

# 吸音面が偏在した非拡散室における残響減衰特性\*

安田洋介, 坂本慎一 (東大・生研), 牛山歩 (大和ハウス工業), 橋秀樹 (千葉工大)

## 1 はじめに

吸音面が偏在した室内においては, 拡散音場が成立しないことから, Eyring 等の残響式を用いて算出した残響時間と測定値とが全く一致しない場合がある. 特に, 床一面や天井一面を吸音性にした場合, 中高音域での残響時間測定値が残響式の値より著しく長くなることが知られている [1, 2]. このような音場に対しても様々な残響時間予測式 [3-6] が提案されているが, いずれも基本的に Sabine の式と同形式であり, 様々な場を一貫して高精度には予測できない [7]. 現象を捉えるには波動的なアプローチが必要となる.

吸音面が偏在する音場の残響特性に関しては, 音響模型実験による検討が報告されており [8], 2次元拡散音場とみなした場合の残響式との比較検討が行われている. 本報では, 音響模型実験に加えて波動数値解析を援用した検討を行う. 残響減衰特性や残響時間の周波数特性から現象を確認した後, 吸音材配置・壁面条件等の影響について調べ, 傾向の把握及び現象の発生メカニズムについての考察を行う.

## 2 検討方法

### 2.1 残響時間の評価

模型実験及び波動数値解析により算出したインパルス応答を基に検討を行った. いずれも 1/3 オクターブバンドのフィルタリング処理を行い, Schroeder 法を用いて各バンドでの残響時間を算出した. 残響曲線の回帰区間は, 模型実験においては S/N 比を考慮して定常状態のレベルから -5 ~ -25dB ( $T_{20}$ ) とし, 数値解析においては -5 ~ -35dB ( $T_{30}$ ) とした.

なお, 本検討では吸音面の偏在した非拡散音場を扱うことから, 残響曲線が直線的に減衰しない場合もありうる. 実際には多くのケースで直線的であったものの, 「床のみ吸音」「床・天井吸音」の場合の一部の波形で折れ曲がりが見られた. 残響曲線の評価区間と残響時間の関係の例を Fig. 1 に示す. 高周波数域, かつ室高さが高い場合には ( $h = 12.0, 500 \text{ Hz}$ ) 評価区間により残響時間が異なっている. このような例も見られたものの, ほとんどのケースでは -5 ~ -25dB 以上の評価区間であれば概ね安定した値となった.

### 2.2 模型実験によるインパルス応答算出

縮尺 1/20 の模型実験を行った. 室・音源・受音点の位置関係を Fig. 2 に示す. 音源としてスパーク放電パルスを, 受音系に 1/4 in. 無指向性マイクロフォンを,

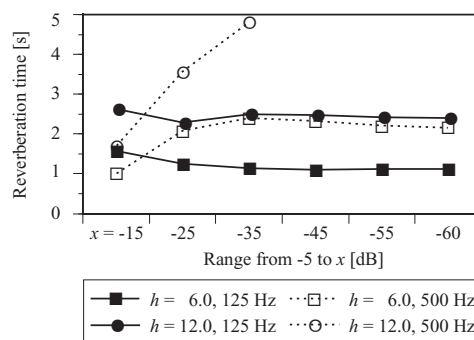


Fig. 1 Effect of the difference in evaluation range on reverberation time (floor area  $S_f$  is  $24 \times 12 \text{ m}^2$ , floor and ceiling absorption, numerical results).

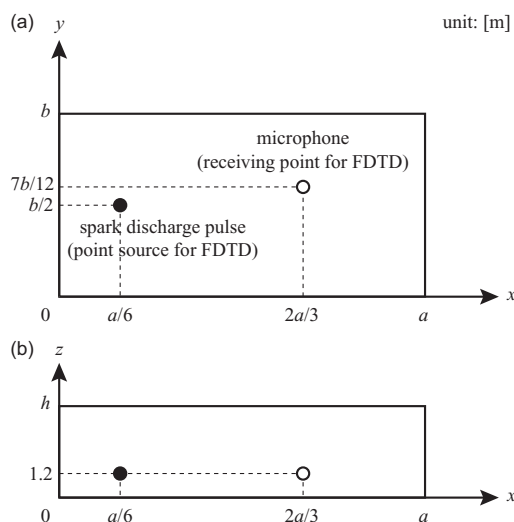


Fig. 2 Arrangement in a rectangular room for studies: (a) plan and (b) cross section.

吸音材にフェルト (2mm 厚) を用いた. 模型残響箱で計測したフェルトの残響室法吸音率を Fig. 3 に示す. 32 回の同期加算を行いインパルス応答を得た.

### 2.3 数値解析によるインパルス応答算出

実験と同様の直方体 (Fig. 2) を解析モデルの基本形状とする. 時間領域差分法 (FDTD) [9] により時間応答波形を計算した. 吸音面に関しては, 統計入射吸音率  $\alpha = 0.5$  に相当する実数音響インピーダンスを与え, その他の面はほぼ剛として  $\alpha = 0.05$  相当とした. 吸音面の偏在と残響時間の周波数特性との関係が明確となるよう, 各面の周波数特性は平坦とした.

### 2.4 ケーススタディ

現象への影響要因として, 室高さ  $h$ ・床寸法  $S_f = a \times b$ ・吸音面配置 (「全面」「床のみ」「床・天井」「吸

\* Characteristic of reberberation decay in a non-diffuse room with unevenly-distributed sound absorbers. by YASUDA Yosuke, SAKAMOTO Shinichi (I. I. S., The Univ. of Tokyo), USHIYAMA Ayumi (Daiwa House Industry Co. Ltd.) and TACHIBANA Hideki (Chiba Inst. of Tech.)

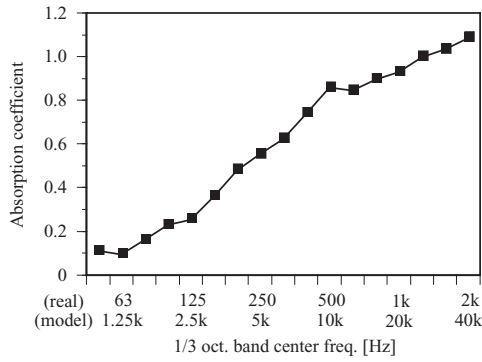


Fig. 3 Absorption coefficient of 2-mm-thick wool felt measured in a scale model reverberation chamber.

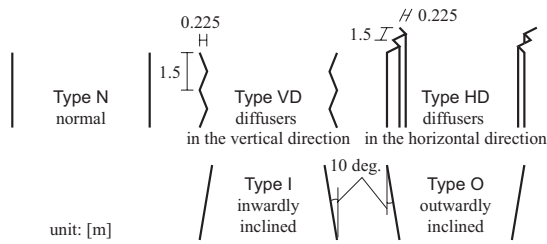


Fig. 4 Wall types (cross section).

音なし)・壁面タイプを変化させた．壁面タイプは Fig. 4 に示すように平坦な平行壁 (Type N) を含め 5 通りとした．なお，特記しない限りは，床寸法は  $S_f = 24 \times 12 \text{ m}^2$ ，壁面タイプは Type N とする．

### 3 結果と考察

#### 3.1 吸音面の配置の影響

吸音面の配置の違いが残響時間周波数特性に及ぼす影響について，実験結果を Fig. 5 に，数値解析結果を Fig. 6 に示す．実験結果には Eyring の残響式による値を，数値解析結果には Eyring (E)・Millington (M) [10]・Fitzroy (F) [5]・Arau-Puchades (A) [6] の残響式による値を付記する．まず実験結果を見ると，「吸音なし」の場合でも高周波数域で残響時間が短い，これは空気吸収の影響である．吸音材を設置した場合と比較すると，「全面」吸音の場合の周波数特性が平坦なのに対し，「床のみ」「床・天井」の場合は中・高周波数域で残響時間が長くなっており，Eyring の残響式による値と著しく異なっている．また，「床のみ」吸音と「床・天井」吸音の場合では特性が異なり，「床のみ」吸音の方が残響時間の増加がより低域から起こっている．数値解析結果 (Fig. 6) を見ると，吸音面に平坦な周波数特性を与えたにもかかわらず，吸音面の偏在により残響時間の周波数特性が平坦でなくなっており，いずれの残響式でも予測不能となっている．また「床のみ」の方が「床・天井」に比べ残響時間の増加がより低域から起こっており，実験結果と対応している．

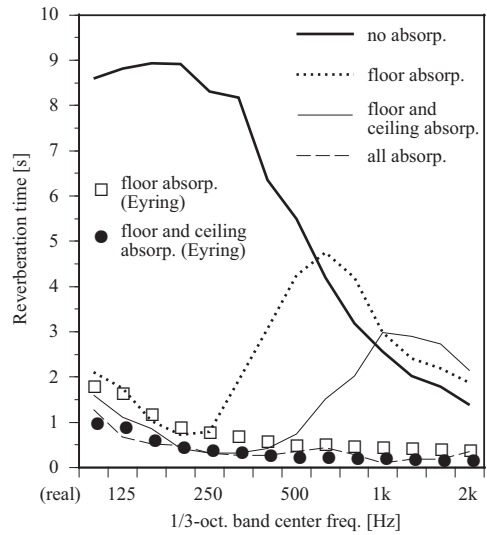


Fig. 5 Effect of arrangement of absorptive surfaces ( $h = 3.0$ , experimental results).

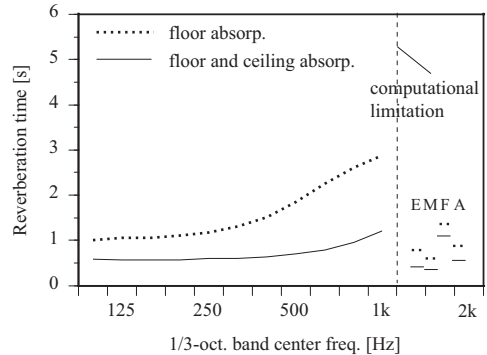


Fig. 6 Effect of arrangement of absorptive surfaces ( $h = 3.0$ , numerical results).

#### 3.2 室形状の影響

室高さ 「床・天井」吸音の場合に室高さ  $h$  が残響時間周波数特性に及ぼす影響についての実験結果を Fig. 7 に示す．高さによらず中高周波数域の残響時間が長く，室高さが高いほど残響時間の Eyring 値からの乖離 (増加) がより低域から起こっている．数値解析結果 (Fig. 8) も同様である．この現象については，残響時間の増加が水平方向の 2 次元モードの減衰と関係しており，壁の高さと波長との関係で 2 次元モードの減衰率が変化していることが原因と考えられる．即ち，壁の高さに対して十分小さい波長の音波に対しては 2 次元モードの減衰率が小さく，残響時間が長くなるものと考えられる．同様に考えると，前節での吸音面の配置の影響についても説明できる．即ち，「床のみ」吸音の音場は，剛な天井に対する鏡像を考えると高さ 2 倍の「床・天井」吸音の音場にほぼ相当することから，「床のみ」吸音の方がより波長の長い低域から残響時間が増加すると考えられる．数値解析における残響減衰波形の例を Fig. 9 に示す．残響時間の長い 500Hz では折れ曲がり確認でき，2 次元モードの減衰が緩やかなことが示唆される．  
床寸法 境界条件・室高さを固定した場合に，床寸法

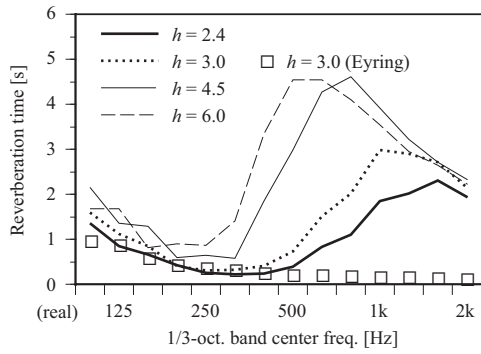


Fig. 7 Effect of ceiling height (floor and ceiling absorption, experimental results).

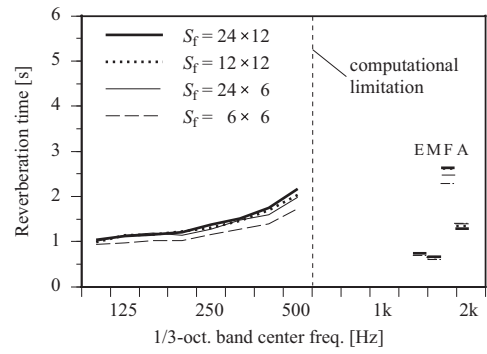


Fig. 10 Effect of floor area ( $h = 6.0$ , floor and ceiling absorption, numerical results).

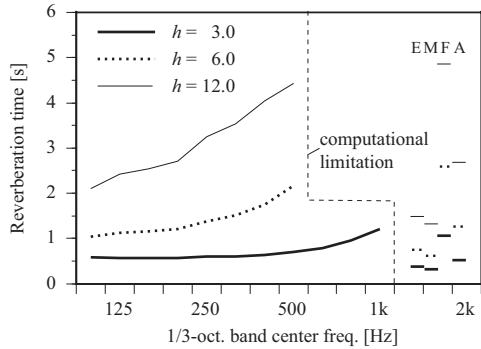


Fig. 8 Effect of ceiling height (floor and ceiling absorption, numerical results).

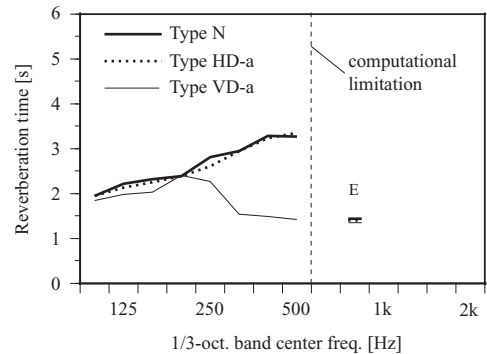


Fig. 11 Effect of diffusion treatment of walls ( $h = 6.0$ , floor absorption, numerical results).

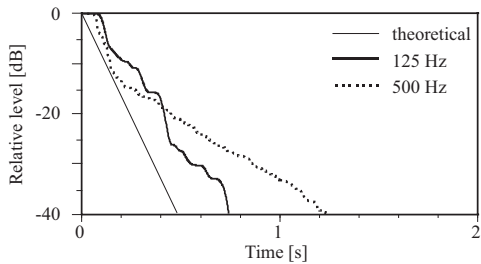


Fig. 9 Reverberation decay curves ( $h = 6.0$ , floor and ceiling absorption, numerical results).

の違いが残響時間周波数特性に及ぼす影響について、数値解析結果を Fig. 10 に示す。床寸法による周波数特性への影響は微小である。

### 3.3 壁面タイプの影響

拡散体 「床のみ」吸音の場合に拡散体の全壁面設置が残響時間周波数特性に及ぼす影響について、数値解析結果を Fig. 11 に示す。水平方向拡散体 (Type HD-a, -a は全壁面設置の意) の場合は中・高周波数帯域で残響時間が長くなる傾向に変化がない一方、鉛直方向拡散体 (Type VD-a) の場合は比較的平坦な周波数特性となっている。水平方向拡散体で傾向が改善されなかった原因としては、水平方向でのなんらかの 2 次元モードが残ってしまうことが考えられる。また、鉛直方向拡散体による残響時間の低減効果は 250Hz 以上の周波数域でのみ現れている。これは拡散体のサイズに起因することから、サイズの異なる

拡散体を数種類設置することで低域も含めた広い帯域で残響時間低減の可能性はある。

内転び・外転び 「床のみ」吸音の場合に内転び壁面 (Type I) が残響時間周波数特性に及ぼす影響について、実験結果を Fig. 12 に示す。「長辺壁面のみ (-l)」、「短辺壁面のみ (-s)」を傾斜させた場合は依然として中・高周波数域の残響時間が長い。改善がなかった原因としては、傾斜させなかった対向壁方向での 1 次元モードが減衰しにくいことが考えられる。一方「全壁面 (-a)」を傾斜させた場合には平坦な周波数特性となっており、Eyring の残響式の値ともよく一致している。次に「床のみ」吸音の場合に内転び (Type I) 及び外転び (Type O) 壁面が残響時間周波数特性に及ぼす影響について、数値解析結果を Fig. 13 に示す。「全壁面 (-a)」傾斜同士で比べると、内転びでは実験結果同様 Eyring の残響式の値とよく対応しているのに対し、外転びでは、比較的平坦ではあるものの Eyring の残響式より大きな値となっている。これは、内転びの場合壁面からの反射波が吸音面 (床面) に入りやすいのに対し、外転びで角度が小さい場合は壁面と天井で多重反射のパスを形成しやすいことが原因と考えられる (Fig. 14)。また、内転びに関しては「各対向壁の片面のみの傾斜 (-e)」で 3 °程度の傾き (Type I-e (3 deg)) でも十分な効果が見られる。

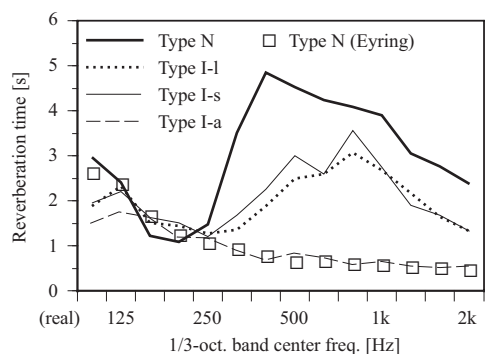


Fig. 12 Effect of inward inclination of walls ( $h = 4.5$ , floor absorption, experimental results).

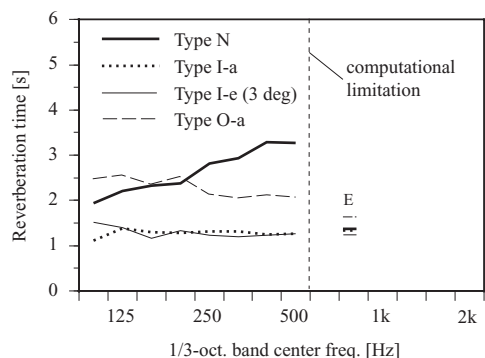


Fig. 13 Effect of inward and outward inclination of walls ( $h = 6.0$ , floor absorption, numerical results).

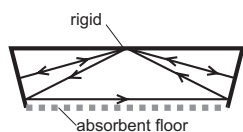


Fig. 14 Sound rays in a room with outwardly inclined walls.

### 3.4 インパルス応答のエネルギー減衰特性

算出したインパルス応答の例（「床のみ」吸音）と、対応するスペクトログラムについて、数値解析による結果を Figs. 15, 16 に示す．Type N (Fig. 15) においては、高域では減衰が緩やかで、応答の後期部分に成分が残っている．このインパルス応答を受聴したところ、時間の経過に伴い音のピッチが上昇するように知覚された．一方全面内転びの Type I-a (Fig. 16) においては、Type N に比べて応答の減衰が速く、高域でのエネルギーの残留は見られない．

## 4 まとめ

吸音面が偏在した非拡散室での残響減衰特性に関して、模型実験及び波動数値解析を通して検討した．「床のみ」（「天井のみ」）または「床・天井」を壁面と比べて著しく吸音した室では中・高周波数域の残響時間が長くなり、残響式では予測困難なことを確認した．また、吸音面の吸音率の周波数特性が平坦であっても残響時間の周波数特性は平坦とはならず、波長の短い高周波数域ほど残響時間が長くなること、室高

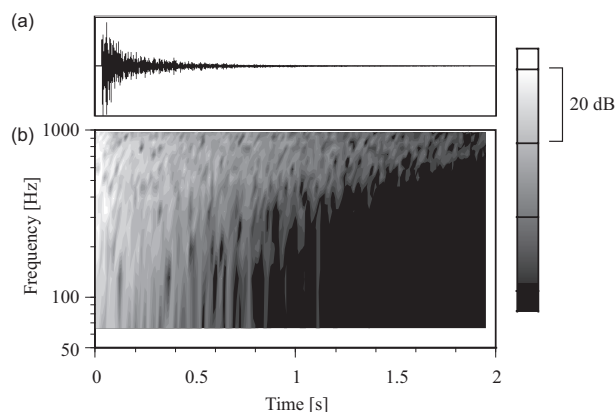


Fig. 15 (a) Calculated impulse response and (b) its spectrogram ( $h = 3.0$ , floor absorption, Type N).

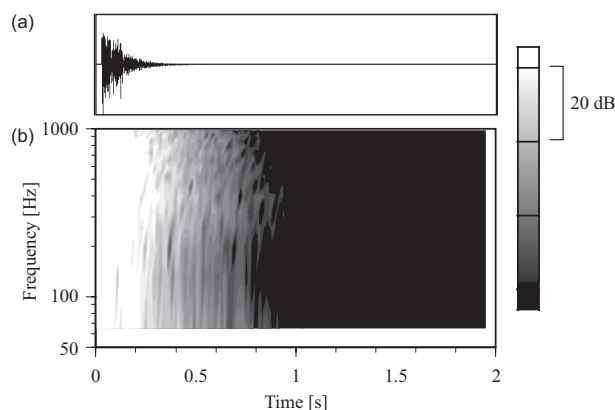


Fig. 16 (a) Calculated impulse response and (b) its spectrogram ( $h = 3.0$ , floor absorption, Type I-a).

さが残響時間の周波数特性に大きく影響し、高いほど残響時間の（残響式による値からの）増加がより低域から発生することを示した．残響時間の増加は水平方向の1, 2次元モードが減衰しにくいことが原因であると考えられ、これを改善するには全ての水平方向のモードが減衰しやすい音場を拡散させる必要がある．具体的対策として、鉛直方向拡散体及び内転び（床面吸音時）が有効なことを示した．

## 参考文献

- [1] 音響技術, no. 25, p. 5 (1979. 1).
- [2] 音響技術, no. 49, p. 9 (1985. 3).
- [3] H. Kuttruff, J. Acoust. Soc. Am., **98**, pp. 288–293 (1995).
- [4] H. Kuttruff, Room Acoustics, 3rd ed. (Elsevier Applied Science, London/New York, 1991).
- [5] D. Fitzroy, J. Acoust. Soc. Am., **31**, pp. 893–897 (1959).
- [6] H. Arau-Puchades, Acustica, **65**, pp. 163–180 (1988).
- [7] S. R. Bistafa and J. S. Bradley, J. Acoust. Soc. Am., **108**(4), pp. 1721–1731 (2000).
- [8] 綿谷, 須賀, 日本音響学会講演論文集, pp. 673–674 (1990. 9).
- [9] T. Yokota, S. Sakamoto and H. Tachibana, Acoust. Sci. & Tech., **23**(1), pp. 40–46 (2002).
- [10] G. Millington, J. Acoust. Soc. Am., **4**, pp. 69–82 (1932).