2014.3.10 ASJ Annual Meeting Spring 2014@Nihon Univ.

一般化スペクトル除算法に基づく 音場収録・再現

Sound field recording and reproduction
based on generalized discrete spectral division method

○岡本 拓磨，榎本 成悟，西村 竜一

情報通信研究機構

Presentation contents

- Introduction
- Problem
- Purpose
- Basic theory
  - Spatial Fourier transform
  - Spectral division method (SDM)
  - Discrete SDM
- Proposed method
  - Generalized discrete SDM
  - Computer simulations
  - Discussion
- Concluding remarks
- Announcements

Introduction

- 大画面立体映像システムに最適な3次元音場の収録・再現

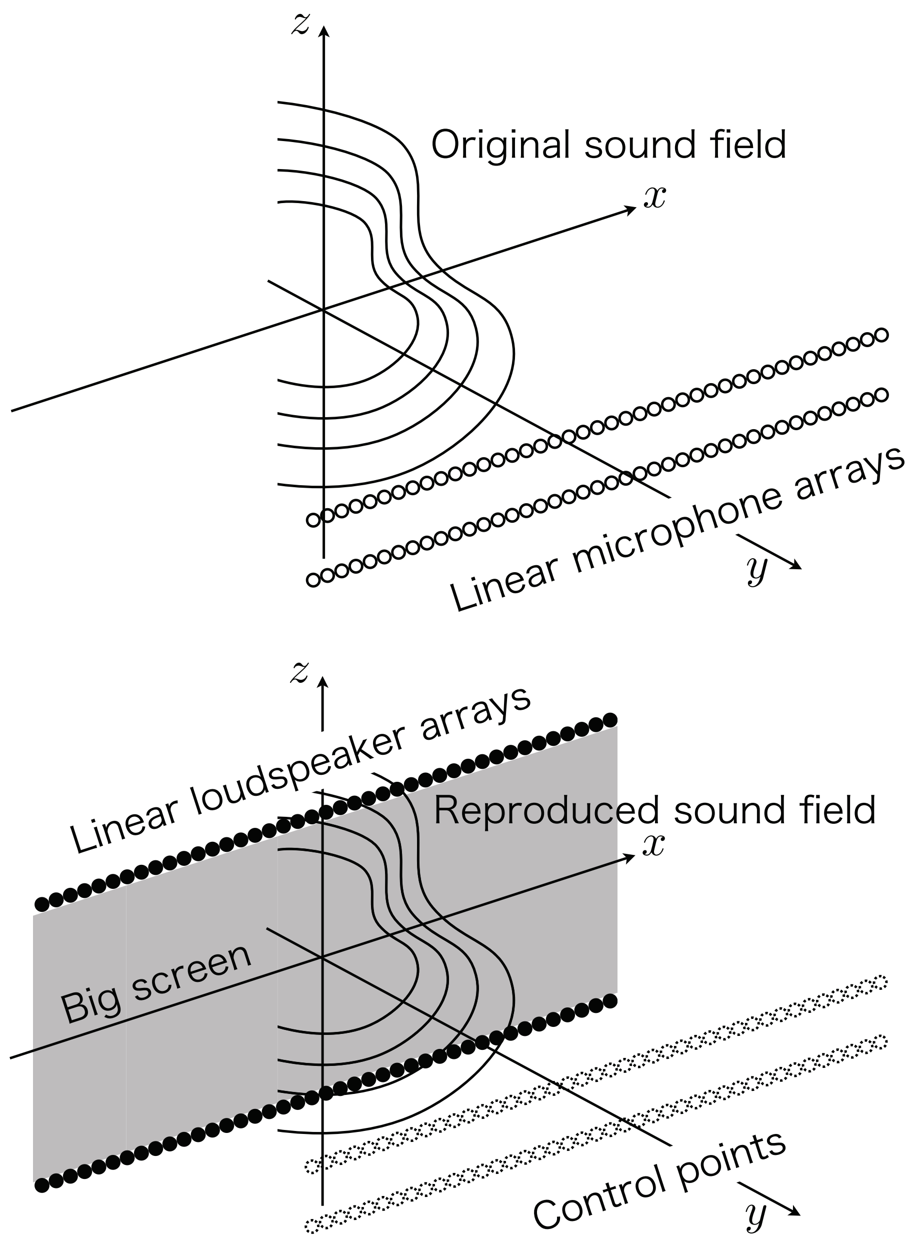
200インチ裸眼立体視ディスプレイ
@グランフロント大阪
3/17(月)再開予定

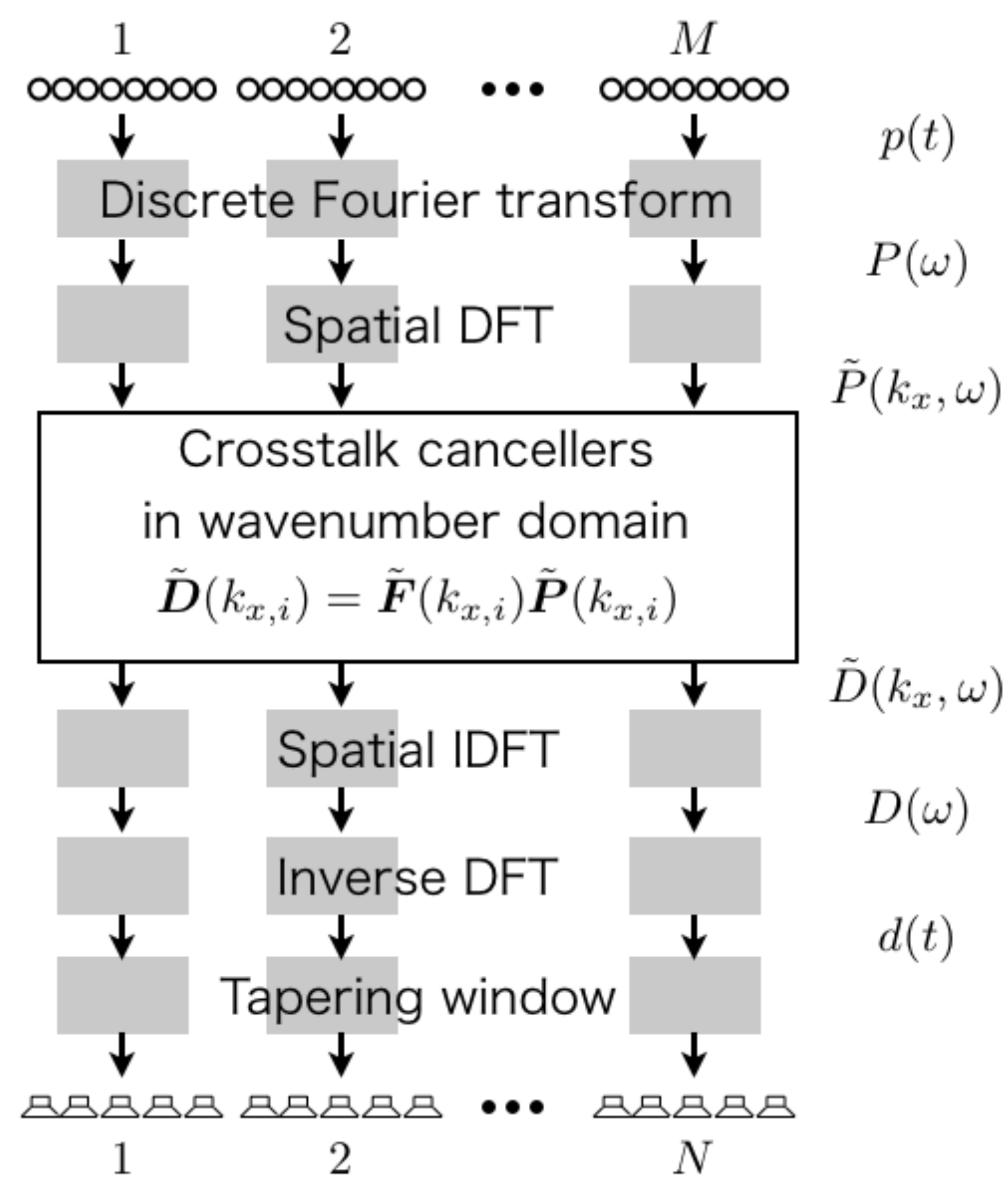
大画面実験室
@NICTけいはんな

  - 仮想音源レンダリング
  - 実環境音場収録・再現

Previous works

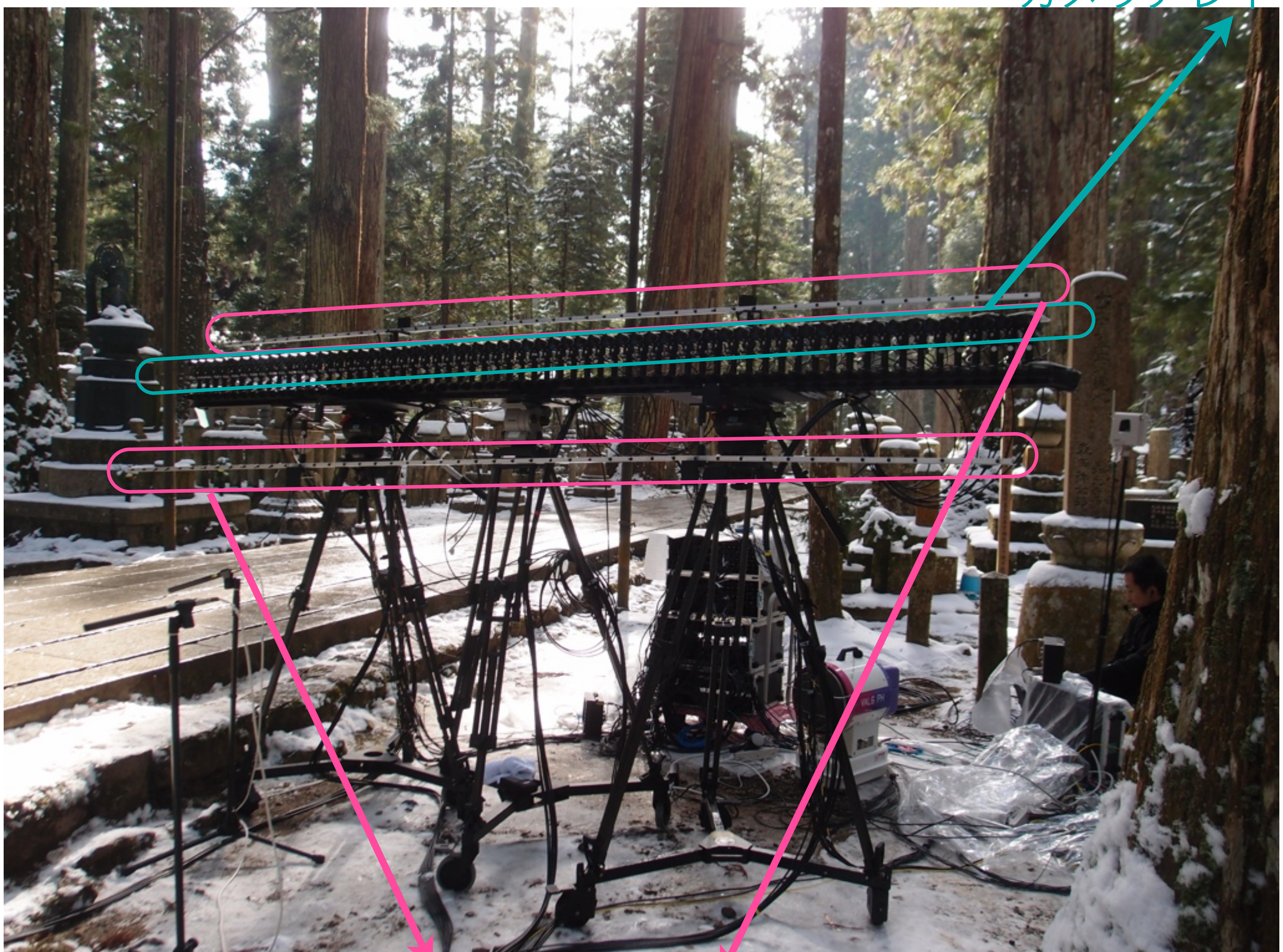
- 複数平行直線アレイを用いた音場収録・再生
  - 岡本ら，時空間周波数領域クロストークキャンセラを用いた複数平行直線アレイによる音空間収録と再生，信学技報, Oct. 2013.





Recording system@Koyasan (2012/12/14)

カメラアレイ (64 ch)



2直線マイクロホンアレイ (96 ch)

Problem

- マイクロホン / スピーカアレイの素子数，素子間隔
  - これまでの検討
    - DFTを用いるためにマイクロホン / スピーカアレイの素子数，間隔は等しい
  - 実際のケース
    - マイクロホンとスピーカの数や間隔は環境に依存するため同じではない場合の方が多い
    - スピーカよりマイクロホンの方が素子の大きさが小さい
    - 空間分解能を上げるためにもマイクロホンはできるだけ密に配置したい

48ch × 2，マイクロホン間隔：0.072 m

41ch × 2，スピーカ間隔：0.11 m

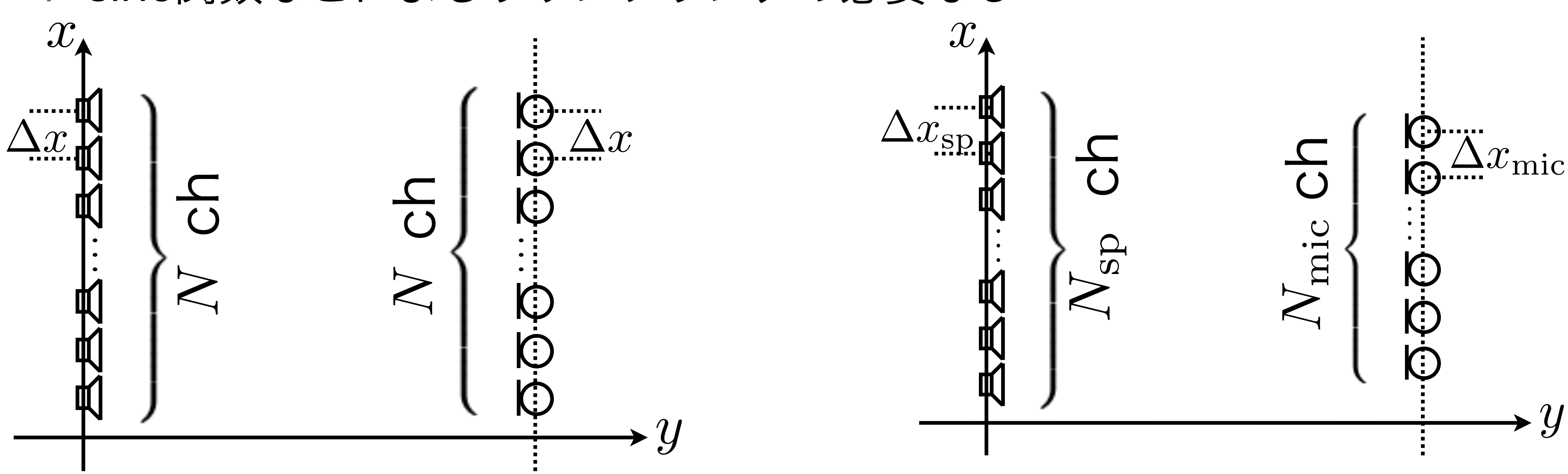
→ DFTを適用できない

Purpose

- 平面や直線上のマイクロホン / スピーカアレイの素子数や素子間隔が異なる場合の音場収録・再現法の提案
  - High order Ambisonics(HOA)では一般的&大きなメリットの1つ

$$D(\phi,\theta,\omega) = \frac{1}{2\pi r_0}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n}\sqrt{\frac{2n+1}{4\pi}}\frac{\mathring{P}_n^m(r_{\mathrm{ref}},\omega)}{G_n^0(\omega)j(kr_{\mathrm{ref}})}Y_n^m(\phi,\theta)$$

  - 各マイクロホンの受信信号から各スピーカの駆動信号を直接算出
    - sincl関数などによるリサンプリングの必要なし



(a) Conventional (b) Proposed method

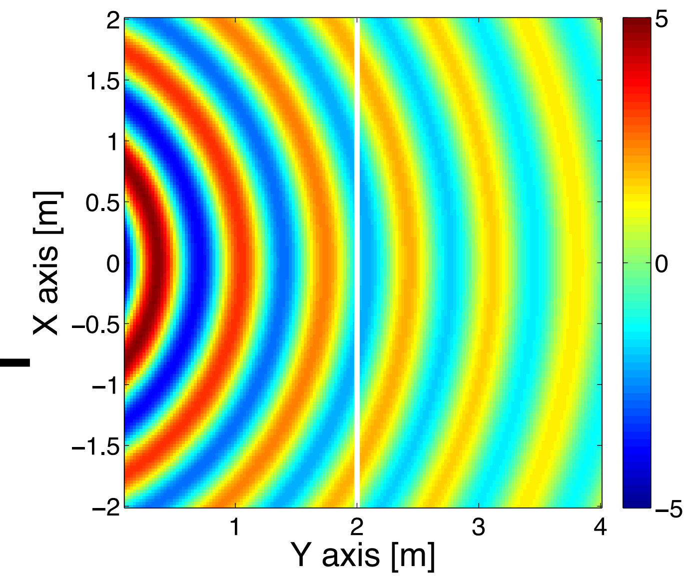
(平面 / 直線ならば)任意の素子間隔，素子数の収録データを再生可能

Basic theory (1)

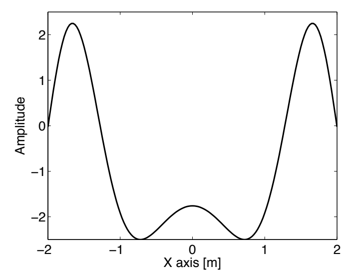
- 空間フーリエ変換
  - 定義

$$\tilde{P}(k_x, y, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y, 0, \omega) e^{jk_x x} dx$$

  - 波面で見てみる

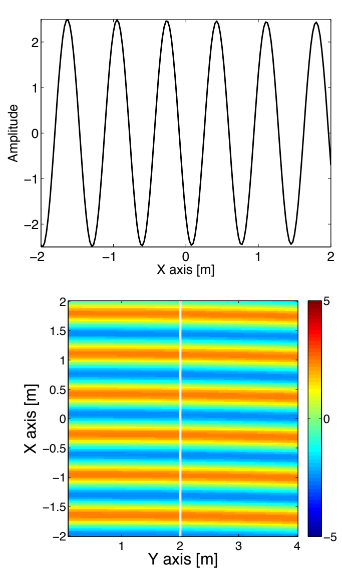


500 Hz点音源

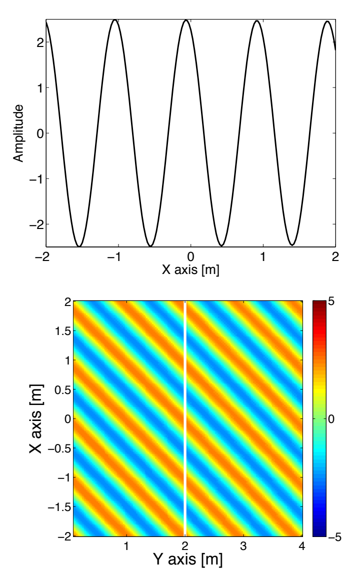


フーリエ変換

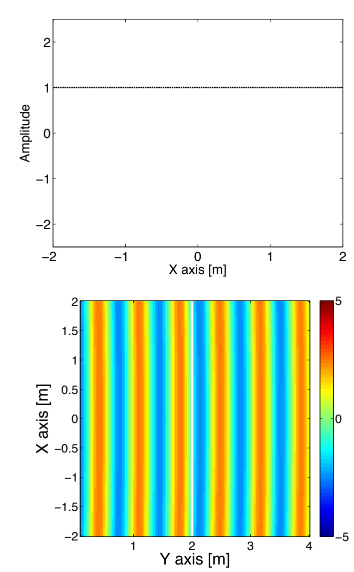
$k_x = -\omega/c$



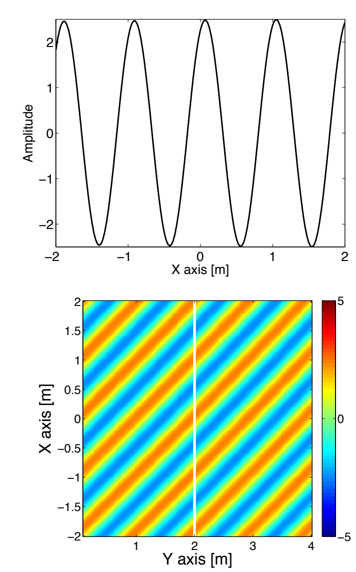
$k_x = -\omega/2c$



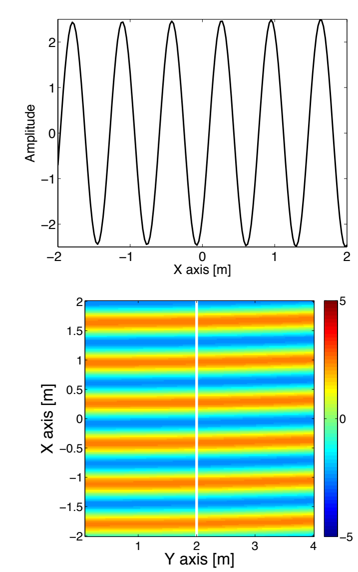
$k_x = 0$



$k_x = \omega/2c$



$k_x = \omega/c$



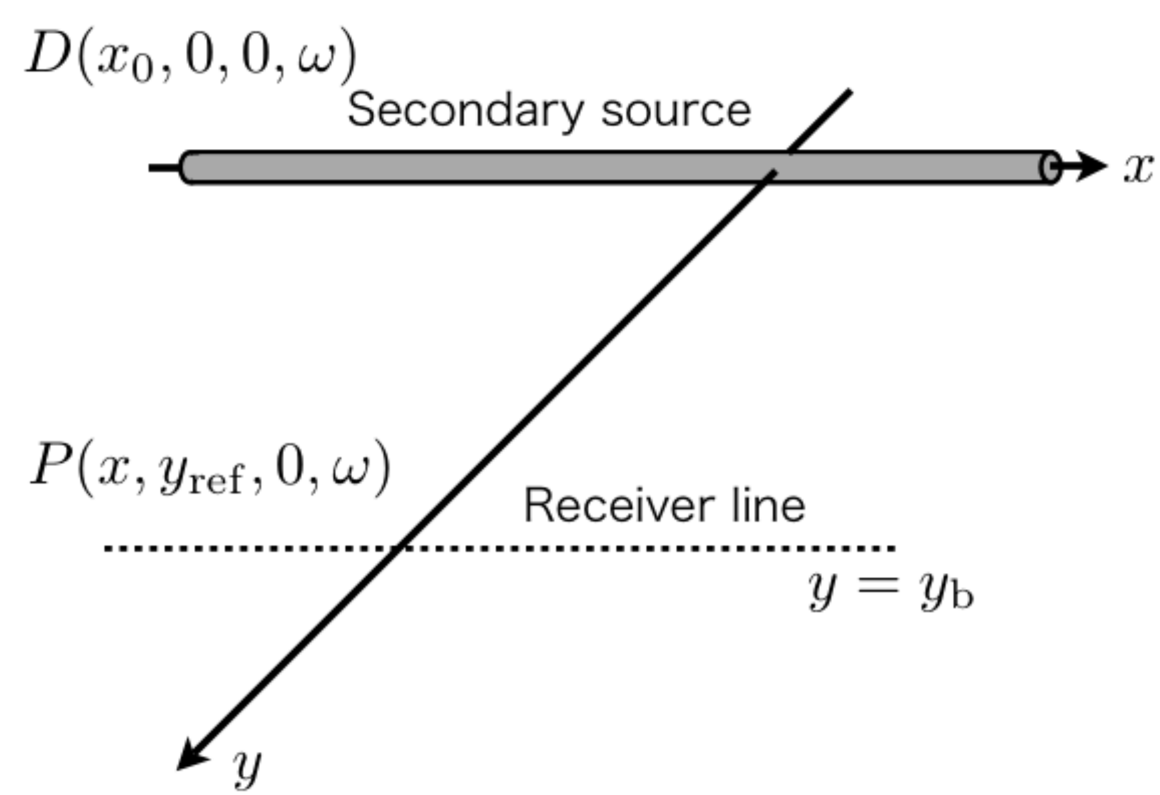
波面を各方向からの平面波に分解(直交展開)する

Basic theory (2)

- 直線2次音源を用いた水平面音場再現
  - Spectral division method (SDM)　J. Ahrens *et al.* 2010.
    - 直線アレイによる音場(Single layer potential)

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

→ 時間周波数領域では畳み込み



- x 軸方向に空間フーリエ変換

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

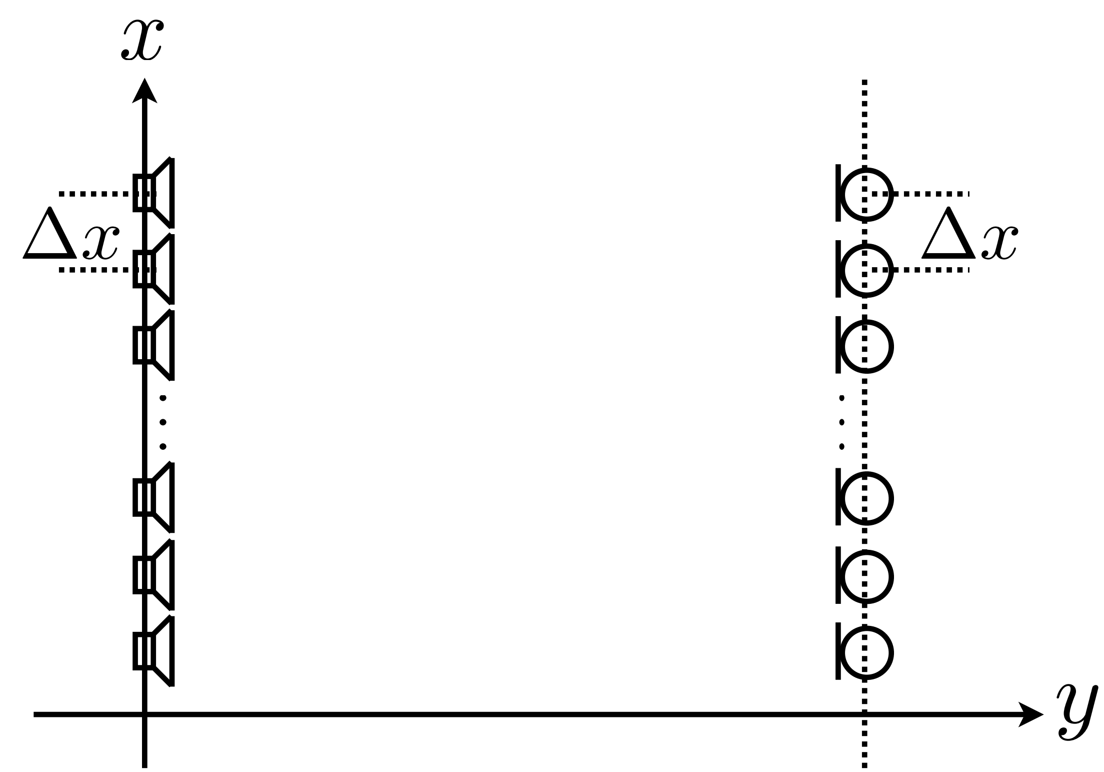
→ 時空間周波数領域ではかけ算

- 時空間周波数(=波数)領域の各スピーカの駆動信号

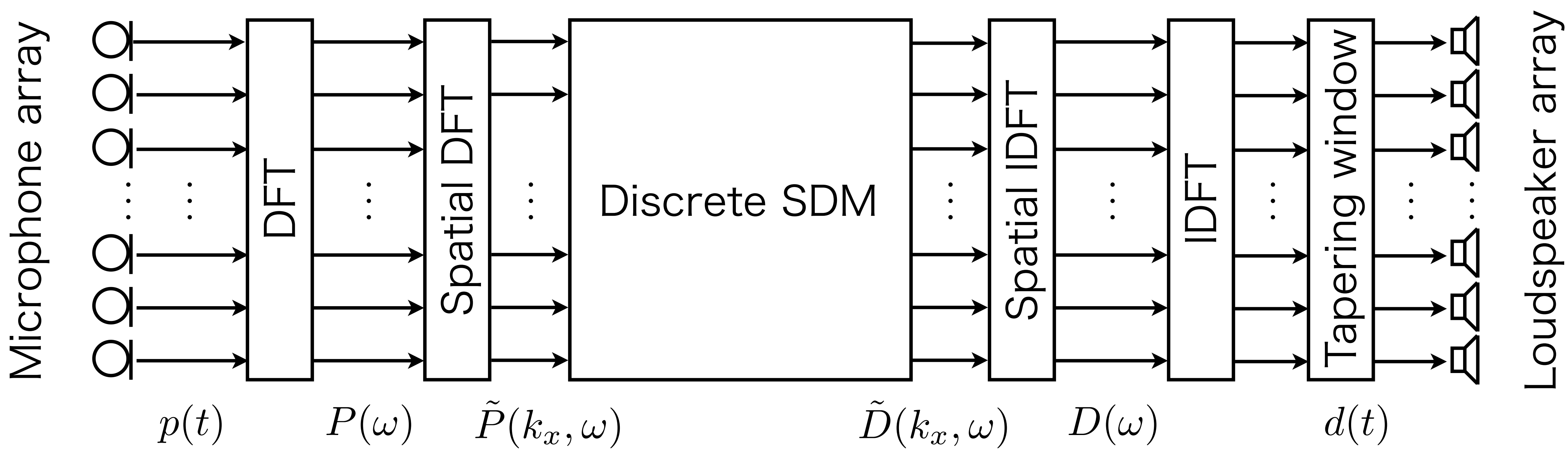
$$\tilde{D}(k_x,\omega) = \frac{\tilde{P}(k_x,y_{\mathrm{ref}},0,\omega)}{\tilde{G}(k_x,y_{\mathrm{ref}},0,\omega)}$$

Basic theory (3)

- 離散SDM
  - 実装のためには
    - 離散化
    - 有限長での打ち切りが必須
  - DFTによる離散化



$$\tilde{D}(k_{x,i},\omega) = \frac{\tilde{P}(k_{x,i},y_{\mathrm{ref}},0,\omega)}{\tilde{G}(k_{x,i},y_{\mathrm{ref}},0,\omega)} \qquad i = 1, 2, \cdots L$$



- マイクロホン / スピーカアレイの素子数，素子間隔は等しいことが前提

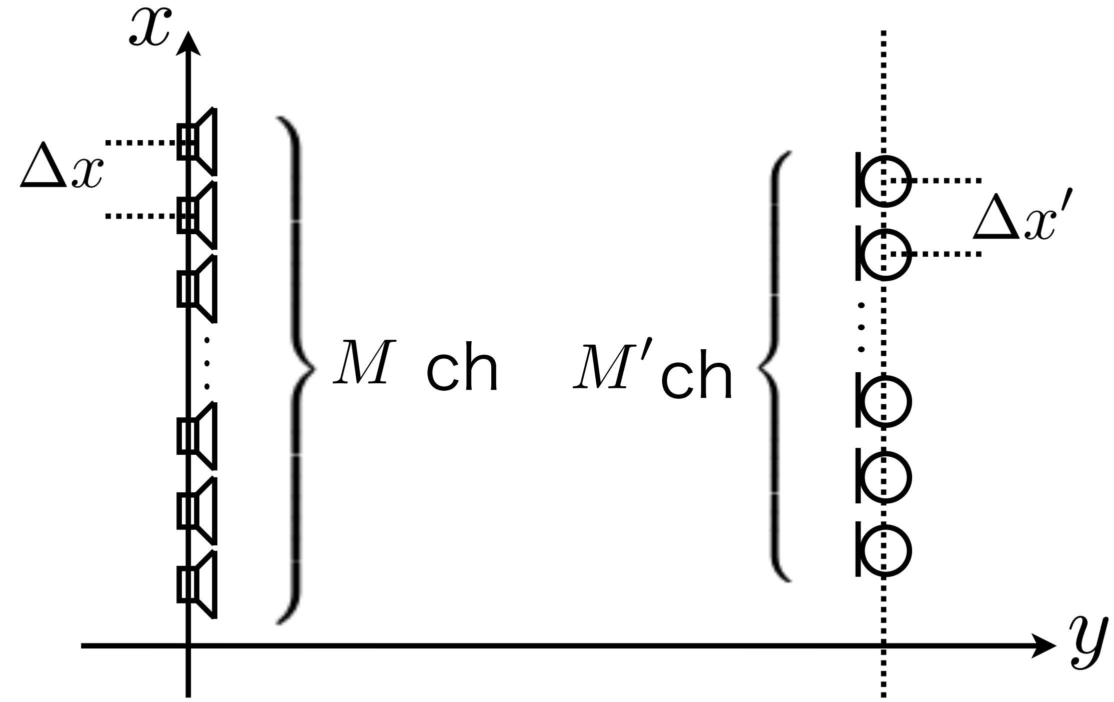
Proposed method (1)

- 一般化離散SDM(直線アレイを用いた場合)

1. 受信信号をマイクロホン間隔 $\Delta x'$ で離散化
   (ただしこの時点でのアレイ長は ∞)

$$\tilde{P}(k_x, y_{\mathrm{ref}}, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y_{\mathrm{ref}}, 0, \omega) e^{jk_x x} dx$$

$$\approx \sum_{m'=-\infty}^{\infty} P(m'\Delta x', y_{\mathrm{ref}}, 0, \omega) e^{jk_x m'\Delta x'} \Delta x'$$



2. この時の駆動信号(まだ連続値)

$$\tilde{D}(k_x, \omega) = \frac{\tilde{P}(k_x, y_{\mathrm{ref}}, k_z, \omega)}{\tilde{G}_x(k_x, y_{\mathrm{ref}}, 0, \omega)} \approx \frac{\Delta x'}{\tilde{G}_x(k_x, y_{\mathrm{ref}}, 0, \omega)} \sum_{m'=-\infty}^{\infty} P(m'\Delta x', y_{\mathrm{ref}}, 0, \omega) e^{jk_x m'\Delta x'}$$

3. $m = -M/2, -M/2+1, \cdots, M/2-1,\ \Delta k_x = \dfrac{2\pi}{\Delta x M}$ (=スピーカアレイ素子間隔, 個数で)離散化，打ち切り

$$\tilde{D}(k_x, \omega) \approx \tilde{D}(m\Delta k_x, \omega) = \frac{\Delta x'}{\tilde{G}_x(m\Delta k_x, y_{\mathrm{ref}}, 0, \omega)} \cdot \sum_{m'=-\infty}^{\infty} P(m'\Delta x', y_{\mathrm{ref}}, 0, \omega) e^{jm\Delta k_x m'\Delta x'}$$

Proposed method (2)

- 続：一般化離散SDM(直線アレイを用いた場合)

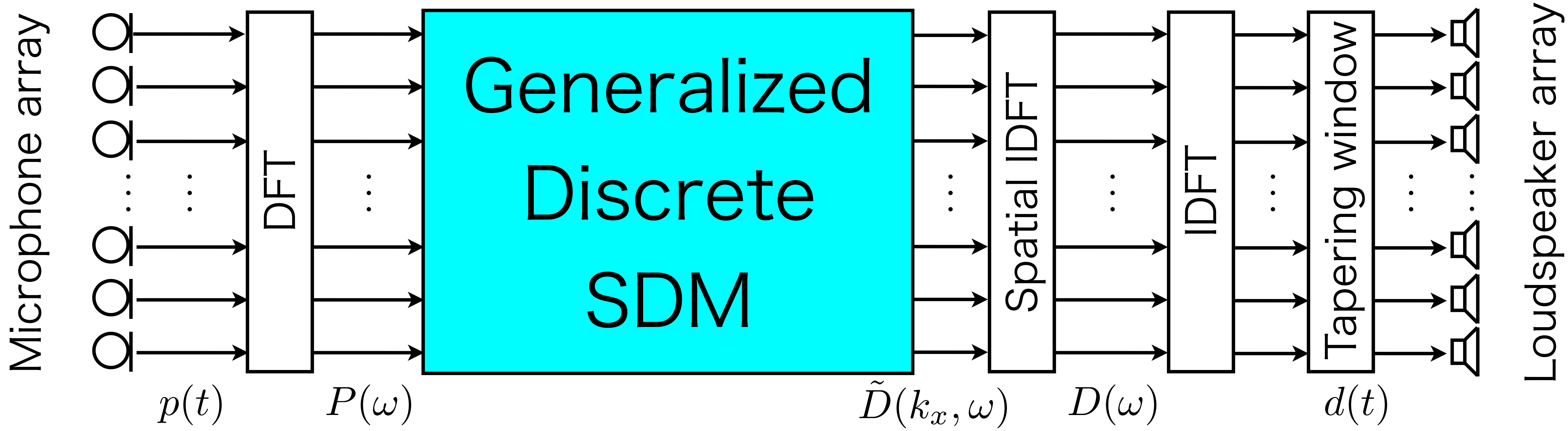
4. マイクロホン個数 $m' = -M'/2, -M'/2+1, \cdots, M'/2-1$ で有限長打ち切り

$$\tilde{D}(m\Delta k_x, \omega) \approx \frac{\Delta x'}{\tilde{G}_x(m\Delta k_x, y_{\mathrm{ref}}, 0, \omega)} \sum_{m'=-M'/2}^{M'/2-1} P(m'\Delta x', y_{\mathrm{ref}}, 0, \omega) e^{jm\Delta k_x m' \Delta x'}$$

マイクロホン間隔 $\Delta x' >$ スピーカ間隔 Δx の場合

$$\tilde{D}(m\Delta k_x, \omega) = 0 \qquad \text{if } \frac{\pi}{\Delta x'} < |m\Delta k_x|$$

← 空間的折り返し歪み防止

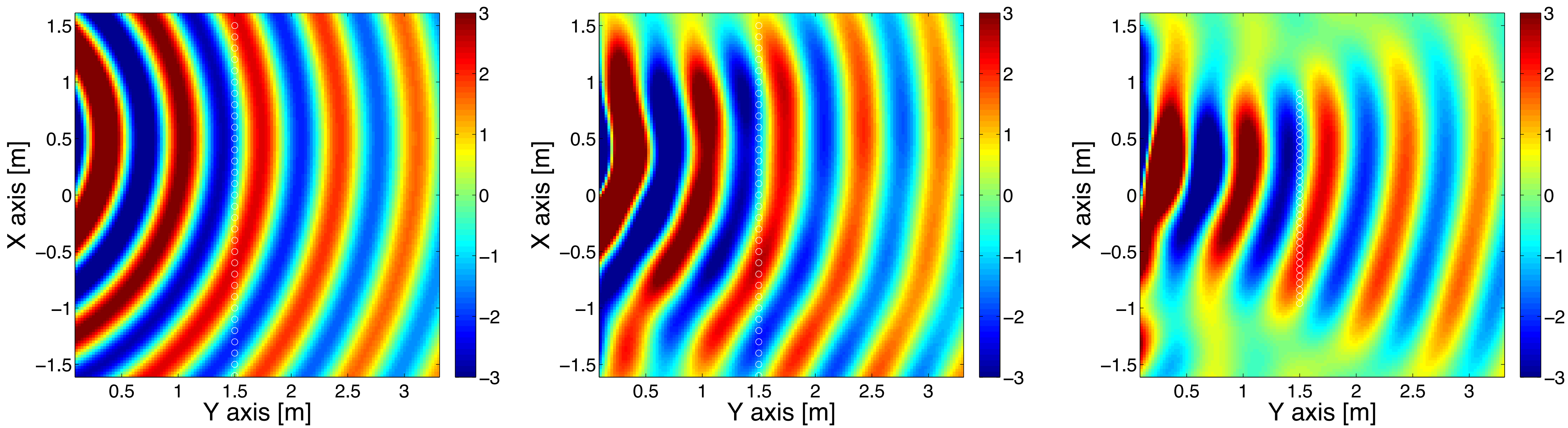


- 複数アレイの方法(岡本ら, 2013)にもそのまま適用可能

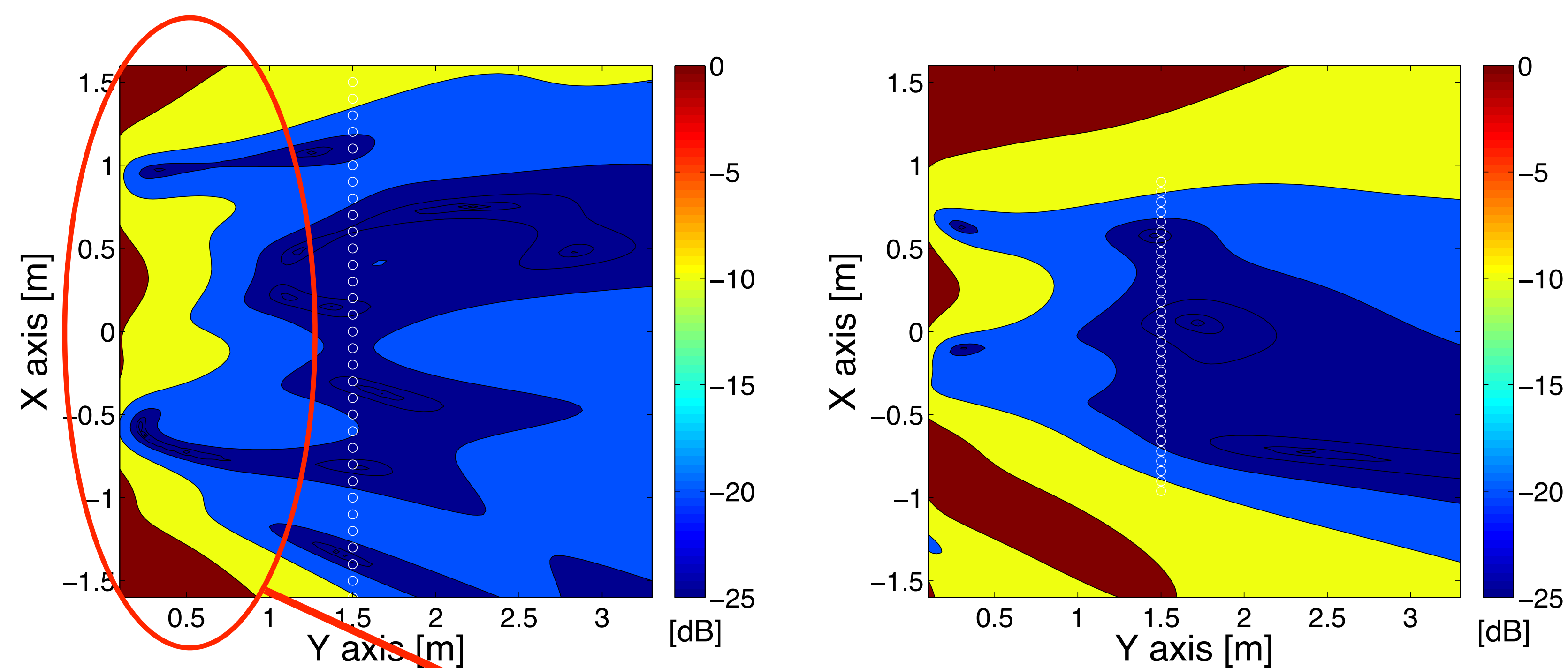
Computer simulation

- 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：[0.5 –1, 0]
  - スピーカ間隔：0.1 m
  - マイクロホン間隔
    - 離散SDM：0.1 m
    - 一般化離散SDM：0.06 m
  - スピーカ数：32 ch
  - マイクロホン数：32 ch
  - 時間平均二乗誤差： $E(\boldsymbol{x}) = 10\log_{10}\dfrac{\sum_i |\hat{p}(t_i,\boldsymbol{x}) - p(t_i,\boldsymbol{x})|^2}{\sum_i |p(t_i,\boldsymbol{x})|^2}$
  - Signal to distortion ratio (SDR)： $SDR = 10\log_{10}\dfrac{\sum_i \sum_{\boldsymbol{x}} |p(t_i,\boldsymbol{x})|^2}{\sum_i \sum_{\boldsymbol{x}} |\hat{p}(t_i,\boldsymbol{x}) - p(t_i,\boldsymbol{x})|^2}$

Reproduction results ($f = 500\ \mathrm{Hz}$)



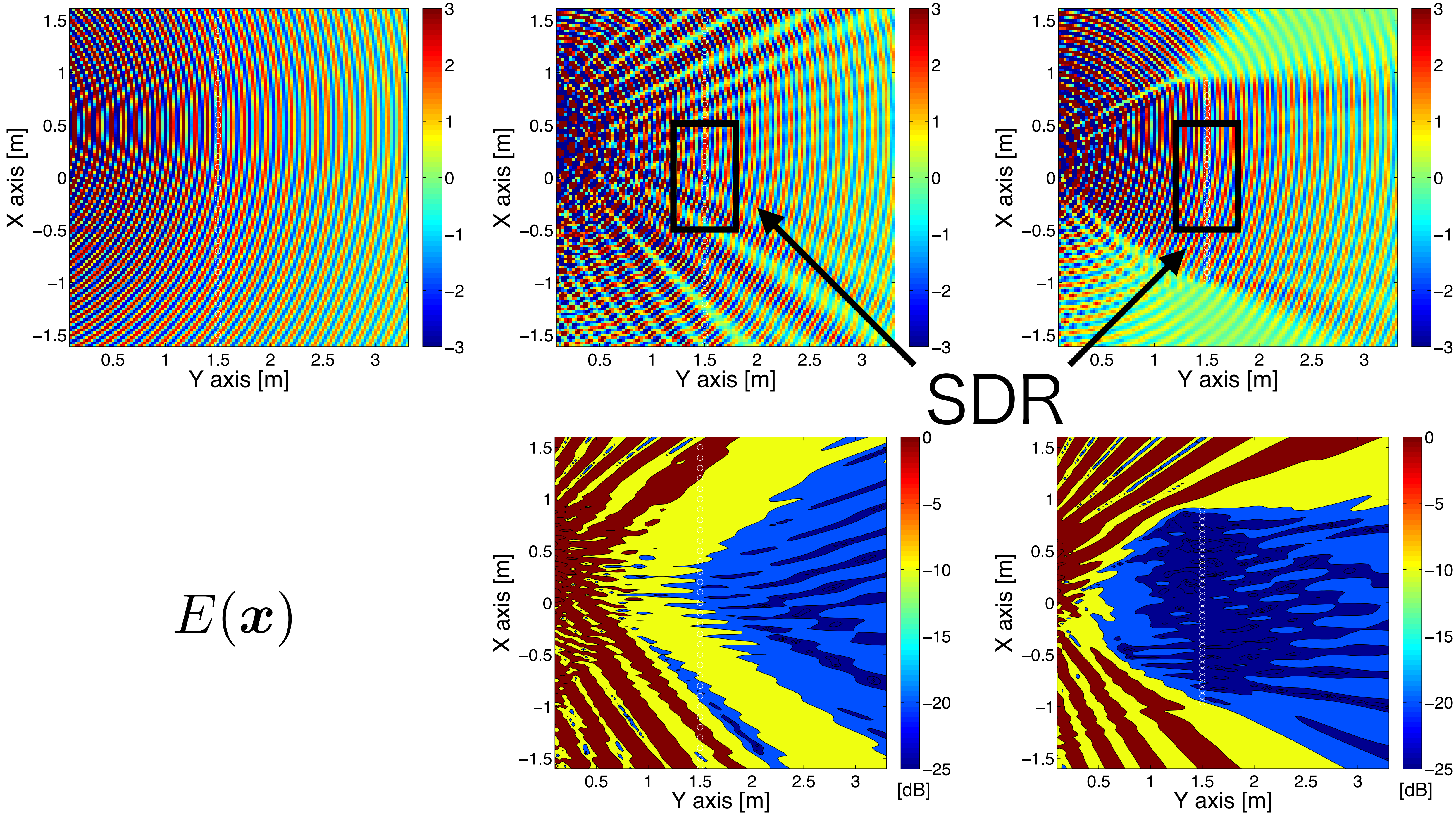
$E(\boldsymbol{x})$



2-P4-21

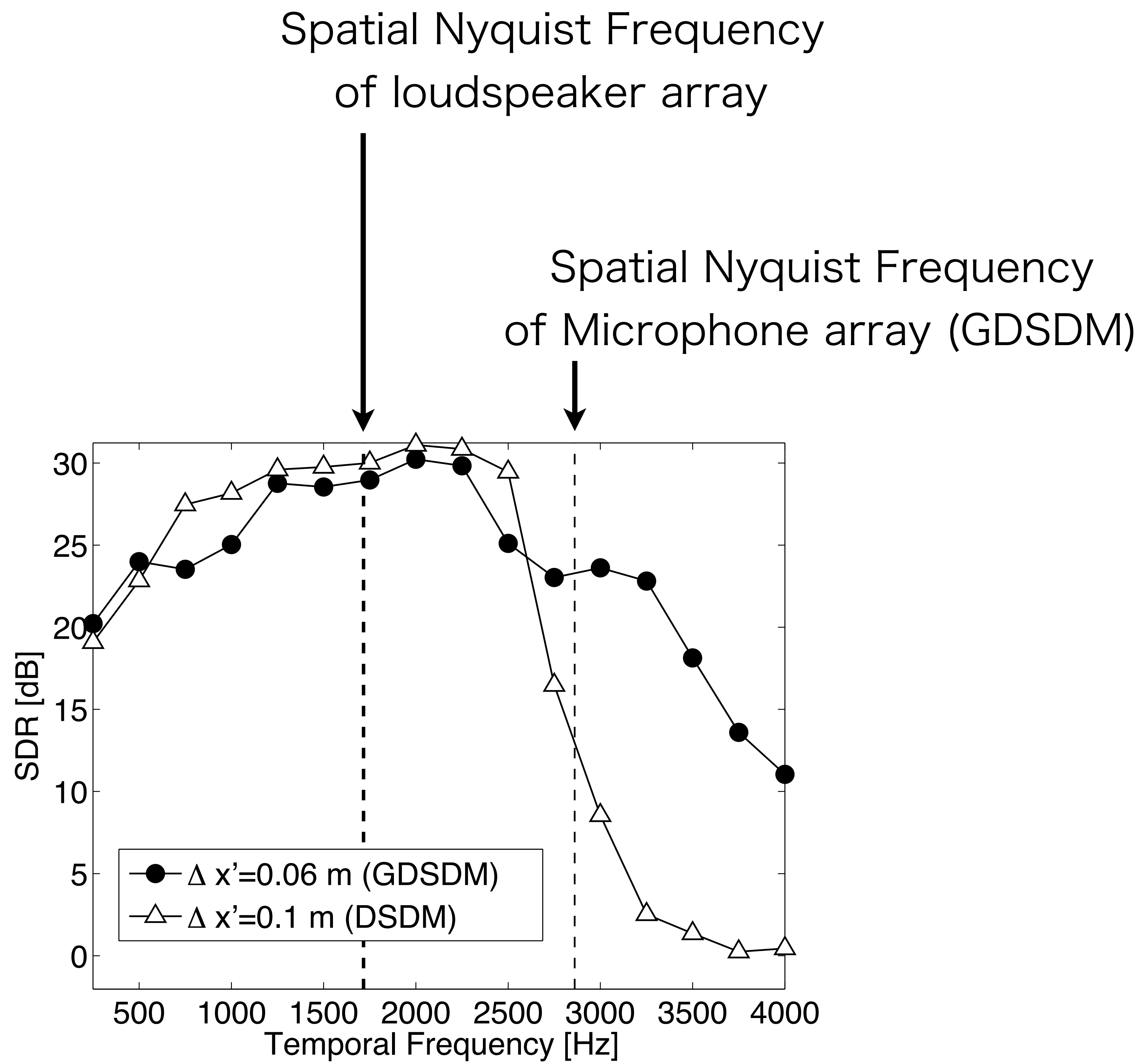
Original DSDM GDSDM

Reproduction results ($f = 3000\ \mathrm{Hz}$)



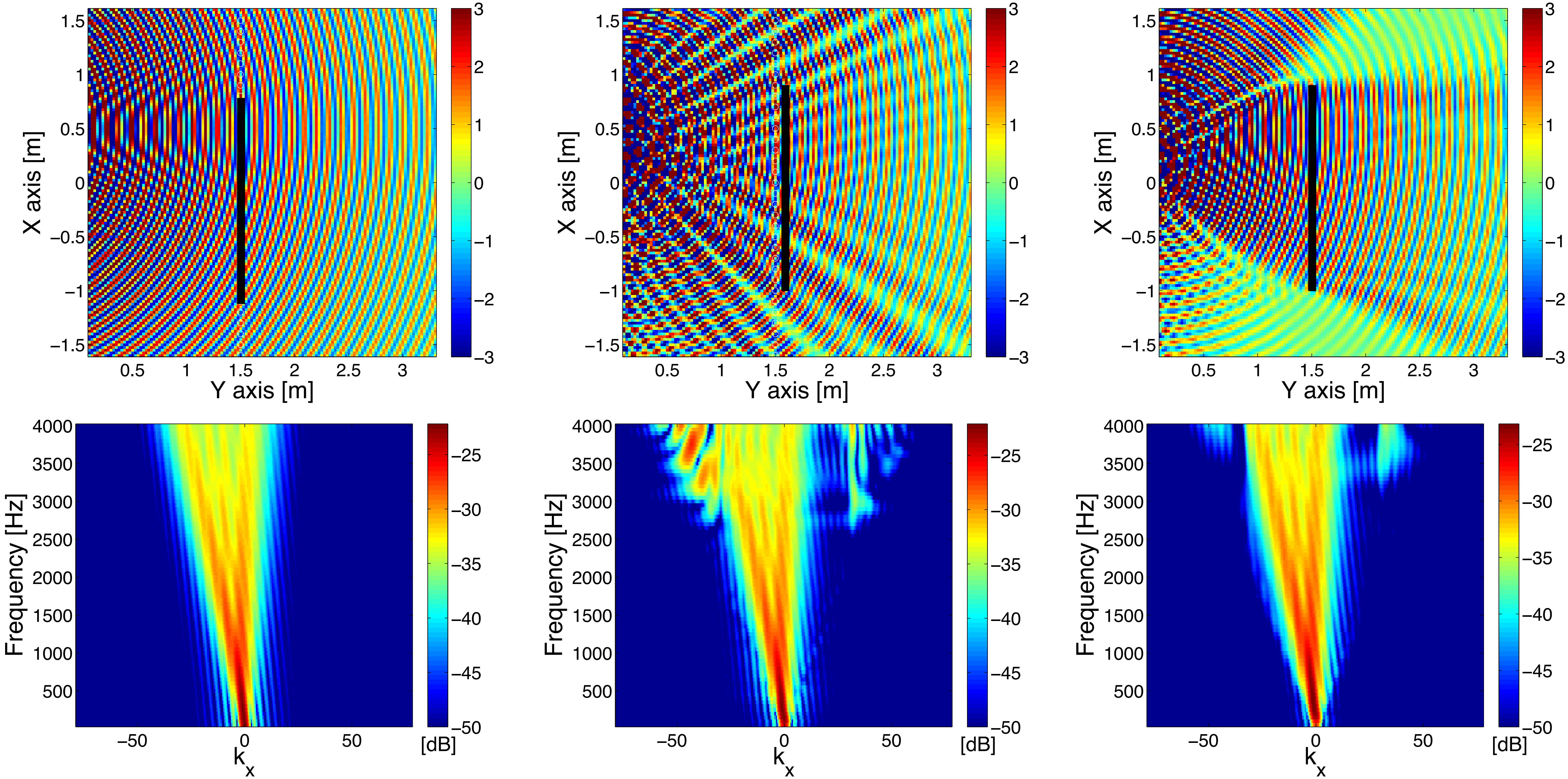
Original DSDM GDSDM

Result of SDR



Discussion(1)

- 波数スペクトルの比較



Original　　DSDM　　GDSDM

Concluding remarks

- 一般化離散SDMに基づく音場収録と再生
  - 一般化離散SDMの提案
    - 定式化
    - 計算機シミュレーション

(平面 / 直線ならば)任意の素子間隔，素子数の収録データを再生可能に

マイクロホンアレイ間隔を小さくすると再現精度が向上する場合がある