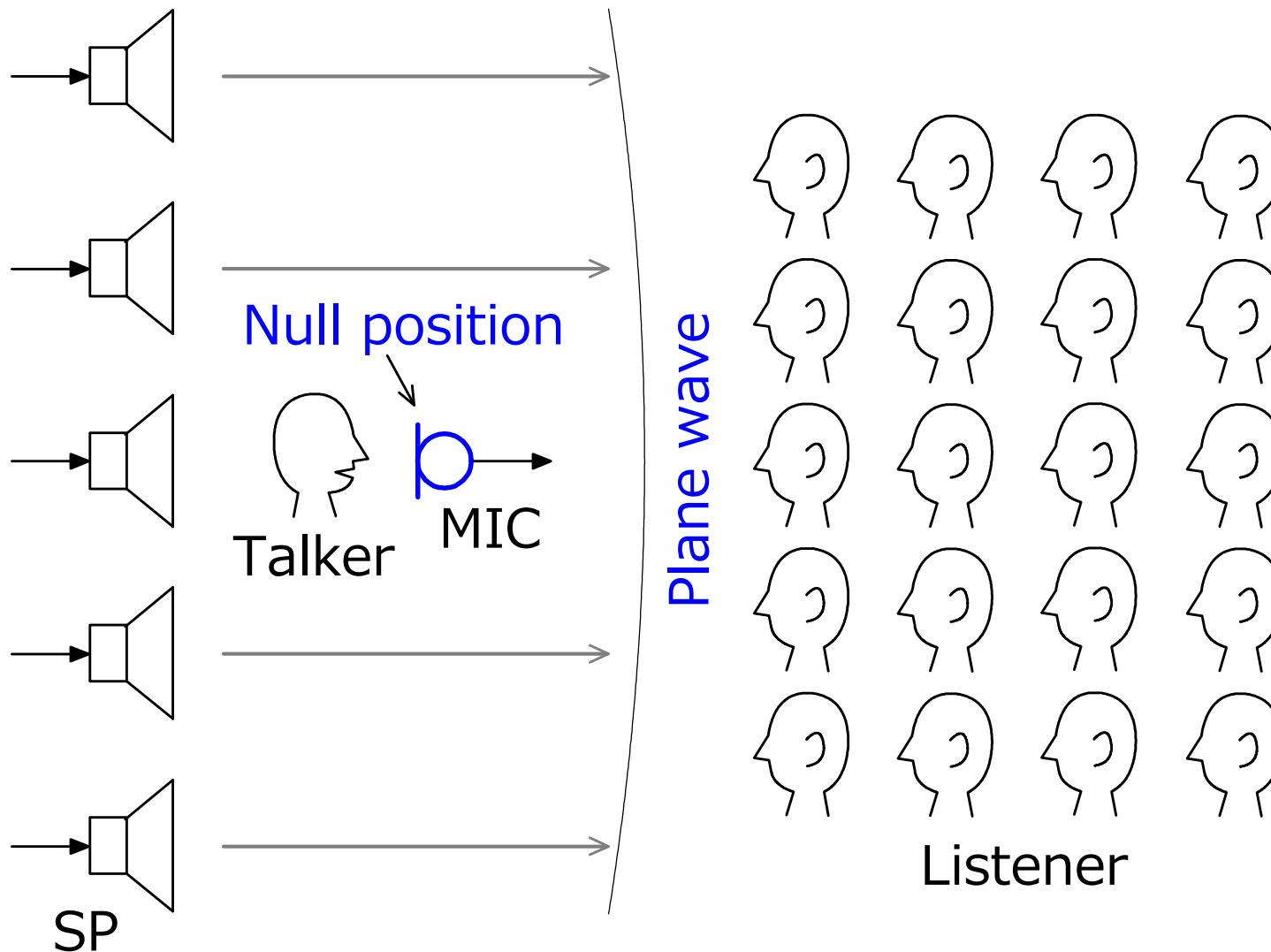

日本音響学会 2012年秋季研究発表会 (2012. 9. 20) 講演番号 2-9-9

近傍に音圧のヌル点を有する減算型スピーカ・アレイの設計

OHP発表資料

■ 実現したいシステム

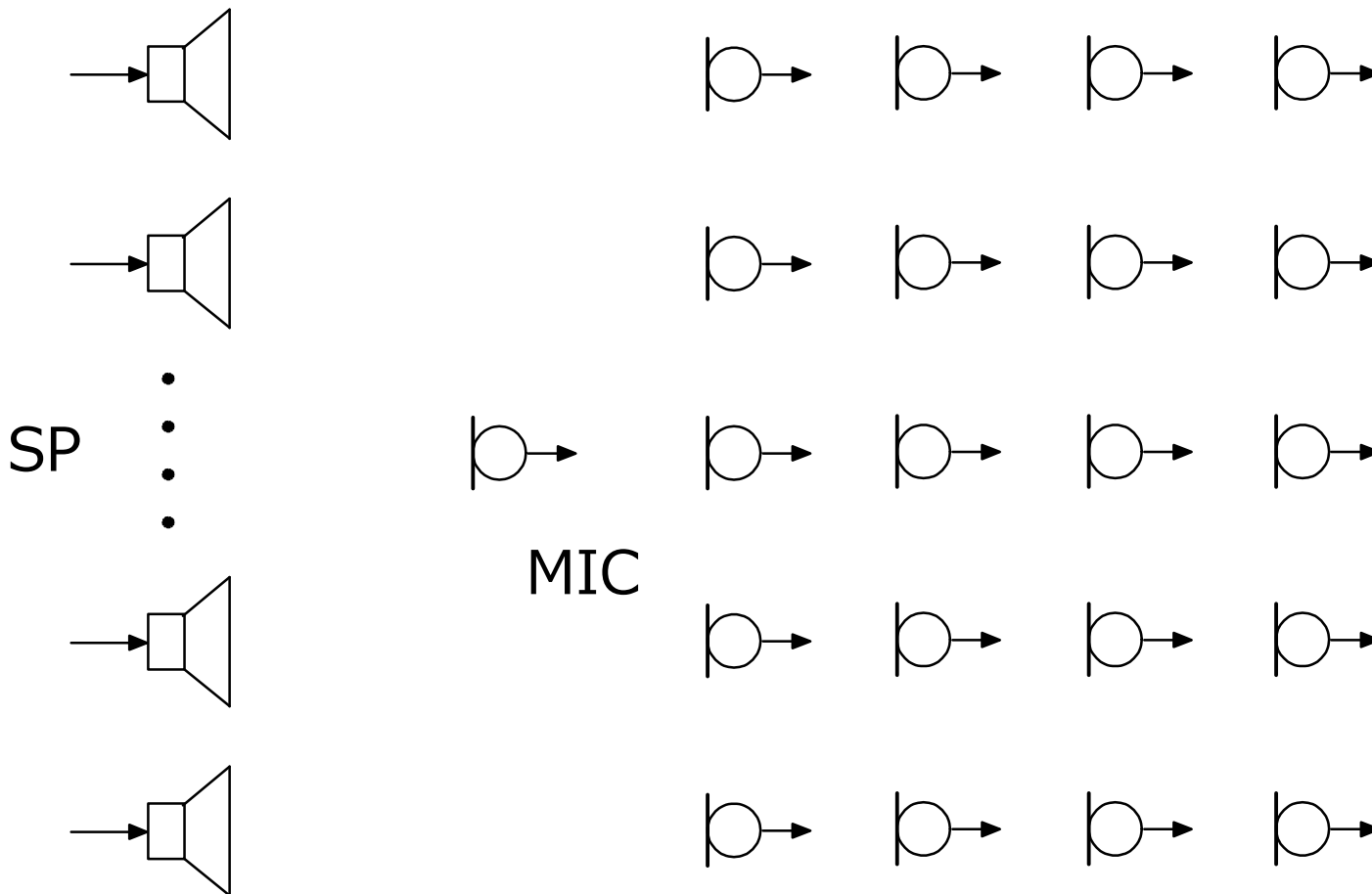
- ・ハウリングしにくい拡声システム
- ・スピーカ数は最低でも10個～20個のオーダーを想定



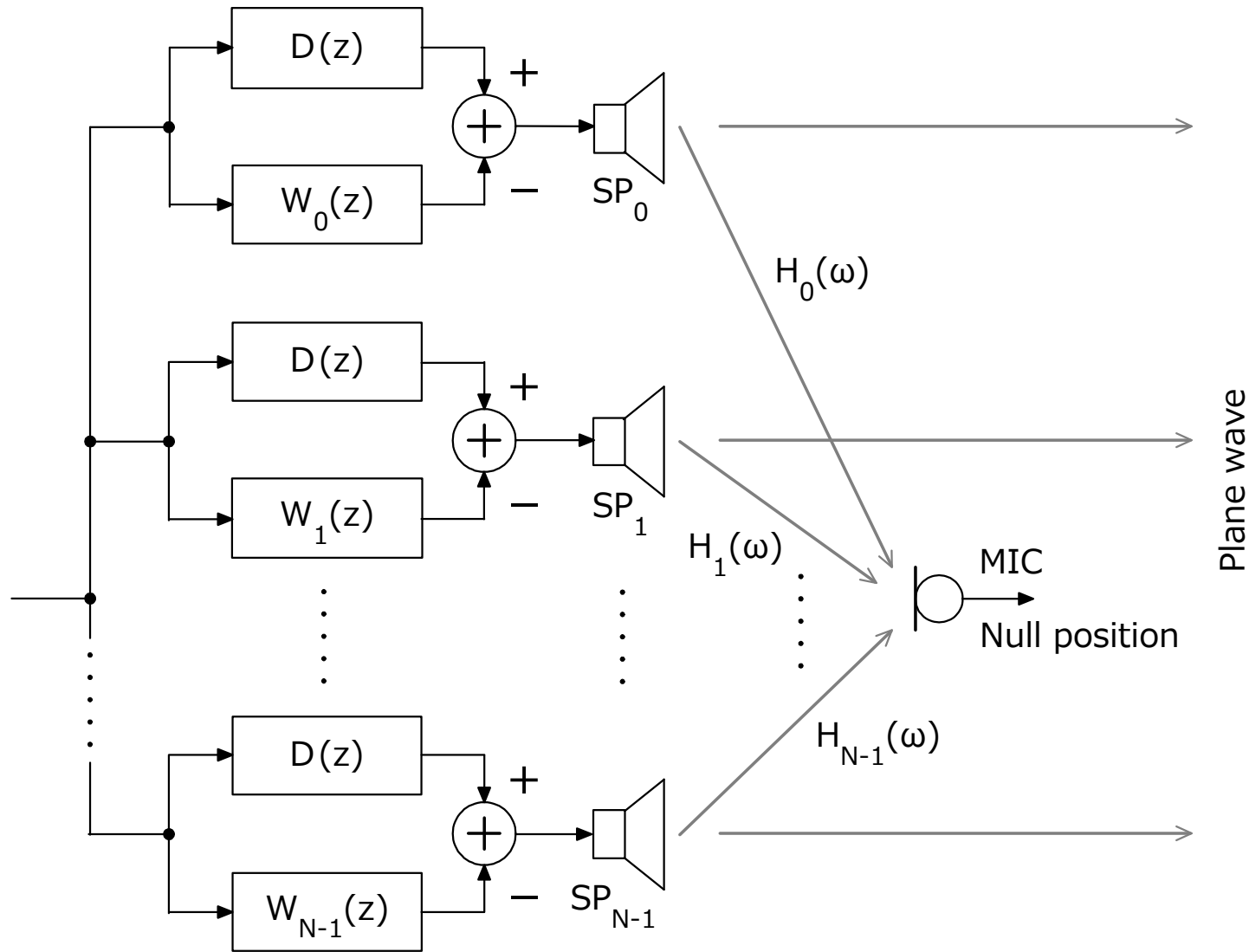
■ このような設計も出来なくはないが . . .

マイク数 \leq スピーカ数 ならば, 連立方程式を解いて
各受音点 (マイク位置) の音圧を独立に制御可能

\implies (マイク数) \times (スピーカ数) が大きくなる



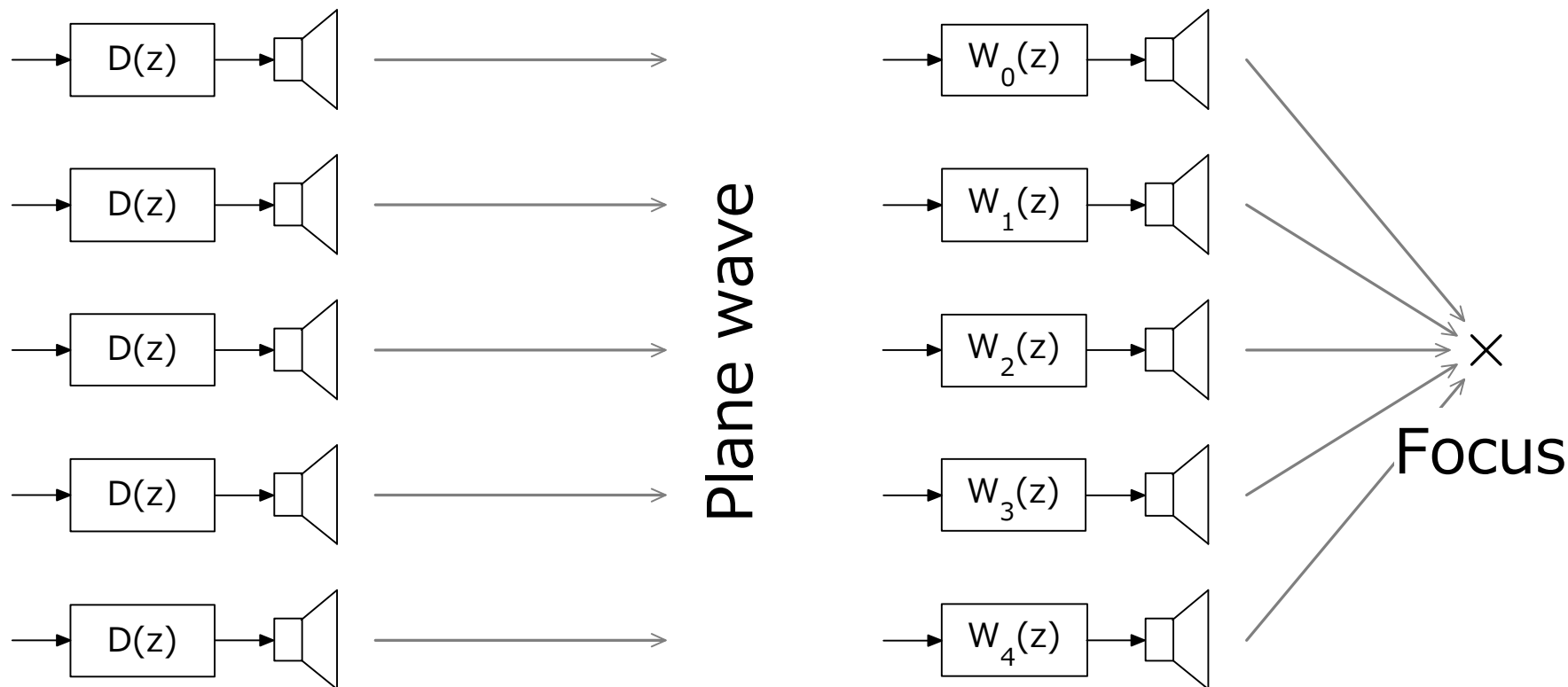
■ 減算型スピーカ・アレイの構成 (1/3)



$D(z)$: Delay

$W_n(z)$: Filter

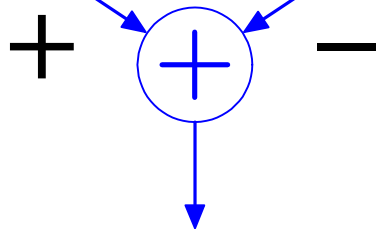
■ 減算型スピーカ・アレイの構成 (2/3)



$D(z)$: Delay

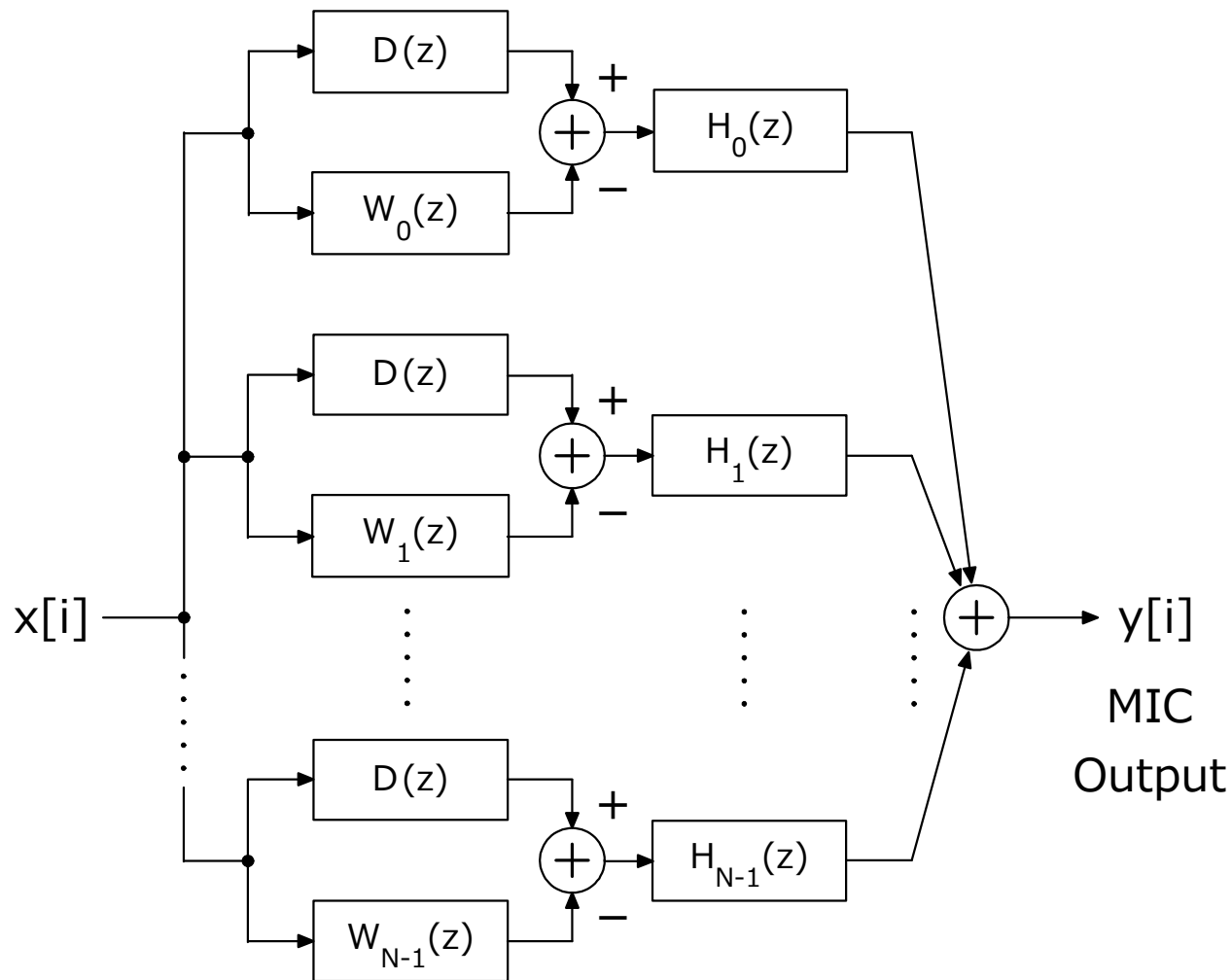
$W_n(z)$: Filter

2つのシステムの
重ね合わせ (減算)



減算型マイク・
アレイに類似

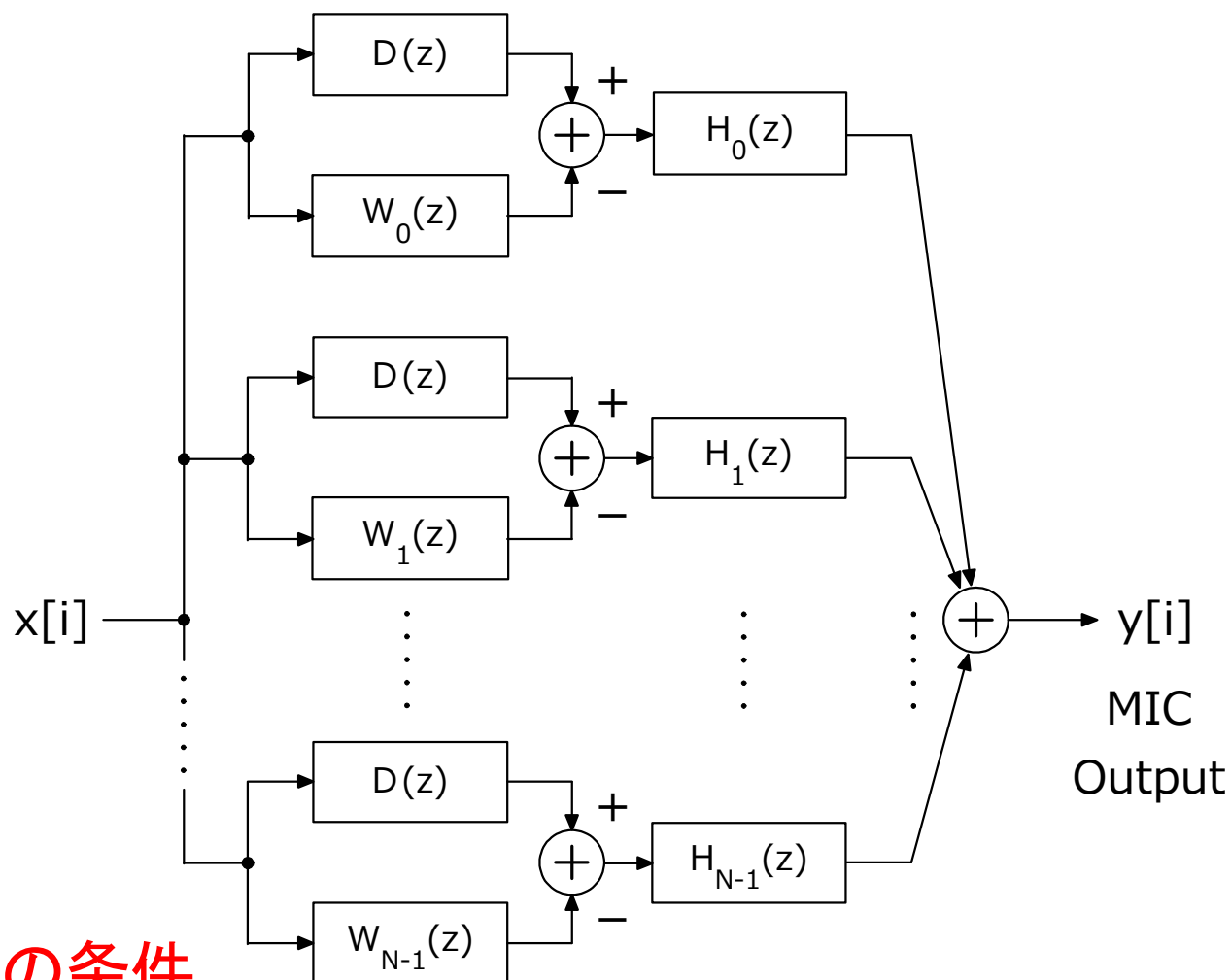
■ 減算型スピーカ・アレイの構成 (3/3)



$$D(z) \{ H_0(z) + H_1(z) + \dots + H_{N-1}(z) \} = W_0(z) H_0(z) + W_1(z) H_1(z) + \dots + W_{N-1}(z) H_{N-1}(z)$$

$$W_0(z) + W_1(z) + \dots + W_{N-1}(z) = 0$$

■ 減算型スピーカ・アレイの構成 (3/3)



ヌル形成の条件

$$D(z) \{ H_0(z) + H_1(z) + \dots + H_{N-1}(z) \} = W_0(z) H_0(z) + W_1(z) H_1(z) + \dots + W_{N-1}(z) H_{N-1}(z)$$

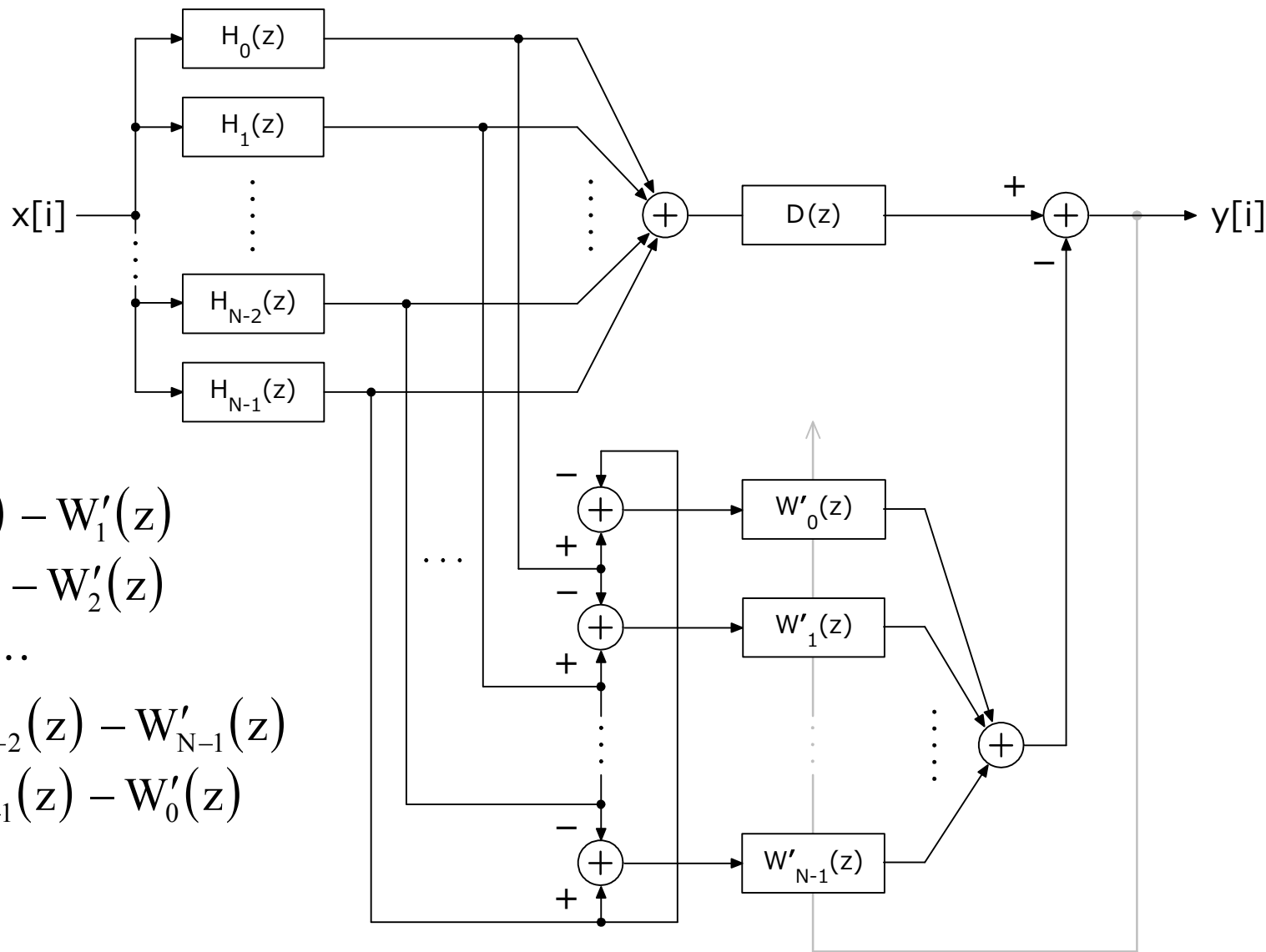
$$W_0(z) + W_1(z) + \dots + W_{N-1}(z) = 0$$

$W_n(z)$ が遠方の音圧特性に影響を及ぼさないための拘束条件

■ 減算型スピーカ・アレイの等価回路・設計回路

$W_n(z)$ を
 $W'_n(z)$ に
置き換え

$$\left\{ \begin{array}{l} W_0(z) = W'_0(z) - W'_1(z) \\ W_1(z) = W'_1(z) - W'_2(z) \\ \dots\dots\dots \\ W_{N-2}(z) = W'_{N-2}(z) - W'_{N-1}(z) \\ W_{N-1}(z) = W'_{N-1}(z) - W'_0(z) \end{array} \right.$$



■ 減算型スピーカ・アレイの等価回路・設計回路

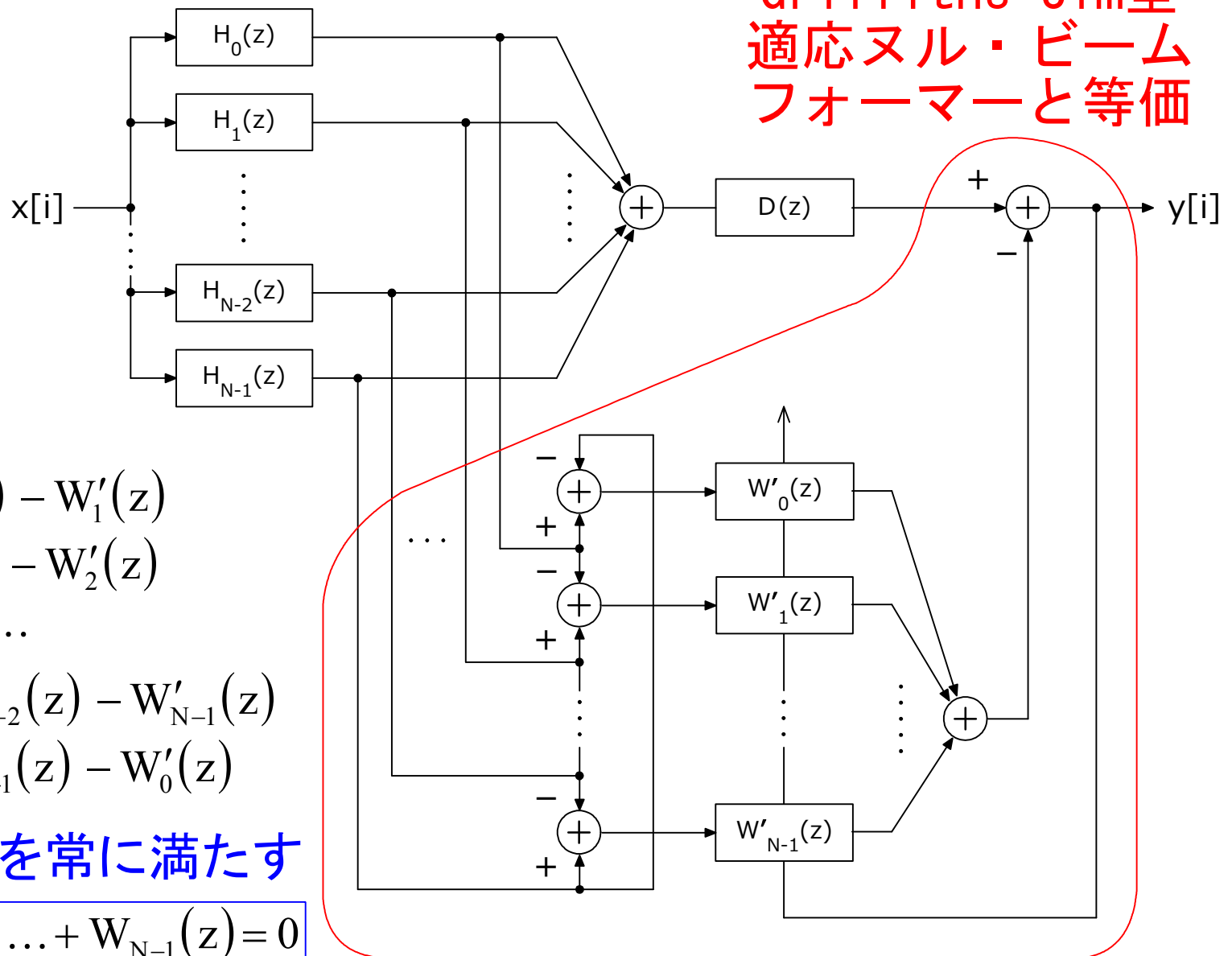
Griffiths-Jim型
適応ヌル・ビーム
フォーマーと等価

$W_n(z)$ を
 $W'_n(z)$ に
置き換え

$$\left\{ \begin{array}{l} W_0(z) = W'_0(z) - W'_1(z) \\ W_1(z) = W'_1(z) - W'_2(z) \\ \dots\dots\dots \\ W_{N-2}(z) = W'_{N-2}(z) - W'_{N-1}(z) \\ W_{N-1}(z) = W'_{N-1}(z) - W'_0(z) \end{array} \right.$$

↓ 拘束条件を常に満たす

$$W_0(z) + W_1(z) + \dots + W_{N-1}(z) = 0$$



■ 減算型スピーカ・アレイの設計手順

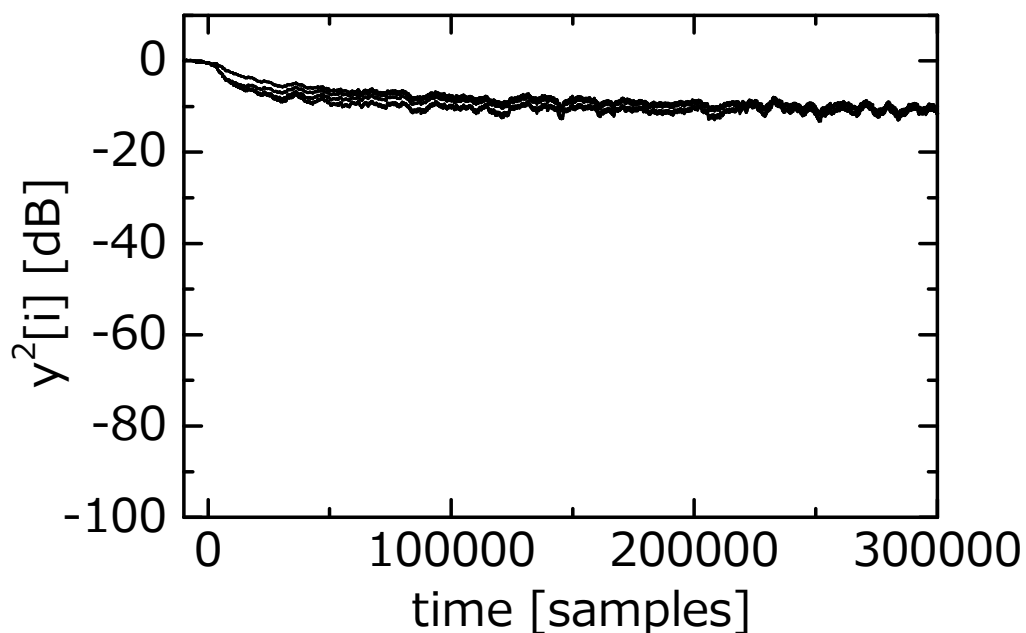
1. 音響系 $H_n(\omega)$ のインパルス・レスポンスを測定
2. 適応アルゴリズムを用いて $W_n'(z)$ のオフライン学習
(トレーニング信号には白色雑音等を用いればよい)
3. 学習終了後, $W_n'(z)$ のフィルタ係数 $w'_n[k]$ から
 $W_n(z)$ のフィルタ係数 $w_n[k]$ を求める

$$\left\{ \begin{array}{l} w_0[k] = w'_0[k] - w'_1[k] \\ w_1[k] = w'_1[k] - w'_2[k] \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ w_{N-2}[k] = w'_{N-2}[k] - w'_{N-1}[k] \\ w_{N-1}[k] = w'_{N-1}[k] - w'_0[k] \end{array} \right. \quad \Leftarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} W_0(z) = W'_0(z) - W'_1(z) \\ W_1(z) = W'_1(z) - W'_2(z) \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ W_{N-2}(z) = W'_{N-2}(z) - W'_{N-1}(z) \\ W_{N-1}(z) = W'_{N-1}(z) - W'_0(z) \end{array} \right.$$

(4. $w_n[k]$ の設定が終わったら拡声システム起動)

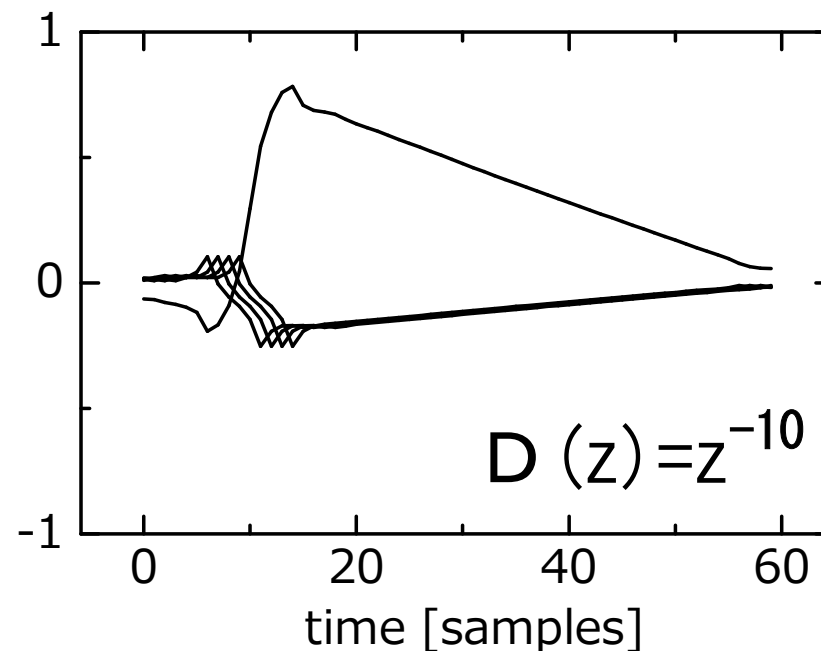
■ シミュレーション結果：残響無し

- ・ 残響無しの状態を模擬： $h_n[k] = \delta[k-n-1]$
- ・ LMS、素子数5、遅延 $D(z) = 1, z^{-5}, z^{-10}, z^{-20}, z^{-30}$



学習曲線

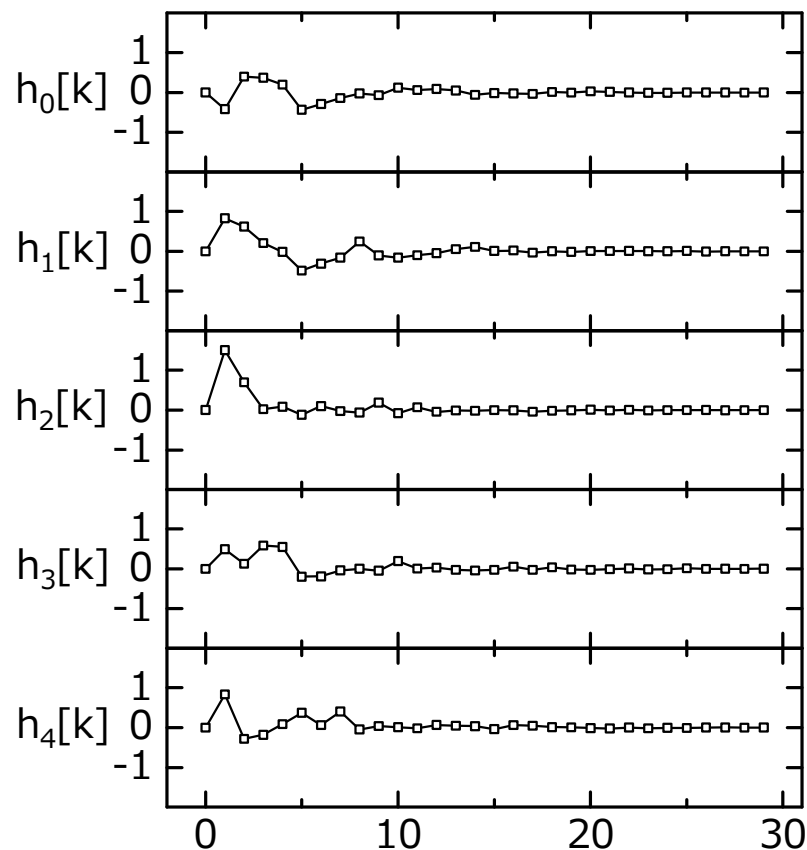
($y^2[i]$ の短時間平均)



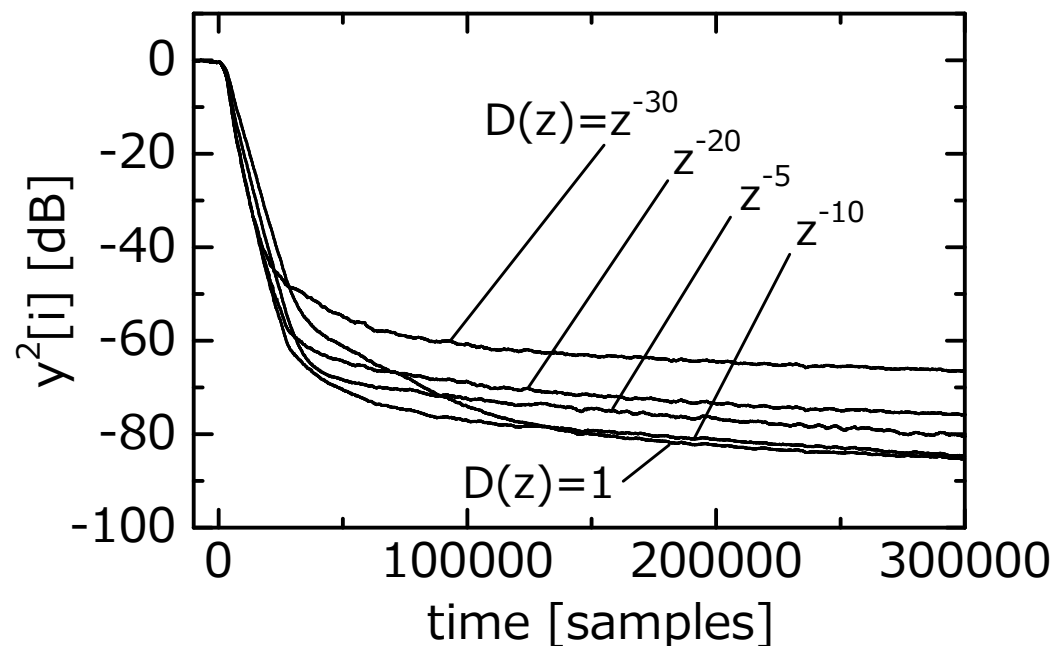
w_n' [k]

■ シミュレーション結果：残響有り（1/2）

- ・ LMS、素子数5、遅延 $D(z)=1, z^{-5}, z^{-10}, z^{-20}, z^{-30}$



$H_n(z)$ のインパルス
レスポンス

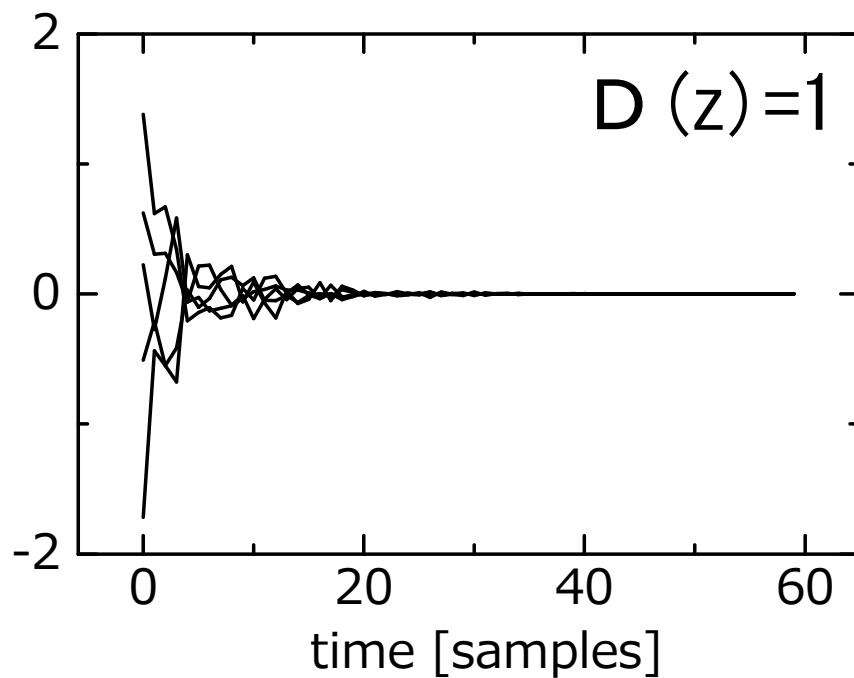


学習曲線
($y^2[i]$ の短時間平均)

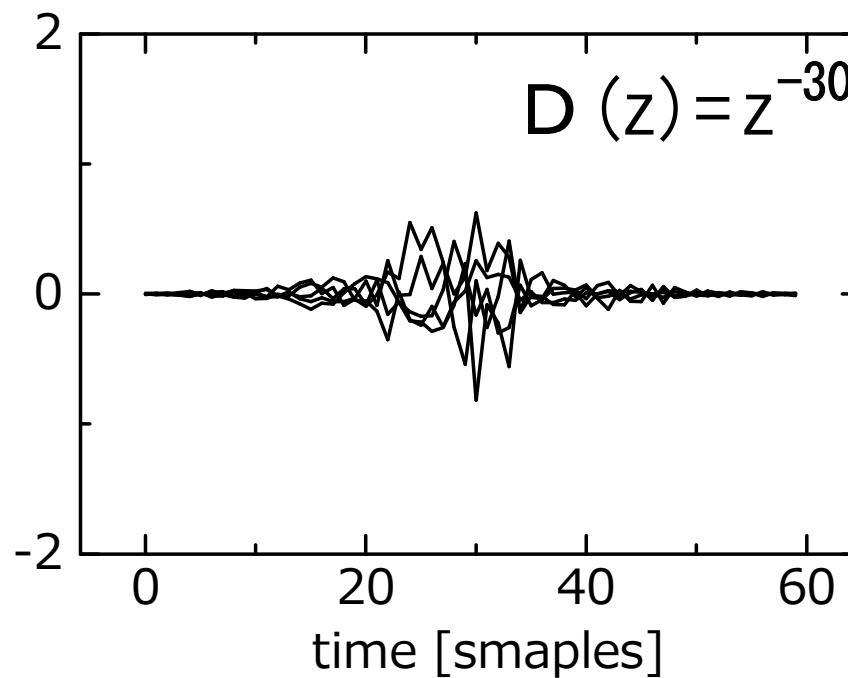
■ シミュレーション結果：残響有り（2/2）

収束後の適応フィルタ係数
 w_n' [k] を制御フィルタ係数
 w_n [k] に変換

$$\left\{ \begin{array}{l} w_0[k] = w'_0[k] - w'_1[k] \\ w_1[k] = w'_1[k] - w'_2[k] \\ \dots\dots\dots \\ w_{N-2}[k] = w'_{N-2}[k] - w'_{N-1}[k] \\ w_{N-1}[k] = w'_{N-1}[k] - w'_0[k] \end{array} \right.$$



w_n [k]



w_n [k]

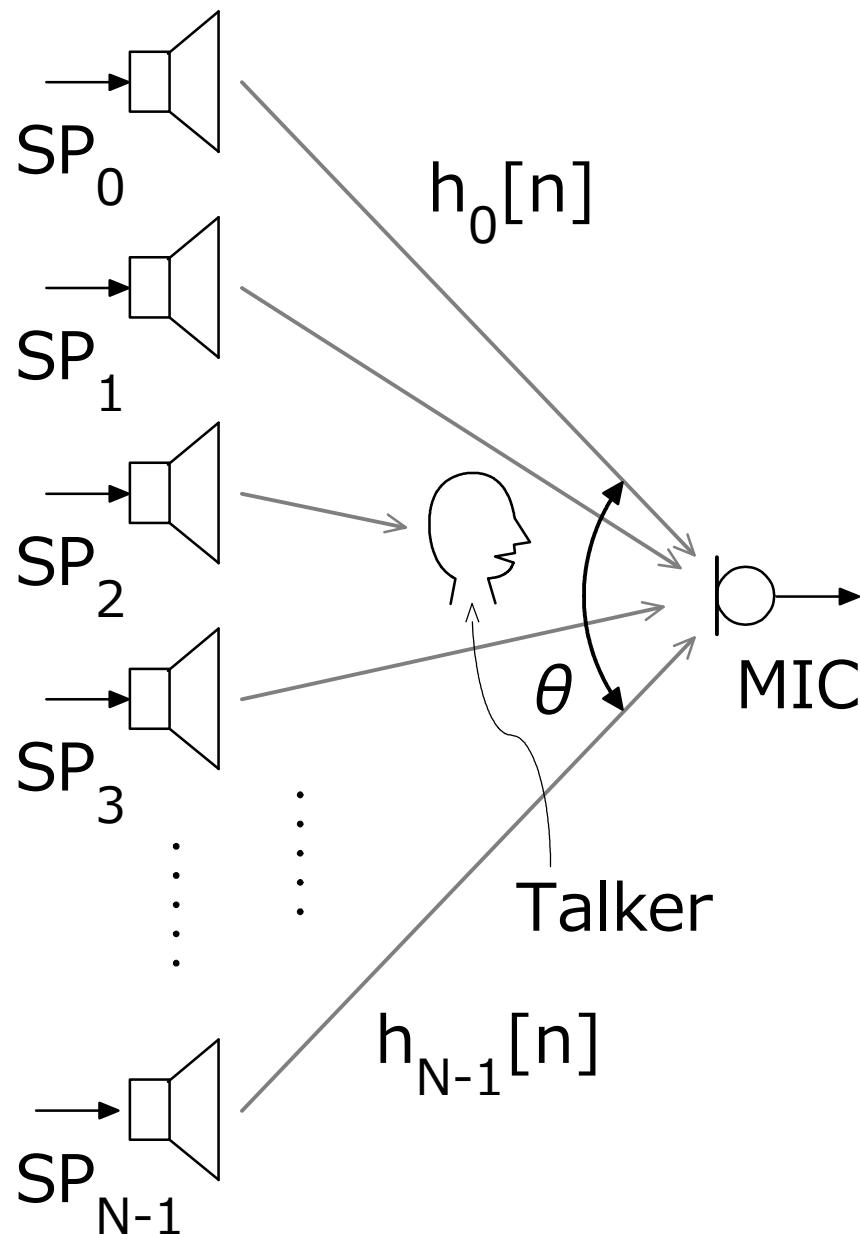
■ 話者（障害物）の影響（1 / 2）

- 設計後の拡声システムで、音響系のインパルス・レスポンスが変化した状況をシミュレーション

$$h_2[k] \rightarrow g \cdot h_2[k]$$

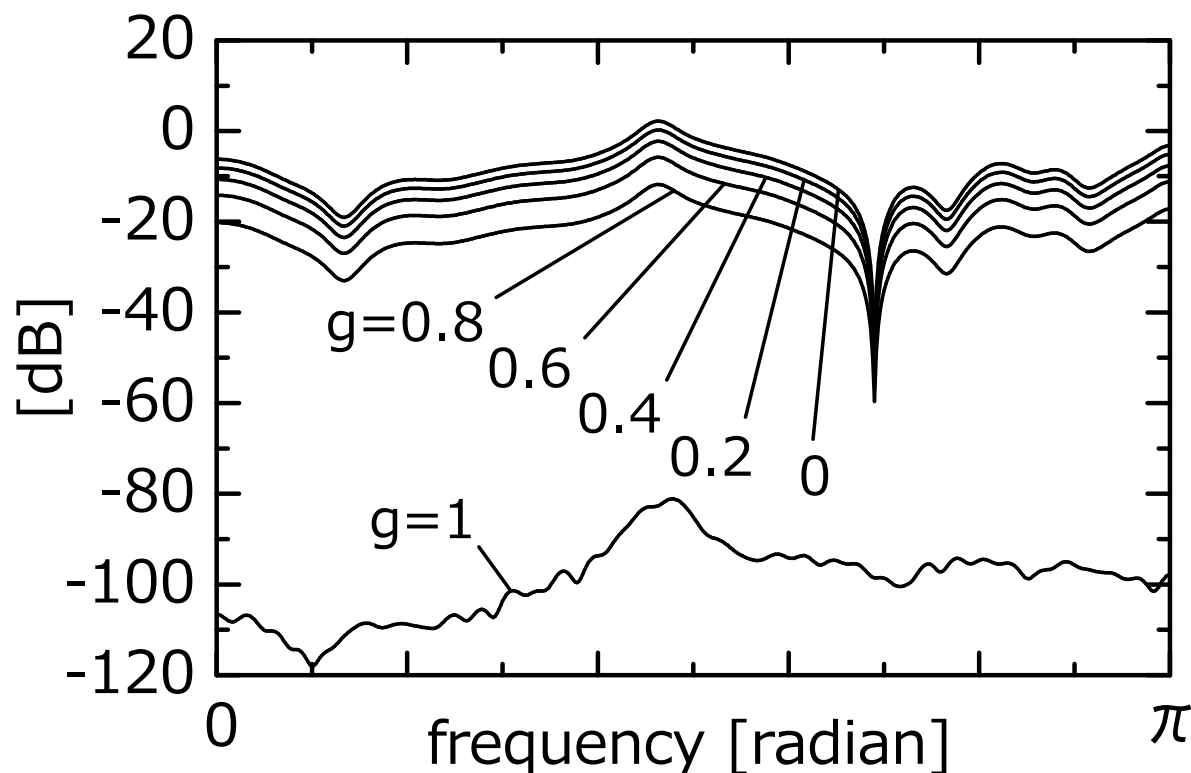
$$(g=0\sim 1)$$

- 素子数 $N=5$
- 遅延 $D(z) = z^{-10}$



■ 話者（障害物）の影響（2/2）

- ・ 音響系のインパルス・レスポンス変動により音圧のヌル量が減少する



- ・ 素子数（スピーカ数）が十分多ければ、低音域で平均 6 dB~10dB程度のヌル量は確保可能？

● 問題点・検討を要する点

- ・ アレイの近く（話者、前列の聴衆位置）では拡声音に不自然なエコーがつく？ アレイの近くほど周波数特性が細かく波打つ？
 - 実験で確認する予定
- ・ 音圧のヌル点形成に必要とされる音響系のインパルス・レスポンスの測定精度（＝測定に要する時間）
- ・ 聴衆（移動・変形する吸音体）の影響の大きさ

● 実現可能か？（将来の夢）

- ・ 拡声システム動作中の自動的・適応的なフィルタ特性制御（音響系のインパルス・レスポンス計測とオフライン学習を省略してヌル形成）

■ まとめ

- 近傍に音圧のヌル点を形成可能な減算型スピーカ・アレイを設計可能（キルヒホッフ積分や理論的に厳密な波面合成によらない簡易な設計手法）
- 残響のある部屋で音圧のヌル点形成が出来る（理論的な疑義は存在しない）
- 音響系のインパルス・レスポンスの揺らぎや話者（障害物）の影響の少ない低音域（ $\sim 500\text{Hz}/1000\text{Hz}$ ？）で実用上有益な 6 dB程度のヌル量を得られる見込み有り
- 定量的な性能評価は今後の課題（残響のある部屋での実験が必要）