

# 時空間周波数領域クロストークキャンセラ を用いた複数平行直線アレイによる 音空間の収録と再生

---

Sound field recording and reproduction by multiple parallel linear arrays  
using crosstalk cancellers in spatio-temporal frequency domain

岡本 拓磨, 榎本 成悟, 西村 竜一

情報通信研究機構

# Presentation contents

---

## ■ Introduction

## ■ Purpose

- 複数平行直線マイクロホン / スピーカアレイを用いた  
大画面映像システムに最適な3次元音場収録・再現

## ■ Basic theory

- Spectral division method

## ■ Proposed method

- 時空間周波数領域クロストークキャンセラの導出
- 計算機シミュレーション

## ■ Concluding remarks

# Introduction

## ■ 大画面映像システム



200インチ裸眼立体システム

## ■ 立体ディスプレイ・高精細ディスプレイ(4K, 8K)

- \* 大画面：没入感
- \* 3D or 高精細：奥行き感, 飛び出し感

## ■ 大画面映像システムに最適な3次元音場収録・再現

### ■ 映像と重らないスピーカー配置

- \* 没入感, 奥行き感, 飛び出し感を如何に制御するか!?

# Purpose : Umekita acoustics

- 平行2直線スピーカアレイによる大画面システムに最適な音場再現



- バーチャル音源の提示 (for rendered contents) 岡本ら, 音講論(秋) 2013
  - \* バーチャル音源の高さや奥行き, 飛び出し音の制御
- 実環境音場の収録・再現 (for recorded contents)
  - \* 最適なマイクロホン配置, 信号処理

# How to arrange microphones?

## ■ 裸眼立体ディスプレイの視聴位置の特徴



## ■ 水平方向

- \* 複数人が同時に違う位置から見る
- \* 立ち位置によって見え方がかわるため視聴者は左右に動く  
→ 最適視聴距離と平行に密に配置

## ■ 仰角方向

- \* 頭の高さは基本的には画面中央付近  
→ 画面中央付近に密に配置

# Proposed arrangement

## ■ 複数平行直線アレイを用いた音空間の収録と再生

### ■ 複数直線マイクロホンアレイ

\* 水平方向は広く制御するために

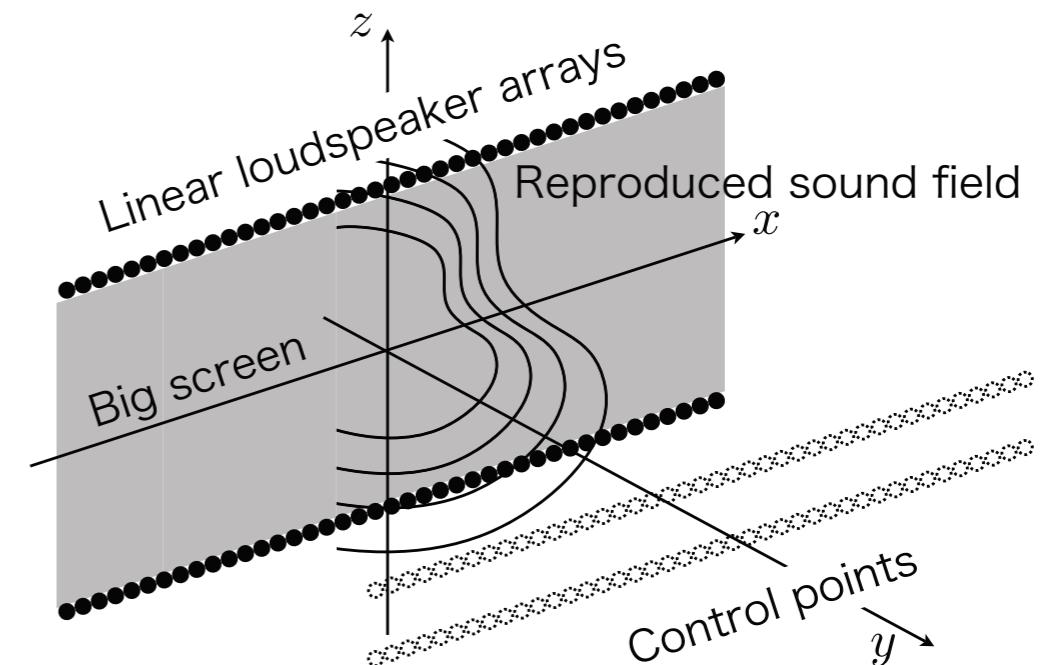
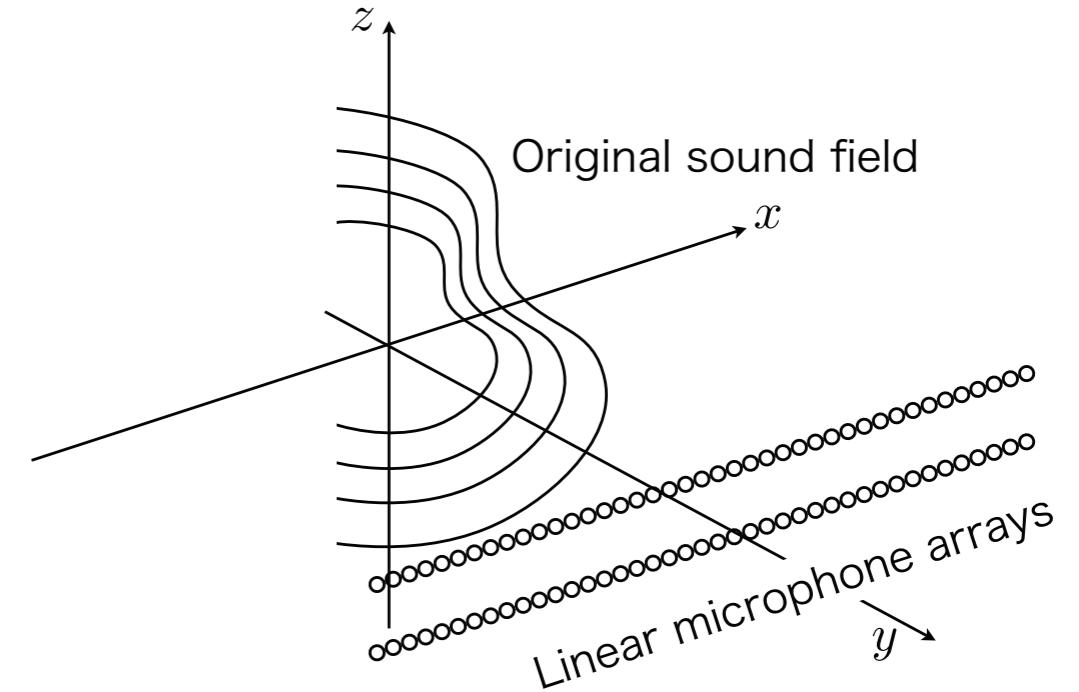
直線アレイを密に配置

\* 仰角方向の音空間を収録するため  
複数の直線アレイを配置

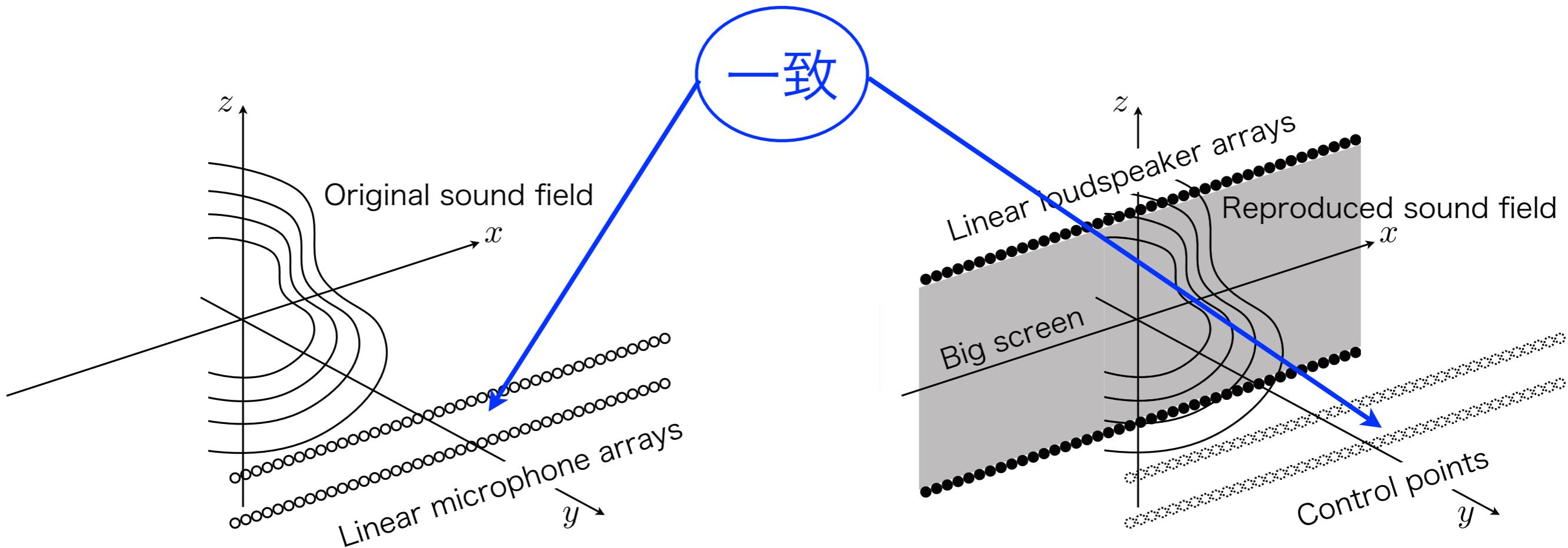
### ■ 複数直線スピーカアレイ

\* 画面と重ならないように

複数の直線スピーカアレイを配置



# Problem



(a) 音場収録部

(b) 音場再現部



# Purpose

## ■ 従来法：最小二乗解(least squares method : LS method)

- 各スピーカー-マイクロホン間の伝達関数行列の逆特性を直接算出

$$\mathbf{P}(\omega) = \mathbf{G}(\omega) \mathbf{D}(\omega) \quad : \text{順問題}$$

↓

$$\mathbf{D}(\omega) = \underline{\mathbf{G}^+(\omega) \mathbf{P}(\omega)} \quad : \text{逆問題}$$

変換フィルタ

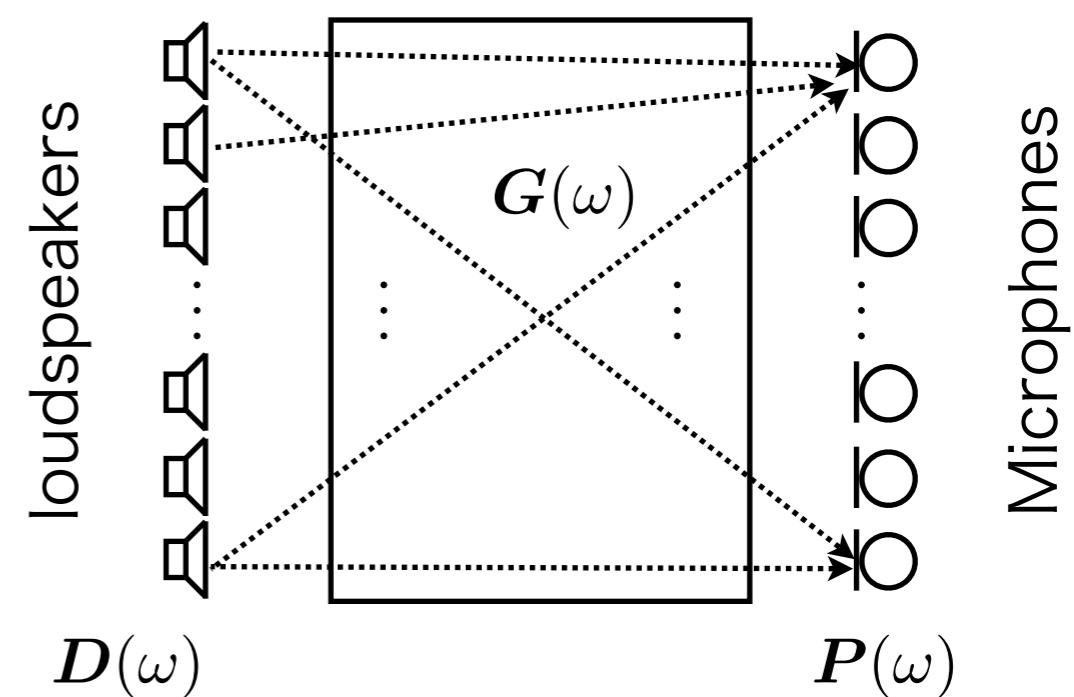
## ■ 問題点

- \* 行列  $\mathbf{G}(\omega)$  は非常に悪条件  
→ 変換フィルタは極めて不安定
- \* 計算量がチャネル数の2乗オーダー

## ■ 本研究の具体的な目的

- 複数平行直線アレイに最適な変換フィルタの設計

- \* 時空間周波数領域クロストークキャンセラの提案



# Basic theory (1)

## ■ 直線スピーカアレイを用いた水平面音場再現

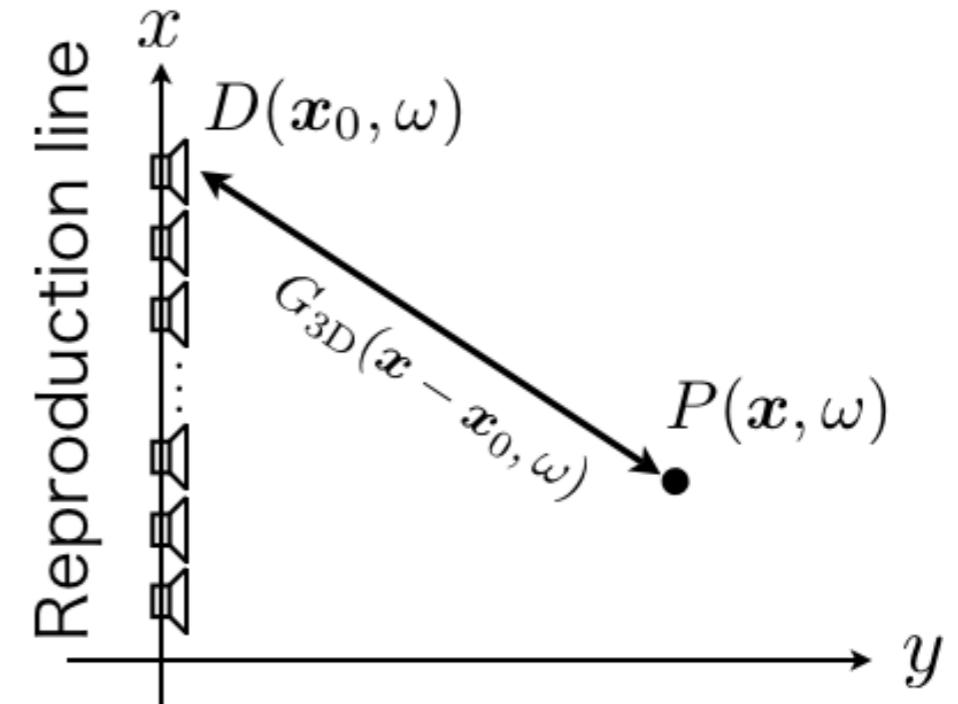
### ■ 波面合成法(Wave field synthesis : WFS)

#### \* 直線アレイによる音場(Single layer potential)

$$P(\mathbf{x}, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} D(\mathbf{x}_0, \omega) G_{3D}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0, \omega) dx_0$$

#### \* 3次元自由空間グリーン関数

$$G_{3D}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0, \omega) = \frac{\exp(-jk|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0|)}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0|}$$



位置  $\mathbf{x}$  での音圧  $P(\mathbf{x}, \omega)$



スピーカの駆動信号  $D(\mathbf{x}_0, \omega)$  と伝達関数  $G_{3D}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0, \omega)$  との畳み込み

# Basic theory (2)

## ■ 直線マイクロホン / スピーカアレイを用いた水平面音場再現

■ Spectral division method (SDM) J. Ahrens *et al.* 2010.

\*  $x$  軸方向に空間フーリエ変換

$$\tilde{P}(k_x, y, 0, \omega) = \tilde{D}(k_x, \omega) \cdot \tilde{G}(k_x, y, 0, \omega)$$

→ 時空間周波数領域ではかけ算

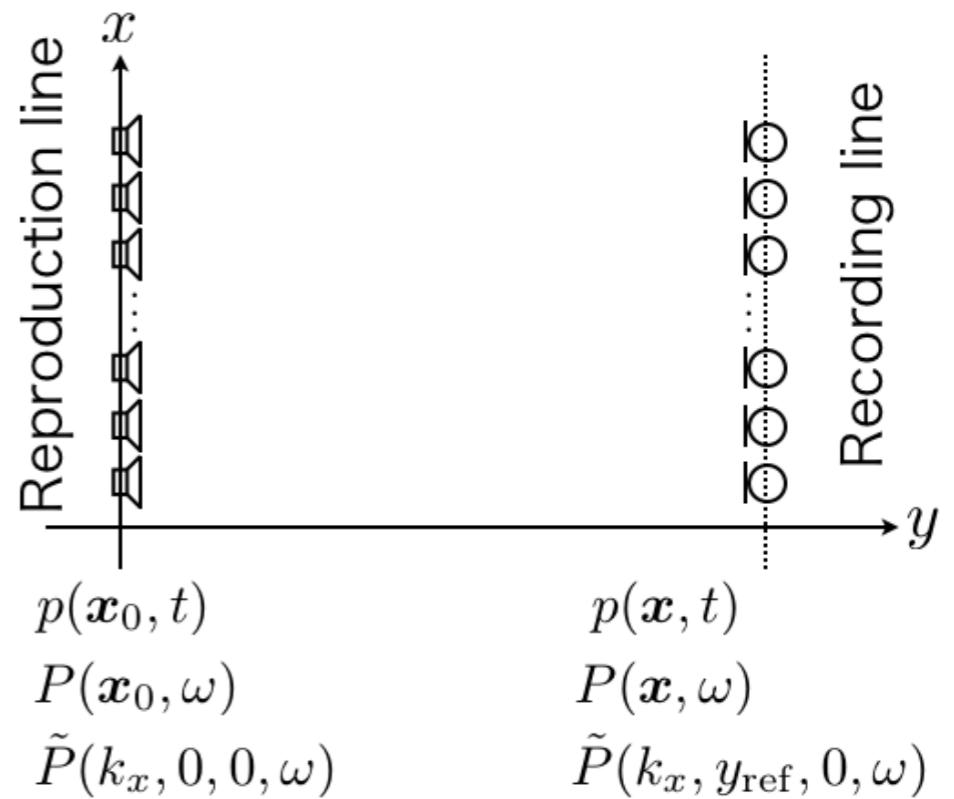
\* 3次元グリーン関数の空間フーリエ変換

$$\tilde{G}(k_x, y, 0, \omega) = \begin{cases} -\frac{j}{4} H_0^{(2)} \left( \sqrt{k^2 - k_x^2} y \right) & \text{for } 0 \leq |k_x| \leq |k| \\ \frac{1}{2\pi} K_0 \left( \sqrt{k_x^2 - k^2} y \right) & \text{for } 0 < |k| \leq |k_x| \end{cases}$$

\* 時空間周波数領域の各スピーカの駆動信号

$$\tilde{D}(k_x, \omega) = \frac{\tilde{P}(k_x, y_{\text{ref}}, 0, \omega)}{\tilde{G}(k_x, y_{\text{ref}}, 0, \omega)}$$

変換フィルタ



# Basic theory (3)

## ■ 直線マイクロホン / スピーカーアレイを用いた水平面音場再現の実装

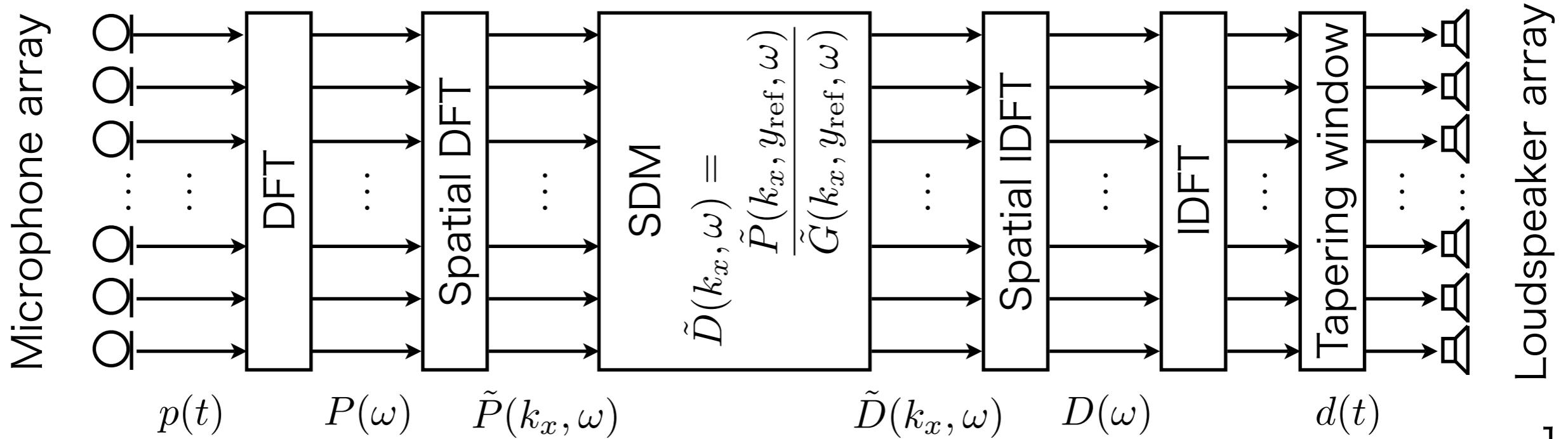
### ■ 実装のためには

- \* 離散化

$$\tilde{P}(k_{x,i}, y, \omega) = \tilde{D}(k_{x,i}, \omega) \cdot \tilde{G}(k_{x,i}, y, \omega) \quad (i = 1, 2, \dots, K)$$

- \* アレイの打ち切り誤差 → 窓関数の導入

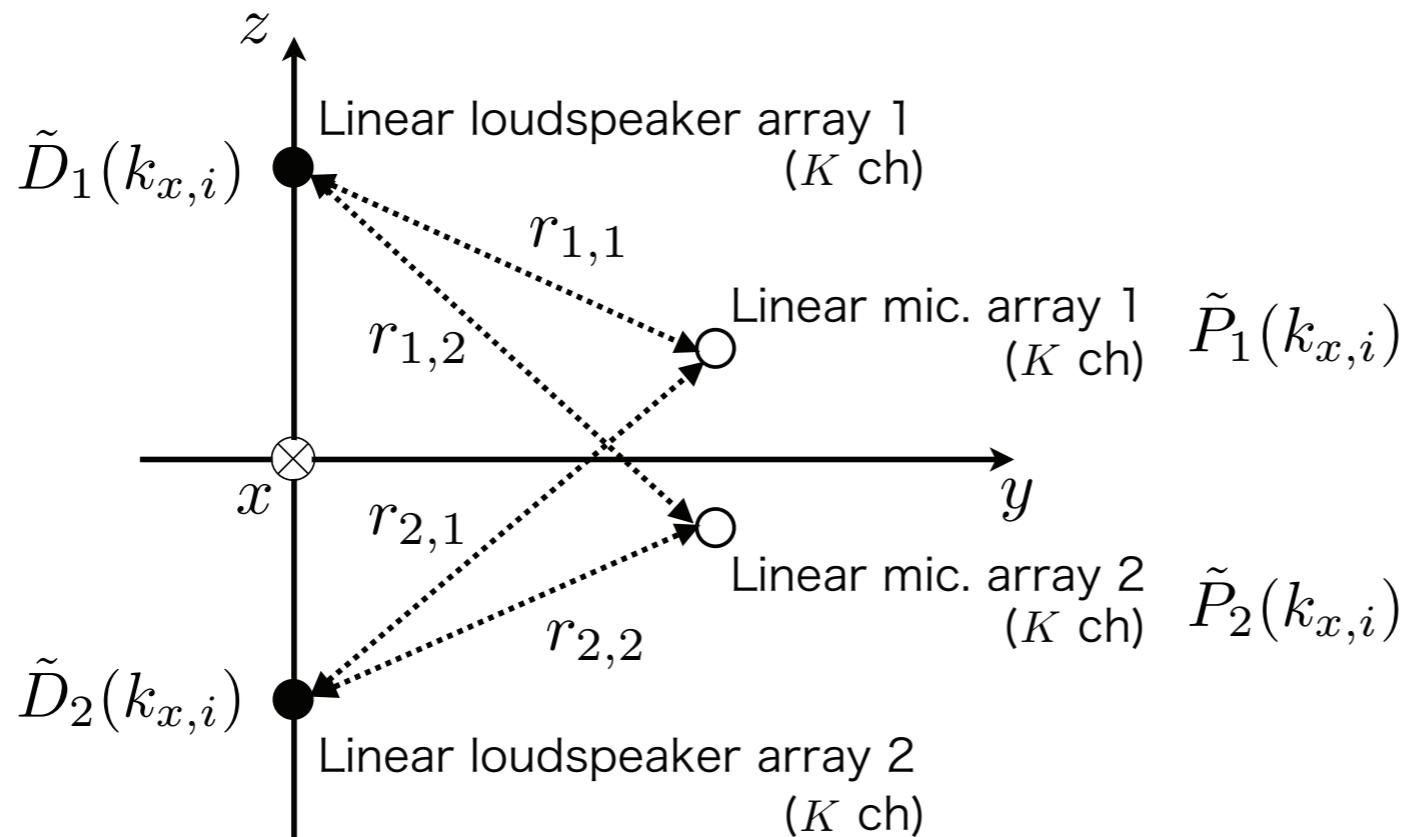
### ■ 実装例



# Strategy for proposed method

■ 複数平行直線アレイの時空間領域信号(  $M = 2, N = 2$  )

■ 各アレイ間の違い=距離の違い



■  $\tilde{P}(k_{x,i}, y, \omega) = \tilde{D}(k_{x,i}, \omega) \cdot \tilde{G}(k_{x,i}, y, \omega)$  の重ね合わせ

$$\tilde{P}_1(k_{x,i}) = \tilde{G}(k_{x,i}, r_{1,1})\tilde{D}_1(k_{x,i}) + \tilde{G}(k_{x,i}, r_{2,1})\tilde{D}_2(k_{x,i})$$

$$\tilde{P}_2(k_{x,i}) = \tilde{G}(k_{x,i}, r_{1,2})\tilde{D}_1(k_{x,i}) + \tilde{G}(k_{x,i}, r_{2,2})\tilde{D}_2(k_{x,i})$$

# Proposed method

## ■ 時空間周波数領域クロストークキャンセラ

### ■ 複数平行直線アレイの時空間領域信号の行列表記

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\mathbf{P}}(k_{x,i}) &= [\tilde{P}_1(k_{x,i}) \ \tilde{P}_2(k_{x,i})]^T \\ \tilde{\mathbf{G}}(k_{x,i}) &= \left[ \begin{array}{cc} \tilde{G}(k_{x,i}, r_{1,1}) & \tilde{G}(k_{x,i}, r_{2,1}) \\ \tilde{G}(k_{x,i}, r_{1,2}) & \tilde{G}(k_{x,i}, r_{2,2}) \end{array} \right] \\ \tilde{\mathbf{D}}(k_{x,i}) &= [\tilde{D}_1(k_{x,i}) \ \tilde{D}_2(k_{x,i})]^T \end{aligned} \right\} \quad \tilde{\mathbf{P}}(k_{x,i}) = \tilde{\mathbf{G}}(k_{x,i}) \tilde{\mathbf{D}}(k_{x,i})$$

### ■ クロストークキャンセラ

$$\tilde{\mathbf{D}}(k_{x,i}) = \tilde{\mathbf{G}}(k_{x,i})^{-1} \tilde{\mathbf{P}}(k_{x,i})$$

$$\tilde{\mathbf{G}}(k_{x,i})^{-1} = \tilde{\mathbf{F}}(k_{x,i}) = \left[ \begin{array}{cc} \tilde{F}_{1,1}(k_{x,i}) & \tilde{F}_{2,1}(k_{x,i}) \\ \tilde{F}_{1,2}(k_{x,i}) & \tilde{F}_{2,2}(k_{x,i}) \end{array} \right]$$

### ■ 時空間周波数領域の各スピーカの駆動信号

$$\tilde{D}_1(k_{x,i}) = \boxed{\tilde{F}_{1,1}(k_{x,i})} \tilde{P}_1(k_{x,i}) + \boxed{\tilde{F}_{2,1}(k_{x,i})} \tilde{P}_2(k_{x,i})$$

$$\tilde{D}_2(k_{x,i}) = \boxed{\tilde{F}_{1,2}(k_{x,i})} \tilde{P}_1(k_{x,i}) + \boxed{\tilde{F}_{2,2}(k_{x,i})} \tilde{P}_2(k_{x,i})$$

# Generalized proposed method

## ■ 時空間周波数領域クロストークキャンセラ(一般化)

### ■ 複数平行直線アレイの時空間領域信号の行列表記

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\mathbf{P}}(k_{x,i}) &= [\tilde{P}_1(k_{x,i}) \ \tilde{P}_2(k_{x,i}) \ \cdots \ \tilde{P}_N(k_{x,i})]^T \\ \tilde{\mathbf{G}}(k_{x,i}) &= \left[ \begin{array}{ccc} \tilde{G}(k_{x,i}, r_{1,1}) & \cdots & \tilde{G}(k_{x,i}, r_{M,1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{G}(k_{x,i}, r_{1,N}) & \cdots & \tilde{G}(k_{x,i}, r_{M,N}) \end{array} \right] \\ \tilde{\mathbf{D}}(k_{x,i}) &= [\tilde{D}_1(k_{x,i}) \ \tilde{D}_2(k_{x,i}) \ \cdots \ \tilde{D}_M(k_{x,i})]^T \end{aligned} \right\} \quad \tilde{\mathbf{P}}(k_{x,i}) = \tilde{\mathbf{G}}(k_{x,i}) \tilde{\mathbf{D}}(k_{x,i})$$

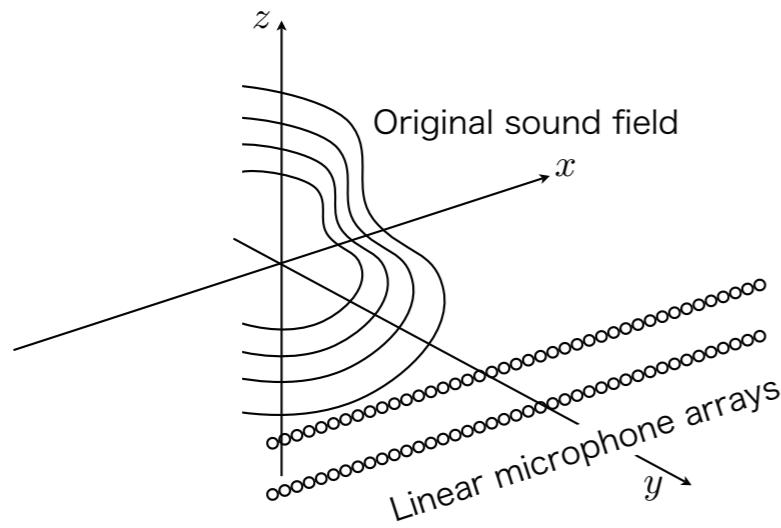
### ■ クロストークキャンセラ

$$\tilde{\mathbf{D}}(k_{x,i}) = \tilde{\mathbf{G}}(k_{x,i})^+ \tilde{\mathbf{P}}(k_{x,i})$$

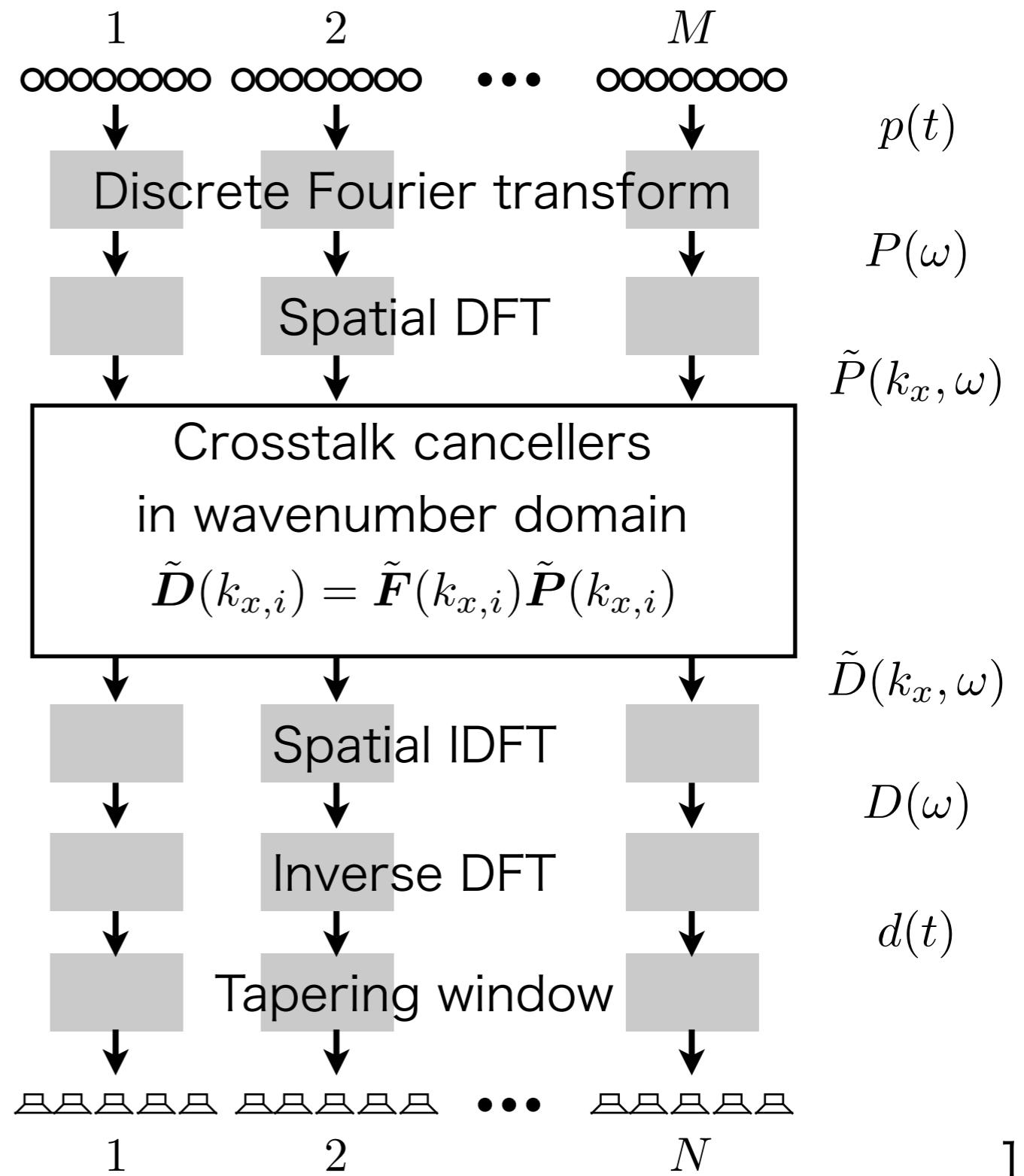
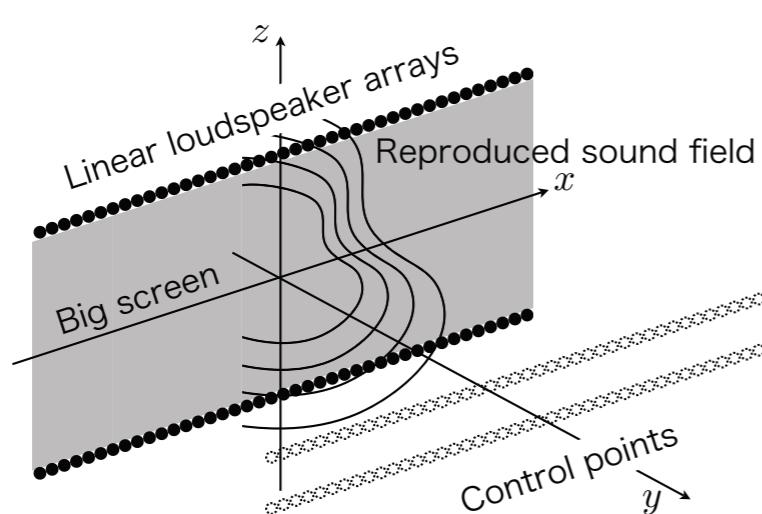
$$\tilde{\mathbf{G}}(k_{x,i})^+ = \tilde{\mathbf{F}}(k_{x,i}) = \boxed{\left[ \begin{array}{ccc} \tilde{F}_{1,1}(k_{x,i}) & \cdots & \tilde{F}_{N,1}(k_{x,i}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{F}_{1,M}(k_{x,i}) & \cdots & \tilde{F}_{N,M}(k_{x,i}) \end{array} \right]}$$

# Block diagram of proposed method

Multiple linear microphone arrays



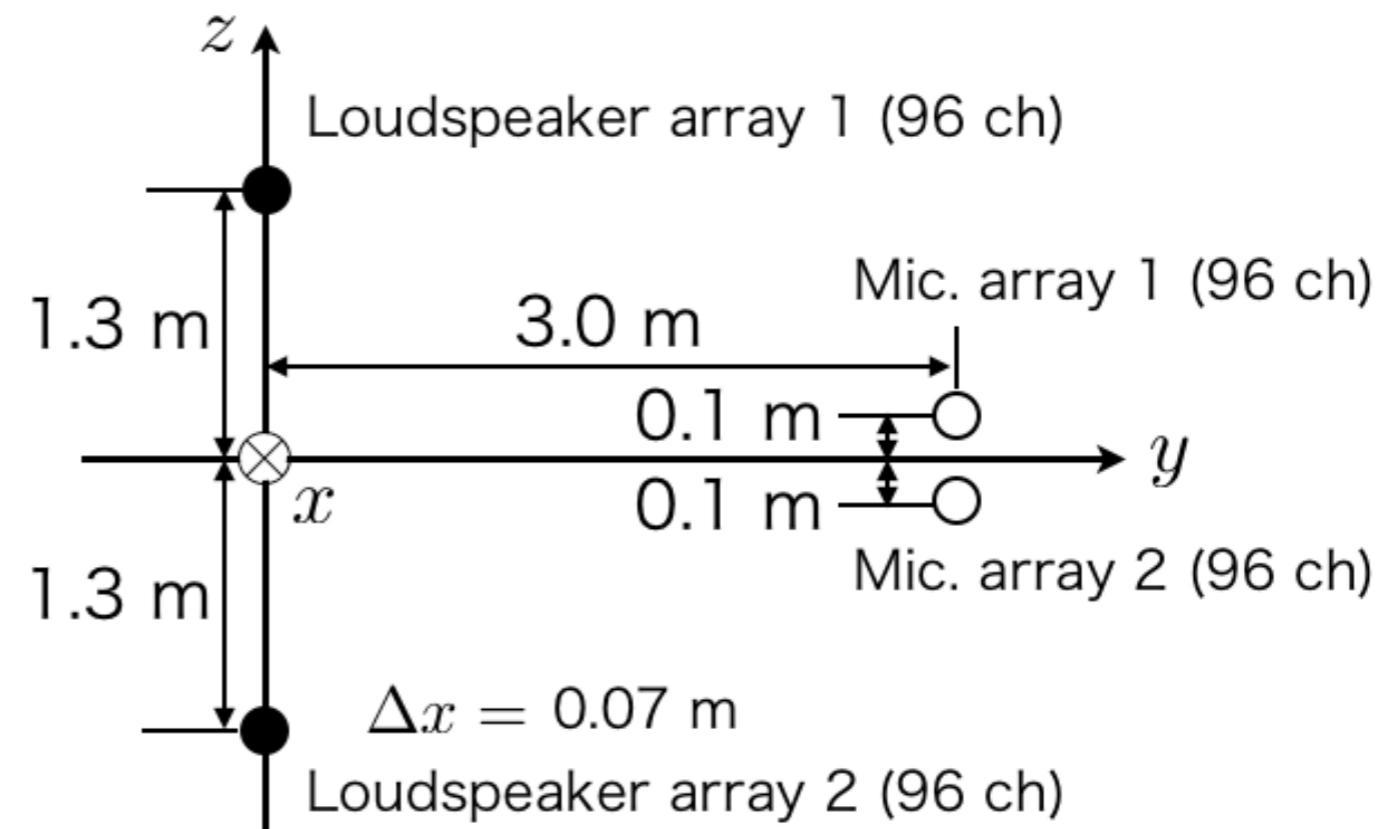
Multiple linear loudspeaker arrays



# Computer simulation

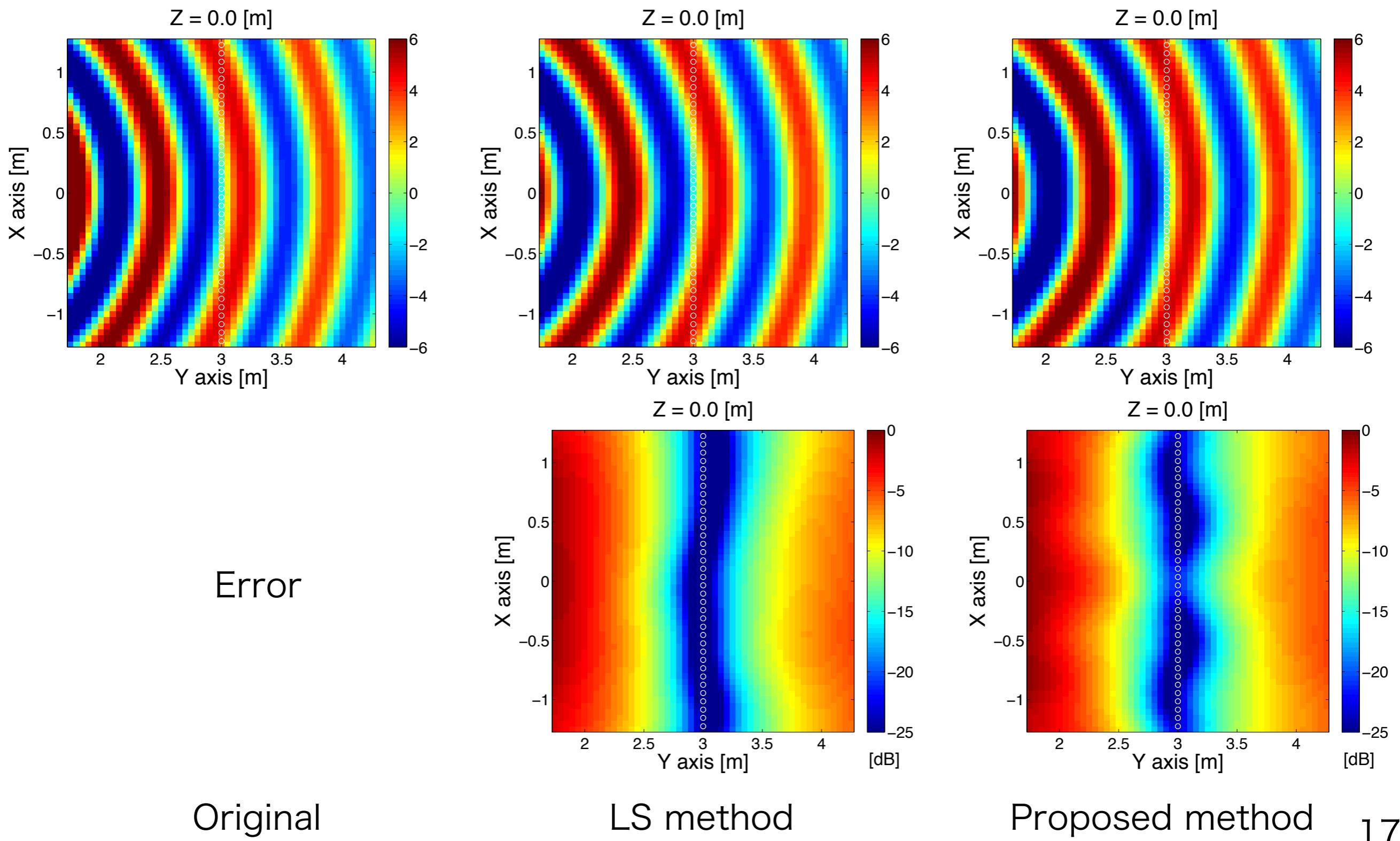
## ■ シミュレーション条件

- 解析周波数 : 500 Hz
  - 音速 : 343.26 m/s
  - 音源 : Monopole
  - 音源位置 : (0, -0.5, 0.5)
  - スピーカ間隔 : 0.07 m
  - スピーカ数 :  $96 \times 2 = 192$  ch
  - マイクロホン数 :  $96 \times 2 = 192$  ch
  - 時間平均二乗誤差

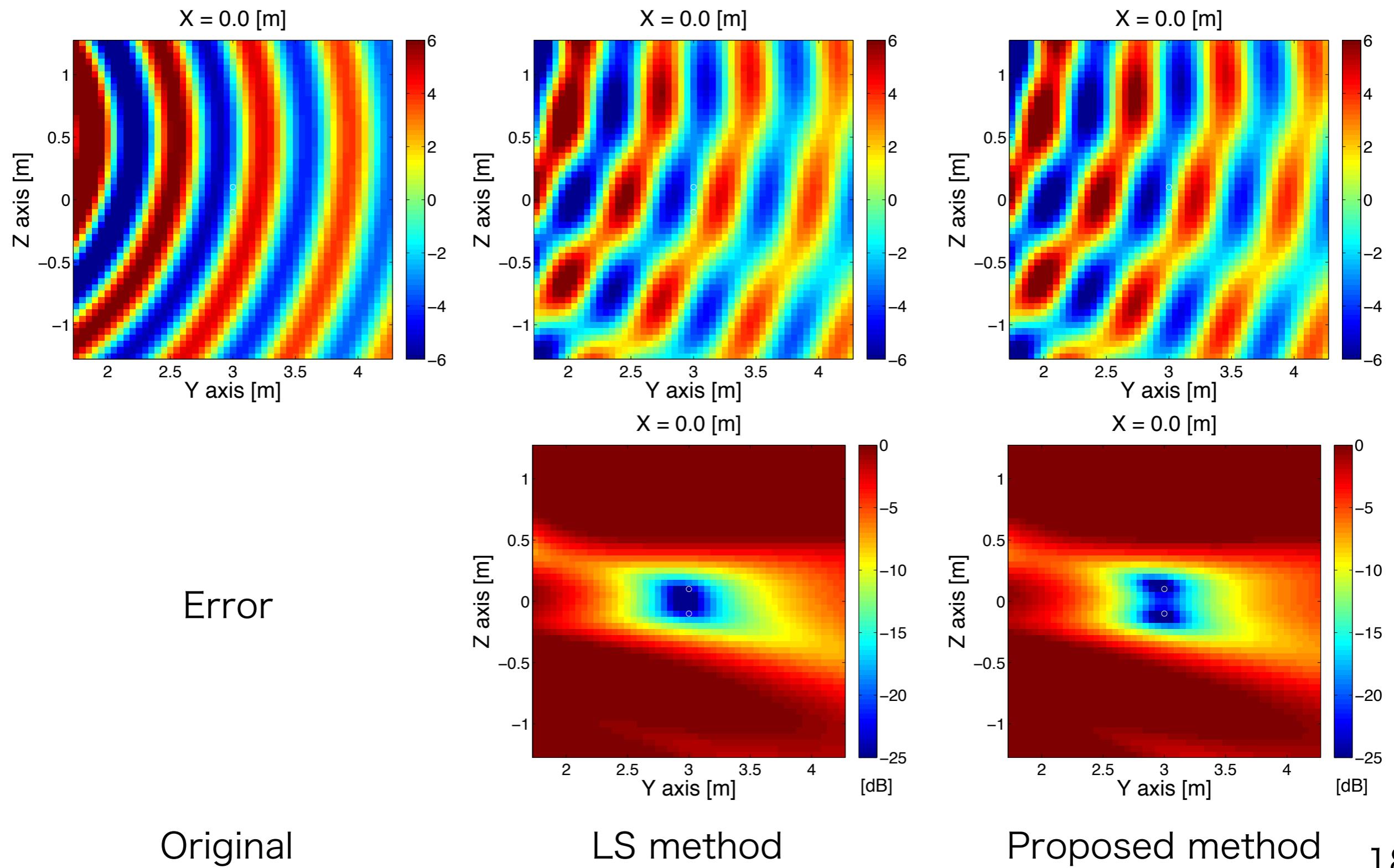


$$E(\mathbf{x}) = 10\log_{10} \frac{\sum_i |\hat{p}(t_i, \mathbf{x}) - p(t_i, \mathbf{x})|}{\sum_i |p(t_i, \mathbf{x})|^2}$$

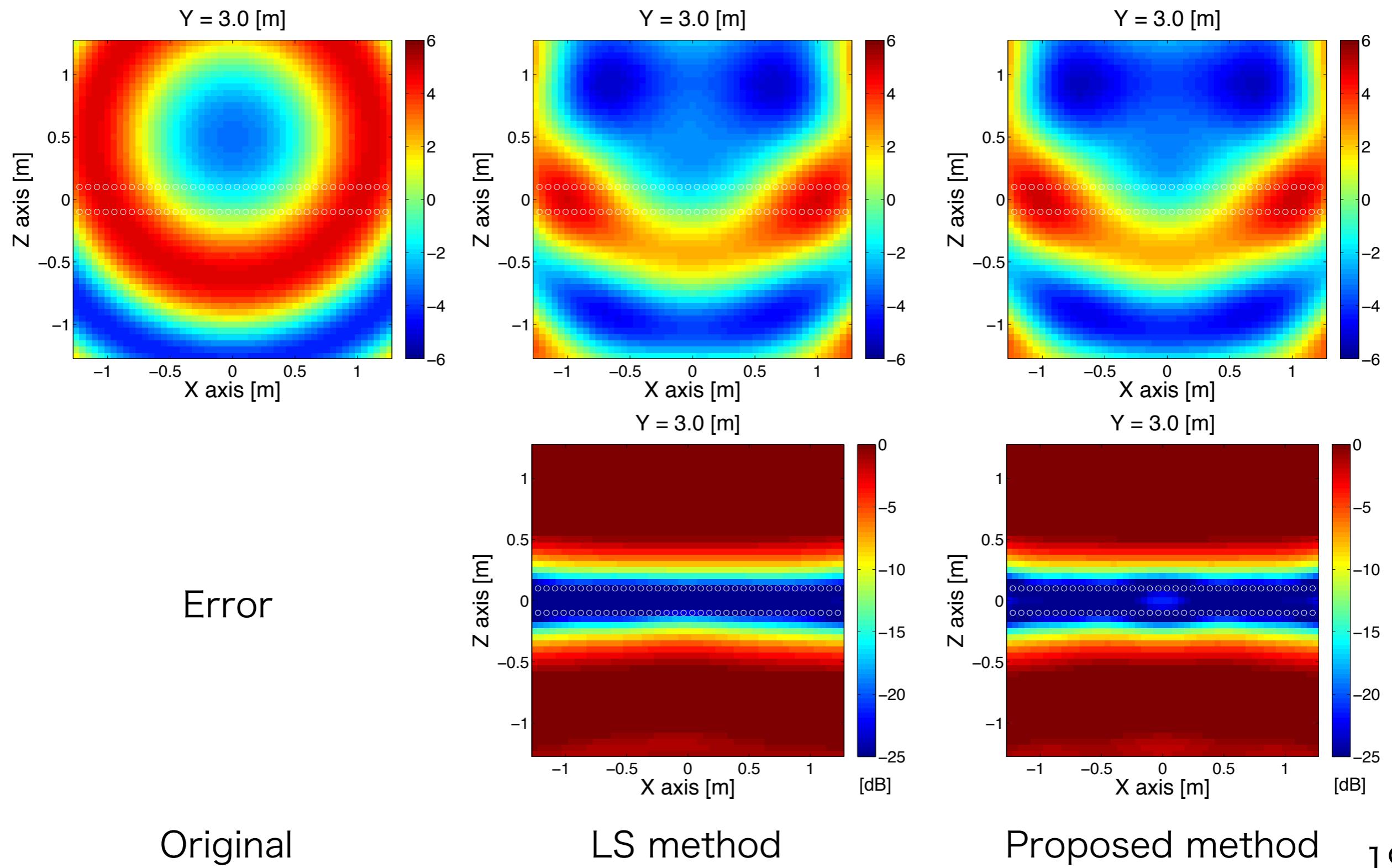
# Simulation results ( $z=0$ )



# Simulation results ( $x=0$ )



# Simulation results ( $y=3$ )



# Conventional LS vs Proposed

## ■ 変換フィルタの安定性

### ■ 変換フィルタ行列の大きさ

- \* 従来法 :  $MK \times NK$

- \* 提案法 :  $M \times N$

### ■ 条件数

- \* 従来法 :  $20\log_{10}\{\text{cond}(\mathbf{G}(\omega))\}$

- \* 提案法 :  $20\log_{10}\{\text{cond}(\tilde{\mathbf{F}}(k_{x,i}))\}$

→ 提案法が格段に小さい

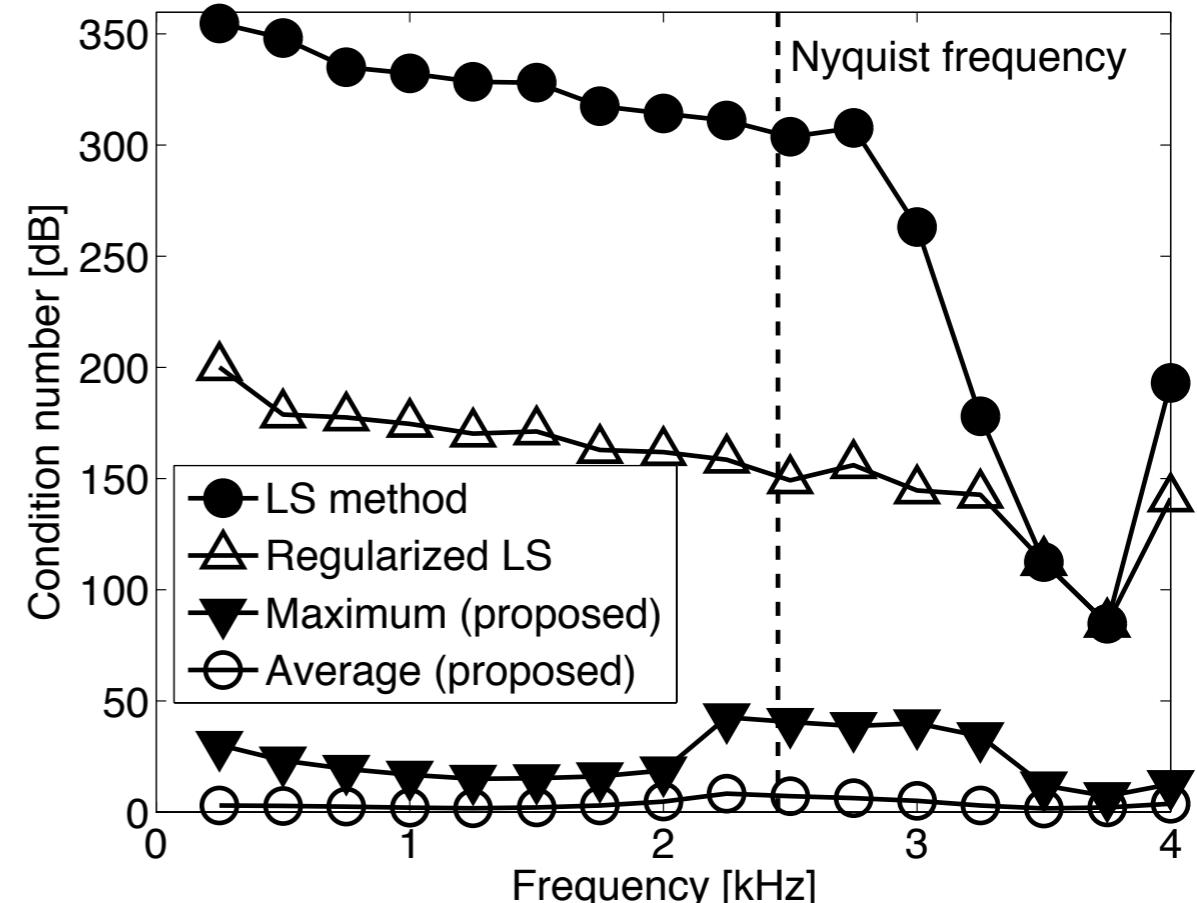
## ■ 変換フィルタ導出の計算量

### ■ 直線アレイの数 $M, N \ll$ 各アレイの素子数 $K$

- \* 従来法 : 逆行列の演算  $O(K^2)$

- \* 提案法 : 空間フーリエ変換(FFT)  $O(K\log_2 K)$

→  $K$ が大きい場合は提案法の方が演算量が小さい



# Concluding remarks

---

- 複数平行直線アレイを用いた音空間の収録と再生
  - 時空間領域クロストークキャンセラの提案
    - \* 定式化
  - 計算機シミュレーション
    - \* 従来法よりも安定かつ高速な変換フィルタを実現
- 今後の予定
  - 実環境での測定
  - 音像定位実験