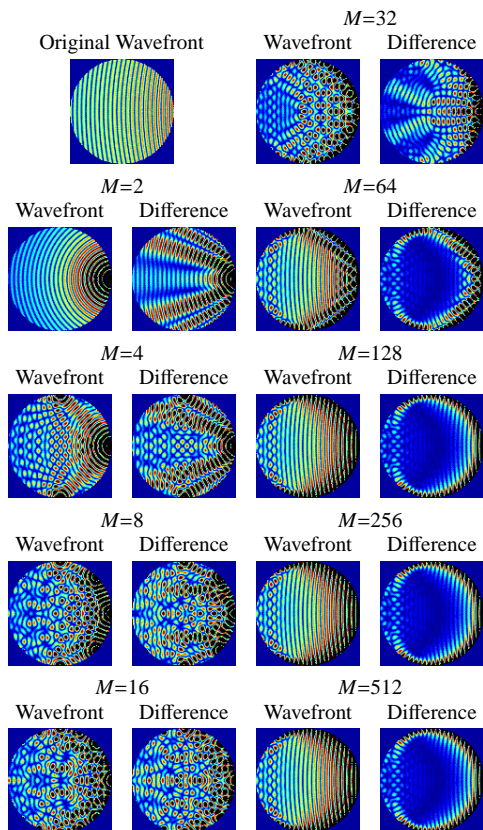


図10 合成した波面の一例(単一指向性, $f=1000$ Hz, $d=10$ m)

Fig. 10 Examples of synthesized wave fronts
(Unidirectional, $f=1000$ Hz, $d=10$ m).

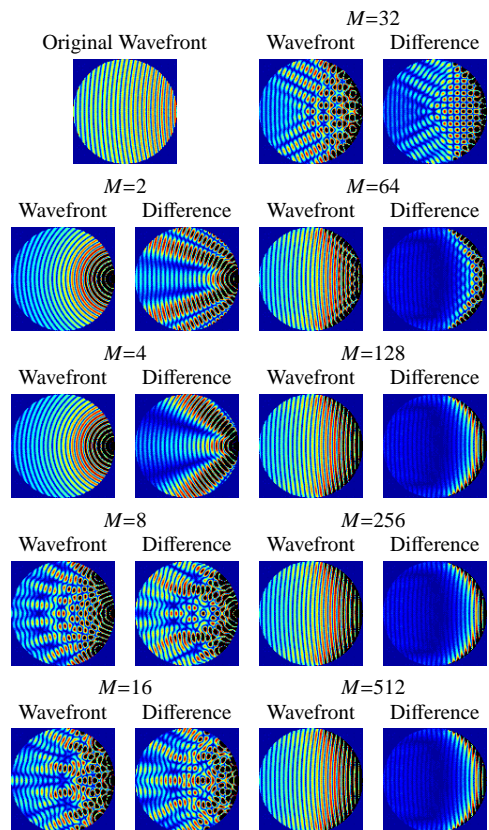


図12 合成した波面の一例(超指向性, $f=1000$ Hz, $d=10$ m)

Fig. 12 Examples of synthesized wave fronts
(Hyperdirectional, $f=1000$ Hz, $d=3$ m).