

円筒関数の加法定理を用いた 2次元外側局所音場再現法

☆任 逸, 羽田 陽一

電気通信大学大学院 情報理工学研究科

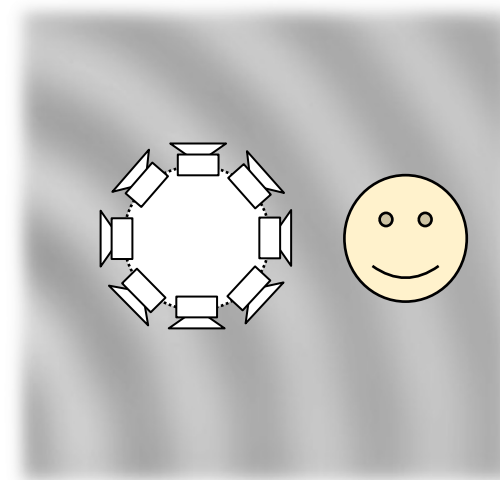
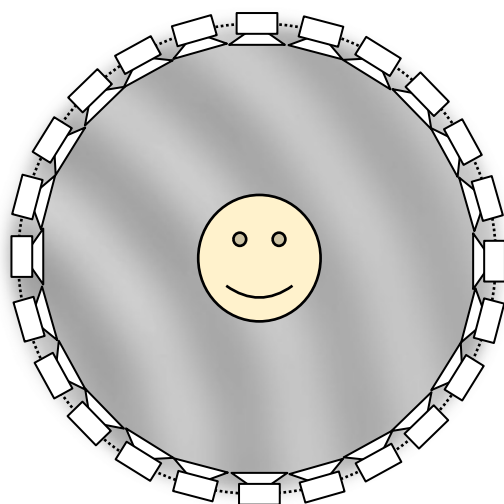
情報学専攻 羽田研究室

博士後期課程3年

研究背景

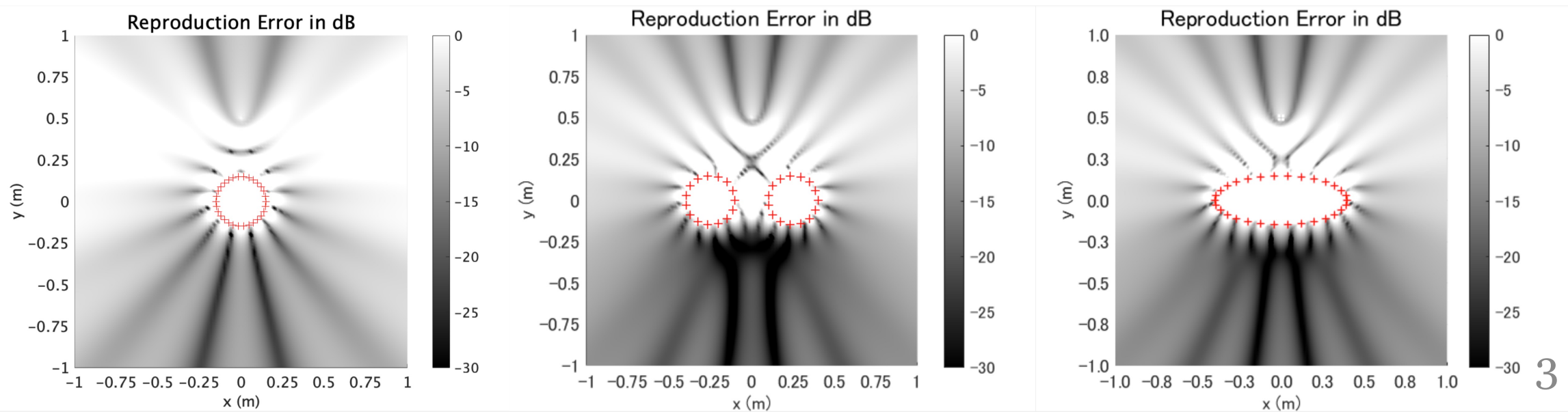
音場再現

- ・高臨場感再生技術・立体音響技術
- ・閉じている境界面で空間を2つに分割(Kirchhoff-Helmholtz積分方程式)
- ・内側か外側のみが制御可能



外側音場再現

- コンパクトなスピーカアレイを用いることが多い
 - 再現性能は内側音場再現より低い
- アプリケーション: 焦点音源再現, 楽器放射特性再現など
- 私たちは焦点音源再現において, 円形・2円・楕円アレイを提案してきた (任+, 2019; 2020)
 - 一定の性能を確保できたが, 音像の提示にはまだ不十分



コンセプト

外側全体の制御が困難



音場の一部の制御なら高い性能を得られる？



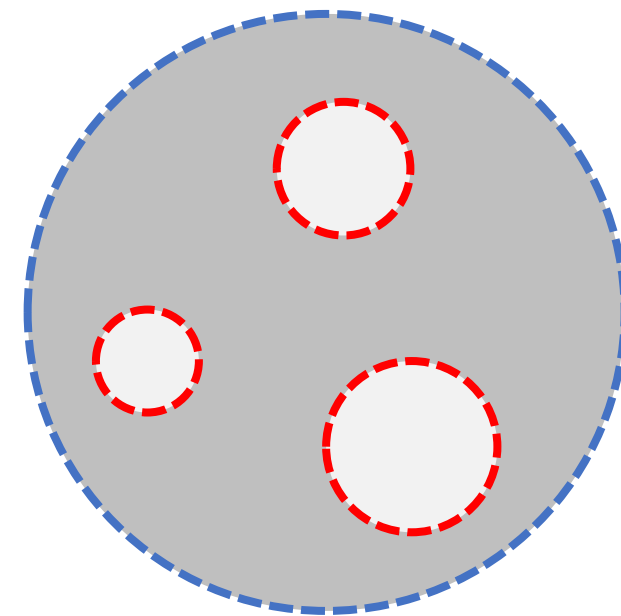
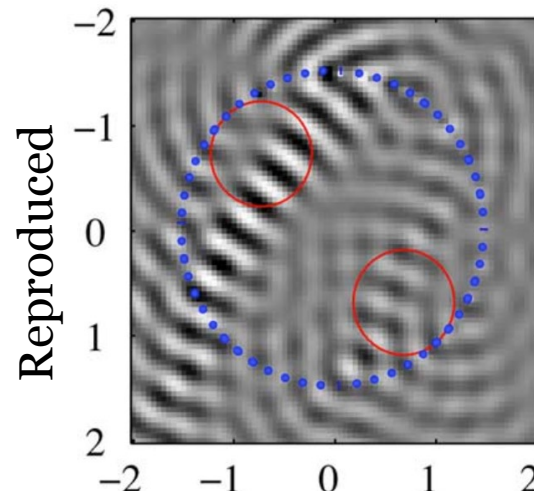
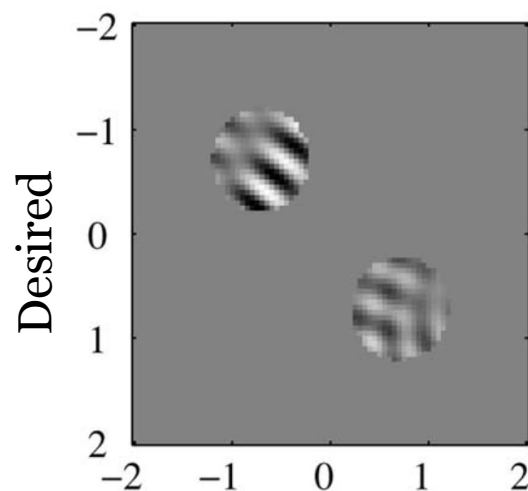
外側の空間を分割して、いくつかローカルエリア
の制御を行う

マルチゾーン再生

内側音場再現の場合

- ・従来手法: 青境界線**内部**全体
- ・マルチゾーン: 赤ローカルエリア**内部**
- ・手法: 多点制御; 円調和展開に基づく波数領域手法 (Grafの加法定理を用いる)

(Wu+, 2010)



局所音場における再現性能の向上は可能

従来技術との差分

- ・マルチゾーン再現の外側音場再現バージョン
- ・円調和展開に基づく波数領域処理

・従来: 内部音場→内部音場

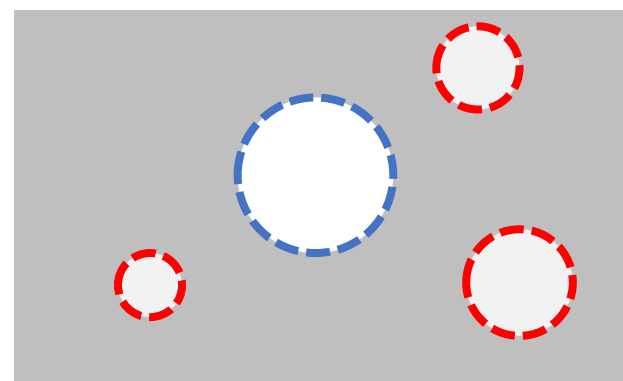
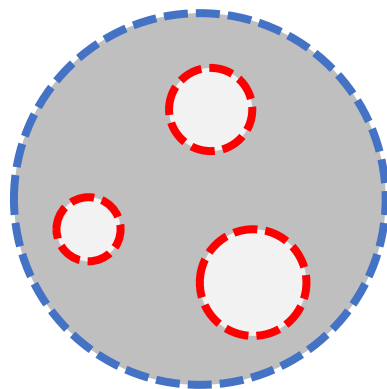
(Bessel → Bessel)

Bessel: 到来する音

・提案: 外部音場→内部音場

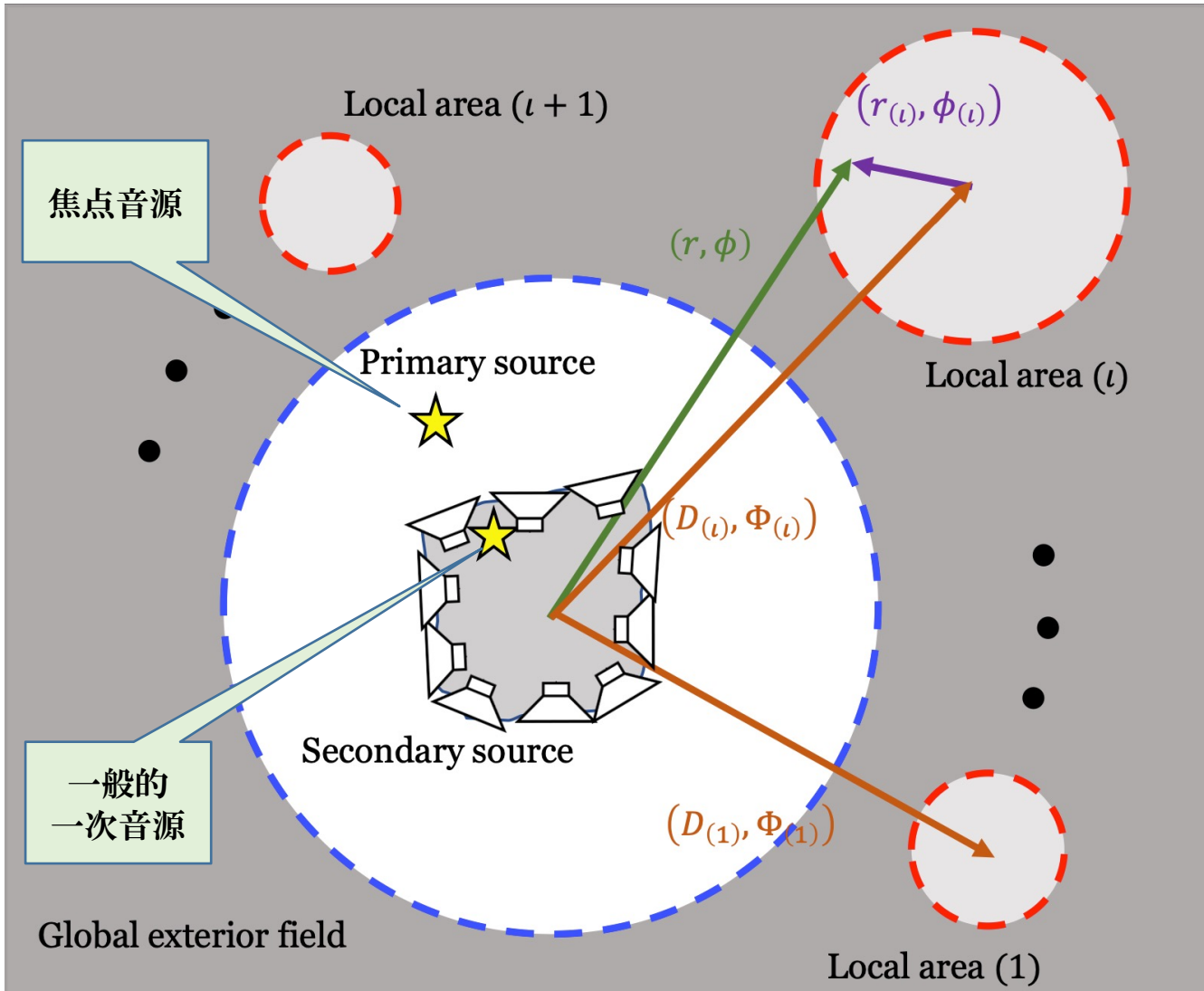
(Hankel → Bessel)

Hankel: 放射する音



- ・制御の条件について検討
- ・理論値と実測データを用いたシミュレーション(焦点音源再現)

問題設定



- 1次音源, 2次音源とも青境界線の**内部**にある
 ➤ 境界線**外部**の空間は制御可能
- (従来手法の) 制御対象は境界線**外部**全体の空間
- 赤円形領域を設置, その**内部**の局所音場を(提案手法の) 制御対象とする

円調和展開に基づく外側音場再現法

- 1次音場 (再現とする音場)

$$p(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \alpha_{\nu} H_{\nu}^{(2)}(kr) e^{j\nu\phi},$$

- 2次音場 (再現音場)

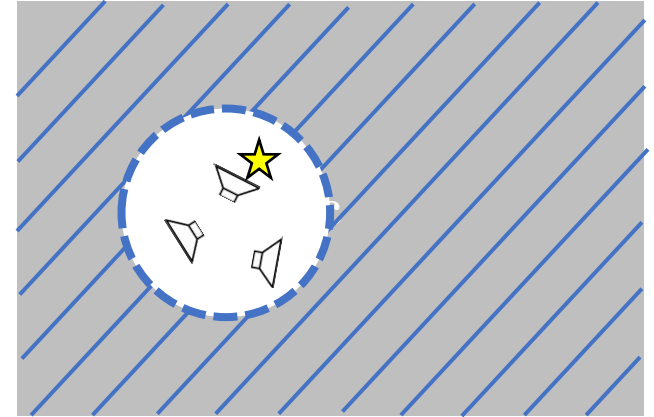
$$\hat{p}(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{l=1}^L G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_l, \omega) d_l$$

$$\hat{p}(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} \xi_{\mu}(\mathbf{d}) H_{\mu}^{(2)}(kr) e^{j\mu\phi},$$

- 展開基底の直交性を利用し、解を導出

$$\xi_{\nu}(\mathbf{d}) = \alpha_{\nu}$$

*円形スピーカアレイの場合,
 $\xi_{\nu}(\mathbf{d})$ から簡単に $\mathbf{d}$ を導出できる



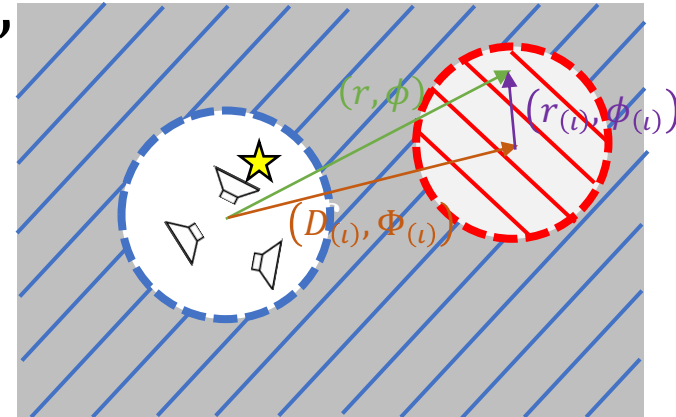
局所音場再現

- (l番目) 局所1次音場

$$p(\mathbf{r}_{(l)}) = \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \alpha_{\nu,(l)} J_{\nu}(kr_{(l)}) e^{j\nu\phi_{(l)}},$$

- 2次音場はHankel関数の展開式

$$\hat{p}(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} \xi_{\mu}(\mathbf{d}) H_{\mu}^{(2)}(kr) e^{j\mu\phi}$$



- HankelをBesselへ変形する必要がある
- Grafの加法定理

$$H_{\mu}^{(2)}(kr) e^{j\mu\phi} = \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \underbrace{H_{\mu-\nu}^{(2)}(kD_{(l)}) e^{j(\mu-\nu)\Phi_{(l)}}}_{T_{\nu,\mu,(l)}} J_{\nu}(kr_{(l)}) e^{j\nu\phi_{(l)}}$$

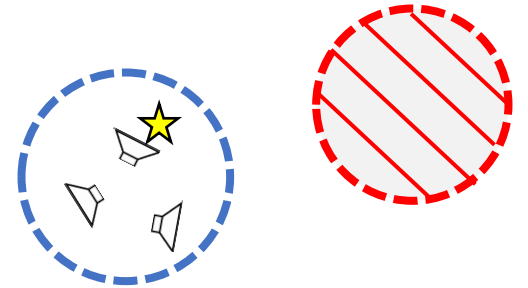
局所音場再現

・2次局所音場

$$\hat{p}(\mathbf{r}) = \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} T_{\nu,\mu,(l)} \xi_{\mu}(\mathbf{d}) J_{\nu}(kr_{(l)}) e^{j\nu\phi_{(l)}}$$

・同じく直交性を利用すると

$$\alpha_{\nu,(l)} = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} T_{\nu,\mu,(l)} \xi_{\mu}(\mathbf{d})$$



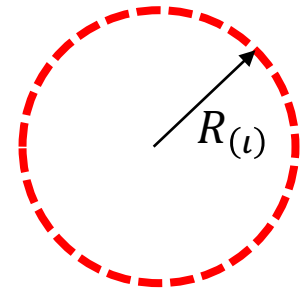
が導出できる。

最後は全ての局所音場を同時制御するように、最小二乗法を用いると解が求められる。

提案手法における制限

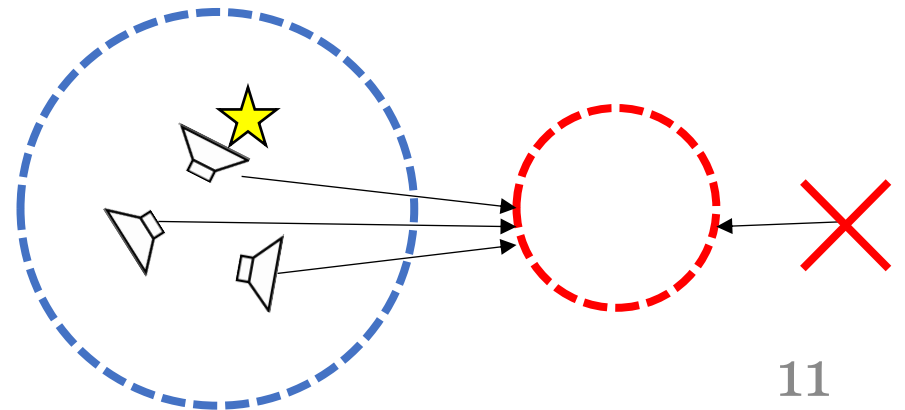
・局所音場の大きさ

- ・打ち切り次数によって決まる
- ・次数と最大半径 $R_{(l)}$ の関係: $N_{(l)} \geq \left\lceil \frac{ekR_{(l)}}{2} \right\rceil$ (Kennedy+, 2007)
- ・次数とスピーカ数の関係: $\sum_l N_{(l)} \leq M \leq \left\lfloor \frac{L-1}{2} \right\rfloor$ (制御の自由度)



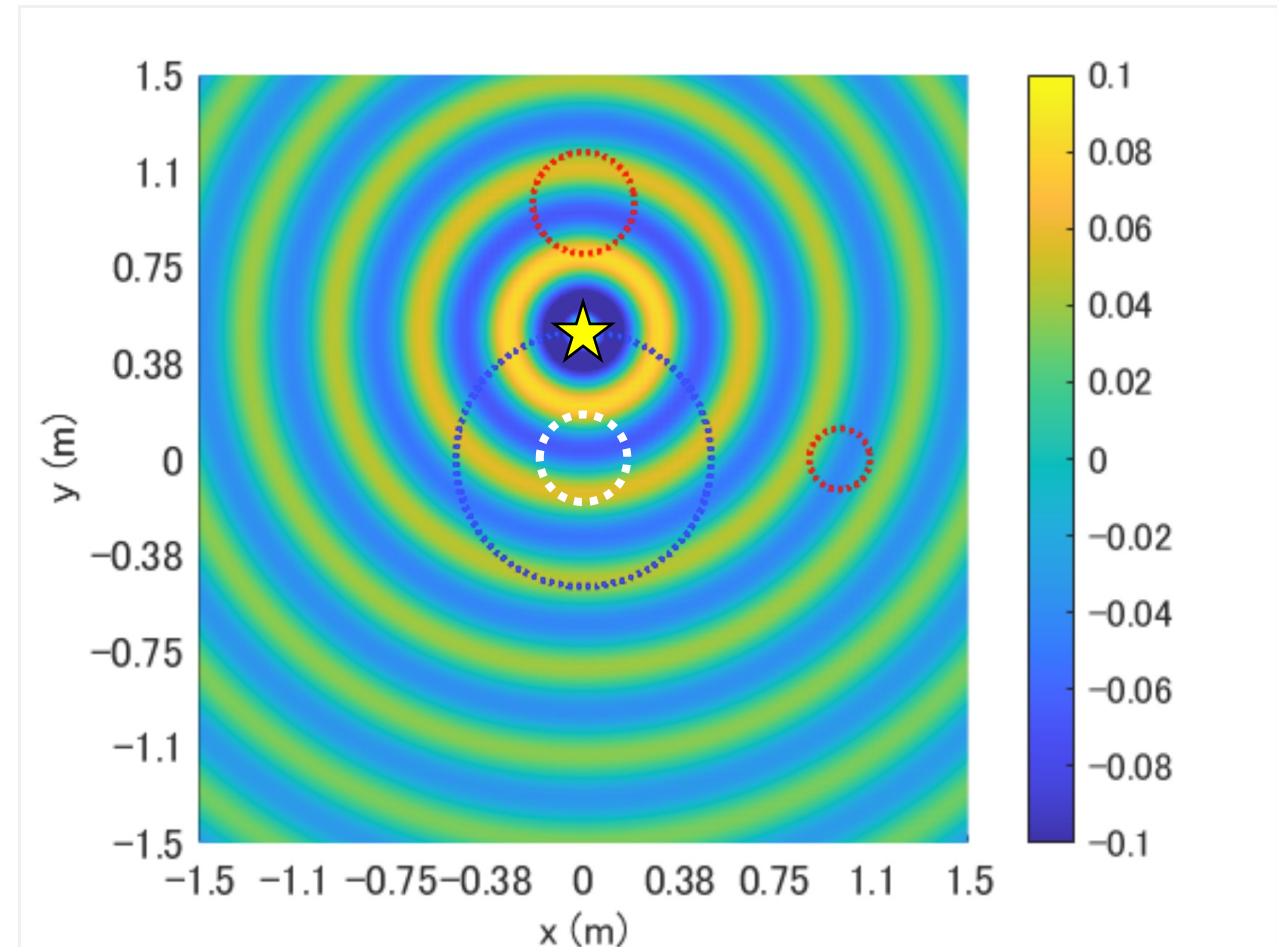
・1次音場の制限

- ・ローカルエリアから見ると, 1次音源も2次音源も外部にある
- ・2次音源はローカルエリアを囲んでない
 - 2次音源の逆方向からの成分では再現不可



理論値シミュレーション

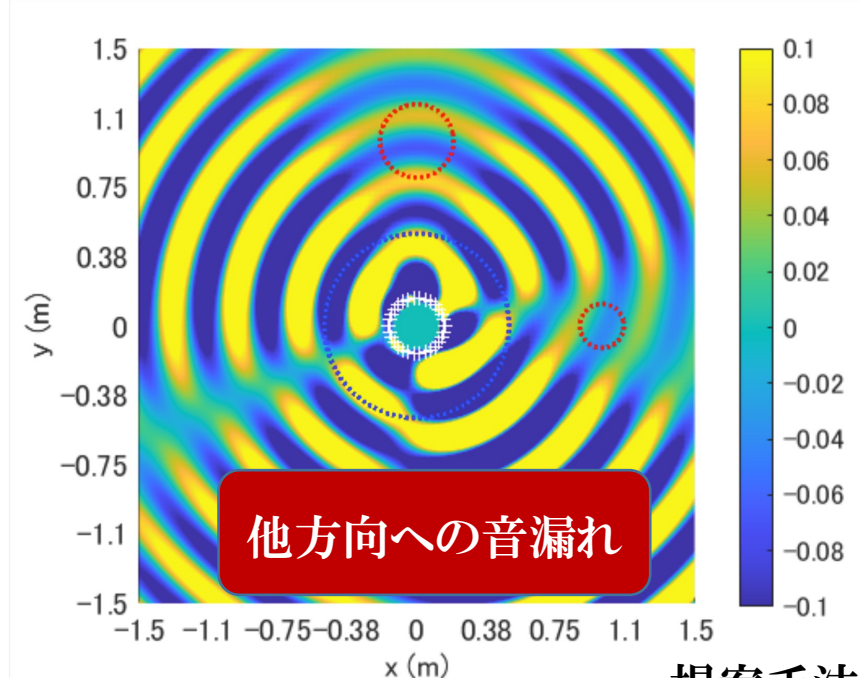
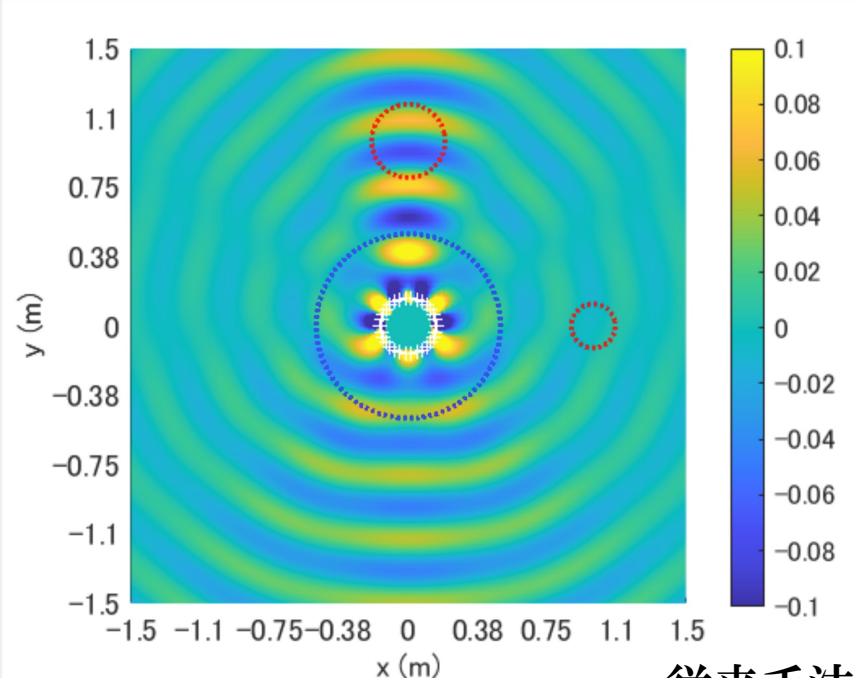
- 焦点音源再現の例
- 1次音源
 - 1000 Hz単一周波数円筒波音源
 - 座標 $(0.5 \text{ m}, \frac{\pi}{2})$
- 2次音源(白点線)
 - 剛体円形スピーカアレイ
 - 半径0.15 m, スピーカ数30
- 駆動関数の打切り次数 $M = 14$
- ローカルエリア: 2ヶ所
 - 中心座標 $(1 \text{ m}, 0)$, $(1 \text{ m}, \pi/2)$
 - 打切り次数 $N_{(1)} = 3$, $N_{(2)} = 5$
 - 制御半径約16 cm, 27 cm



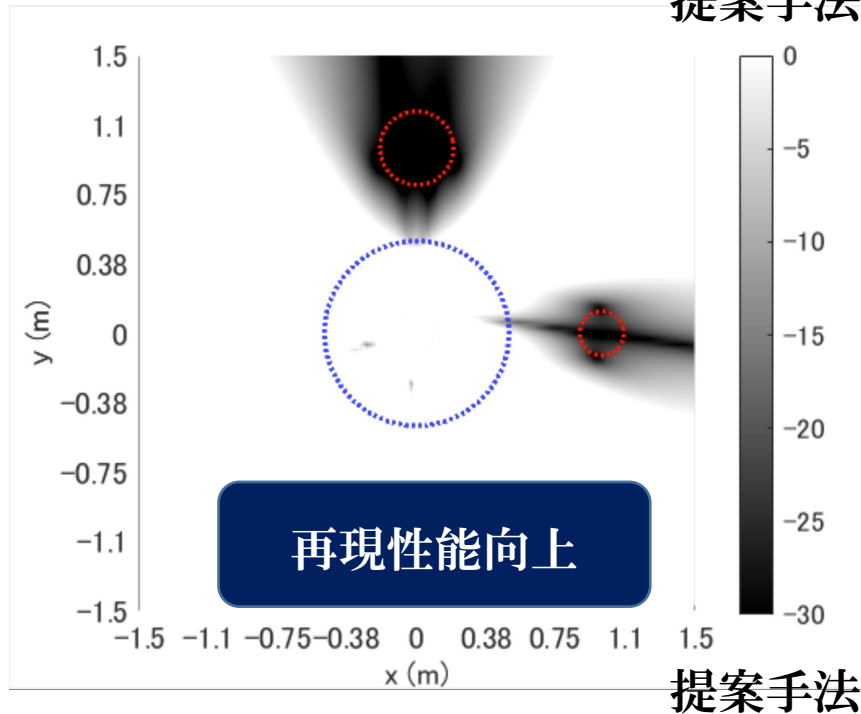
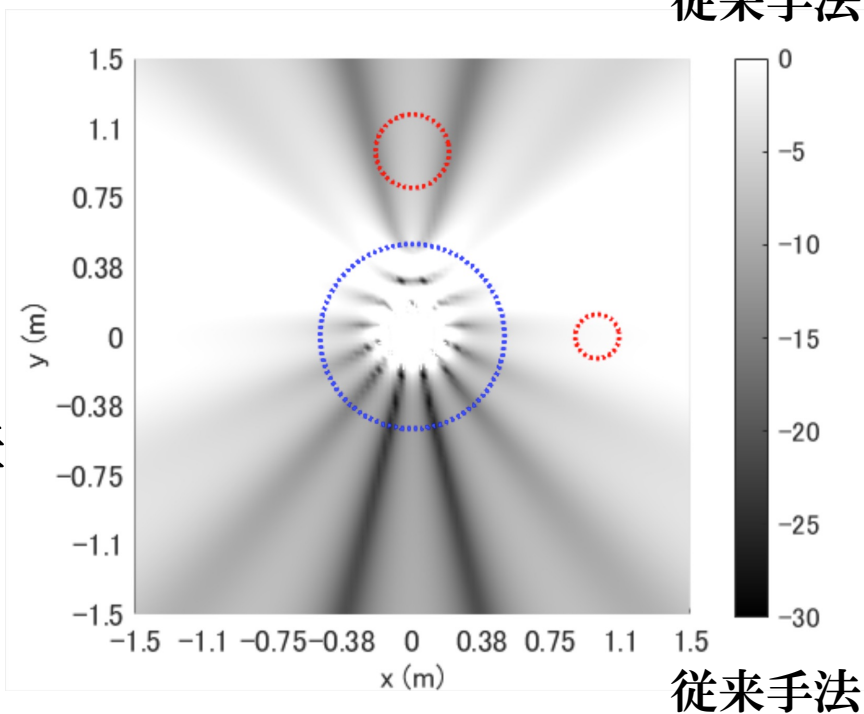
制御領域: 従来手法 青点線外部
提案手法 赤点線内部

・結果

音場



再現誤差



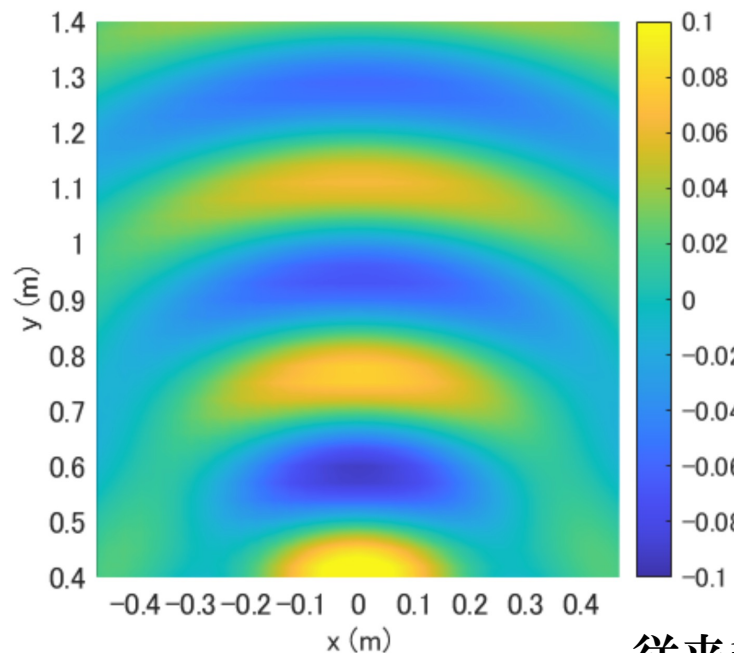
実測値シミュレーション

- 1次音源: 同上
- 2次音源
 - 剛円(筒)スピーカアレイ
 - 半径0.15 m, スピーカ数15
 - 高さ 0.572 m
- ローカルエリア: 座標(1 m, $\pi/2$)の1ヶ所
- 音場測定(任+, 2021)
 - スピーカ素子と同一水平面
 - $0.94 \times 0.1 \text{ m}^2$ の音場
 - 座標範囲 $x \in [-0.47 \text{ m}, 0.47 \text{ m}]$, $y \in [0.4 \text{ m}, 1.4 \text{ m}]$
 - 0.02 m 間隔のグリッド状でインパルス応答を測定

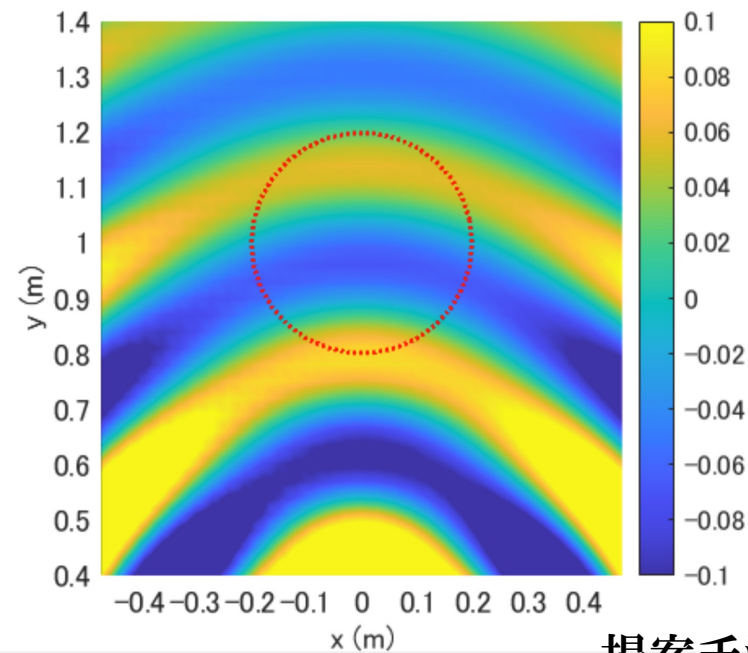


• 結果

理論値

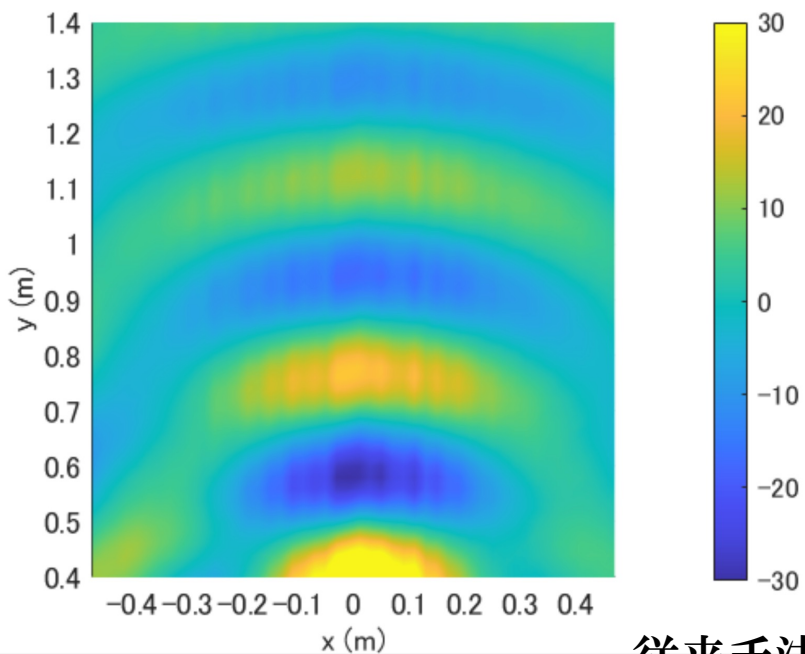


従来手法

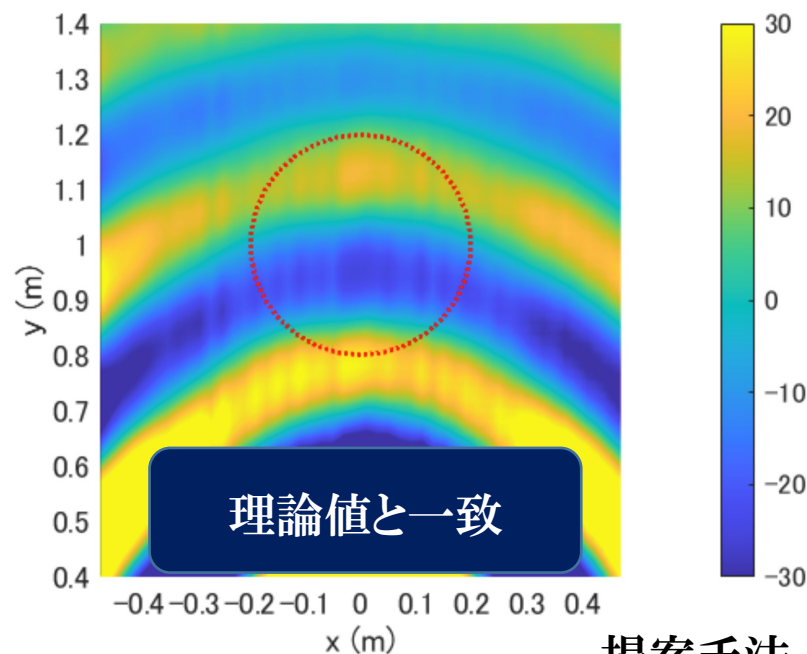


提案手法

実測値



従来手法



提案手法

まとめ

- 本研究では、円調和展開に基づく2次元外側局所音場再現法を提案した。
- 円筒関数の加法定理を用い、対象とする制御領域の外部音場を局所的内部音場に変形し、ローカルエリアにおける再現精度の向上に成功した。
- 3次元減衰や残響環境を考慮した手法の提案は今後検討する予定である。

ご清聴ありがとうございました

補足: 円形アレイの場合

$$G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_l, \omega) = \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} b_{\nu} e^{-j\nu\phi_l} H_{\nu}^{(2)}(kr) e^{j\nu\phi}$$

駆動関数も展開できる(円周上にあるため)

$$d_l = \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \tilde{d}_{\nu} e^{j\nu\phi_l}$$

$$b_{\nu} = \begin{cases} -\frac{j}{4} J_{\nu}(ka), & \text{中空アレイ} \\ -\frac{1}{2\pi ka H_{\nu}^{(2)'}(ka)}, & \text{剛アレイ} \end{cases}$$

整理すると, 2次音場は

$$\hat{p}(\mathbf{r}, \omega) = \sum_{\mu=-\infty}^{\infty} L b_{\nu} \tilde{d}_{\nu} H_{\mu}^{(2)}(kr) e^{j\mu\phi}$$

$$\xi_{\mu}(\mathbf{d}) = L b_{\nu} \tilde{d}_{\nu}$$