

非拡散音場の室内残響に関する研究 - 2次元 FDTD 法解析による検討 -

Study on room reverberation of non-diffuse sound field,
by using two dimensional FDTD method analysis.

学籍番号 47 - 106751
氏名 楠井 尚貴 (Naotaka, KUSUI)
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

1. はじめに

1.1 研究の背景

音響的配慮が必要な空間は音楽ホールの様に大規模かつ不整形なものだけでなく、会議室のような矩形室まで存在する。一般矩形室において、室形状・吸音面配置・壁面形状に起因する拡散不足は、平行壁面間での多重反射によるフラッターエコーを生じ、音場の明瞭度を低下させている場合も少なくない。改修には大きな負担となる室形状の変更よりも、吸音処理や壁面形状変更などの軽微な変更が望まれる。その施工後の音場は、残響時間に代表される音響指標を用いて予測・評価が行われるが、

残響時間の予測は、(1)室内全点のエネルギー密度が一定、(2)伝搬方向があらゆる方向に当確率、の2条件を満たす拡散音場上で成立する。そのため、室仕様によっては予測値と実測値の間に大きな乖離を生じる可能性がある。よって、あらゆる室仕様に対応できる室内音響設計スキームの確立が必要である。

1.2 研究の目的

本研究では、非拡散音場の残響現象を波動音響解析である時間領域有限差分法(FDTD法)を用いて定量的に知見を得ることを目的とする。同時に、非拡散音場の室内音響設計スキームの確立を目指し、壁面拡散を考慮した残響理論[1]との対応関係及び適用範囲を検討することを目的とする。

2. 平行壁間残響に関する検討

2.1 検討方法

非拡散音場として、1次元音場が卓越する平行壁面間を対象に、アスペクト比・壁面拡散が残響に及ぼす影響を検討する。解析対象はFig.1, Tab.1に示す2次元の平行壁面間で、壁面長(L_y)が異なる3条件に対して、それぞれ拡散体設置を含む3種類の壁面を設定した。x方向壁面は反射性として垂直入射吸音率に $\alpha_x^n=0.05$ 、y方向の境界は開口を模擬し、無反射境界を設定した。また、残響時間の同定には1次元残響減衰を示す区間として、T₃₀(-30~-60[dB])とした。

Tab.1 Room conditions.

Room	L _x	L _y	α_x^n	Wall type
Room 1-1	8	4	0.05	FF,DF,DD
Room 1-2	8	8	0.05	FF,DF,DD
Room 1-3	8	16	0.05	FF,DF,DD

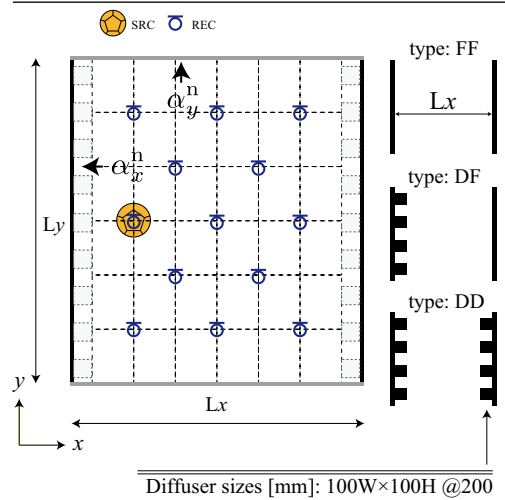


Fig.1 Arrangement of source and receiving points, and wall types.

2.2 理論計算

[1]による1次元音場の残響時間はEq.(1)で表される. Eq.(2)の第1項では垂直入射吸音により表され, 無限壁面長(L_y)を想定したEyringの1次元残響式と一致する. 第1, 2項において乱反射率 \tilde{s}_x^n 導入による鏡面吸音, 第3項は壁面入射に対する開口への擦過入射回数比を用いた擦過入射吸音の項である. ただし, c は音速, $\tilde{\alpha}_y^g$ は y 方向擦過入射吸音率である. また, 対向壁面の吸音率・乱反射率はEq.(3)により平均化を行う.

$$T_{60} = 0.04 \frac{Lx}{\beta_{Eax}} [\text{sec}] \quad (1)$$

$$\beta_{Eax} = -\ln(1 - \tilde{\alpha}_x^n) - \ln(1 - \tilde{s}_x^n) - \frac{cLx}{8f} \left(\frac{1}{L_y^2} \right) \ln(1 - \tilde{\alpha}_y^g) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_x^n &= 1 - \sqrt{(1 - \tilde{\alpha}_x^{n+})(1 - \tilde{\alpha}_x^{n-})} \\ \tilde{s}_x^n &= 1 - \sqrt{(1 - \tilde{s}_x^{n+})(1 - \tilde{s}_x^{n-})} \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 結果と考察

2.3.1 平行平板対に関する検討

Fig. 3にRoom 1-1の解析結果及び壁面拡散を伴うType DF, DDの理論値を示す. 理論計算は解析結果の壁面Type FFから逆算した y 方向擦過入射吸音率 $\tilde{\alpha}_y^g$, 及び波動音響解析である境界要素法にて算出した垂直入射乱反射率 \tilde{s}_y^v を使用した(Fig. 2). 壁面拡散を伴わない平板対Type FFの解析結果は, 鏡面反射性が強い高音域ほど壁面間衝突で減衰し, Eyringの1次元残響時間に近似する. 一方, 低音域では開口部に回折するため残響時間は短くなる. Eyringの1次元残響時間を同位置に示すRoom 1-2, 1-3の結果では, 壁面長(L_y)が長いものほど残響時間が増加していることが確認できる(Fig. 4, 5).

2.3.2 壁面拡散に関する検討

壁面拡散に伴うType DF, DDの解析結果・理論値ともに乱反射率に対応する形で残響時間が減少した. これは x 方向成分が拡散体により散乱され, 開口部へ入射するためである. Room 1-1の理論値は低音域で良い対応を示すが, 高音域では乖離が認められる. 一方, Room 1-3は低音域で乖離が認められるが, 高音域で良い対応を示した. 前者はEq.(2)第3項の y 方向入射による減衰が過大評価されている可能性が挙げられる. 後者は, 解析結果では拡散体による実効的な吸音増加するが, 理論値では1次元残響が支配的な室において乱反射率の低い低音域ではType FFの値に収束するためと考えられる.

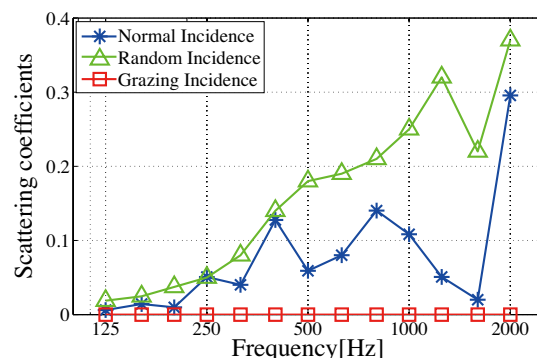


Fig.2 Scattering coefficients used for theoretical calculations.

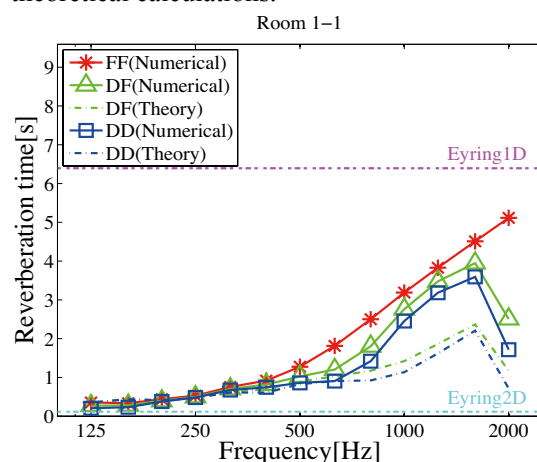


Fig. 3 Reverberation time, by FDTD and the theory(Room 1-1).

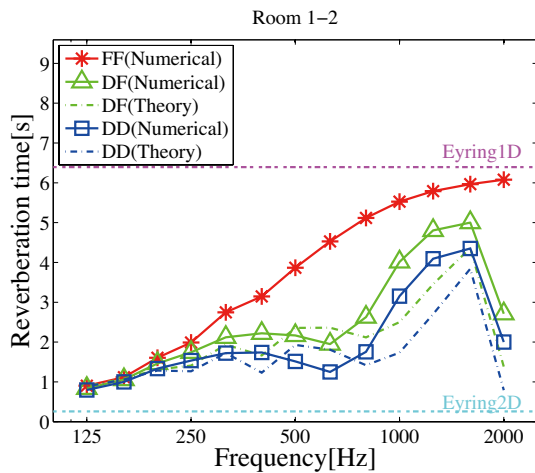


Fig. 4 Reverberation time, by FDTD and the theory (Room 1-2).

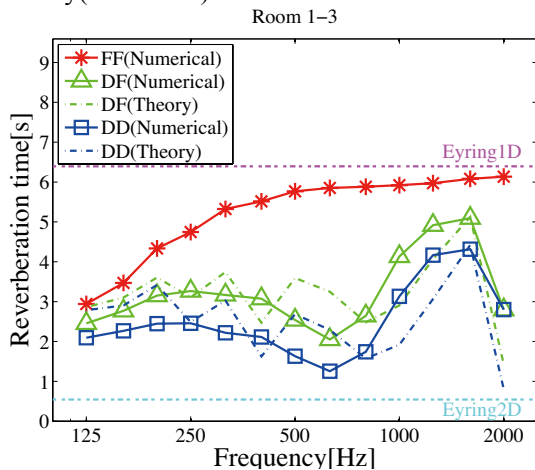


Fig. 5 Reverberation time, by FDTD and the theory (Room 1-3).

3. 矩形室残響に関する検討

前章では、壁面長 (L_y) による Type FF の周波数特性を確認し、拡散体設置による残響抑制を解析結果・理論値ともに確認した。本章ではより現実的なモデルとして、吸音面配置の影響について検討を行う。

3.1 検討手法

対象は Fig.1, Tab.2 に示す 2次元矩形室とする。全面反射性の正方形室 (Room 2-1), に対し y 方向壁面を吸音性とした室アスペクト比の異なる Room 2-2, 2-3 を設定した。さらに各室における壁面拡散の影響を調べるため、前章同様に x 方向壁面を 3種類を設定した。

3.1 理論計算

2次元矩形室の残響減衰は、2次元平面と各軸対向壁面の3つの鏡面反射成分、壁面拡散により一部の鏡面反射成分が転化し生じる拡散反射成分の計4つの成分に分解される。理論計算の吸音率(垂直・乱・擦過)は、数値解析との対応を図り、乱反射率(垂直・乱)には Fig.2 示す値を、擦過入射乱反射率は0を設定した。残響時間の同定は、 $T_{30}(-5 \sim -35[\text{dB}])$ で行った。

3.2 結果と考察

Tab.2 Room Conditions.

Room	L_x	L_y	α_x^n	α_y^n	Wall type
Room 2-1	8	8	0.05	0.05	FF,DF,DD
Room 2-2	4	16	0.05	0.20	FF,DF,DD
Room 2-3	8	8	0.05	0.20	FF,DF,DD

3.2.1 吸音面配置の影響

Fig.6 に Room 2-1 の解析結果・理論値の残響時間を示す。解析結果では、Type FF の残響時間は概ね Eyring の 2次元残響時間付近となる。一方、Type DF, DD の低音域では実効的な吸音が増加するため残響時間は減少するが、Type DD の中音域の値は大きく増加した。この値は、Room 1-2 の同タイプに比べても大きい値となっている (Fig.4)。Room 2-2, Type DD の値も同様の結果が認められる (Fig.7)。これは、拡散反射成分が y 方向成分へ転化し、1次元残響減衰を行ったためと考えられる。また、Room 2-3, Type FF では前章同様に、1次元音場が卓越し高音域につれて残響時間が増加した。拡散体設置時は x 方向鏡面反射成分が散乱されるため、残響時間は減少した。

3.2.2 理論値との対応

Room 2-1, 2-2 の Type FF において両者は概ね一致するが、拡散反射成分から鏡面反射成分への転化を想定しない理論値で

は Type DD においては解析結果と乖離した。一方, Room 2-3, Type FF の理論値は解析結果に比べ長くなる傾向があり, Fig. 9 に示す残響減衰曲線からも 500Hz 帯域では減衰率が乖離することが確認される。高音域の 2000 Hz では Eyring の 1 次元残響時間に収束するため減衰率は近似するが, エネルギーレベル差があるため残響時間としての値は異なる。Type DF, DD の値は, 乱反射率の高い高音域では, 拡散反射に起因するランダム入射の減衰が支配的なため, 数値解析結果と良い対応を示した。

[参考文献]

[1]Sakuma, EAA, pp.1959-1964, 2011

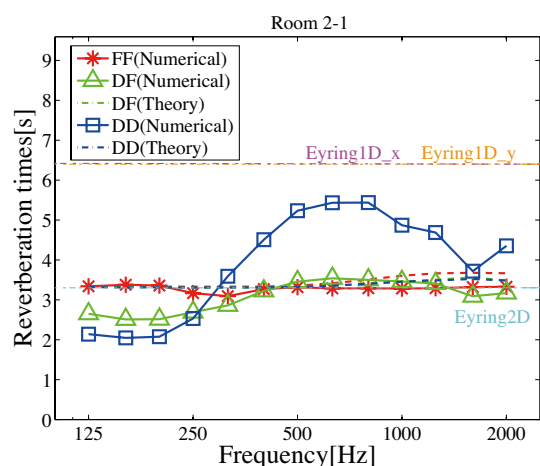


Fig. 6 Reverberation time, by FDTD and the theory (Room 2-1).

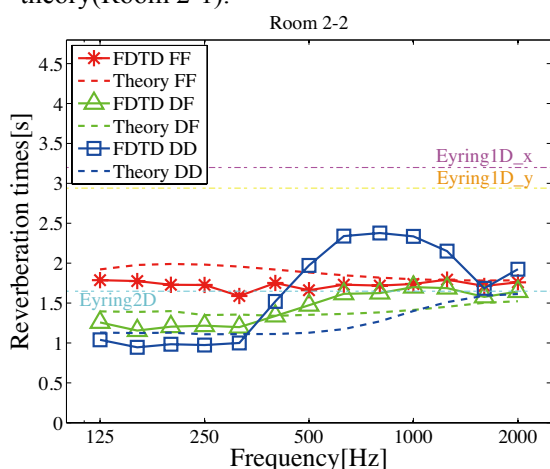


Fig. 7 Reverberation time, by FDTD and the theory (Room 2-2).

4. まとめ

本研究では, 非拡散音場の残響現象の解明を目的として, 平行壁間残響や吸音面が偏在する矩形室解析を行った。1次元音場が卓越する状況では, フラッターエコー対策として重要な高音域の残響抑制を残響理論により予測できることが示唆された。しかし, 全面反射性といった室において, 拡散性向上を目的とした拡散体の設置は, 残響を増加させ所望の音場と異なる性能を生じる可能性が示唆された。今後の課題は, この物理現象の解明及び, 現実的な3次元問題を扱うことである。

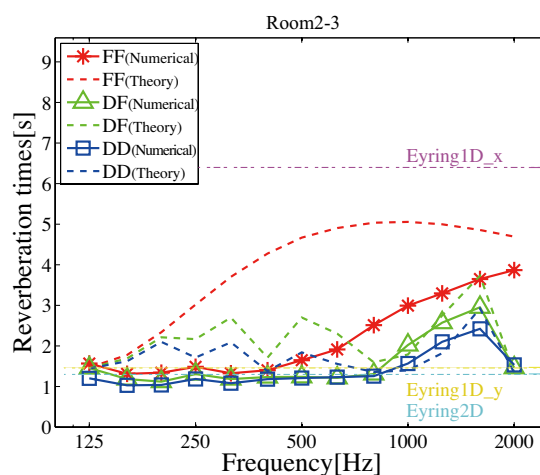


Fig. 8 Reverberation time, by FDTD and the theory (Room 2-3).

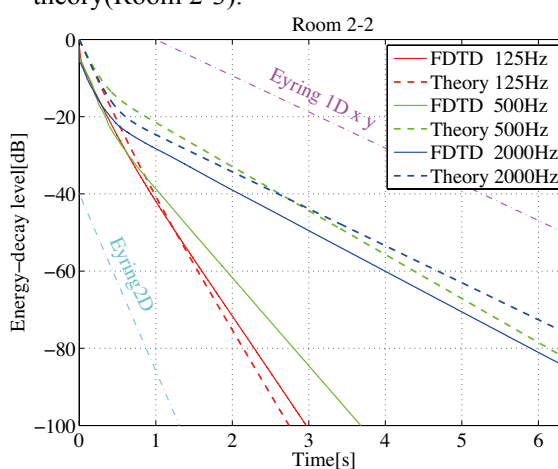


Fig. 9 Energy decay curves, by FDTD and the theory 125, 500, 2000 [Hz] (Room 2-3 Type FF).