

残響付加システムによる生成音場の残響時間の可変範囲に関する検討

03-240100 水野 綾音

1. はじめに

演劇、合唱、室内楽といった幅広い用途を想定して運用されるホールでは、用途によって異なる音響特性を実現する残響可変技術への需要が高い。残響可変技術は大きくパッシブ制御とアクティブ制御に分けられる。前者の例としては吸音カーテンや昇降式天井など建築的な操作によるものが、後者の例としては電気音響を利用した残響付加が挙げられ、特に近年は FIR (Finite Impulse Response) フィルタによる畳み込みを用いたシステムが普及している。本研究室では、この電気音響による残響付加システムを対象に、モデルベースド制御に基づく音場の定量的な調整手法に関する研究を進めている。本研究ではその基礎的検討として、FIR フィルタの持つ残響特性と、生成される音場の残響時間との関係について分析を行う。

2. 残響付加システムの構成

本研究では電気音響による残響付加システムとして、Active Field Control Enhance (AFC) <sup>[1]</sup>を使用する。AFC の基本モデルを図 1 に示す。システムは初期反射音制御部と残響音制御部に分けられ、それぞれ異なる制御方式が用いられる。初期反射音制御部では、音源からの臨界距離以内に設置した指向性マイクで直接音を收音し、プロセッサで処理した後、空間内に分散配置したスピーカーから再生する。残響音制御部では、音源からの臨界距離付近に設置した全指向性マイクで拡散音を收音し、同様にプロセッサでの処理後スピーカーから再生する。初期反射音制御部と異なる特徴として、再生された音が再びマイクで收音されることで発生する音響フィードバックを積極的に利用していることが挙げられる。このとき、フィードバックループを 1 周する間の信号増幅度を表すループゲインが大きいほど残響時間延長度が大きくなる。

AFC のブロック図を図 2 に示す。EQ は周波数帯域ごとに信号の大きさを増減することで、全体のループゲインを操作する。FIR(Finite Impulse Response)はコンサートホール等で測定された室内インパルス応答を基に生成した信号を入力音に畳み込んで響きを付加する処理を指し、特に残響音制御部で畳み込む信号の特性によって残響時間延長度が変化する。Matrix はマイク・スピーカの割り当て処理で、本研究では固定条件として扱う。

3. 残響時間調整可能範囲の検討

3.1 前提条件

AFC を使用する空間は、半無響室(残響時間  $T_{20} = 0.1$  s)とした。半無響室内の機器配置を図 3 に示す。また、ステージ音響を想定し、音場評価用のマイク・スピーカを室中央部の高さ 1.5 m に 1 m 離して設置した。

使用する FIR の種類や、残響音制御部における FIR タップ数を表 1 に示す。A-F の 6 ケースにおいて、それぞれ AFC 調整を行った際の残響時間調整可能範囲を比較した。

また各 FIR を使用した際の残響エネルギーを揃える目的で、 $ST_{Early}$  が -16dB になるよう事前調整を行った。

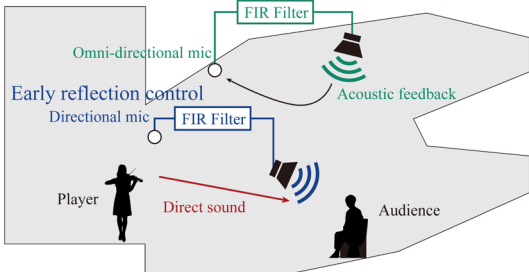


図 1 残響付加システムの基本モデル

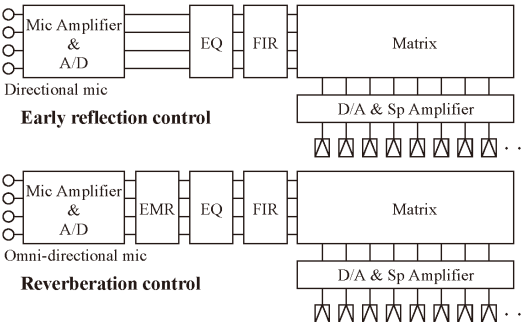


図 2 残響付加システムのブロック図

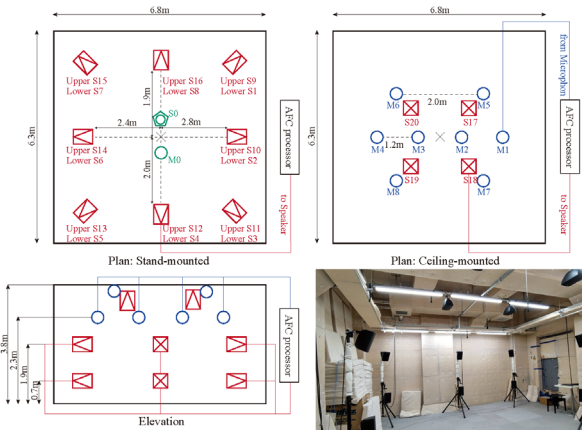


図 3 半無響室の機器配置

表 2 FIR の種類

ID	Venue	RT[s]	Length[s]
A	Piano testing room	1.3	5.4
B	Small concert hall	1.6	4.4
C	Small symphony hall	1.9	5.4
D	Large concert hall	2.5	4.7
E	Large symphony hall	2.7	5.4
F	Cathedral	5.0	7.0

なお、AFC 調整および評価はシミュレーションモデル上で行うこととし、音場評価用の伝達関数は次式で計算される[2]。

$$\begin{aligned} h'_{00} &= h_{00} + \mathbf{h}_{S0}^T \mathbf{G} \mathbf{h}_{0M} + \mathbf{h}_{S0}^T \mathbf{G} (\mathbf{H} \mathbf{G}) \mathbf{h}_{0M} \\ &\quad + \mathbf{h}_{S0}^T \mathbf{G} (\mathbf{H} \mathbf{G}) (\mathbf{H} \mathbf{G}) \mathbf{h}_{0M} + \dots \\ &= h_{00} + \mathbf{h}_{S0}^T \mathbf{G} (\mathbf{I} - \mathbf{H} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{h}_{0M} \end{aligned} \quad (1)$$

$\mathbf{H}_{ij} = h_{ij}$  : 音場内 S1~20-M1~8 間の伝達行列

$\mathbf{G}_{ij} = g_{ji}$  : AFC 内 M1~8-S1~20 の伝達行列

$\mathbf{h}_{0M,i} = h_{0i}$  : S0-M1~8 間の伝達ベクトル

$\mathbf{h}_{S0,i} = h_{j0}$  : S1~20-M0 間の伝達ベクトル

### 3.2 調整の流れ

各 FIR を使用した状態で残響音制御部の EQ ゲインを調整し、 $T_{20}$  バンドパス値の上限・下限を分析した。分析の手順を図 4 に示す。

EQ の Q 値は、ピーク-3 dB の帯域幅が 1 オクターブとなる 1.4 で固定とした。また、EQ の中心周波数は、125-4k Hz の 1/1 オクターブバンドの中心周波数のうちいずれか 1 つとし、分析対象の  $T_{20}$  バンドパス値の中心周波数に対応させた。

上限値はハウリング条件( $\mathbf{H} \mathbf{G}$  の固有値の最大値>1)に依存するため、安全側を取って  $\mathbf{H} \mathbf{G}$  の固有値の最大値が 0.9 となる EQ のゲインを勾配降下法により求めて設定した。下限は AFC 内 EQ のゲインの最小設定値-18 dB に合わせて調整した。

なお、 $T_{20}$  は、直接音の後の急な信号の減衰による折れ曲がり为了避免するため、-15 dB から-35 dB の減衰に要した時間から算出した値とした。

これらの操作を、残響時間バンドパス値の中心周波数ごと、FIR のケースごとに行い、 $T_{20}$  バンドパス値の上限と下限を調べた。

### 3.3 結果と考察

ゲイン調整による  $T_{20}$  の可変範囲を図 5 に示す。グラフから、FIR の残響特性が大きく反映される傾向が見られた。これは元の響きが少ない半無響室で調整を行った影響と考えられる。異なる FIR 間の比較では、残響が長い FIR の方が  $T_{20}$  の調整幅が広がる傾向が確認できた。同一 FIR 内での比較では、高音域で調整幅が狭くなる傾向が見られた。また、本研究では  $ST_{\text{Early}}$  を-16 dB に事前調整した条件で検討したが、調整前の状態によって得られる結果が変化する可能性があるため、今後は初期状態の影響についても検討が必要である。

## 4. まとめ

本研究では、FIR の残響時間と生成音場の残響時間の可変範囲に対応が見られることが確認できた。この結果は、目標とする残響時間に応じた FIR の選択・設計に有用である。

今後の課題として、響きのある空間で同様の検討を行うこと、 $T_{20}$  の下限付近で減衰曲線に折れ曲がりが生じることによる指標値と聴感のずれの評価、さらに  $T_{20}$  を固定した場合の  $ST_{\text{Early}}$  の調整可能範囲の検討が挙げられる。

### 参考文献

- [1]渡辺, 宮崎. 音場支援システムの構成と適用事例. 日本音響学会誌, Vol. 76, No. 9, pp. 511-517, 2020.
- [2]河野他, 残響付加システムのモデルベース制御に関する研究—室内音響指標に基づく自動調整—, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.541-542, 2025.

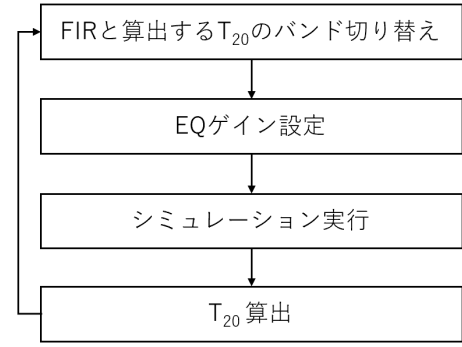


図 4  $T_{20}$  可変範囲の分析手順

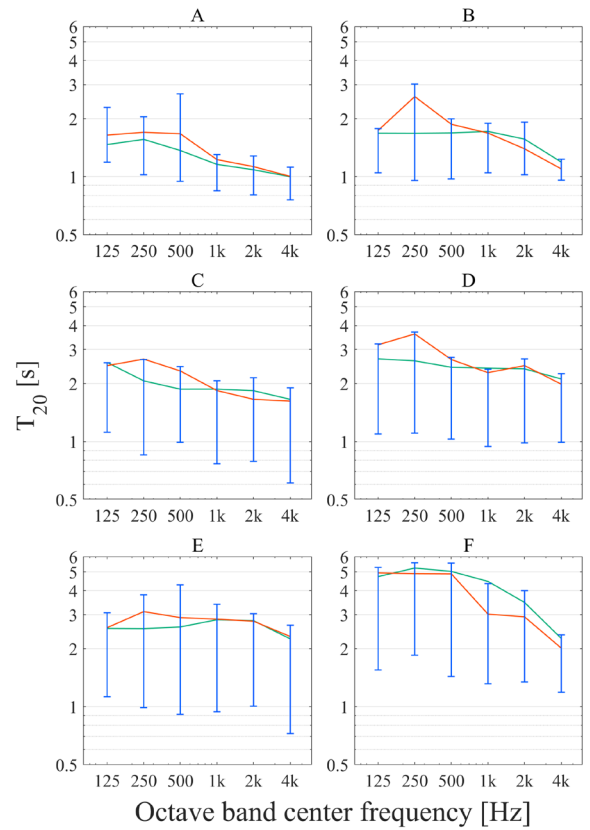


図 5 ゲイン調整による  $T_{20}$  の可変範囲