

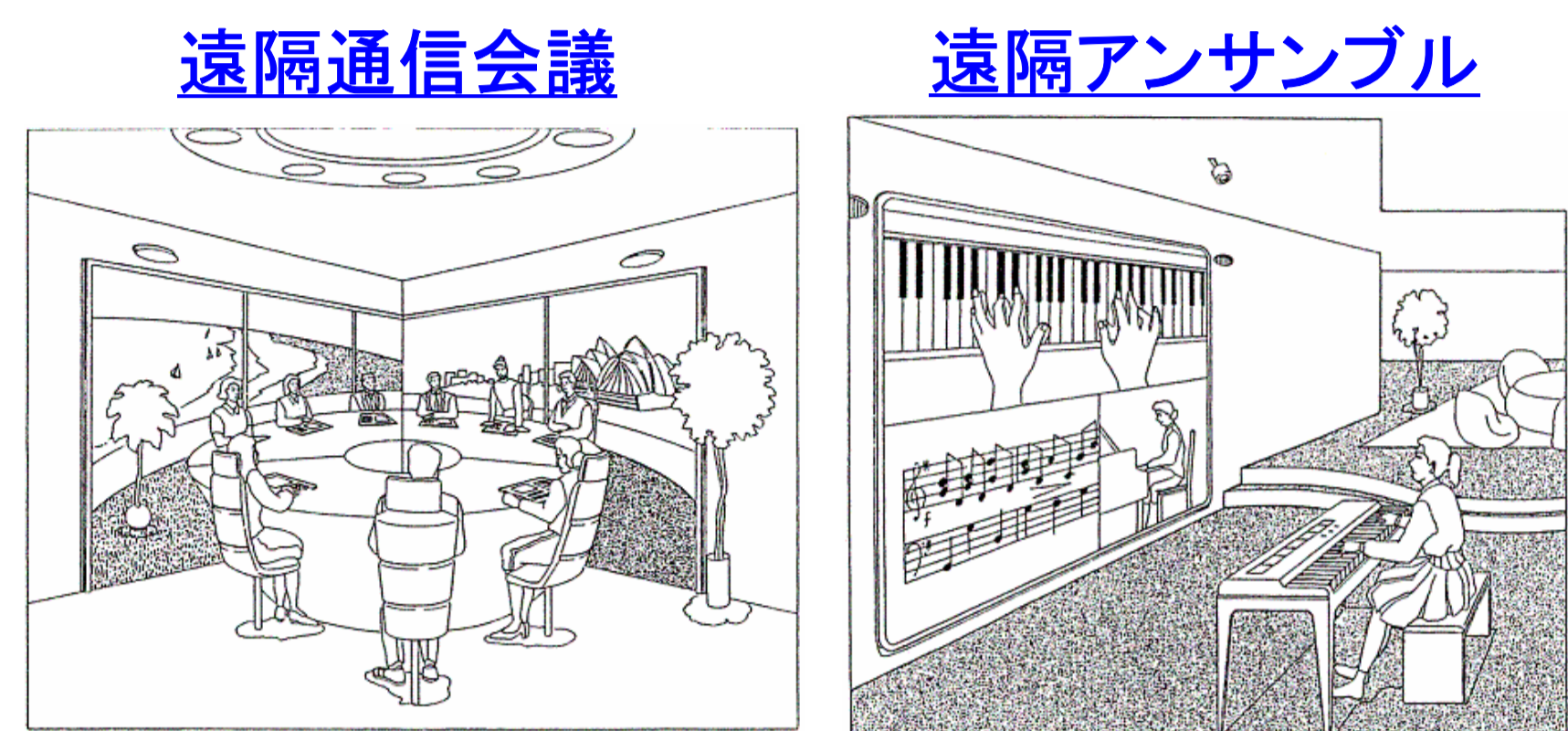
3-Q-20 波面合成法による三次元音場再現におけるマイクロホン及びスピーカの指向特性による影響

©木村 敏幸(東京農工大院・工学府), 笈 一彦(中京大・情報理工)

1.はじめに

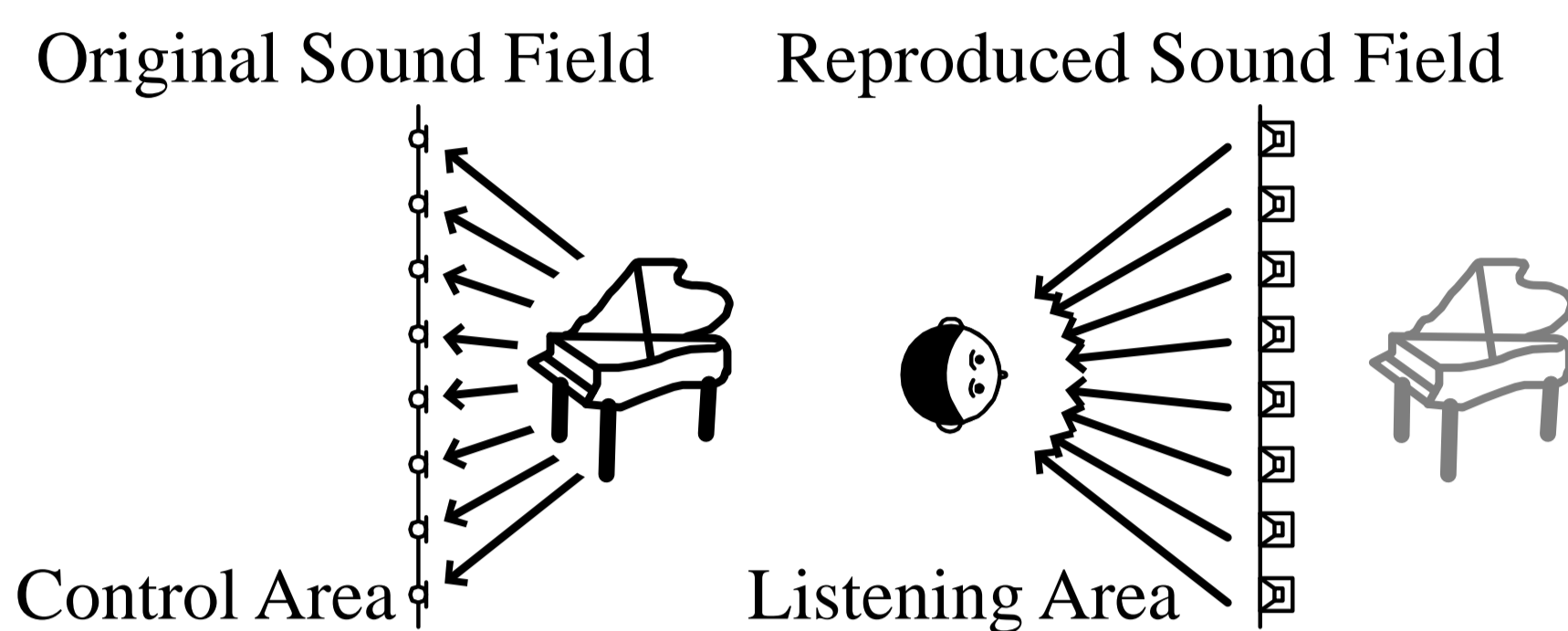
三次元音場再現技術

- 従来の技術よりも高い臨場感
 - 従来の技術...テレビ電話, 5.1chオーディオ
- 遠隔通信会議, 遠隔アンサンブル
 - 同じ場所で会議, 合奏(本当は違う場所)
 - 目の前に相手がいる(本当はいない)



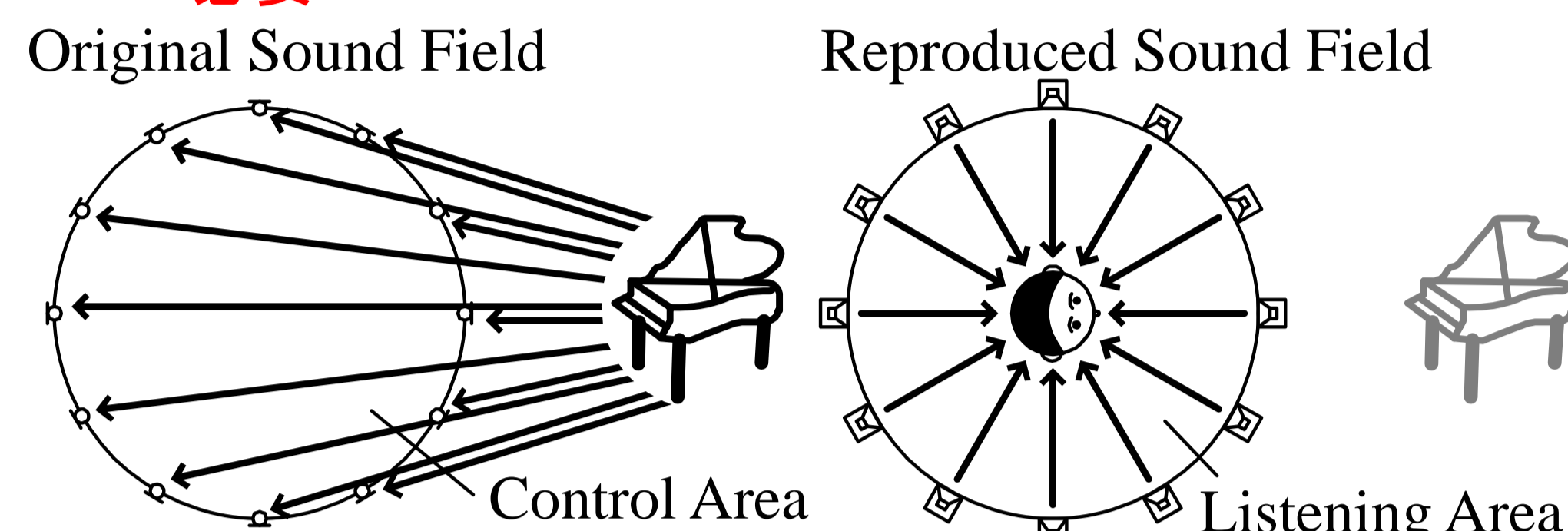
波面合成法

- 従来研究
 - アレーを直線状に配置
 - 聴取領域ではピアノ音は前からのみ聞こえる



サラウンドシステム

- サラウンドシステム
 - アレーを領域の周りに配置
 - 聴取領域では音が全方向から到達
 - **マイクロホンやスピーカに指向特性を設けることが必要**



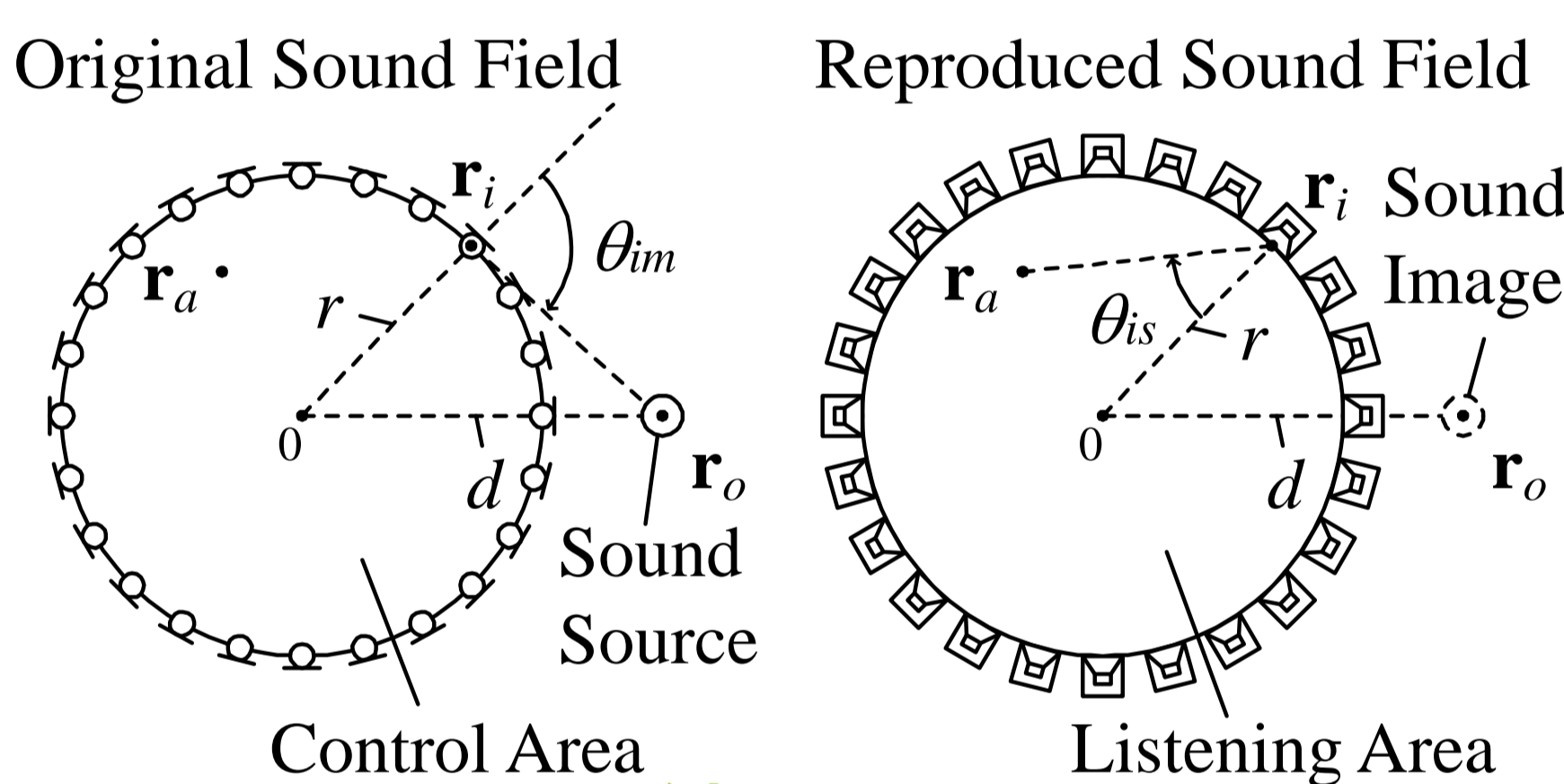
研究目的

- 波面合成法による三次元音場再現をサラウンドシステムで実現
- マイクロホンやスピーカの指向特性による影響を計算機シミュレーションで検討
 - 領域の形状...円形, 正方形

2.シミュレーション—円形領域—

シミュレーション環境

- 原音場
 - 自由音場
- マイクロホンの指向特性
 - 制御領域の外側方向
- スピーカの指向特性
 - 聴取領域の内側方向



シミュレーション結果

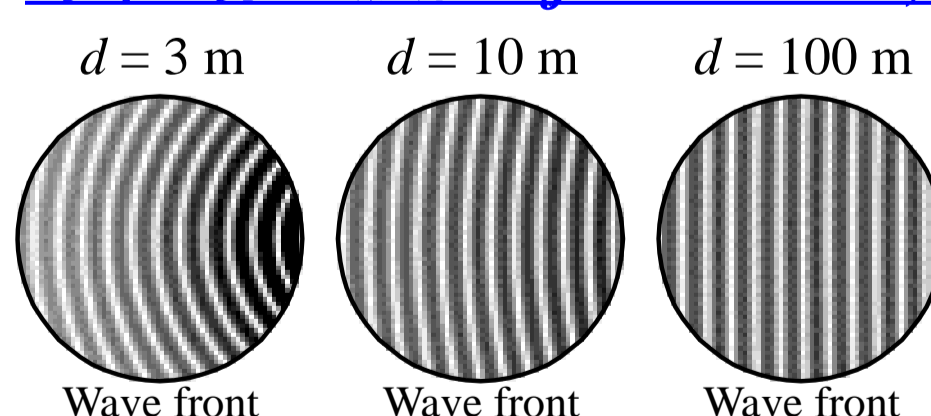
- 無指向性マイクロホン
 - 波面が忠実に合成されない
- 単一指向性, 超指向性マイクロホン
 - 波面が忠実に合成される

単一指向性や超指向性マイクロホンを用いれば波面が忠実に合成される

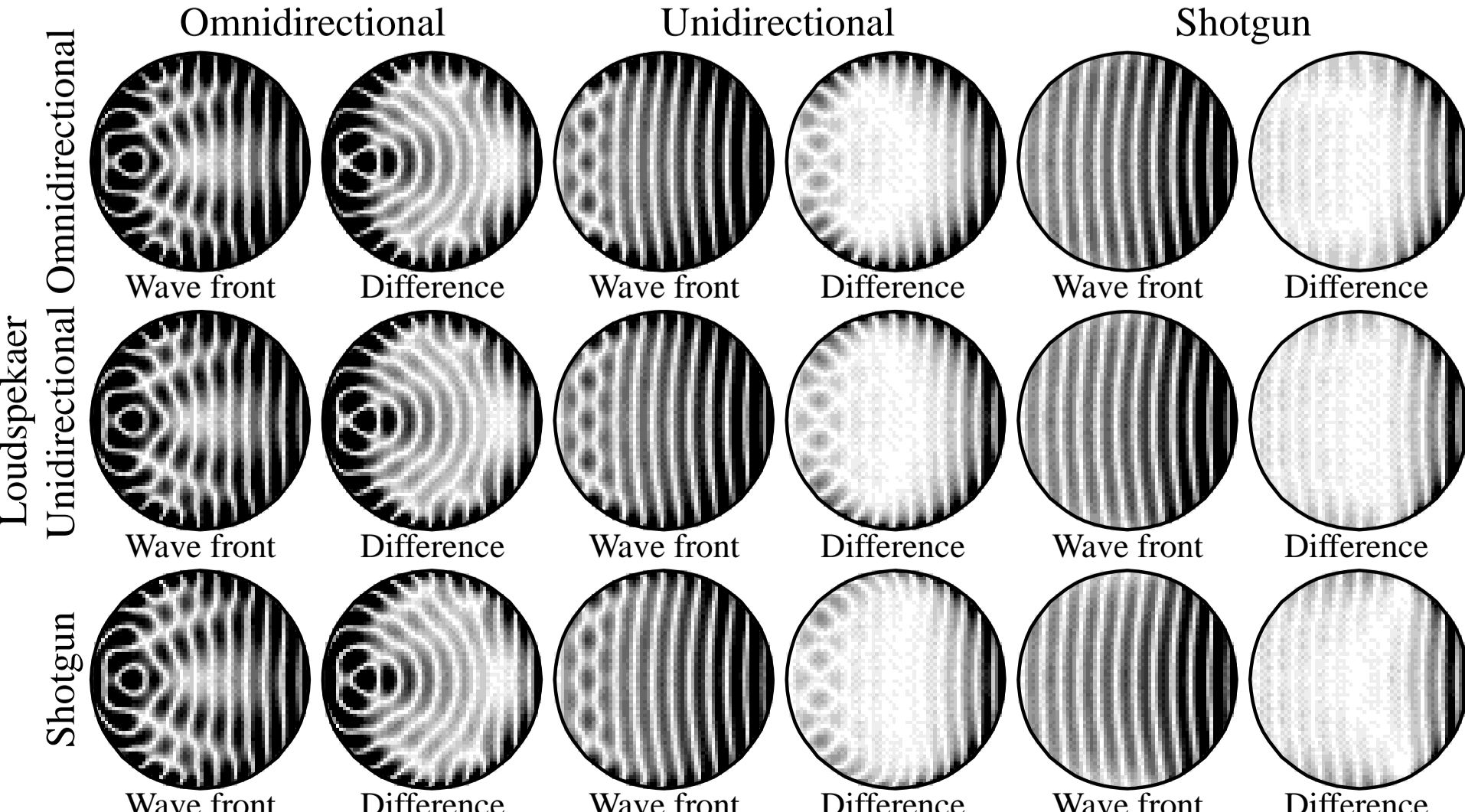
- スピーカの指向特性による影響
 - どの指向特性でも合成される波面は同じ

スピーカの指向特性よりもマイクロホンの指向特性の方が大きく寄与

原音場の波面 (f = 500 Hz)



f = 500 Hz, d = 3 m



■ 音源信号 $s(t) = \sin 2\pi ft$

■ 原音場の音圧

$$p_o(\mathbf{r}_a, f, t) = \frac{1}{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_o|} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_o|}{c} \right) \right\}$$

■ マイクロホンのチャンネル信号

$$x_i(t) = \frac{D_{im}}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_o|} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_o|}{c} \right) \right\}$$

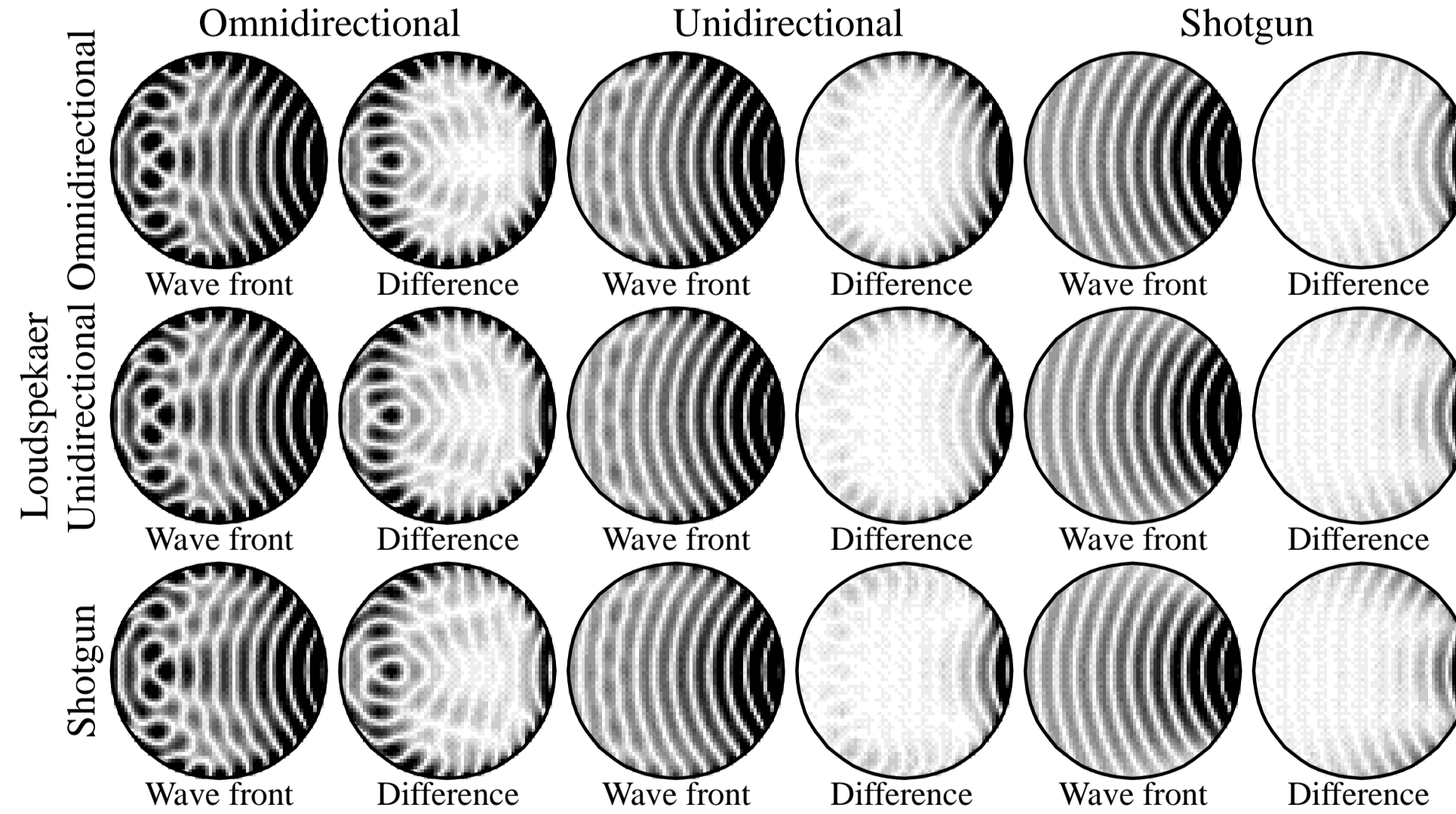
■ 再現音場の音圧

$$p(\mathbf{r}_a, f, t) = \sum_{i=1}^M \frac{D_{is}}{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_i|} x_i \left(t - \frac{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_i|}{c} \right) = \sum_{i=1}^M \frac{D_{is} D_{im}}{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_i| |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_o|} \sin \left\{ 2\pi f \left(t - \frac{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_i| + |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_o|}{c} \right) \right\}$$

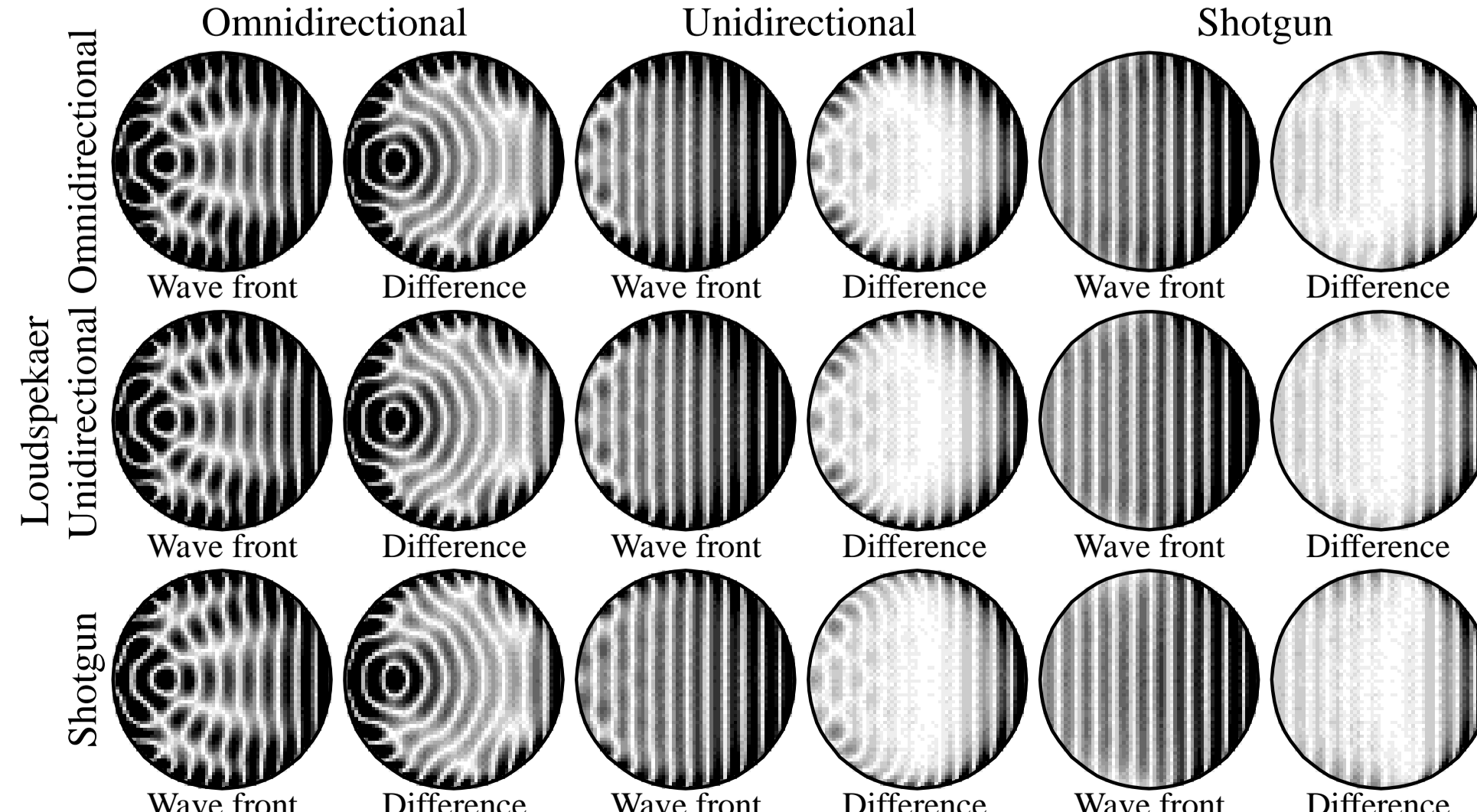
\mathbf{r}_o : 音源の位置ベクトル
 \mathbf{r}_i : マイクロホン, スピーカの位置ベクトル
 \mathbf{r}_a : 領域内の位置ベクトル
 D_{im}, D_{is} : マイクロホン, スピーカの指向特性係数

(無指向性) $D_{im(is)} = 1$
 (単一指向性) $D_{im(is)} = \frac{1 + \cos \theta_{im(is)}}{2}$
 (超指向性) $D_{im(is)} = \begin{cases} \cos \theta_{im(is)} & (\theta_{im(is)} \leq 90^\circ) \\ 0 & (\theta_{im(is)} > 90^\circ) \end{cases}$

f = 500 Hz, d = 10 m



f = 500 Hz, d = 100 m

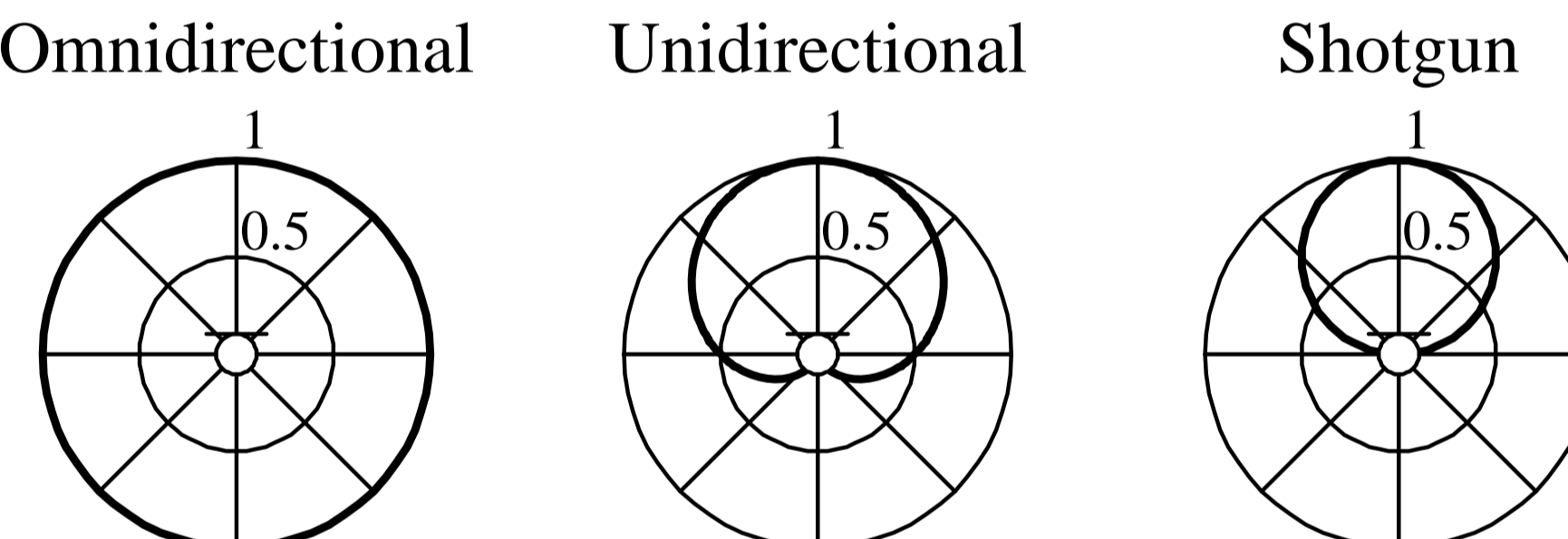


パラメータ条件

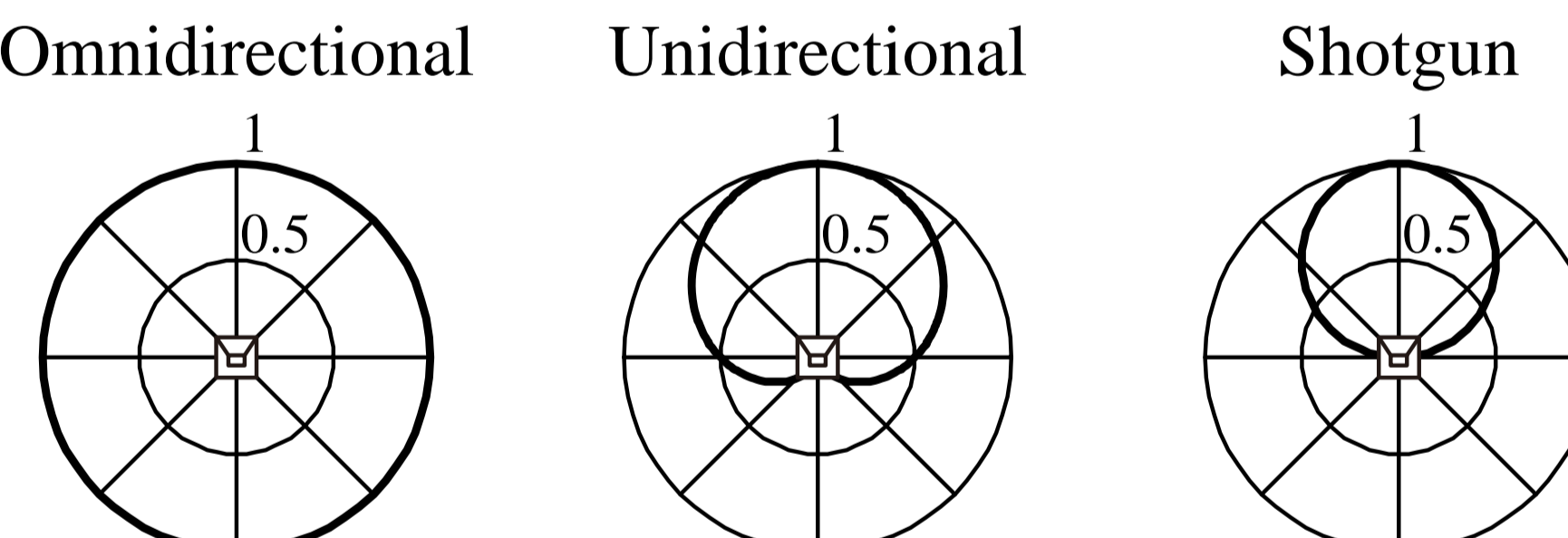
総数 (M)	630
音源の周波数 (f)	125, 177, 250, 354, 500, 707, 1000, 1414, 2000, 2828, 4000, 5657, 8000 Hz
音源距離 (d)	3, 10, 100 m
円の半径 (r)	2 m
音速 (c)	340 m/s
指向特性 (D_{im}, D_{is})	無指向性, 単一指向性, 超指向性

$$\mathbf{r}_o = \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{r}_a = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \end{pmatrix} \quad (r_x^2 + r_y^2 < r^2), \mathbf{r}_i = \begin{pmatrix} r \cos \frac{2\pi i}{M} \\ r \sin \frac{2\pi i}{M} \end{pmatrix}$$

Microphone



Loudspeaker



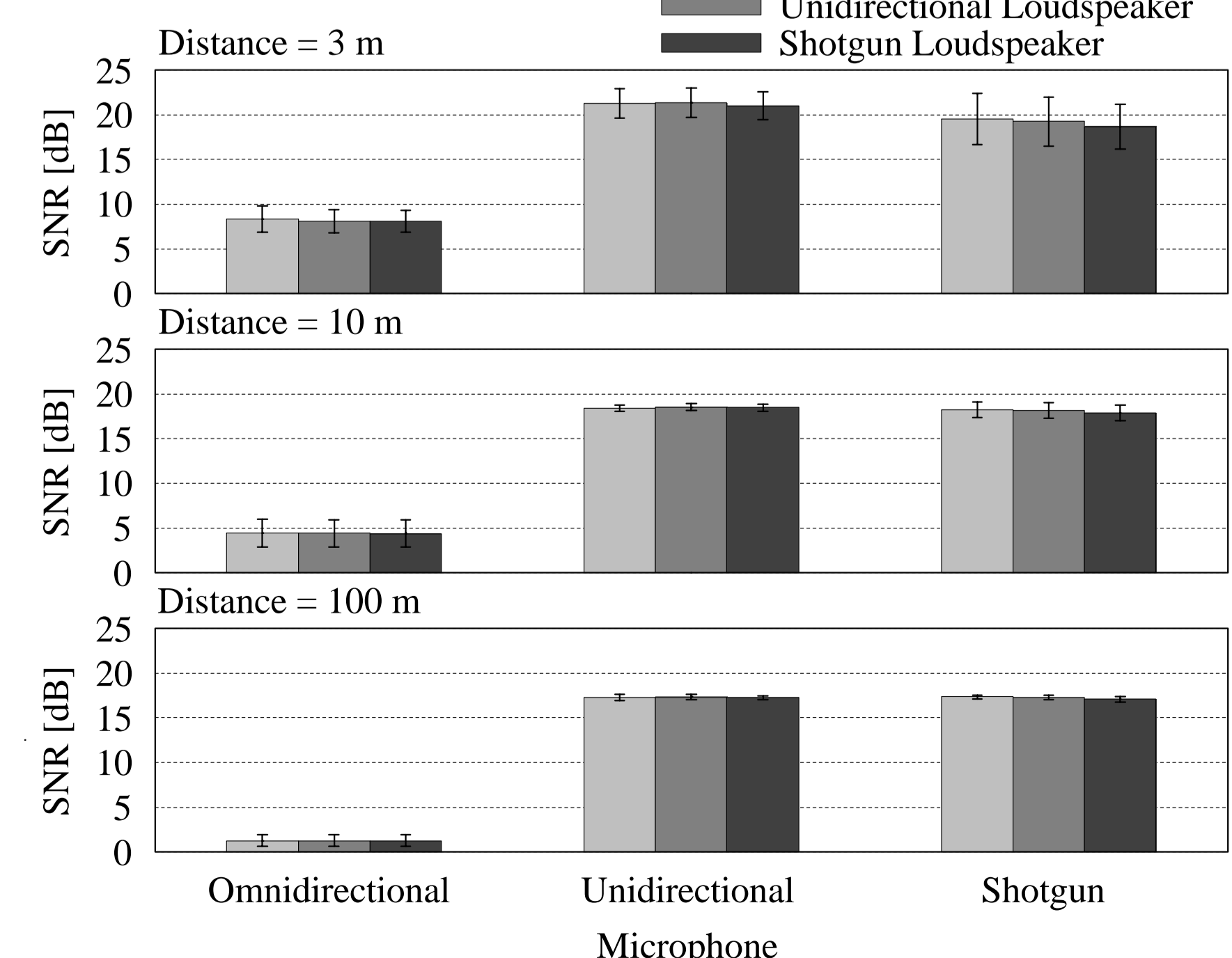
SNRによる評価

■ SNR(Signal-to-Noise Ratio)

- \mathbf{r}_a の範囲: $r_x^2 + r_y^2 < 1^2$
- $F (= 13)$: 周波数の数

$$\text{SNR}[\text{dB}] = \frac{1}{F} \sum_f \left[10 \log_{10} \frac{\sum_{\mathbf{r}_a} \{p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)\}^2}{\sum_{\mathbf{r}_a} \{p(\mathbf{r}_a, f, 0) - p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)\}^2} \right]$$

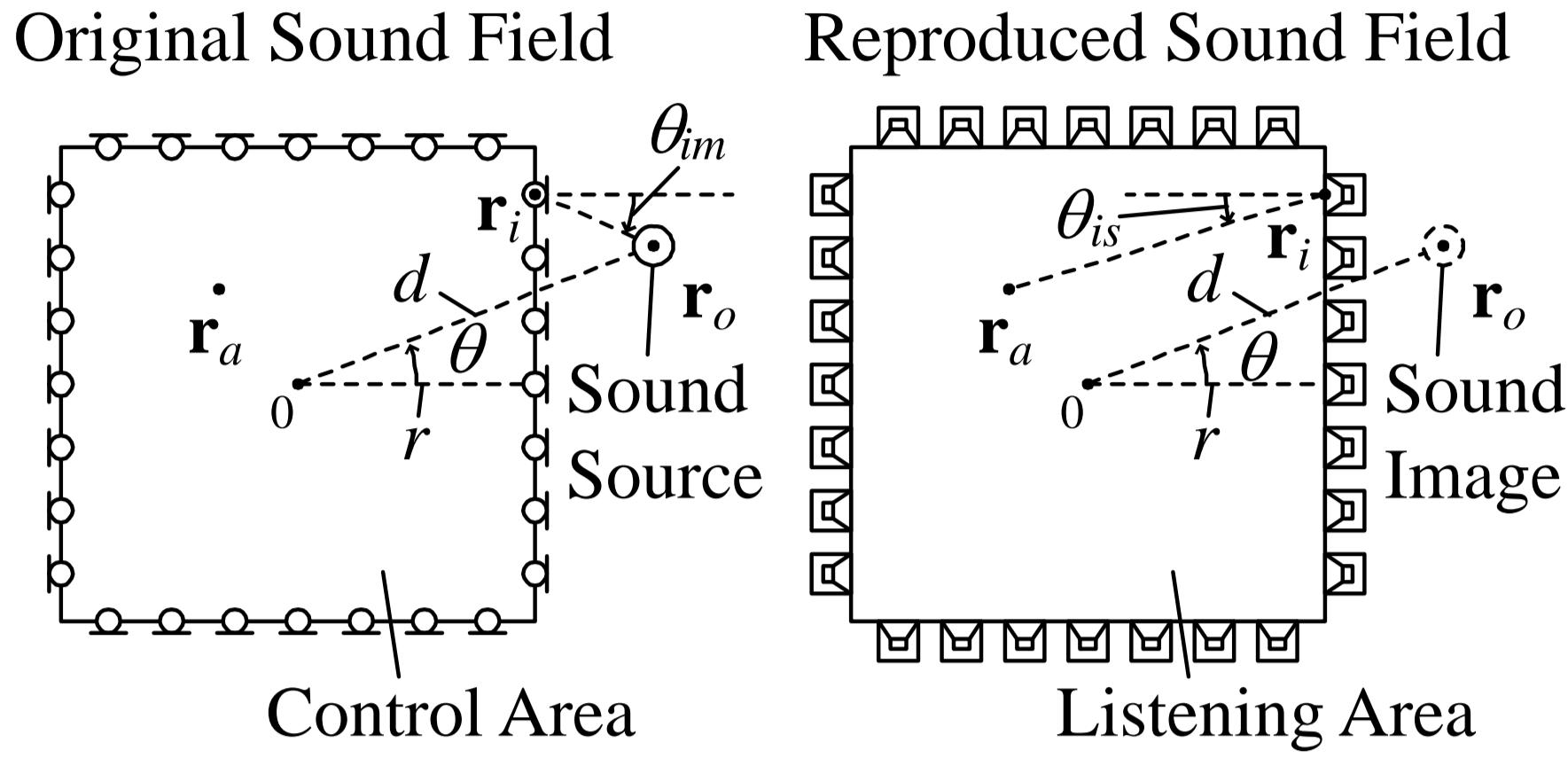
SNRの結果



3. シミュレーション—正方形領域—

シミュレーション環境

- 原音場
 - 自由音場
- マイクロホンの指向特性
 - 制御領域の外側方向
- スピーカの指向特性
 - 聴取領域の内側方向



パラメータ条件

総数 (M)	800
音源の周波数 (f)	125, 177, 250, 354, 500, 707, 1000, 1414, 2000, 2828, 4000, 5657, 8000 Hz
音源距離 (d)	3, 10, 100 m
音源の方位角 (θ)	0, 45
正方形の一辺 (2r)	4 m
音速 (c)	340 m/s
指向特性 (D _{im} , D _{is})	無指向性, 単一指向性, 超指向性

$$\mathbf{r}_0 = \begin{pmatrix} d \cos \theta \\ d \sin \theta \end{pmatrix}, \mathbf{r}_a = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \end{pmatrix} (|r_x|, |r_y| < r),$$

$$\mathbf{r}_i = \begin{cases} \begin{pmatrix} -r + \frac{r}{100}i & -r \end{pmatrix}^T & (i = 1-200) \\ \begin{pmatrix} r & -r + \frac{r}{100}(i-200) \end{pmatrix}^T & (i = 201-400) \\ \begin{pmatrix} r - \frac{r}{100}(i-400) & r \end{pmatrix}^T & (i = 401-600) \\ \begin{pmatrix} -r & r - \frac{r}{100}(i-600) \end{pmatrix}^T & (i = 601-800) \end{cases}$$

シミュレーション結果

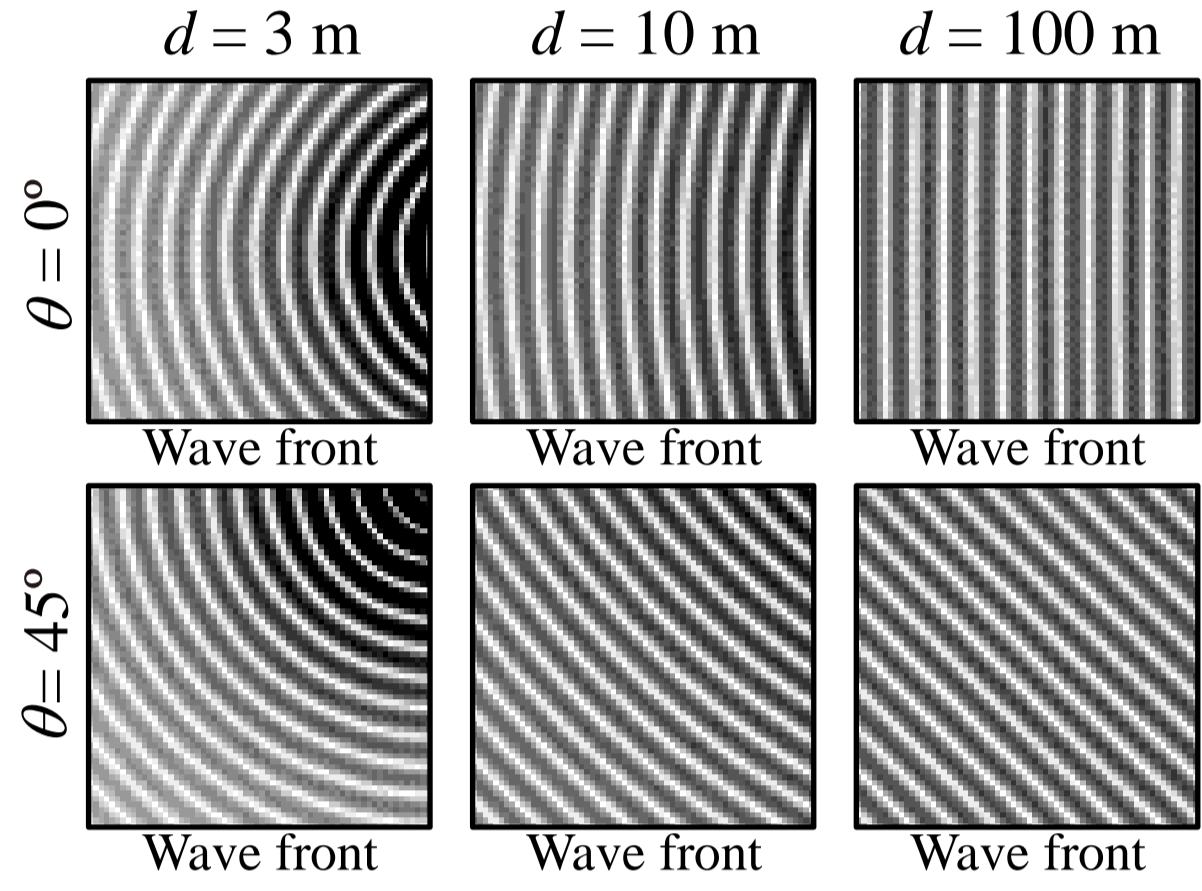
- 無指向性マイクロホン
 - 波面が忠実に合成されない
- 単一指向性, 超指向性マイクロホン
 - 波面が忠実に合成される

単一指向性や超指向性マイクロホンをうければ波面が忠実に合成される

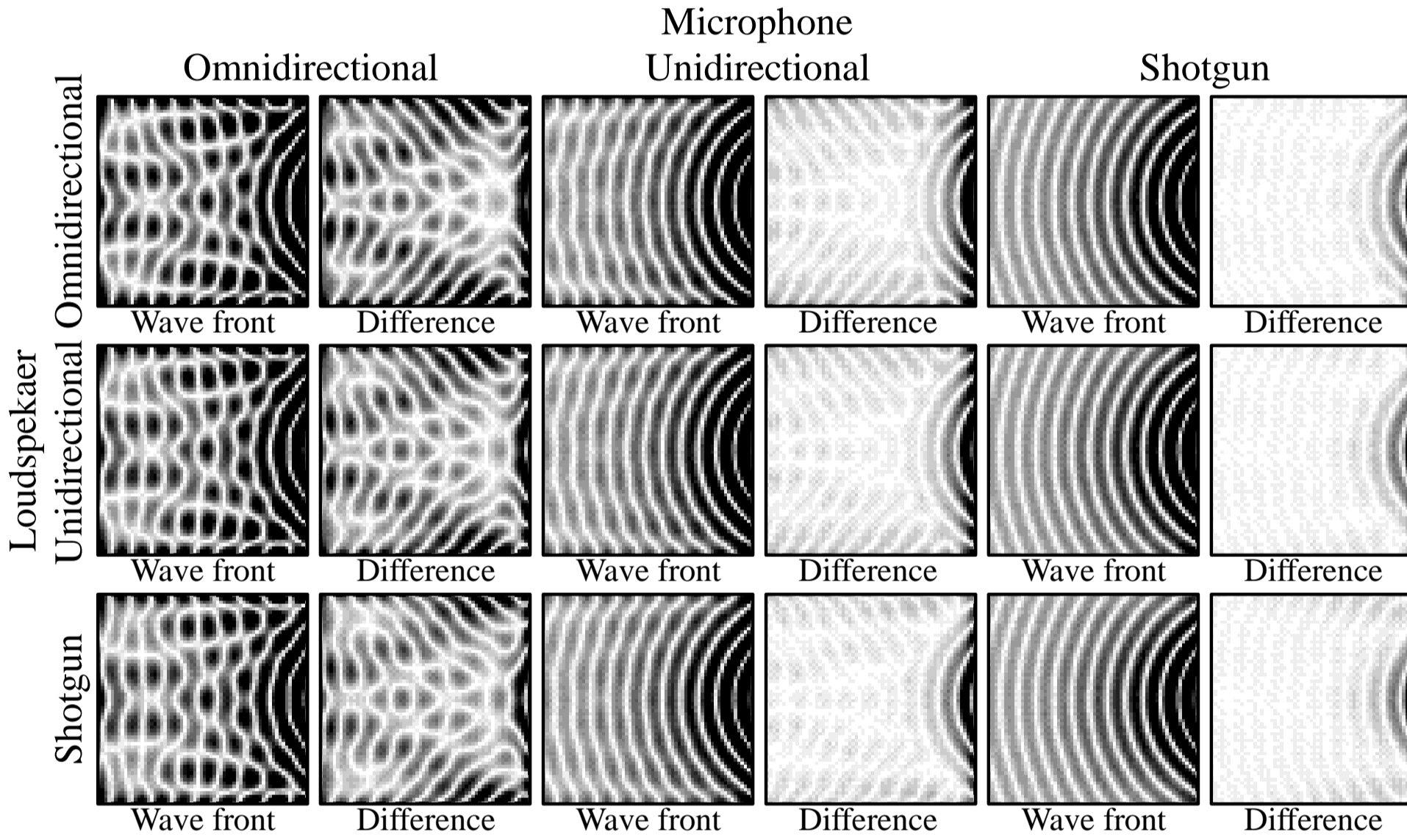
- スピーカの指向特性による影響
 - どの指向特性でも合成される波面は同じ

スピーカの指向特性よりもマイクロホンの指向特性の方が大きく寄与

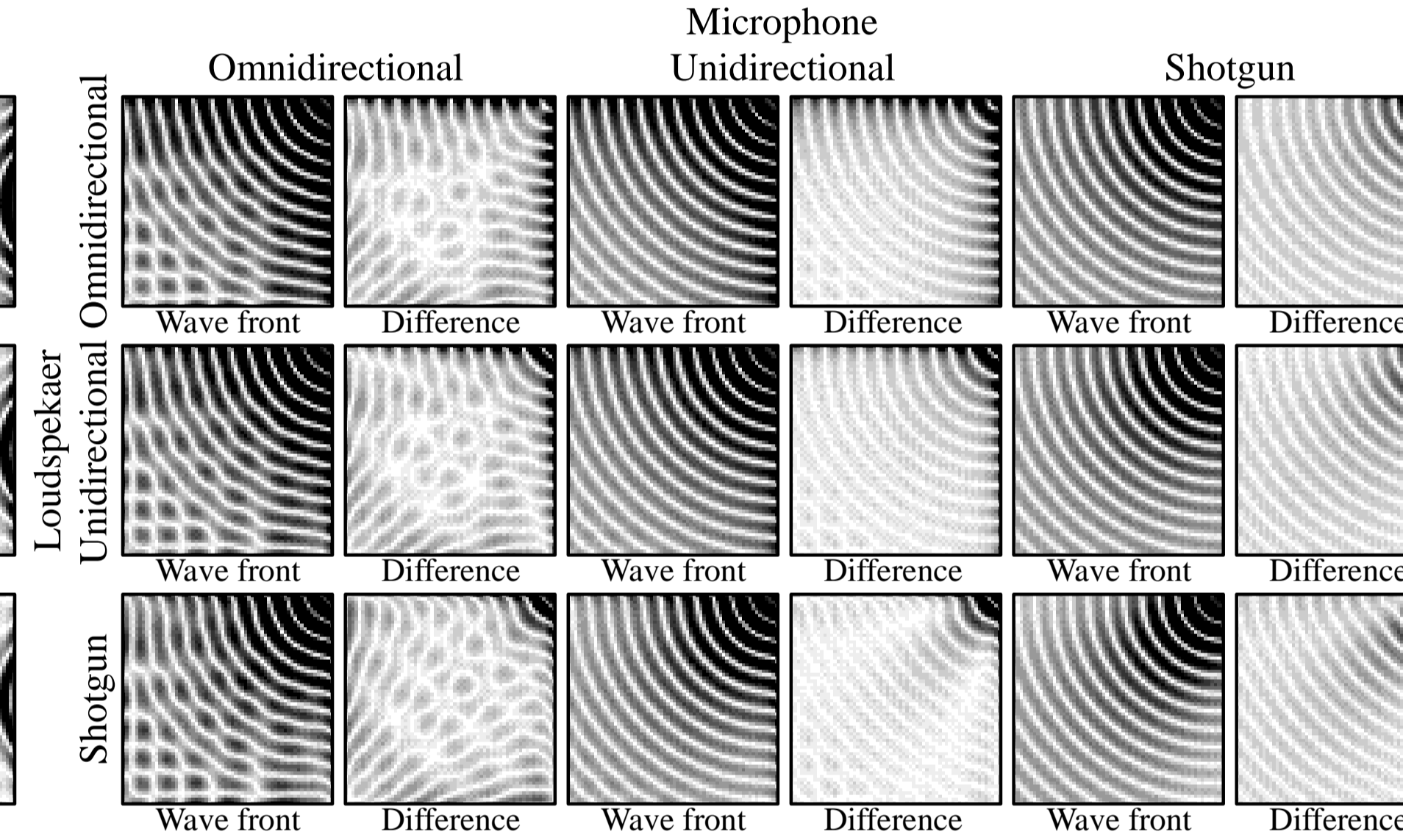
原音場の波面 (f = 500 Hz)



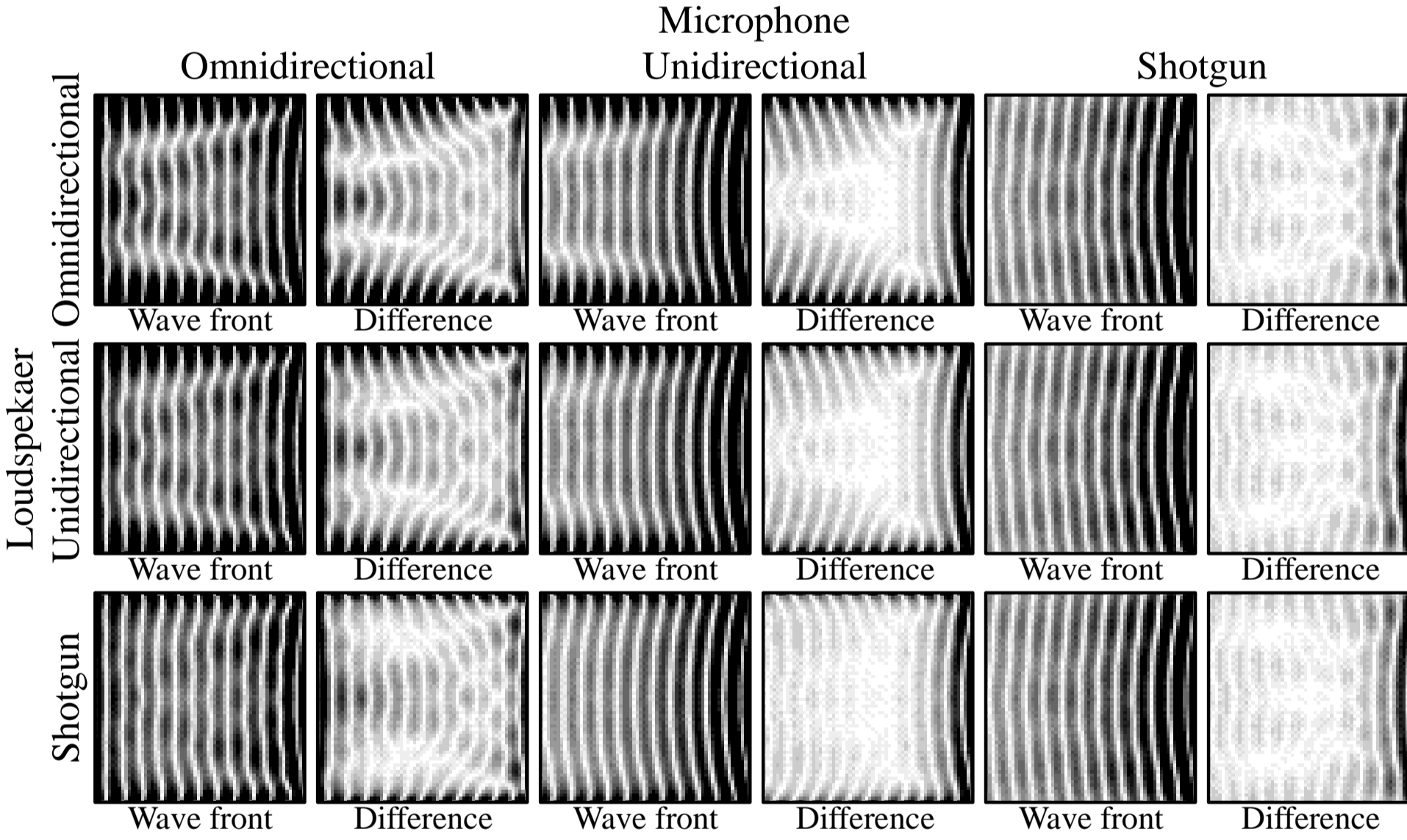
f = 500 Hz, d = 3 m, θ = 0°



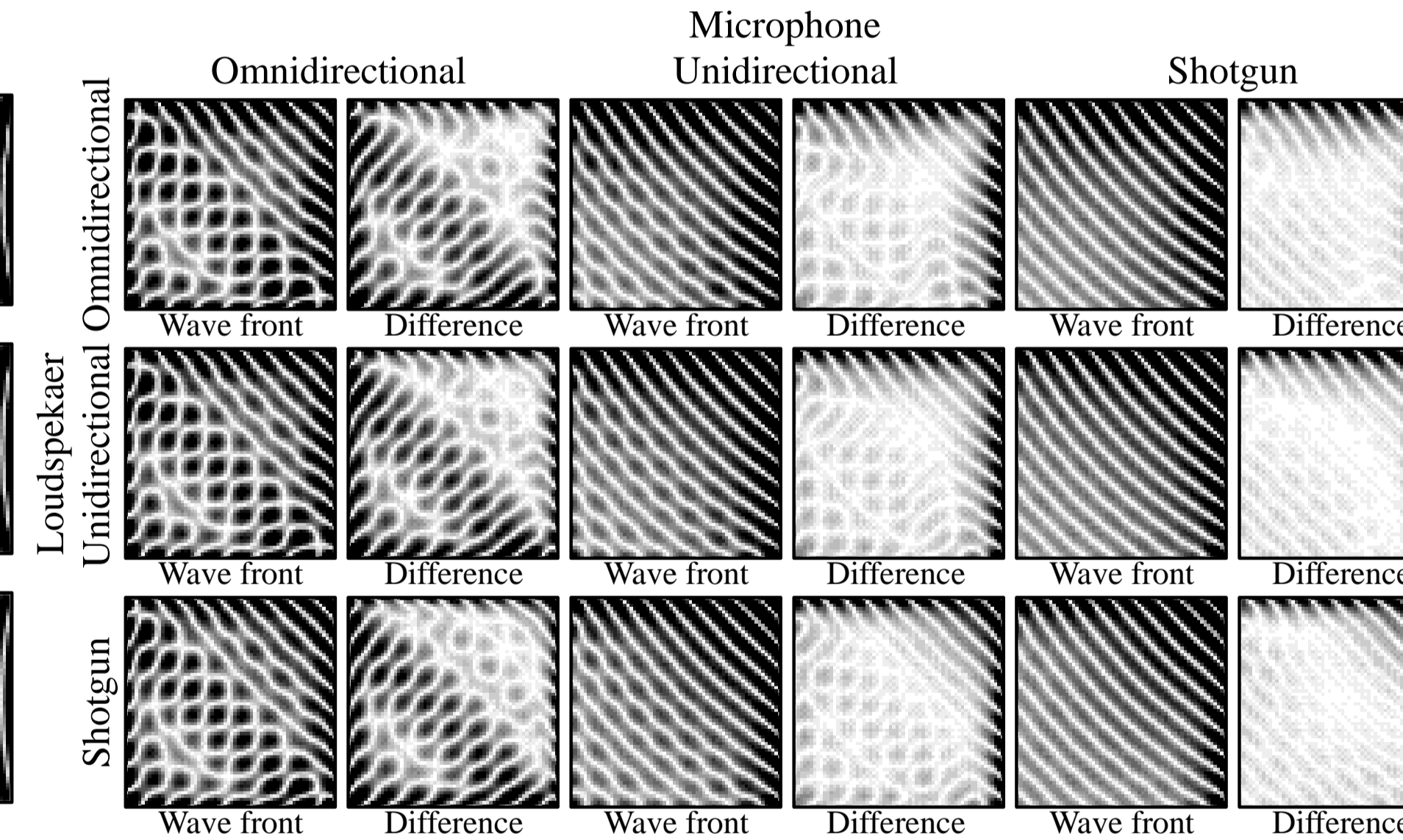
f = 500 Hz, d = 3 m, θ = 45°



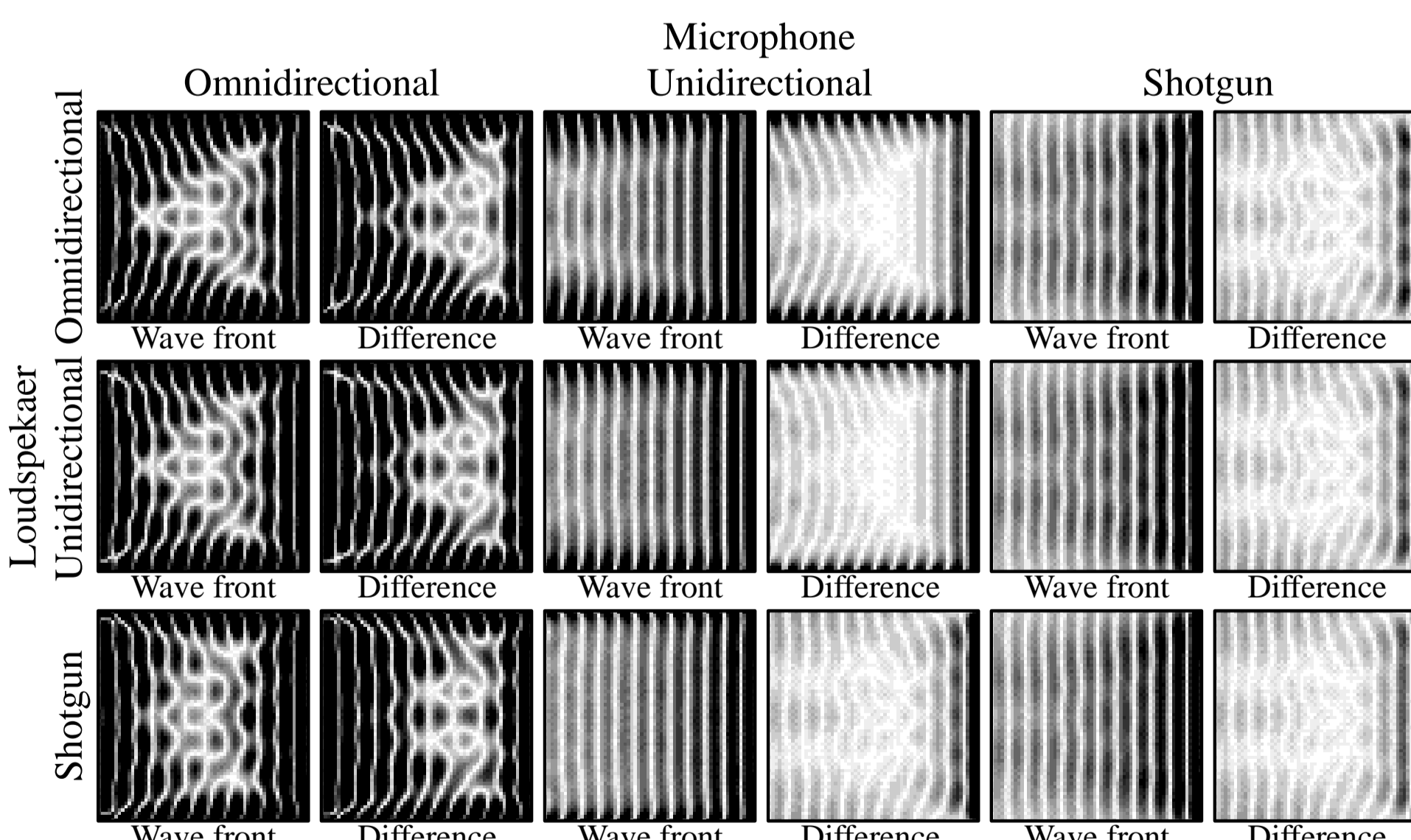
f = 500 Hz, d = 10 m, θ = 0°



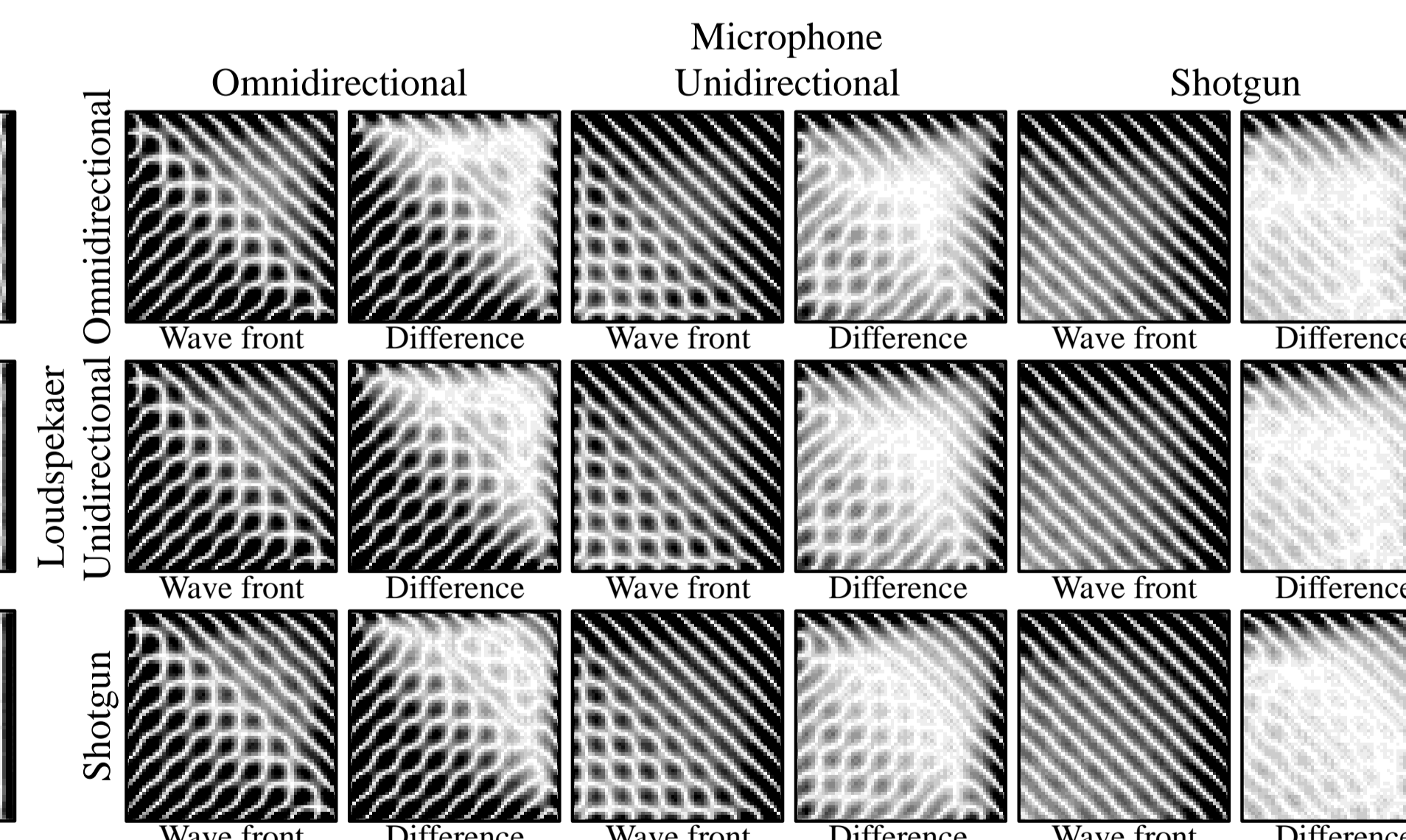
f = 500 Hz, d = 10 m, θ = 45°



f = 500 Hz, d = 100 m, θ = 0°



f = 500 Hz, d = 100 m, θ = 45°



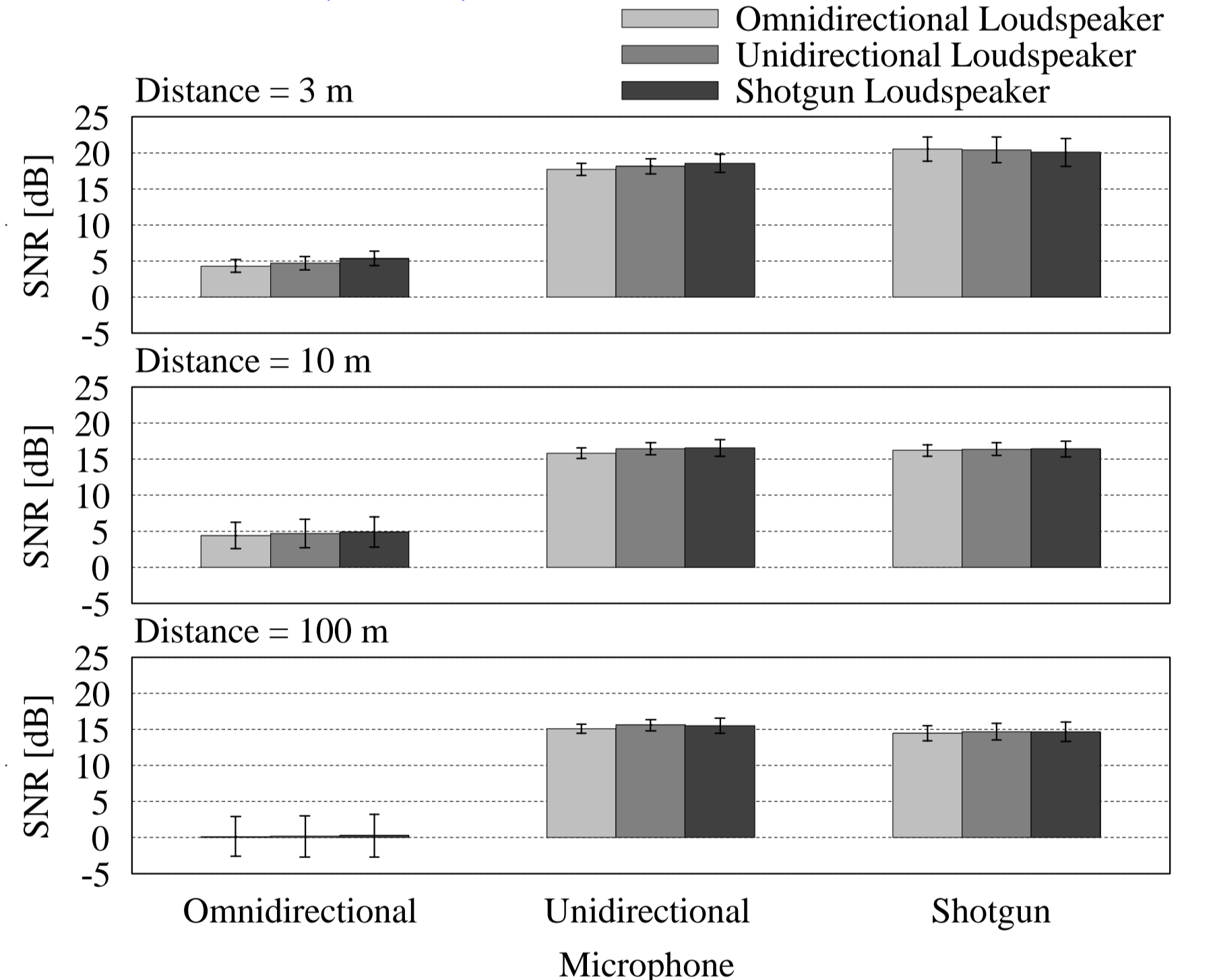
SNRによる評価

- SNR (Signal-to-Noise Ratio)

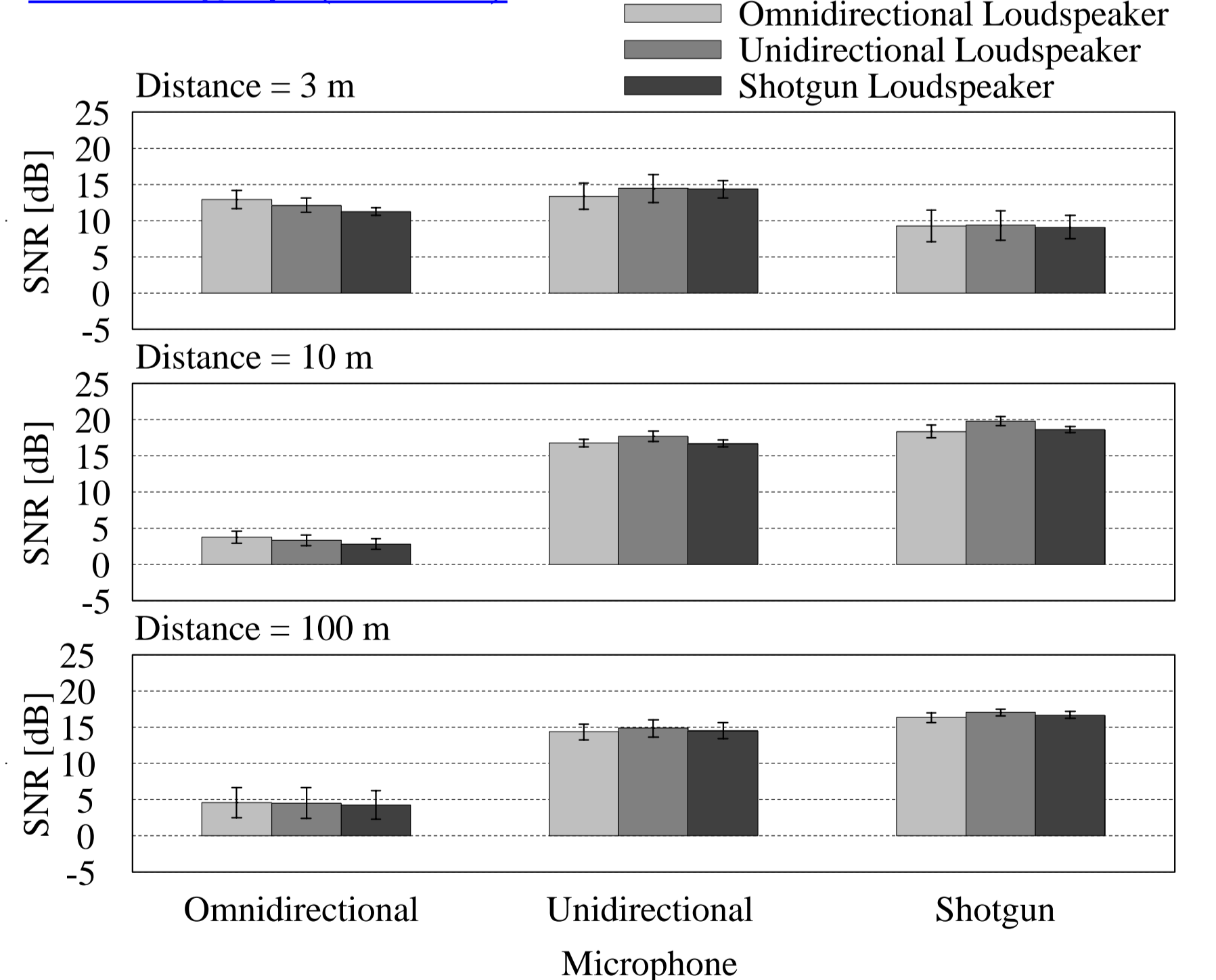
- r_a の範囲: |r_x|, |r_y| < 1
- F (= 13): 周波数の数

$$\text{SNR}[\text{dB}] = \frac{1}{F} \sum_f \left[10 \log_{10} \frac{\sum_{\mathbf{r}_a} \{p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)\}^2}{\sum_{\mathbf{r}_a} \{p(\mathbf{r}_a, f, 0) - p_o(\mathbf{r}_a, f, 0)\}^2} \right]$$

SNRの結果 (θ = 0°)



SNRの結果 (θ = 45°)



4. まとめ

- 波面合成法による三次元音場再現におけるマイクロホン及びスピーカの指向特性による波面の合成精度への影響を検討するために、計算機シミュレーションを実施
- 2種類の領域 (半径2 mの円, 一辺4 mの正方形)におけるシミュレーションの結果, 以下のことが判明
 - スピーカの指向特性による影響はほとんど見られない
 - 無指向性マイクロホンよりも, 単一指向性及び超指向性マイクロホンをういた方が波面を忠実に合成できる
- 今後の課題
 - 領域を三次元空間上に設定した場合(球, 立方体など)におけるマイクロホン及びスピーカの指向特性による影響の検討
 - スピーカアレーを(実際の室内などの)残響空間に配置した場合の波面の合成精度の検討