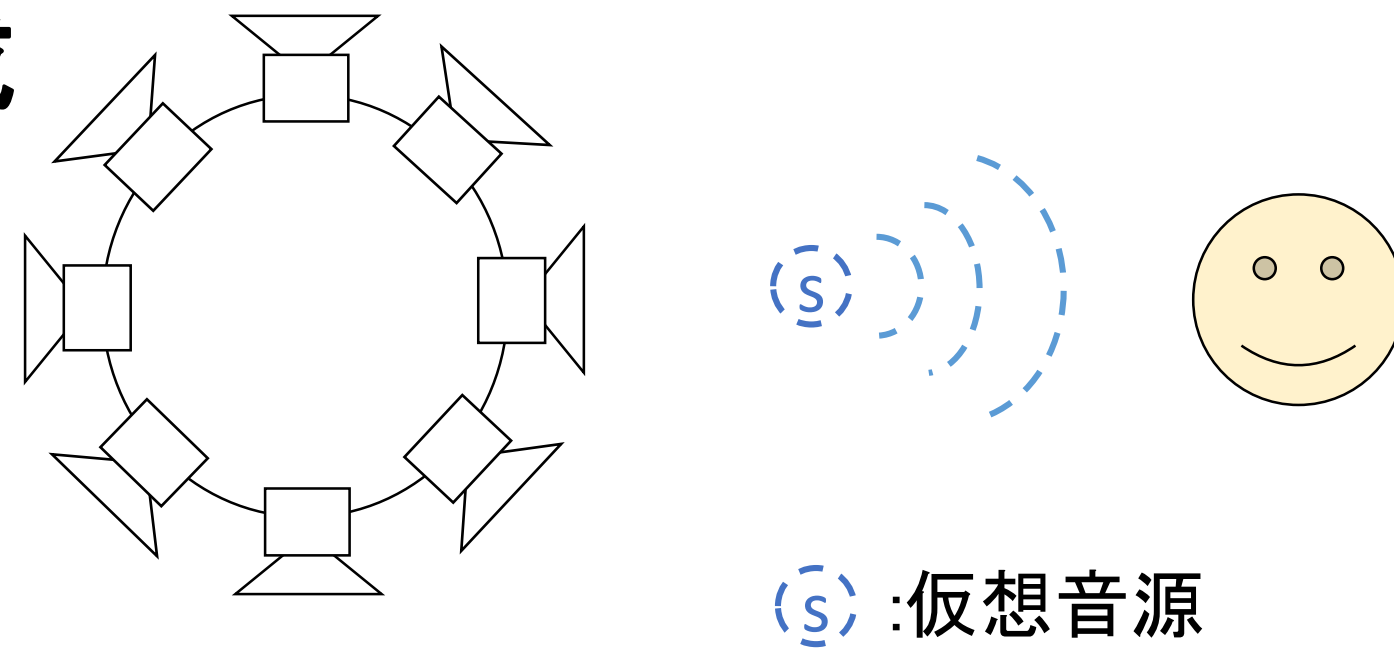


## 研究目的

円形スピーカアレイの外側に仮想音源生成

単一無指向性音源

放射性再生



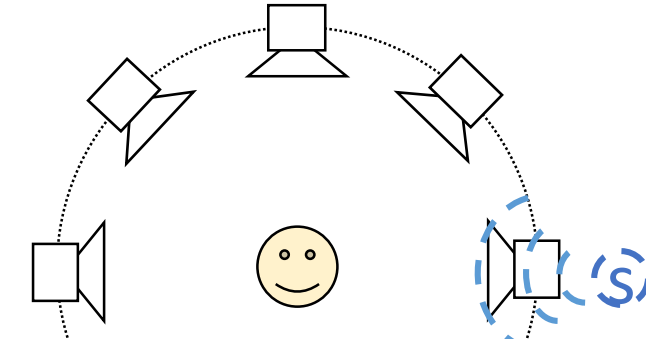
(S) :仮想音源

## 円形スピーカアレイを用いた臨場感再生の従来研究

円形スピーカアレイ内側に音場再現

時反転焦点音源, アンビソニックスなど

受聴者の位置は制限される

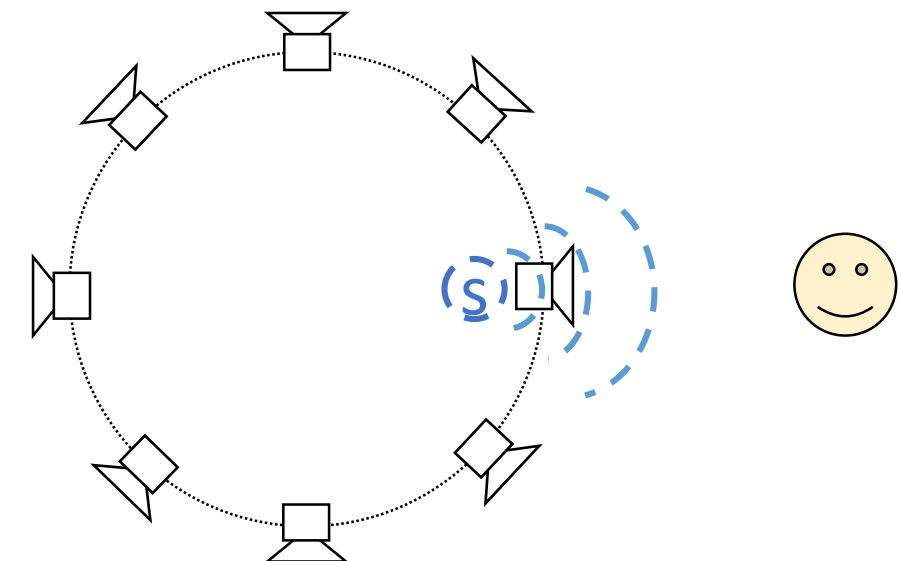


円形スピーカアレイ外側に音場再現

放射性音場再現

仮想音源はアレイ内部

仮想音源の位置が制限される



## 問題設定

音源を囲む円形マイクアレイで收音, 円形スピーカアレイで再生

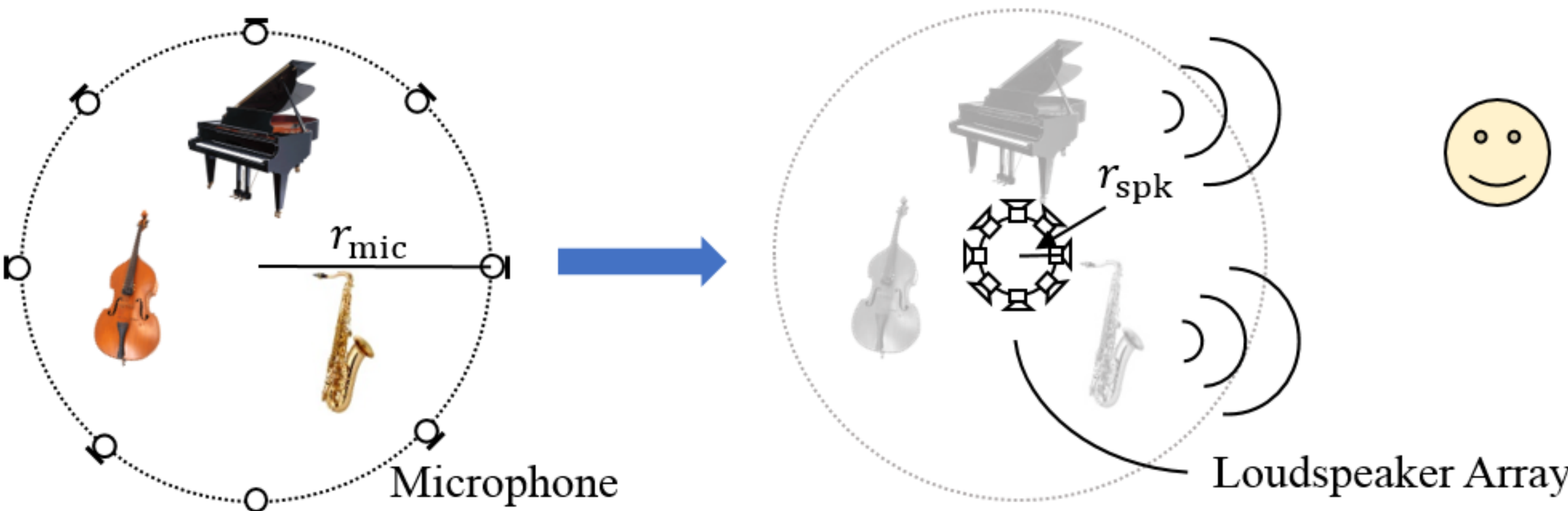
半径 $r_{mic} \gg r_{spk}$ , 中心 $O_{mic} = O_{spk}$ 

仮想音源をスピーカアレイの外側で再現

モードマッチングによる単一無指向性音源の音場を再現

Original Soundfield

Reproduced Soundfield



Microphone

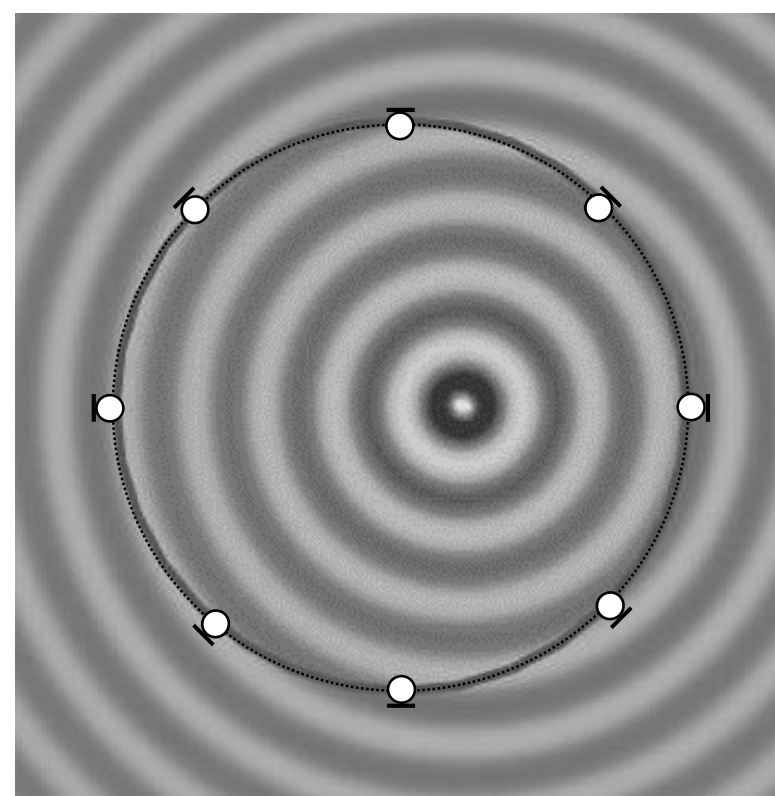
Loudspeaker Array

## 提案手法

## 円調和展開

円形マイクロホンアレイの観測音圧を展開

$$p(r_{mic}, \phi, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_n(r_{mic}, k) e^{jn\phi}$$

音圧 $p$ , マイクロホンアレイ半径 $r_{mic}$ , 制御点角度 $\phi$ , 周波数 $\omega$ , 次数 $n$ , 円調和展開係数 $P_n$ , 波数 $k$ 

## モードマッチングによるフィルタ設計

スピーカから再生した音を制御点で観測

$$p_{spk}(r_{mic}, \phi, \omega) = \int_0^{2\pi} G(r_{mic}, \phi, r_{spk}, \phi_l, \omega) w(r_{spk}, \phi_l, \omega) r_{spk} d\phi_l$$

再生音圧 $p_{spk}$ , スピーカアレイとマイクアレイ間の伝達関数 $G$ , フィルタ $w$ ,  
スピーカアレイ半径 $r_{spk}$ ,  $l$ 個目のスピーカ角度 $\phi_l$ 

両辺を円調和展開

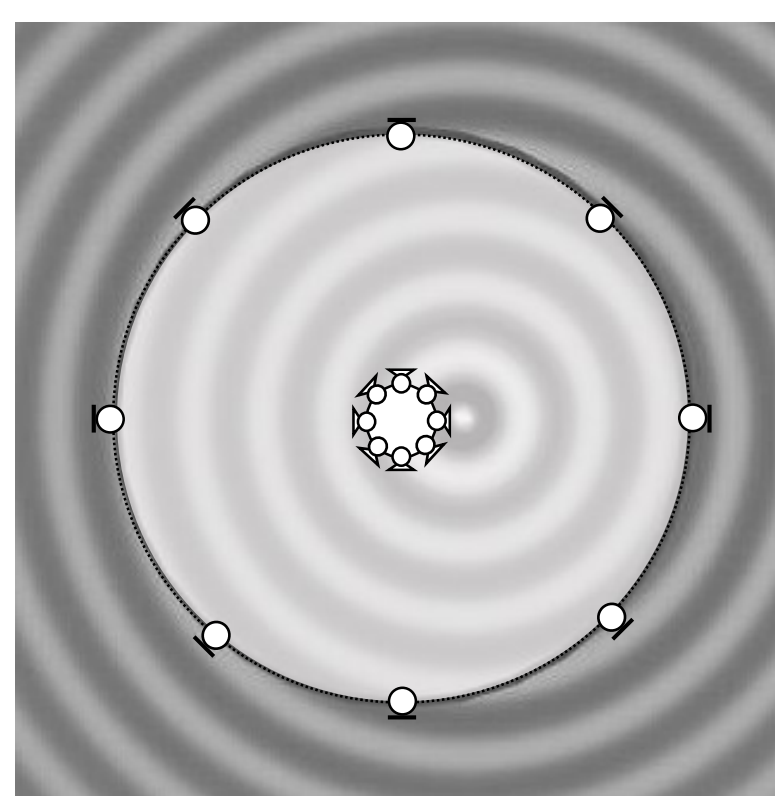
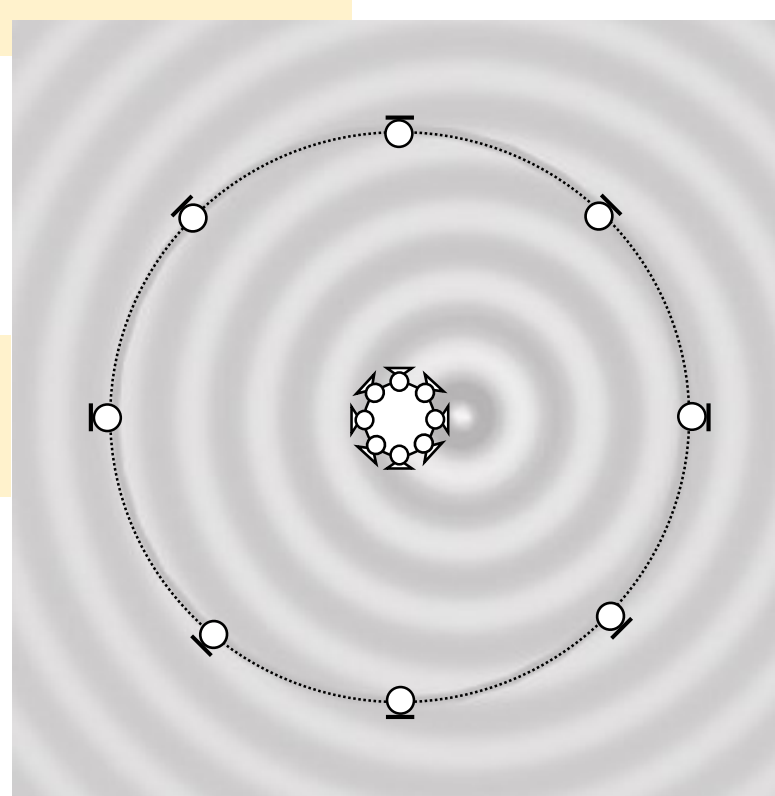
$$P_n^{spk}(r_{mic}, k) = 2\pi r_{spk} G_n(r_{mic}, r_{spk}, k) w_n(r_{spk}, k)$$

再生音場の円調和展開係数 $P_n^{spk}$ , フィルタの円調和展開係数 $w_n$ ,  
スピーカアレイとマイクアレイ間の伝達関数の円調和展開係数 $G_n(r_{mic}, r_{spk}, k)$ 再生音場の円調和展開係数 $P_n^{spk}$ を元音場の $P_n$ と一致させる

$$w_n(r_{spk}, k) = \frac{P_n(r_{mic}, k)}{2\pi r_{spk} G_n(r_{mic}, r_{spk}, k)}$$

逆空間フーリエ変換し, 周波数領域に戻す

$$w(r_{spk}, \phi_l, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} w_n(r_{spk}, k) e^{jn\phi_l}$$



## 波動場の外挿関係より外側音場が解析的に保証

音源が制御点の内側のとき

$$P_n(r, k) = \frac{H_n^{(2)}(kr)}{H_n^{(2)}(kr_{mic})} P_n(r_{mic}, k)$$

制御点の外側ある点から中心の距離 $r$ , ハンケル関数 $H_n^{(1)}$ 

外側の音圧は制御点音圧から決定される → 外側の音場が再現

## 次数制限の適用

フィルタゲイン(dB):  $A(\omega) = 10 \log_{10} |\mathbf{w}(\omega)|^2 / L$ 

フィルタゲインが大きい → 放射効率が悪い, スピーカ出力が歪む

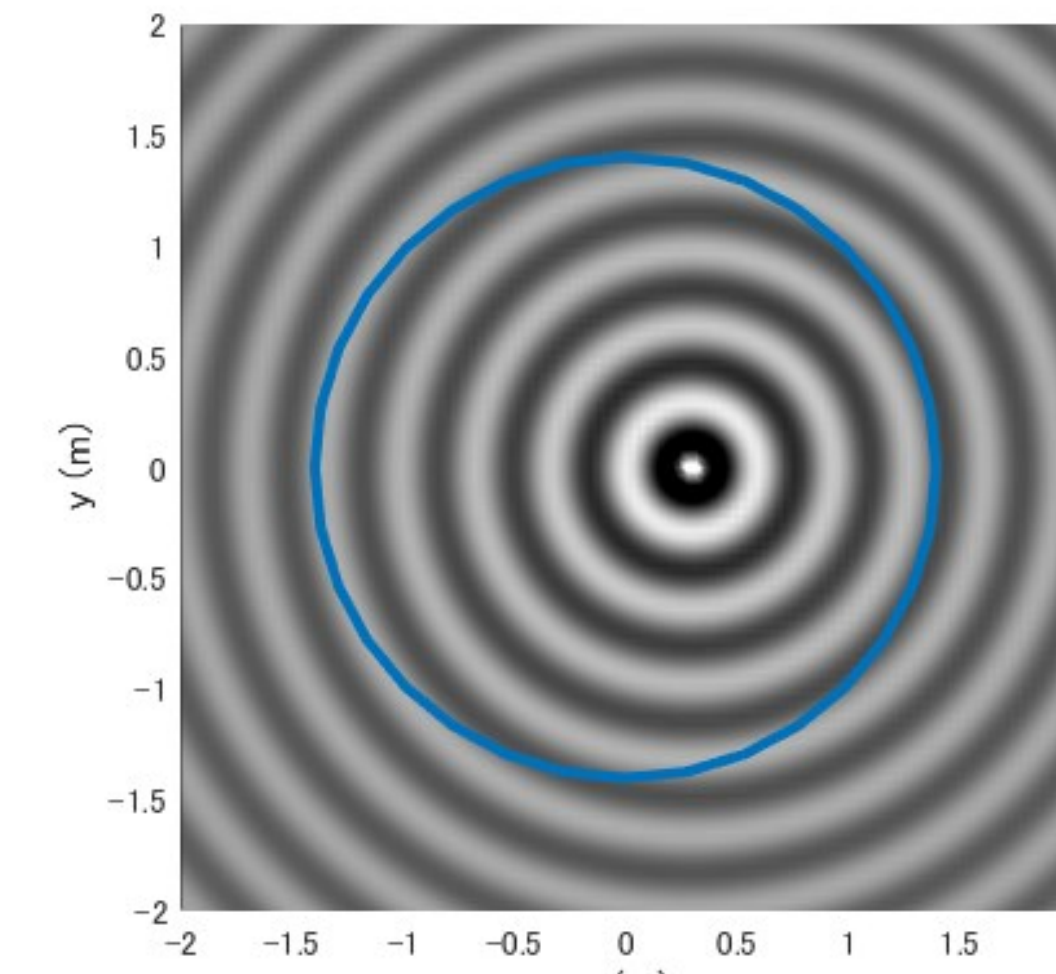
低周波数において, 高い次数 $n$ を使うとフィルタゲインが大きくなる制御点外側の音場を再現するため, 最大次数を制限する:  $N_{fs} = \lceil kr_{mic} \rceil$ 仮想音源の外側の音場を再現すれば良い:  $N_{fs'} = \lceil kr_s \rceil$ 音源から中心の距離 $r_s$ 

## シミュレーション

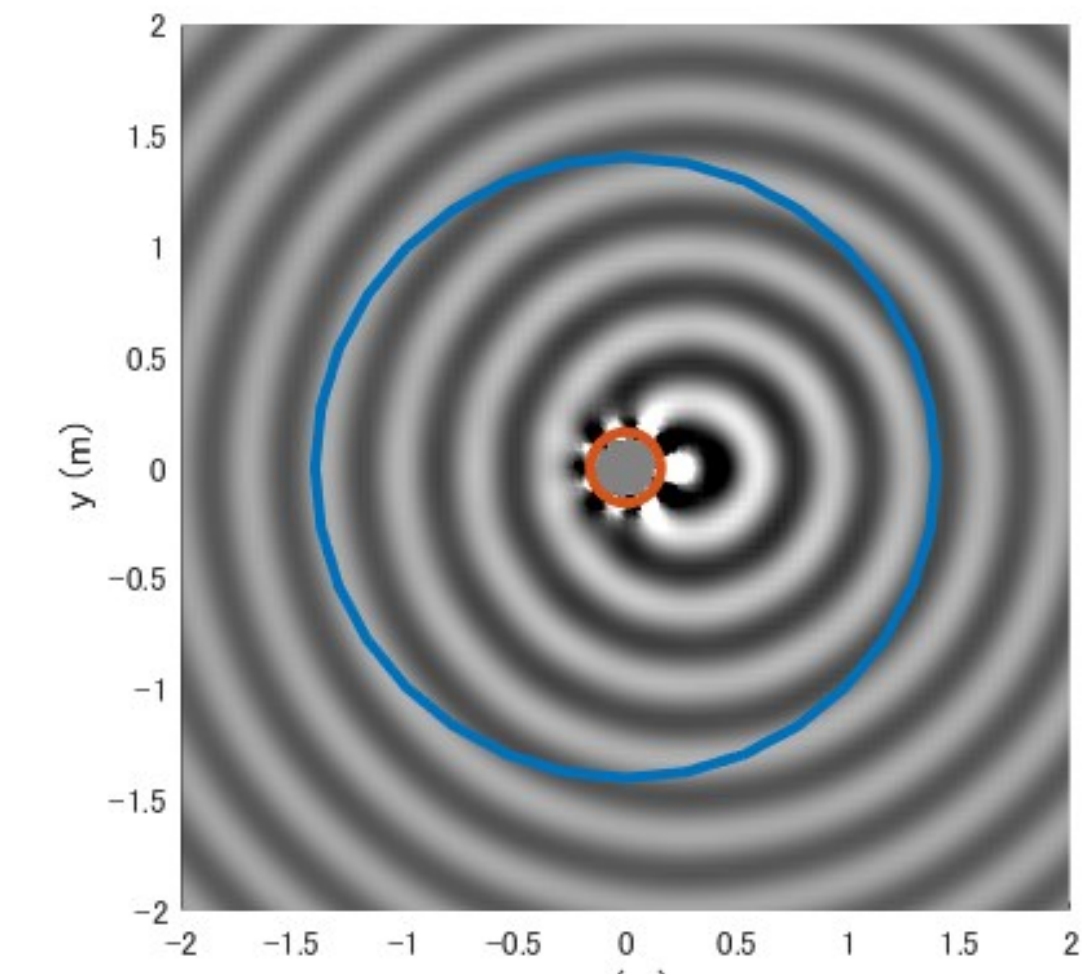
## 波面再現

単一周波数仮想音源生成

スピーカ数( $L$ )	16	周波数( $f_s$ )	1000 Hz	マイク数	24	最大次数( $N$ )	$\lceil \frac{L-1}{2} \rceil = 7$
スピーカ半径( $r_{spk}$ )	0.16 m	音源位置( $opt\_pos$ )	(0.3 m, 0 m)	マイク半径	1.4 m		



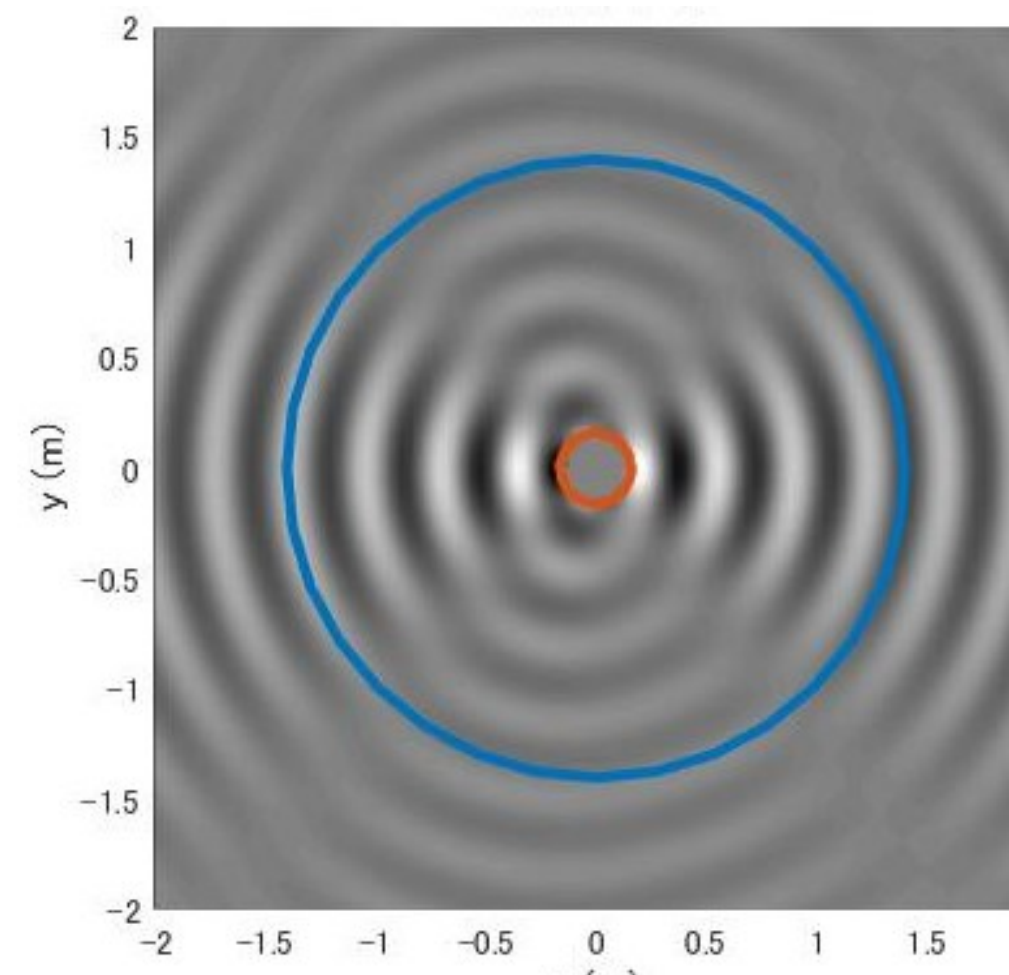
原音場



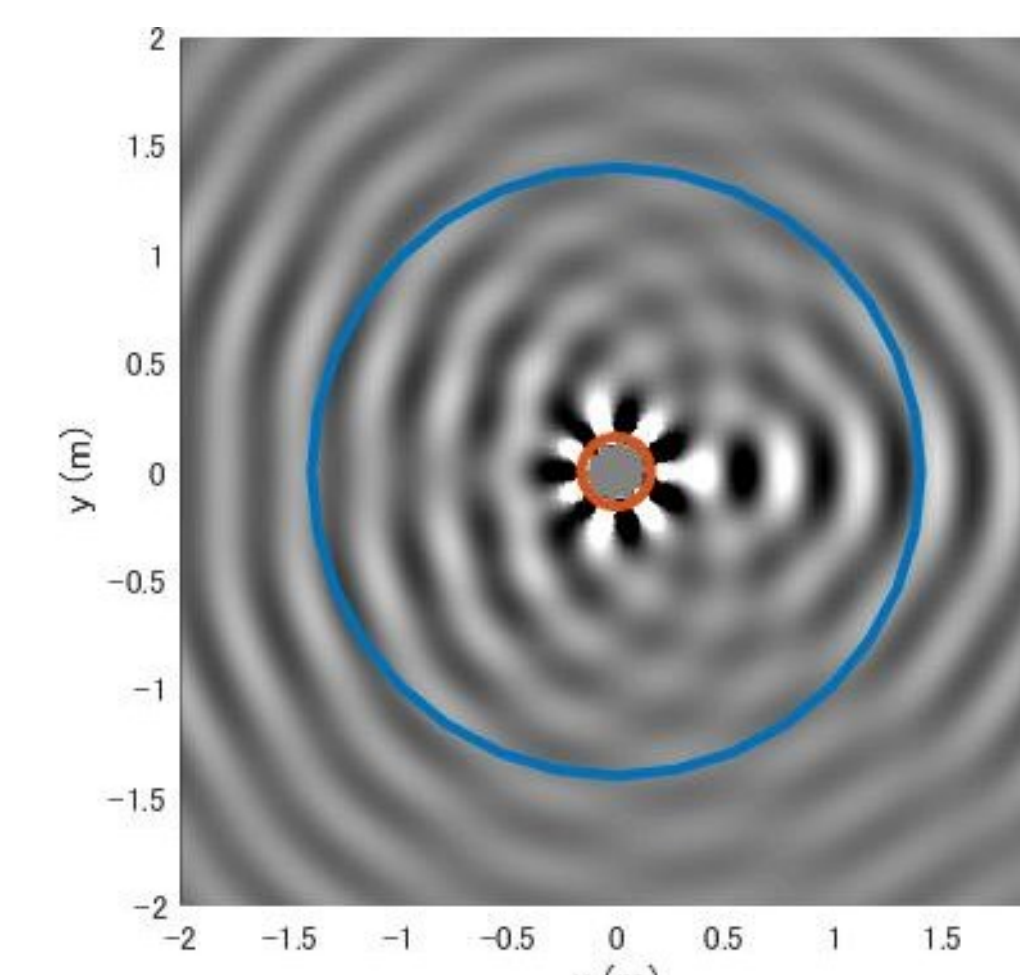
モードマッチングによる再現音場

原音場を再現できていることが分かった

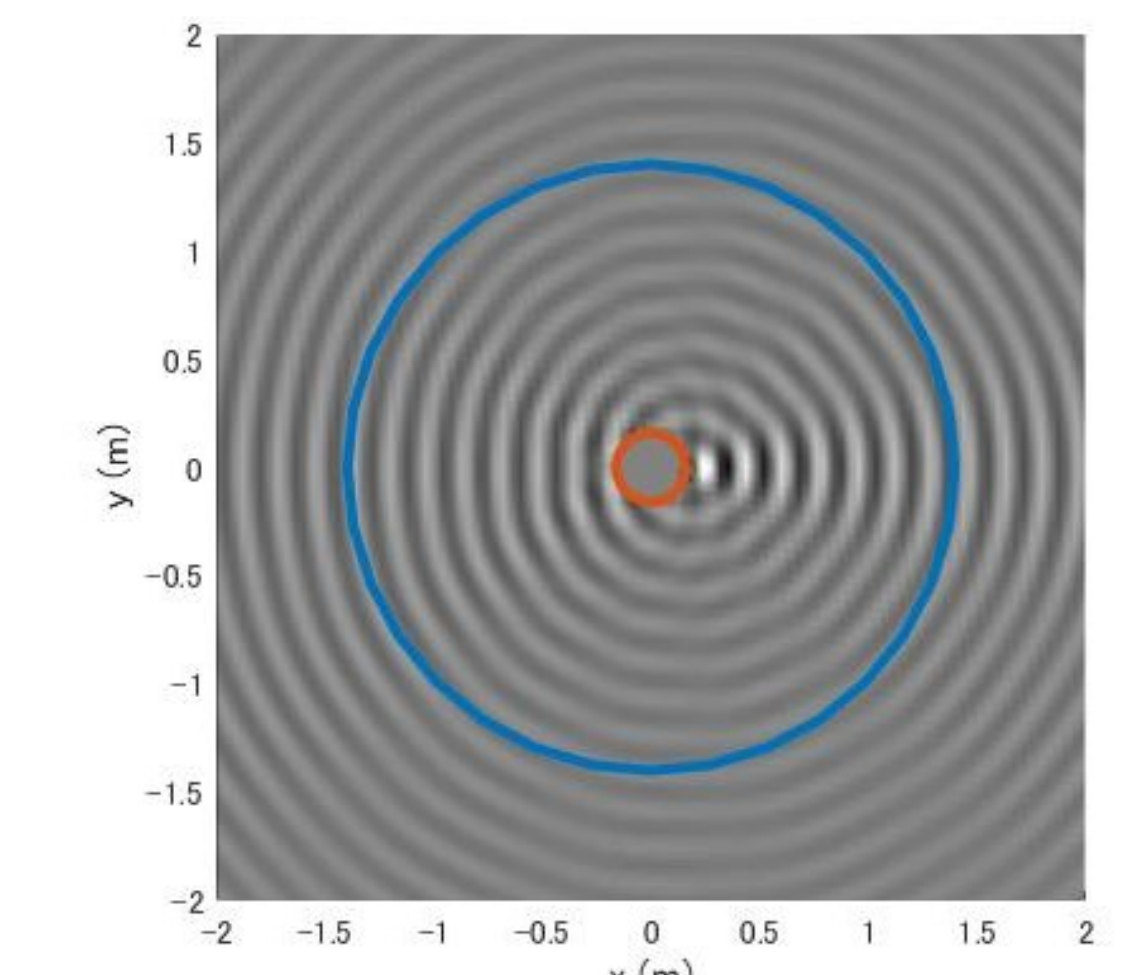
スピーカ数, 音源位置, 周波数の依存性



スピーカ数8個



音源位置(0.5 m, 0 m)

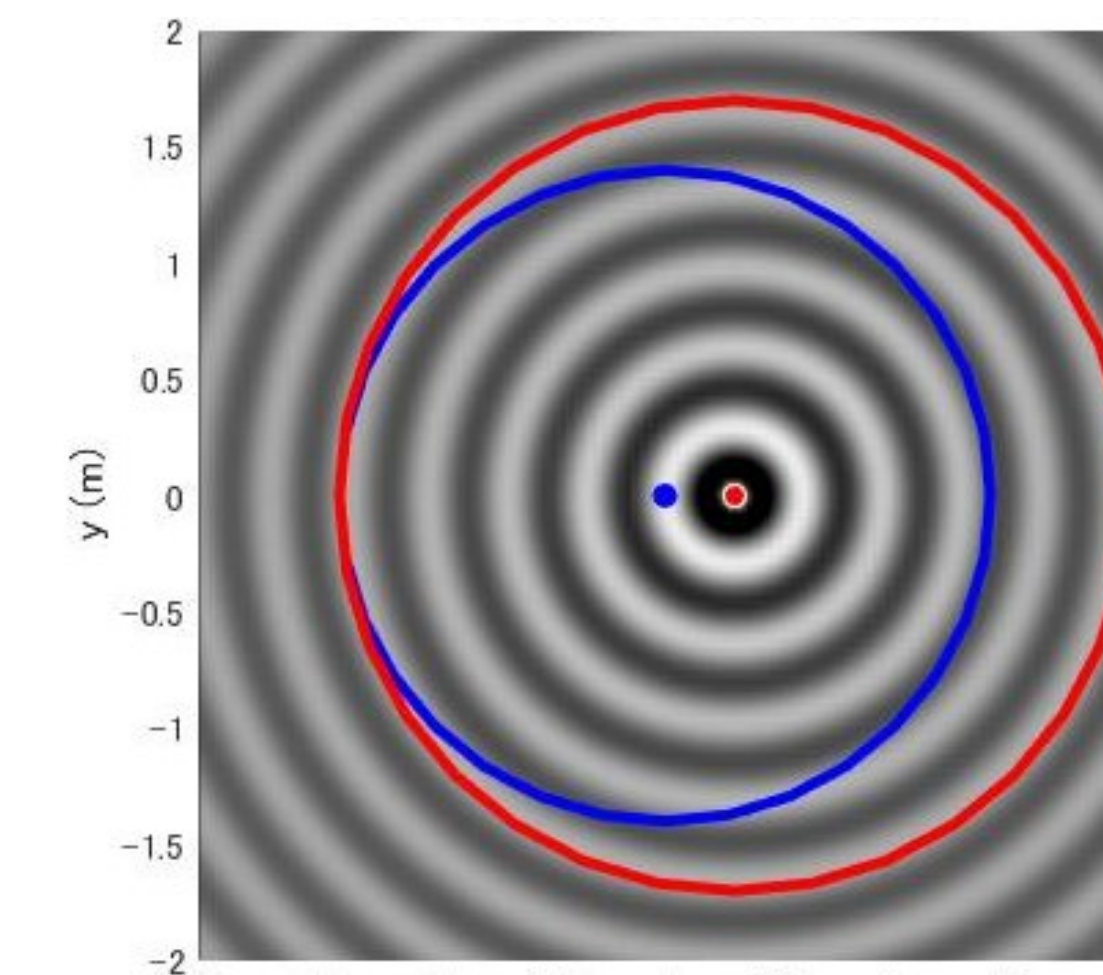


周波数2000 Hz

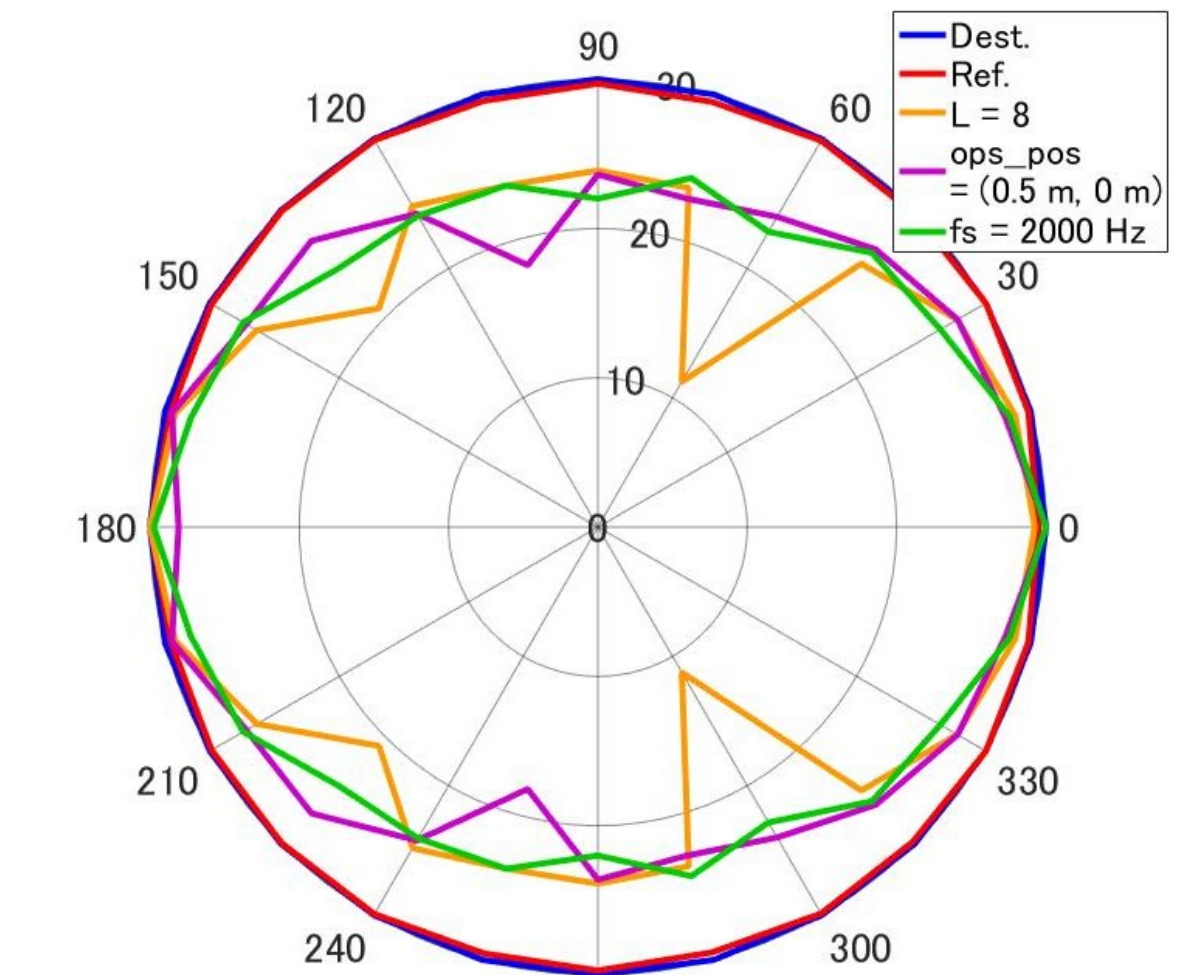
スピーカ数の減少, 音源とスピーカアレイの距離の増加, 周波数の増加  
によって音源位置の誤差及び波面の崩れが発生する

## 指向特性

仮想音源を中心にした円上の指向特性を確認(左図赤線)



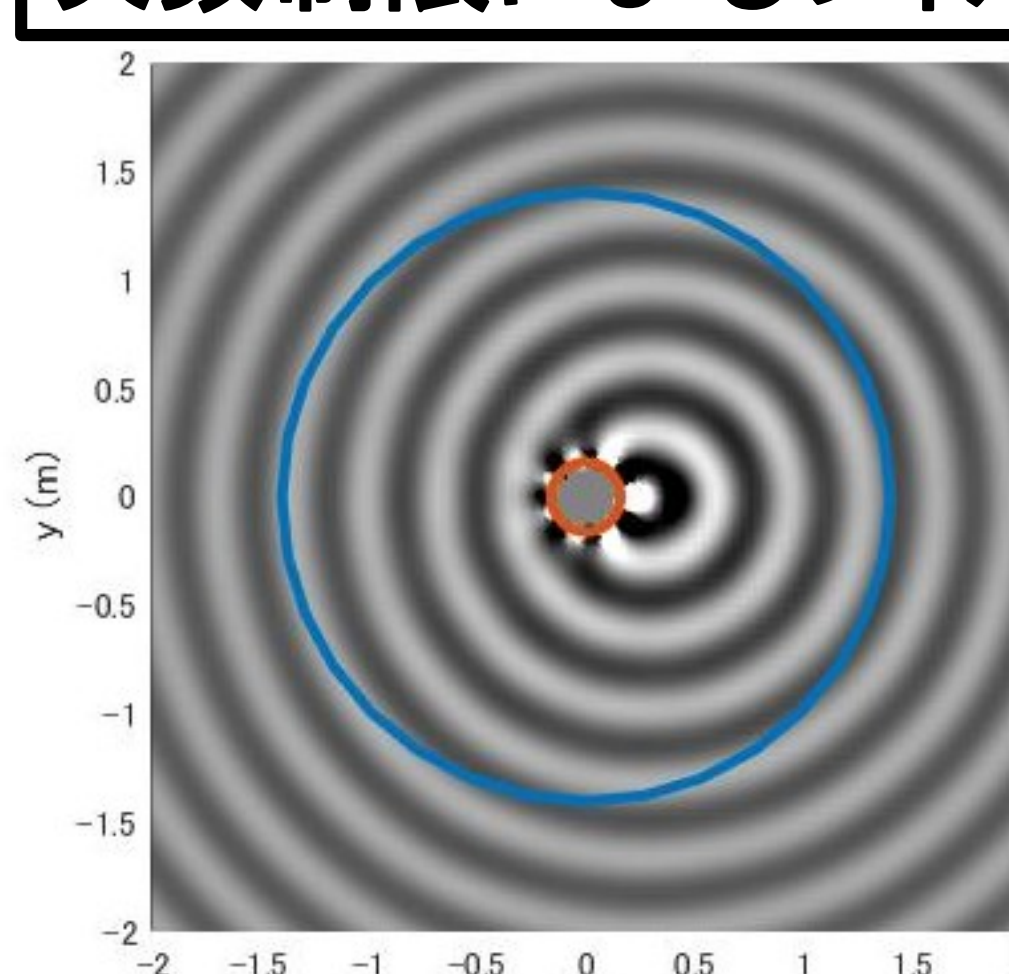
原音場



シミュレーション条件による指向特性

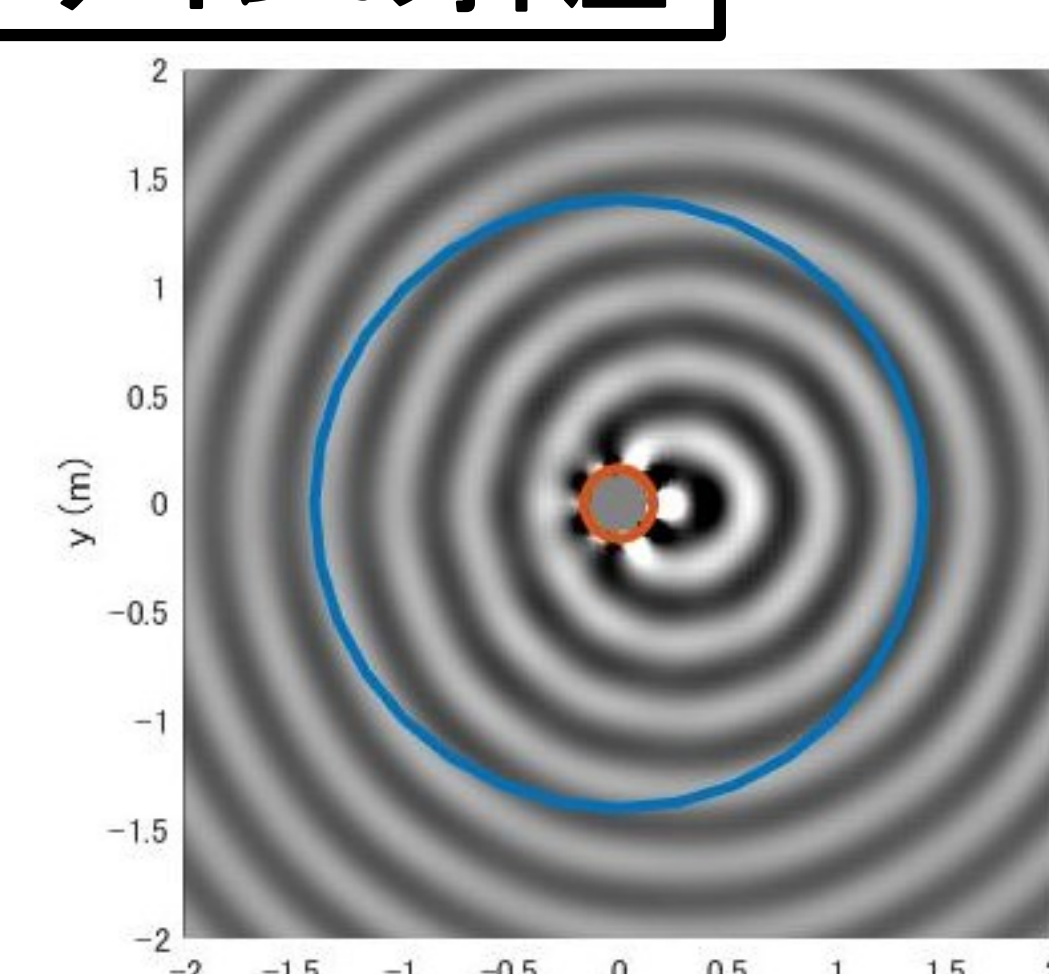
各条件による音場再現の精度は指向特性で表れる

## 次数制限によるフィルタゲインの抑圧



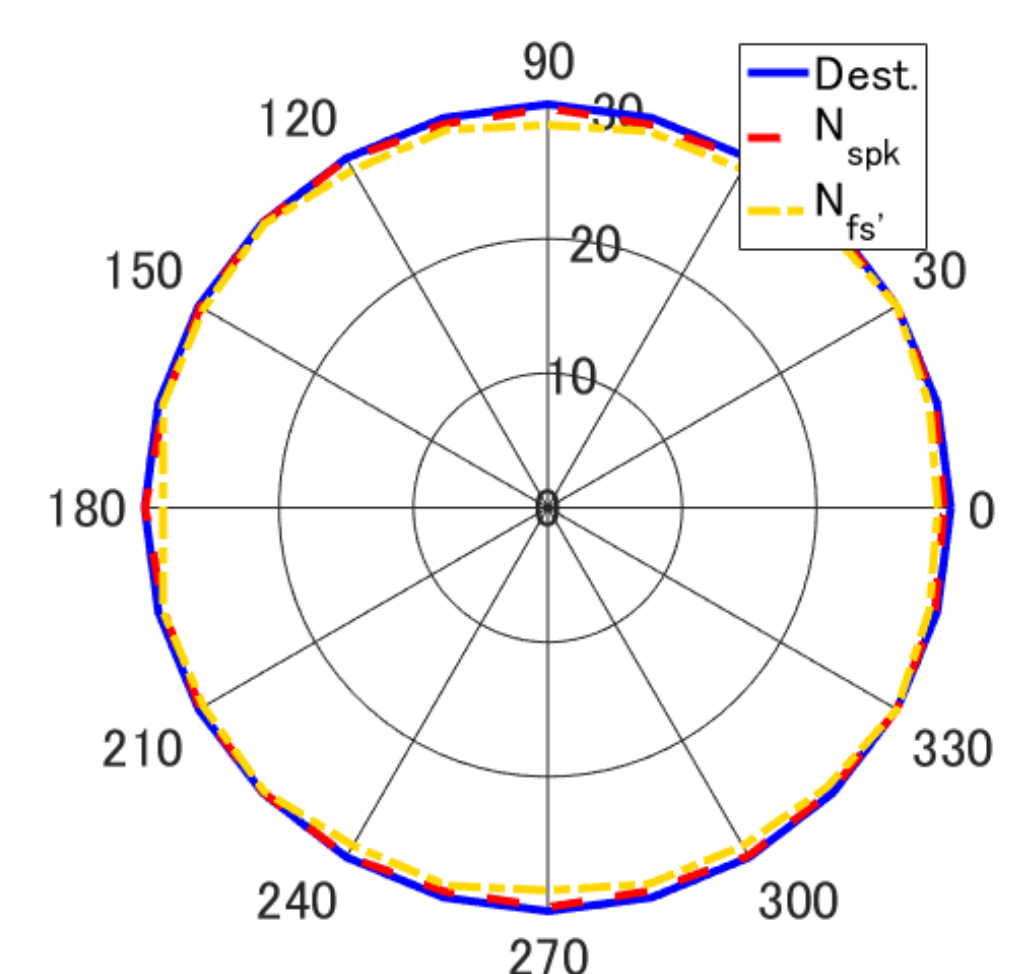
$$N_{spk} = \left\lceil \frac{L-1}{2} \right\rceil = 7$$

$$A_{N_{spk}} \approx 6.13$$



$$N_{fs'} = \lceil kr_s \rceil = 6$$

$$A_{N_{fs'}} \approx -1.20$$



次数制限による指向特性

次数制限手法による音場の再現及びフィルタゲインの抑圧が確認できた

## 受聴実験

無指向性音源の様な

指向性が聞こえる

音源位置は目標位置

よりスピーカアレイ寄り



実機16ch円形アレイ

スピーカ数	16	周波数	500 Hz - 3000 Hz
スピーカ半径	0.16 m	音源位置	(0.3 m, 0 m)
音源	白色雑音	最大次数( $N$ )	$N = \lceil kr_s \rceil$

## まとめ

モードマッチングにより, スピーカの数が必要な場合, 円形アレイの外側に  
仮想音源を作れることが分かった。次数をうまく調整することで, ある程度再生音場を保ったままフィルタゲイン  
を抑圧することができた。

今後の予定: 收音からの再生, 円形から円柱スピーカアレイへの検討