

# 没入型聴覚ディスプレイ装置“音響樽”による 音場シミュレータの実現と室内音響指標による評価 - フィードバック抑制効果の検証 - \*

○渡邊祐子, 吉田飛里, 河野峻也, 池田雄介, 伊勢史郎 (東京電機大学/JST, CREST)

## 1 はじめに

没入型聴覚ディスプレイ装置“音響樽”[1]の内部で演奏することにより、あたかもホールで演奏しているような音の響きを波面として物理的に再生することを目的とする音場シミュレータが提案されている[2]。本稿では、音場再現精度の低下の原因となるフィードバックを抑制することが可能な音場シミュレータを実現し、その性能を室内音響指標により検証する。

## 2 音場シミュレータシステム

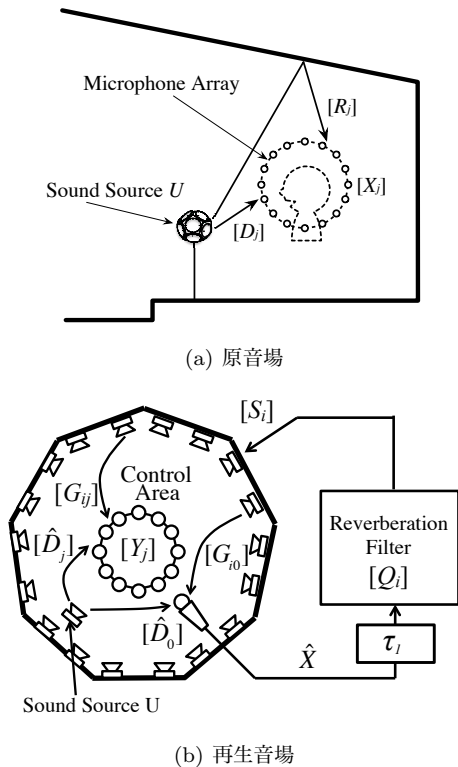


Fig. 1 音場シミュレータシステム概念図

音場シミュレータの概略図を Fig.1 に示す。再現対象となる原音場において音源信号を  $U$ 、音源から BoSC マイクロホン [1] までの伝達関数を  $[F_j] = [D_j + R_j] (\in \mathbb{C}^{1 \times M})$  とする。ただし、 $[D_j]$  は直接音成分、 $[R_j]$  は反射音成分である。また再生音場には音源 (楽器を想定) からの音響信号を収音するためのマイクロホン (以下、楽音用マイクロホン) を設置し、その出力信

号  $\hat{X}$  と残響生成用フィルタ  $[Q_i] (\in \mathbb{C}^{1 \times N})$  を実時間で畳み込んだ信号  $[S_i] (\in \mathbb{C}^{1 \times N})$  をスピーカから再生することで、原音場と同じ残響を有する音場を再現する。以上の条件から残響生成用フィルタ  $[Q_i]$  を求めると

$$[Q_i] = \frac{[R_j][G_{ij}]^{-1}}{\hat{D}_0 + [R_j][G_{ij}]^{-1}[G_{i0}]} e^{j\omega\tau_1} \quad (1)$$

となる。ここで指向性をもつ楽音用マイクロホンを音源に近くに設置することにより  $\hat{D}_0 \gg [R_j][G_{ij}]^{-1}[G_{i0}]$  が成り立ち、また音源から楽音用マイクロホンへの伝達特性は遅延  $\tau_2$  のみ、すなわち周波数振幅特性は平坦と考え  $\hat{D}_0 = e^{-j\tau_2\omega}$  を仮定する。さらに反射音成分  $[R_j]$  を  $\tau_r$  だけ前方に時間シフトした信号を  $[R'_j] = [R_j]e^{j\omega\tau_r}$ 、逆システムによる遅延を  $\tau_h$  とすると、実際に設計する残響生成用フィルタ  $[Q'_i]$  は

$$[Q'_i] \doteq [R'_j][H_{ji}] = [R_j][G_{ij}]^{-1} e^{j\omega(\tau_r - \tau_h)} \quad (2)$$

となる。ただし  $[G_{ij}] (\in \mathbb{C}^{N \times M})$  は再生音場における  $i$  番目のスピーカから境界面  $S'$  上の  $j$  番目のマイクロホンへの伝達関数マトリクス、 $[H_{ji}] (\in \mathbb{C}^{M \times N})$  は逆システムの伝達関数マトリクスである。

音響樽内に設置した演奏音収音用マイクロホン (以下、楽音用マイクロホン) の位置で、音波をキャンセルするように逆システムを設計する手法 [3] を採用する。この手法によりフィードバックの抑制が原理的には可能であることはすでに確認した [4]。本稿ではフィードバックキャンセラを実装した音場シミュレータを実現し、その性能について室内音響指標を用いて評価する。

## 3 音場シミュレータの評価実験

### 3.1 実験条件

原音場として残響時間約 1.5s の多目的ホールのインパルス応答を測定し、反射音成分の開始時刻を 25ms として残響生成用フィルタを作成した。また式 (2) の  $[H_{ji}]$  は、2048 点で切り出したインパルス応答を FFT 長 8192 点で周波数軸上に変換後、正規化パラメータ法を用いて遅延数 2048 点 (約 42.7 ms) として

\* Development of a Sound-Field Simulation System and its Evaluation on Room Acoustics, - Examination of Acoustic Feedback Cancellation - by WATANABE, Yuko, YOSHIDA, Hisato, KOHNO, Shunya, IKEDA, Yusuke and ISE, Shiro (Tokyo Denki University/CREST, JST)

フィルタ長 4096 点の逆システムとして設計した [5]。Fig.2 に音場シミュレータの計測図を示す。床面から 145cm の音響樽壁面に楽音用マイクロホンとして、小型の無指向性マイクロホン (DPA-4060) を 1 つ設置し、音響樽中心、高さ 120cm に設置した BoSC マイクロホン を評価点とした。

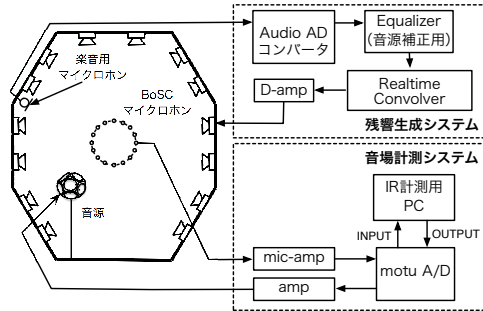


Fig. 2 再現精度計測システム図

### 3.2 実験結果

計測した音場シミュレータのインパルス応答から、オクターブ帯域別の残響時間と、反射音エネルギーとして初期反射音エネルギー  $L_{er}$ 、残響音エネルギー  $L_{rev}$  を算出した。直接音エネルギーを直接音到達時刻から 10ms までのエネルギー、初期反射音エネルギーを 25~100ms のエネルギーと直接音エネルギーの比、残響音エネルギーを 100ms 以降のエネルギーと直接音エネルギーの比とした。残響時間を Fig.3 に示す。Fig.3 より、フィードバック制御した場合には原音場とシミュレーション音場との残響時間の誤差は小さいが、フィードバック制御なしの条件では、500Hz 以下の帯域で誤差が大きいことがわかる。

次に反射音エネルギーを Fig.4 に示す。残響時間とは異なり、初期反射音エネルギーおよび残響音エネルギーはフィードバック制御の有無にかかわらず、2kHz 以下の帯域において原音場の応答と大きな差異が見られる。これは定式化において  $\hat{D}_0$  の周波数振幅特性が平坦であると仮定したことが原因と考えられる。そこで初期反射音エネルギーと残響音エネルギーの総和が原音場とフィードバック制御時の再生音場で等しくなるように楽音用マイクロホンの入力信号の周波数振幅特性を補正した場合について検討する。

楽音用マイクロホンの入力信号の周波数振幅特性を補正した場合の初期反射音エネルギーおよび残響音エネルギーを Fig.5 に示す。補正によりフィードバック制御における初期反射音エネルギー、残響音エネルギー共に原音場の特性に近づき、音場が概ね良好に再現できることが確認できる。

## 4 むすび

フィードバック制御を行うことにより残響時間、初期反射音エネルギー、残響音エネルギーなどの室内音響指標に関して原音場に近い音場シミュレータを実現できることを確認した。

### 参考文献

- [1] 伊勢他, 計測と制御, 51(12), 1110-1115 (2012.12).
- [2] 渡邊 他, 音講論 (秋), 1-Q-27, 2014.
- [3] 三野 他, 信学技報, EA, 101(479), 67-74, 2001.
- [4] 河野 他, 音講論 (秋), 1-Q-32, 2014.
- [5] 伊勢, 音講論 (秋), 1-1-2, 2014.

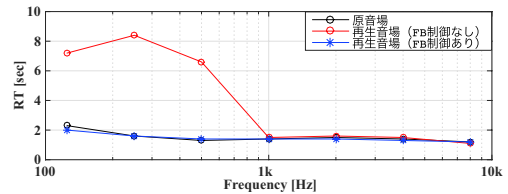
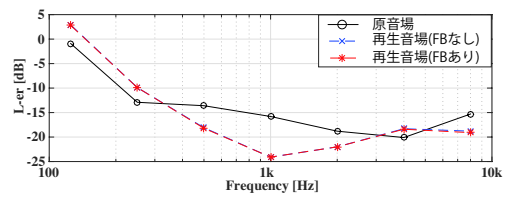
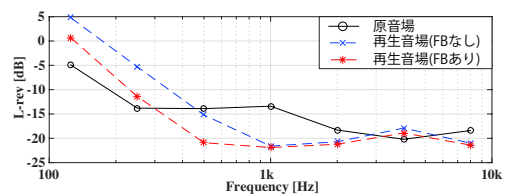


Fig. 3 オクターブ帯域別の残響時間

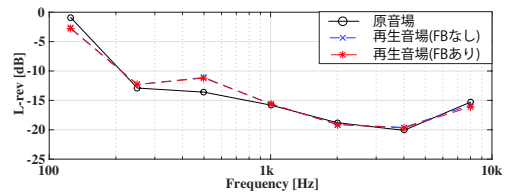


(a) 初期反射音エネルギー

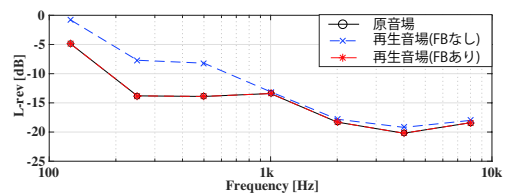


(b) 残響音エネルギー

Fig. 4 反射音エネルギーの比較 (補正前)



(a) 初期反射音エネルギー



(b) 残響音エネルギー

Fig. 5 反射音エネルギーの比較 (補正後)