2013.12.13 EA@Satellite plaza of Kanazawa Univ. in Kanazawa

波数領域空間フィルタリングに基づく直線スピーカアレイを用いたマルチスポット再生

Multiple sound spots generation by spatial filtering in wavenumber domain using a linear loudspeaker array

岡本 拓磨

情報通信研究機構

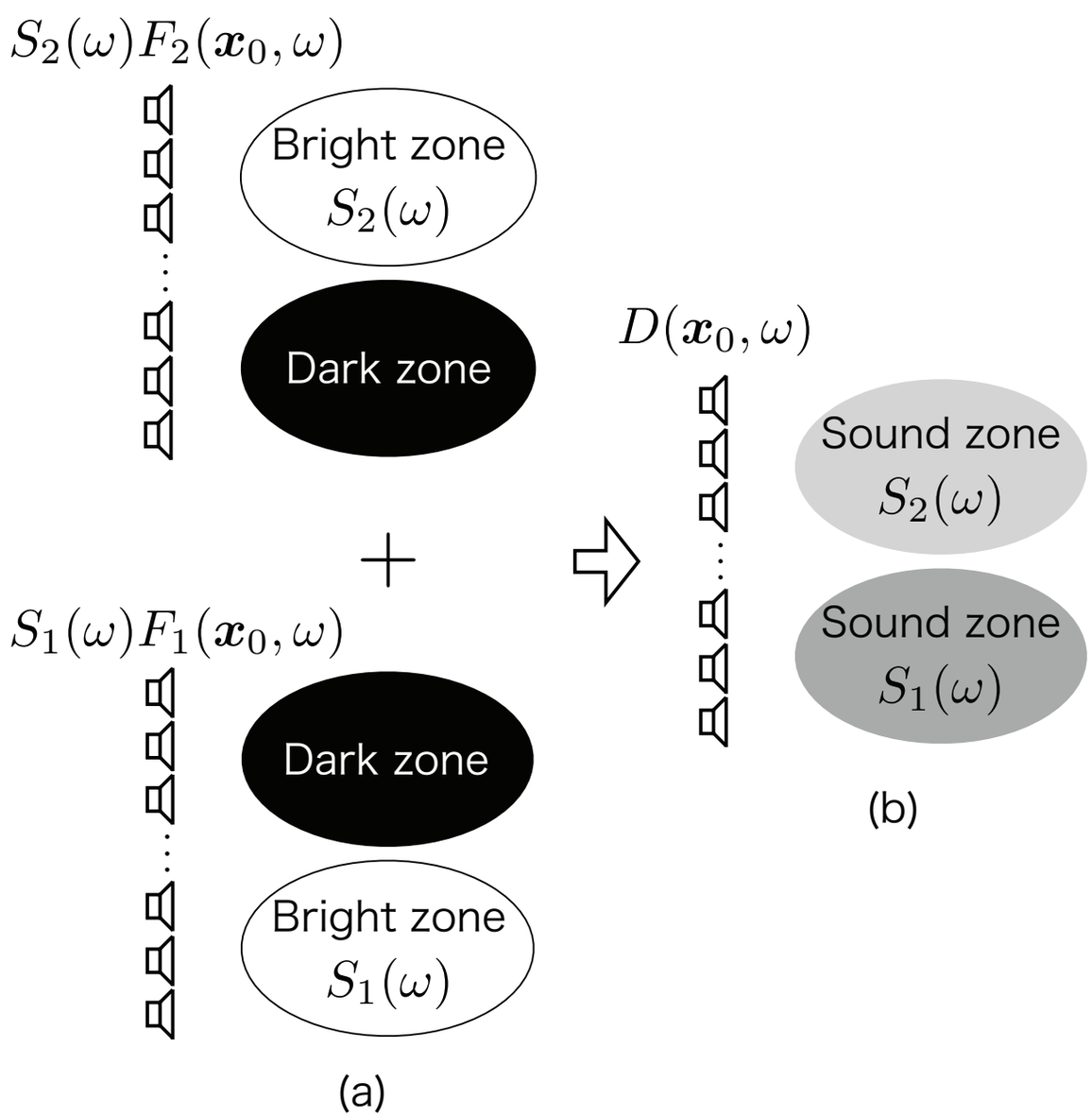
Presentation contents

- Introduction
  - Acoustically bright zone or multi-zones generation using loudspeakers
- Purpose
  - Conventional methods and their problems
  - Novel approach
- Proposed method
  - Basic theory : Spectral division method (SDM)
  - Analytically-derived spatial filters in wavenumber domain
  - Computer simulations
  - Demo
- Concluding remarks

Introduction

- 多チャネルスピーカを用いた局所再生・マルチスポット再生
  - (a) 局所再生
    - ある領域にのみある特定の音が聞こえ，他の場所では聞こえない
  - (b) マルチスポット再生
    - それぞれの領域にそれぞれ別の音が聞こえる

- 応用例
  - パーソナルオーディオシステム
    →ヘッドホン装着なし
  - 美術館などの多言語ガイド
  - その他バーチャルリアリティ技術

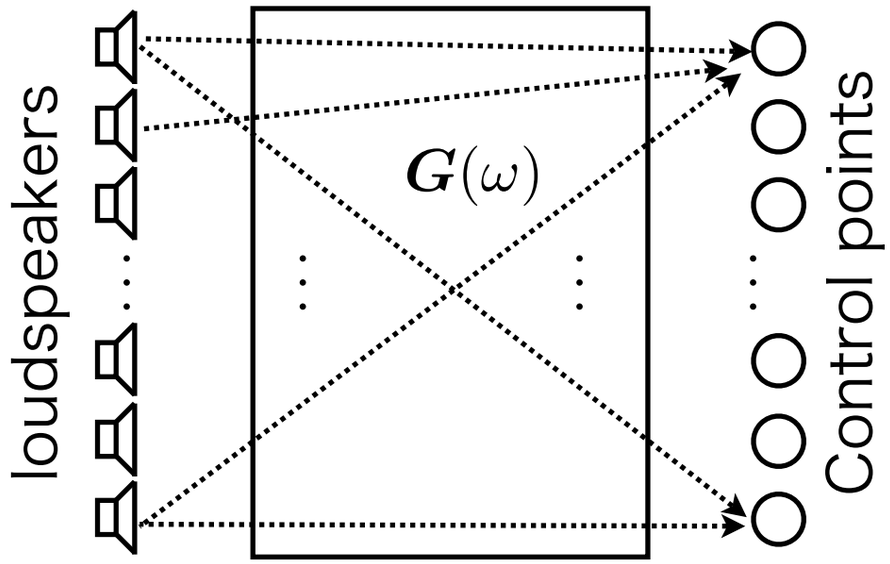


Conventional methods

- ビームフォーミングに基づく方法
  - 指向性制御
    - 目的方向の音響エネルギーを最大にする問題
- 多点制御に基づく方法
  - 局所再生型
  - マルチスポット再生
    - 制御点間の音響エネルギー差を最大にする問題
- その他
  - 加算型スポット方式 (岡本ら，EA 2011，音講論2012春，Acoustics 2012)
    - 目的音は同位化，マスカは無相関信号→スポットでのみ目的音が聞こえる
  - 平行直線アレイを用いた方式 (岡本，音講論2013秋)
    - 直線アレイから逆位相対平面波を出力，いわゆるANC型

Problems of previous methods

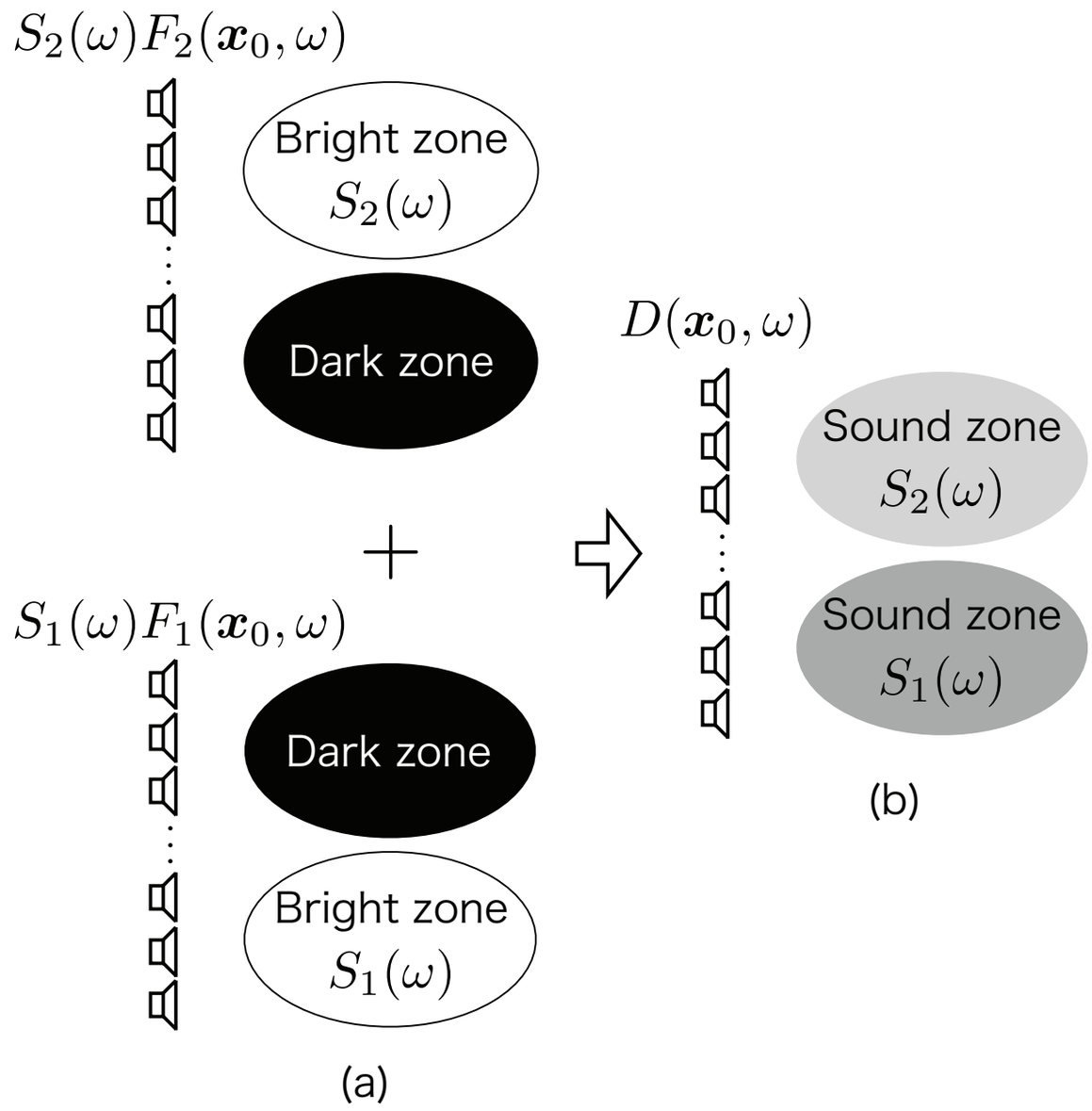
- 多点制御に基づく多くの方法(e. g. J.-W. Choi *et al*. 2002.)
  - 原理
    - 各スピーカと制御点間の空間相関行列の逆行列に基づく
  - 問題点
    - 音響逆問題は極めて悪条件→解は極めて不安定
    - 正則化パラメータ決定のための反復計算が必要



- Energy difference maximization (EDM) M. Shin *et al*. 2010.
  - 原理
    - 各スピーカと制御点間の空間相関行列の固有ベクトルに基づく
    - 解の不安定問題は解消
  - 問題点
    - チューニング係数を決めるための反復計算が必要

Novel approach

- 従来法の問題点
  - 逆行列問題による解の不安定性
  - 反復計算の必要性
- 提案法の特徴
  - 直線スピーカアレイを使用
  - 空間フィルタを解析的に導出
  - 反復計算の必要なし
- 問題の定式化
  - 音源信号：$S(\omega)$
  - スピーカの駆動信号
    - 局所再生： $D(\boldsymbol{x}_0, \omega) = S_1(\omega) F_1(\boldsymbol{x}_0, \omega)$
    - マルチスポット再生： $D(\boldsymbol{x}_0, \omega) = \sum_{i=1}^{M} S_i(\omega) F_i(\boldsymbol{x}_0, \omega)$



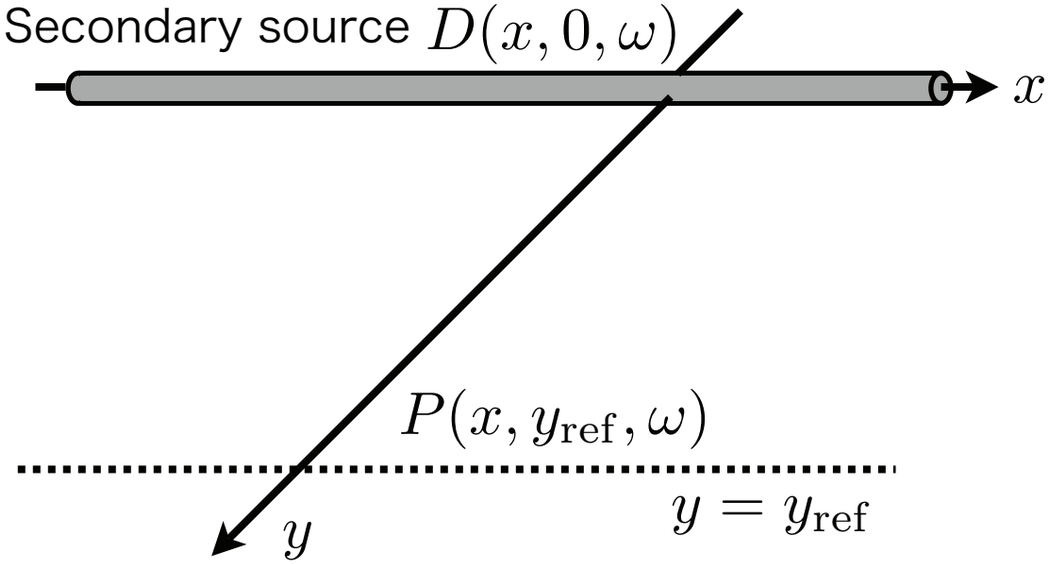
如何に計算するか?

Basic theory

- Spectral division method (SDM) J. Ahrens *et al*. 2010.
  - 平面 or 直線アレイを用いた音場再現
    →二次音源(=各スピーカ)の駆動信号 $D(x,\omega)$ を解析的に導出

❋ 直線アレイによる音場

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



❋ x 軸方向に空間フーリエ変換($\mathcal{F}_x$)

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

❋ 各スピーカの駆動信号($y = y_{\mathrm{ref}}$)

$$\tilde{D}(k_x,\omega) = \frac{\tilde{P}(k_x,y_{\mathrm{ref}},\omega)}{\tilde{G}(k_x,y_{\mathrm{ref}},\omega)} \quad \overset{\mathcal{F}_x^{-1}}{\Rightarrow} \quad D(x,\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{\infty}^{\infty} \frac{\tilde{P}(k_x,y_{\mathrm{ref}},\omega)}{\tilde{G}(k_x,y_{\mathrm{ref}},\omega)} e^{-jk_x x} dk_x$$

Strategy of proposed method

- SDM
  - 特徴
    - ❋ 二次音源の駆動信号は基準線の音圧 $P(x, y_{\mathrm{ref}}, \omega)$ のみによって一意に決まる

$$D(x,\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{\infty}^{\infty} \frac{\tilde{P}(k_x, y_{\mathrm{ref}}, \omega)}{\tilde{G}(k_x, y_{\mathrm{ref}}, \omega)} e^{-jk_x x} dk_x$$

    - ❋ 音場再現において音圧 $P(x, y_{\mathrm{ref}}, \omega)$ は
      (1) 理論的に計算 (平面波，仮想音源)
      (2) 直線マイクロホンアレイにより観測 S. Koyama *et al*. 2013.

- 提案法
  - 着眼点
    - ❋ 音圧 $P(x, y_{\mathrm{ref}}, \omega)$ を局所再生領域に割り当てる
      局所再生位置： $P(x, y_{\mathrm{ref}}, \omega) = 1$
      無音位置： $P(x, y_{\mathrm{ref}}, \omega) = 0$

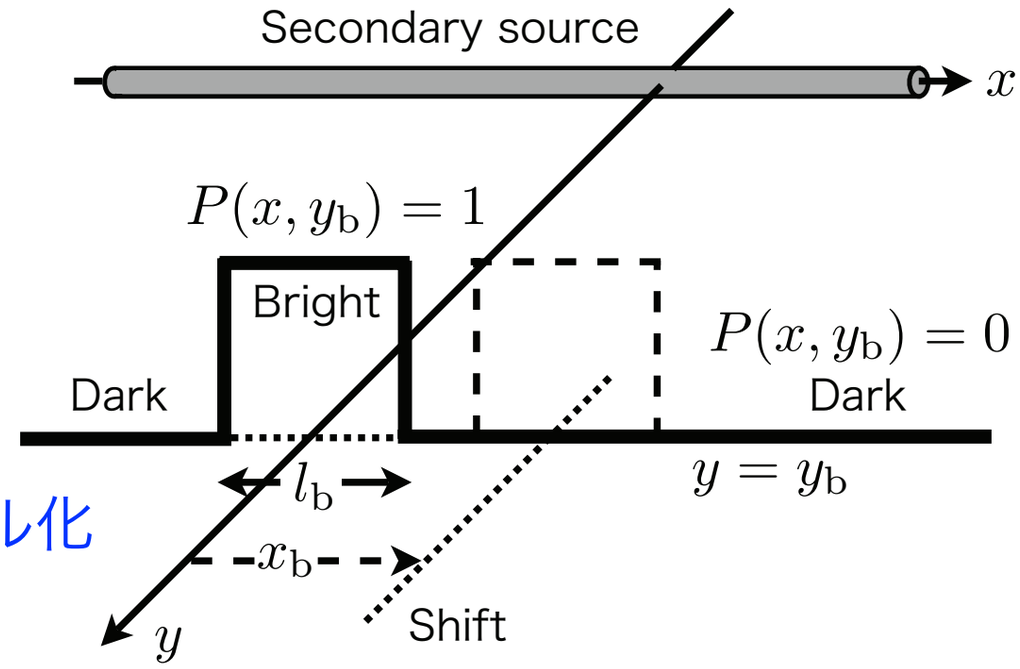
Proposed method

- 波数領域空間フィルタの解析的導出
  - 波数領域空間フィルタ

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

  - 局所領域： $P(x, y_{\mathrm{ref}}, \omega) = 1$
  - 無音領域： $P(x, y_{\mathrm{ref}}, \omega) = 0$

} 矩形窓でモデル化



$$P(x, y_{\mathrm{b}}) = \Pi\left(\frac{x}{l_{\mathrm{b}}}\right) = \begin{cases} 1, & \text{for } |x| \leq l_{\mathrm{b}}/2 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad \overset{\mathcal{F}_x}{\Rightarrow} \quad \tilde{P}(k_x) = l_{\mathrm{b}}\ \mathrm{sinc}\left(\frac{k_x l_{\mathrm{b}}}{2\pi}\right)$$

  - 局所位置のシフト

$$\tilde{P}_{\mathrm{shift}}(k_x) = \tilde{P}(k_x)\exp(jk_x x_b) = l_{\mathrm{b}}\ \mathrm{sinc}\left(\frac{k_x l_{\mathrm{b}}}{2\pi}\right)\exp(jk_x x_b)$$

  - 波数領域局所再生空間フィルタ

$$\tilde{F}(k_x, \omega) = \frac{l_{\mathrm{b}}\ \mathrm{sinc}\left(k_x l_{\mathrm{b}}/2\pi\right)\exp(jk_x x_{\mathrm{b}})}{\tilde{G}(k_x, y_{\mathrm{b}}, \omega)} \quad \rightarrow$$

任意の位置 $[x_{\mathrm{b}}, y_{\mathrm{b}}]^{\mathrm{T}}$に
任意の幅 l_{b} の
局所再生を実現

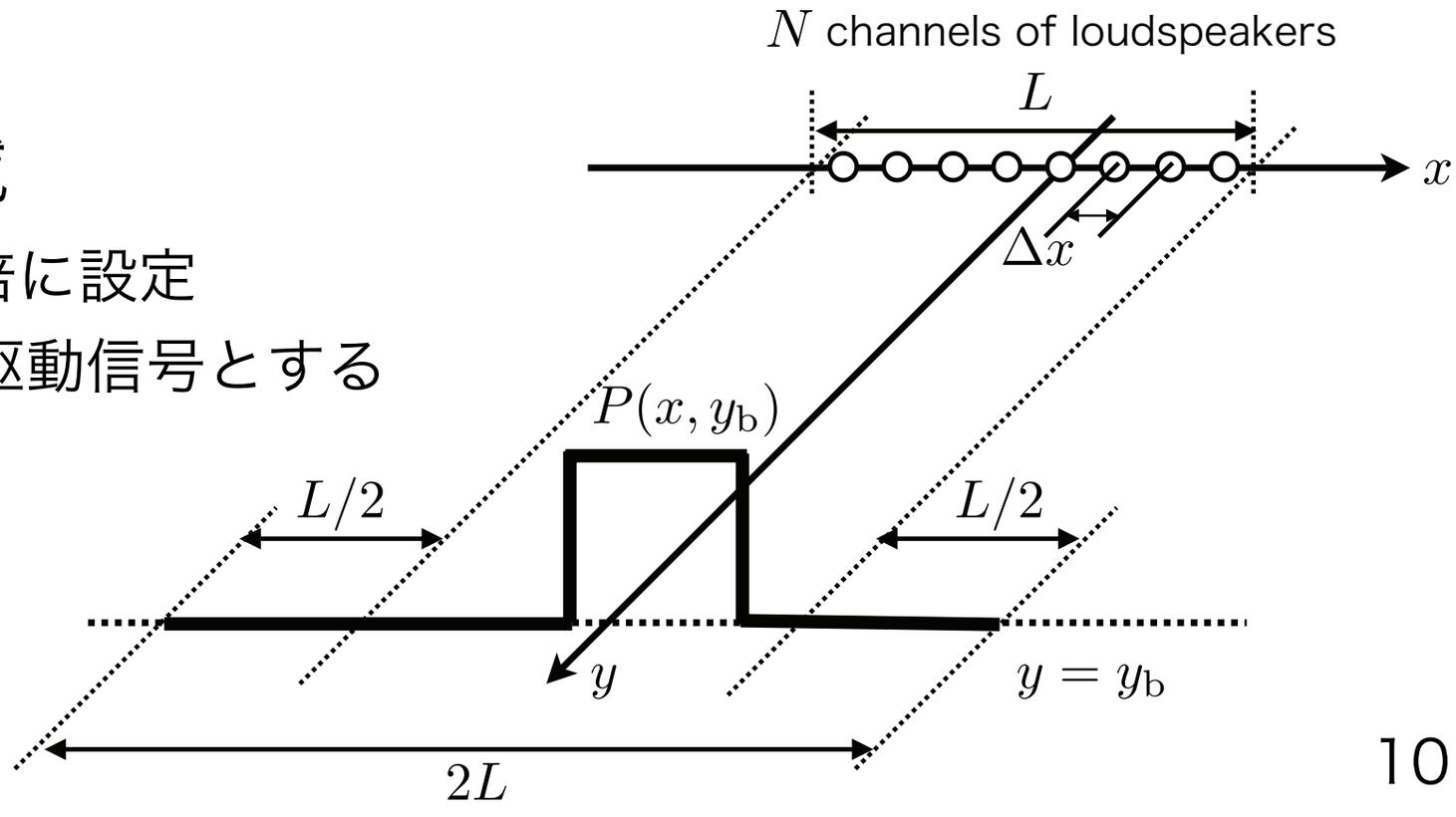
For implementation

- 離散化・有限長打ち切り
  - 無限長連続二次音源 → 直線スピーカアレイ
    - 離散逆フーリエ変換(IDFT)による駆動信号の算出

$$F_{\mathrm{IDFT}}(x,\omega) = \frac{1}{L}\sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \tilde{F}(k_x,\omega)\exp(-2\pi jnm/N)$$

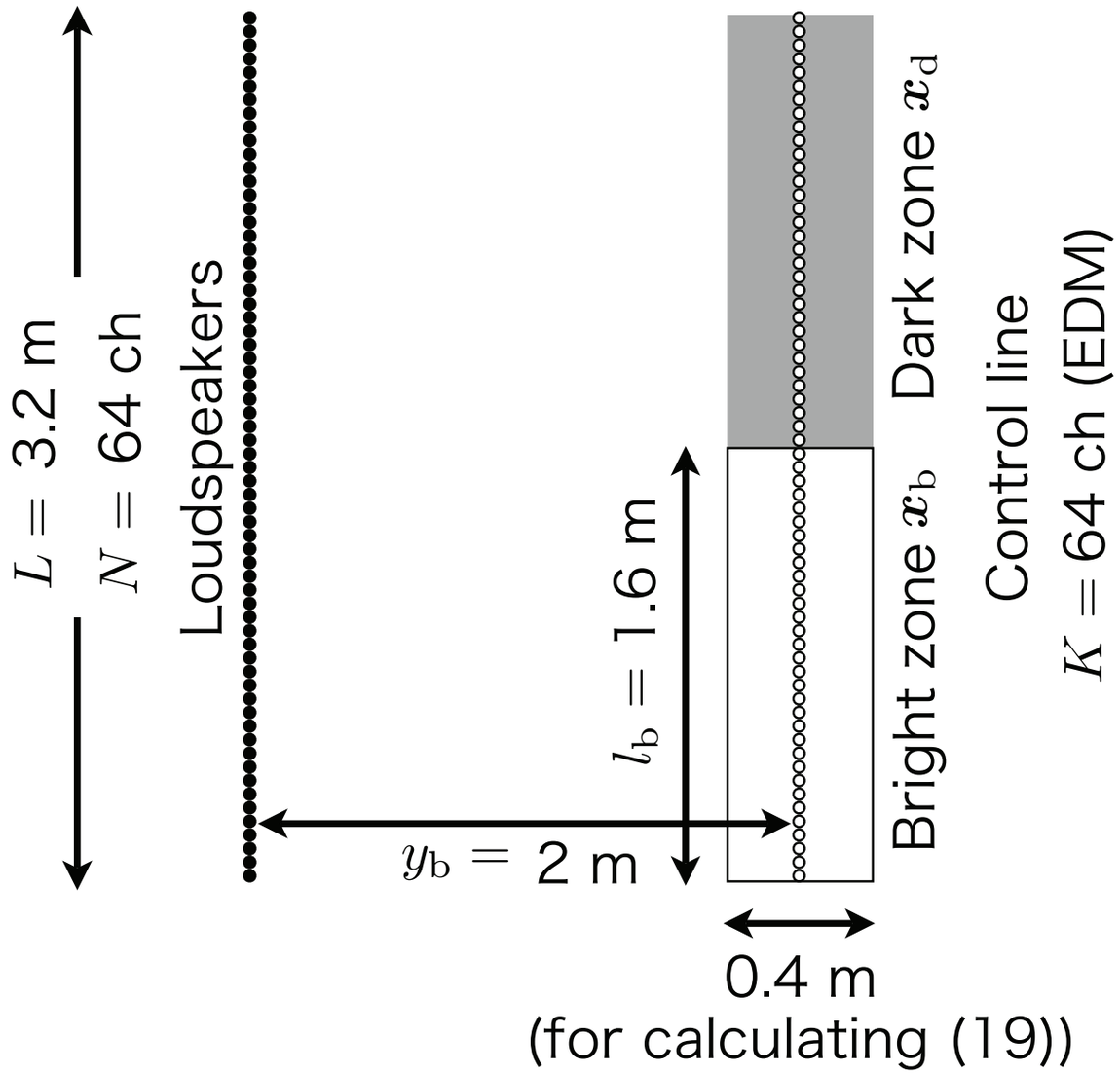
$$x = n\Delta x \qquad k_x = 2\pi m/N\Delta x \qquad -N/2 \le n \le N/2-1$$

- 有限長打ち切り誤差の低減
  - 矩形窓長をスピーカアレイの2倍に設定
    - 中央N点の $F_{\mathrm{IDFT}}(x,\omega)$ を駆動信号とする



Computer simulations (vs EDM)

- シミュレーション条件
  - 解析周波数 f ：200～5000 Hz
  - 音速 c ：343.26 m/s
  - 素子間隔 Δx ：0.05 m
  - チューニング係数(EDM) α ：0.9999



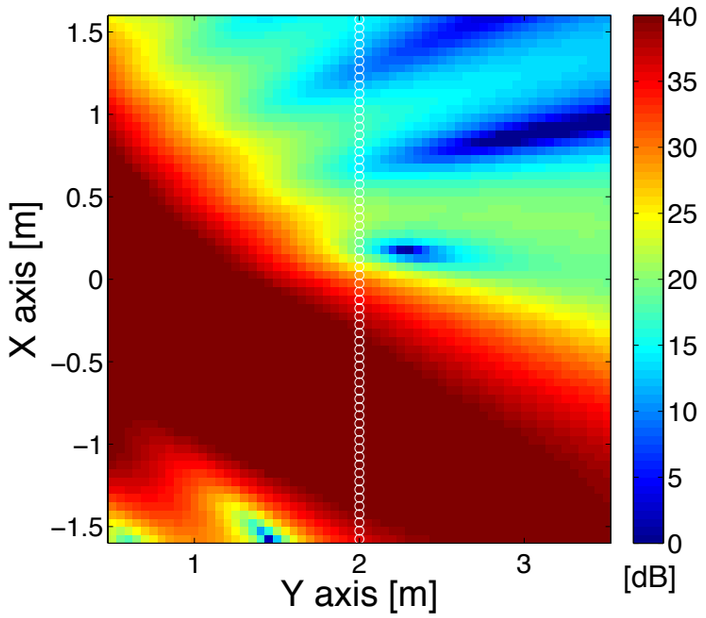
- 評価指標
  - 平均時間音圧レベル
    - ❋ 局所再生の位置による精度の評価

$$P_{\mathrm{SPL}}(\boldsymbol{x}) = 10\log_{10}\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} p(t_i, \boldsymbol{x})^2$$

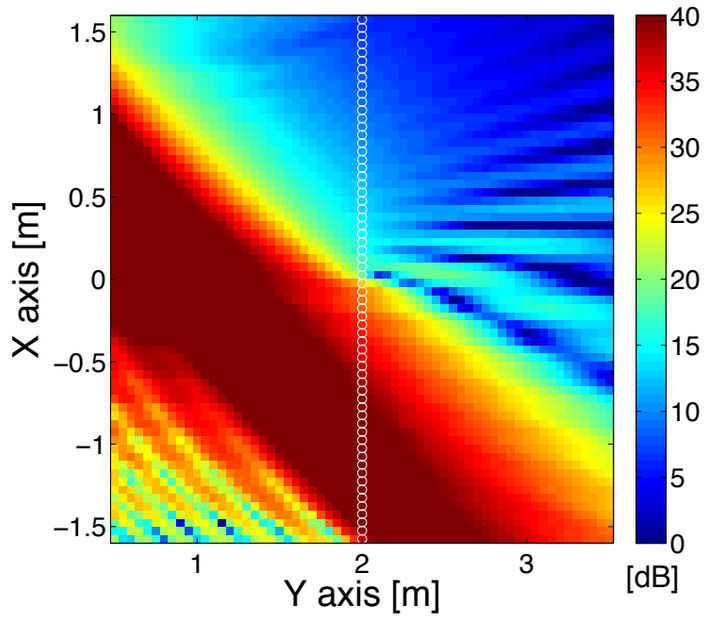
  - 時空間平均音圧レベル
    - ❋ 局所領域と無音領域のレベル差を評価

$$BDR = 10\log_{10}\frac{\sum_i \sum_{\boldsymbol{x}_\mathrm{b}} p(t_i, \boldsymbol{x}_\mathrm{b})^2}{\sum_i \sum_{\boldsymbol{x}_\mathrm{d}} p(t_i, \boldsymbol{x}_\mathrm{d})^2}$$

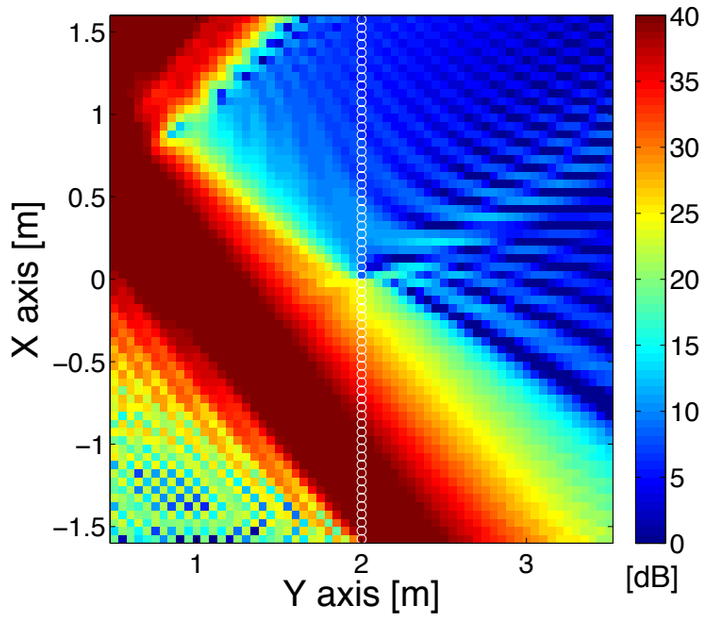
Simulation results : $P_{\mathrm{SPL}}(\boldsymbol{x})$



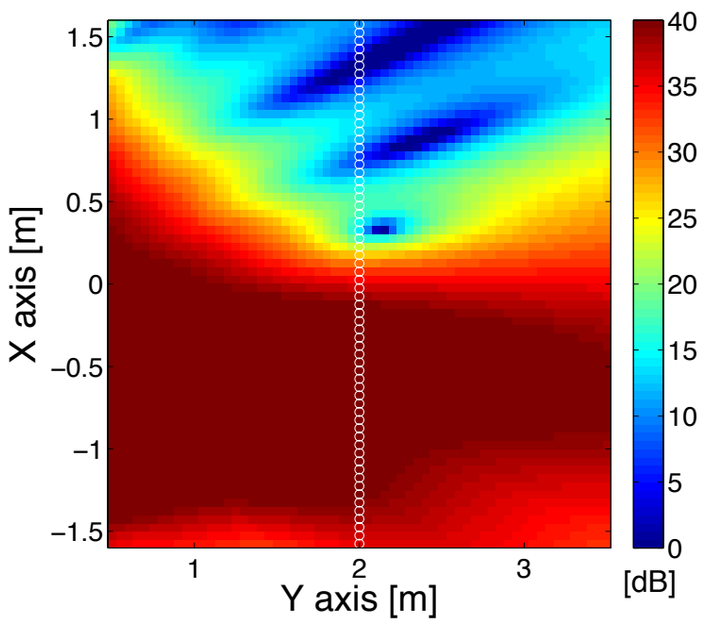
EDM (500 Hz)



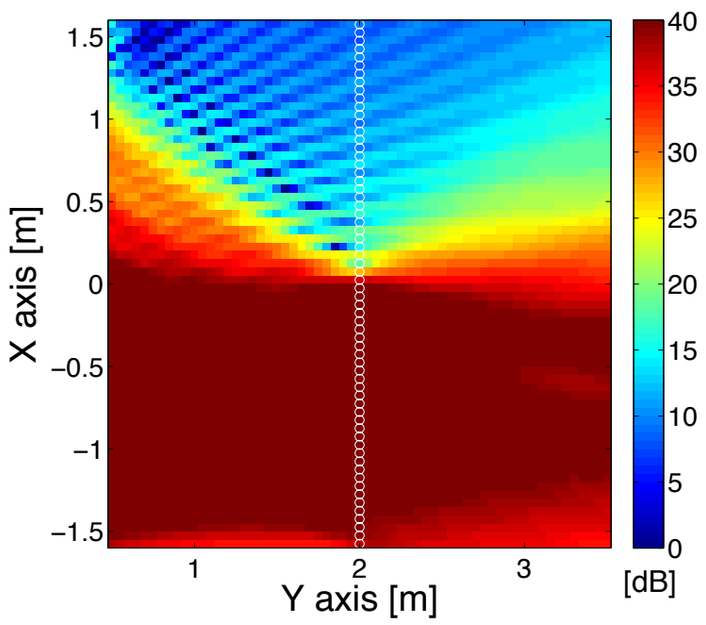
EDM (2 kHz)



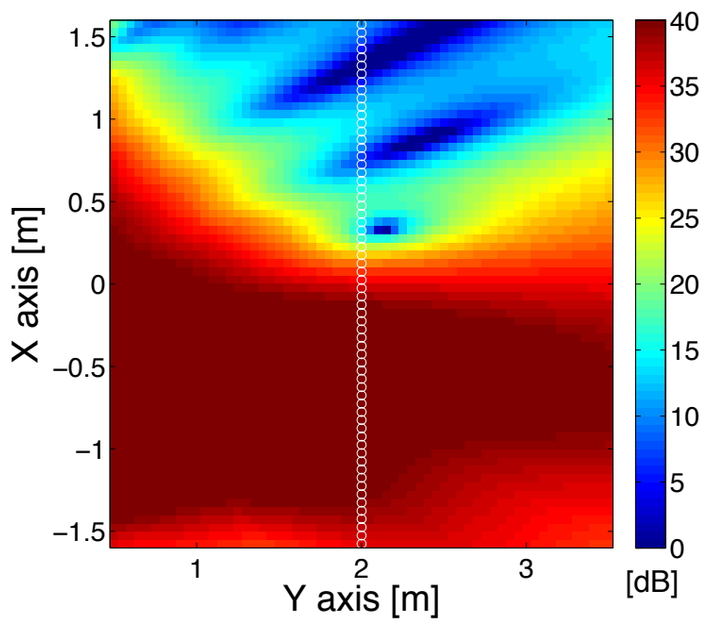
EDM (5 kHz)



Proposed (500 Hz)

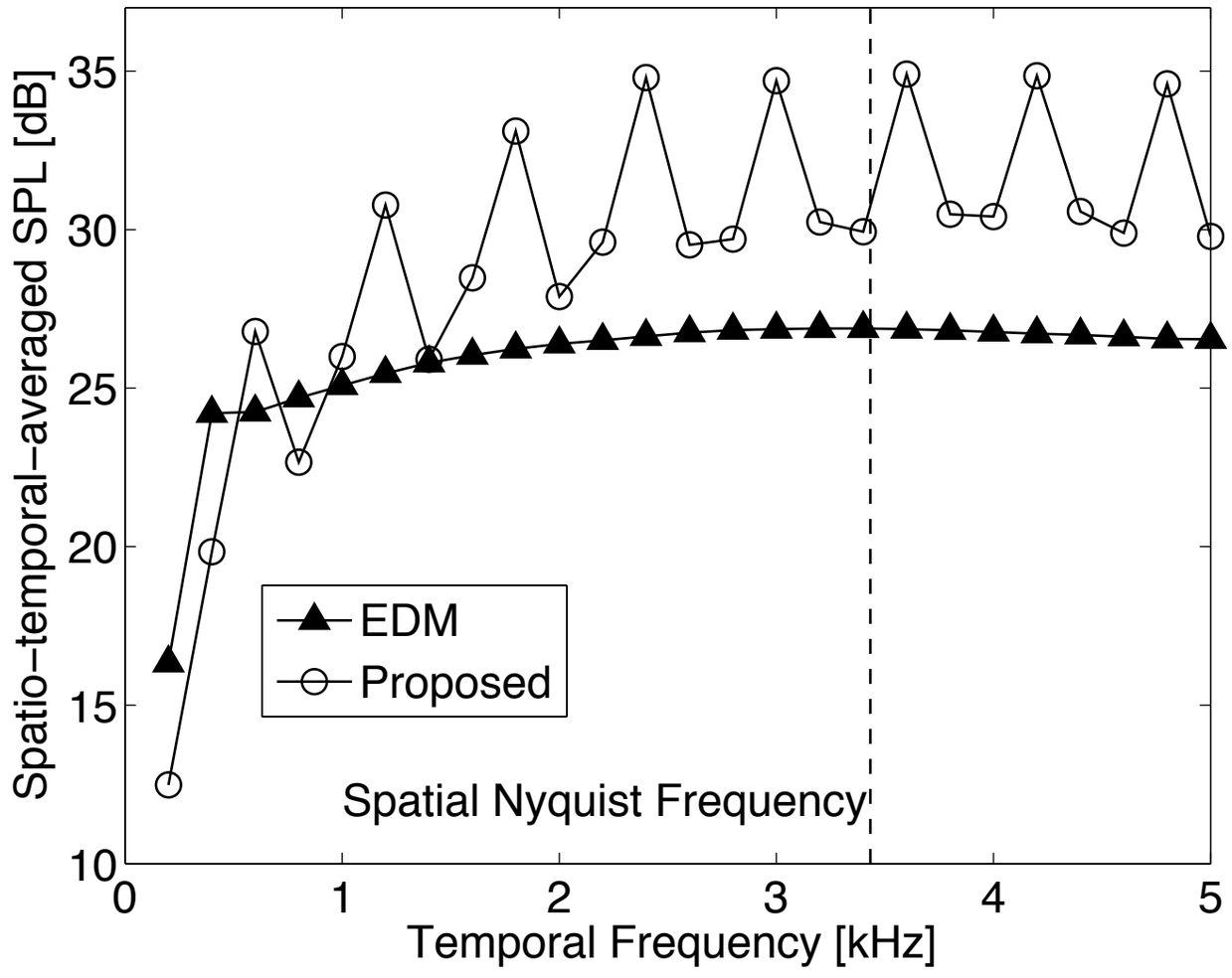


Proposed (2 kHz)



Proposed (5 kHz)

Simulation results : BDR



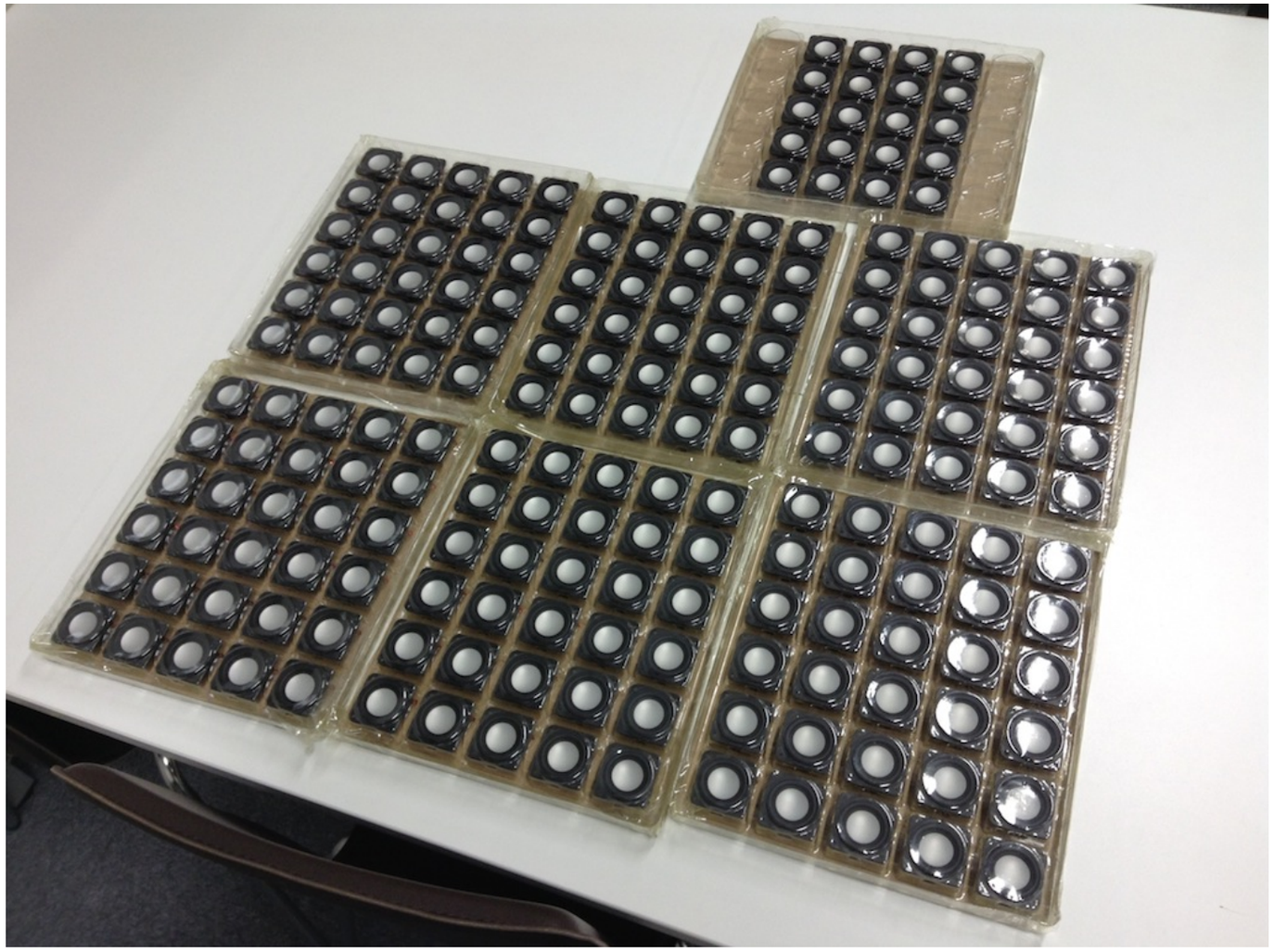
$$BDR = 10\log_{10}\frac{\sum_i \sum_{\boldsymbol{x}_\mathrm{b}} p(t_i, \boldsymbol{x}_\mathrm{b})^2}{\sum_i \sum_{\boldsymbol{x}_\mathrm{d}} p(t_i, \boldsymbol{x}_\mathrm{d})^2}$$

提案法の方が高精度な局所再生を実現

DEMO implemented by Puredata

Concluding remarks

- 波数領域空間フィルタリングに基づく局所再生
  - 直線アレイを使用
  - フィルタを解析的に導出
  - 反復計算不要



- 今後の予定
  - スピーカアレイの実装
  - 実環境での性能評価

- 謝辞
  - 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費若手研究B(No. 25871208：加算型サウンドスポットシステムの高精度化)の助成による