

長岡技術科学大学大学院
工学研究科修士論文

題 目

半円スピーカアレイと
マスキングノイズを用いた
エリア再生に関する研究

指導教員

准教授 杉田 泰則

著 者

電気電子情報工学専攻
信号処理応用研究室
18316087 原島 元気

令和4年2月10日

ABSTRACT

A study on area reproduction using semi-circular speaker array and masking sound

Author : Genki HARASHIMA

Supervisor : Yasunori SUGITA

In the field of acoustics, there is a technology called area reproduction. Area reproduction is a technology that reproduces the target sound (the sound to be heard by the listener) only in a certain area, so that the target sound cannot be heard in other areas. The purpose of using area reproduction is to play an explanatory voice only to the people in front of a painting at a museum, or to play a confidential voice that you do not want other people to hear at a hospital or bank. Various methods for area reproduction have been studied to date, and methods using speaker arrays are often used, and methods using two-dimensional filters, boundary sound field control and multi-point control have been proposed. There is also an area reproduction method using a circular speaker array that performs area reproduction by using masking sound together. Since the method of controlling the directivity of the speaker array is to maximize the directivity of the target sound, it is not very suitable for area reproduction, where the target sound forms an inaudible area. In addition, the method using multi-point control requires a great deal of effort to measure the transfer function in space because it requires many control points, and the designed inverse filter may become unstable. The area reproduction method using a circular speaker array with masking sound does not use the transfer function of space. This eliminates the need for transfer function measurements, which require a great deal of effort, and the instability of the inverse filter. On the other hand, the circular speaker array has poor accessibility to the center, making it difficult to use in situations where people change frequently.

Therefore, this paper proposes an area reproduction method using a semi-circular speaker array that improves accessibility while maintaining the masking capability mainly to the rear, assuming a reception area such as a hospital or a bank. In order to improve the accessibility of the circular speaker array, part of the circular speaker array must be opened up. However, just opening up a part of the circular speaker array will not allow area reproduction in some directions. Therefore, the proposed method uses two phase-controlled filters that are switched at certain time intervals to maintain the backward masking capability, and a semi-circular speaker array to improve the accessibility to the inner side of the circular speaker array.

Computer simulation using the FDTD method was used to investigate the proposed method. When comparing the difference in SN ratio between the listening area and the masking area using three methods: the method with only a semi-circular shape, the method with phase-shift direction switching (without amplitude control), and the method with phase-shift direction switching (with amplitude control), the method with the phase-shift direction switching (with amplitude control) resulted in the largest difference in SN ratio. The number of speakers was also examined, and the results showed that about 48 speakers were sufficient for the current conditions. In the study of the switching time in the phase-shift direction, it was found that 5 ms was the optimum switching time in the phase-shift direction under the present conditions.

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	論文構成	2
第 2 章	本研究における基礎的な知識・手法	3
2.1	聴覚マスキング	3
2.2	位相制御法	4
2.3	FDTD 法	6
	2.3.1 空間の離散化	6
	2.3.2 時間の離散化	6
2.4	駆動方程式	8
第 3 章	提案手法	9
3.1	移相方向切替	9
3.2	振幅制御	11
第 4 章	シミュレーション	12
4.1	シミュレーション条件	12
4.2	数値評価指標	13
4.3	シミュレーション結果	14
	4.3.1 目的音の音圧パワーマップ	14
	4.3.2 マスキング音の音圧パワーマップの比較	14
	4.3.3 SN 比マップの比較	16
	4.3.4 SN 比の数値比較	18
	4.3.5 スピーカ数の異なる SN 比マップの数値比較	19
	4.3.6 移相方向切替時間の異なる SN 比マップの数値比較	23

第 5 章	おわりに	27
謝辞		28
参考文献		29

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景

音響の分野にはエリア再生という技術がある。エリア再生とは、目的音 (受聴者に聞かせたい音) をあるエリアにのみ再生し、それ以外のエリアでは目的音が聞こえないようにする技術である。エリア再生の利用目的としては、美術館などで絵画の前にいる人のみに説明音声を再生することや病院や銀行などの窓口で他の人に聞かれない秘匿性のある音声を再生することが挙げられる。

エリア再生には現在までに様々な手法が研究されており、スピーカを複数並べるスピーカアレイを用いた手法がよく用いられる。2次元フィルタによってスピーカアレイの指向性を制御する手法 [1, 2], 境界音場制御 [3] に基づいたスピーカアレイの指向性を制御する手法 [4–6], 境界音場制御に基づいたエリア再生法 [7], 境界音場制御に基づいた音場再現法 [8], 多点制御法 [9] を用いた手法 [10–14] などが提案されている。また、マスキング音を併用することでエリア再生を行う円形スピーカアレイによるエリア再生手法 [15] がある。2次元フィルタや境界音場制御を用いてスピーカアレイの指向性を制御する手法は、目的音の指向性を最大にする手法なため、目的音が聞き取れないようなエリアを形成するエリア再生にはあまり向かない。また、多点制御を用いた手法では、多くの制御点を必要とするため空間の伝達関数を測定するために多大な労力を必要することや設計した逆フィルタが不安定になる場合があるなどの問題がある。マスキング音を併用した円形スピーカアレイによるエリア再生手法 [15] では、空間の伝達関数を用いない。そのため、伝達関数を測定する必要や逆フィルタが不安定になることがない。一方、円形スピーカアレイでは中心へのアクセス性が悪いため、人が頻繁に入れ替わるような状況での利用は難しいという問題もある。

1.2 研究目的

本論文では空間の伝達関数を用いずに位相制御法 [16], 円形スピーカアレイ, マスキング音によって目的音の聞こえるエリアと聞こえないエリアを生成できる手法 [15] をベースとして, 半円スピーカアレイを用いてエリア再生を行う. 円形スピーカアレイでは, 中心へのアクセス性が悪いため, 人が頻繁に入れ替わるような状況での利用は難しい. しかし, 単に円形スピーカアレイの一部を開放するだけでは, 方向によってはエリア再生ができない. そこで, 本論文では, 病院や銀行などの受付を想定し, 主に後方へのマスキング能力を維持しつつ, アクセス性を向上させる方法を提案する. これは, ある時間間隔で切り替える 2 つの位相制御フィルタと半円スピーカアレイを用いることで実現する. また, シミュレーションにより, 音圧マップの比較や SN 比の比較を行うことによって提案手法の有効性の検証を行う.

1.3 論文構成

本論文の構成を以下に示す. 第 2 章では聴覚マスキング, 位相制御法, FDTD 法について説明する. 第 3 章では提案手法である移相方向切替, 振幅制御について説明する. 第 4 章ではシミュレーションにより提案法の比較を行う. 第 5 章では本論文の結論を述べる.

第 2 章

本研究における基礎的な知識・手法

2.1 聴覚マスキング

聴覚マスキングとは、ある音が他の音により掻き消され、聞こえにくくなるまたは聞こえなくなる現象のことをいう。日常生活の中でも、友人との会話が電車の騒音によって掻き消され、聞こえにくくなるまたは聞こえなくなるなどの経験があると思う。本論文においては、"ある音"のことを受聴者に聞かせたい音として目的音、"他の音"のことを目的音をマスキングする音としてマスキング音と呼ぶことにする。マスキング音には上記の電車の騒音のような不快感のある音もあるが、人に不快感を与えにくい音として BGM、川のせせらぎ音やピンクノイズなどがよく用いられる。実際の生活の中での使用例として以下に例をいくつか挙げる。

- コンビニのトイレ: コンビニのトイレでは、用を足す音を他の人に聞かれたくない及び他の人が聞きたくないなどの理由により、川のせせらぎや鳥のさえずりなどのマスキング音により用を足す音をマスキングしている。
- カフェの BGM: カフェの店内などで BGM が再生されているのは雰囲気づくりという面もあるが、他のお客様の話し声などを聞き取りづらくすることで、あまり気にならないようにする効果がある。
- 銀行などの受付: 銀行や病院などの受付において、通常はあまり他の人に聞かれたくない会話が行われると思う。そこで、BGM などのマスキング音を流しておくことで会話の秘匿性を確保しやすくすることができる。

従来研究より、ある純音をマスキングするために必要な帯域はその純音の周波数周辺の帯域のみであり、それ以外の帯域はマスキングに寄与しないことが明らかとされ

ている [17]. この現象は人間の聴覚特性に起因していると言われており, 以下の式である目的音に対するマスキング音の有効帯域を求めることができる [17].

$$CB = 25 + 75 \left(1 + 1.4 \left(\frac{f_c}{1000} \right)^2 \right)^{0.69} \quad (2.1)$$

ここで, CB は臨界帯域 (Critical band), f_c は目的音の周波数 (純音) を表す. 臨界帯域とは, ある f_c に対して有効なマスキング音の帯域であり, 周波数範囲としては $f_c - CB/2$ から $f_c + CB/2$ の範囲がマスキング音の有効な帯域である. つまり, 人間の聴覚マスキングにおいては, 目的音の周波数帯域と同程度または少し広い帯域のマスキング音を用いてマスキングすることが効果的ということである.

2.2 位相制御法

先行研究 [15] において, マスキング音は位相制御法を基に制御されている. 位相制御法はもともとスピーカの再生に用いられる手法ではなく, マイクの録音においての一手法である. 位相制御法では, 図 2.1 に示すような 4 素子円形マイクロホンアレイを用いる. この手法は, 4 素子円形マイクロホンアレイの各マイクロホン出力を $\pi/2$ ずつ移相させ, その出力の平均を計算することで, 円形マイクロホン中心方向への收音感度を低くすることができる. 先行研究 [15] ではこの位相制御法をスピーカアレイに適応し, スピーカアレイ中心に quiet zone を作成している. 半径 $r[m]$, スピーカ数 P の円形スピーカアレイの場合, スピーカ出力を移相させるためのフィルタ $W_i(\omega)(i = 0, 1, 2, \dots, P-1)$ は以下で表せる.

$$W_i(\omega) = \exp(-jn\phi_i) \quad (2.2)$$

上式において, n は波の個数で $\omega r/c$ 未満の最大整数かつ $P/2$ 以下である. ここで, $c[m/s]$ は音速, P はスピーカの数である. n の制約は, 通常よりも減衰の速いエバネッセント波が発生しないようにするための制約である [18]. ϕ_i は図 2.2 に示すように中心 O から各スピーカまでの角度で $\phi_i[rad] = 2\pi i/P$ となる. i はスピーカインデックスで, 0 から $P-1$ の範囲で与えられる.

各スピーカから放射されるマスキング音はこのフィルタによって少しずつ移相される. スピーカアレイ中心では全スピーカからの距離がほぼ等しくなるため, 移相によりマスキング音同士が打ち消し合い, マスキング音が静音化される. 一方, スピーカアレイ外側では図 2.3 のようにマスキング音が螺旋状に放射される. つまり, quiet zone がスピーカアレイ内側のみに生成される. 図 2.3 は, ホワイトノイズやピンクノイズなどのマスキング音をフィルタ W_i を用いてフィルタリングし, 各スピーカから放射

したときの音圧マップの例である．この音圧マップは後述する計算機シミュレーションにより生成したもので，外側には音圧を放射し，内側は静音化されている様子を示している．

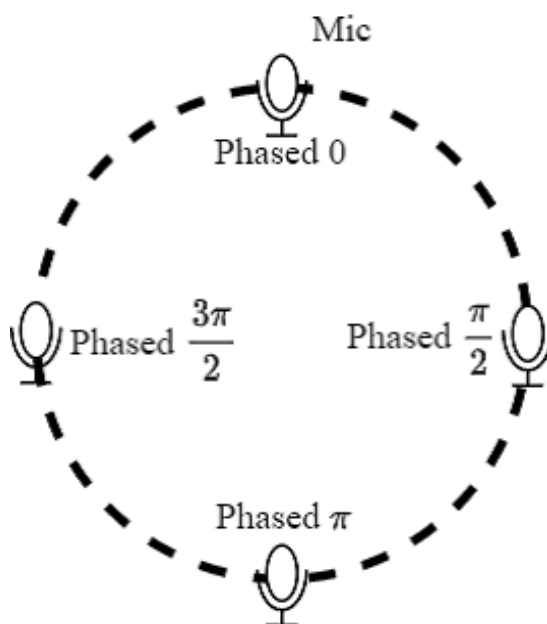


図 2.1 The explanation of phase control method

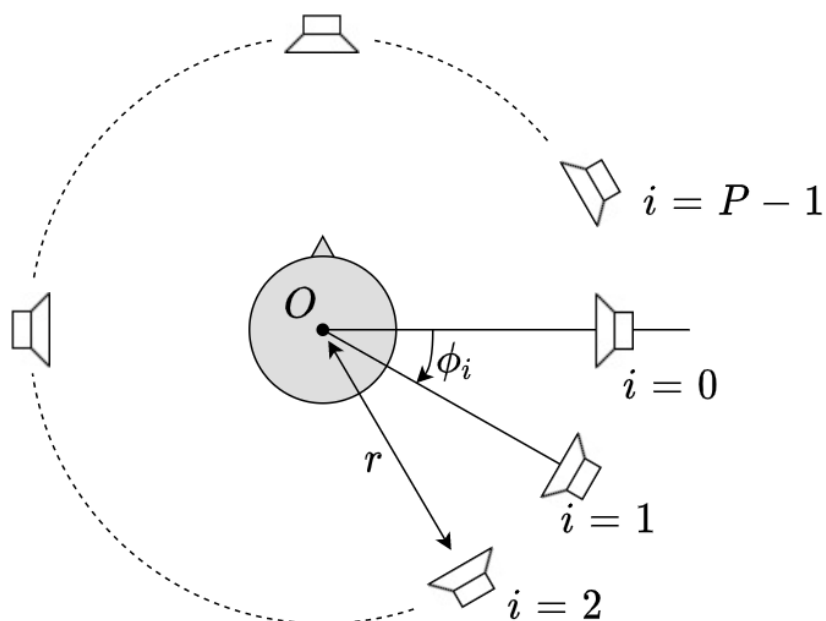


図 2.2 The explanation of the circle speaker array

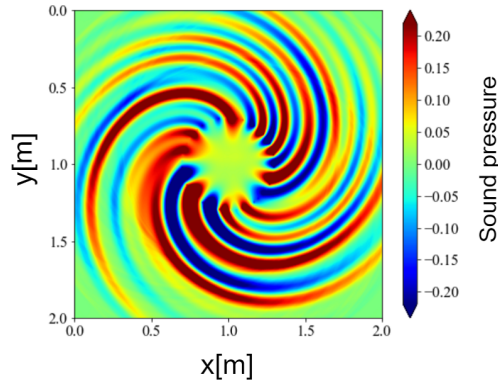


図 2.3 The sample of masking sound with circle array

2.3 FDTD 法

FDTD 法 (Finite-difference time-domain method) [19] は時間領域有限差分法とも呼ばれ、偏微分方程式の微分項を差分に置き換え、逐次時間積分を行うことで対象となる方程式の時間発展を計算していくシミュレーション手法である。物理の分野では古くから使用されている手法で、1966 年に Yee によって電磁界解析に初めて応用され [20]、計算機的发展とともに工学的に使用されるようになった。音響の分野でも時系列の解析が必要な場合に使用されることがある。本研究では、音場のシミュレーションとしてこの FDTD 法を用いた。

2.3.1 空間の離散化

FDTD 法は空間と時間の離散化を行う必要があるが、まず空間の離散化について説明する。空間の離散化にも様々な手法があるが、単なる直交格子より計算精度が高く、よく用いられている Staggered grid を説明する。Staggered grid は図 2.4 のように、音圧、粒子速度を互い違いに配置して空間を離散化する手法である。この手法は単なる直交格子よりも FDTD 法特有の数値振動を低減させる効果がある。本研究のシミュレーションでもこの Staggered grid を使用した。

2.3.2 時間の離散化

次に FDTD 法における時間の離散化について説明する。時間の離散化についての概略図を図 2.5 に示す。図 2.5 の $p^n(i)$ はある時刻 n 、ある位置 i における音圧を表

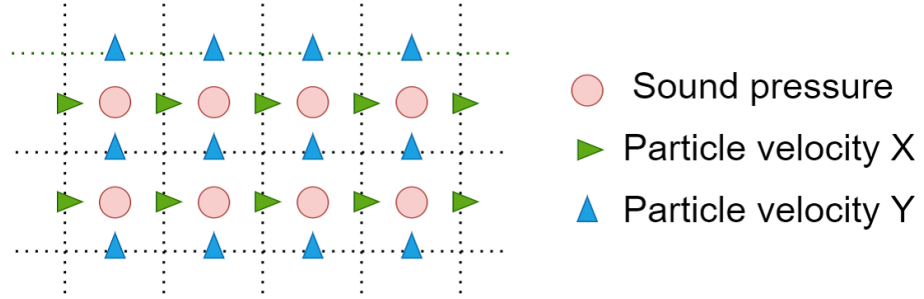


図 2.4 The discretization of space of FDTD

し, $u_x^n(i)$ はある時刻 n , ある位置 i における x 方向の粒子速度を表す. 図 2.5 が示すように, 音圧と粒子速度の計算される時刻が異なっており, 空間の離散化と同様に互い違いになっている. これは Leap frog algorithm と呼ばれており, 音圧 2 つから粒子速度を計算, 粒子速度 2 つから音圧を計算を繰り返すことで逐次計算していく手法である.

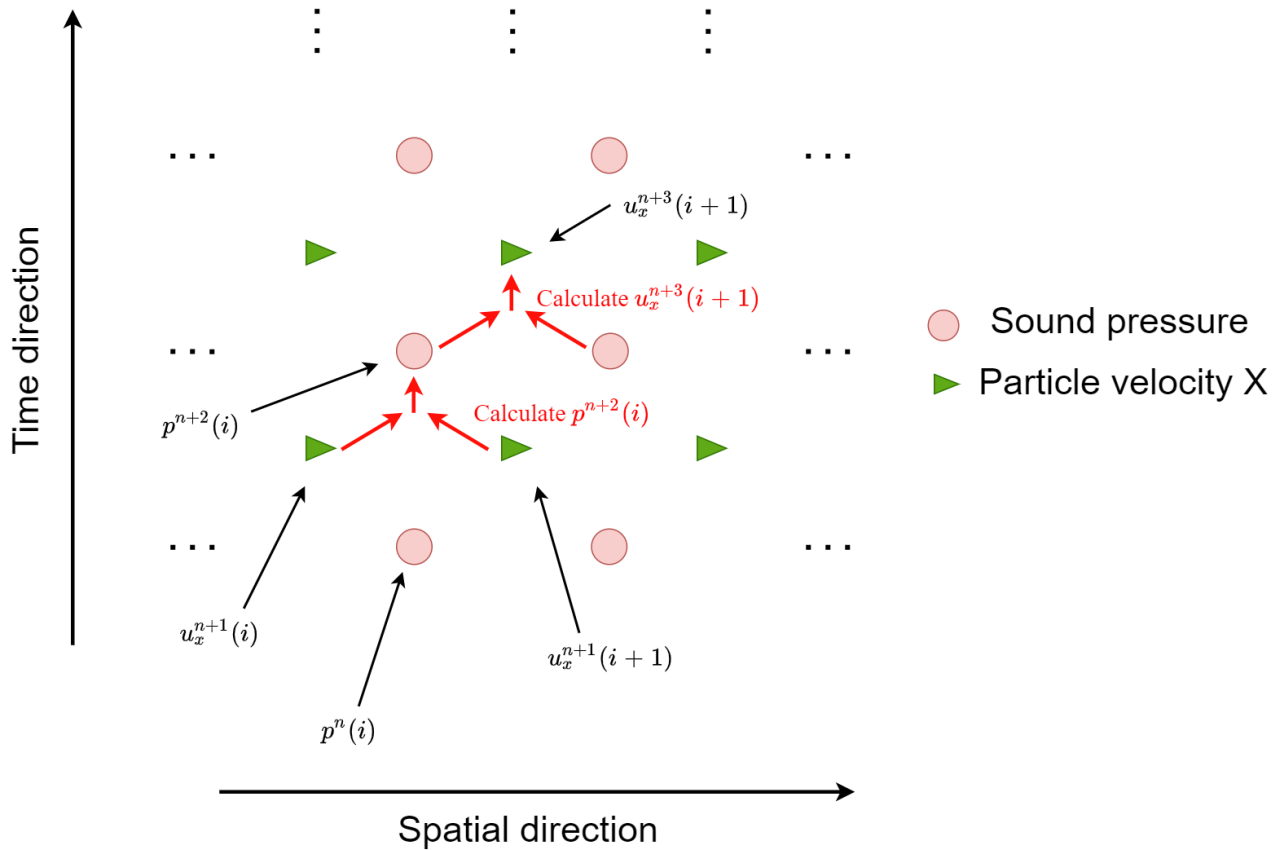


図 2.5 The discretization of time of FDTD

2.4 駆動方程式

FDTD 法を計算するための駆動方程式は運動方程式と連続の式の差分方程式で表される．空気中の音波の運動方程式は以下に示す．

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \frac{\partial u_y}{\partial t} = 0 \quad (2.4)$$

つぎに，連続の式を示す．

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \kappa \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.5)$$

ここで， p は音圧， u_x ， u_y は x ， y 方向の粒子速度， κ は体積弾性率， ρ は媒質密度を示す．FDTD 法ではこれらの式が基礎方程式となる．

式 (2.3)，式 (2.4)，式 (2.5) の 3 つの方程式を計算機で計算できるように，2.2 節，2.3 節に記述した Staggered grid と Leap frog algorithm により離散化した駆動方程式を以下に示す．

$$u_x^{n+1}(i+1, j) = u_x^n(i+1, j) - \frac{\Delta t}{\Delta h \rho} [p^n(i+1, j) - p^n(i, j)] \quad (2.6)$$

$$u_y^{n+1}(i, j+1) = u_y^n(i, j+1) - \frac{\Delta t}{\Delta h \rho} [p^n(i, j+1) - p^n(i, j)] \quad (2.7)$$

$$p^{n+1}(i, j) = p^n(i, j) - \frac{\Delta t \kappa}{\Delta h} \{ [u_x^{n+1}(i+1, j) - u_x^{n+1}(i, j)] + [u_y^{n+1}(i, j+1) - u_y^{n+1}(i, j)] \} \quad (2.8)$$

ここで， n は時刻のインデックス， i ， j は x 方向， y 方向の空間のインデックス， Δt は時間分解能， Δh は空間分解能を表す．式 (2.6) と式 (2.7) の二つと式 (2.8) を時々刻々と交互に計算していくことによって時間応答を得ることができる．

第 3 章

提案手法

3.1 移相方向切替

図 3.1 に提案する半円スピーカアレイを示す．半円スピーカアレイの半径は $r[m]$ である．提案手法において，目的音は先行研究 [15] と同様に各スピーカから同相で再生することで，半円スピーカアレイの中心 O で強調される．目的音を各スピーカから再生するための式を以下に示す．

$$L_i^T(\omega) = S_T(\omega) \quad (3.1)$$

ここで， $L_i^T(\omega)$ は i 番目のスピーカから放射される目的音成分， S_T は目的音， ω は角周波数を表す．

一方，マスキング音は，先行研究 [15] で使用されている位相制御のフィルタを拡張した 2 つのフィルタによって前処理され，各スピーカから再生される．この 2 つのフィルタは i 番目のスピーカから再生されるマスキング音を各角周波数 ω に応じて移相される．以下にこの 2 つのフィルタを示す．

$$W_i(\omega) = \exp(-jn\phi_i) \quad (3.2)$$

$$W'_i(\omega) = \exp(-jn(\pi(P-1)/P - \phi_i)) \quad (3.3)$$

上式において， n は波の個数で $\omega r/c$ 未満の最大整数かつ $P/2$ 以下である．ここで， $c[m/s]$ は音速， P はスピーカの数である． n の制約は，通常よりも減衰の速いエバネッセント波が発生しないようにするための制約である [18]． ϕ_i は図 2.2 に示すように中心 O から各スピーカまでの角度で $\phi_i[rad] = 2\pi i/P$ となる． i はスピーカインデックスで，0 から $P-1$ の範囲で与えられる．提案手法では，masking sound の前処理に用いるフィルタ ($W_i(\omega)$ or $W'_i(\omega)$) は，ある時間間隔 T で交互に切り替えられる．この 2 つのフィルタを交互に切り替えることを移相方向切替 (Phase-shift direction switching) と呼ぶことにする．マスキング音を各スピーカから再生するための式を以

下に示す.

$$L_i^M(\omega) = \begin{cases} W_i(\omega) \times S_M(\omega) & (t \bmod 2T < T) \\ W'_i(\omega) \times S_M(\omega) & (t \bmod 2T \geq T) \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで, $L_i^M(\omega)$ は i 番目のスピーカから放射されるマスキング音成分, $S_M(\omega)$ はマスキング音 (ホワイトノイズやピンクノイズなど), t は時間である. これらの式から, 最終的にスピーカから再生する音は以下の式によって決定される.

$$L_i(\omega) = L_i^T(\omega) + L_i^M(\omega) \quad (3.5)$$

ここで, $L_i(\omega)$ は半円スピーカアレイの i 番目のスピーカから最終的に再生される音を表す.

提案手法の半円スピーカアレイでは, 上記の移相方向切替を適切に行うことによって, 半円スピーカアレイにしたことで生じるスピーカアレイ外側への音圧放射の偏りを軽減し, より均一に外側へ音圧を放射する. 上記の位相制御法と移相方向切替によって, 半円スピーカアレイ内側ではマスキング音が静音化され, 目的音が強調されるので, SN 比が良好なエリアを生成することができる. 一方, 半円スピーカアレイ外側ではマスキング音が均一に放射され, 目的音は強調されないので, SN 比が悪いエリアを生成することができる.

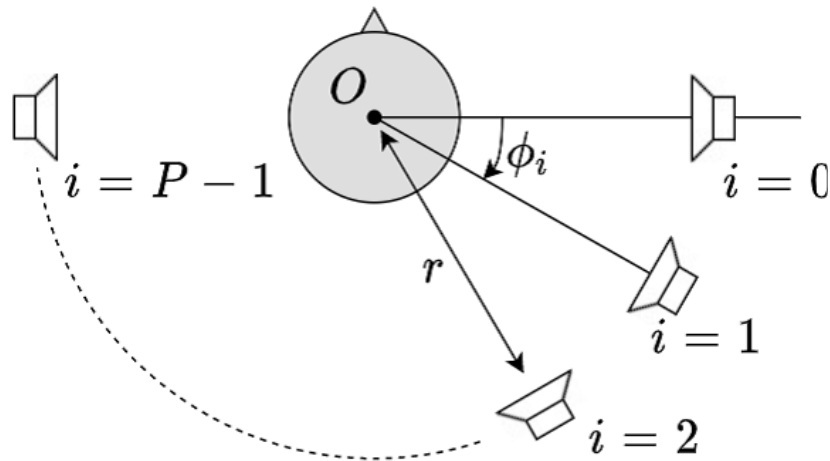


図 3.1 The speaker position of half circular speaker array

3.2 振幅制御

前節の移相方向切替に追加で、各スピーカから再生するマスキング音の振幅を調整することによってマスキング音の半円スピーカアレイ中心での更なる静音化を行う。これを本論文では振幅制御 (Amp control) と呼ぶこととする。振幅制御は、以下の式でこの振幅制御は円形スピーカアレイを半分にしてしまったことにより、スピーカアレイ端から音圧が静音化したいエリアに漏れ出てしまう現象を抑制する効果を期待して行う。この振幅制御法では、式 (3.5) ではなく、この式のかわりに以下を用いて $L_i(\omega)$ を生成する。

$$L_i(\omega) = A_i \times L_i^T(\omega) + L_i^M(\omega) \quad (3.6)$$

ここで、 A_i は $L_i^M(\omega)$ の振幅を調整する係数で、以下で表される。

$$A_i = 1 - \cos\left(\frac{2\pi(i+1)}{P+1}\right) \quad (3.7)$$

$$A_{min} = 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{P+1}\right) \quad (3.8)$$

$$A_{max} = \begin{cases} 1 - \cos\left(\frac{\pi P}{P+1}\right) & (P \bmod 2 = 0) \\ 2 & (P \bmod 2 = 1) \end{cases} \quad (3.9)$$

A_i は i が 0 または $P-1$ で最小 (A_{min})、 $P/2$ で最大 (A_{max}) となる。この振幅制御により、半円スピーカアレイの端に近づくにつれてマスキング音の音圧が徐々に低下させることで、スピーカアレイ端の影響を低減できるため、半円スピーカアレイ中心での静音性が向上すると考えられる。

第 4 章

シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

以下のシミュレーション結果については、FDTD 法によってシミュレーションにより得た結果を示す。このときのシミュレーション条件を表 4.1 に示す。ただし、各節で断りのあるパラメータについては各節で記述される値を用いることとする。

表 4.1 The simulation conditions

time resolution dt	$2 \times 10^{-6}[\text{s}]$
spatial resolution dh	$2 \times 10^{-3}[\text{s}]$
sound field size	$2 \times 2[\text{m}^2]$
speed of sound c	$340[\text{m/s}]$
medium density ρ	$1.293[\text{kg/m}^3]$
number of speakers P	48
speaker array radius r	$0.3[\text{m}]$
phase-shift direction switching time T	$2 \times 10^{-3}[\text{s}]$
masking sound type	pink noise (1k ~ 3kHz)
masking sound amplitude	0dB
target sound type	white noise (1k ~ 3kHz)
target sound amplitude	-20dB

シミュレーション結果として音圧パワーマップを用いたため、音圧マップの生成方法を以下に示す。まず、シミュレーション開始から 5ms 後から 15ms までの 10ms 間に関して $50\mu\text{s}(20\text{kHz})$ 間隔でサンプリングする。その各サンプルに対して、音圧を 2 乗することによって各サンプルごとに音圧パワーを計算する。その後、10ms 間の全て

のサンプルの音圧パワーを平均し、音圧パワーマップを生成する。

4.2 数値評価指標

本研究では、提案手法の評価としてシミュレーションによる音圧マップと各エリアでの音圧値を用いた。そのため、本節で各エリアの区分と音圧値の計算方法を説明する。

最初に各エリアの区分を図 4.1 に示す。図 4.1 に示すように、目的音を聞き取るためのエリアとして受聴エリア (Listening area)、目的音をマスキングするエリアとしてマスキングエリア (Masking area) と呼ぶこととする。中心 O を原点とする極座標系において、 $\theta[\text{rad}]$ を角度、 $r[\text{m}]$ を原点からの距離とすると、受聴エリアは $r \leq 0.2$ のエリア、マスキングエリアは $0 \leq \theta \leq \pi$ かつ $0.3 < r \leq 1.0$ のエリアである。次に、評価指標の計算方法について説明する。評価指標として、受聴エリアとマスキングエリアの音圧または SN 比の平均と分散を計算し、これらを指標とする。この計算は 2.4 節で説明した FDTD 法でのシミュレーションの本論文ではこれらの評価指標をエリアポイント (Area point) と呼ぶこととする。

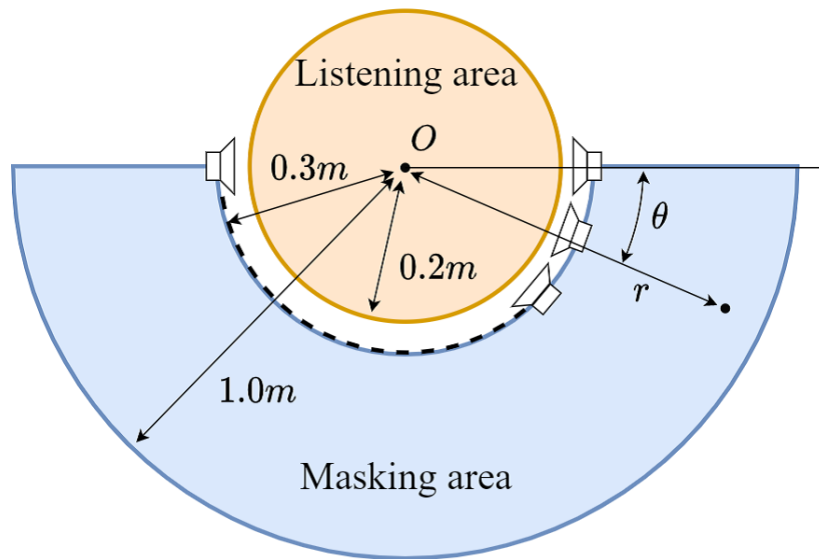


図 4.1 Classification of 2 areas

4.3 シミュレーション結果

4.3.1 目的音の音圧パワーマップ

本システムの半円スピーカアレイで目的音を再生した場合にどのような音圧パワーマップとなるかを確認するためにシミュレーションを行った。その結果を図 4.2 に示す。図 4.2 からスピーカアレイ中心で目的音が強調されていることがわかる。

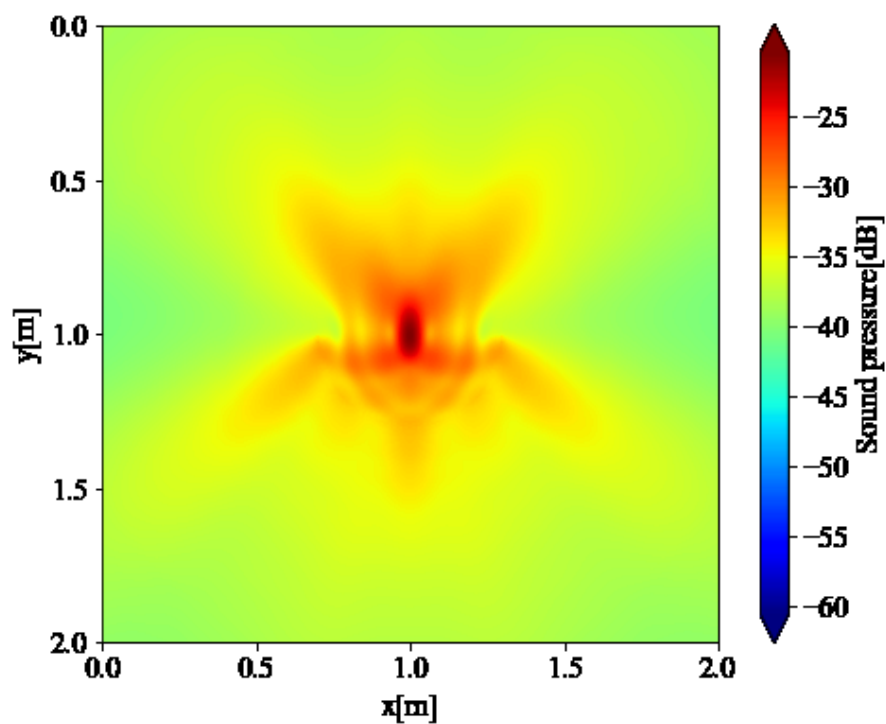


図 4.2 Sound pressure map of target sound

4.3.2 マスキング音の音圧パワーマップの比較

マスキング音について、移相方向切替を行うことで受聴エリアを静音化できているか、マスキングエリアにマスキング音を放射できているかどうかの確認および比較を行った。シミュレーション結果を図 4.3, 図 4.4, 図 4.5 に示す。これらの結果より、移相方向切替ありの方がマスキング音が外側に均一に放射できていることが確認できた。

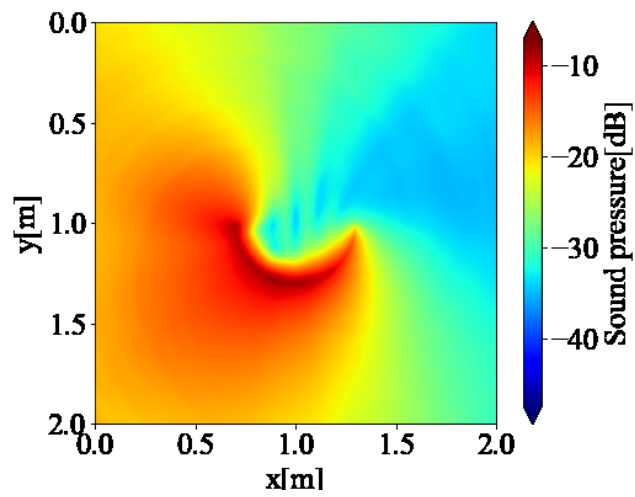


図 4.3 masking sound map without phase-shift direction switching

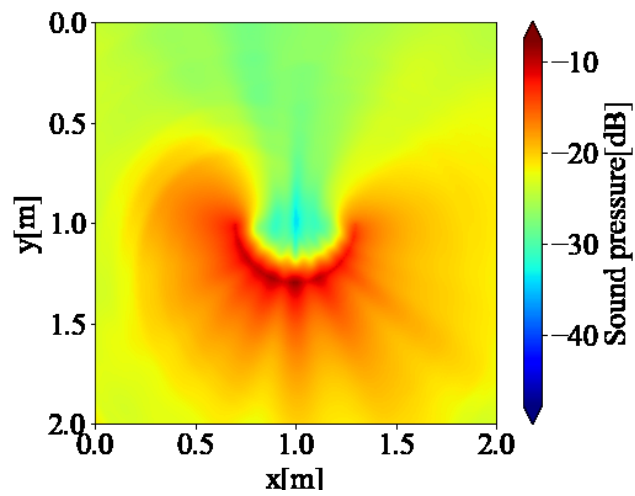


図 4.4 masking sound map with phase-shift direction switching(without amp control)

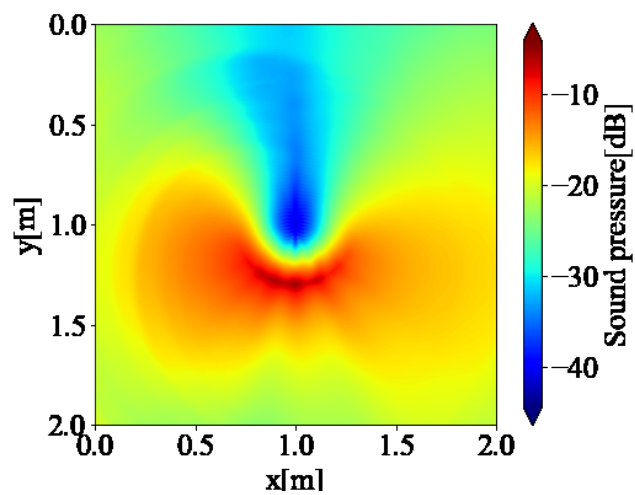


図 4.5 masking sound map without phase-shift direction switching(with amp control)

4.3.3 SN 比マップの比較

目的音を Signal, マスキング音を Noise として SN 比を計算して比較を行った. マスキング音は移相方向切替なし, 移相方向切替あり (振幅制御なし), 移相方向切替あり (振幅制御あり) の3つを使用した. 4.3.1 節の目的音の音圧マップと 4.3.2 節のマスキング音の音圧マップより, SN 比マップを生成した結果を図 4.6, 図 4.7, 図 4.8 に示す. 図 4.6 は移相方向切替なし, 図 4.7 は移相方向切替あり (振幅制御なし), 図 4.8 は移相方向切替あり (振幅制御あり) の結果である. これらの結果より, どの手法でもスピーカアレイ中心で SN 比が上昇し, 目的音を強調できていることがわかる. 更に, 中心でもっとも SN 比が高いのは移相方向切替あり (振幅制御あり) であることもわかる. 一方, 移相方向切替なしの場合, マスキングエリアの右側の SN 比を低下させられていないことがわかる.

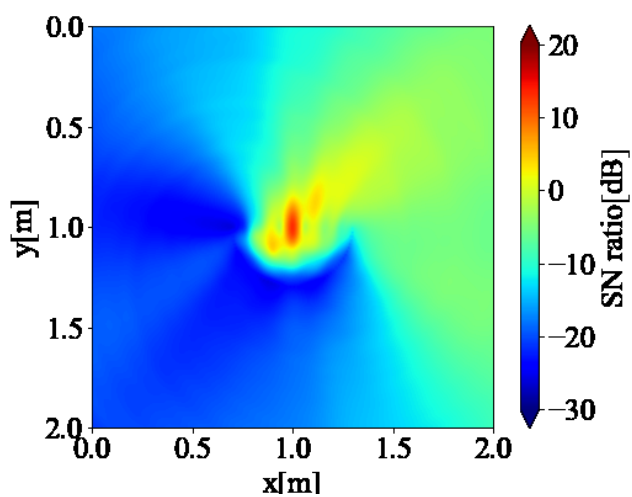


図 4.6 SN ratio map without phase-shift control switching

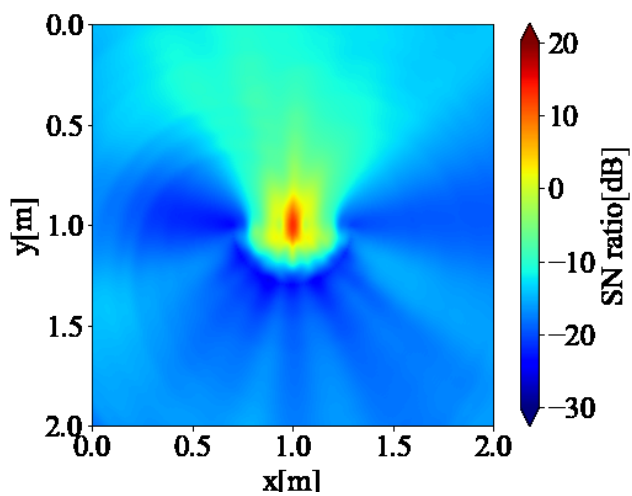


図 4.7 SN ratio map with phase-shift control switching(without amp control)

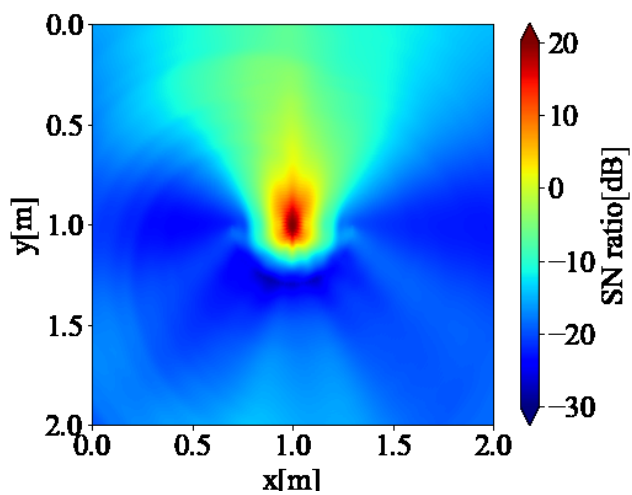


図 4.8 SN ratio map with phase-shift control switching(with amp control)

4.3.4 SN比の数値比較

これらのエリアに対して、4.3.3節のSN比マップのSN比の平均を計算した。その結果の受聴エリアのSN比平均値と分散値を表4.2、マスキングエリアのSN比平均値と分散値を表4.3、受聴エリアのSN比の平均からマスキングエリアのSN比の平均を引いた差を表4.4に示す。ここで、Aは移相切替なし、Bは移相切替あり(振幅制御なし)、Cは移相切替あり(振幅制御あり)の手法を表す。

表4.4より、Cの移相切替あり(振幅制御あり)がもっともSN比の差を大きくできていることがわかる。表4.3より、移相方向切替なしより移相方向切替ありの2手法の方がマスキングエリアのSN比の分散値を低くでき、より均一にマスキングエリアをマスキングできていることがわかる。これらの結果より、分散値に関しては移相方向切替あり(振幅制御なし)の方が若干優れているが、SN比の差は移相方向切替あり(振幅制御あり)が最も優れていることがわかった。目的音を受聴エリアで再生し、マスキングエリアでマスキングするには受聴エリアとマスキングエリアのSN比の差が最も重要なため、本牧的には移相方向切替あり(振幅制御あり)が最も適していると考えられる。

表 4.2 Evaluation value of listening area

Method	Mean SN of listen area [dB]	Variance SN of listen area
A	-0.108	22.9
B	-1.25	24.5
C	1.01	68.8

表 4.3 Evaluation value of masking area

Method	Mean SN of masking area [dB]	Variance SN of listen area
A	-16.3	35.0
B	-17.7	2.57
C	-19.8	4.81

表 4.4 Difference of SN ratio

Method	Difference of SN ratio[dB]
A	16.2
B	16.4
C	20.8

4.3.5 スピーカ数の異なる SN 比マップの数値比較

スピーカ数 P が変化したときの受聴エリアとマスキングエリアの SN 比について移相方向切替あり (振幅制御あり) の手法で数値比較した。スピーカ数 P を 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96, 108, 120, 132, 144, 156, 168, 180, 192 の 16 パターンでシミュレーションを行った。目的音とマスキング音のシミュレーションを別々に行い、目的音の音圧マップからマスキング音の音圧マップを引いて SN 比マップを生成した。そして、SN 比マップから SN 比のエリアポインを計算した。

このシミュレーションの結果である受聴エリアの平均 SN 比を図 4.9 に、受聴エリアの SN 比の分散値を図 4.10 に、マスキングエリアの平均 SN 比を図 4.11 に、マスキングエリアの SN 比の分散値を図 4.12 に、受聴エリアの平均 SN 比からマスキングエリアの平均 SN 比を引いた差を図 4.13 に示す。図 4.9 と図 4.11 より、スピーカ数が増加することにより受聴エリアとマスキングエリアの平均 SN 比は上昇することがわかる。ただし、スピーカ数が 48 を超えたあたりから傾きは緩やかになり、少しずつその後も上昇するがほぼ一定となっている。図 4.13 は受聴エリアの平均 SN 比からマスキングエリアの平均 SN 比を引いたグラフである。このグラフは受聴エリアとマスキングエリアの SN 比の差を表しており、スピーカ数が増加すると 60 個あたりまでは SN 比の差が増加するが、その後はほぼ一定となっている。次に、SN 比の分散値についてだが、図 4.10 より受聴エリアの SN 比の分散値は最初は上下するがスピーカ数 48 個あたりで傾きは緩やかになり、ほぼ一定となっていることがわかる。図 4.12 より、マスキングエリアの SN 比の分散はスピーカ数が増加すると 60 個あたりまで上昇し、その後は傾きが緩やかになり徐々に上昇していくことがわかる。これらの結果より、今回の条件ではスピーカ数を増加させてもある値より上では図 4.13 で示すように SN 比の差は大きくなりづらいことがわかった。スピーカ数が 48 個または 60 個あたりから SN 比の差は大きくなりづらいため、今回の条件ではスピーカ数が多いとコストがかかるため、48 から 60 個の間で良いと考えられる。スピーカ数が 48 個または 60 個あたりから SN 比の差が大きくなりづらい理由としては、スピーカアレイのスピーカ同士の距離が使用しているマスキング音の周波数 3kHz に対して十分に近くなったため、それ以上スピーカ数が増えても効果が薄いのではないかと考えられる。スピーカ数 48 個の時点で、3kHz の波長約 110mm に対してスピーカ距離は約 20mm なため、5 倍以上細かい。そのため、これ以上細かくなっても効果が薄かったのではないかと考えられる。スピーカ数がもっと必要になる条件の可能性としては、目的音やマスキング音にもっと高い周波数が含まれる場合やスピーカアレイの半径が大きくなりスピーカ同士の距離が遠くなった場合などが考えられる。

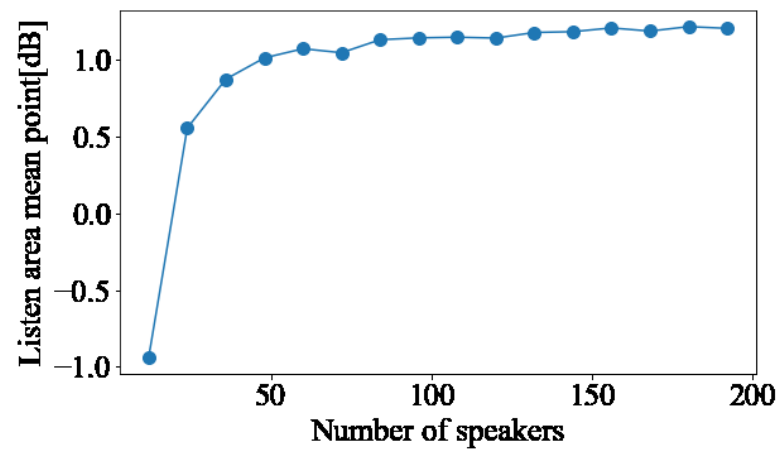


図 4.9 Listening area mean SN ratio when changing number of speakers

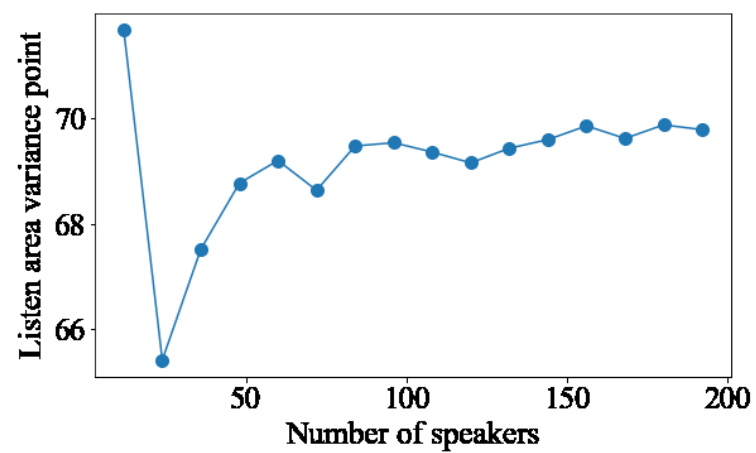


図 4.10 Listening area variance SN ratio when changing number of speakers

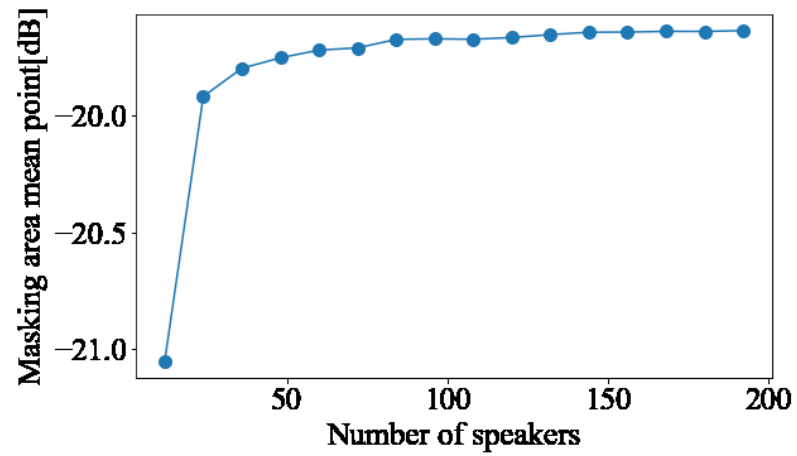


図 4.11 Masking area mean SN ratio when changing number of speakers

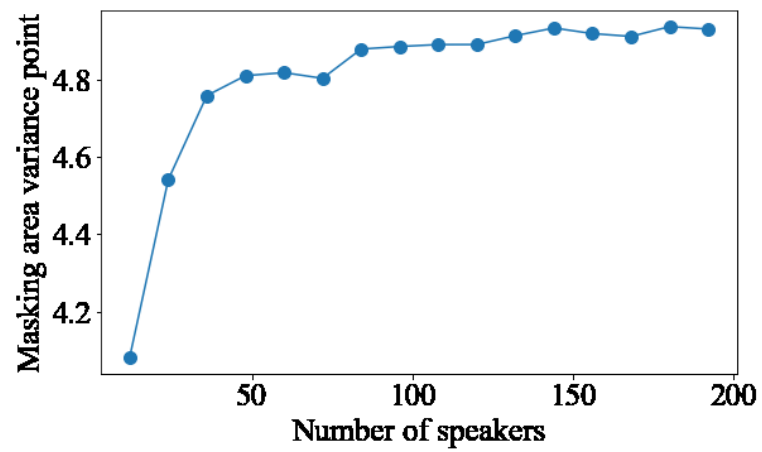


図 4.12 Masking area variance SN ratio when changing number of speakers

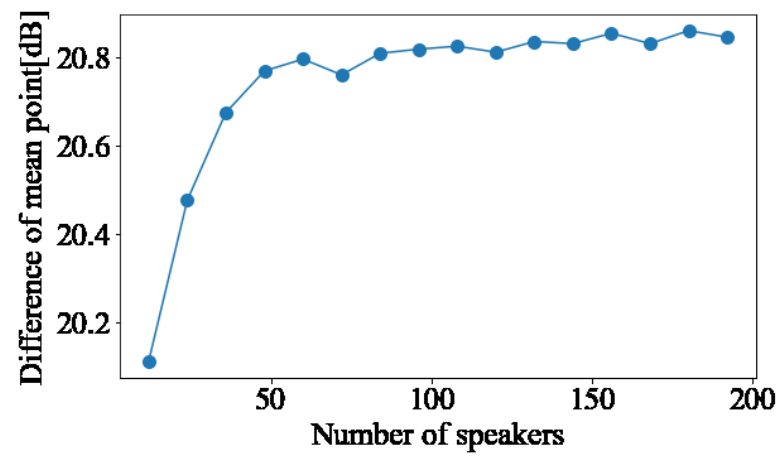


図 4.13 Difference of mean SN ratio when changing number of speakers

4.3.6 移相方向切替時間の異なる SN 比マップの数値比較

移相方向切替時間が変化したときの受聴エリアとマスキングエリアの SN 比について移相方向切替あり (振幅制御あり) の手法で数値比較した。移相方向切替時間の 0.20, 0.25, 1.00, 1.50, 2.00, 4.00, 4.50, 5.00, 5.50, 6.00, 6.50, 7.00, 7.50, 8.00[ms] の 14 パターンでシミュレーションを行い、SN 比のエリアポイントを計算した。移相方向切替時間の増加に伴い、音圧マップを生成するための平均時間をシミュレーション開始から 5ms 後から 48ms 間に変更した。目的音とマスキング音のシミュレーションを別々に行い、目的音の音圧マップからマスキング音の音圧マップを引いて SN 比マップを生成した。そして、SN 比マップから SN 比のエリアポイントを計算した。

このシミュレーションの結果である受聴エリアの平均 SN 比を図 4.14 に、受聴エリアの SN 比の分散値を図 4.15 に、マスキングエリアの平均 SN 比を図 4.16 に、マスキングエリアの SN 比の分散値を図 4.17 に、受聴エリアの平均 SN 比からマスキングエリアの平均 SN 比を引いた差を図 4.18 に示す。図 4.14 より、移相方向切替時間が増加すれば受聴エリアの SN 比が良くなっていくことがわかる。ただし、SN 比の上昇は 2ms あたりから傾きが緩やかになっている。図 4.15 より、受聴エリアの SN 比の分散は移相方向切替時間が増加すると 1ms あたりまでは増加するが、その後はほぼ一定となっていることがわかる。図 4.16 より、移相方向切替時間が増加するとマスキングエリアの SN 比は低下することがわかる。マスキングエリアの SN 比の低下も受聴エリアの SN 比の上昇と同様に 2ms あたりから傾きが緩やかになっている。図 4.17 より、移相方向切替時間が増加すると全体の傾向としてはマスキングエリアの SN 比の分散は大きくなることがわかる。最後に、図 4.18 より、受聴エリアとマスキングエリアの SN 比の差は移相方向切替時間が増加すると良くなり、移相方向切替時間が 5ms あたりから上昇しなくなっていることがわかる。

移相方向切替時間が大きすぎる場合、移相方向を切り替えない場合とほぼ同等になってしまうためできる大きすぎるのは良くないと考えらる。図 4.17 の分散値からも移相方向切替時間が増加するとマスキングエリアの分散値が増加してしまうため、できるだけ移相方向切替時間は小さい方が良く考えられる。図 4.18 からは受聴エリアとマスキングエリアの SN 比の差が最大付近かつ移相方向切替時間が最も小さいのは 5ms だということがわかるため、今回の条件での最適な移相方向切替時間は 5ms であることがわかった。

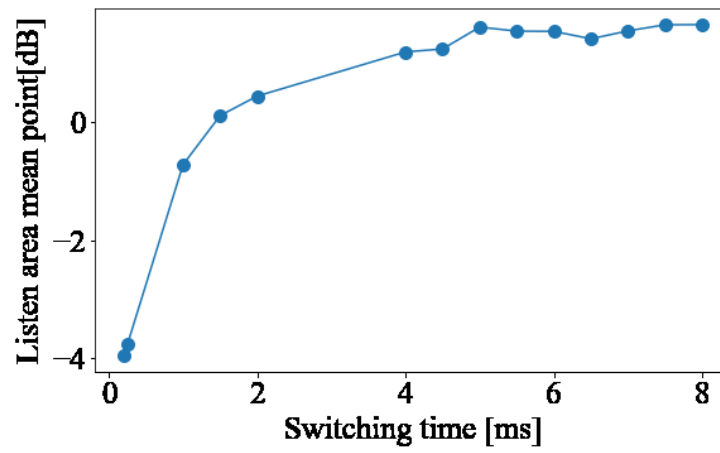


図 4.14 Listening area mean SN ratio when changing switching time

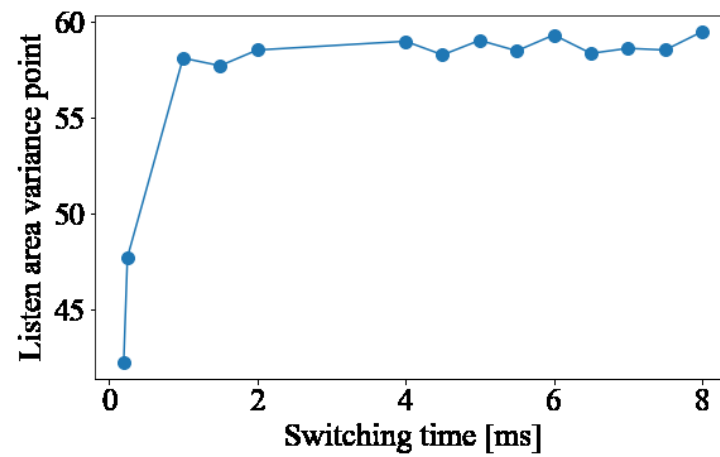


図 4.15 Listening area variance SN ratio when changing switching time

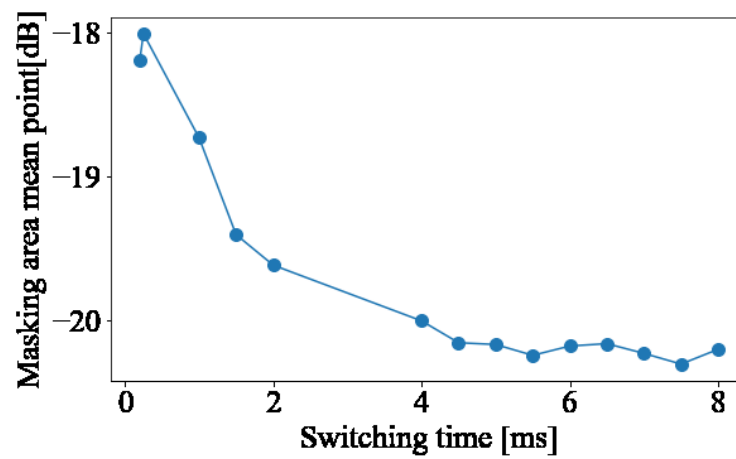


図 4.16 Masking area mean SN ratio when changing switching time

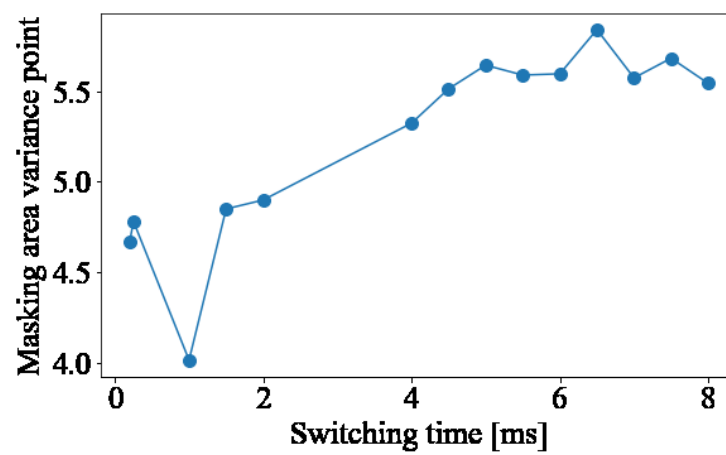


図 4.17 Masking area variance SN ratio when changing switching time

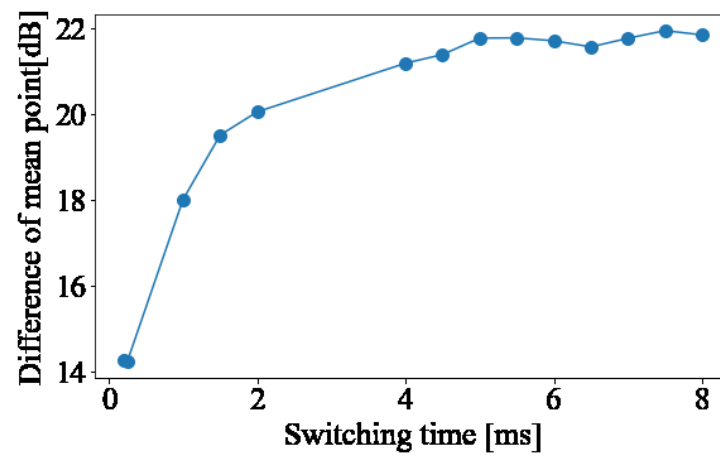


図 4.18 Difference of mean SN ratio when changing switching time

第 5 章

おわりに

本論文では、病院や銀行などの受付を想定した、主に後方へのマスキング能力を維持かつアクセス性を向上させた半円スピーカアレイのエリア再生法を提案した。この提案手法は聴覚マスキング、位相制御法を用いた円形スピーカアレイのエリア再生法をベースに、フィルタをある時間間隔で切り替えることによって半円スピーカアレイでも使用できるように拡張を行った手法であった。この提案手法に対し、FDTD 法を用いた計算機シミュレーションにより提案手法の検討を行った。移相方向切替なし、移相方向切替あり (振幅制御なし)、移相方向切替あり (振幅制御あり) の 3 つの手法の中では、移相方向切替あり (振幅制御あり) がもっとも受聴エリアとマスキングエリアの SN 比の差を大きくできるという結果が得られた。また、スピーカ数を変化させてのシミュレーションでは、スピーカ数が 48 個を超えたあたりで SN 比の差の変化が小さくなったため、今回の条件においては 48 個付近のスピーカ数で十分であるという結果が得られた。そして、移相方向切替時間を変化させてのシミュレーションでは、移相方向切替時間を 5ms より長くしても SN 比の差が大きくならなかったことや移相方向切替時間を長くするとマスキングエリアの SN 比の分散値が大きくなることから、今回の条件においては移相方向切替時間は 5ms が最適であるという結果が得られた。

謝辞

本研究を進めるにあたり，日頃より様々なご指導ご鞭撻を賜りました，本学電気系准教授 杉田泰則 博士に深謝いたします。また，本論文の審査において貴重なご意見，お時間を賜りました，本学電気系教授 岩橋政宏 博士，本学電気系准教授 圓道知博 博士，ならびに音楽電気系助教 原川良介 博士に御礼申し上げます。そして，本研究に関して多くのご指摘，ご意見を下さった信号処理応用研究室の皆様には感謝の意を表します。最後に，学生生活を支えていただいた両親に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 西川清, 大崎貴也, “2次元デジタルフィルタを用いた指向性アレースピーカ,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J78-A, No. 11, pp. 1419–1428, 1995.
- [2] 藤野輝雄, 西川清, “マルチビーム形指向性アレースピーカによる広受聴域音像定位のステレオ再生法,” 電子情報通信論文誌, Vol. J87-A, No. 4, pp. 439–447, 2004.
- [3] 伊勢史郎, “キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理,” 音響学会誌, Vol. 53pp. 706–713, 1997.
- [4] 橋本泰治, 田中和世, “境界音場制御の原理に基づく2次元スピーカアレーと楕円形制御点配置を用いた指向性制御の数値的検討,” 日本音響学会誌, Vol. 66, No. 12, pp. 589–597, 2010.
- [5] 榎本成悟, 伊勢史郎, “境界音場制御の原理を用いた指向性スピーカシステムの提案,” 信学論 (A), Vol. J87-A, No. 4, pp. 431–438, 2004.
- [6] 橋本泰治, 三河正彦, 田中和世, “境界音場制御の原理を用いた全方位音響マルチビームフォーミングシステムの開発,” 日本音響学会誌, Vol. 68, No. 3, pp. 113–120, 2012.
- [7] 関貴志, 羽田陽一, “円形スピーカアレーを用いたNBSFC法によるエリア再生法の検討,” 信学技報, Vol. 114, No. 473, pp. 231–236, 2015.
- [8] Akira Omoto, Shiro Ise, Yusuke Ikeda, Kanako Ueno, Seigo Enomoto, and Maori Kobayashi, “Sound field reproduction and sharing system based on the boundary surface control principle,” *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol. 36, No. 1, 2015.
- [9] 安枝和哉, 新城大輔, 片岡章俊, “直線スピーカアレーを用いた多点制御法による複数エリア再生,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J103-A, No. 1, pp. 9–16, 2020.
- [10] 植松尚, 羽田陽一, 片岡章俊, “エリア内の再生特性を考慮した音の局所的再生,” 日本音響学会誌, Vol. 62, No. 2, pp. 89–97, 2006.
- [11] O.Kirkeby, P.Nelson, F.Orduna-Bustamante, and H.Hamada, “Local sound field reproduction using digital signal processing,” *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 100, No. 3, pp. 1584–1593, 1996.
- [12] Noriyuki Kamado, Hiroshi Saruwatari, and Kiyohiro Shikano, “Robust sound field

- reproduction integrating multi-point sound field control and wave field synthesis,” *2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2011.
- [13] 安枝和哉, 新城大輔, 片岡章俊, “実環境における多点制御法を用いた複数エリア再生,” 信学技報, Vol. 116, No. 475, pp. 339–344, 2017.
- [14] 安枝和哉, 片岡章俊, “多点制御法と音声の残差信号分解法を用いた音のエリア再生,” 信学技報, Vol. 112, No. 478, pp. 37–42, 2013.
- [15] 関貴志, 羽田陽一, “音場制御と聴覚マスキングの併用による円形スピーカアレイを用いたエリア再生法,” 日本音響学会誌, Vol. 73, No. 4, pp. 221–225, 2017.
- [16] 中川朗, 羽田陽一, 青木茂明, 牧野昭二, “全指向性を持つスピーカ・マイクロホン一体型通話装置の設計,” 音響学会誌, Vol. 57pp. 509–516, 2001.
- [17] E. Zwicker and E. Terhardt, “Analytical expressions for critical - band rate and critical bandwidth as a function of frequency,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 68, No. 5, pp. 1523–1525, 1980.
- [18] 関貴志, 羽田陽一, “48 ch 円形スピーカアレイによるエバネッセント波生成の検討,” 音講論集, pp. 775–776, 2014.
- [19] 日本建築学会, “はじめての音響数値シミュレーション プログラミングガイド,” コロナ社, 東京, 2012.
- [20] Kane Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell’s equations in isotropic media,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 14, No. 3, pp. 302–307, 1966.