

# Kirchhoff-Helmholtz積分方程式の逆問題と 順伝搬に基づく音場推定

---

Estimation of sound field based on inversion of Kirchhoff-Helmholtz  
integral equation and forward wave propagation

岡本 拓磨, 榎本 成悟, 西村 竜一

情報通信研究機構

# Introduction

## ■ 超臨場感次世代インタラクティブコミュニケーションの実現

■ ユニバーサルコミュニケーション研究所：多感覚・評価研究室



## ■ 3次元音空間インタラクティブコミュニケーション

■ あたかも**そこに自分**がいるかのような音空間通信 → 音場再現

✳ サラウンド指向音空間再現：臨場感重視

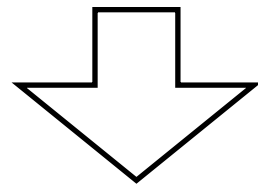
■ あたかも**ここにその人(物)**がいるかのような… → 物体の放射指向特性再現

✳ オブジェクト指向型音空間再現：実在感重視

# Motivation

## ■ 音の放射指向特性の重要性

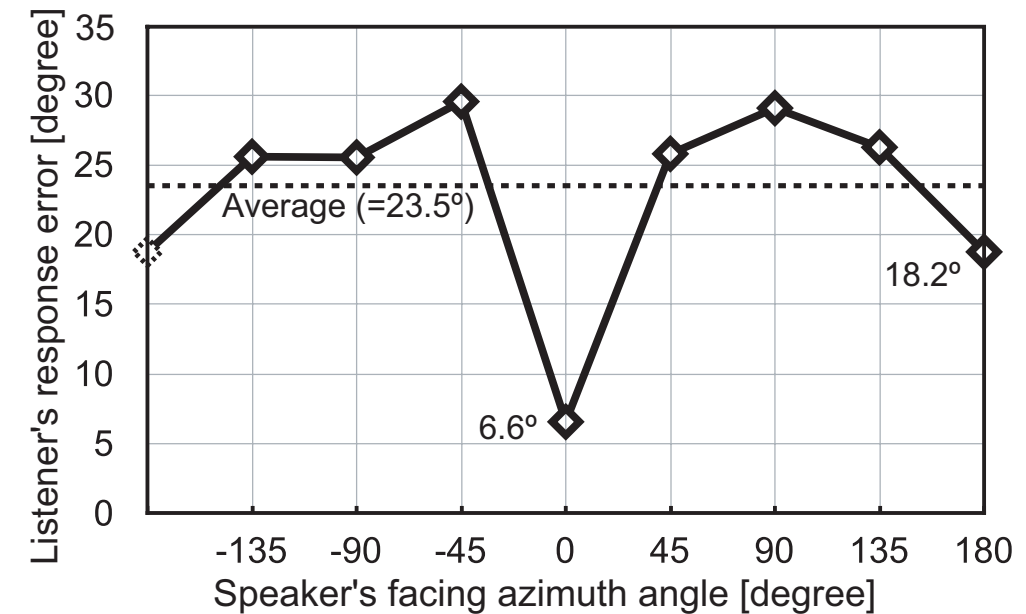
- 人間は音だけで話者や楽器の向きがわかる
  - ✱ 音声の場合, 特に正面方向の感度は極めて高い



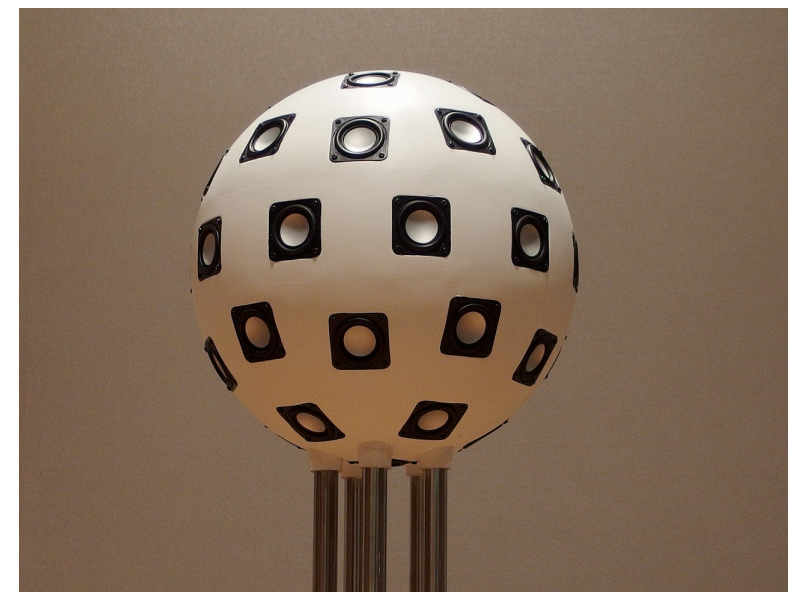
次世代テレビ会議など超臨場感インタラクティブ  
コミュニケーションには放射指向特性の伝送は必須

## ■ 音の放射指向特性伝送に向けて

- 音の放射指向特性を精度よく再現(提示)する技術
  - ✱ 球形スピーカアレイに基づく方法



H. Kato *et al.* *Proc. ICA2010*

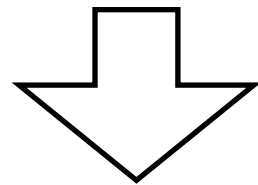


# Motivation

## ■ 音の放射指向特性の重要性

■ 人間は音だけで話者や楽器の向きがわかる

✱ 音声の場合, 特に正面方向の感度は極めて高い



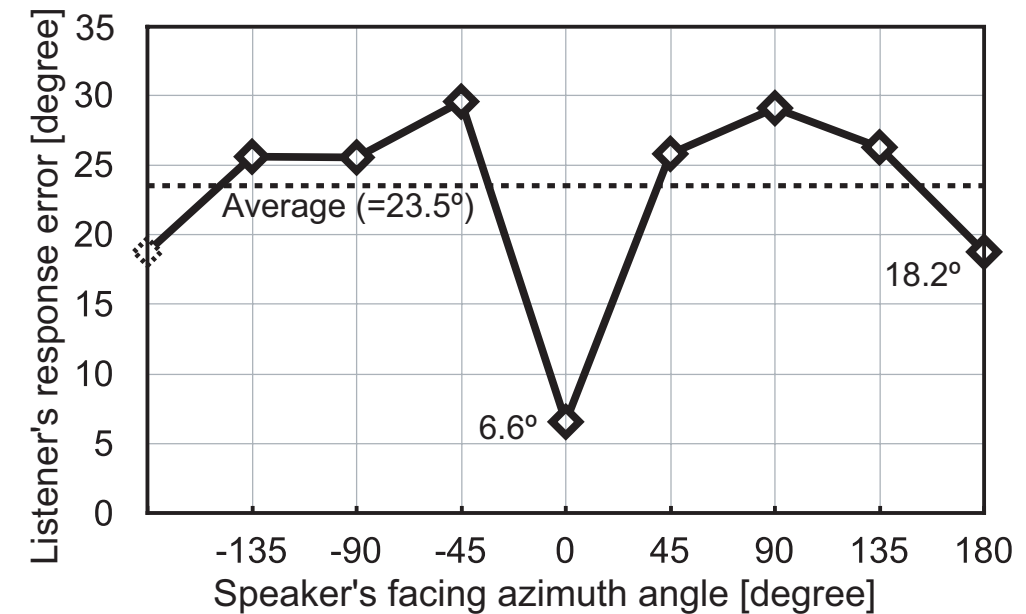
次世代テレビ会議など超臨場感インタラクティブ  
コミュニケーションには放射指向特性の伝送は必須

## ■ 音の放射指向特性伝送に向けて

■ 音の放射指向特性を精度よく再現(提示)する技術

✱ 直線スピーカアレイに基づく方法

→ 200インチ裸眼立体ディスプレイ音響  
(2013年4月うめきた登場予定)



H. Kato *et al.* *Proc. ICA2010*

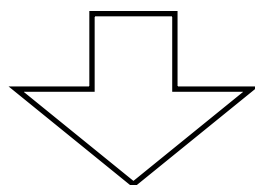




# Motivation

## ■ 音の放射指向特性の重要性

- 人間は音だけで話者や楽器の向きがわかる
  - ✱ 音声の場合, 特に正面方向の感度は極めて高い

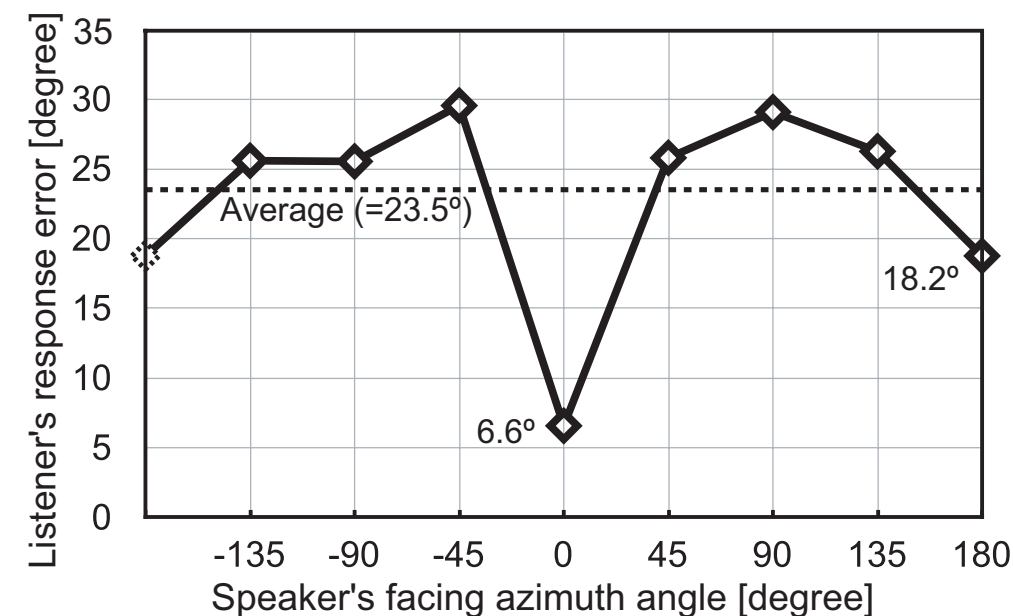


次世代テレビ会議など超臨場感インタラクティブコミュニケーションには放射指向特性の伝送は必須

## ■ 音の放射指向特性伝送に向けて

- 音の放射指向特性を精度よく再現(提示)する技術
  - ✱ 球形スピーカアレイに基づく方法
  - ✱ 直線スピーカアレイに基づく方法
    - 200インチ裸眼立体ディスプレイ音響  
(2013年4月うめきた登場予定)

- 音の放射指向特性を精度よく抽出(推定)する技術



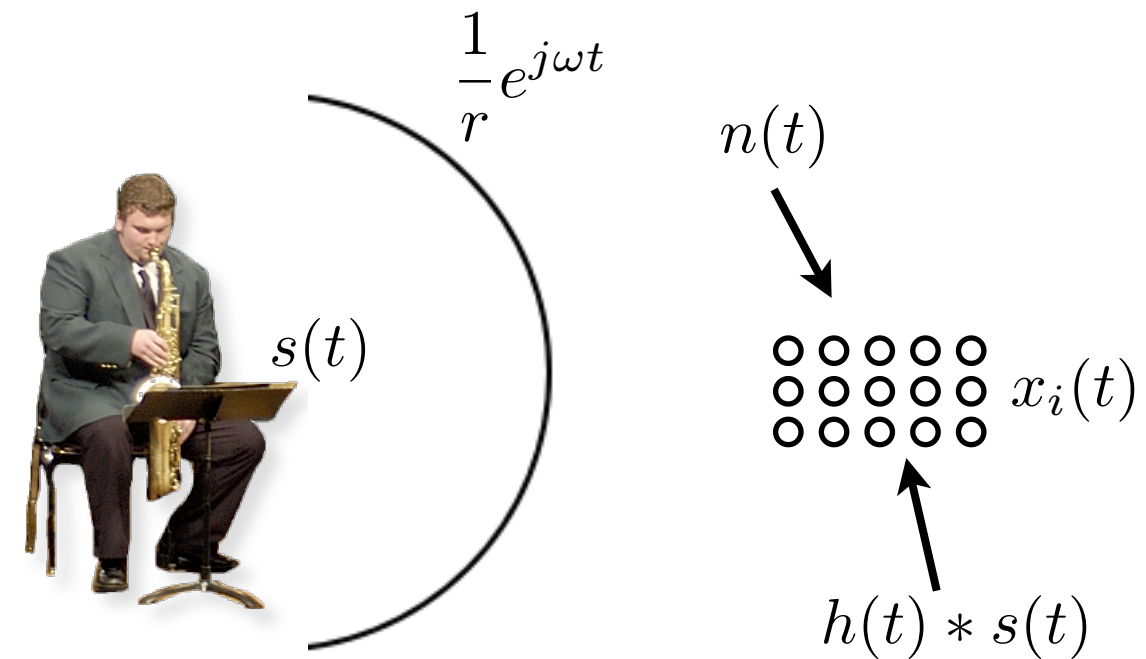
H. Kato *et al.* *Proc. ICA2010*



# Previous method (1)

## ■ (Delay-and-Sumを代表とする)ビームフォーミング

- 残響, 雑音環境下から目的音声信号  $s(t)$  の強調
- マイクホンアレイ規模: 小 ○
- 伝達関数は点音源を仮定 ×
  - ✱ 放射指向特性は得られない



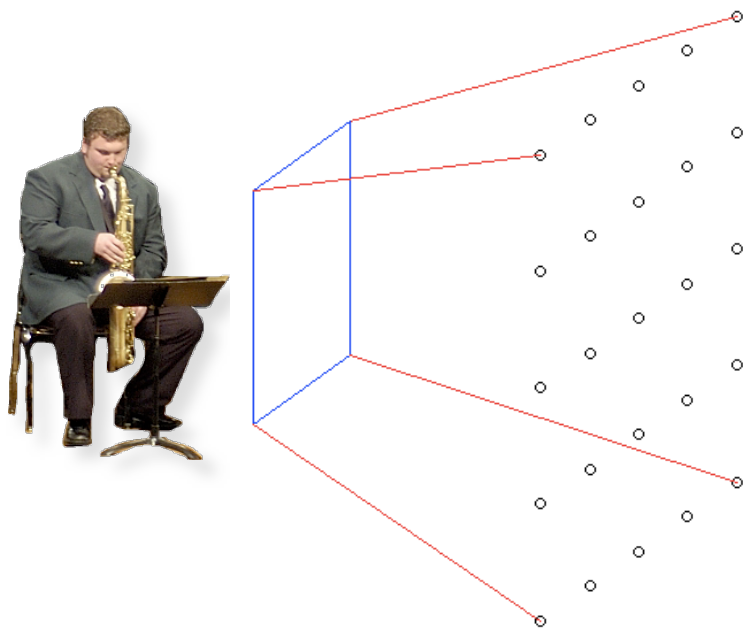
## ■ 残響分解 (Dereverberation)

- 残響環境下から目的信号  $s(t)$  の分解・強調
- マイクホンアレイ規模: 小 ○
- 伝達関数は点音源(インパルス)を仮定 ×
$$x_i(t) = [h_D(t) + h_R(t)] * s(t) + n_i(t)$$
  - ✱ 放射指向特性は残響成分と共に分解されてしまう

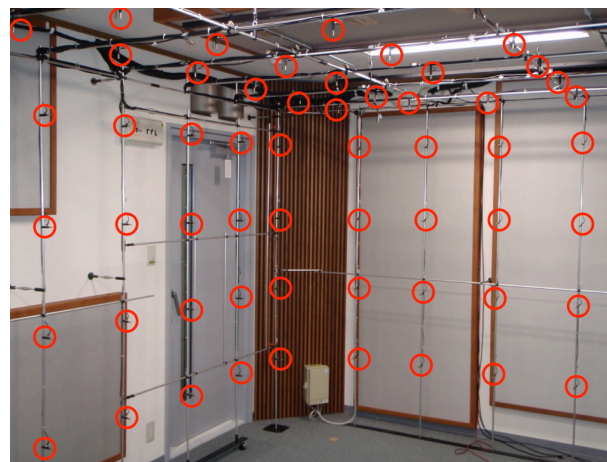
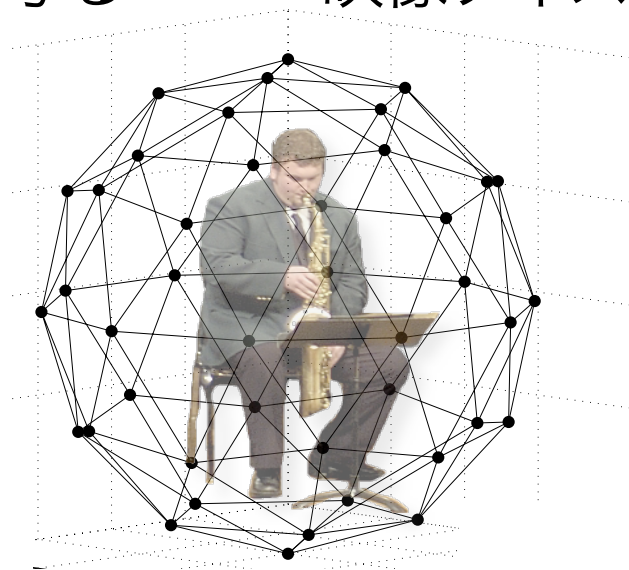
# Previous method (2)

## ■ 近接音響ホログラフィ

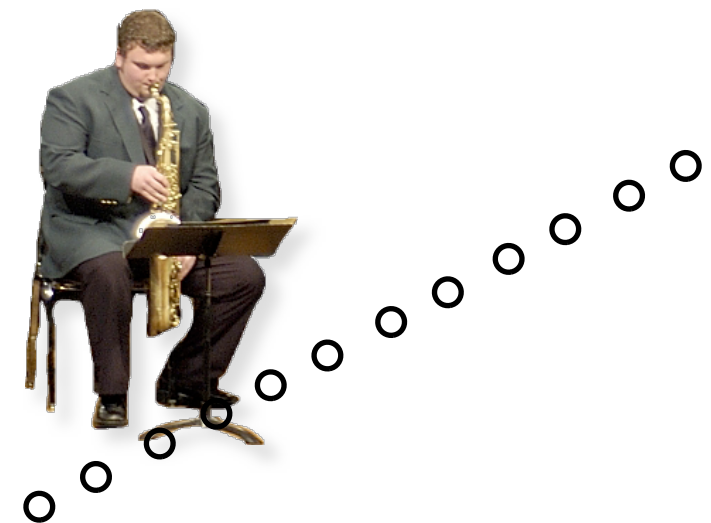
- 音源からの放射指向特性を取得可能 ○
- 音源を取り囲むなど、アレイ規模が大きい ×
  - ✳ カメラに被写体(=音源)が写る → 映像ディスプレイとの連携困難



近接音響ホログラフィ



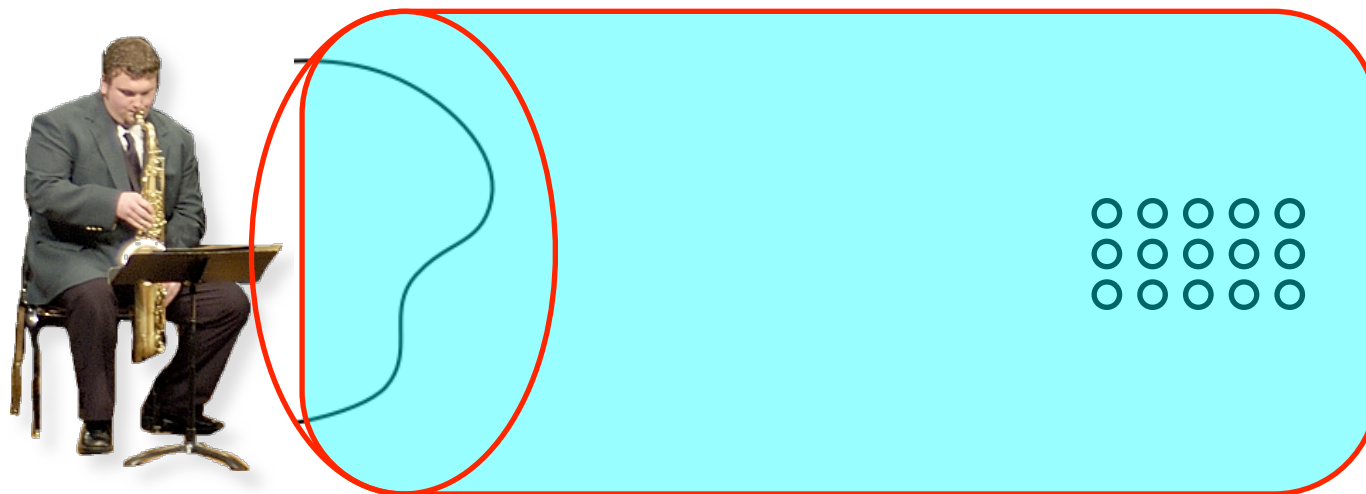
包囲型アレイ型



直線アレイ型

# Purpose

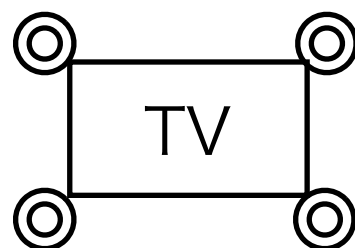
- 小規模マイクロホンアレイで離れた場所の音場を推定する



- 放射指向特性推定 → オブジェクト指向型音場再現
- (反射音などの)周囲の音場推定 → サラウンド指向型音場再現



バイノーラル再生



家庭内再生・TV会議



包囲型音場再現



直線アレイ型音場再現 8

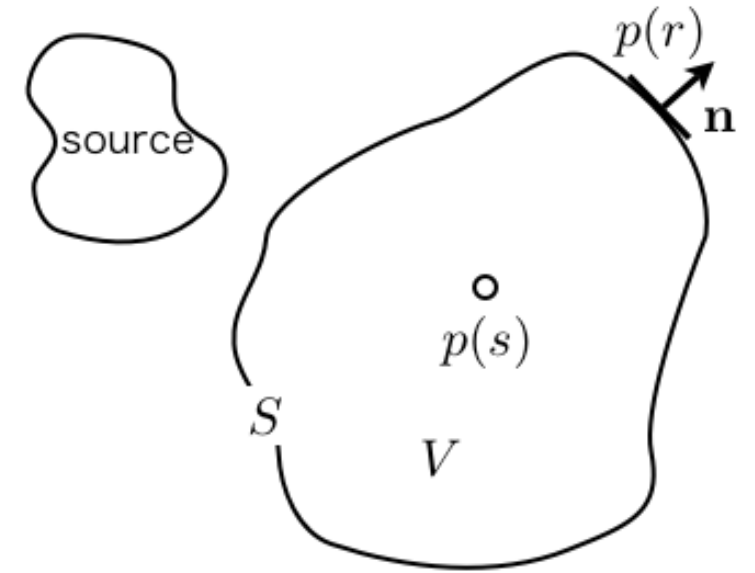


# Basical theory

## ■ Kirchhoff-Helmholtz積分方程式に基づく音場再現

$$\iint_S \left\{ G(r|s) \frac{\partial p(r)}{\partial n} - p(r) \frac{\partial G(r|s)}{\partial n} \right\} \delta S = p(s)$$

$$G(r|s)_{2D} = \frac{j}{4} H_0^{(2)}(k|r-s|) \quad G(r|s)_{3D} = \frac{\exp(-jk|r-s|)}{4\pi|r-s|}$$

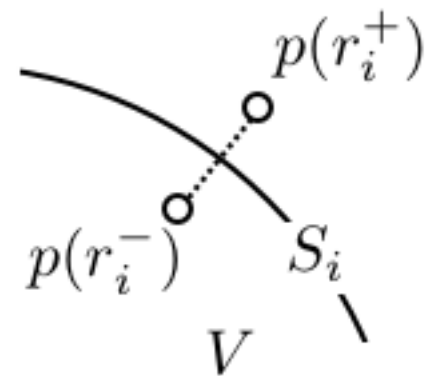


■ 境界内部の音圧は境界面の音圧と粒子速度により一意に規定される

## ■ Kirchhoff-Helmholtz積分方程式の離散化

$$\sum_{i=1}^N \left[ g_i \frac{\partial p(r_i)}{\partial n} - g'_i p(r_i) \right] = p(s)$$

$$\frac{\partial p(r_i)}{\partial n} \simeq \frac{p(r_i^+) - p(r_i^-)}{\delta} \quad g_i \simeq G(r_i|s)\Delta \quad g'_i \simeq \frac{G(r_i^+|s) - G(r_i^-|s)}{\delta} \Delta$$



# Matrix description of K-H integral eq.

## ■ Kirchhoff-Helmholtz積分方程式の行列表現

$$\mathbf{g}_1 = [g_1 \ g_2 \ \cdots \ g_N]$$

$$\mathbf{p}' = \left[ \frac{\partial p(r_1)}{\partial n} \ \frac{\partial p(r_2)}{\partial n} \ \cdots \ \frac{\partial p(r_N)}{\partial n} \right]^T$$

$$\mathbf{g}'_1 = [g'_1 \ g'_2 \ \cdots \ g'_N]$$

$$\mathbf{p}(r) = [p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_N]^T$$

$$\sum_{i=1}^N \left[ g_i \frac{\partial p(r_i)}{\partial n} - g'_i p(r_i) \right] = p(s)$$

↓

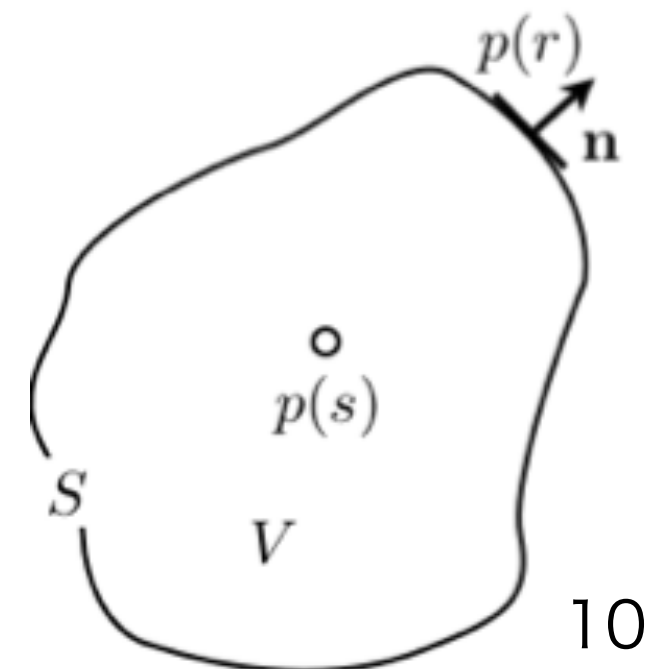
$$[\mathbf{g}_1 \ -\mathbf{g}'_1] \begin{bmatrix} \mathbf{p}'(r) \\ \mathbf{p}(r) \end{bmatrix} = p(s_1)$$

## ■ 内部の点が複数ある場合の表現

$$\mathbf{p}(s) = [p(s_1) \ p(s_2) \ \cdots \ p(s_M)]^T$$

$$[\mathbf{G} \ -\mathbf{G}'] \begin{bmatrix} \mathbf{p}'(r) \\ \mathbf{p}(r) \end{bmatrix} = \mathbf{p}(s)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1 \\ \mathbf{g}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{g}_M \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}' = \begin{bmatrix} \mathbf{g}'_1 \\ \mathbf{g}'_2 \\ \vdots \\ \mathbf{g}'_M \end{bmatrix}$$



# Proposed method

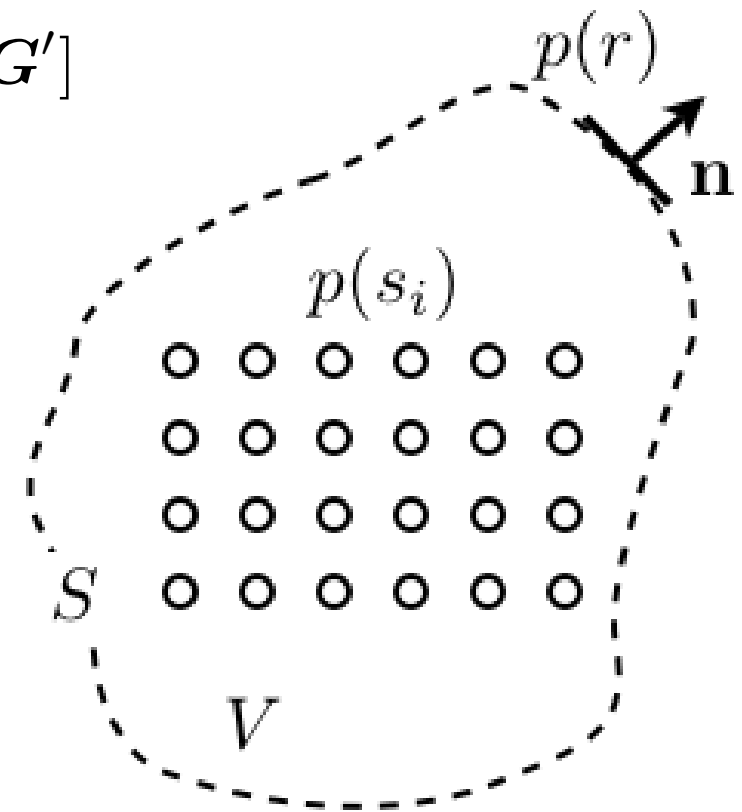
## ■ Kirchhoff-Helmholtz積分方程式の逆問題

1. マイクロホンアレイでの受信信号： $p(s)$
2. 仮想境界をマイクロホンアレイの外側に設定  $\rightarrow A = [G - G']$
3. 境界の音圧  $\hat{p}(s)$ と粒子速度 $\hat{p}'(s)$ を推定

$$[G - G'] \begin{bmatrix} p'(r) \\ p(r) \end{bmatrix} = p(s) \rightarrow \begin{bmatrix} \hat{p}'(r) \\ \hat{p}(r) \end{bmatrix} = A^+ p(s)$$

✱ マイクロホン数が仮想境界点の2倍の時  $A$ は正則

$$\begin{bmatrix} \hat{p}'(r) \\ \hat{p}(r) \end{bmatrix} = A^{-1} p(s)$$



## ■ 順伝搬による仮想境界内部音場の推定

■ 推定した音圧  $\hat{p}(s)$ と粒子速度 $\hat{p}'(s)$ をK-H積分方程式に基づき境界内に順伝搬

$$\hat{p}(s) = \sum_{i=1}^N \left[ g_i \frac{\partial \hat{p}(r_i)}{\partial n} - g'_i \hat{p}(r_i) \right]$$

# Computer simulation

## ■ シミュレーション条件

■ 解析周波数：200, 500, 1000, 1500 Hz

■ 音速：343.26 m/s

■ 音源：点音源(2次元)

$$G(r|s)_{2D} = \frac{j}{4} H_0^{(2)}(k|r-s|)$$

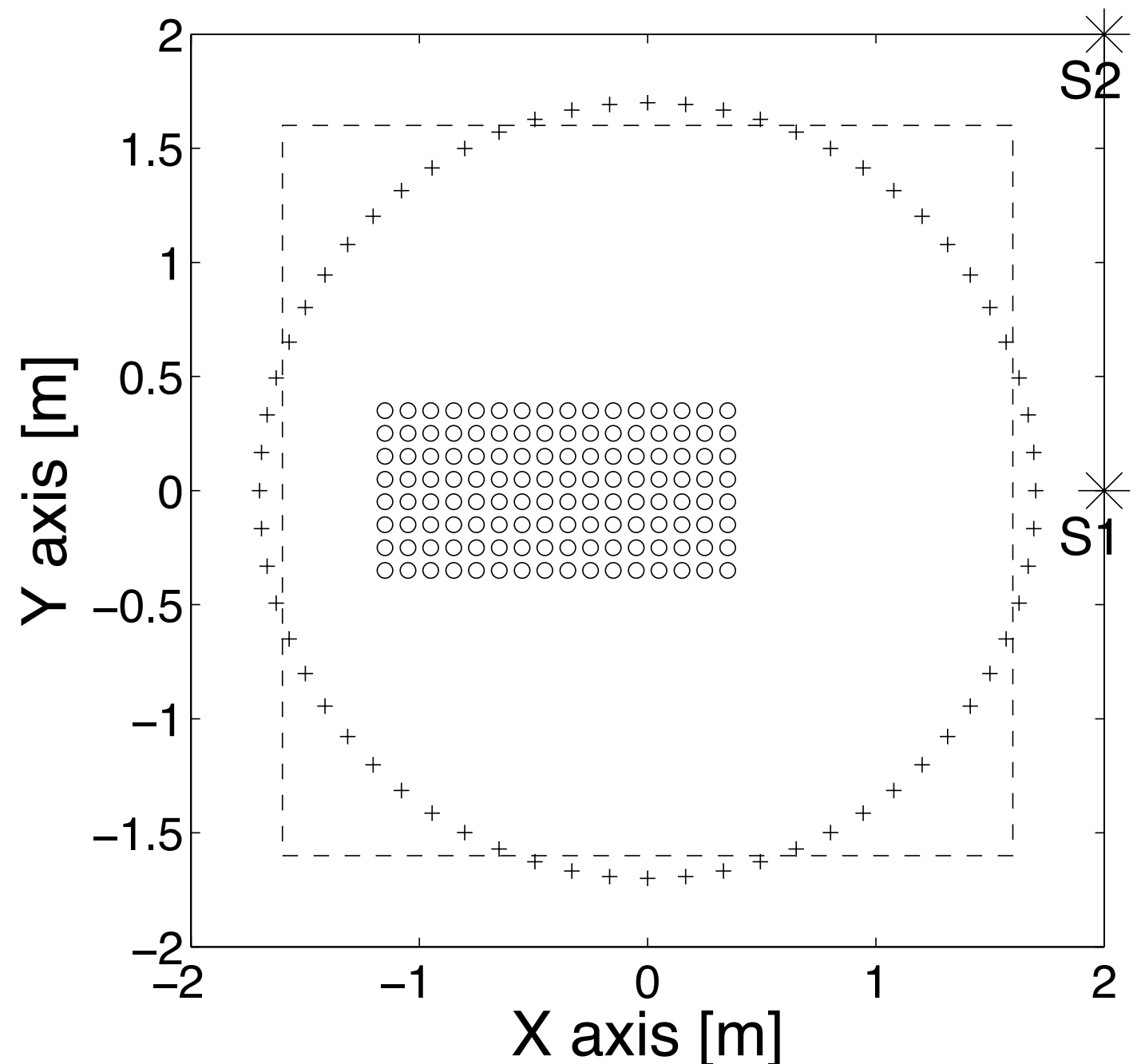
■ 音源位置：(2, 0)および(2, 2)

■  $\delta$ ：0.00000002 m

■ マイクロホン間隔：0.1 m

■ マイクロホン数：128 ch

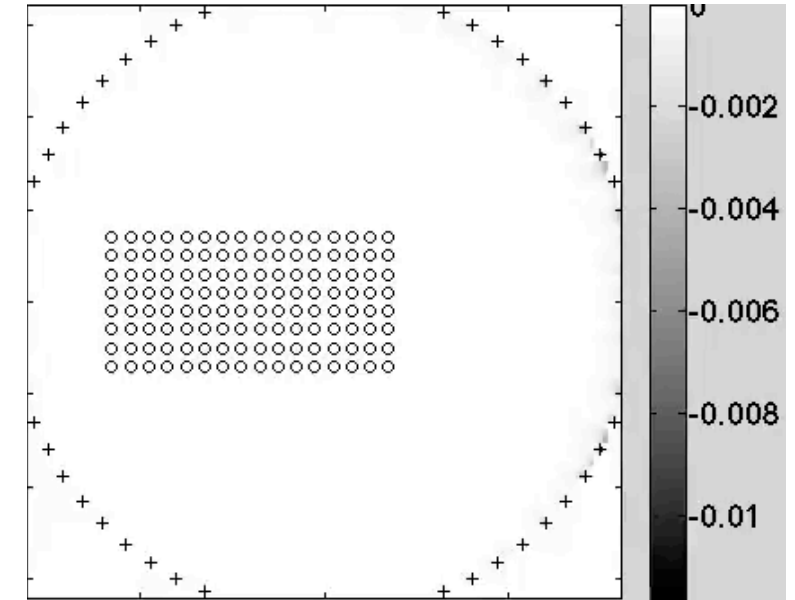
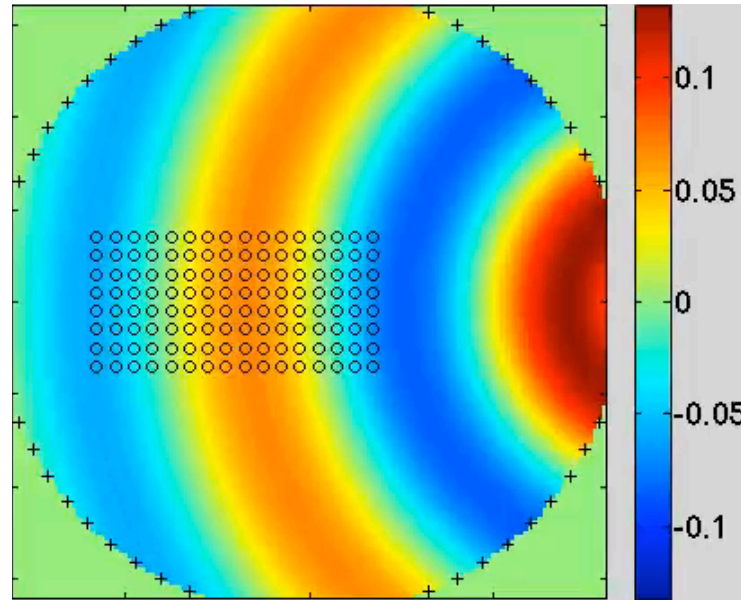
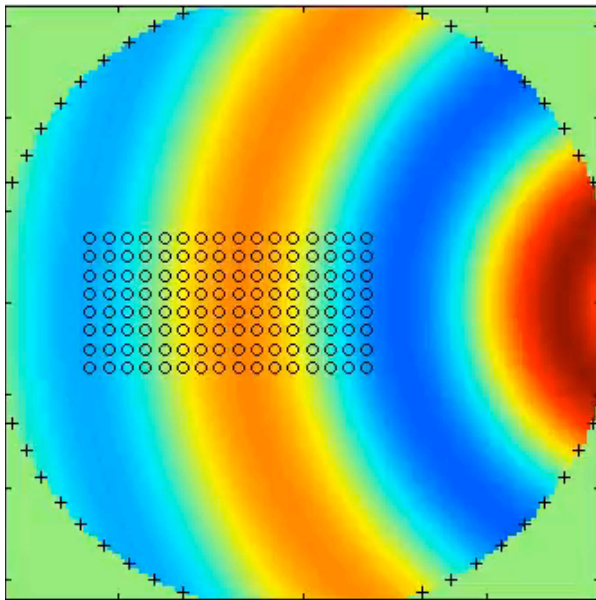
■ 制御点数：64 ch



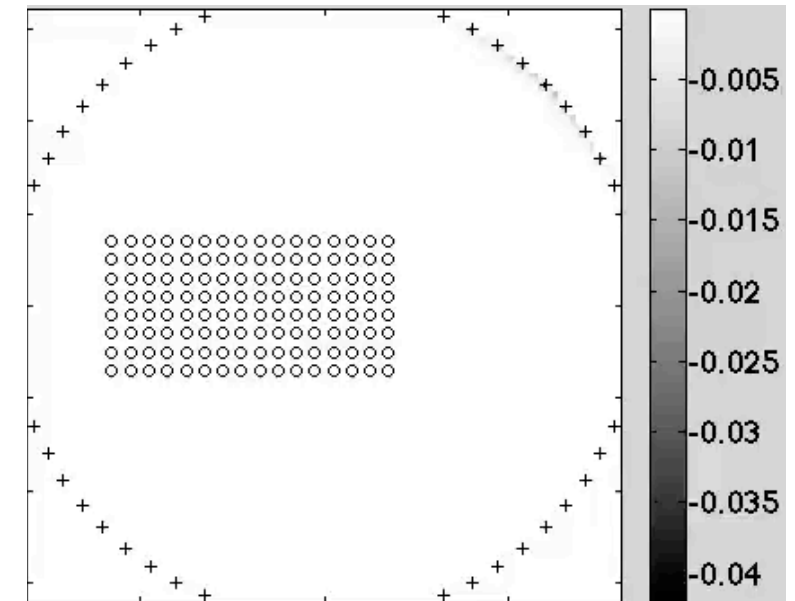
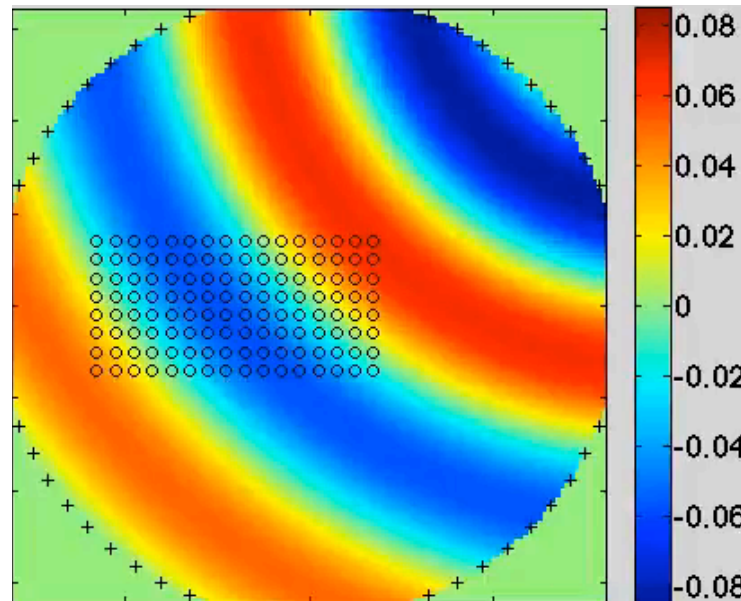
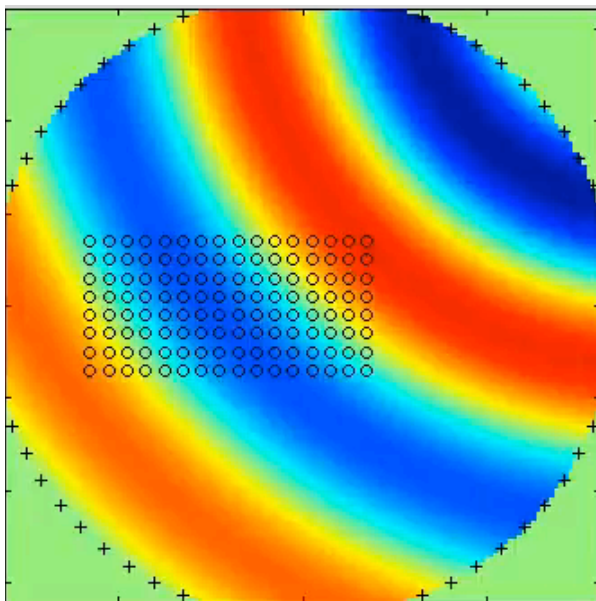


# Simulation results (200 Hz)

- Sound source position is (2, 0)



- Sound source position is (2, 2)



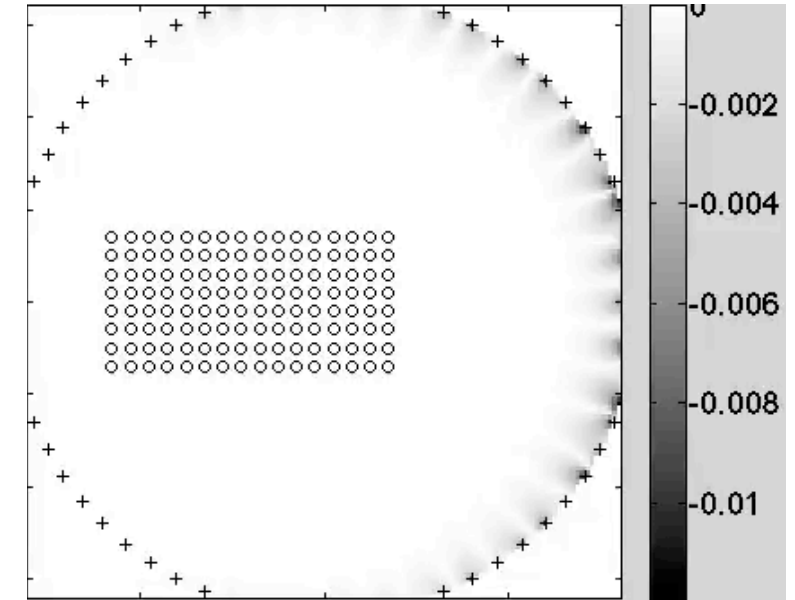
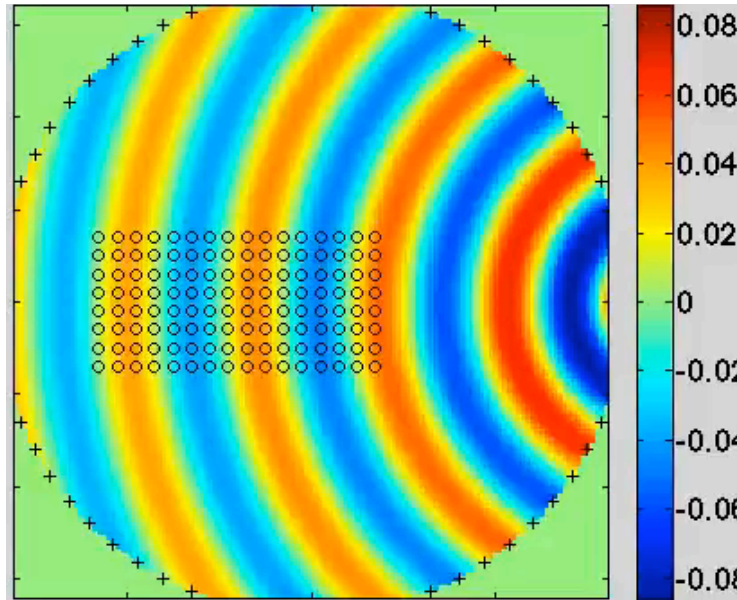
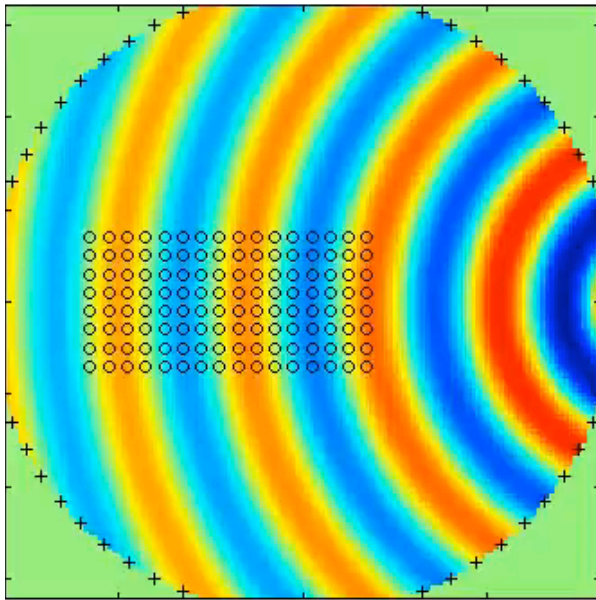
Original

Estimated

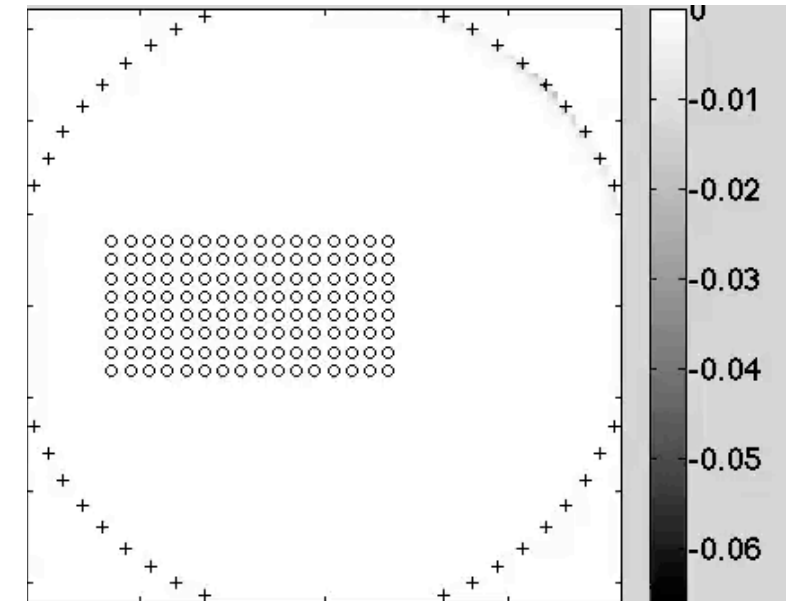
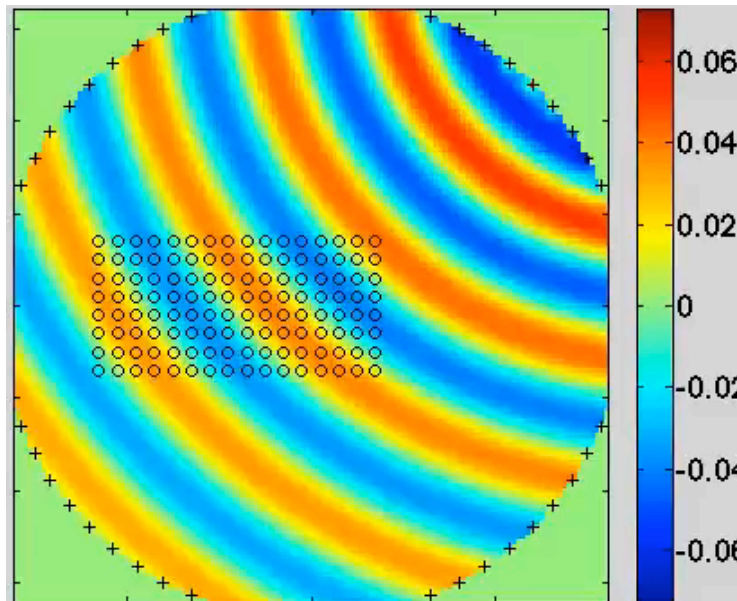
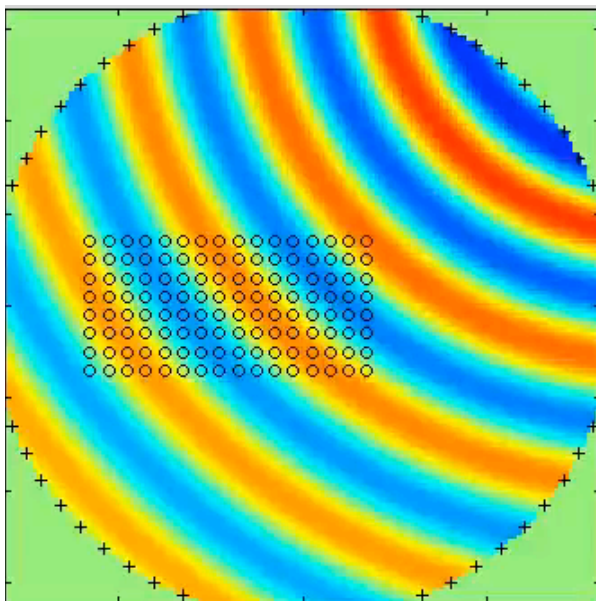
Error

# Simulation results (500 Hz)

- Sound source position is (2, 0)



- Sound source position is (2, 2)



Original

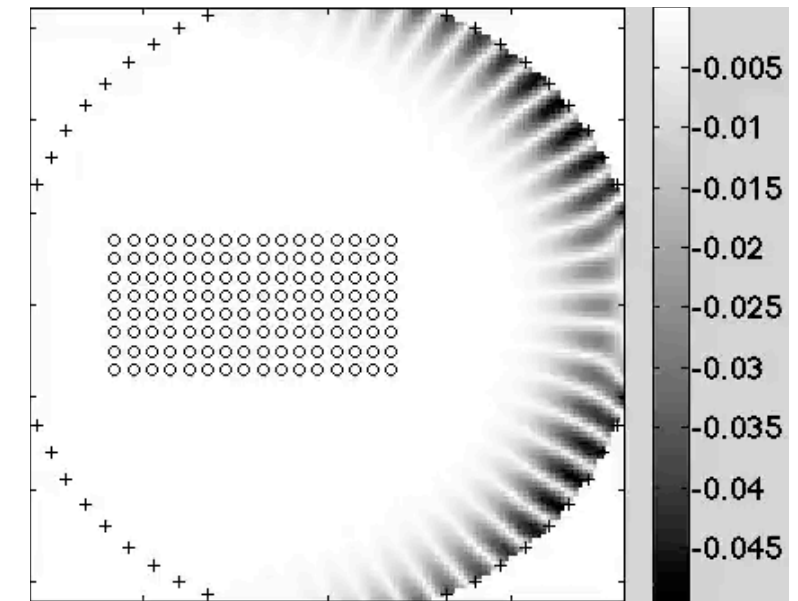
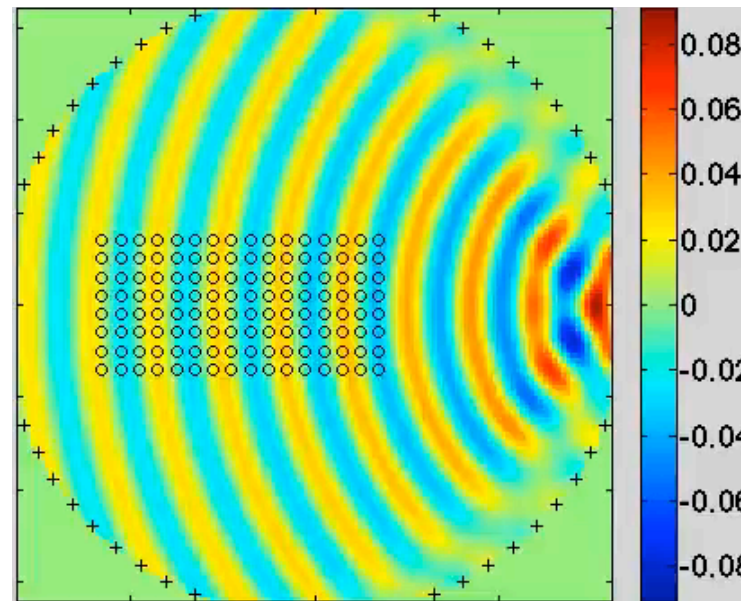
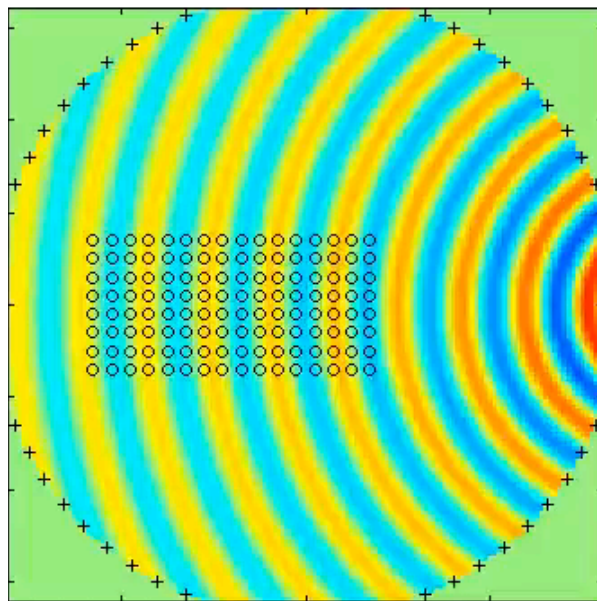
Estimated

Error

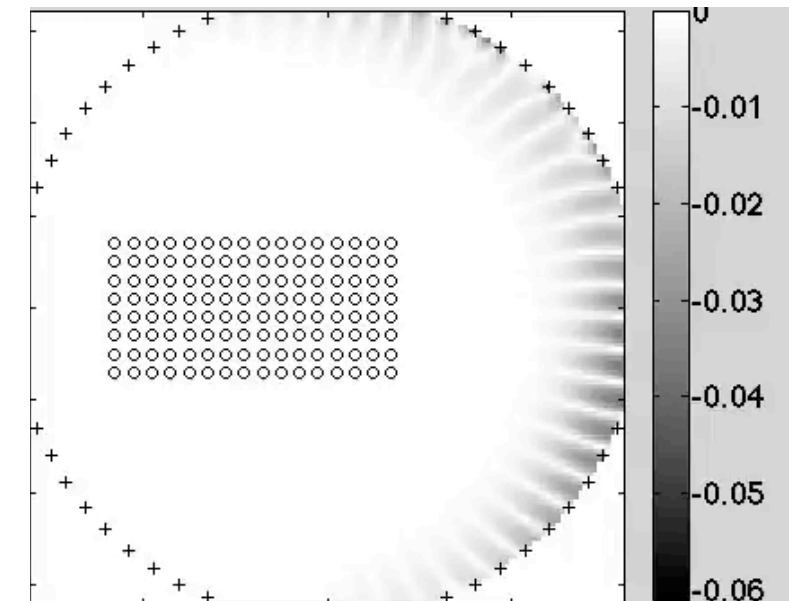
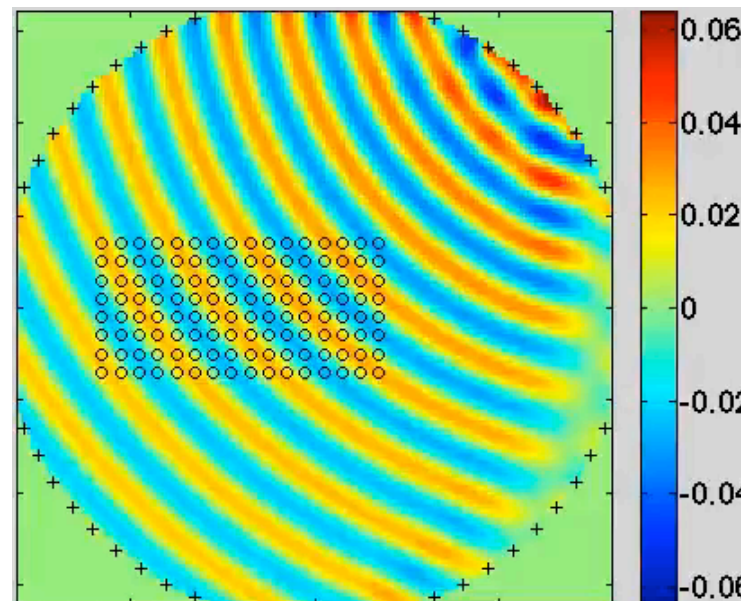
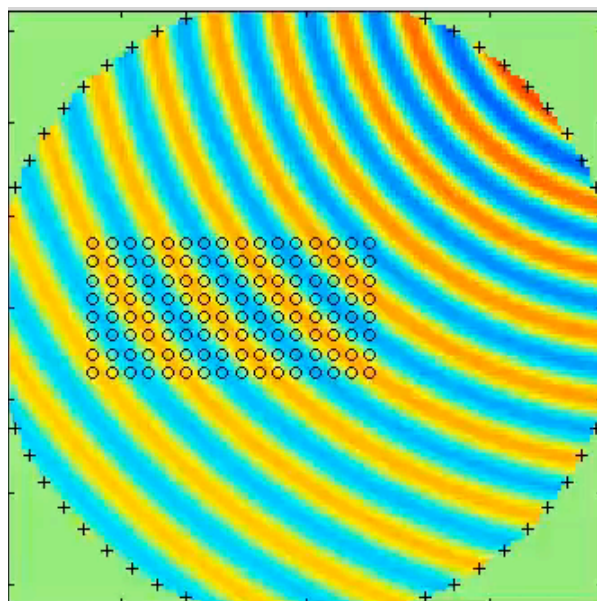


# Simulation results (1000 Hz)

- Sound source position is (2, 0)



- Sound source position is (2, 2)



Original

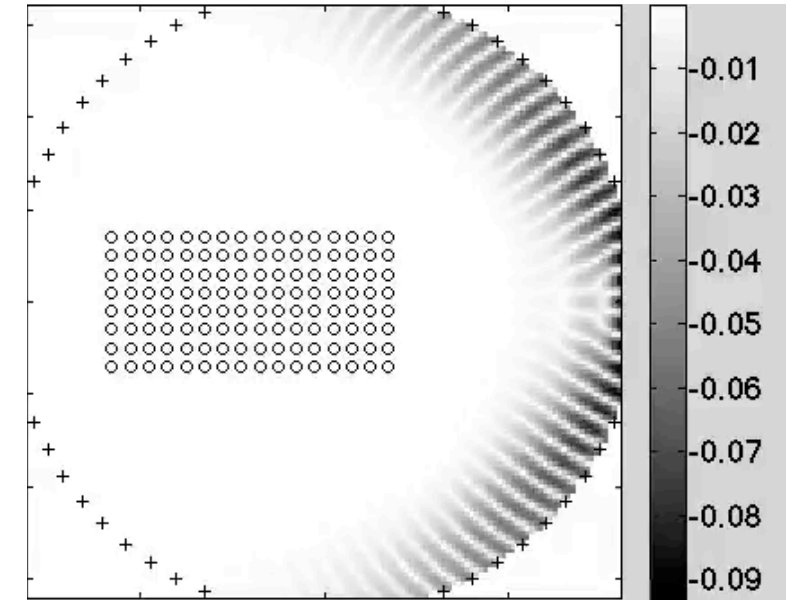
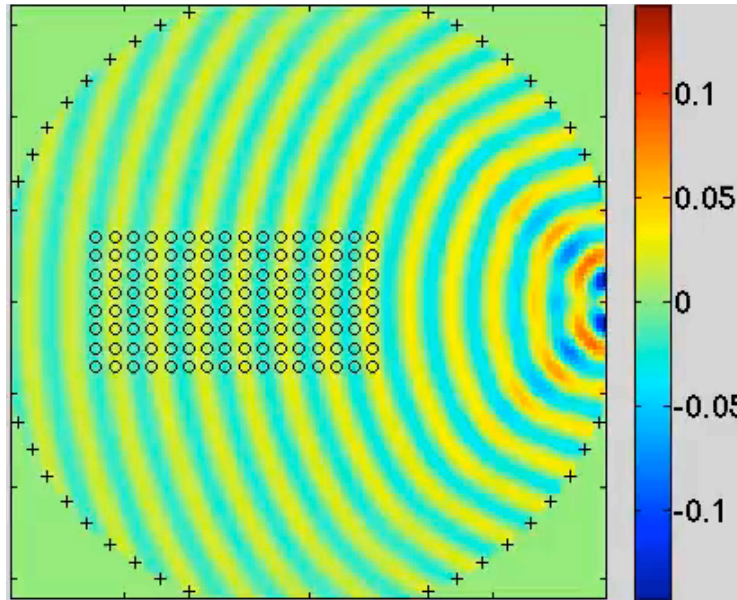
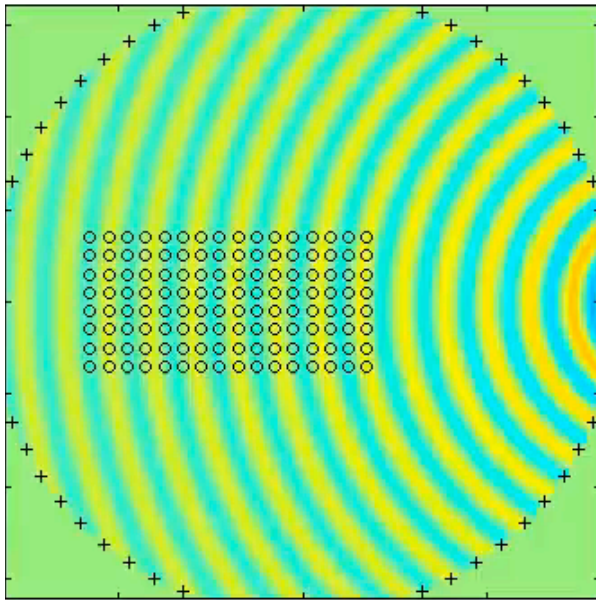
Estimated

Error

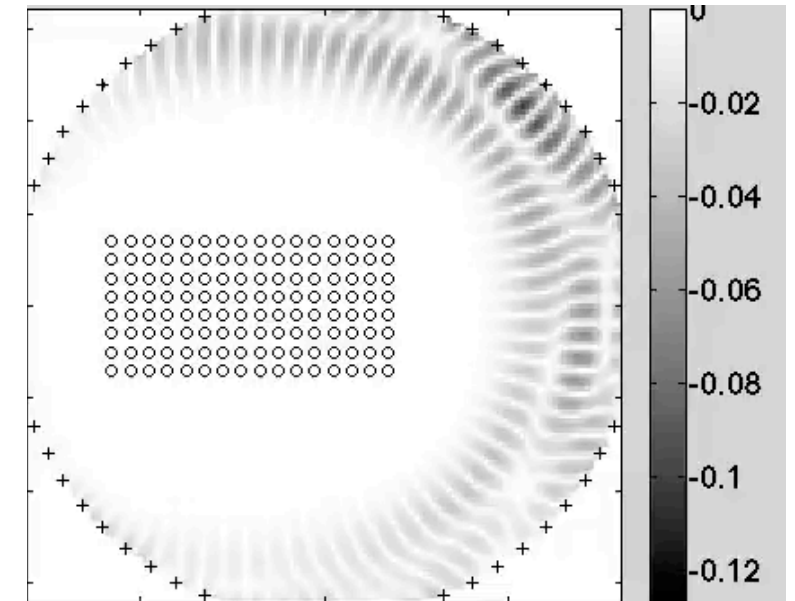
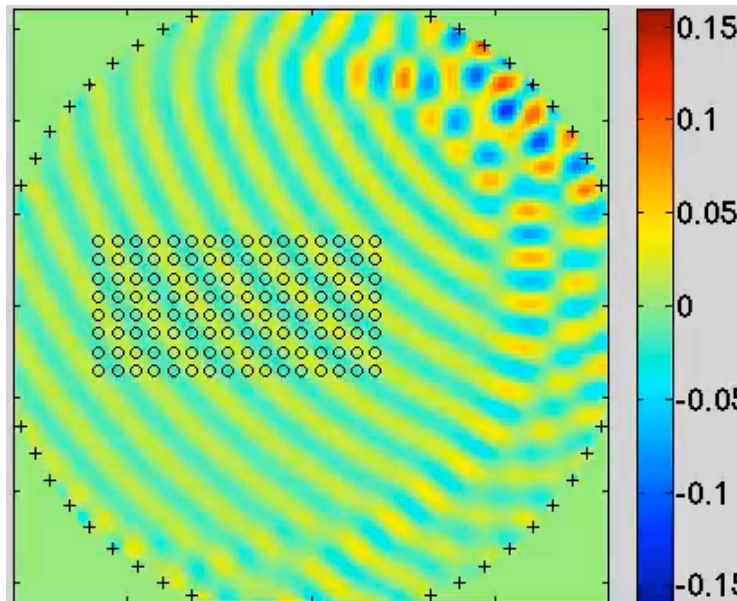
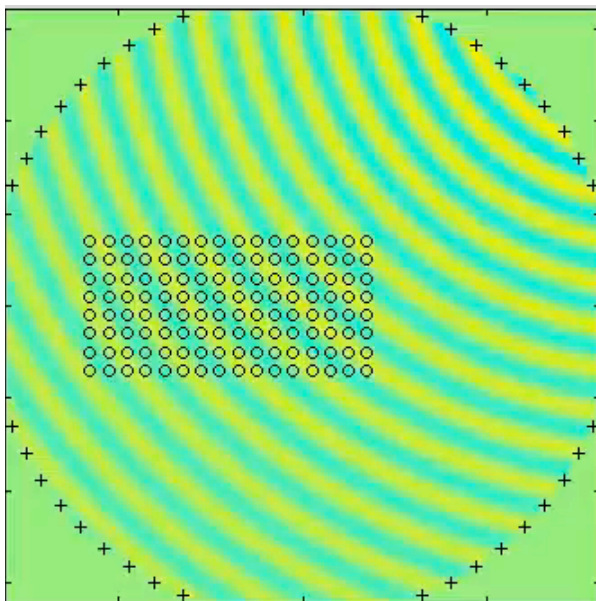


# Simulation results (1500 Hz)

- Sound source position is (2, 0)



- Sound source position is (2, 2)



Original

Estimated

Error

# Discussion

## ■ 再現精度

- 推定した  $\hat{p}(s)$  および  $\hat{p}'(s)$  は正解値とは異なる

- ✱ エバネッセント波の逆伝搬は指数関数的に増大 →  $A$  の条件数は極めて大きい

- 推定した  $\hat{p}(s)$  および  $\hat{p}'(s)$  を順伝搬した音場自体はアレイ外側でも予測可能

## ■ 精度向上のために

- 音圧か粒子速度どちらかで内部音場を規定 → マイクロホン数を半分に

- ✱ ノイマン型グリーン関数

$$\iint_s G_N(r|s) \frac{\partial p(r)}{\partial n} \delta S = p(s) \rightarrow \text{境界上の粒子速度のみで内部音場を記述}$$

無限平面：WFS※(第1種Rayleigh積分)  
球：High order Ambisonics

- ✱ ディリクレ型グリーン関数

$$-\iint_s p(r) \frac{\partial G_D(r|s)}{\partial n} \delta S = p(s) \rightarrow \text{境界上の音圧のみで内部音場を記述}$$

無限平面：WFS※(第2種Rayleigh積分)



# Concluding remarks

---

## ■ Kirchhoff-Helmholtz積分方程式の逆問題と順伝搬に基づく音場推定法の提案

- 定式化
- 計算機シミュレーション(2次元)

## ■ 今後の予定

- 計算機シミュレーション(3次元)
- 実環境における実験
- 精度向上およびチャネル数の削減