

2013 年度 修士論文

室内インパルス応答の反射音構造の
分析評価に関する研究

Analysis and evaluation of reflected sound structure of room
impulse responses

竹下 圭悟
Takeshita, Keigo

2014 年 1 月 27 日

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	既往関連研究	3
1.3	研究目的	4
1.4	論文構成	4
第 2 章	室内インパルス応答の検討モデル	5
2.1	はじめに	5
2.2	幾何音響解析による算出	7
2.2.1	鏡像法	7
2.2.2	音線法	9
2.3	波動音響解析による算出	14
2.3.1	時間領域有限差分法	14
2.4	室内音響測定	20
2.4.1	TSP (伸張パルス) 法	20
第 3 章	室内インパルス応答の反射音構造の抽出	23
3.1	はじめに	23
3.2	室内インパルス応答の減衰を除去した反射音構造抽出手法	23
3.2.1	二乗インパルス応答を指数関数で除する方法	23
3.2.2	二乗インパルス応答を逆二乗積分値で除する方法 (減衰率比)	26
	減衰を除去したインパルス応答の基準化	29
3.3	減衰率比の基本的性質の把握	30
3.3.1	反射音の疎密を考慮した場合の理論的算出	30
3.3.2	幾何音響解析によるケーススタディ	33
	音源位置の影響	33
	室容積の影響	34

サンプリング周波数の影響	34
周波数帯域分析の影響	35
3.4 湾曲減衰時の基準化に関する検討	37
3.4.1 回帰曲線を用いる方法	37
線形回帰手法	37
非線形回帰手法	40
3.4.2 一般化減衰関数を用いる方法	43
3.5 おわりに	50
第 4 章 室条件が反射音構造に及ぼす影響	51
4.1 はじめに	51
4.2 室アスペクト比の影響	53
4.2.1 幾何音響解析による検討	53
4.3 吸音分布の影響	56
4.3.1 幾何音響解析による検討	56
4.3.2 実測による検討	56
4.4 壁面拡散の影響	65
4.4.1 幾何音響解析による検討	65
4.4.2 波動音響解析による検討	68
4.5 おわりに	74
第 5 章 総括	75
参考文献	77
謝辞	81
修士論文要旨	83
関連発表論文	85

第 1 章

序論

1.1 研究背景

空間の質を決定する一つの要因として音環境があげられる。特に生活スタイルが多様化した今日において、良好な生活環境を創出するためには、音環境を適切に設計し制御することが重要であると考えられる。一言で音と表しても、心地よい音や不快な音など、人間は音に関して様々な感覚を持っているため、それぞれの音環境に対する要求は異なり、その要求に応じた適切な音響設計を行うことが重要である。

■音響設計に関して

音響設計は大別して、騒音防止（遮断）設計と室内音響設計がある [1]。

まず、騒音防止（遮断）設計とは、室の使用目的に適した静けさを実現するためのものであり、(1) 騒音源の対策（騒音源の抽出・定量）(2) 騒音の伝搬系の対策（伝搬経路の判定、建築・建物の配置計画、遮音・吸音計画）(3) 受音系の対策（受音点での評価）の 3 つの段階に分けられ、それぞれの段階に対して順序正しく適切な対策を計画することである。

次に、室内音響設計については、室の使用目的に適した室内音響効果を実現するために室形状・壁面吸音・壁面形状によって響きを制御することである。一般的に室内音響計画の目標としては、(1) 邪魔な騒音がないこと (2) 言葉は明瞭に聞き取れること (3) 音楽は美しく豊かに響くこと (4) 室全体に音場の分布が良いこと (5) エコー、フラッターエコー（鳴龍）などの音響障害が生じないこと、等が挙げられる。また、対象となる室は、コンサートホールや劇場、音楽練習室・スタジオやオーディオルームといった音響施設から、講堂や教室、オフィスや会議室等の施設のような日常生活で使用する施設まで規模や使用目的は多岐にわたる。

室内音響設計の方法としては、縮尺模型測定や数値解析によって得られた室内インパルス応答から算出される残響感や明瞭性等に関する量的な音響指標を用い、設計目標値との対応をはかることが通常である。特に、室容積に応じて経験的に提案された最適残響時間に基づいて行われるのが第一義的である。その理由として、残響時間が室容積や表面積、壁面の吸音率によって比較的簡単に計算できることや測定位置の依存性が低いこと、室内音響学史上初の測定可能な物理量として定義され現在までに膨大なデータベースがあること、等が挙げられる。しかし、残響時間を予測するための残響理論は拡散音場という理想的な仮定のもとで構築・発展してきた。拡散音場とは、エネルギーの (1) 密度が一様、かつ (2) 伝搬方向が等確率であると定義される。現実はこの仮定を満たさない室は多く、理論との乖離が生じる。また、それに加え、残響時間は室内の音響伝搬の一面だけを表すものであり、指標化に際して棄却される時間変動性の高い情報にも、主観的に影響の大きい詳細な側面を把握するものが含まれていると考えられ、これらを考慮することでより所望の音環境の実現に近づくと考えられる。

■音場の拡散性について

音場の拡散性については、これまで様々な議論がなされてきているが、ここではエネルギー論的観点のみに焦点を当てると、従来の音場の拡散性を評価する方法として、エネルギーの空間分布を取ったものとして、 $S.D$ [16] や NV [17] などがあげられる。これらの特徴として、多点で算出したインパルス応答から拡散性を評価している。現在、計算機能力の向上や実測でのインパルス応答測定技術向上によりインパルス応答の計測が容易になって来ているが、多点で測定することは大空間になるほどより困難である。また、近年、不均等吸音及び壁面における音響拡散を考慮できる新たな残響理論が提案されたことにより矩形室に限定されるものの非拡散音場の残響予測の可能性が開けつつある [5]。さらに、壁面反射の拡散性に関する測定法は規格化 [28] され、幾何音響シミュレーション等にも壁面の拡散反射成分を反映できるようになってきている [7] が、壁面の拡散性と音場の拡散性の関係性に関しては未解明な部分が多い [8]。一般に、壁面の凹凸によって壁面の拡散性が向上した場合には、音波がこの凹凸により反射する度に散乱されるため、室内で多数回反射を繰り返した後に、音響エネルギーの空間分布が均一になる。そのため、壁面の拡散性が増すほど、室内インパルス応答の反射音構造上でも反射音エネルギーの時間分布の偏りが小さくなると考えられる [9]。逆に、音場の拡散性が低い場合において、物理的現象として、速やかな減衰を妨げたり、聴覚的現象として、明瞭性が低下したり、フラッターエコーが発生する場合もある。このように拡散性に関する議論は定性的な検討のみにとどまっているのが現状である [10]。

■音場の質的評価

室内音場におけるインパルス応答に含まれる膨大な情報の中から、聴感上意味のある情報を抽出したものが室内音響指標である。現在までに、数多くの室内音響指標が提案され [4]、室内音響の物理的性質とそれに対応する心理量の関係に関して多くの実験的検討が行われてきた [2]。具体的には、直接音に隣接して到来する初期の反射音群（初期反射音）とそれより遅れ時間の長い反射音群（残響音あるいは後期反射音）は聴感に及ぼす効果が異なるということに着目し、初期反射音と残響音の関係に関する様々な室内音響指標が提案されてきた。その中の一部は、ISO (International Organization for Standardization) に規格化 [3] されており音響的に特に配慮すべき空間においては残響時間に加えて、これらの音響指標も併用しながら設計することが一般的である。一方で、初期反射音と残響音の聴感に及ぼす効果は違うといえども、我々はその全体を聞いている。例えば、反射音が多いとよく響く感じがし、これを live と言い、反射音が少なく直接音が強いと dead あるいは dry と呼ぶこともあり、聴感的な印象が変化する。さらに、最近の報告では、音場拡散と響きの質に関して一定の関係性があるとの報告 [18] もされており、反射音構造を特定時間で区切るのではなく、時々刻々と変化する様子から、即ち反射音構造そのものを評価することができれば、更に新たな音響心理効果や室内音響学上の意味が明らかにされるであろうと考えられる。

これらの背景を踏まえ、反射音構造から音場の拡散性が定量的に評価できるようになることで、残響時間等を始めとする拡散音場を基にした各種指標に対する予測精度が向上すると考えられる。また、反射音構造と主観的效果との関係を解明することで、使用目的に応じた室形や吸音面配置を科学的に決定する設計方法が確立されるであろうと考えられる。

1.2 既往関連研究

従来の反射音構造を評価する目的として、エコー検知 [11][12] があげられる。一般にインパルス応答には音響伝達に関するすべての情報が含まれているため、反射音の時間的な微細構造を検討することができるが、これには経験や知識が必要となり、主観に依存するところが大きく、客観的に音場を評価することが難しい。そのため、何らかの処理を施すことで反射音構造をより見やすくする方法が検討されてきた。例えば、二乗包絡線 [?] による処理などがあげられる。また、近年では、反射音自身に含まれる減衰成分を除去することで反射音を見やすくする方法が提案されている [14][15]。室内音場の拡散性の評価を目的として、Joeng や羽入らは、減衰曲線の瞬時の傾き（瞬時減衰率）に対し減衰曲線の平均的な減衰率で除する（減衰率比）ことで、相対的な反射音の変動性を抽出し、間接的

に音場の拡散度を評価しているが、反射音構造の抽出方法、及びその物理的性質に関して十分な知見があるとは言いがたい。しかし、従来の拡散性の評価と異なる点として、羽入 [14] や Joeng [15] らの検討は、一点のインパルス応答の反射音構造から拡散性を評価できる可能性がみられ、音場の拡散性に関する物理的把握の機運が高まってきている。

1.3 研究目的

以上のような研究背景、既往関連研究の動向を踏まえ、本研究の目的を以下のように設定する。

室内音響の質的設計スキームの確立に資する知見を得ることを目的とし、減衰率比に着目し、

- その物理的性質を明らかにすること
- 室条件が反射音構造に及ぼす影響を把握すること

とする

第一の目的は、物理的な現象把握を目的とし減衰率比の理論構築を行い、減衰率比に及ぼす影響要因を解明することである。次の目的は、質的設計のための知見として、室条件が反射音構造に及ぼす影響の程度を数値計算と実測を用いて整理する。

1.4 論文構成

以上を研究の目的とした本論文の構成を述べる。

第 1 章では、研究の背景、既往関連研究について概観し、本研究の目的および位置づけについて述べる。また、本論文の構成について示す。

第 2 章では、検討の対象とする室内インパルス応答を算出するための手法について説明する。

第 3 章では、反射音構造の各種抽出手法を概観し、減衰率比の有意性を示し、その理論的検討およびケーススタディを通じて基本的性質の把握を行う。

第 4 章では、アスペクト比・吸音分布や吸音量、壁面拡散などの室仕様が反射音構造に与える影響に関する知見を得る。

第 5 章は総括であり、本論文の成果、および今後の課題について述べる。

第 2 章

室内インパルス応答の検討モデル

2.1 はじめに

インパルス応答とは、ある系に継続時間の非常に短い信号（インパルス、厳密にはデルタ関数）を入力した時の系からの出力を指す。室内音響では、音が伝播する室内空間全体が一つの系となる。つまり、音源から放射された音が室内でどのような伝播をしているかということを時系列信号として表したものがインパルス応答である (Fig.2.1)。また、別の見方をすると、インパルス応答にはすべての周波数成分が含まれているのでインパルス応答は各周波数成分が伝搬系によってどのように変化したかの情報も含んでいるとも考えられる。そのため、インパルス応答のフーリエ変換は周波数応答関数、伝達関数などとも呼ばれ、音源と受音点間の伝送周波数特性を表しているとも言える。

近年の計算機環境の急速な発展により、コンピュータ上に音響現象を数値的に模擬することが比較的容易になってきた。この数値解析手法は、（１）大掛かりな実験施設が不要、（２）設計変更への対応が容易、（３）理想的な条件での検討が行えるなどのメリットがあり、現在の音響設計において強力なツールとなっている。

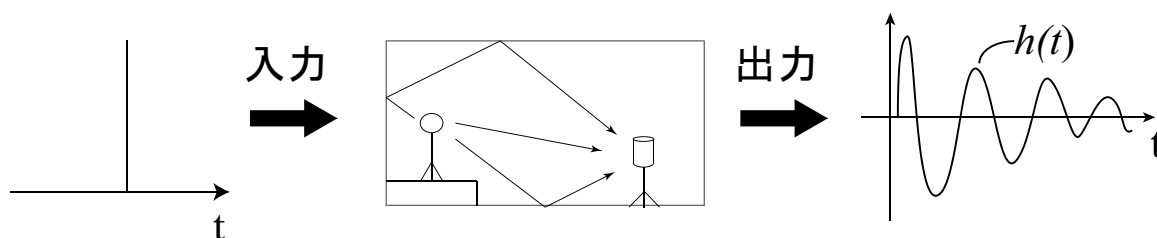


Fig. 2.1 An image of impulse response.

数値解析手法は、音響伝播における音の回折、干渉のような音の波動性の考慮の有無によって、

- 波動音響解析手法：音の波動的な性質を含めた、音響伝播現象の厳密性の高いモデル化による手法
- 幾何音響解析手法：音の波動性を無視し、音響エネルギーの伝播を幾何学的にモデル化する手法

に大別される。

このうち、前者の波動音響学的手法は、さらに以下に大別される。

- 周波数領域解法：ある周波数における定常解を求める手法
- 時間領域解法：過渡的な音響伝播現象の進行を時々刻々アニメーションのコマのように時間を進めながら追う手法

前者の代表例としては、境界要素法および有限要素法、後者の代表例としては時間領域有限差分法が挙げられる。これらの3手法はいずれも1990年代前半までには概ね基礎が築かれた古典的手法であるが、その後も大規模問題解析のための手法開発や特定の問題により則した手法の開発などが進められている。

一方、幾何音響学的手法は計算機負荷が小さいため、1960年代後半から導入が図られてきた。音響数値シミュレーション手法としては最も歴史の長い手法群といえる。

2.2 幾何音響解析による算出

幾何音響解析手法は、音線法 (Ray Tracing Method) と鏡像法 (Image Source Method) が挙げられる。これらは音の波動性を無視して、そのエネルギーの伝播を幾何学的に扱う手法のことである。そのため、本来波動現象である音の回折や干渉は考慮されず、精度の保証はなく曖昧な部分が多い。しかし、非常に直感的で理解しやすい方法であり、現在も建築・環境音響学、設計や実務分野における音場シミュレーションにおいて広く用いられている方法である。また、各平面での吸音率が考慮可能であり、これに周波数特性を持たせることで、本来幾何音響では取り扱えない周波数の概念も取り入れられる。

2.2.1 鏡像法

鏡像法は、閉空間音場に対して離散的に分布する実音源及び鏡像音源群のそれぞれの寄与が各反射音の強さになり、それらの総和を算出することにより、受音点での音の強さが求められる。具体的には、Fig.2.2 に示すように与えられた音源に対し、まず室を構成する各境界面による第一鏡像をもとめ、その鏡像音源群が受音点に対して寄与すると考える。続いて第一鏡像音源群からでた音が各境界面で反射したと考えると第二鏡像音群を求め、その寄与を求める。以下、この手続を必要な段階まで行う。また、直接音を含む全ての反射

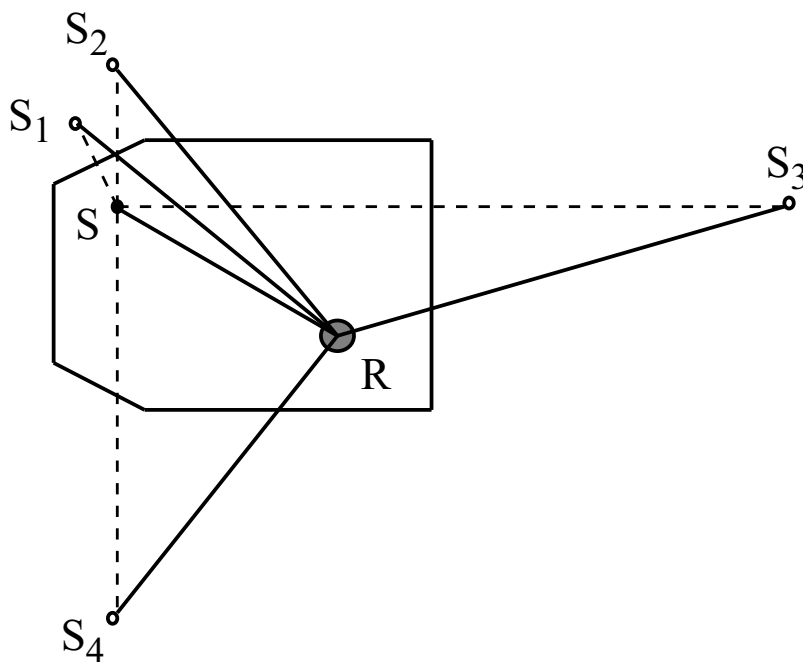


Fig. 2.2 Illustration of image source method.

について距離減衰が与えられ, さらに, 反射する境界面の吸音率を α とすると, 反射一回ごとに $(1-\alpha)$ のエネルギー反射率が考慮される. この手法では, 後述する音線法に比べ, 方向, 相対的なエネルギー, 到来時刻が正確に求まるため, 初期反射音構造の検討やエコー障害のチェック, 反射音の指向性分布の検討に有効である. しかし, 反射次数の増加とともに虚音源数が時間の三乗に増加するため, 高次の反射音まで求めることが困難である. さらに, 解析の上限は, 反射音レベルや観測時間ではなく, 反射次数によって場合されるため, 上限反射次数で直接音から最も遅れて到来する反射音より, さらに高次で伝播距離が比較的短い反射音が, 時間的に早く到来することがあり, 任意の時刻において全ての反射音が含まれない場合が生じるという問題があることに留意が必要である.

矩形室に限定し音源受音点位置が室中央にある場合, 以下のように定式化できる. Fig.2.4 に示すような, 矩形室の中心 O に出力 W_0 の点音源と受音点を設置する. $x(y,z)$ 軸に垂直な2壁面を $x(y,z)$ 方向壁面と称し, 各方向壁面の吸音率を $\alpha_{x(y,z)}$, 反射回数を $|n_{x(y,z)}|$ とすると, 受音点のエネルギー密度は (Eq.2.1) で表される.

なお, 直接音 ($r=0$) の寄与は除くものとし, 得られた $E(t)$ を鏡像法におけるインパルス応答として扱う.

$$E(t) = \sum_{n_x=-\infty}^{\infty} \sum_{n_y=-\infty}^{\infty} \sum_{n_z=-\infty}^{\infty} \frac{W_0}{4\pi c r^2} (1-\alpha_x)^{|n_x|} (1-\alpha_y)^{|n_y|} (1-\alpha_z)^{|n_z|} \quad (2.1)$$

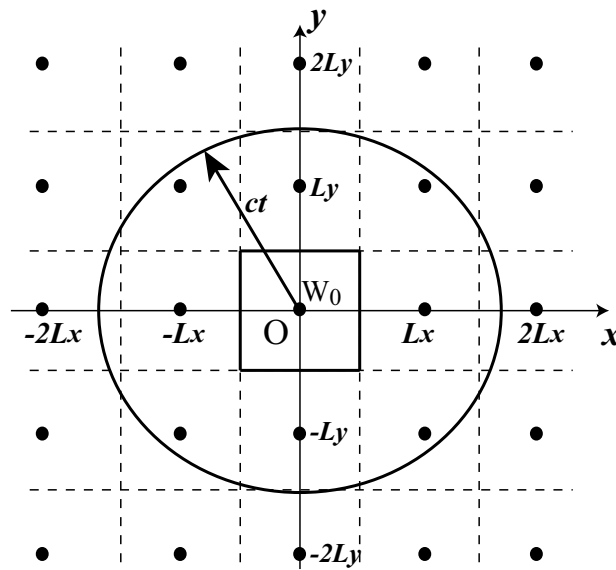


Fig. 2.3 Illustration of image source method.

2.2.2 音線法

音線法は、音源点から多数の音線を放射し、その反射履歴を時間とエネルギー、入射方向のデータとして順次追跡していく計算方法である (Fig.2.4)。距離減衰は時間経過に伴う音線間隔の広がり、すなわち密度の減少により考慮される。反射については前述の鏡像法と同様である。この方法では、大きさを持たない受音点に対して、音線が入射することは難しく、受音位置にある特定の大きさを持つ受音球を設定することが一般的である。このことが音線の入射数及び、反射経路において誤差を生じる要因となってる。この誤差を解決するために、音線法で抽出された反射経路を虚像法により逆追跡する手法である backtracing(combined ray tracing and image source method : Lehnert[23], Sekiguchi[24], Naylor[25], Vorlander[26]) や音線の先端に円の有限領域を持たせる cone tracing method (Vian and D. Maercke[27]) などが提案されている。本研究では、従来の音線法のアルゴリズムを使用し、境界条件にて鏡面反射成分（幾何的な反射）以外に散乱成分（壁面の凹凸による拡散反射）を考慮できるように改良する。具体的には、壁面の音響拡散の程度を表す、乱反射率を導入する。なお、音線法の説明の一部を [22] から引用する。

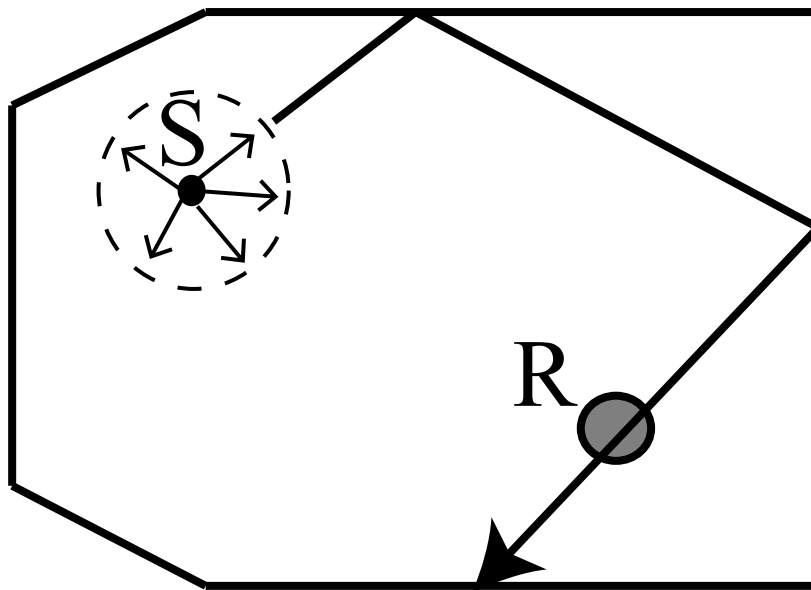


Fig. 2.4 Illustration of ray trace method.

■音波の表現

音線法では, あるポテンシャルを持って空間内を進行する仮想的な物体を音粒子と呼び, また音粒子の属性として進む方向ベクトル伴ったもの, もしくは音粒子が通過した軌跡を音線と呼ぶ. 音粒子と音線は同意で表現されることも多い. 以上から音線法では進行波を模擬することを意味する. また進行波は空間的に幅を持つが, 音線は概念的なもので空間的大きさを持たない. ポテンシャルの移動は音線は進むのにかかる時間が最小となる経路を通る. そのため, 温度, 密度が均一な媒質中を進行するのであれば音線は直進する (Fig.2.5).

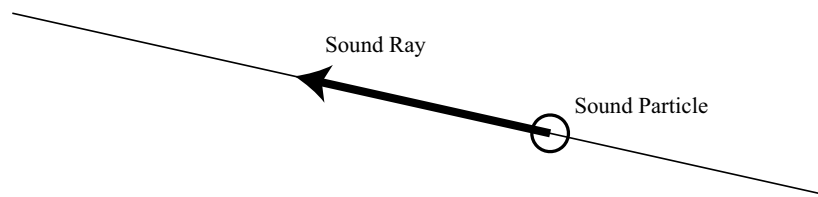


Fig. 2.5 Sound particle and sound ray.

■鏡面反射時の境界面における音波の扱い

エネルギー

境界面に入射するエネルギー E_i は, 反射するエネルギー E_r と, 屈折しながら境界内部に侵入し欠損するエネルギー E_l , もしくは透過するエネルギー E_t に分けられる (Fig.2.6). 音線法において, 境界面におけるエネルギーの損失は, 境界面に設定した反射率 $(1-\alpha)$ を乗じることにより算出する (Fig.2.7).

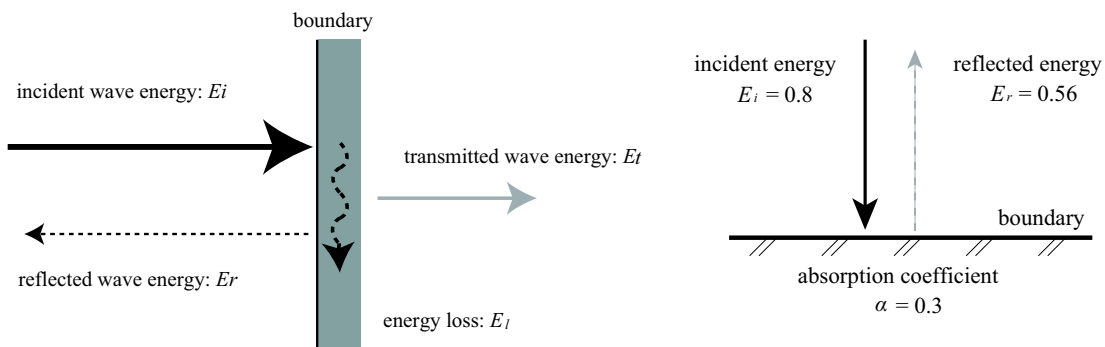


Fig. 2.6 Sound energy on boundary.

Fig. 2.7 Treatment of sound energy on boundary.

方向

反射する音線の方法は、鏡面反射する成分と拡散反射する成分に分かれる。鏡面反射成分は Snell の法則に則り (Fig.2.8), 入射角と同じ角度で反射する。拡散成分に関しては後述する。

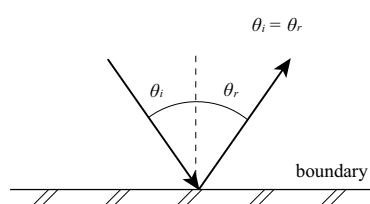


Fig. 2.8 Direction of specular reflected sound.

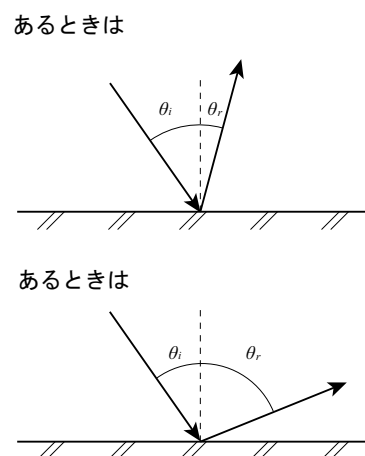


Fig. 2.9 Direction of scattered sound.

■拡散反射時の境界面での音線の扱い

拡散反射の反射性状を支配する法則として、ランベルトの余弦則が用いられることが多い。拡散反射する毎にランベルトの余弦則に従ってあらゆる方向に伝搬していくため、壁面の衝突の度に多数の音線を各方向に分散させなければならない。この操作では音線数が爆発的に増加し、計算が不可能になる。そのため、本検討では、統計的な考え方に基づいて単一音線の挙動のみを取り扱う。

■乱反射率

壁面による拡散反射を幾何音響解析に導入することを主たる目的として、乱反射率 (Scattering coefficient) が提案されている [28]。乱反射率は、壁面の全反射エネルギーに対する鏡面反射成分以外のエネルギーの総量の割合 (Fig.2.10) を表す指標であり次式のよう定義される。

$$s = 1 - \frac{E_{\text{spec}}}{E_{\text{total}}} \quad (2.2)$$

但し、 E_{total} ：全反射エネルギー、 E_{spec} ：鏡面反射エネルギーである。

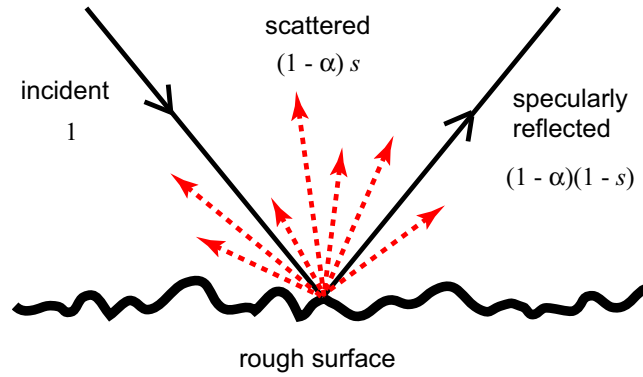


Fig. 2.10 Scattering from rough surface. α is absorption coefficient and s is scattering coefficient.

鏡面反射と拡散反射の判定

一様乱数を用いて鏡面反射か拡散反射の判定を行う。一様乱数 $n(0 < n < 1)$ を発生させ、乱反射率 s とすると $n < s$ のとき鏡面反射、 $n > s$ のとき拡散反射と判定する (Fig.2.9).

エネルギー

境界面におけるエネルギーの損失は、境界面に設定した反射率 $(1-\alpha)$ を乗じることにより算出する。

方向

3次元空間を想定して、反射ベクトルの方向を一様乱数で与え、ランダムな方向に単一音線のみを放射する。従って、反射波の指向特性は考慮していない。方位角 ϕ 、仰角 θ を以下の式に従い算出するものとする。 m, n を一様乱数 ($0 < m < 1, 0 < n < 1$) として

$$\begin{aligned}
 \phi &= 2\pi m \\
 \theta &= \arccos(1 - 2n) \\
 v_x &= \cos\phi \sin\theta \\
 v_y &= \sin\phi \sin\theta \\
 v_z &= \cos\theta
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

により反射ベクトル $v = (v_x, v_y, v_z)$ を算出する。なお、この反射ベクトルは壁面の面内方向の座標系で算出し、ランベルトの余弦法則の性質が反映されるように設定した [29]。

なお, 本研究における室条件は基礎的検討を主眼として矩形室に限定し, 容積を 1000m^3 , 吸音面積 210m^2 のアスペクト比と吸音分布が均等不均等となる 4 条件を基本条件として設定する (Table.2.1). また, Sabine 式での残響時間は 0.77 s である.

Table 2.1 Conditions of rectangular rooms.

Case	$L_x(m)$	$L_y(m)$	$L_z(m)$	α_x	α_y	α_z	Ratio(α/L)
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.35	0.35	0.35	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

2.3 波動音響解析による算出

波動音響解析手法は、時間領域有限差分法 (Finite Difference Time Domain Method : FDTD), 有限要素法 (Finite Element Method : FEM), 境界要素法 (Boundary Element Method:BEM) 等が挙げられる。これらはいずれも波動方程式の近似的 (数值的) 解法であり、理論的に波動性を考慮したものであることから、空間領域・時間 (周波数) 領域における高精度の予測が原理的に保証される。しかし、解析対象となる建築空間は3次元空間であり、また、人間の可聴領域も広範なことから計算機の必要記憶容量や計算時間が膨大になるという大きな問題がある。

2.3.1 時間領域有限差分法

時間領域有限差分法 (FDTD 法) は、計算力学分野全般において適用される汎用的な離散化手法によって、波動方程式を離散化し、音の波動的な振る舞いを予測する手法である。特に音場の初期状態からの過渡的な現象の推移を時間発展的に解く手法であるため、解析結果の可視化や音響数値シュミレーション独特の解析結果提示手法である可聴化に優れる。また、Yee によって提唱された、リープフロッグ (蛙飛び差分) アルゴリズムを用い、空間・時間に変数がずれたスタガードグリッドを用いることで、差分法特有の数値振動を減少させている。

■基礎方程式

音圧・粒子速度を二変数として、空気中を伝わる音波の伝搬は、空気の粒子に関する運動方程式 (Eq.(2.4)) と連続の式 (Eq.(2.5)) で表される。

$$\nabla p = -\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = -\frac{1}{\kappa} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.5)$$

ここで、 p は音圧、 \mathbf{u} は粒子速度ベクトル、 ρ_0 は媒質 (空気) の密度、 κ は体積弾性率であり、媒質の密度と音速 c_0 によって $\kappa = \rho_0 c_0^2$ で表される。

Eq.(2.4), Eq.(2.5) を計算機上で演算する為に、有限の空間・時間で差分化するのだが、波動方程式の様に、進行波と後退波の両方含まれている解析には、後進差分・中心差分・前進差分の中で中心差分が主に使われている。そこで、Eq.(2.4) を1次元 x 軸方向の運動方程式として中心差分で近似すると、

$$\frac{p^n(i+1) - p^n(i)}{\Delta x} = -\rho_0 \frac{u_x^{n+1}(i+1) - u_x^{n+1}(i)}{\Delta t} \quad (2.6)$$

となる。ただし i は空間インデックスで、時間インデックスを n として、時間発展型に変形すると、

$$u_x^{n+1}(i+1) = u_x^n(i+1) - \frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta x} (p^n(i+1) - p^n(i)) \quad (2.7)$$

という差分式が得られ、既知の音圧や粒子速度から Δt 後の粒子速度が得られる (Fig.??). 連続の式に対しても同様にして、

$$p^{n+1}(i) = p^n(i) - \frac{\Delta t \kappa}{\Delta x} (u_x^{n+1}(i+1) - u_x^n(i+1)) \quad (2.8)$$

が得られ、これらを3次元に拡張すると、Eq.(2.7) から Eq.(2.8) は、

$$u_x^{n+1}(i+1, j, k) = u_x^n(i+1, j, k) - \frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta x} (p^n(i+1, j, k) - p^n(i, j, k)) \quad (2.9)$$

$$u_y^{n+1}(i, j+1, k) = u_y^n(i, j+1, k) - \frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta y} (p^n(i, j+1, k) - p^n(i, j, k)) \quad (2.10)$$

$$u_z^{n+1}(i, j, k+1) = u_z^n(i, j, k+1) - \frac{\Delta t}{\rho_0 \Delta z} (p^n(i, j, k+1) - p^n(i, j, k)) \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} p^{n+1}(i, j, k) = & p^n(i, j, k) - \frac{\Delta t \kappa}{\Delta x} (u_x^{n+1}(i+1, j, k) - u_x^n(i, j, k)) \\ & - \frac{\Delta t \kappa}{\Delta y} (u_y^{n+1}(i, j+1, k) - u_y^n(i, j, k)) \\ & - \frac{\Delta t \kappa}{\Delta z} (u_z^{n+1}(i, j, k+1) - u_z^n(i, j, k)) \end{aligned} \quad (2.12)$$

と表される。

ただし、 i, j, k はそれぞれ x, y, z 軸方向の空間インデックス、 n は時間方向のインデックスである。計算機内では、Eq.(2.10) から Eq.(2.12) と境界条件によって時間発展を随時演算していくことになる。最終的に、ある受音位置で得られた p をインパルス応答として扱う。

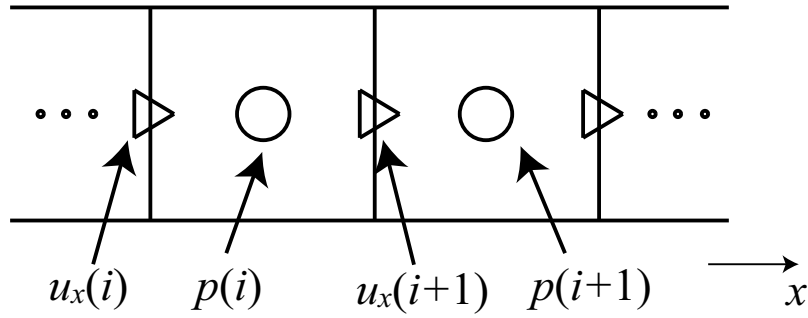


Fig. 2.11 Illustrator of staggered grid.

■安定性と精度

FDTD 法の取り扱う初期値問題では、計算の途中で発散したり、異常に振動したりすることがある。これらの原因としては、定式化に問題がある場合、時間離散幅と空間離散幅の比が適当でない場合がある、後者については、CFL 条件と呼ばれ、離散化格子系において時間離散幅 Δt が、音波が隣り合う格子に伝搬するまでの時間幅より小さくなくてはならない [19]。すなわち 3 次元格子空間の場合、

$$\Delta t \leq \frac{1}{c_0} \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2} \quad (2.13)$$

という条件を満たさなければいけない。ここで、

$$\Delta t = \frac{\lambda}{c_0} \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2} \quad (2.14)$$

とする。このとき λ をクーラン数と呼ぶ。安定条件は、

$$\lambda \leq 1 \quad (2.15)$$

また、FDTD 法では、空間離散幅は計算する音波の周波数に応じて細かくしなければいけない。空間離散幅を小さくするほど精度は向上する。例えば、クーラン数を半分にすると計算時間は 3 次元問題で 2^4 で増加する。一般に計算対象上限周波数における波長の 10 分割から 20 分割程度で行われている。

■境界条件

実際の音場の境界は、吸音材・開口・板・膜など様々な部材によって構成され非常に複雑であり、これらの境界条件を全て数値解析でモデリングを行うことは、困難かつ現実的ではない。位相的な特性などの差異を無視すれば、入射したエネルギーの吸収・透過するエネルギーの比率を表す吸音率を設定すれば、様々な状況に対応できる。

インピーダンス境界

吸音率を持った境界を実現するためのもっとも簡単な手法は、吸音率と関係づけることのできるインピーダンス境界条件を用いるものである。インピーダンスは音響系で使われる場合、音圧と粒子速度の比で定義される (Eq.(2.16)).

$$Z_n = \frac{p}{u_n} \quad (2.16)$$

で表される。ただし、 p は、境界面における音圧、 Z_n は法線方向外向きの音響インピーダンス u_n は境界外向きの法線方向の粒子速度である。FDTD 法では、スタガードグリッドを用いているため u_n と p の定義点は時間・空間的に反グリッドずれており、局所作用を厳密に成立させることは難しい。通常、境界面近傍の圧力 p より境界面上の粒子速度 u_n を求める。一般的にノーマルインピーダンス Z_n は位相特性も含まれた複素数の物理量であるが、通過位相特性を無視する事でノーマルインピーダンスの虚数成分を 0 とおき、実数で垂直入射吸音率 α_n とノーマルインピーダンス Z_n は以下の関係で表される。

$$Z_n = \rho_0 c \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha_n}}{1 - \sqrt{1 - \alpha_n}} \quad (2.17)$$

■音源条件

時間領域有限差分法では、音源位置の要素に時間波形を時々刻々と与えることや、場の音圧の初期値を空間分布で与える事で、音源条件を与えることが出来る。

線形・時普遍的なシステムでは、インパルス応答がすべての情報を含むため、任意の入力波形をこれに畳み込むことでシステムの出力を得ることができる。そのため、インパルス応答を求めることが最も重要であるといえる。デルタ関数は以下の性質を満たすため、理想的なインパルスである。

$$(1) x \neq 0 \text{ の時 } \delta(x) = 0$$

$$(2) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1$$

$$(3) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x-t) dx = f(t)$$

ただし、デルタ関数は強い不連続性を持つため、離散化手法で音源として用いる波動数値解析上で扱うことはできない。これを疑似する初期条件としてある程度滑らかなコサイン波やガウス関数を初期の空間分布として与える方法がよく用いられる。これらは音源の幅から規定される上限周波数以下では疑似的なインパルスとして振る舞う。具体的には以下のような音源を用いることが多い。

1) コサイン波を音源として用いる場合

$$p(r) = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \cos(\pi r/d) & (r \leq d) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2.18)$$

2) ガウス関数を音源として用いる場合

$$p(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{d^2}\right) \quad (2.19)$$

ここで、 r : 音源からの距離、 d : 初期空間波形の幅である。音場解析では初期の粒子速度を0とすることが多い。コサイン波はその特性上高周波成分を多く含みエイリアシングが発生しやすいのに対し、ガウス関数は高周波成分が少ないことが知られているため [20] 本論文ではガウス音源を用いることにする。この音源は文献 [21] によると

$$p(r) = \frac{1}{2r}(r-ct) \exp\left(-\frac{(r-ct)^2}{d^2}\right) + \frac{1}{2r}(r+ct) \exp\left(-\frac{(r+ct)^2}{d^2}\right) \quad (2.20)$$

のように進行波と後退波に分離できるため、前者の進行波成分についてのみフーリエ変換することで以下のスペクトルが得られる。

$$F[p(r,t)] = \frac{\omega \sqrt{\pi} d^3}{2rc^2} \exp\left(-i\omega \frac{r}{c} - \frac{(\omega d)^2}{4c^2}\right) \quad (2.21)$$

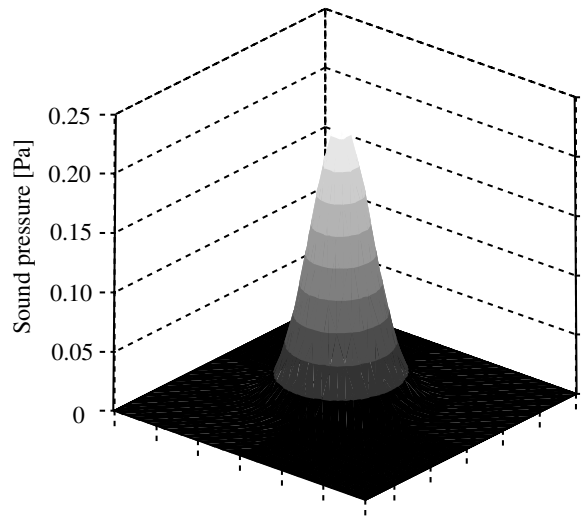


Fig. 2.12 The spectrum of gaussian source.

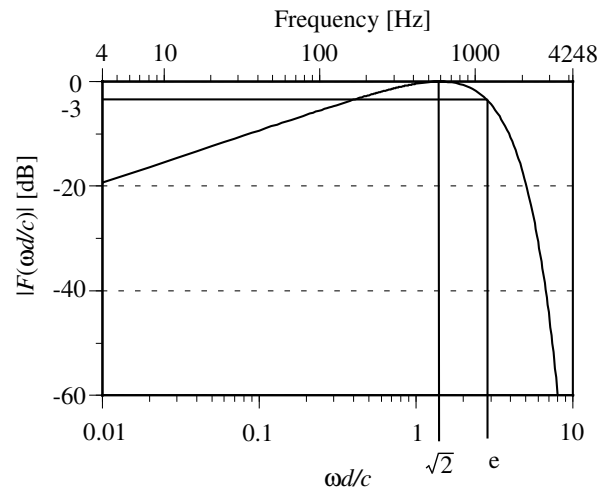


Fig. 2.13 An example of a spatial source.

2.4 室内音響測定

数値解析とは異なり，系が線形で時不変性であるという仮定を満たすことは難しく，測定毎に異なる室内インパルス応答が測定される．これらの問題を回避するために，デジタル処理等によって測定の精度向上を行っている．本論文では，TSP法を用いて室内インパルス応答を測定した．

2.4.1 TSP（伸張パルス）法

電気的入力信号として，インパルスを直接スピーカに入力することもできるが，振幅特性の限界から，大きなエネルギーを得ることが難しい．そのため，インパルス自体を周波数別に時間軸上で引き伸ばすことによりエネルギーを増大させた TSP(Time Stratched Pulse) 信号が考案された．そして，音源から放射された TSP 信号を測定し，時間的に引き伸ばされたインパルスをデジタル処理によって圧縮処理を行うことで，室内インパルス応答を得る．さらに，残響時間などを算出するための十分な SN 比を確保するために同期加算をすることがあるが，音場の時変性の影響を受けることがあるので，十分に注意する必要がある．

なお，本検討で用いた測定システムは，Fig.2.14 のとおりである．

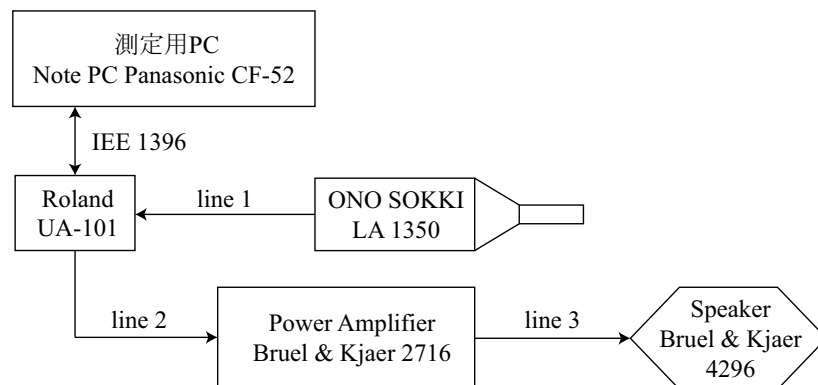


Fig. 2.14 Measurement system of room impulse response.

音源系統

1 2 面体スピーカ（Bruel&Kjaer.4250），三脚（Bruel&Kjaer, KE-0364），パワーアンプ（Bruel&Kjaer, 2716），測定用 PC（Note PC Panasonic CF-52），オーディオインターフェイス（Roland UA-101）

受音系統

騒音計 (ONO SOKKI, LA-1350), マイクスタンド, ケーブルなど

ソフトウェア

インパルス応答測定 AEIRM (日東紡音エンジニアリング (株))

測定パラメーター

音源: TSP 信号, サンプリング周波数: 48kHz, 出力信号次数: 16 次, インパルス応答長: 1.365 秒, 同期加算回数: 10 回

第 3 章

室内インパルス応答の反射音構造の抽出

3.1 はじめに

室内インパルス応答から得られた出力波形を目視することで、一般に反射音は直接音を補強し、その明瞭性や音量感を向上し、響きの豊かさに寄与するが、その遅れ時間が大きいと分離して聞こえエコーやカラーレーション等の音響障害を引き起こすことがある。しかし、この判断は個人の主観に依存するところが大きく、その程度に関しても同様に個人の経験的背景に委ねられる。それに加えて、インパルス応答そのものに減衰が含まれているため、その程度を比較することが困難であり、特にその傾向は後期時間ではより強まる。そのため、インパルス応答に含まれている減衰を除去することで反射音の相対的な突発性を把握する事ができると考えられる。

本章では、近年提案されたインパルス応答から減衰を除去した反射音構造を算出方法を概観し、理論的検討およびケーススタディを通して基本的性質の把握を行う。

3.2 室内インパルス応答の減衰を除去した反射音構造抽出手法

3.2.1 二乗インパルス応答を指数関数で除する方法

まず、室内インパルス応答の減衰を除去した反射音構造を算出する方法の一つとして、インパルス応答から推定した指数関数で二乗インパルス応答を除することで得られると考えられる。ここで、試験的に鏡像法解析により得られたインパルス応答から指数関数を

推定し、減衰を除去した反射音構造の抽出を試みる。なお、室条件は、立方体均等吸音の Case 1a と直方体不均等吸音の Case 2b を用いた (Table.2.1)。また、減衰曲線の指数関数を推定するにあたり、一般に残響時間算出に用いられている手法に習い、減衰曲線の評価区間を (1) 0dB から 60dB (2) -5dB から -35dB (3) -5dB から -25dB の 3つの区間において、それぞれ減衰率を線形最小二乗近似より推定した。

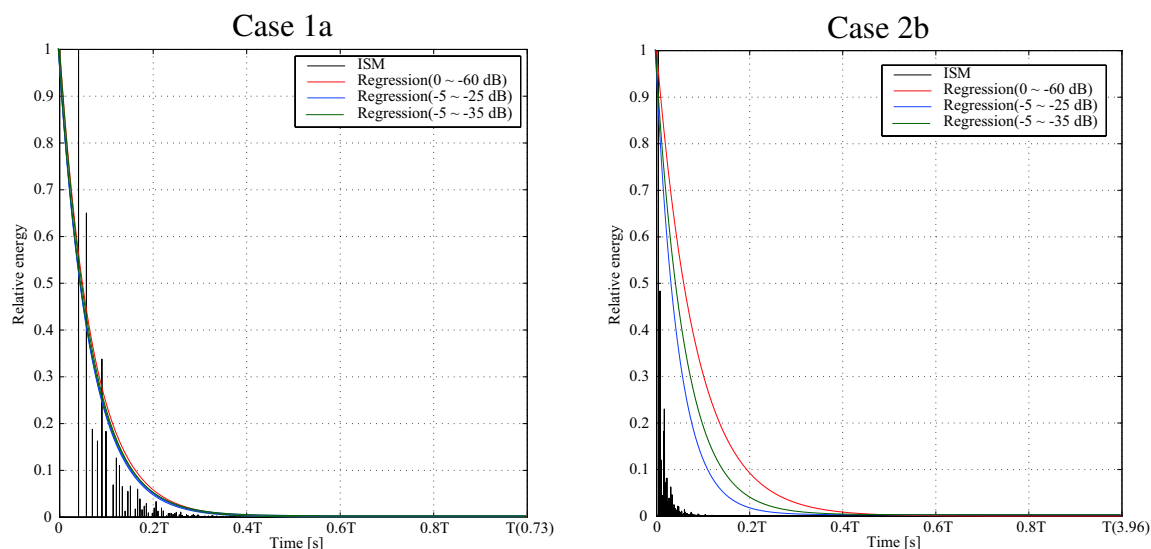


Fig. 3.1 Energy impulse response and approximation curves.

Fig.3.1 はエネルギーインパルス応答と減衰曲線のそれぞれの評価区間から推定した指数関数である。立方体均等吸音の場合、エネルギーインパルス応答は初期時刻では比較的まばらに反射音が到来し、そのエネルギー減衰の様子も近似した指数関数と比較的類似した傾向である。一方、直方体不均等吸音のエネルギーインパルス応答では初期時刻に強い反射音が到来した後、急速に減衰している。さらに、減衰の様子も推定した指数関数と様態が異なり、また、指数関数も評価区間によって大きく変化している。また、実測においては暗騒音の影響でインパルス応答自体が指数減衰に従わないことも考えられる、

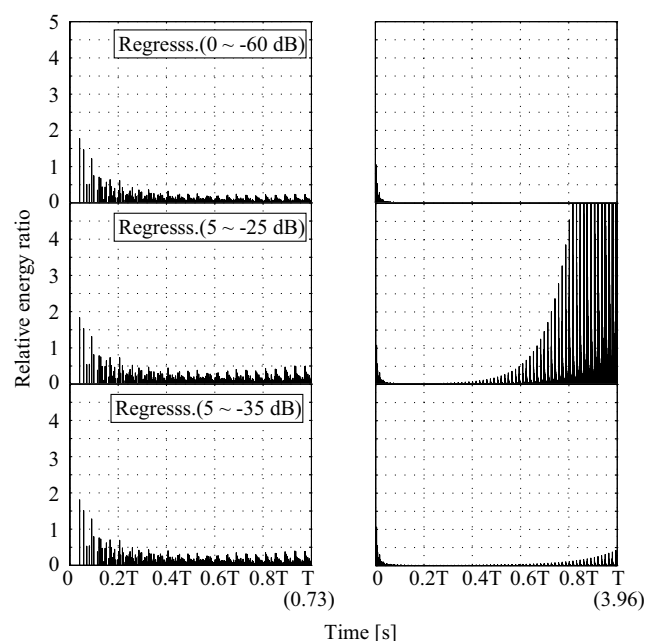


Fig. 3.2 Divided impulse response using approximation exponential decay function.

Fig.3.2.1 はエネルギーインパルス応答を推定した指数関数で除したものである。指数関数を推定するにあたり、評価区間によるばらつきが比較的少なかった立方体均等吸音の場合では、絶対値に多少の変化はあるものの、様相は類似している。しかし、直方体不均等吸音の場合、評価区間によって推定した指数関数の様相が大きく異なる。これらは、減衰曲線が湾曲していることなどが挙げられる。加えて、インパルス応答自体の減衰のとして指数関数のみで表されるわけではなく、べき乗減衰することも報告されており [30], あらゆるインパルス応答の減衰を推定することは難しいと考えられる。

3.2.2 二乗インパルス応答を逆二乗積分値で除する方法（減衰率比）

羽入 [14] らはインパルス応答の減衰を除去する方法として、エネルギーインパルス応答をインパルス応答積分値で除することで減衰を除去した反射音構造を抽出する手法を提案した (Eq.(3.1)).

$$D(t) = \frac{I(t)}{E(t)} \quad (3.1)$$

ここで、 $I(t)$ はエネルギーインパルス応答であり、 $E(t)$ は $I(t)$ のインパルス応答積分値であり、

$$E(t) = \int_t^{\infty} I(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

である。

ここで、反射音構造の詳細を無視し、エネルギーが平均的に減衰率 α で減衰すると仮定し、エネルギーインパルス応答 $I(t)$ を次式のようにモデル化すると、

$$I(t) = I_0 e^{-\alpha t} \quad (3.3)$$

ただし、 I_0 はエネルギーインパルス応答の最大値を表す。この場合、インパルス応答積分値 $E(t)$ は、Eq.(3.2) より、

$$E(t) = \int_t^{\infty} I(\tau) d\tau \quad (3.4)$$

$$= \int_t^{\infty} I_0 e^{-\alpha \tau} d\tau \quad (3.5)$$

$$= \frac{I_0}{\alpha} e^{-\alpha t} \quad (3.6)$$

$$(3.7)$$

これを Eq.(3.1) に代入すると、

$$D(t) = \frac{I(t)}{E(t)} \quad (3.8)$$

$$= \frac{I_0 e^{-\alpha t}}{\frac{I_0}{\alpha} e^{-\alpha t}} \quad (3.9)$$

$$= \alpha \quad (3.10)$$

$$(3.11)$$

となり、変動を無視した場合においては、 $D(t)$ は時間に依らず、減衰率 α に等しくなる。この手法では、二乗インパルス応答から減衰率を推定するような恣意性がなく、またインパルス応答自身の減衰で除去するため、湾曲減衰など減衰性状に依らず減衰除去が行えると考えられる。

また、Jeong[15] は、インパルス応答積分法 (Eq.(3.2)) によって得られた残響減衰曲線における急峻な変化が強い反射音を表しているとして、減衰曲線の瞬時の傾き（瞬時減衰率）を算出した (Eq.(3.12)).

$$D(t) = \frac{L(t + \Delta t) - L(t)}{\Delta t} \quad (3.12)$$

ただし、

$$L(t) = 10 \log_{10} E(t) \quad (3.13)$$

であり、 $\Delta t_s = 1/f_s$ 、 f_s はサンプリング周波数である。このとき、Eq.(3.12) において、 $\Delta t \rightarrow 0$ にすると、微分に書き換えられ、

$$D(t) = \frac{dL(t)}{dt} = -\frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{I(t)}{E(t)} [\text{dB/s}] \quad (3.14)$$

となり、結果的に係数を除いて Eq.(3.1) と一致する。

別の観点として、Huszy [31] はインパルス応答積分法の指数部に着目し任意の冪指数を用いて減衰曲線を算出することを提案しており、これを一般化減衰関数と呼ぶ (Eq.(3.36)) それを時間の偏微分をした場合、瞬時減衰率に相当するものが算出される。

一般化減衰関数は、

$$\varphi(t, p) = \frac{2}{p} 10 \log_{10} \frac{\int_t^\infty |h(\tau)|^p d\tau}{\int_0^\infty |h(\tau)|^p d\tau} [\text{dB}] \quad (3.15)$$

であり、ただし、 $h(t)$ はインパルス応答である。これを時刻 t で偏微分することで、

$$D(t, p) = \frac{\partial \phi(t, p)}{\partial t} = -\frac{2}{p} \frac{10}{\ln 10} \frac{|h(t)|^p}{\int_t^\infty |h(t)|^p dt} [\text{dB/s}] \quad (3.16)$$

が得られ、指数 p が 2 の時は、Eq.(3.14) と一致する。

■瞬時減衰率の算出方法に違いに関する検討

Eq.(3.1) と Eq.(3.12) は微分形式においては、係数を除いて値が一致するが、実際のインパルス応答では有限のサンプリング周波数であるため、Eq.(3.12) はサンプリング周波数に依存する懸念が考えられる。

直方体不均等吸音の Case 2b (Table.2.1) の条件のもと、音線法解析で得られたインパルス応答に対し、サンプリング周波数 f_s を変化させた時の両手法の瞬時減衰率を比較した。Fig.3.3 上図は両手法で算出した瞬時減衰率であり、Fig.3.3 下図は Eq.(3.1) に対する Eq.(3.12) の誤差率である。サンプリング周波数によらず Jeong 値が羽入値より小さい。また、 f_s が小さいほどの誤差が大きくなり、最大で 10 % 以上の誤差が生じている。本検討では、理論式上においてサンプリング周波数の影響がない Eq.(3.1) を用いることとする。

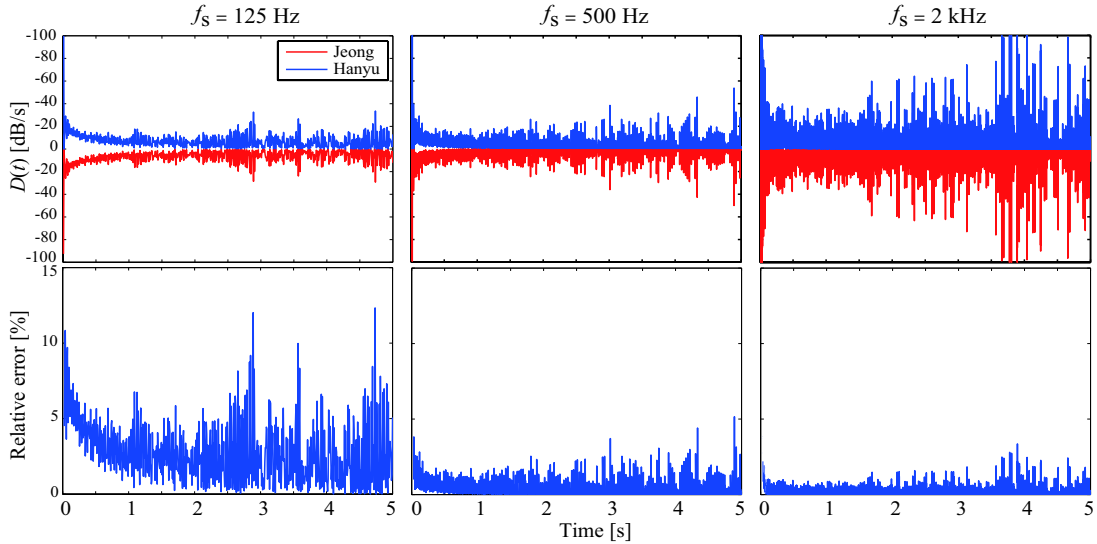


Fig. 3.3 Comparison of $D(t)$ with the two methods at three sampling frequencies (Upper); Relative error (Lower).

減衰を除去したインパルス応答の基準化

Eq.(3.12) より瞬時減衰率 $D(t)$ は減衰曲線の傾きが大きいほど大きな値を取りやすい Fig.3.4. 即ち, 残響の長さに依存する量であるため, 異なる音場間や周波数間での比較が困難である. この影響を影響を取り除くために, 平均的な減衰率 (基準減衰率) \bar{D} で基準化を行い相対的な反射音エネルギーの変動性を評価できると考えられる. なお, 基準化後の $D(t)$ を減衰率比 $d(t)$ と称する. Fig.3.4 は継続時間 3s のホワイトノイズに対して, 残響時間が 1s および 2s となるような指数減衰を与えた時のエネルギー減衰曲線 (上図), 瞬時減衰率 (中図) と減衰率比 (下図) を示す. 瞬時減衰率では減衰曲線の傾きの違いにより絶対値が異なるが, 平均的な減衰率で除することで, 減衰率比は残響の長さに依らず, 減衰率比はおおよそ一定となり, 残響時間が異なる部屋や異なる周波数間での比較を行うことができる.

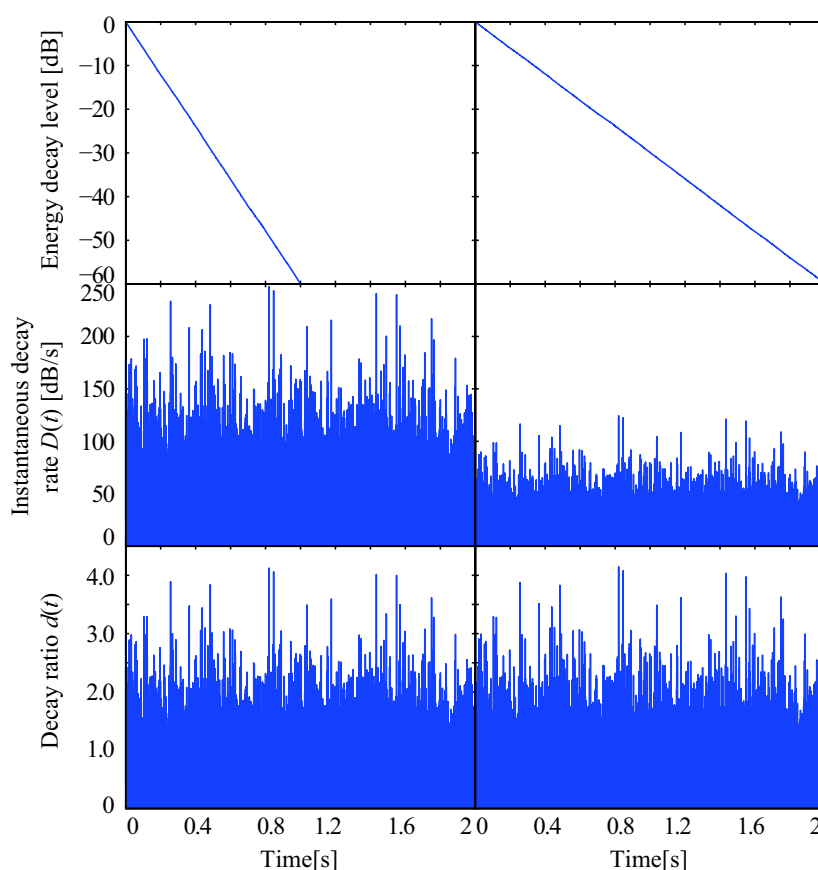


Fig. 3.4 Comparison of Energy decay level , decay rate and decay ratio calculated .

3.3 減衰率比の基本的性質の把握

反射音構造の抽出方法は上節で述べた。逆自乗積分値で除する方法は減衰曲線の性状によらず減衰除去ができると考えられるため以後、減衰率比 $d(t)$ で検討する、しかし、Eq.(3.1) では、反射音の微細構造を無視した仮定であり、実際のインパルス応答においては反射音間隔に疎密が生じる。一般的には音源から音が発せられた直後は反射音が時間的に疎であり、時間が経過するにつれ密になる。本節では反射音の疎密を考慮したモデルを想定した理論的算出を行い、ケーススタディを通して基本的性質を把握する。

3.3.1 反射音の疎密を考慮した場合の理論的算出

容積 V 、表面積 S の室内にある点音源から時刻 $t = 0$ に出力 I_0 のインパルスが発せられた場合、距離減衰、壁面吸音を算定すると、ある鏡像音源からの到来時刻における離散時間内の音響エネルギー密度は次式で表される、

$$I_i(t) = \frac{I_0/\Delta t_s}{4\pi c^3 t^2} (1 - \bar{\alpha})^{\frac{c}{l}t} \quad (3.17)$$

ただし、音速 c 、平均吸音率 $\bar{\alpha}$ 、平均自由行路 $l = 4V/S$ 、 $\Delta t_s = 1/f_s$ 、 f_s はサンプリング周波数である、

Eq.(3.17) に対して、受音点から等距離にある微小区間の音源個数を考慮し、逆二乗積分を行うと次式となる、

$$E(t) = \int_t^\infty I_i(\tau) \Delta t_s \cdot \frac{dN}{d\tau} d\tau \quad (3.18)$$

$$= \int_t^\infty I(\tau) \Delta t_s \cdot \frac{4\pi c^3 t^2 d\tau}{V} \quad (3.19)$$

$$= \frac{4I_0}{-cS \ln(1 - \bar{\alpha})} (1 - \bar{\alpha})^{\frac{c}{l}t} \quad (3.20)$$

ただし、 dN/dt は単位時間あたりの鏡像音源個数、

$$\frac{dN}{dt} = \frac{4\pi c^3 t^2}{V} \quad (3.21)$$

である。ここで、各反射音が同時刻に到来しないことを仮定すると、瞬時減衰率は

Eq.(3.14) より,

$$D(t) = -\frac{10}{\ln 10} \frac{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}{16\pi(ct)^2} \frac{1}{\Delta t_s} [\text{dB/s}] \quad (3.22)$$

となる. ここで, 平均的な減衰率を,

$$\bar{D} = -10 \log_{10}(1 - \bar{\alpha})^{\frac{c}{V}t} = -\frac{10}{\ln 10} \frac{cS}{4V} \ln(1 - \bar{\alpha}) [\text{dB/s}] \quad (3.23)$$

とすると, 減衰率比は次式で表される.

$$d(t) = \frac{V}{4\pi c^3 t^2} \frac{1}{\Delta t_s} = \frac{\Delta t_r}{\Delta t_s} \quad (3.24)$$

ただし, Δt_r は平均反射音時間間隔であり,

$$\Delta t_r = \frac{dt}{dN(t)} = \frac{V}{4\pi c^3 t^2} \quad (3.25)$$

である. Eq.(3.24) は時間の逆二乗で単調減少し, 平均反射音時間間隔とサンプリング間隔 Δt_s が一致する時刻を t_c とすると,

$$t_c = \sqrt{\frac{V}{4\pi c^3} \frac{1}{\Delta t_s}} \quad (3.26)$$

と表され, このとき減衰率比は 1 を示す. また, t_c 以降では, 反射音が同時刻に到来しないという仮定が成立しないため $d(t) = 1$ となる. なお, t_c は反射音の疎密をサンプリング周波数に応じて物理的に区分する時刻である.

次に, 周波数帯域分析を考慮した場合の減衰率比の理論を検討する. インパルス応答はある応答に対し, 継続時間が 0 でエネルギーが 1 であるデルタ関数の畳み込みであると考えられる. つまり, Eq.3.17 は離散時間 t_s 上においてエネルギーが 1 になるようなデルタ関数を畳み込んでいることに相当する.

周波数フィルターをインパルス応答に畳み込むとき, 使用するフィルタの最大エネルギーを I_{\max}^F , フィルタの通過する全エネルギーを E^F としたとき, 最大エネルギーを全エネルギーで除した値を相対的ピーク値 $R(= I_{\max}^F / E^F)$ とすると, 瞬時減衰率・減衰率比は Eq.(3.22), Eq.(3.24) の $1/\Delta t_s$ を R に置換して, 次式のように表すことができる.

$$D(t) = \frac{10}{\ln 10} \frac{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}{16\pi(ct)^2} \cdot R [\text{dB/s}] \quad (3.27)$$

減衰率比 $d(t)$ は,

$$d(t) = \frac{V}{4\pi c^3 t^2} \cdot R \quad (3.28)$$

$$= \Delta t_r \cdot R \quad (3.29)$$

と表される.

3.3.2 幾何音響解析によるケーススタディ

前節では、減衰率比は容積とサンプリング周波数に依存することを理論的に示した。この理論について立方体室を対象とした鏡像法解析を行い減衰率比について理論との対応を検証する。基本条件として、室寸法 10m, 吸音率 0.35 を全面に与える。サンプリング周波数 48kHz とし、音源点は室中央から各壁方向に 0.1, 0.2, 0.3m 移動した位置とする。この基本条件に対して、音源位置、室寸法、サンプリング周波数を変化させる。また、減衰率比算出に用いる平均的な減衰率として評価区間内 (60 dB 減衰時刻 T まで) の瞬時減衰率の平均値とする。

音源位置の影響

Fig.3.5 に基本条件 (図左) と音源位置を中央 (右) にした場合を示す。なお、音源位置を中央にした場合においては参考として 10 倍, 100 倍の理論値を併記した。基本条件の場合、解析値は理論値と傾向は概ね対応しているが、数倍程度大きい値を示している。これは、到来反射音の時間分布の偏りが大きいため、また各鏡像音源の反射頻度が均一でないためと考えられる。また、 t_c 付近では概ね一定の値を変動をしている。音源が中央にある場合、解析値の傾向は理論値と類似しているが、100 倍程度の乖離が見られ、突発的な反射音が到来していることがわかる。これは、音源受音点が室中央にあるために基本条件に比べて同時刻に多数の反射音が到来することに起因すると考えられる。

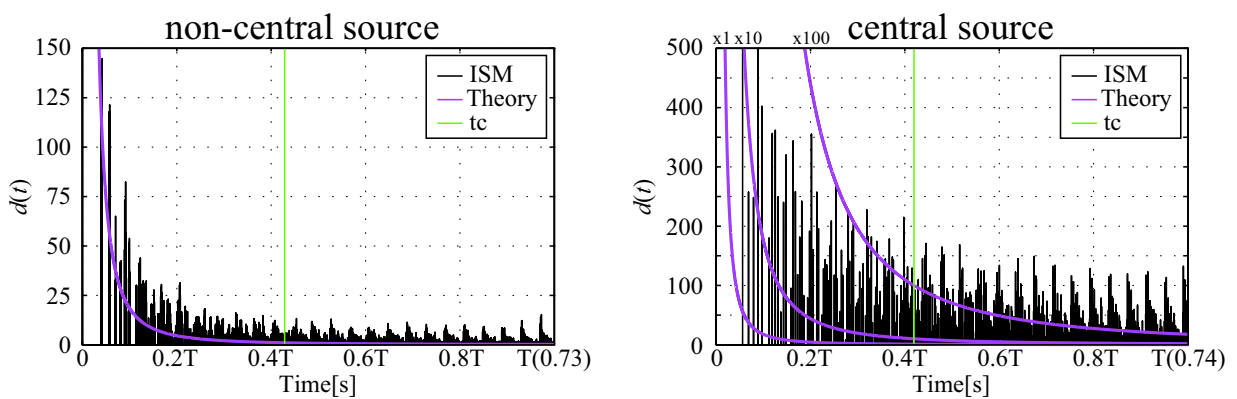


Fig. 3.5 Decay ratio $d(t)$ with changing room volume.

室容積の影響

室寸法を変化させた場合の減衰率比 $d(t)$ を Fig.3.6 に示す。室寸法を変化させた場合、理論値は室容積の比例して変化している。解析値についても同等の傾向が見られるが、理論値と比べて変化が小さい。これは各鏡像音源の反射頻度が異なるため後期では交互反射方向の成分の寄与が相対的に大きくなることから、減衰率比は室容積ではなく壁面間距離の変化に追従したものと考えられる。

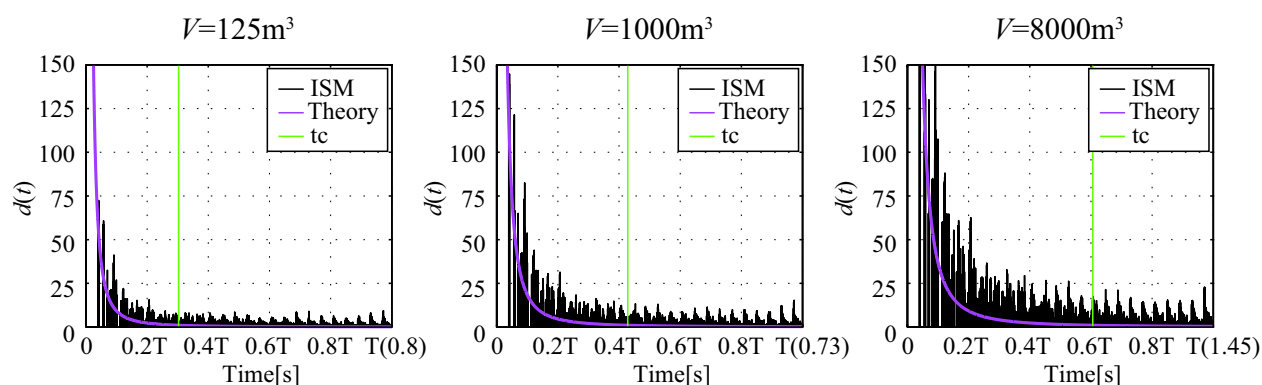


Fig. 3.6 Decay ratio $d(t)$ with changing room volume.

サンプリング周波数の影響

基本条件に対しサンプリング周波数を変化させたときの減衰率比を Fig.3.7 に示す。理論上では減衰率比とともにサンプリング周波数と比例関係にあり、その傾向は理論値・解析値ともに同程度の変化を確認することができる。

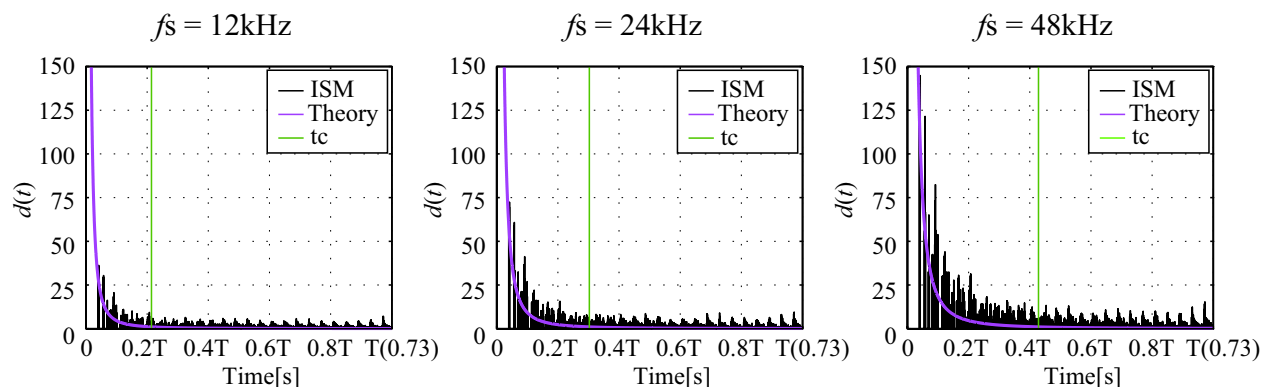


Fig. 3.7 Decay ratio $d(t)$ with changing sampling frequencies.

周波数帯域分析の影響

フィルタリング処理による影響を調べるために、基本条件に対して、サンプリング周波数と中心周波数をそれぞれ変化させた。なお、本検討で用いたフィルタは、中心周波数に依らず遮断特性が一定となるように窓関数法によって作成し、使用した時間窓はハミング窓とする。一例として、1/3 オクターブバンド幅、中心周波数 1kHz の時のフィルタの次数は $(2^{11} - 1)$ であり、中心周波数を 2 倍にすると次数が $(2^{10} - 1)$ になる。ケーススタディの報告の前にまずフィルタの相対ピーク値 R やフィルタのオーバーラップに関する検証を行った上で、結果を述べる。

相対ピーク値 R に関する確認

中心周波数や帯域幅を変化させた時の相対ピーク値 R の値を確認する。Fig.3.8 はサンプリング周波数 $f_s = 48\text{kHz}$ での相対ピーク値 R である。中心周波数が低いほど相対ピーク値は小さな値を取ることが確認できる。また、帯域幅に比例して相対ピーク値が増加している。

フィルタのオーバーラップが与える影響

減衰率比は反射音間隔に依存する量であり、反射音間隔によってはフィルタがオーバーラップすることが考えられる。Fig.3.3.2 は反射音間隔をフィルタのタップ数に応じてフィルタのオーバーラップ率を変化させた図である。また、計算条件は、サンプリング周波数 48kHz、残響時間が 1s になるような減衰率を与えた。なお、フィルタは 1/3 オクターブバンド幅で中心周波数が 1kHz である。また、Eq.(3.29) から算出した理論値を併記した。結果は、理論と概ね対応しており、オーバーラップ率が 100% の時に解析値では 1 となる。

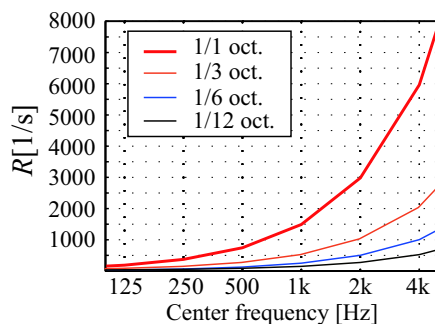


Fig. 3.8 Relative peak R with changing center frequencies and octave bands.

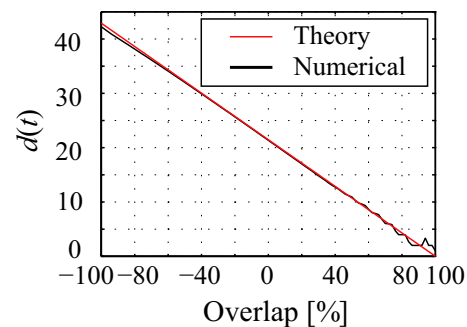


Fig. 3.9 Comparison of theoretical decay ratio $d(t)$ and effect of filtering overlap.

Fig.3.10 に基本条件に対して、サンプリング周波数と中心周波数を変化させ、1/3 オクターブバンドフィルタを通した場合の減衰率比 $d(t)$ を示す。中心周波数を固定した場合、サンプリング周波数によらず、同様の傾向を示した。中心周波数間での比較では、中心周波数が高くなるほど、減衰率比の値が上昇している様子が伺えるが、もとのインパルス応答に含まれる周波数特性の影響を受けるため、単純な比較は困難であると考えられる。

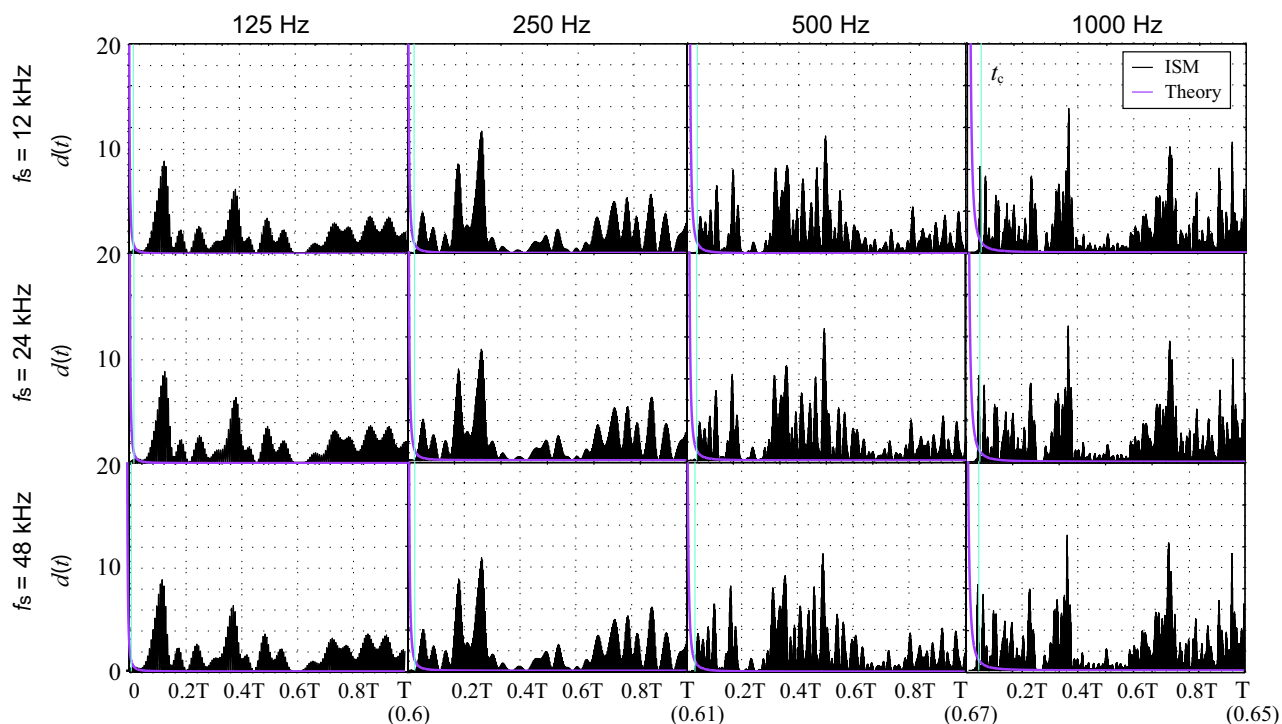


Fig. 3.10 Decay ratio calculated by the image source method in 1/3 oct. bands with changing sampling frequency.

3.4 湾曲減衰時の基準化に関する検討

前節では、減衰曲線が1つの指数減衰で表される理想的なモデルを想定した。また、基準化の方法について Joeng や羽入らは \bar{D} を評価区間内の $D(t)$ の平均値、即ち評価区間内で直線減衰を仮定した場合の基準減衰率が用いられているが、評価区間の設定は試行段階にあるように見える。特に、減衰曲線が湾曲をした場合において、直線減衰の傾きで基準化を行うと、その評価を誤る可能性が考えられる。そのため、湾曲減衰を考慮した基準減衰率を用いることで評価区間に依存せずに、また平均的な減衰性状に対する到来反射音の突発性の程度をより正確に算出できると考えられる。

計算条件

室条件は Table.2.1 の基本条件室で検討した。比較のため、直線減衰性状であった Case 1a に対し湾曲が顕著であった Case 2b の2種の部屋を想定した。なお、Sabine 式による残響時間は 0.77s である。また、インパルス応答は音線法解析により得る。音源・受音球は室中央、音線数は 10^6 本、サンプリング周波数 $f_s = 1\text{kHz}$ 、計算時間は残響時間より十分長い時間を考慮し、7.5s とする。なお、評価区間は 0 から -60dB とする。

3.4.1 回帰曲線を用いる方法

線形回帰手法

2種類の基準減衰率を設定し比較する。

(A) 減衰曲線における 0dB 点と -60dB 点の結線の勾配 \bar{D}_{60}

(B) 10dB 減衰毎の結線の勾配 $\bar{D}_{10}(t)$

(A) は既往例で用いられている方法であり、(B) は湾曲を考慮するために、試行的に 10dB 区間ごとの基準化を行う。

■結果と考察

減衰性状

Fig.3.11 に示す，立方体均等吸音の Case 1a では概ね直線減衰しているのに対し直方体不均等吸音である Case 2b では減衰曲線に湾曲が見られる．直線減衰の場合は大きな差が見られないが，湾曲減衰した場合においては 10 dB 減衰毎の結線の方では，比較的湾曲に沿って傾きが変化している．

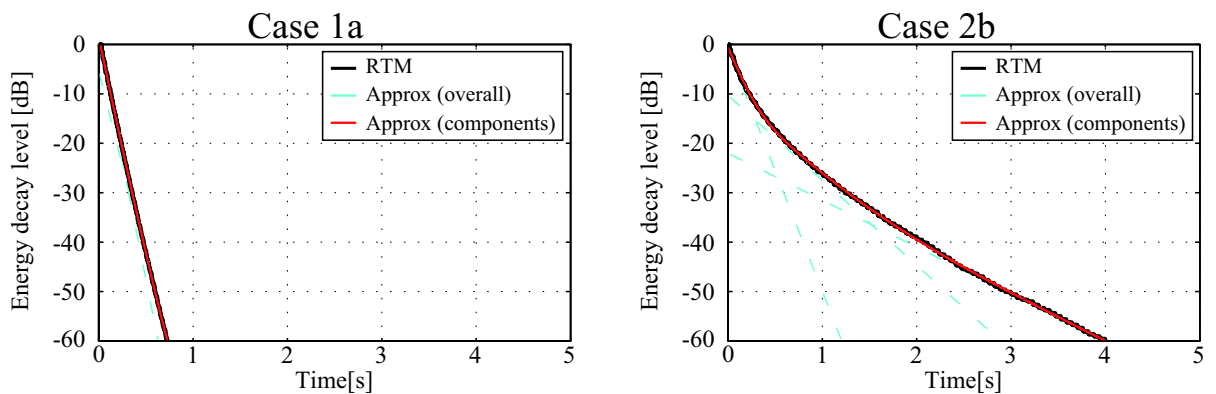
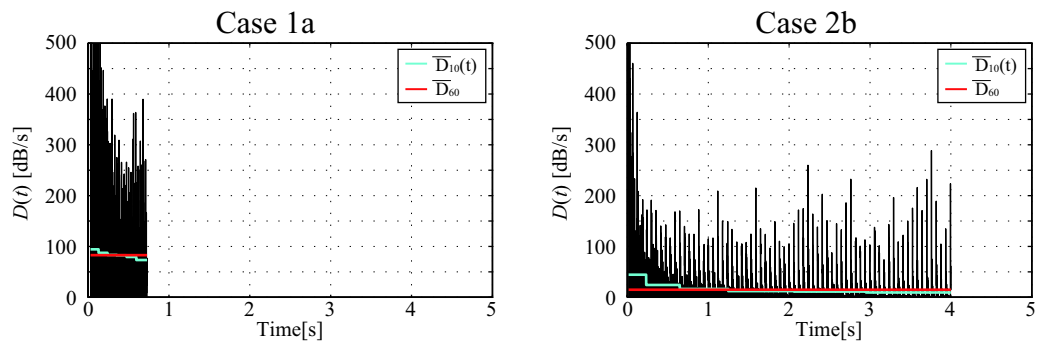
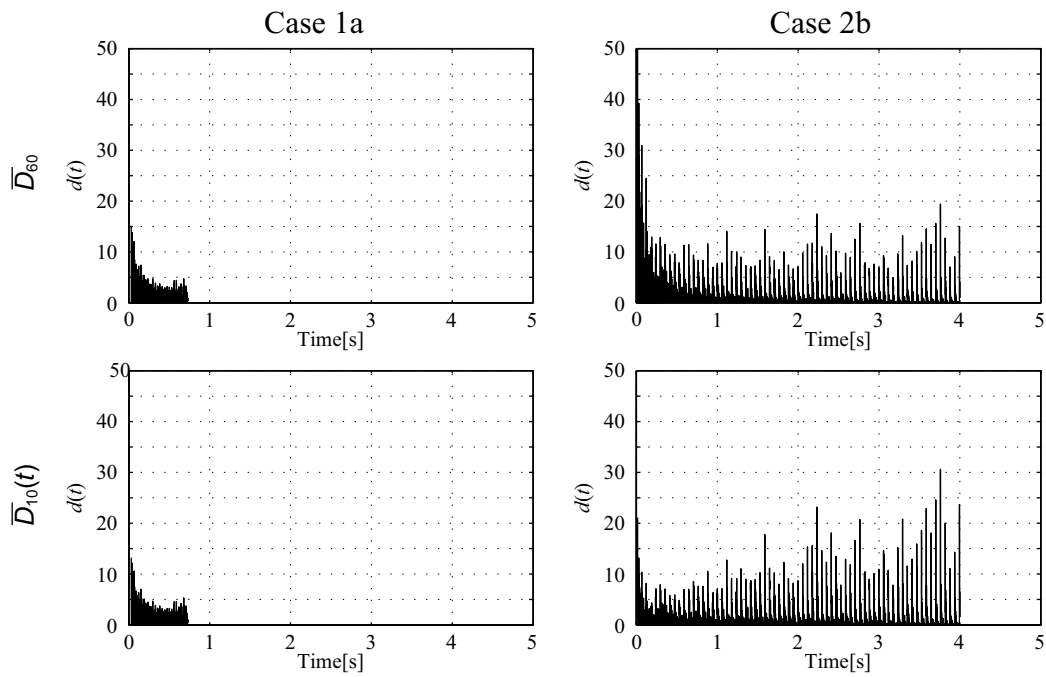


Fig. 3.11 Energy decay curve.

瞬時減衰率・減衰率比

Fig.3.12 に瞬時減衰率を示す．また，両手法の基準減衰率も併せて載せている．両条件ともに初期では反射音密度が疎かつ減衰が迅速なため値は大きく，後期では一定の値を変動している．特に減衰曲線が湾曲した場合においては，後期に行くほど値のばらつきが大きくなっている．基準減衰率については，減衰性状での考察と同様に，減衰曲線が比較的直線減衰している場合においては，両手法の基準減衰率に大きな差が見られず，湾曲した場合において，初期で値が大きく異なる．

Fig.3.13 に減衰率比を示す．基準減衰率がほぼ同等の Case1a においては，減衰率比に大きな違いは見られない．一方，湾曲減衰をした Case2b では基準減衰率が大きく異なるため， \bar{D}_{60} を用いた場合において初期では $\bar{D}_{10}(t)$ に比べ値が大きく過大評価している可能性があり，後期では逆に $\bar{D}_{10}(t)$ に比べ値が小さく，過小評価をしている可能性が示唆された．また， $\bar{D}_{10}(t)$ を用いた場合では値が時々刻々と上昇しており平行壁間の交互反射の影響が強まっていると考えられる．

Fig. 3.12 Instantaneous decay rate $D(t)$.Fig. 3.13 Decay rate normalized by \bar{D}_{60} and $\bar{D}_{10}(t)$.

非線形回帰手法

線形回帰による基準化方法においては、評価区間の設定に任意性があり、また、10dB 区間毎では基準減衰率が不連続に変化することが課題としてあげられる。そこで、連続的に基準減衰率を変化させるため、非線形回帰曲線による手法 [32] で基準減衰率を算出する。

残響減衰曲線 $L(t)$ に対して、便宜的に3種の指数減衰で表される曲線 $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ を仮定して回帰する。

$$\tilde{L}(\mathbf{x}, t) = 10 \log_{10} \tilde{E}(t) = 10 \log_{10} (\mathbf{x}_1 e^{-\mathbf{x}_2 t} + \mathbf{x}_3 e^{-\mathbf{x}_4 t} + \mathbf{x}_5 e^{\mathbf{x}_6 t}) \quad (3.30)$$

ただし、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ である。このとき、回帰区間を時刻 $t = 0$ から T までとしたとき、Eq.(3.31) で表される評価関数 $G(\mathbf{x})$ が最小になるときの \mathbf{x} を反復解法にて算出する。

$$G(\mathbf{x}) = \int_0^T (\tilde{L}(\mathbf{x}, \tau) - L(\tau))^2 d\tau \quad (3.31)$$

得られた回帰曲線 $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ から、 $\tilde{E}(t)$ を求めると、

$$\tilde{E}(t) = 10^{\frac{\tilde{L}(\mathbf{x}, t)}{10}} \quad (3.32)$$

この瞬時減衰率 $D(t)$ は、

$$D(t) = \frac{\tilde{L}(\mathbf{x}, t)}{dt} = -\frac{10}{\ln 10} \frac{\tilde{E}(t)'}{\tilde{E}(t)} \quad (3.33)$$

となり、これを基準減衰率 $\bar{D}(t)$ として用いる。

■結果と考察

減衰性状

Fig.3.14 に減衰性状と非線形回帰によって得られた近似曲線を併せて載せる。減衰曲線の性状に依らず概ね近似していることがわかる。特に、湾曲をしている Case 2b においては減衰の様子が時々刻々と変化し 3つの指数減衰でおおよそ表現できることが確認された。

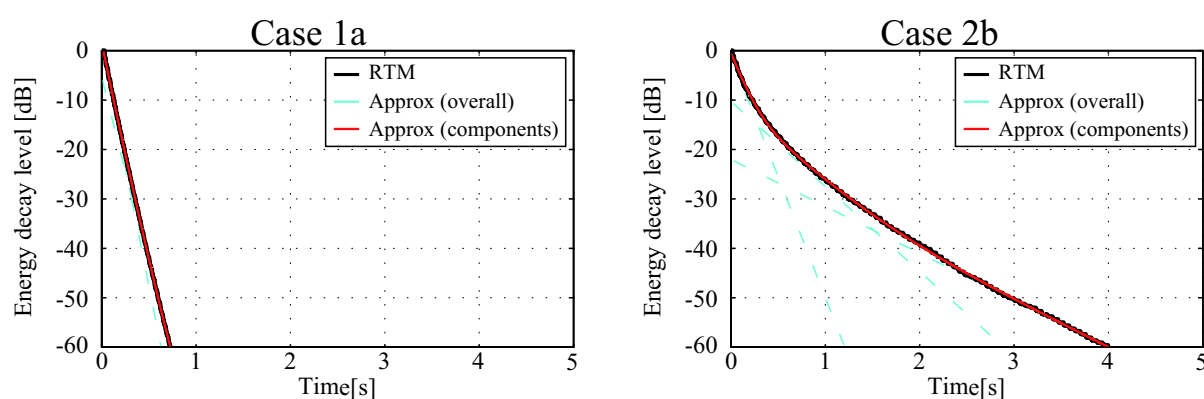
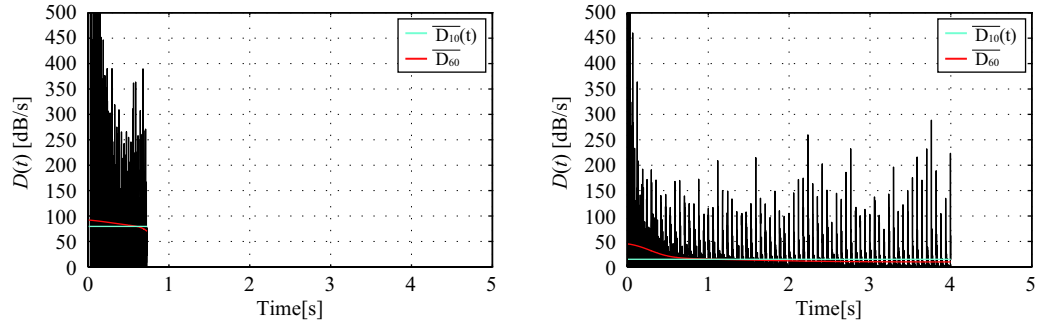
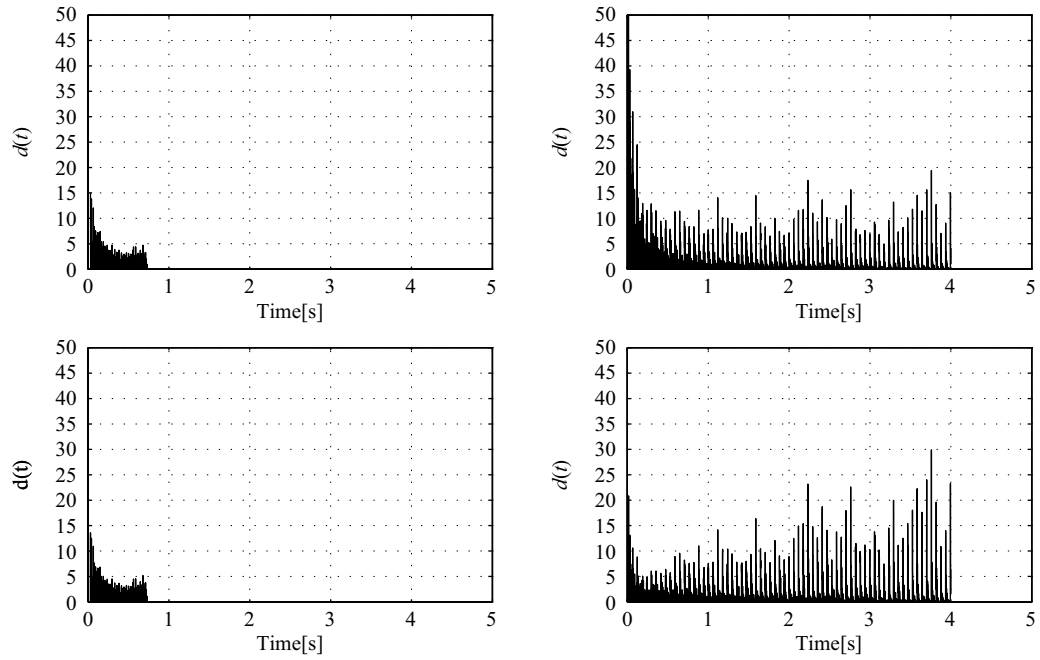


Fig. 3.14 Energy decay curve and their approximation curve.

瞬時減衰率・減衰率比

Fig.3.15 に瞬時減衰率を示す。また、比較として従来法の \bar{D}_{60} の基準減衰率も併せて載せている。基準減衰率については、直線減衰の場合には大きな変化は見られず、湾曲減衰の場合に大きく異なる。全体的な傾向としては、 $\bar{D}_{10}(t)$ の時と同様で、湾曲減衰の時に差が現れている。

Fig.3.16 に減衰率比を示す。基準減衰率がほぼ同程度の Case 1a においては、減衰率比に大きな違いは見られない。 $\bar{D}_{10}(t)$ を用いた場合では値が時々刻々と上昇しており平行壁間の交互反射の影響が強まっていると考えられる。

Fig. 3.15 Instantaneous decay rate $D(t)$.Fig. 3.16 Decay ratio normalized by \overline{D}_{60} and $\overline{D}_{10}(t)$.

3.4.2 一般化減衰関数を用いる方法

インパルス応答積分法の冪指数を変化させ、突出した反射音を増幅する方法が提案されている [31]. そこで、異なる 2 つの冪指数の瞬時減衰率の比をとることで、減衰率比を算出する.

Eq.(3.16) より、減衰率比は次式のように表される.

$$d(t, p) = \frac{D(t, p_2)}{D(t, p_1)} \quad (3.34)$$

$$= \frac{p_1 |h(t)|^{p_2} \int_t^\infty |h(\tau)|^{p_1} d\tau}{p_2 |h(t)|^{p_1} \int_t^\infty |h(\tau)|^{p_2} d\tau} \quad (3.35)$$

$$= \frac{p_1}{p_2} |h(t)|^{(p_2-p_1)} \frac{\int_t^\infty |h(\tau)|^{p_1} d\tau}{\int_t^\infty |h(\tau)|^{p_2} d\tau} \quad (3.36)$$

ここで、 $|h(t)|^{(p_2-p_1)}$ に着目する. ここで、 $h(t)$ は振幅相当であるため、 $p_2 - p_1 = 2$ となる時、エネルギー相当の値になると考えられる. そこで、 $p_2 - p_1 = 2$ となるような指数 p_1 と p_2 を与える.

■一般化減衰関数を用いた理論的算出

1 つの指数減衰の場合

インパルス応答 $h(t)$ を次式のように定義する.

$$h(t) = A_0 e^{-\alpha t} \quad (3.37)$$

A_0 は振幅、 α は減衰率である.

このとき、Eq.(3.16) より、

$$\varphi(t, p) = \frac{2}{p} 10 \log_{10} \frac{A_0 e^{-p\alpha t}}{\frac{A_0}{p\alpha} e^{p-\alpha t}} \quad (3.38)$$

$$= 2 \cdot \frac{10}{\ln 10} \alpha \quad (3.39)$$

となり、1 つの指数減衰の場合には、指数 p には依存しない. 従って、減衰率比 $d(t)$ は

$$d(t, p) = \frac{D(t, p_2)}{D(t, p_1)} = 1 \quad (3.40)$$

2つの指数減衰で表されている場合

インパルス応答 $h(t)$ を次式のように定義する.

$$h(t) = A_0 e^{-\alpha_1 t} + B_0 e^{-\alpha_2 t} \quad (3.41)$$

A_0, B_0 は振幅, $\alpha_{1,2}$ は減衰率である.

このとき,

$$|h(t)|^p = (A_0 e^{-\alpha_1 t} + B_0 e^{-\alpha_2 t})^p \quad (3.42)$$

$$= \sum_{k=0}^p {}^p C_k (A_0 e^{-\alpha_1 t})^{p-k} (B_0 e^{-\alpha_2 t})^k \quad (3.43)$$

$$\int_t^\infty |h(t)|^p dt = \int_t^\infty \sum_{k=0}^p {}^p C_k (A_0 e^{-\alpha_1 t})^{p-k} (B_0 e^{-\alpha_2 t})^k dt \quad (3.44)$$

$$= \sum_{k=0}^p {}^p C_k \frac{(A_0 e^{-\alpha_1 t})^{p-k} (B_0 e^{-\alpha_2 t})^k}{\alpha_1 p + (\alpha_2 - \alpha_1)k} \quad (3.45)$$

となり, 瞬時減衰率 $D(t, p)$ を陽には解くことができない. そのため, $|h(t)|^{(p_2-p_1)}$ がエネルギーの次元 ($p_2 - p_1 = 2$) となるような指数 p_1 と p_2 を変化させた時の瞬時減衰率、減衰率比を算出した. なお、仮定したインパルス応答モデルは, Eq.(3.41) とする.

■結果と考察

減衰性状

Fig.3.17 に一般化減衰関数を示す．指数が大きくなるほど，減衰曲線の折れ曲がり急峻になることが示され，指数を上げていくと減衰曲線がお互い接近し合い，ほとんど差異がなくなる．

Fig.3.18 にそれぞれの瞬時減衰率を示す．湾曲付近を境に瞬時減衰率が徐々に変化し，その様子は，冪指数が小さいほど緩やかであることが示されている．

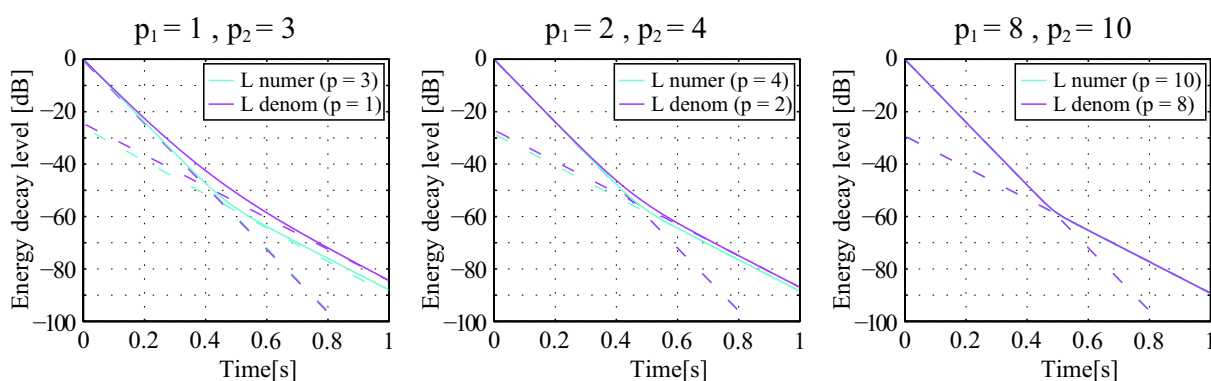


Fig. 3.17 Representation of a double decay room impulse response by the generalized decay function with changing exponential number. Decay rate $\alpha_1 = 13.81$ and $\alpha_2 = 6.9$ and amplitude constants $A_0 = 1$ and $B_0 = 0.0316$ were used to synthesize the room impulse response.

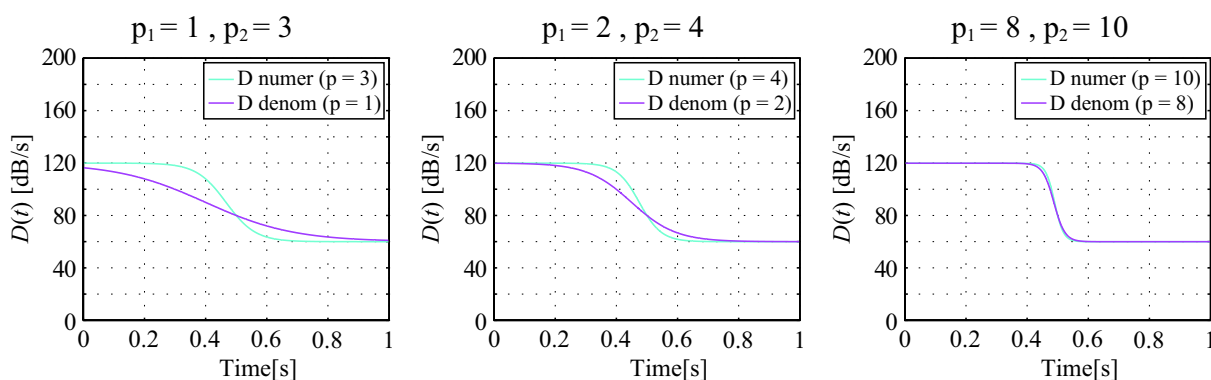


Fig. 3.18 Instantaneous decay ratio with changing exponential number.

Fig.3.19 に冪指数の差が2になるように p_1 と p_2 を任意に変化させた時の減衰率比を示す。冪指数が小さいほど、減衰率比の値が大きく、また時間的变化も長い。指数が大きくなるとほとんど違いがなくなり、減衰率比のピークの値は指数同士の商 (Eq.(3.36) より $\frac{p_1}{p_2}$) の値に収束すると考えられる。また、参考として Fig.3.20 に p_1 を2に固定した時の減衰率比を示す。指数の差が大きいくほど、減衰率比の変化が大きくなる。指数の取り方で減衰率比の値が大きく異なることが確認されたが、適切な指数の与え方に関しては検討の余地がある。

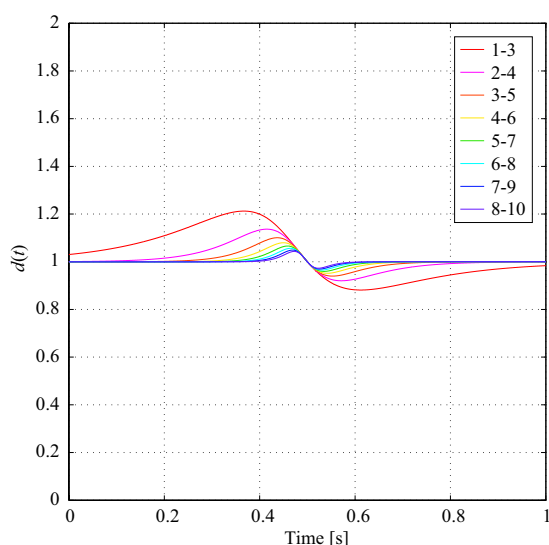


Fig. 3.19 Decay rate with changing exponential number (However exponential number($p_2 - p_1 = 2$) is constant)

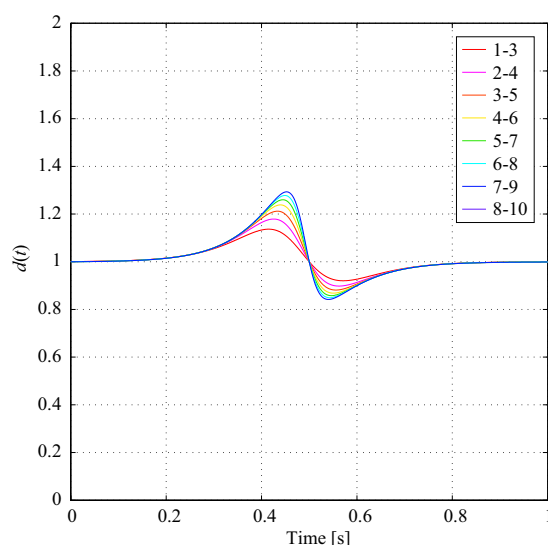


Fig. 3.20 Decay rate with changing exponential number (However exponential number($p_1 = 2$) is constant).

■ケーススタディ

以上を踏まえ、一般化減衰関数を用いた減衰率比算出を、鏡像法解析で得られたインパルス応答を用いて検討する。室条件は基本条件の Table.2.1 の Case 1a と Case 2b であり、音源・受音点は室中央に設置する。

■結果と考察

減衰性状

Fig.3.21 に立方体・均等吸音 Case 1a の一般化減衰曲線を示す。指数が小さくなると減衰曲線の傾きが小さくなる。また、指数を上げると減衰曲線の変動が強調されたような性状になっている。

Fig.3.22 に直方体・不均等吸音 Case 2b の一般化減衰曲線を示す。指数が1のときには湾曲がほとんど見られない。また、指数を高くすると初期部でのエネルギーの落ち込みが大きくなる。これは指数の増大により初期時刻の比較的能量の大きい反射音が相対的に増幅されたと考えられる。

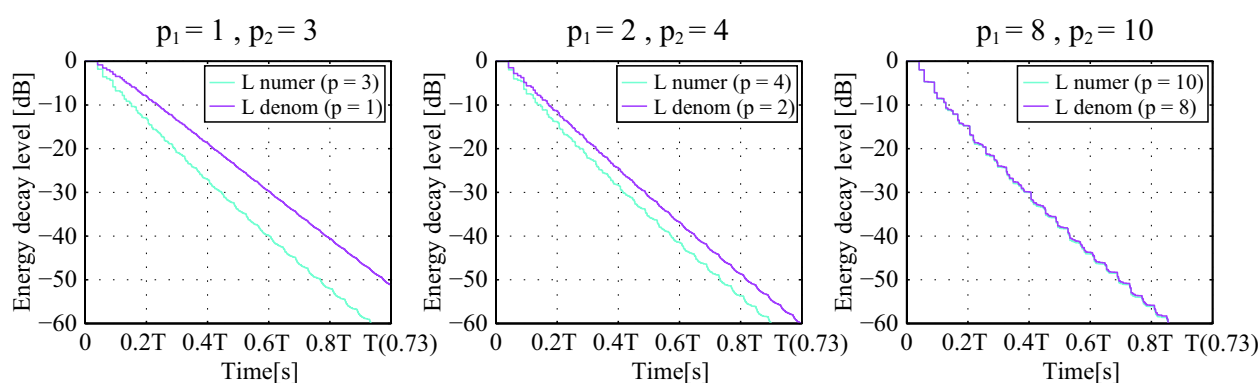


Fig. 3.21 Generalized decay curve of Case 1a with changing exponential number.

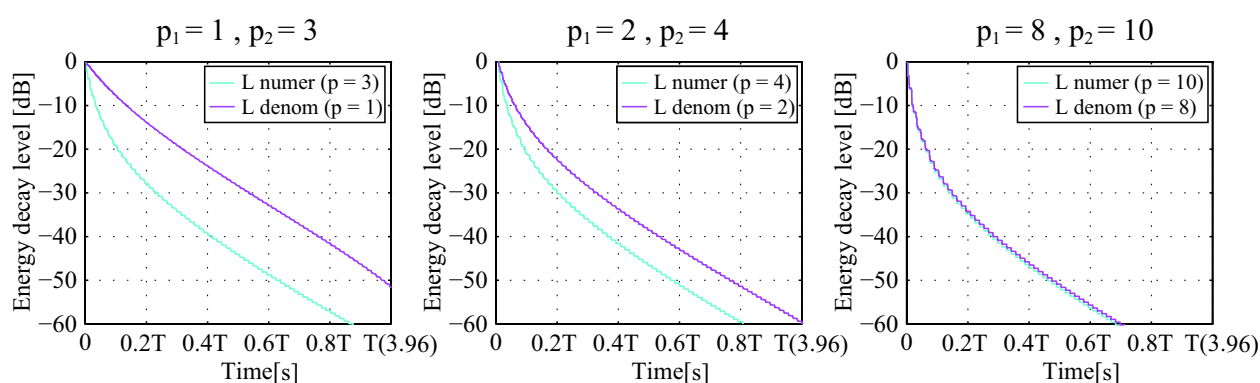


Fig. 3.22 Generalized decay curve of Case 2b with changing exponential number.

瞬時減衰率

Fig.3.23 に立方体・均等吸音の瞬時減衰率を示す。指数が小さいほど、瞬時減衰率の差が大きくなることは前述と対応している。また、冪指数を上げることで、瞬時減衰率の反射音の特異性が強調されている一方で、冪指数が小さい時にみられる細かな反射音が失われている。

Fig.3.24 に立方体・均等吸音の瞬時減衰率を示す。Case 1a と比べ減衰曲線の傾きが小さいため、それに伴い瞬時減衰率の値も小さくなっている。後期時間になると、指数によって絶対値は変わるものの、ある一定の大ききで振動するような傾向が見られる。また、反射性壁間での交互反射の影響が示されており、その程度は指数が高いほど顕著である。

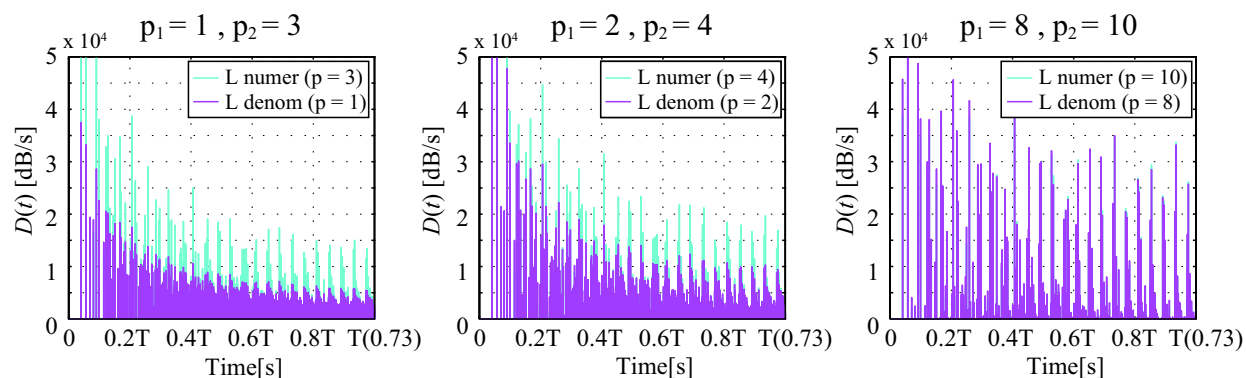


Fig. 3.23 Instantaneous decay rate of Case 1a with changing exponential number.

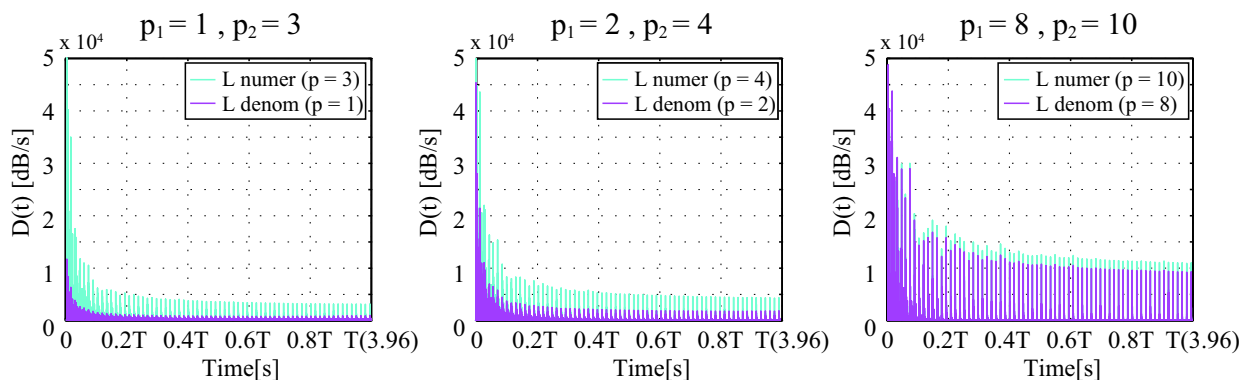


Fig. 3.24 Instantaneous decay rate of Case 2b with changing exponential number.

減衰率比

Fig.3.25 に立方体・均等吸音の減衰率比を示す。指数が大きくなるほど、瞬時減衰率の値が接近してくることから減衰率比が1に収束していく傾向が伺える。また、後期時間に行くに連れ、減衰率比が上昇しており、前節で検討した減衰率比の傾向とは反対の性質を示した。

Fig.3.26 に直方体・不均等吸音の減衰率比を示す。全体の傾向として Case1a より値が大きくなり、相対的に強い反射音が到来していると考えられるが、指数が低い場合の後期時間で減衰率比が減少しており、交互反射の影響が大きくなる現象とは逆の傾向を示している。

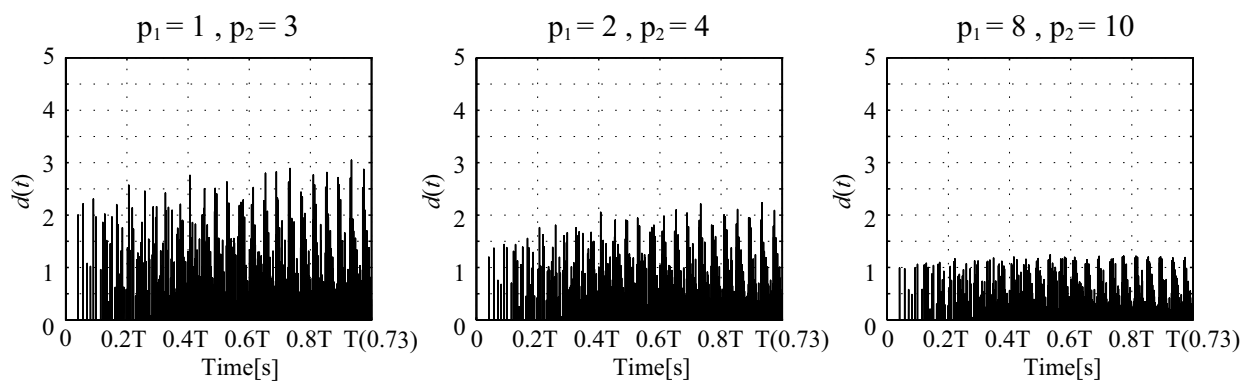


Fig. 3.25 Decay ratio of Case 1a with changing exponential number.

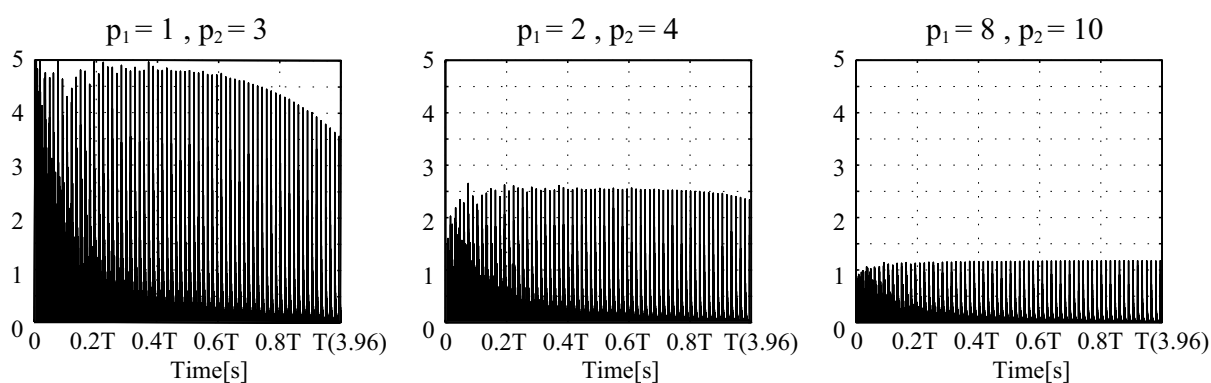


Fig. 3.26 Decay ratio of Case 2b with changing exponential number.

3.5 おわりに

本章では、インパルス応答の反射音構造の抽出に関して、減衰率比に着目し、理論的算出を行った後、ケーススタディを通じてその物理的性質の把握を行った。反射音の疎密を考慮した場合において、減衰率比は、

- 減衰率比は平均反射音間隔とサンプリング周波数に依存し、それぞれ比例した値となる
- 周波数分析をする際、減衰率比 $d(t)$ はサンプリング周波数に依存せず、平均反射音間隔に相対ピーク値 R を乗した値となる
- 中心周波数が高いほど、オクターブバンド幅が広帯域ほど、減衰率の値が高くなる
- フィルタがオーバーラップする場合においても、減衰率比に及ぼす影響は小さい

ことがされた。また、拡散音場を仮定したとき理想的な指数減衰の場合における減衰率比が1であるという観点から、減衰率比を用いて空間の拡散性を評価すると、一般的に言われている室容積が大きくなると固有周波数密度が増し空間の拡散性が高まるということと矛盾し、また、高い周波数ほど拡散性が高まるという従来の知見からも背反する。これらを包括的に捉え、音場の拡散性に関する評価方法が今後の課題としてあげられる。また、基準化手法に関しては、線形回帰による基準化手法としては、 $\bar{D}_{10}(t)$ を用いたほうが従来法より、湾曲性を考慮できていると推測されるが、基準減衰率が不連続な値をとっているため、評価区間内に湾曲部がある場合には従来法と同様に評価を誤る可能性がある。対して非線形回帰による基準化手法を用いることで、基準減衰率が連続的に変化するため評価区間に依存せずに、また平均的な減衰性状に対する到来反射音の特異性の程度をより正確に表す値を算出することができた、さらに仮定する減衰関数によっては暗騒音の影響なども考慮でき、実測を踏まえた基準化手法であると考えられ、非線形回帰曲線による基準化の方が有意性があると考えられる。一方で、本検討では仮定する減衰曲線を便宜的に3つにしたが、仮定する減衰曲線モデルなどの問題が残され今後の課題である。さらに、一般化減衰関数を用いた減衰比の算出を行った。瞬時減衰率においては、インパルス応答積分法の冪指数を上げることで、反射音の特異性を増幅している様子が伺える、一方、減衰率比においては、インパルス二乗応答を二乗積分値で除する時とは逆の傾向を示し、物理的性質が異なる可能性が示唆され、一般化減衰関数を用いた減衰比に関する詳細な検討が必要であると考えられる。

第4章

室条件が反射音構造に及ぼす影響

4.1 はじめに

これまでの検討は、完全拡散音場を仮定した上での検討であった。しかし、前述したように我々が日々使用する建築空間で完全な拡散音場はほとんど存在しない。それは、機能性などの点から日常の建築空間では矩形室になることが多く、平行壁面を持つため、拡散性が悪くなりやすい。形状による問題に加えて、吸音分布や室形状があげられる。吸音分布に関して一般居室や会議室を例に挙げると、壁はボード仕上りなどの反射性であるのに対し、天井に岩綿吸音板、床はカーペットと吸音性になることがある。このような状況においては、反射性の壁間でフラッターエコーのような多重反射が生じることがある。一方、公共施設等の建築物に着目すると、意匠側の要求として外観にシンボリック的印象を求める場合などに凹面を持つような形状にすることがあるが、音響的視点に立った場合には、エコーや音の焦点・死点などといった音響障害が生じやすいため、一般的に良くないとされる。これらの問題に対処する方法として、大規模な改修によって室形状を変更することも考えられるが、負担が大きくあまり現実的ではない。そのため、吸音処理や壁面形状などの軽微な変更が望まれる。

そこで本章では、建築空間において使用されやすい形状である矩形室に対して様々な室条件を変化させ、反射音構造に及ぼす影響を検討する。

一例として、フラッターエコーのような周期的に強い反射音が到来しているような状況を想定した場合の減衰率比の振る舞いを調べる。

Fig.4.1 は1つの指数減衰するようなエネルギー減衰を作成し、周期的に 3dB 大きいパルスが付加させた応答である。非現実的な応答ではあるが、エネルギーの大きい反射音が周期的に到来していることが観察できる。しかし、後期ではエネルギーが減少しているため、相対的な大きさに関しては把握することが難しい。Fig.4.2 に示す減衰率比は、エネルギーの大きい反射音に対応して値が大きくなっており、同程度の突発性のパルスが周期的に到来している様子が伺える。後期に減衰率比が上昇していくのは、打ち切りによる影響である。

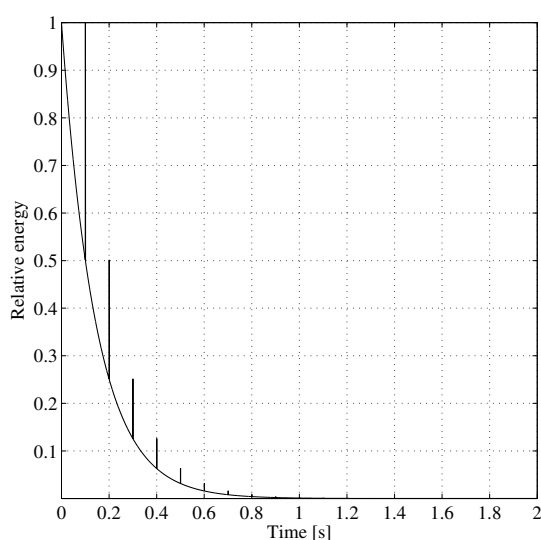


Fig. 4.1 Energy time curve.

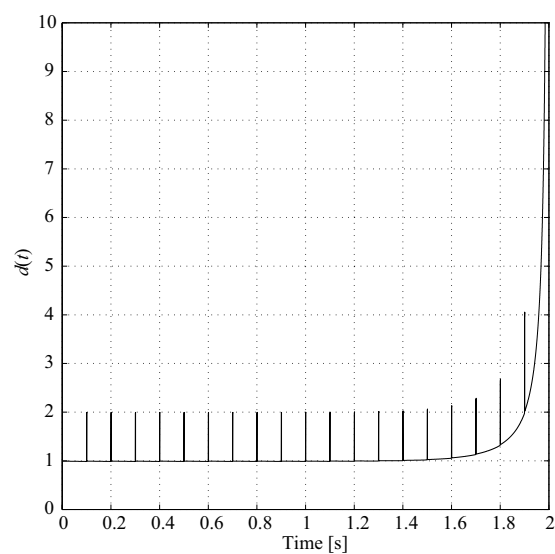


Fig. 4.2 Decay ratio $d(t)$ with additional interval artificial pulse.

4.2 室アスペクト比の影響

4.2.1 幾何音響解析による検討

Table.2.1 に示す 4 条件を用いて音線法解析を行った。音線法の計算条件として、音源・受音球を室中央に設置した。また、音線数は 10^6 本、時間離散化幅 1ms、打切りの影響を考慮し残響時間に対して十分な応答長を確保するために、7.5s とした。尚、直接音 ($t = 0$) は除くこととしている。

また、減衰率比算出のための平均的な減衰率として評価区間内（60 dB 減衰時刻 T ）までの回帰曲線で得られた瞬時減衰率を用いる。なお、本検討では室アスペクト比の影響と吸音分布の影響を併せて考察する。

■残響減衰性状

Fig.4.3 にエネルギー応答曲線と残響減衰曲線を示す。立方体・均等吸音の Case 1a では、両曲線とも概ね直線減衰を示しているが、他条件では湾曲し、室アスペクト比・吸音分布ともに不均等の Case 2b で顕著である。 α/L が等しい Case 1b と Case 2a の残響減衰曲線は概ね類似しているが、エネルギー応答曲線については、Case 1b に比べ Case 2a では突出した反射音が周期的に表れている。伝搬距離の大きい壁間での交互反射の影響であると考えられる。

Fig.4.4 に得られた減衰曲線と近似曲線を示す。どの条件においても概ね近似していることがわかる。直線的に減衰する Case 1a であっても2種の直線により僅かな減衰を捉えている。また、湾曲の顕著な Case 2b においては3種の直線で近似されており、時々刻々と減衰率が変化していく様子が伺える。

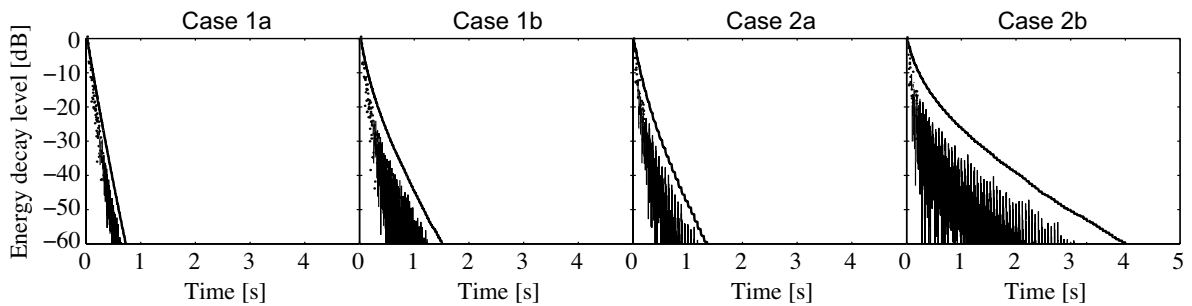


Fig. 4.3 Energy-time curves obtained by ray tracing simulation, backward integrated decay curves.

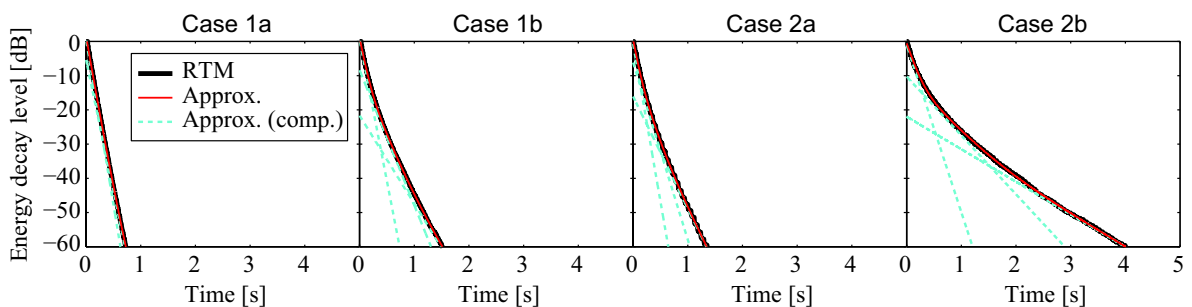


Fig. 4.4 Energy decay curves and their approximation curves.

■減衰率比

Fig.4.5 に瞬時減衰率・減衰率比を示す。また、非線形回帰曲線の瞬時減衰率 $\bar{D}(t)$ を併記した。初期は室条件に依らず、反射音密度が疎かつ減衰が迅速なため、減衰率比は大きくなり、後期では条件に依らず概ね一定の値を変動している。立方体均等吸音の Case 1a においては、多少のばらつきがあるものの全体として値が小さくなっているが、減衰曲線が湾曲した他条件においては、後期の時間に行くほど減衰率比が大きくなっている様子が伺え、周期的に強い反射音が到来してると考えられる。その傾向は Case 2b で最も顕著に現れ、減衰曲線の湾曲の程度と対応する。また、湾曲の程度が同程度の Case 1b と Case 2a では減衰率比の値にそれほど大きな違いが見られないが、Case 2b の方が全体の傾向に対して突出した値になっている。これらは、吸音率が低い平行壁間や伝搬距離の大きい壁間での交互反射の影響が強まることが表されていると考えられる。

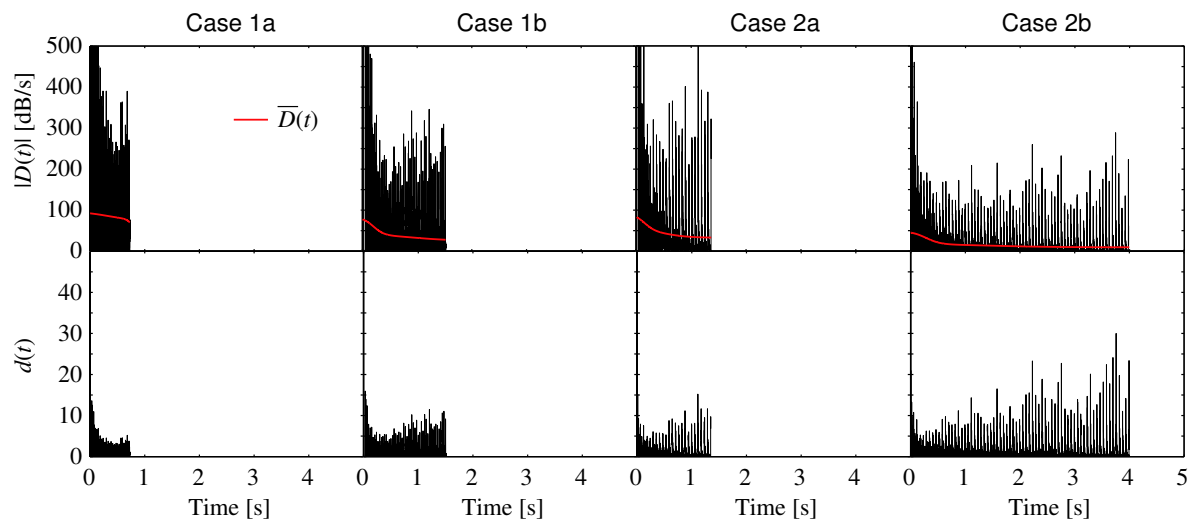


Fig. 4.5 Instantaneous decay rates $|D(t)|$ (Upper) and Decay ratio $d(t)$ using $\bar{D}(t)$ (Lower).

4.3 吸音分布の影響

4.3.1 幾何音響解析による検討

上節にて同時に考察した。

4.3.2 実測による検討

容積 100m³ 程度の小会議室 (Fig.4.6) を対象として、実測したインパルス応答の反射音構造を分析する。

室内の基本条件は、壁は石膏ボード張り (一部、金属製パネル)、床はビニルシート、天井は岩綿吸音板の仕上げであり、室中央に机および椅子 4 脚を配置した (Fig.4.8)。

測定条件として、基本条件の室 (Case O) に対して、吸音性のパネル (2,000 × 900 × 36 mm) を全側壁に配置した Case A に対し、対向 2 壁面に配置した Case B を設定する。また、Case A、Case B とともにパネルの枚数を 4 枚、8 枚、12 枚、最大で 16 枚と変化させ吸音量も変化させた (Fig.4.10)。なお、使用した吸音性のパネルの吸音特性は Fig.4.9 であり、1kHz の中音域で最も吸音率が高くなるようなパネルである。12 面体スピーカを長手壁面の中央 (h = 1.3 m) に、受音点を特定の座席位置 (h = 1.2 m) に設置して、インパルス応答測定を行った (Fig.4.7)。測定システムに関しては、2.4 章を参照されたい。また、周波数別の影響も調べるために、得られた室内インパルス応答に中心周波数 250,1k,4k Hz の 1 オクターブバンドフィルタリング処理を施した。

反射音構造の評価区間は -5 から -35 dB とし、減衰率比算出のための平均的な減衰率として非線形回帰曲線の瞬時減衰率とする。ただし、実測においては、暗騒音の影響も懸念されるため、近似関数を 2 種の指数減衰及び暗騒音と逆自乗積分の打切りを想定した成分で構成する (Eq.(4.1))。さらに、回帰区間は暗騒音と逆二乗の打切りの影響を捉えるため、便宜的に -5 から -80dB とした。なお、瞬時減衰率を算出する際には暗騒音による影響を除いて算出した。

$$\tilde{L}(\mathbf{x}, t) = 10 \log_{10} \{ \mathbf{x}_1 e^{-\mathbf{x}_2 t} + \mathbf{x}_3 e^{-\mathbf{x}_4 t} + \mathbf{x}_5 (T - t) \} \quad (4.1)$$

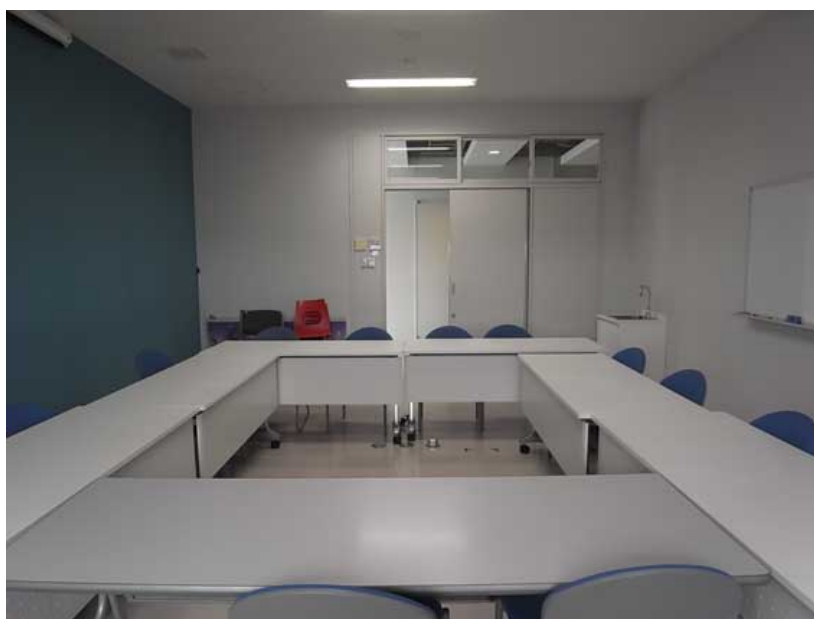


Fig. 4.6 Meeting room.



Fig. 4.7 Measuring meeting room.

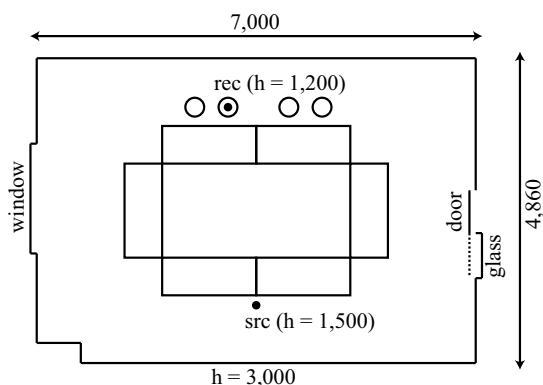


Fig. 4.8 A plan of the meeting room.

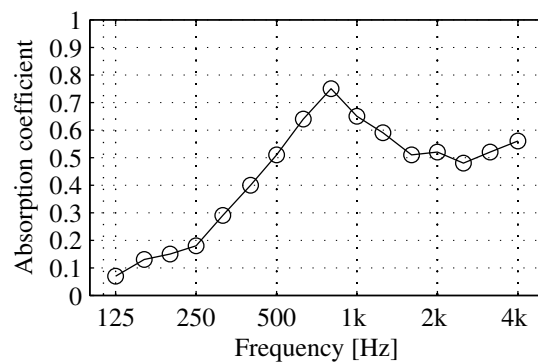


Fig. 4.9 Random incidence absorption coefficient of the absorptive panel.

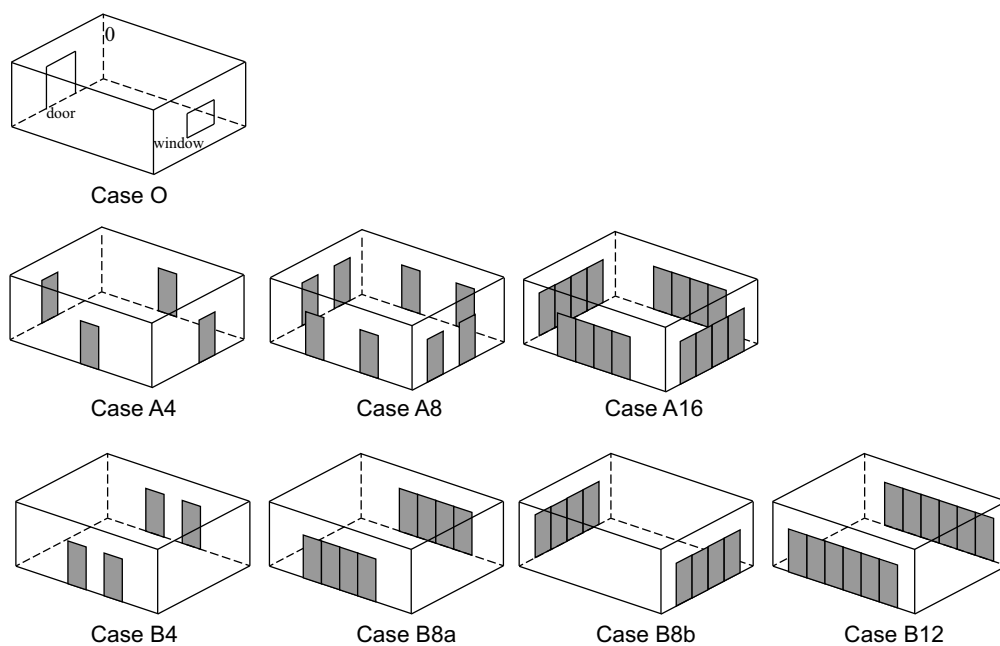


Fig. 4.10 A absorption plan of the meeting room.

■残響減衰性状

Fig.4.11 に全側壁に吸音材を設置した時の残響時間を Fig.4.12 に対向 2 壁面のみ吸音した時の残響時間を示す。尚、残響時間算出においては、減衰曲線の -5 dB から -35 dB までの線形二乗回帰直線の傾きから算出した (T_{30})。参考として両者ともに吸音材を設置していない条件 (Case O) も併記した。

125 Hz 付近では、吸音材自体の吸音率が小さいため、条件に依らず大きな変化は見られない。全側壁を均等吸音とした場合においては、枚数を増やすことで残響時間に一定の減少が見られる一方で、対向 2 壁設置の場合において、短辺側に吸音材を偏在させた場合 (Case 8b) で 2k Hz から 4k Hz で残響時間が長くなっている。これは、反射性壁間での交互反射成分が残留することに起因すると考えられる。

Fig.4.16 から Fig.4.18 に各周波数毎の減衰曲線と近似曲線を示す。全体の傾向として、吸音材の吸音特性により、1kHz、4kHz では条件間の違いが顕著に現れている。ほとんどの条件において周波数に依らず、吸音材の枚数を増やすことで、減衰曲線の傾きが急峻になるが、8 枚以上になると減衰性状に変化があまり見られない。また、近似曲線においては、条件間や周波数間によって多少違いはあるものの概ね近似できており、暗騒音や積分の打ち切りによる影響も近似されていることがわかる。

周波数間で比較すると、250Hz 帯域では条件間による差異は殆ど見られない。これは、吸音材の吸音特性によるものと考えられる。また、近似曲線においても実際の減衰曲線に対し 1 つの指数減衰で表現されており、直線回帰したものとほぼ差異がないと考えられる。1kHz 帯域では、枚数に依らず、吸音材を設置したことで湾曲が見られるが、これは、暗騒音の影響による折れ曲がりと考えられる。吸音材の設置方向に関する違いはあまり見られない。4kHz 帯域でも同様に吸音材を設置したことで、減衰曲線に湾曲が見られる。特に、Case B8b では -10 dB 付近で急峻な折れ曲がりが見られ、傾きも Case O よりも緩やかになっている。また、吸音材の設置方向によっても湾曲し始める時間が異なり、全側壁吸音の Case A では -40 dB 付近から湾曲し始めるのに対し、対向 2 壁設置の Case B では -20 dB 付近から湾曲が始まっている。これは、反射性壁間での交互反射の影響が強まっていると考えられる。特に、Case B8b は短辺方向の交互反射のため、Case B8a よりも減衰曲線の勾配が小さくなると考えられる。

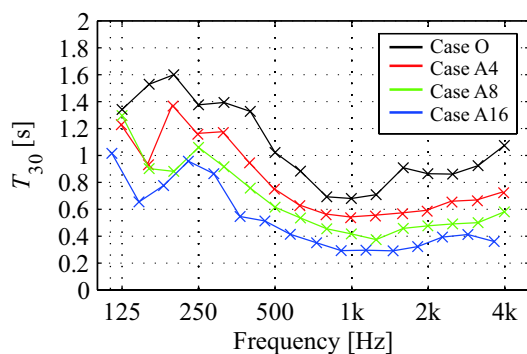


Fig. 4.11 Reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB) of Case A with changing a number of the absorptive panel.

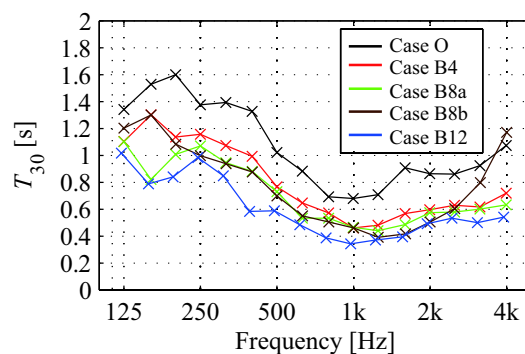


Fig. 4.12 Reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB) of Case B with changing a number of the absorptive panel.

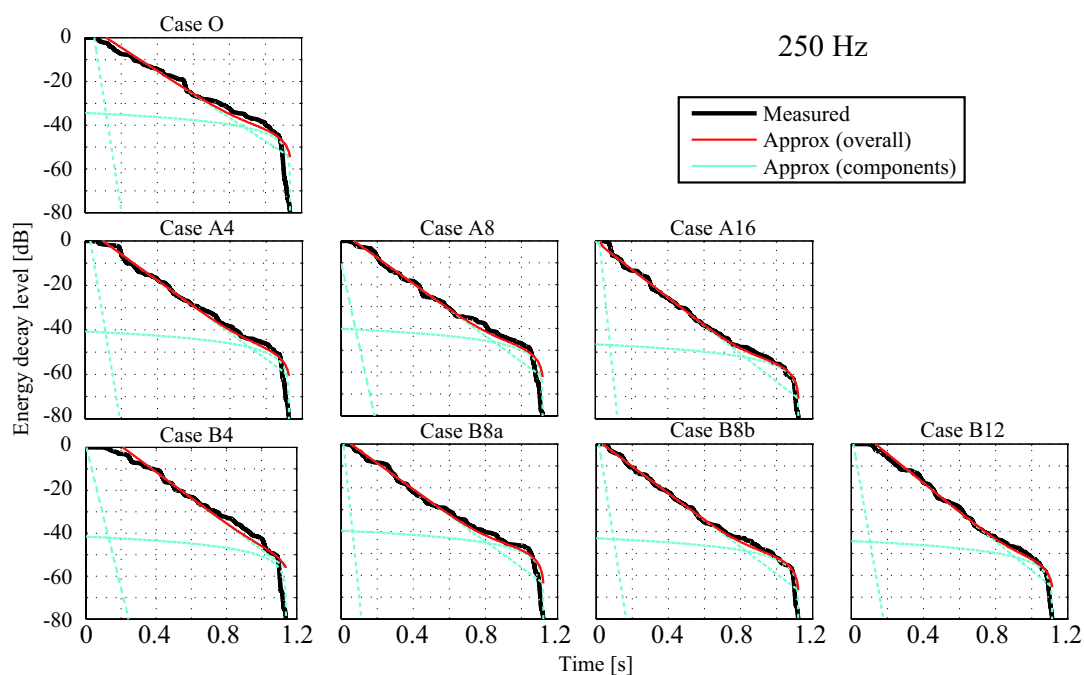


Fig. 4.13 Energy-time curves in 1/3 octave band of 250Hz obtained by measuring room changing absorption plan, and their approximation curves.

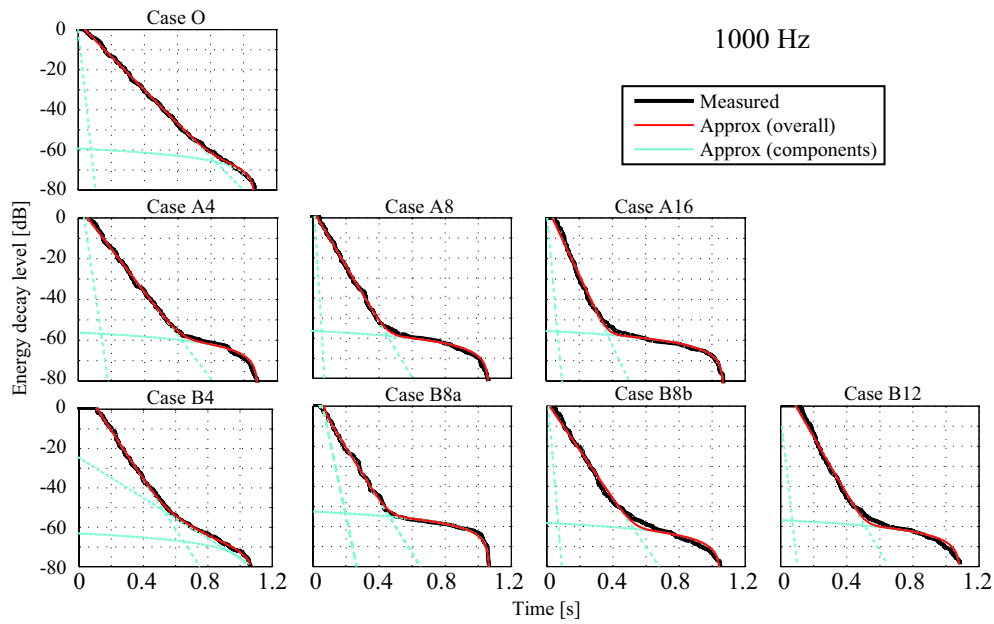


Fig. 4.14 Energy-time curves in 1/3 octave band of 1kHz obtained by measuring room changing absorption plan , and their approximation curves.

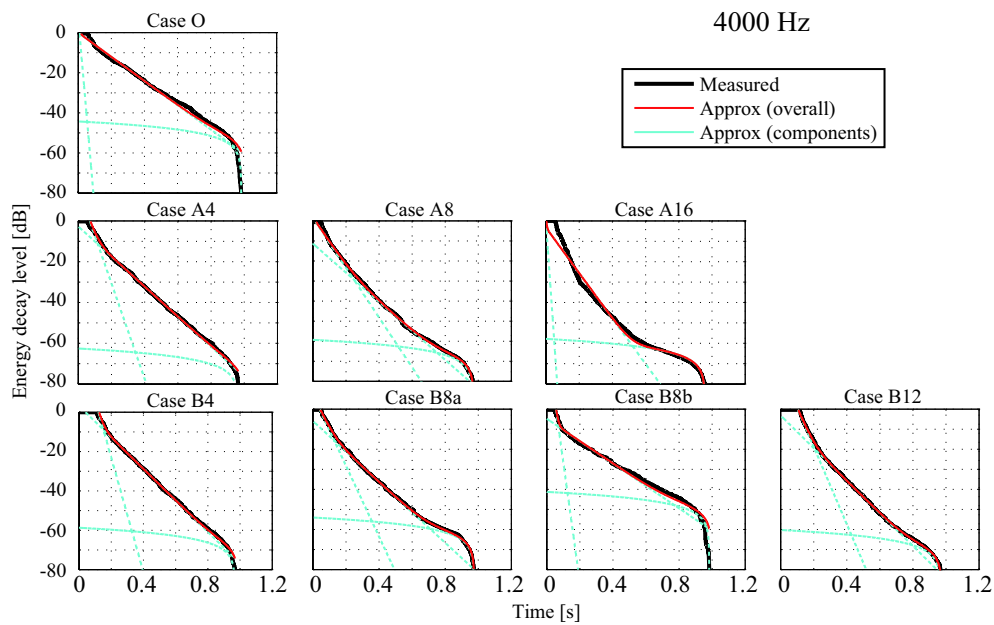


Fig. 4.15 Energy-time curves in 1/3 octave band of 4kHz obtained by measuring room changing absorption plan, and their approximation curves.

■減衰率比

Fig.4.16 から Fig.4.18 に減衰率比 $d(t)$ を示す。全体の傾向として、低い周波数ほど減衰率比が小さくなり、相対ピーク値が小さくなることから理論と対応する。また、高い周波数ほど減衰率比のばらつき大きい。これは、高音域では干渉の影響を受けやすく、帯域内に含まれる周波数成分が低い周波数に比べ多いことが起因すると考えられる。

周波数毎に比較をすると、250Hz 帯域では吸音材を設置していない条件でみられた突発的な反射音がみられるが、吸音材を設置した他の条件ではみられない。しかし、全側壁吸音においては吸音材を設置したことで、埋もれていた他の反射音が相対的に目立ってしまっている。また、吸音材の枚数による大きな違いは見られない。1kHz 帯域では、吸音材の枚数を増やしたことにより、減衰率比が若干小さくなる傾向が見受けられるが、基本条件に対する変化は小さい。また、対面2壁設の長辺側に吸音材を設置した Case B8a では、0.2s あたりに全条件の中で最も大きい減衰率比を示した。これは、吸音材設置による反射音が抑制されたことと設置方向による影響が重なることに起因すると考えられる。4kHz 帯域ではどの条件においても、突発的な反射音が到来している様子が伺えるが、交互反射成分が残留する Case B8b では周期的に強い反射音が到来している様子が顕著に現れている。

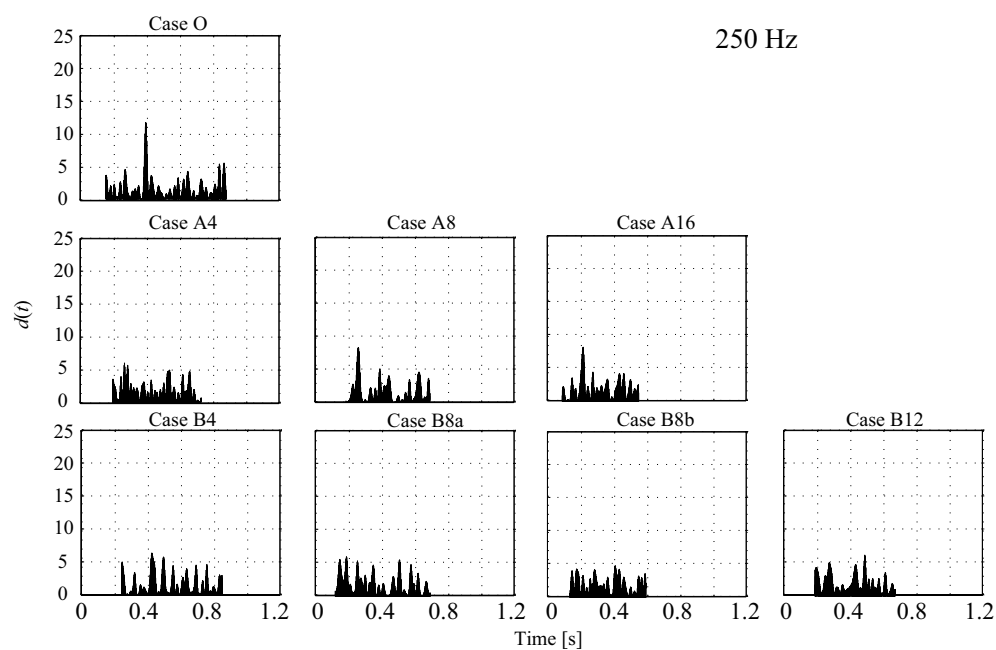


Fig. 4.16 Decay ratio $d(t)$ in 1/3 octave band of 250Hz obtained by measuring room changing absorption plan.

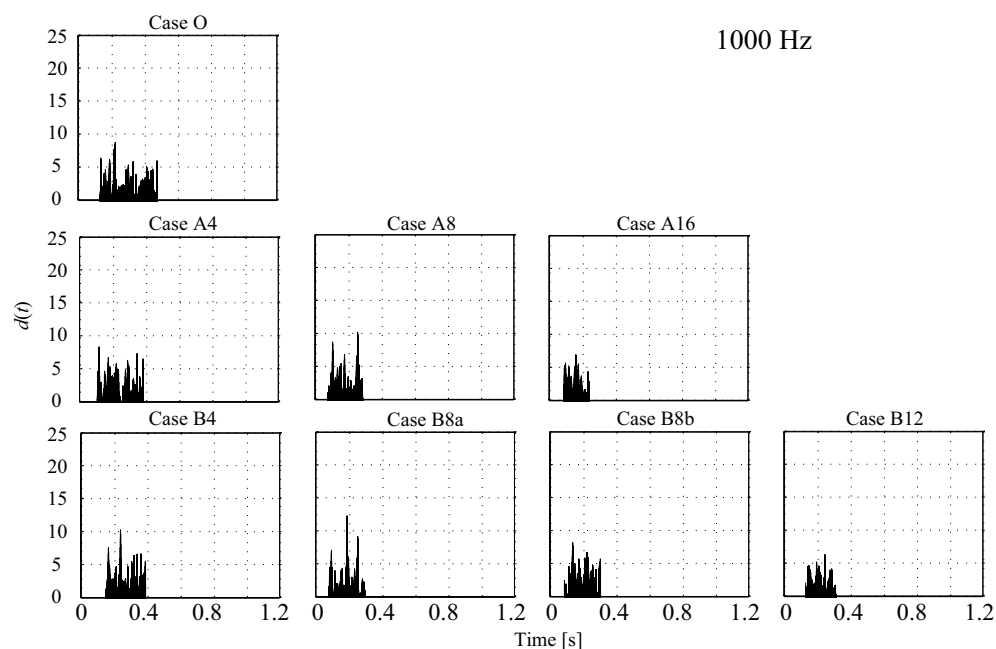


Fig. 4.17 Decay ratio $d(t)$ in 1/3 octave band of 1kHz obtained by measuring room changing absorption plan.

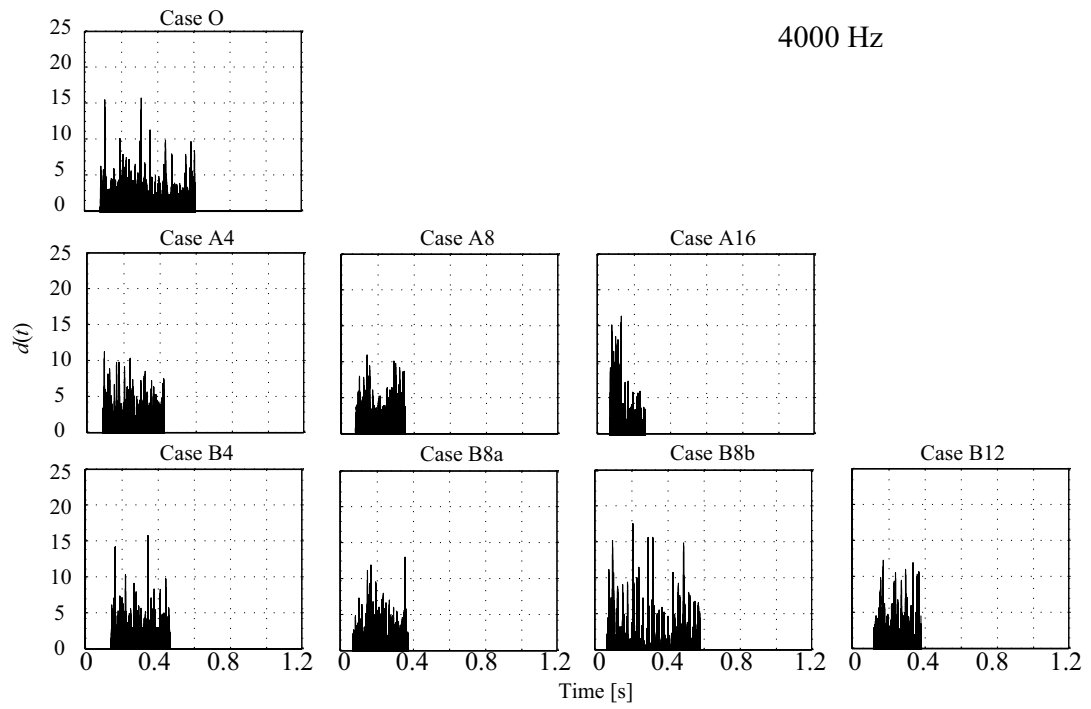


Fig. 4.18 Decay ratio $d(t)$ in 1/3 octave band of 4kHz obtained by measuring room changing absorption plan.

4.4 壁面拡散の影響

4.4.1 幾何音響解析による検討

室条件は、Table.2.1 の4条件であり、それぞれ乱反射率 $s = 0.1, 0.2, 0.4$ を全面均一に与えた。なお、音源受音点や時間離散化幅は前述と同じである。また、減衰曲線の収束が悪いため音線数は 10^7 本としている。

■残響減衰性状

各室条件において、乱反射率を変化させた時の残響減衰曲線を Fig.4.19 に示す。減衰曲線がほぼ直線減衰していた立方体均等吸音の Case 1a は乱反射率を変化させても大きな違いは見られず、減衰曲線が湾曲した他の条件では乱反射率を増加させることで湾曲が軽減され、直線的になっている。特に、その傾向は湾曲が最も顕著な直方体不均等吸音の Case 2b で著しい。また、乱反射率 $s=0.4$ の時は条件に依らず、概ね同様の減衰性状を示した。

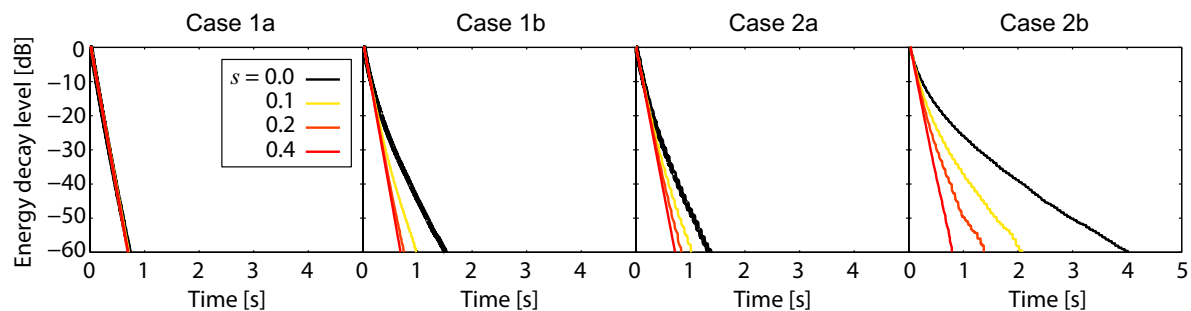


Fig. 4.19 Energy decay curves with changing scattering coefficient.

乱反射率の影響が最も顕著だった直方体室不均等吸音の Case 2b を対象として, Fig.4.21 にエネルギー応答曲線と残響減衰曲線を示す. また, Fig.4.21 に乱反射率を変化させた時の減衰曲線を示す. エネルギー応答曲線では乱反射率を上げると突出した反射音が少なくなっている. 特に初期時間において突出した反射音が抑制されている.

非線形回帰曲線による近似曲線も減衰性状によらず, 概ね対応しており, 乱反射率を上げると, 近似した指数減衰の数が少なくなっている. 特に, 乱反射率 $s=0.4$ の時には1つの指数減衰で表現できており, 壁面拡散を上げることで音場が拡散している事を表していると考えられる.

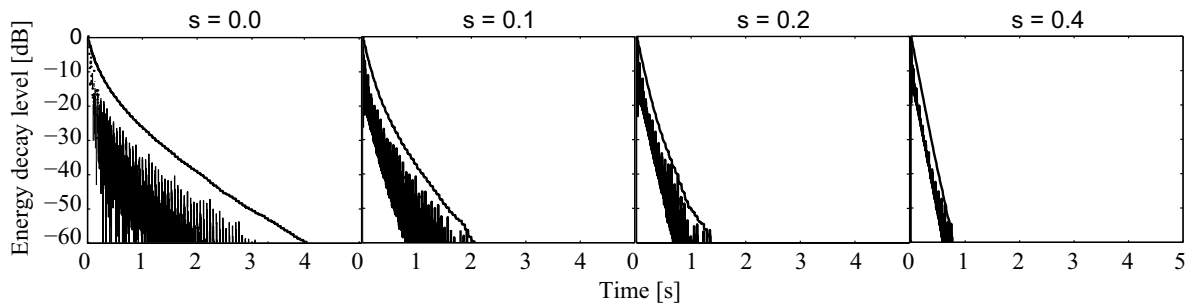


Fig. 4.20 Energy-time curves obtained by ray tracing simulation , backward integrated decay curves.

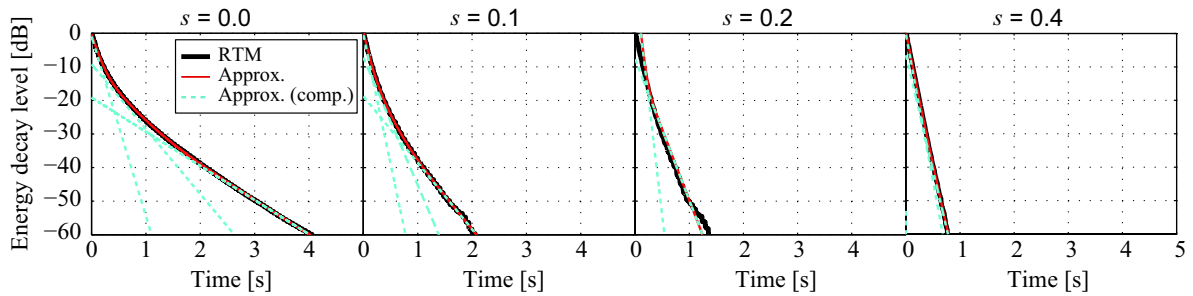


Fig. 4.21 Energy-time curves obtained by ray tracing simulation , backward integrated decay curves.

■減衰率比

Fig.4.22 に減衰率比を示す。乱反射率の増大とともに初期の減衰率比が小さくなり、乱反射率 $s = 0.4$ では、周期的に突出した値が観測されているが、全体の傾向として概ね 1 に収束する。これは、乱反射率を上げることで到来反射音の時間分布の偏りが緩和されたためだと考えられ、壁面拡散が空間に及ぼす影響を示す一つの知見となった。なお、後期で減衰率比が上昇するのは、音線数の不足に伴う減衰曲線の収束性の悪化に起因すると考えられる。

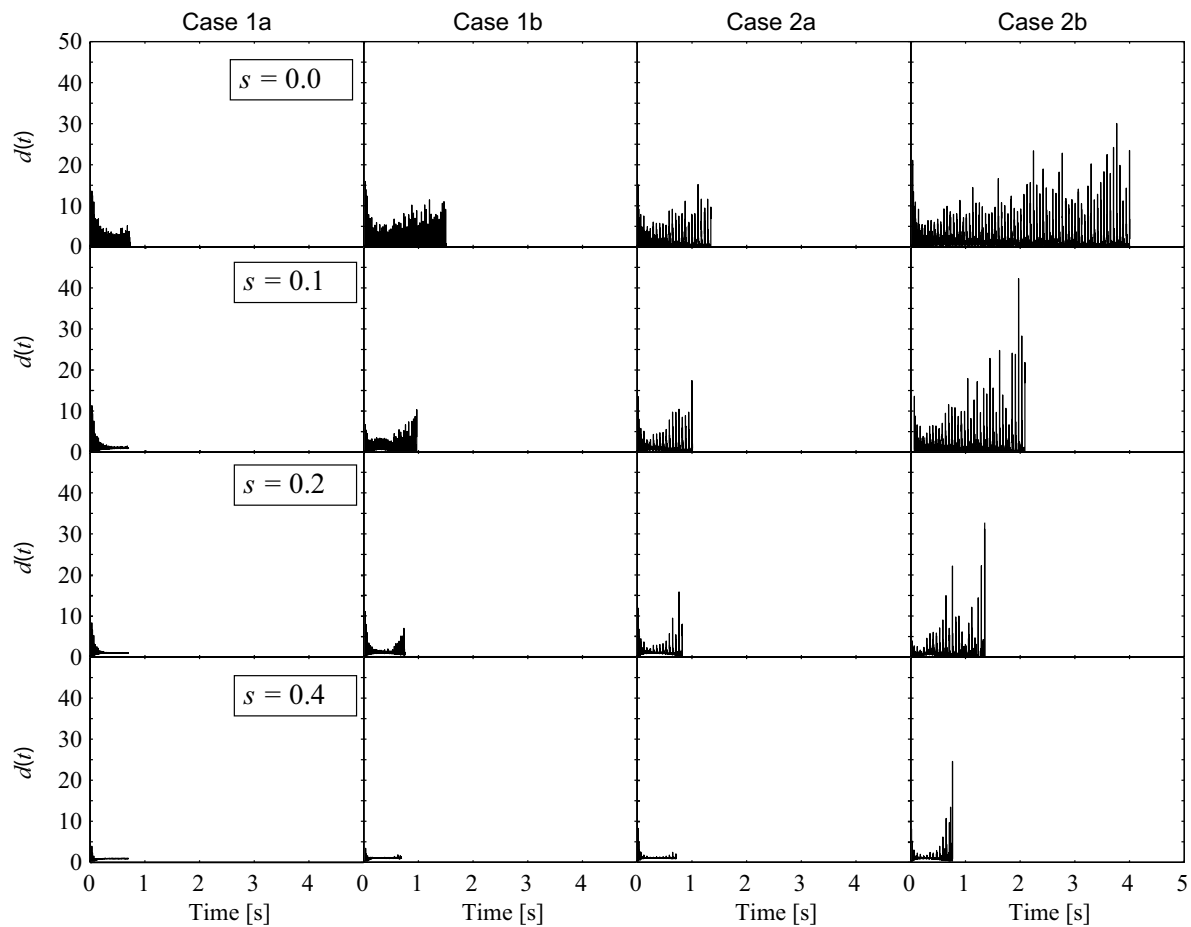


Fig. 4.22 Decay ratio $d(t)$ with changing scattering coefficients s , calculated by the ray-tracing method.

4.4.2 波動音響解析による検討

前節で実測による周波数分析を行ったが、室容積が小さいことや暗騒音の影響、スピーカ自体の周波数特性等の不確定要素が懸念されるため、理想的な条件を模擬するためにFDTD法解析を用いて減衰率比の周波数特性に関して検討する。

室条件として、容積が約 100m^3 である小会議室を想定した直方体室と点音源からなる解析モデルを想定した (Fig.4.23)。境界条件としては、全面反射性 (reflec: 垂直入射吸音率 $\alpha = 0.1$ 相当の実音響インピーダンス)、天井のみ吸音 (absorp: $\alpha = 0.5$ 相当) の2つを設けた。

基本条件の室 (noDiff) に対して、全壁面に一次元周期構造の矩形拡散体 (0.1 m 角 / 0.2 m 周期) を水平方向に設置 (4Diff) した。また、使用した拡散体の乱反射率は [33] を参考にした (Fig.4.24)。

FDTD法解析については、空間離散化幅 0.025 m、時間離散化幅 0.04 ms とし、音源には 1 kHz の 1/3 オクターブバンド上限周波数以下の成分が含まれるガウス関数を音圧の空間分布として与えた。そして、受音点 R で得られたインパルス応答 (応答長 2 s) に中心周波数 125, 250, 500, 1k Hz の 1/3 オクターブバンドフィルタリング処理を施した。

減衰率比算出の評価区間は幾何音響シミュレーションの時と同様に、60dB 減衰時刻までとした。

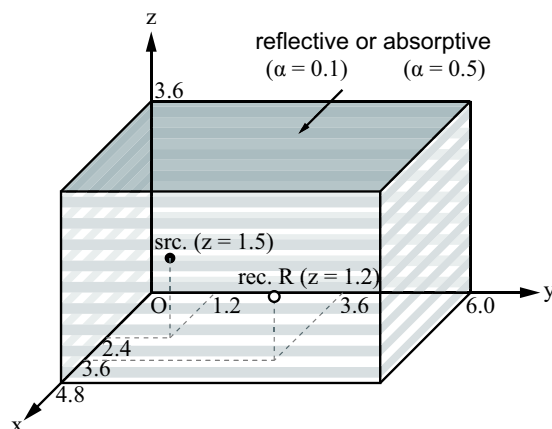


Fig. 4.23 A rectangular room with a point source.

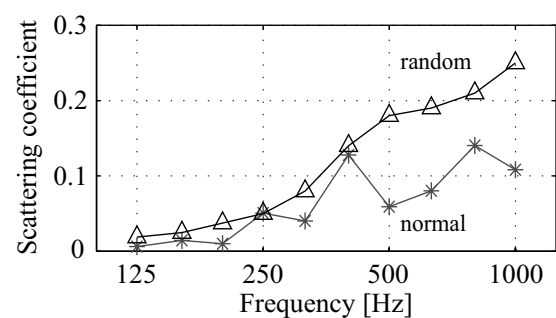


Fig. 4.24 Random/normal incidence scattering coefficients of the diffuser.

■残響減衰性状

残響時間を Fig.4.25 に残響減衰曲線を Fig.4.26 に示す。拡散体なしの場合においては、天井吸音することで 125,250Hz 帯域では残響時間が減少しているが、高音域では音波の直進性により水平面内の成分が残留していることから、吸音材を設置しても変化が小さくなる。拡散体を設置した場合、全面反射性の条件において、周波数によっては残響時間が長くなっている。これは、拡散反射成分が鉛直方向の交互反射成分に遷移したものだと考えられる。減衰曲線は、全面反射性の場合周波数に依らず概ね直線減衰しているものの、拡散体を設置したことで 500,1k Hz 帯域では残響が長くなっている。一方で、天井吸音することで残響が抑制されるものの、拡散体を設置したことで 1kHz 帯域では減衰曲線に湾曲が見られる。

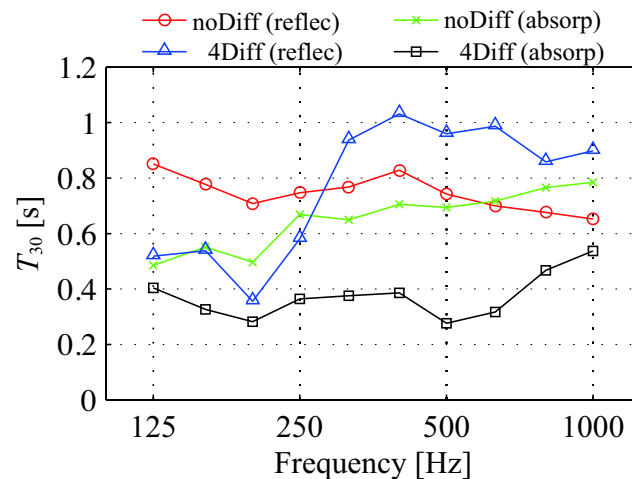


Fig. 4.25 Reverberation times T_{30} (-5dB to -35dB).

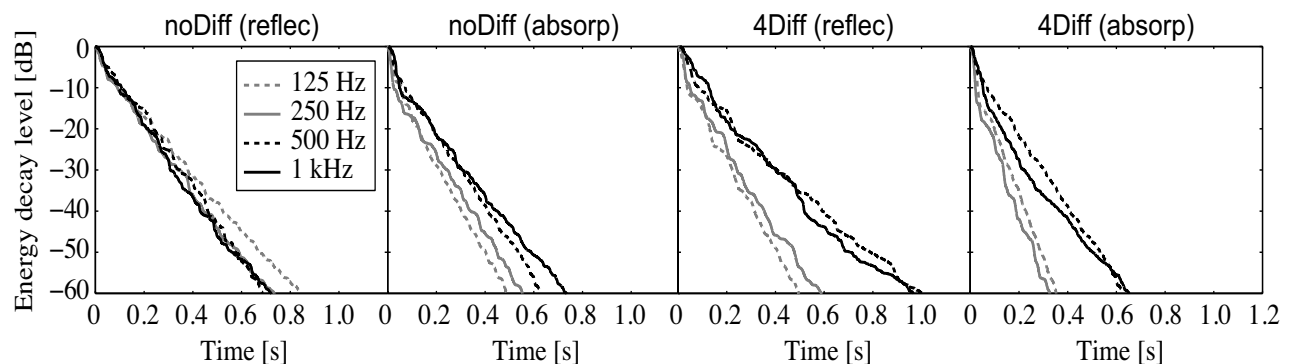


Fig. 4.26 Reverberation times T_{30} (-5dB to -35dB).

■減衰率比

フィルタリング処理による影響を調べるために、帯域幅を 1/3, 1/6, 1/12 オクターブバンドに変化させた。Fig.4.27 から Fig.4.29 にそれぞれの帯域幅で算出した減衰率比を示す。低音域では乱反射率も低いため、室条件による傾向は捉え難く、拡散体による影響が小さいと考えられる。一方で、500, 1k Hz 帯域については、全面反射性の場合に対して天井吸音時に減衰率比が小さくなる傾向が見られ、特に拡散体設置時に顕著である。また、室条件によらず高音域ほど値が大きくなる傾向が見られる。帯域幅の影響に関しては、狭帯域になるほど波形が鈍る様子が伺える。なお、1/12 オクターブバンドフィルタの中心周波数が 125Hz の減衰率比が急激に上昇しているのはフィルタのタップ長に対し応答長が短いことに起因すると考えられる。

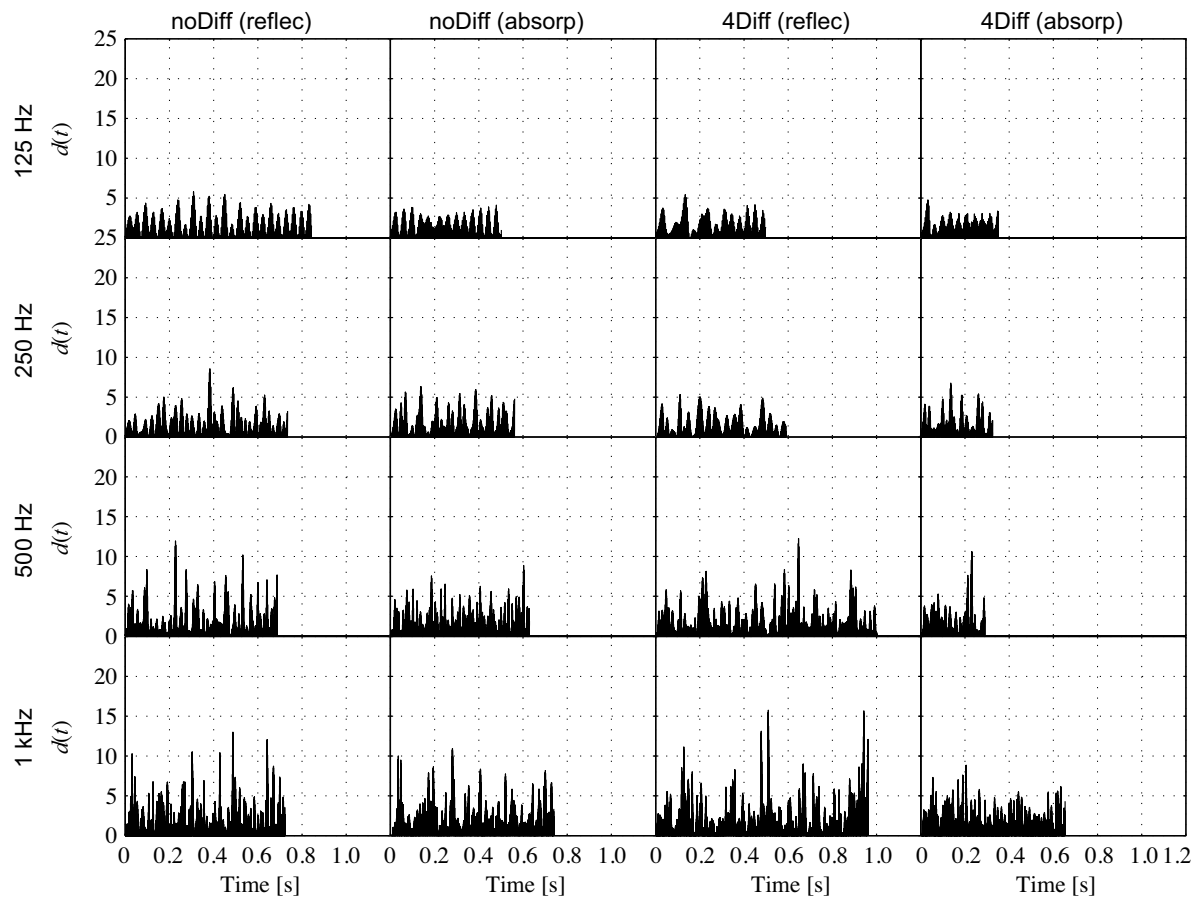


Fig. 4.27 Instantaneous decay ratio $d(t)$ using $\bar{D}(t)$, calculated by the FDTD method in 1/3 oct. bands of 4 frequencies.

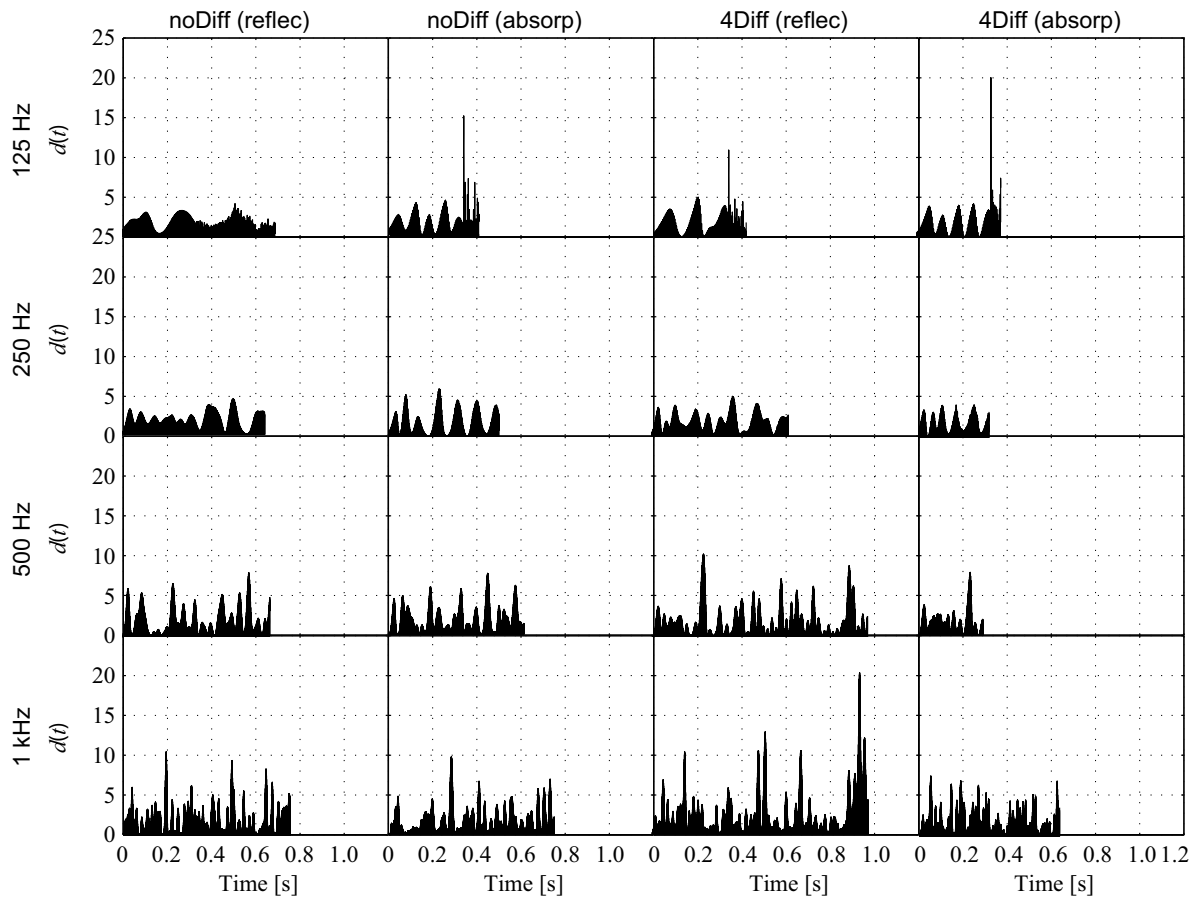


Fig. 4.28 Instantaneous decay ratio $d(t)$ using $\bar{D}(t)$, calculated by the FDTD method in 1/6 oct. bands of 4 frequencies.

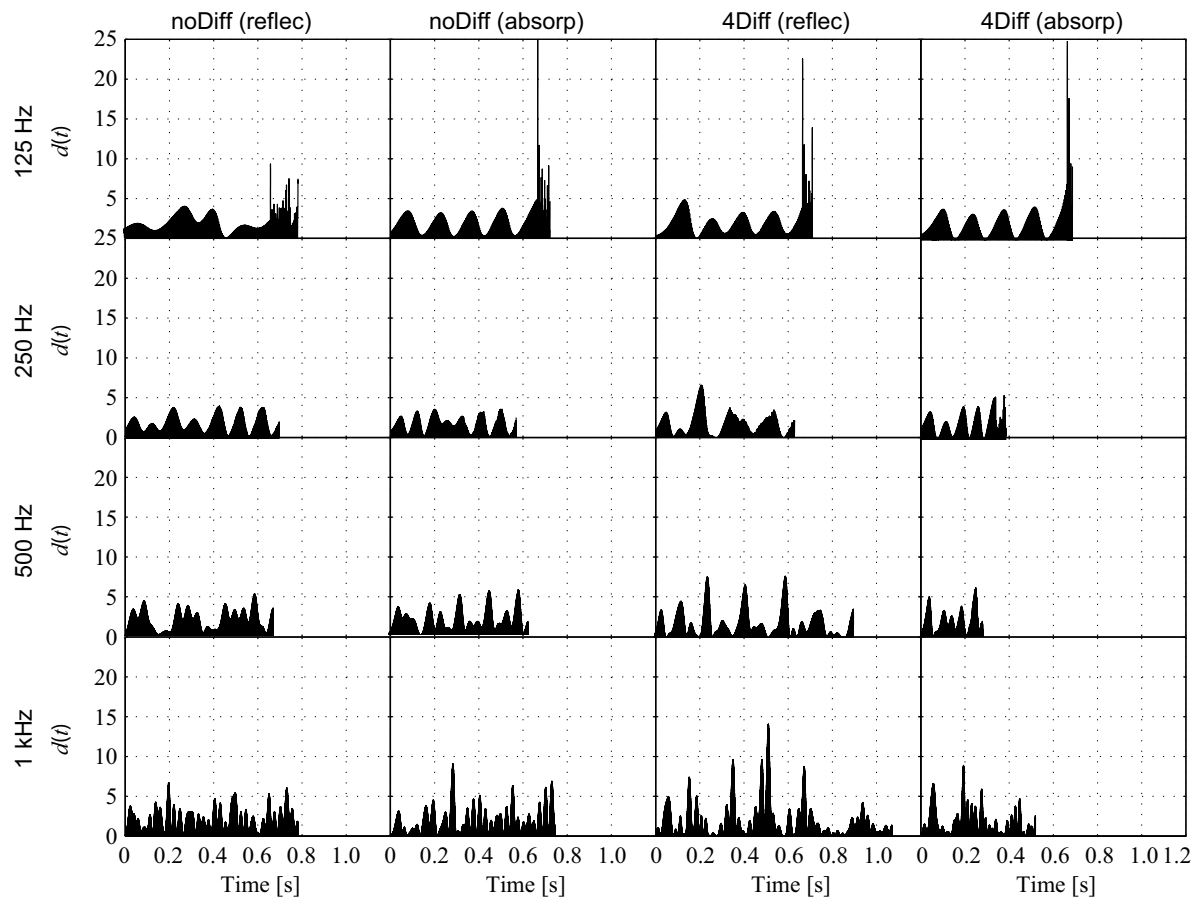


Fig. 4.29 Instantaneous decay ratio $d(t)$ using $\bar{D}(t)$, calculated by the FDTD method in 1/12 oct. bands of 4 frequencies.

4.5 おわりに

本章では、室条件が反射音構造に及ぼす影響を検討した。矩形室に限定し、室アスペクト比や吸音分布・吸音量、壁面拡散に関してパラメトリックに変化させ、これらが反射音構造に及ぼす影響を減衰率比の観点から考察した。結果として、減衰率比を用いることで、定性的に言われている現象を物理的に表現することができる可能性が示唆された。アスペクト比の影響に関しては、反射性壁間での多重反射が減衰率比に反映され、反射音の突発性が表現されていることが確認された。吸音分布の影響に関しては、吸音が偏在すると、反射音の時間的な分布に偏りが生じることで、相対的に突出した反射音が到来する様子が減衰率比にも示された。

以上より、音響設計行為を考慮した時に、減衰率比の時間間隔からどの壁間での多重反射が生じているかを推定することや、またこれらの対処として適切な吸音面配置や吸音量の設定を行える可能性が考えられる。また、壁面拡散の影響に関しては、一般に拡散体を設置することで音響エネルギー分布が空間的に一様になると言われている現象が減衰率比を用いることで物理的に特徴を表していることが示唆され、壁面拡散と音場拡散の関係性に関する一知見が得られたと考えられる。

第 5 章

総括

本研究は、室内音響の質的設計スキームの確率に資する知見を得ることを目指し、減衰率比に着目し、その物理的性質を明らかにし室条件が反射音構造に及ぼす影響を把握することを目的とした検討を行った。

第 1 章では、本研究の背景を概観し、室内音響設計の問題点を整理しながら、特に室内インパルス応答の反射音構造の分析方法に関する問題点を述べた。既往関連研究を整理し、現在提案されている反射音の抽出方法の問題点を整理し、本研究の位置づけを示した。

第 2 章では、本研究で使用するインパルス応答の音場モデルを概観した。数値解析による手法においては、波動音響解析として FDTD 法、幾何音響解析として、鏡像法と音線法について触れ、それぞれの手法の特徴を概要した。また、実測においては、音響測定で一般的に用いられている手法の一つとして、TSP 信号によるインパルス応答測定に関して触れ、本研究における測定条件を述べた。

第 3 章では、インパルス応答の反射音構造の抽出に関して、減衰率比に着目し、理論的算出を行った後、ケーススタディを通じてその物理的性質の把握を行った。減衰率比は室容積が大きいほど、即ち平均反射音間隔が広いほど、また高い周波数ほど高い値をとることが確認された。これは、従来の音場の拡散に関する知見とは反する結果となり、音場の拡散性に関してさらなる検討の必要性が示唆された。基準化手法に関しては、非線形回帰による基準化手法を用いることで、基準減衰率が連続的に変化するため評価区間に依存せずに、また平均的な減衰性状に対する到来反射音の特異性の程度をより正確に表す値を算出することができた、さらに仮定する減衰関数によっては暗騒音の影響なども考慮でき、実測を踏まえた基準化手法であると考えられ、非線形回帰曲線による基準化の方が従来法よりも有意性があると考えられる。一方で、本検討では仮定する減衰曲線を便宜的に 3 つにしたが、仮定する減衰曲線モデルなどの問題が残され今後の課題である。さらに、一般化減衰関数を用いた減衰比の算出を行ったが減衰率比においては、インパルス二乗応答を二乗積分値で除するとは逆の傾向を示し、物理的性質が異なる可能性が示唆され、一般化

減衰関数を用いた減衰比に関する詳細な検討が必要であると考えられる。

第4章では、室条件が反射音構造に及ぼす影響を検討した。矩形室に限定し、室アスペクト比や吸音分布・吸音量、壁面拡散に関してパラメトリックに変化させ、これらが反射音構造に及ぼす影響を減衰率比の観点から考察した。結果として、減衰率比を用いることで、定性的に言われている現象を物理的に表現することができる可能性が示唆された。アスペクト比の影響に関しては、反射性壁間での多重反射が減衰率比に反映された。吸音分布の影響に関しては、吸音が偏在すると、反射音の時間的な分布に偏りが生じることで、相対的に突出した反射音が到来する様子が減衰率比にも現れた。

以上より、音響設計行為を考慮した時に、減衰率比の時間間隔からどの壁間での多重反射が生じているかということを推定することや、またこれらの対処として適切な吸音面配置や吸音量の設定を行える可能性が考えられる。また、壁面拡散の影響に関しては、一般に拡散体を設置することで音響エネルギー分布が空間的に一様になると言われている現象を減衰率比を用いることで物理的にその傾向を表していることが示唆され、壁面拡散と音場拡散の関係性に関する一知見が得られたと考えられる。

なお、本研究においては、一般居室において使用されやすい形状である矩形室に限定した検討を行ったが、実際の建築空間では曲面を持つような空間や不整形な空間等多様に存在する。例えば凹面を持つ空間では、エコーを始め音の死点や焦点といった音響障害が起りやすい形状であることが知られており、同時刻に反射音が到来するような場所においては減衰率が非常に高い値を示すであろうと考えられる。また、残響室などの不整形な空間を想定した場合には、幾何音響シミュレーションにおいては乱反射率を高めることに相当し、減衰率比は1に接近すると考えられ、残響室の性能評価などにも減衰率比が利用できる可能性が考えられる。

以上、本研究によって得られた成果を総括した。今後の課題として、抽出された反射音構造の評価があげられ、突発性の程度や音場の拡散性評価などがあげられる。さらに、本研究では物理的側面のみに関しての検討であったが、質的設計スキームの確立のためには心理量との対応関係が必要であると考えられ、エコー評価やカラーレーションなどの音色変化といった聴感印象評価との対応関係が解明されることで、これまでになかった音響心理効果が明らかとなり、音響設計における、量的設計に加え、質的設計手法構築のための知見を深め、自由度の高い所望の音環境空間が創出されることに期待したい。

参考文献

- [1] ハイน์リッヒ・クットルフ著, 藤原恭司, 日高孝之訳. 室内音響学- 建築の響きとその理論-
- [2] 羽入敏樹. 室内音響指標値, 日本音響学会誌 Vol60, No.2, pp 72-77, 2004
- [3] ISO 3382-1:2009, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters Part 1: Performance spaces, 2009.
- [4] Lacatis, Radu; Gimenez, Alicia; Barba Sevillano, Arturo; Cerda, Salvador; Romero, Jose; Cibrian, Rosa, Historical and chronological evolution of the concert hall acoustics parameters, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 123, issue 5, p. 3198, 2008.
- [5] 佐久間哲哉. 非拡散音場の室内音響特性に関する研究 その1 - 壁面拡散を考慮した残響理論 -, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.1287-1290, 2011.
- [6] ISO 17497-1:2004, Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, 2004.
- [7] 坂本慎一. 幾何音響の新しい流れ, 特集: されど幾何音響シミュレーション, 音響技術 No. 129, pp. 35-39, 2005, 3.
- [8] 羽入敏樹. 壁面の拡散性と音場の拡散性の関係, 日本音響学会誌 Vol65, No.11, pp 579-583, 2009
- [9] 安岡正人. 室内音響と拡散性について, 日本音響学会誌 Vol65, No.11, pp 594-598, 2009
- [10] 小口恵司. 室内音響設計における拡散の取り扱い - ホールにおける拡散体形状 -, 日本音響学会誌 Vol65, No.11, pp 589-593, 2009.
- [11] Y.Yamada, T.Hidaka, Y.suzuki, A simple method to detect audible echoes in room acoustical design, Applied Acoustics 67 pp835-848, 2006.
- [12] 山本照二. 複合反射音を対象にしたエコーの検知限, 日本音響学会誌 Vol26, No.3, pp 153-162, 1971.
- [13] 田原靖彦, 佐藤洋, 西谷修一, エコーの時間的分離知覚限界に基づく聴覚特性の一検討, 日本音響学会誌 Vol61, No.1, pp 14-23, 2005

- [14] 減衰を除去したインパルス応答による室内音場における拡散度の推定, 日本建築学会大会講演梗概集, pp.183-184, 2012.
- [15] C.-H.Joeng, F.Jacobsen, J.Brunskog. Thresholds for the slope ratio in determining transition time and quantifying diffuser performance in situ, J.Acoust.Soc.Am, 132(3), September, pp 1427-1435, 2012.
- [16] 富来礼次. 有限要素法を用いた残響室内音場の拡散性解明に関する研究. 博士学位論文 (大分大学), 2003.
- [17] 横田孝俊, 坂本慎一, 橘秀樹. FDTD 法による室内音場の拡散性に関する 3 次元音場解析. 日本音響学会研究発表講演論文集 (秋季, pp.911-912, 2003)
- [18] 田原靖彦, 霜田英麿. 室内表面の拡散処理が“響きの質”の評価に及ぼす影響— 1/10 スケール室内音響模型による検討—. 日本音響学会誌 Vol69, No.8, pp 397-406, 2013.
- [19] 森下他, 時間領域差分法を用いた多孔質材料の音響特性解析, 音響学会誌, vol.59, pp.70-79, 2003
- [20] 山本航介, 坂本慎一, 橘秀樹, 高次差分を用いた FDTD 法の精度向上, 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春), pp.831-832, 2004.3.
- [21] 坂本慎一, 横田孝俊, FDTD 法による音場解析とその応用, 日本音響学会研究発表会講演論文集 (春), pp.1233-1236, 2006.3.
- [22] 日本建築学会 編. はじめての音響数値シュミレーションプログラミングガイド, コロナ社, 2012.
- [23] Hilmar Lehnert: Systematic errors of the ray-tracing algorithm, Applied Acoustics, Vol. 38, pp. 207-221, 1993.
- [24] Katsiaki Sekiguchi, Sho Kimura, and Tomoyuki Sugiyama: Approximation of impulse response thorough computer simulation based on finite sound ray integration, J.Acoust. Soc. Jpn. (E), Vol. 6 (2), 1985.
- [25] G.M. Naylor: ODEON-Another hybrid room acoustical model, Applied Acoustics, Vol. 38, pp. 131-143, 1993.
- [26] Michael Vorlander: Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm, J. Acoust. Soc. Am. 86 (1), 1989.
- [27] J. Vian and D. Maercke: Calculation of the room impulse response using a ray tracing method, ICA symposium at Vancouver, pp. 74-78, 1986.
- [28] ISO 17497-1:2004, Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, 2004.
- [29] 杉原慎一郎. 壁面の拡散性を考慮した幾何音響シミュレーション—乱反射率の入射角依存性の反映—, 修士学位論文, 2010.

-
- [30] kawakami and K.Yamaguchi,"A systematic study of power-law decays in reverberation rooms," J.Acoust. Soc. Am. 80, pp.543-554, 1986
- [31] C .Huszy, "Time-domain swept signal based measurement and processing of impulse responses for room acoustic evaluation," Ph.D dissertation, 2012
- [32] N. Xiang, "Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach," J. Acoust.Soc. Am.98,2112-2121,1995
- [33] H. Lee, "Characterization of scattering coefficients of periodical surfaces by numerical analysis," Proc. Inter-Noise 2012(New York),N.756,9p.(2012)."

謝辞

本論文は、筆者が東京大学大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻修士課程において同専攻准教授 佐久間哲哉先生のもとに行った研究をまとめたものであります。

指導教員の佐久間哲哉准教授には、研究に対する取り組み方や考え方、また、研究のテーマの設定から当論文の作成に至るまで、終始厳しくも優しいご指導を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

副指導教員である同専攻味埜俊教授には、有益かつ貴重なご意見をいただき、普段見落としがちな視点からアドバイスをいただくことが出来ました。また、東京大学生産技術研究所 坂本慎一准教授には副査を担当していただき、貴重なご指摘をいただくことができました。

佐久間研究室の先輩である土屋裕造さん、石川聡史さんには研究以外においても沢山のアドバイスを頂きました。同研究室の博士後期課程の江田和司さんには、研究内容に関して多くの助言をいただき、また日々の生活に至るまで有意義な時間を過ごさせていただきました、2年間本当にお世話になりました。心より御礼申し上げます。同研究室の博士後期課程の井上尚久さんには、学部時代から音響に関して無知であった私に対して、いつも丁寧にご指導していただきました。同研究室卒業生である、李孝振さん、太刀岡勇氣さん、楠井尚貴さん、郭静さんには沢山のアドバイスを頂きました。また同期の清家剛さんは同期として研究内容から日々の生活に至るまで、大学院生活における多くの時間を共に過ごさせていただき、私の人生における貴重な1ページとなりました。本当にありがとうございました。同研究室後輩の上田脩太郎さん、澤幡麻佑子さん、西村裕喜子さんには日常の議論を通じて様々な知識や刺激をいただくことが出来ました。また、同じ院生室で共に時間を過ごした社会文化環境学専攻の大学院生の皆様に謝意を表します。

最後に研究生生活をするにあたり、どんなときも暖かく見守って頂いた両親ならびに親戚のみなさまに深く御礼申し上げます。

2014 年 1 月 27 日

竹下 圭悟

修士論文要旨

室内インパルス応答の反射音構造の分析評価に関する研究

Analysis and evaluation of reflected sound structure of room impulse responses.

学籍番号 47 - 126786
氏 名 竹下 圭悟 (Takeshita, Keigo)
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

1. はじめに

1.1 研究背景

室の用途に応じ適切な音環境設計を行うことは知的生産性やコミュニケーションの観点から重要である。音響設計の際の判断材料として一般的に用いられている残響感や明瞭性に関する指標は室の音響伝達特性であるインパルス応答を量的な指標に落としこむことにより算出されているが、それらの指標を算出するにあたり棄却される時間変動性の高い情報にも、主観的に影響の大きい要素が含まれている可能性がある。近年、インパルス応答から残響減衰の影響を除去することによって、反射音の相対的な突発性を表す構造を抽出する方法が提案された。これには、従来ではインパルス応答の目視による経験的判断に依存していた、音響障害の一つあるエコーや音色の変化といった質的側面を定量的に評価できる可能性がみられ、音響特性の物理的把握に加え、質的設計手法の構築の機運が高まっている。

1.2 室内インパルス応答の減衰除去

Jeong[1]は、インパルス応答積分法で得られた残響減衰曲線の瞬時の変化が反射音エネルギーの突発性を表しているとして、残響減衰曲線の瞬時の傾き（瞬時減衰率）を算出した（式(1)）。

$$D(t) = \{L(t + \Delta t) - L(t)\} / \Delta t \quad [\text{dB/s}] \quad (1)$$

尚、 $L(t) = 10 \log_{10} E(t)$, $E(t) = \int_t^\infty I(\tau) d\tau$, $I(t)$ はエネルギーインパルス応答。ここで、式(1)は $\Delta t \rightarrow 0$ のとき、

$$D(t) = \frac{dL(t)}{dt} = -\frac{10}{\ln 10} \frac{I(t)}{E(t)} \quad (2)$$

となり、Hanyu[2]が提案する音圧の二乗値を二乗積分値で除することと係数を除いて一致する。さらに、瞬時減衰率 $D(t)$ について、インパルス応答の平均的な減衰率 \bar{D} （基準減衰率）との比（減衰率比 $d(t) = D(t) / \bar{D}$ ）を算出することで残響の長さの影響を除去することができる。既往例[1,2]では、評価区間内の $D(t)$ の平均値、即ち評価区間内で直線減衰を仮定した時の減衰率が用いられているが、湾曲減衰時の適用妥当性の懸念があり、また評価区間の設定は試行段階にあるように見える。

1.3 研究目的

本研究では、室内音響の質的設計スキームの確立に資する知見を得ることを目指し、減衰率比に着目して、（１）その物理的性質を明らかにし、（２）室条件が反射音構造に及ぼす影響を把握する。尚、本研究では物理的な側面に関する検討を行い、心理量との対応は将来の課題とする。

2. 減衰率比の理論的算出

容積 V 、表面積 S の室内にある点音源から時刻 $t = 0$ に出力 I_0 のインパルスが発せら

れた場合、距離減衰、壁面吸音を算定すると、ある鏡像音源からの到来時刻における離散時間内の音響エネルギー密度は次式で表される。

$$I_i(t) = \frac{I_0 / \Delta t_s}{4\pi c^3 t^2} (1 - \bar{\alpha})^{\frac{c}{t}} \quad (3)$$

但し、音速 c 、平均吸音率 $\bar{\alpha}$ 、平均自由行程 $l = 4V/S$ 、 $\Delta t_s = 1/f_s$ 、 f_s はサンプリング周波数。式(3)に対して、受音点から等距離にある微小区間内の音源個数を考慮し、逆二乗積分を行うと次式となる。

$$E(t) = \int_t^\infty I_i(\tau) \Delta t_s \cdot \frac{4\pi c^3 \tau^2 d\tau}{V} \\ = \frac{4I_0}{-cS \ln(1 - \bar{\alpha})} (1 - \bar{\alpha})^{\frac{c}{t}} \quad (4)$$

ここで、各反射音が同時刻に到来しないことを仮定すると、瞬時減衰率は式(2)より、

$$D(t) = -\frac{10}{\ln 10} \frac{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}{16\pi (ct)^2} \frac{1}{\Delta t_s} \quad (5)$$

となる。ここで、平均的な減衰率を、

$$\bar{D} = -10 \log_{10} (1 - \bar{\alpha})^{\frac{c}{t}} = -\frac{10}{\ln 10} \frac{cS}{4V} \ln(1 - \bar{\alpha}) \quad (6)$$

とすると、減衰率比は次式で表される。

$$d(t) = \frac{V}{4\pi c^3 t^2} \frac{1}{\Delta t_s} = \frac{\Delta t_r}{\Delta t_s} \quad (7)$$

但し、平均反射音時間間隔 $\Delta t_r = V / 4\pi c^3 t^2$ 。上式は、時間の逆二乗で単調減少し、平均

反射音間隔とサンプリング間隔 Δt_s が一致する時刻 $t_c = \sqrt{V / 4\pi c^3 \Delta t_s}$ で 1 を示す。 t_c 以降では、反射音が同時刻に到来しないという仮定が満たされないため、 $d(t)=1$ となる。

2.1 ケーススタディ

立方体室を対象に鏡像法解析を行い、減衰率比について理論との対応を検討する。基本条件として、室容積 1000m^3 、全面に吸音率 0.35 、サンプリング周波数 48kHz 、受音点は室中央、音源点は室中央から各壁方向に $0.1, 0.2, 0.3\text{m}$ 移動した位置とする。基本条件に対して、音源位置、室寸法、サンプリング周波数を変化させる。また、減衰率比算出に用いる平均的な減衰率として評価区間内 (60dB 減衰時刻 T まで) の瞬時減衰率の平均値とする。

2.2 結果と考察

基本条件の結果を図 1 左に示す。解析値は理論値と傾向が概ね対応しているが、数倍程度大きい値を示している。これは、到来反射音の時間分布の偏りが大きく、各鏡像音源の反射頻度も均一でないためと考えられる。室容積を 8 倍にした場合 (図 1 中央左) 理論値は室容積の変化に比例して値が上昇しているが解析値は比較的变化が小さい。これは各鏡像音源の反射頻度が異なり、後期では交互反射方向の成分の寄与が

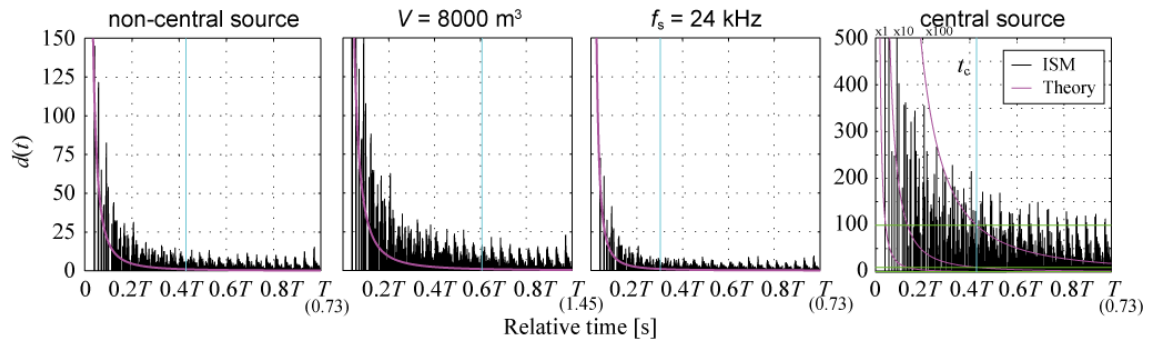


Fig. 1: Decay ratio $d(t)$, calculated by the image source method and the theory.

相対的に大きくなることから、減衰率比は室容積ではなく壁面間距離の変化に追従したものと考えられる。サンプリング周波数を 1/2 に変化させた場合(図 1 中央右)理論値、解析値ともに比例関係が確認できる。音源位置を中央にした場合(図 1 右)理論値から 100 倍程度の乖離が見られる。これは基本条件に比べ多数の反射音が同時刻に到来することに起因すると考えられる。

3. 湾曲減衰時の基準化に関する検討

残響減衰曲線が湾曲した場合については、直線近似による単一の基準減衰率では反射音の突発性評価には不適切であると考えられる。そこで、残響減衰曲線の非線形回帰曲線[3]を求め、その瞬時減衰率を用いて減衰率比を算出し、比較して検討する。

解析条件 室条件は、室容積 1000 m^3 、吸音面積 210 m^2 の矩形室に対して、アスペクト比と吸音分布が均等・偏在となる 4 条件を設定する(表 1)。全条件で Sabine 式による残響時間は 0.77 s である。

3.1 結果と考察

残響減衰曲線と減衰率比を図 2 に示す。

残響減衰性状 Case 1a では、概ね直線減衰を示しているが、他条件では湾曲し、室アスペクト比・吸音分布ともに不均等の Case 2b で顕著である。回帰曲線については、室条件によらず残響減衰曲線を概ね近似していることがわかる。直線的に減衰する Case 1a であっても 2 種の直線によりわずかな湾曲を捉えている。

減衰率比 基準減衰率として直線減衰を仮定した場合には、時間的な変動は小さい。近似減衰曲線を用いた場合は、直線減衰する Case 1a では基準減衰率による違いは見られないが、他の条件では後期時刻に減衰率比が大きくなっている様子が伺える。

Table 1: Conditions of rectangular rooms.

Case	L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	α_x	α_y	α_z
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40

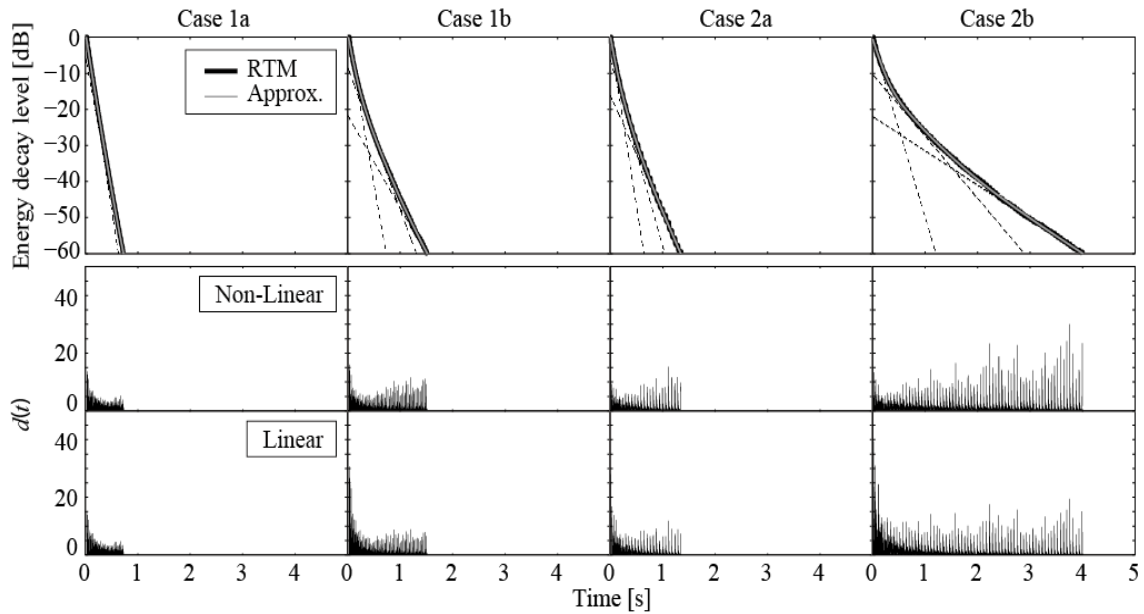


Fig. 2: Upper: energy decay curves calculated by the ray tracing method, and their approximation curves; Lower: decay ratio $d(t)$, normalized by using non-linear and linear regression curves

4. 室条件が反射音構造に及ぼす影響

4.1 吸音分布の影響

減衰率比 図2より吸音面が偏在すると相対的に強い反射音が周期的に到来しており、これは吸音率の低い平行壁間での交互反射の影響が時々刻々と強まることが表されていると考えられる。

4.2 壁面拡散の影響

音響エネルギー分布の一様性向上やエコー抑制などを目的として、壁面に凹凸を施して反射音を拡散させることが多い。壁面の拡散性能として乱反射率を導入した音線法解析により、壁面拡散が減衰率比に及ぼす影響を検討する。残響減衰の湾曲が顕著な Case 2b を対象として、乱反射率 s を全範囲に 0.1, 0.2, 0.4 と変化させる。

残響減衰性状 残響減衰曲線とその非線形回帰曲線を図4に示す。乱反射率を上げることで湾曲が軽減し、乱反射率 0.4 ではほぼ直線減衰になっている。近似曲線に関しては減衰性状に依らず概ね近似していることが確認できる。

減衰率比 図4に減衰率比を示す。初期については、乱反射率の増大とともに値が理論値に接近し、乱反射率 $s = 0.4$ では概ね対応している。これは乱反射率を上げること

で到来反射音の時間分布の偏りが緩和されたためであると考えられる。

5. おわりに

室内インパルス応答の反射音構造分析のため、減衰率比に関して、その物理的性質や室条件の影響を理論及び数値解析を通して検討した。減衰率比は反射音間隔に依存することが分かった。また、本紙では省略したが、周波数帯域分析の影響や実空間を対象としたケーススタディを行い、理論と概ね対応していることが確認された。今後の課題として、減衰率比の評価方法や心理量との対応が挙げられる。

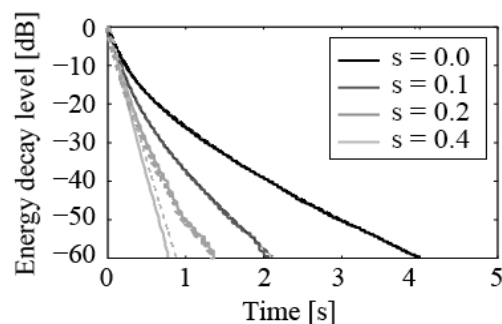


Fig. 3: Energy decay curves calculated with changing scattering coefficient and their approximation curves.

参考文献 [1] C.-H. Jeong, *et al.*, J. Acoust. Soc. Am. **127**, 2733-2761, 2010. [2] T. Hanyu, Proc. Intl. Sympo. on Room Acoust. P063, 9p., 2013. [3] N. Xiang, J. Acoust. Soc. Am. **98**, 2112-2121 (1995)

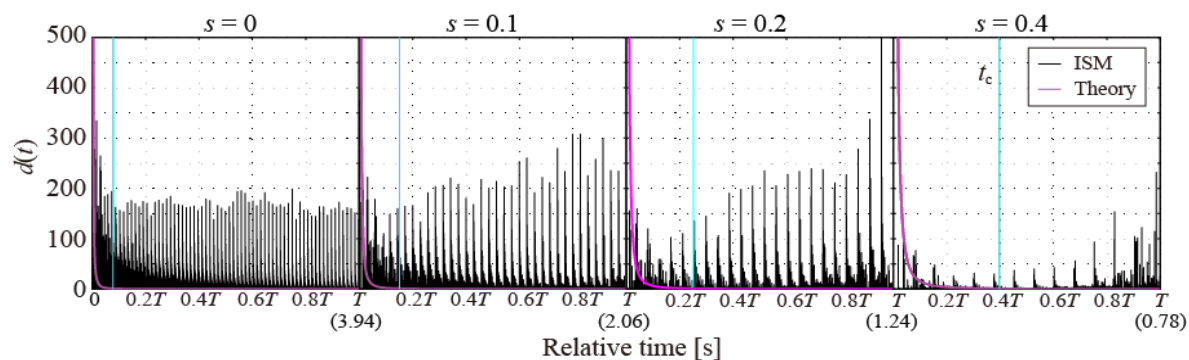


Fig. 4: Decay ratio of Case 2b with changing scattering coefficient s , calculated by the ray tracing method.

関連発表論文

[1] 江田和司, 竹下圭悟, 佐久間哲哉:インパルス応答の時間構造に関する研究 その1ー特異反射音抽出の基礎検討ー. 日本建築学会学術講演論文集(環境工学1), pp.157-158, 2013.

[2] 竹下圭悟, 江田和司, 佐久間哲哉:インパルス応答の時間構造に関する研究 その2ー実音場を対象とした周波数特性の検討ー, 日本建築建築学会大会学術講演論文集(環境工学1), pp.159-160, 2013.

[3] 竹下圭悟, 江田和司, 佐久間哲哉: 室内インパルス応答における反射音構造の評価ー非線形回帰を用いた減衰除去ー, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.1071-1072, 2013.

[4] 江田和司, 竹下圭悟, 佐久間哲哉: 室内音響インパルス応答の時空間特性に関する研究ー反射音構造分析の基礎的検討ー 日本音響学会建築音響研究会資料, AA2013-46, 8p., 2013.

[5] 江田和司, 竹下圭悟, 佐久間哲哉: 室内音響インパルス応答の反射音構造の評価ー減衰率比の理論的考察ー, 日本音響学会春季発表大会, 2013.

インパルス応答の時間構造に関する研究
—その 1 特異反射音抽出の基礎検討—

正会員 ○江田 和司*1
同 竹下 圭悟*2
同 佐久間哲哉*3

室内音響 インパルス応答 反射音構造
音場拡散 フラッターエコー 幾何音響解析

1. はじめに

近年、音場拡散評価やエコー検出を目的として、インパルス応答から特異反射音を抽出する方法が提案されている[1-3]。本報では、各提案指標及びその基本的性質を概観し、指標値の算出方法に関する基礎的な検討を行う。

2. 特異反射音の抽出方法

Jeong [2]は、インパルス応答積分法によって得られた減衰曲線における急峻な変化が特異な反射音を表しているとして、減衰曲線の瞬時の傾きを算出した (式(1))。

$$D(t)=[L(t+\Delta t)-L(t)]/\Delta t$$
 (1)

ここで、 $L(t)=10\log_{10}\langle h^2(t)\rangle$ 、 $\langle h^2(t)\rangle=\int_0^\infty g^2(\tau)d\tau$ 、 $g(t)$ はインパルス応答。 $D(t)$ の単位は dB/s であり、直線減衰時には一定値、湾曲減衰時には単調減少を示す。また、式(1)は $\Delta t\rightarrow 0$ のとき、

$$D(t)=\frac{dL(t)}{dt}=-\frac{10}{\ln 10}\cdot\frac{g^2(t)}{\langle h^2(t)\rangle}$$
 (2)

となり、音圧の二乗値を二乗積分値で除すること[3]と一致する。また、インパルス応答積分法の冪指数を変化させ、特異反射音を増幅する方法が提案されている[1]。

2.1 基準化

$D(t)$ を平均的な減衰率 \overline{D} で基準化することで減衰の影響を除去し、反射音の特異性の程度を表すことができる。基準化後の $D(t)$ を $d(t)$ ($=D(t)/\overline{D}$) とする。既往例[2,3]では、基準値として評価区間内の \overline{D} が用いられているが、評価区間の設定は試行段階にあるように見える。また、湾曲減衰を考慮した基準値を用いることで反射音の特異性をより正確に抽出できると考えられる。

3. 基準値に関する検討

3.1 検討方法

本節では、2種類の基準値 \overline{D} を設定し、比較する。基準値は、A) 減衰曲線における 0 dB 点と-60 dB 点の結線の勾配 \overline{D}_{60} 、B) 10 dB 減衰毎の結線の勾配 $\overline{D}_{10}(t)$ とし、評価区間は 0~-60 dB とする。室条件は、室容積 1000 m³、吸音面積 210 m² の矩形室に対して、アスペクト比と吸音分布が均等・偏在となる 4 条件を設定する (表 1)。全条件で Sabine 式による残響時間は 0.77 s である。インパルス応答は音線法解析により得る。音源・受音球は室中央、音線数 10⁶ 本。サンプリング周波数 $f_s = 1$ kHz、打ち切り時間 7.5 s とする。尚、直接音は除くこととする。

Table 1. Conditions of rectangular rooms.

Case	L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	α_x	α_y	α_z	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

3.2 結果と考察

減衰性状 図 1 にエネルギー応答曲線と減衰曲線を示す。立方体・吸音均等の Case 1a では、両曲線とも概ね直線減衰を示しているが、他条件では湾曲し、直方体・吸音偏在の Case 2b で顕著である。 α/L 比が等しい Case 1b と Case 2a の減衰曲線は概ね一致しているが、エネルギー応答曲線については、Case 1b に比べ Case 2a では突出した反射音が周期的に表れている。伝搬距離の大きい壁間での交互反射の影響であると考えられる。

反射音性状 結果を図 2 に示す。基準化しない場合 (O) は、条件によらず、初期では反射音密度が疎かつ減衰が迅速なため値は大きく、後期では条件毎に概ね一定の値を変動している。基準化した場合 (A, B)、基準値によらず、減衰の湾曲性が強い条件ほど全体的に値が大きくなり、特異性の大きい反射音が到来していることがわかる。直線減衰する Case 1a では基準値によらず同様の傾向であるが、他条件では基準値として減衰の湾曲性を考慮した $\overline{D}_{10}(t)$ を用いた場合に上昇傾向を示しており、平行壁間の交互反射の影響が時々刻々と強まることを表している。

時間離散化幅の影響 インパルス応答のサンプリング周波数 f_s を 250, 4k Hz に変化させた場合の結果を図 3 に示す。基準値は $\overline{D}_{10}(t)$ とした。室条件によらず、 f_s が大きくなるに従い、値のばらつきが大きくなる傾向が見られる。これより、高音域ほど反射音の特異性が大きいことが示唆される。

4. おわりに

減衰の湾曲性を考慮した基準値を用いることで反射音の特異性を強調できること、また高音域ほど反射音の特異性が大きいことが示唆された。この指標の評価方法については今後の課題である。

参考文献

[1] C. Huszty, *Ph. D. dissertation*, Univ. of Tokyo, 2012.
[2] C.-H. Jeong, *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*, **132**, 1427-1435, 2012.
[3] 羽入他, AIJ 梗概集 D-1, 183-184, 2012.

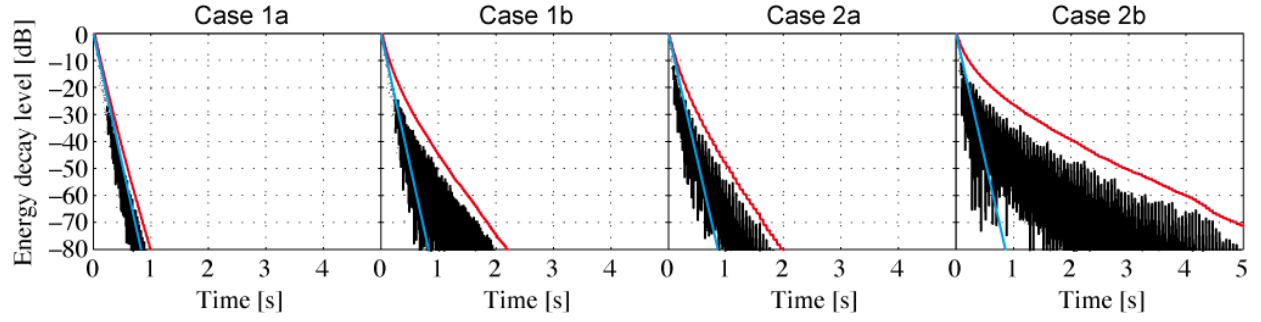


Fig. 1. Energy-time curves obtained by ray tracing simulation (black line), backward integrated decay curves (red line) and Eyring decay slopes (blue line).

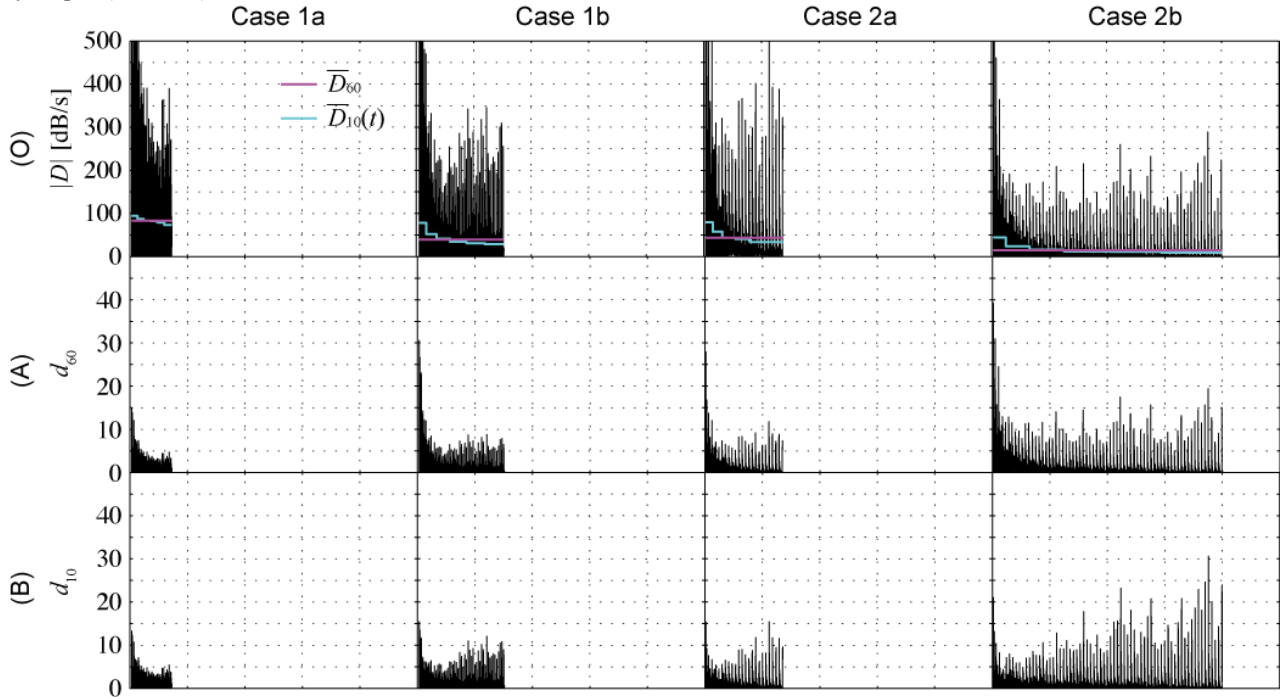


Fig. 2. Instantaneous decay rates $D(t)$ (O), and $d(t)$ normalized by \bar{D}_{60} (A) and $\bar{D}_{10}(t)$ (B).

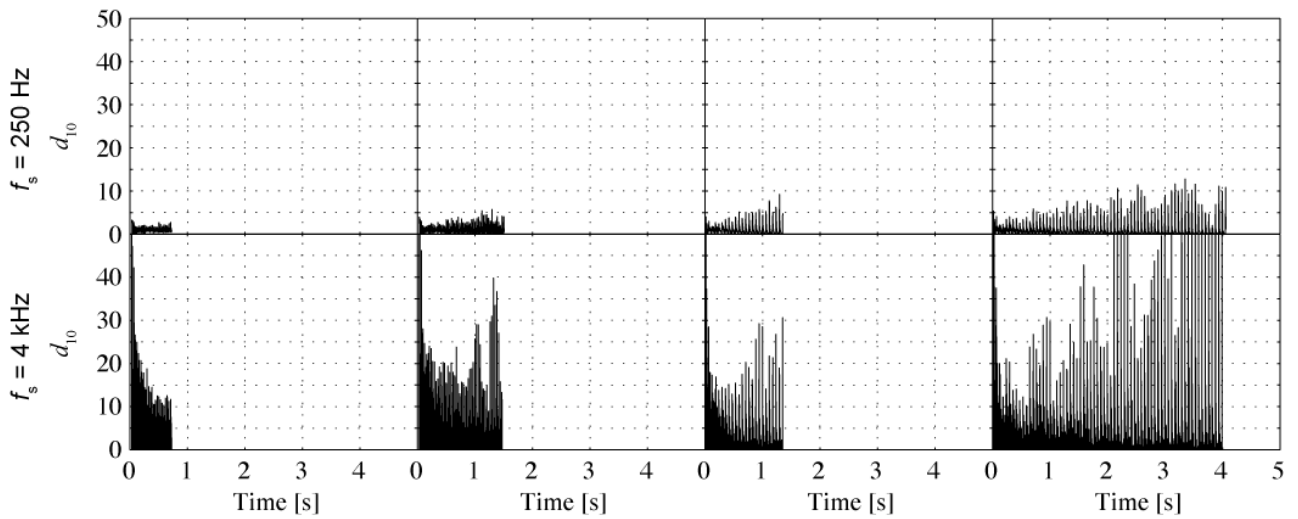


Fig. 3. $d(t)$ normalized by $\bar{D}_{10}(t)$, at 250 and 4k Hz of 2 sampling frequencies.

*1 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻
博士課程・修士（環境学）
*2 同 修士課程
*3 同 准教授・博士（工学）

*1 Doctoral Course, Dept. of Socio-Cultural Environ. Studies, Grad. Sch. of
Frontier Sciences, Univ. of Tokyo, M. Environ.
*2 Master Course, ditto.
*3 Assoc. Prof, ditto, Dr. Eng.

インパルス応答の時間構造に関する研究
—その2 実音場を対象とした周波数特性の検討—

正会員 ○竹下 圭悟*¹
同 江田 和司*²
同 佐久間哲哉*³

室内音響 インパルス応答 反射音構造
音場拡散 フラッターエコー 音響測定

1. はじめに

前報[1]では、音線法を用いて特異反射音抽出に関する基礎的検討を行った。本報では、吸音配置が異なる部屋の実測インパルス応答を用いて、周波数帯域毎に特異反射音を抽出し、その性状を把握する。

2. 反射音構造の抽出手法

前報と同様に、インパルス応答積分法で得られた減衰曲線の瞬時の減衰率を算出する[2,3] (式(1))。

$$D(t) = [L(t + \Delta t) - L(t)] / \Delta t \quad (1)$$

ここで、 $L(t) = 10 \log_{10} \langle h^2(t) \rangle$, $\langle h^2(t) \rangle = \int_0^\infty g^2(\tau) d\tau$, $g(t)$ はインパルス応答。本件では、減衰曲線における 10 dB 減衰毎の 2 点結線の勾配 $\bar{D}_{10}(t)$ で $D(t)$ を基準化し ($d(t) = D(t) / \bar{D}_{10}(t)$)、減衰の影響を除去する。評価区間は SN を考慮して、-5~-35 dB とする。

3. 検討方法

3.1 測定条件

小会議室を対象として、吸音材配置に関する 3 条件を設定する (図 1)。吸音材なし (Case A) に対して、吸音材を平行 2 壁設置 (Case B)、全側壁設置 (Case C) とする。室内の基本条件として、壁はスチール製間仕切り 3 面・石膏ボード張り 1 面、床はビニールシート、天井は岩綿吸音板の仕上げであり、室中央に机及び椅子 4 脚を配置した。サンプリング周波数 48 kHz、応答長 1.37s としてインパルス応答を測定し、全周波数帯域の他、得られた応答に中心周波数 125, 250, 2k Hz の 1 オクターブバンドフィルタリング処理を施し、 $d(t)$ を算出する。

3.2 結果と考察

残響時間 残響時間 (T_{30} : -5~-35 dB) を表 1 に示す。吸音材なし (Case A) に対して、吸音材を設置した条件 (Case B, C) では残響時間が短くなっている。特に、交互反射の影響が小さい Case C で顕著である。

Table 1. Reverberation times (unit : s).

Case	All Pass	125 Hz	500 Hz	2 kHz
A	0.96	0.97	0.96	0.76
B	0.64	0.84	0.50	0.54
C	0.67	0.69	0.49	0.31

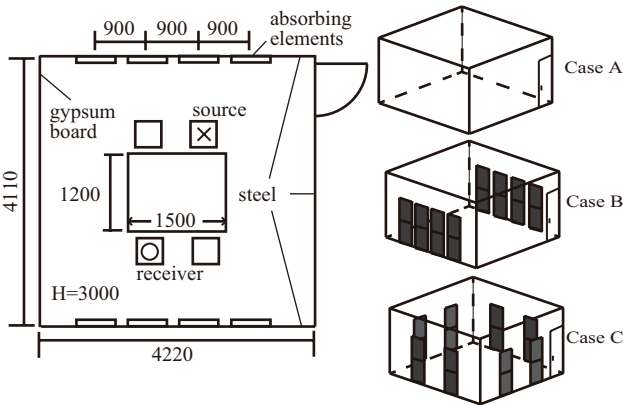


Fig. 1. Plan of the meeting room and absorption conditions.

減衰性状 図 2 に減衰曲線を示す。周波数によらず、吸音材なしの場合 (Case A) については比較的緩やかな勾配で直線減衰しているのに対し、吸音材を設置した他の条件では湾曲がみられるが、初期の減衰は急峻であり、特に均等吸音の Case C で顕著である。

反射音性状 結果を図 3 に示す。図中の赤線は基準値が変化する時刻を記したものである。条件によらず、高音域ほど反射音の特異性が大きくなっており、前報の結果と対応する。吸音条件による大きな特徴は捉え難いが、Case B の 2 kHz 帯域では、後期で周期的に値が大きくなっている。これは反射性壁間でフラッターエコーが生じているものと考えられる。また、Case C の全周波数帯域では後期に値が減少しているが、これは基準化区間内に湾曲点が含まれるため、湾曲点の前時刻では反射音の特異性を過大評価し、後時刻では過小評価していると考えられる。

4. おわりに

実測インパルス応答を対象として、周波数帯域毎に特異反射音を抽出した。高音域ほど特異性の大きい反射音が到来すること、及び減衰の湾曲性を考慮した基準化方法を再検討する必要性が示唆された。

参考文献

[1] 江田他, AIJ 梗概集 D-1, 2013.
[2] C.-H. Jeong, et al., J. Acoust. Soc. Am., **132**, 1427-1435, 2012.
[3] 羽入他, AIJ 梗概集 D-1, 183-184, 2012.

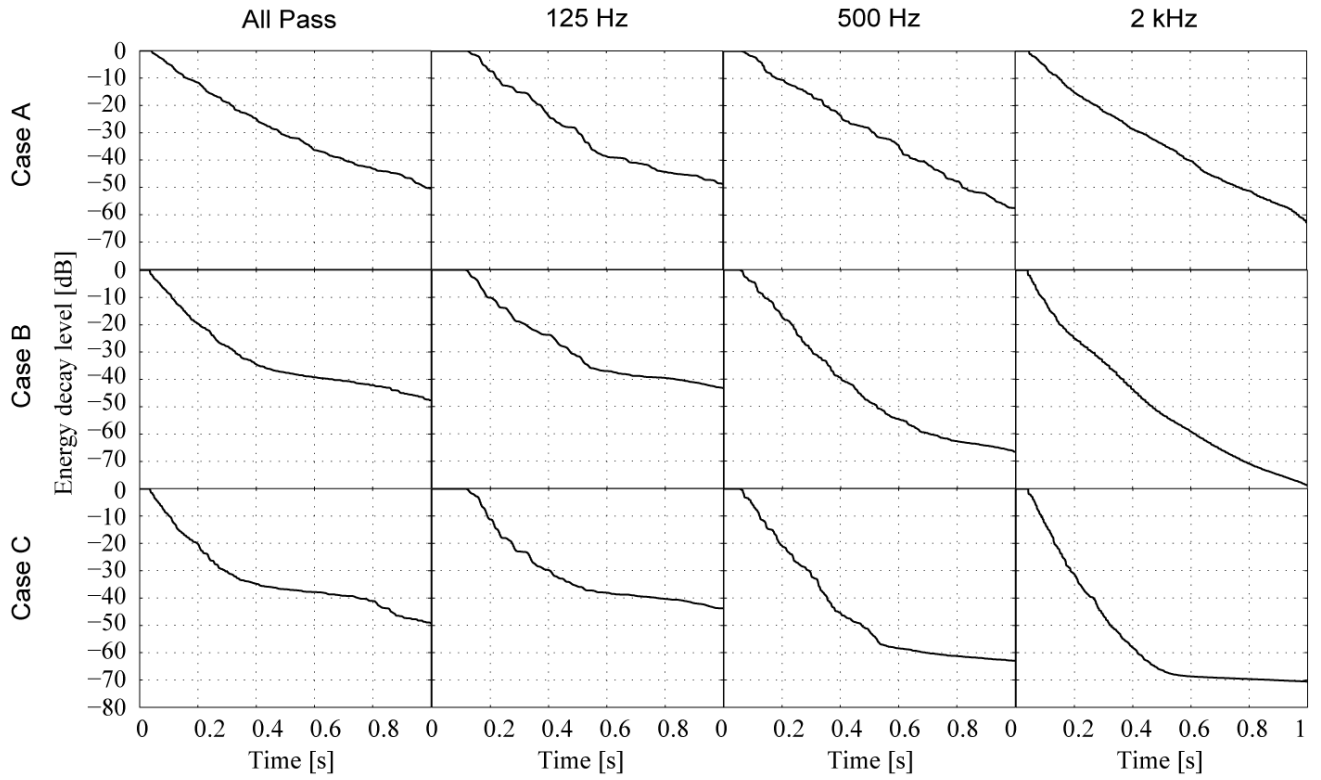


Fig. 2. Backward integrated decay curves at 4 frequency bands.

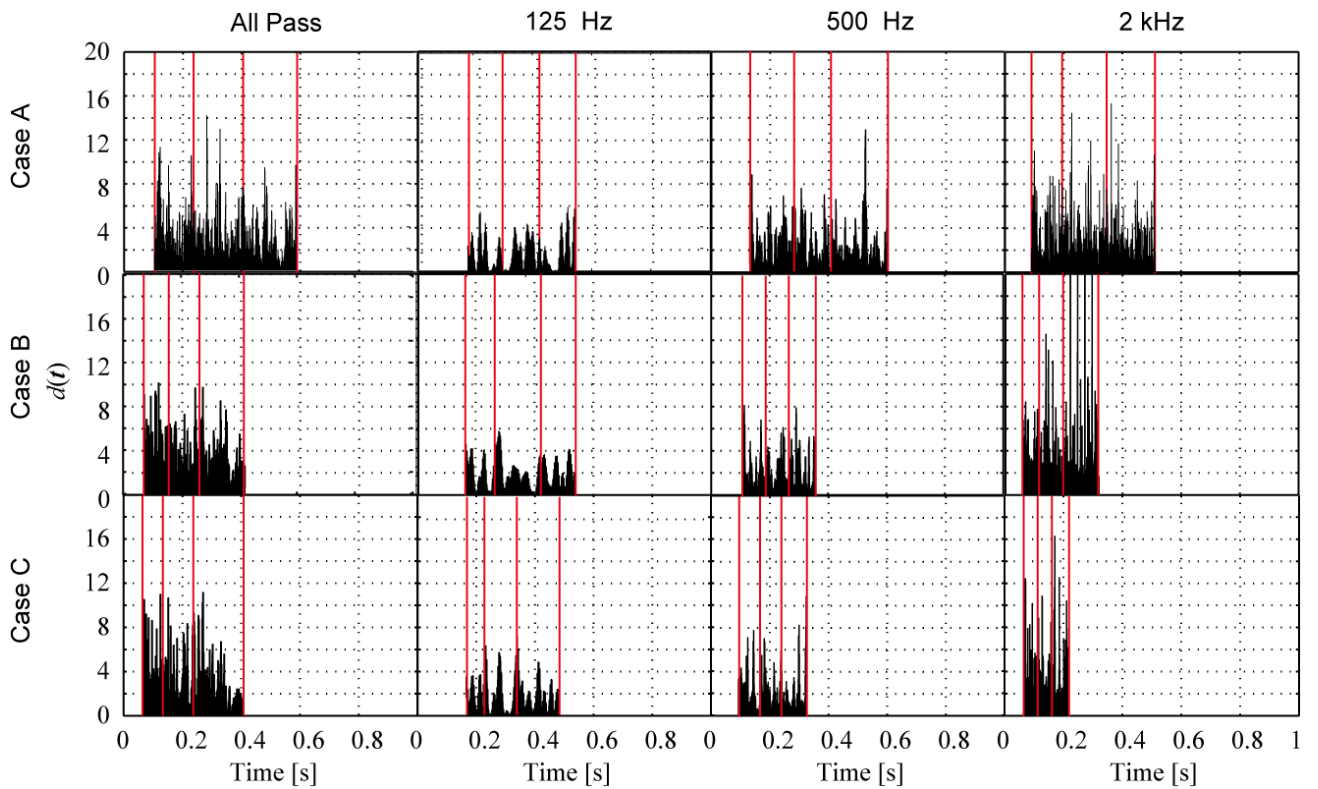


Fig. 3. $d(t)$ normalized by $\bar{D}_{10}(t)$ at 4 frequency bands.

*1 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻
修士課程
*2 同 博士課程・修士（環境学）
*3 同 准教授・博士（工学）

*1 Grad.Student., Grad. Sch. Frontier Sci., Univ. of Tokyo.
*2 Doctoral Course, ditto, M. Environ.
*3 Assoc.Prof, ditto, Dr. Eng.

室内インパルス応答における反射音構造の評価 -非線形回帰を用いた減衰除去-

☆竹下圭悟, 江田和司, 佐久間哲哉 (東大・新領域)

1 はじめに

近年, 音場拡散評価やエコー検出を目的として, 室内インパルス応答から減衰を除去することで特異反射音を抽出する方法が提案されている[1-3]. 一方で, 湾曲減衰時には減衰除去の方法によって指標値に違いが表れることも示唆されている[4,5]. 本報では, 残響曲線の非線形回帰曲線による減衰除去を提案し, 反射音構造を評価する.

2 特異反射音の抽出方法

Jeong[1]はインパルス応答積分法によって得られた減衰曲線の瞬時の傾きから特異反射音を抽出する手法(式(1))を提案している.

$$D(t) = [L(t + \Delta t) - L(t)] / \Delta t \quad (1)$$

ここで, $L(t) = 10 \log_{10} \langle h^2(t) \rangle$, $\langle h^2(t) \rangle = \int_0^t g^2(\tau) d\tau$, $g(t)$ はインパルス応答, $\Delta t = 1/f_s$ (f_s : サンプル周波数)である. 式(1)は $\Delta t \rightarrow 0$ のとき,

$$D(t) = \frac{dL(t)}{dt} = -\frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{g^2(t)}{\langle h^2(t) \rangle} \quad [\text{dB/s}] \quad (2)$$

となり, 羽入[2]が提案する音圧の二乗値を二乗積分値で除する手法と係数を除いて一致する. 但し, 式(1)は, サンプル周波数に依存する懸念がある. 図1は同一条件(表1の

Case 2b) に対して二乗応答におけるサンプリング周波数を変化させて, 両手法から算出した $D(t)$ (上図) 及び羽入値(式(2))に対する誤差率(下図)である. f_s によらず Jeong 値が羽入値より小さい傾向が見られる. また, f_s が小さいほどの誤差が大きくなり, 最大で 10 %以上の誤差が生じている. 本報では, サンプル周波数による誤差が生じない式(2)を用いることとする.

3 基準化に関する検討

3.1 基準化の手法

$D(t)$ は残響時間によって異なる値を持つことが確認され, 異なる音場や周波数間での反射音の特異性を比較することが困難である. 室に起因する影響を除去するために基準化を行う必要がある. 羽入[2]は評価区間内での $D(t)$ の二乗平均平方根を用いて基準化を試みている. さらに, 既報[3,4]では基準値として, A) 減衰曲線における 0 dB 点と -60 dB 点の結線の勾配 \bar{D}_{60} , B) 10 dB 減衰毎の結線の勾配 $\bar{D}_{10}(t)$ を設定し, 比較検討を行った. その結果, 湾曲減衰の場合は B の方が反射音の特異性を強調できるが, 結線区間に急峻な湾曲が含まれる場合に評価を誤る可能性が示唆された.

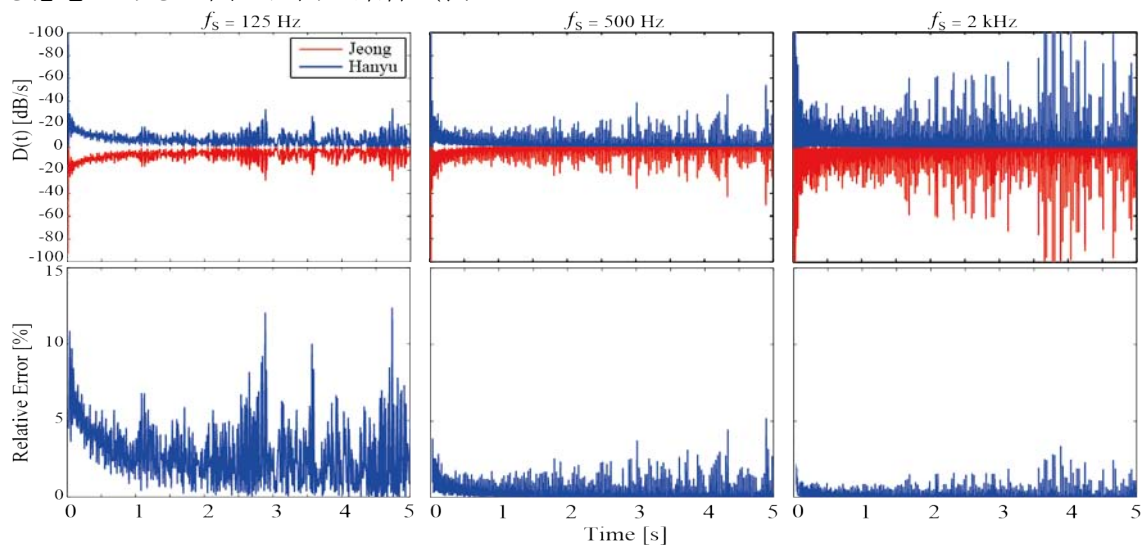


Fig. 1. Upper : Comparison of $\bar{D}(t)$ with the two methods at three sampling frequencies ; Lower : relative error.

* Evaluation of the reflected sound structure in the room impulse response - Decay removal using nonlinear regression, by TAKESHITA Keigo, EDA Kazushi and SAKUMA Tetsuya (Univ. of Tokyo).

本報では、Xiang[5]が提案する減衰曲線の非線形回帰手法を応用した基準化の手法を提案する。以下に手順を示す。

減衰曲線 $L(t)$ に対し、求める回帰曲線を $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ としたとき、測定時間 T における、評価関数 $G(\mathbf{x})$ は以下のように示される。

$$G(\mathbf{x}) = \int_{t=0}^T (\tilde{L}(\mathbf{x}, t) - L(t))^2 dt \quad (3)$$

上記の評価関数が最小となるようなパラメータ \mathbf{x} を求めることで、回帰曲線を得る。得られた $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ から、 $\langle h^2(t) \rangle$ を推定したエネルギー応答 $\langle \tilde{h}^2(t) \rangle$ を次のように定義する。

$$\langle \tilde{h}^2(t) \rangle = 10^{\frac{\tilde{L}(\mathbf{x}, t)}{10}} \quad (4)$$

よって、基準化に用いる $\overline{D(t)}$ は、

$$\overline{D(t)} = \frac{d\tilde{L}(\mathbf{x}, t)}{dt} = -\frac{10}{\ln 10} \frac{\langle \tilde{h}^2(t) \rangle'}{\langle \tilde{h}^2(t) \rangle} \quad (5)$$

と表され、これを用いて $D(t)$ 基準化し、 $d(t)$ を算出する。

$$d(t) = \frac{D(t)}{\overline{D(t)}} \quad (6)$$

本報では、湾曲減衰を考慮するために、回帰曲線 $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ を3つの指数減衰（式(7)）と2つの指数減衰とべき乗減衰（式(8)）の2つのモデルを設定した。

$$\tilde{L}_1(x, t) = 10 \log_{10}(x_1 e^{-x_2 t} + x_3 e^{-x_4 t} + x_5 e^{-x_6 t}) \quad (7)$$

$$\tilde{L}_2(x, t) = 10 \log_{10}(x_1 e^{-x_2 t} + x_3 e^{-x_4 t} + x_5 (T - t)) \quad (8)$$

式(7)を用いて幾何音響解析による検討を行い、式(8)を用いて実測による検討を行った。なお、式(8)の第3項は暗騒音の時間成長を表している。式(8)による基準化には、第3項を除いた値を用いて基準値 $\overline{D(t)}$ を算出した。

3.2 幾何音響解析（音線法）による検討

室条件は、室容積 1000 m^3 、吸音面積 210 m^2 の矩形室に対して、アスペクト比と吸音分布が均等・偏在となる4条件を設定する（表1）。全条件で Sabine 式による残響時間は 0.77 s である。音源・受音球は室中央、音線数 10^6 本。サンプリング周波数 $f_s = 1 \text{ kHz}$ 、打ち切り時刻 7.5 s とする。なお、乱反射率は全面0とし、直接音は除くこととする。評価区間は、減衰曲線が -60 dB 減衰するまでの時間とする。

減衰性状 結果を図2に示す。Case 1aを除き、他の条件では湾曲が見られる。特に直方体・吸音偏在の Case 2b で顕著である。非線形回帰曲線による減衰曲線の推定は室条件に依らず概ねできている。Case 1a では、直線減衰しているため、2つの指数減衰によって近似されている。他の条件では3つの指数減衰によって湾曲も含めて概ね近似されている。

Table 1. Conditions of rectangular rooms.

Case	L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	α_x	α_y	α_z	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

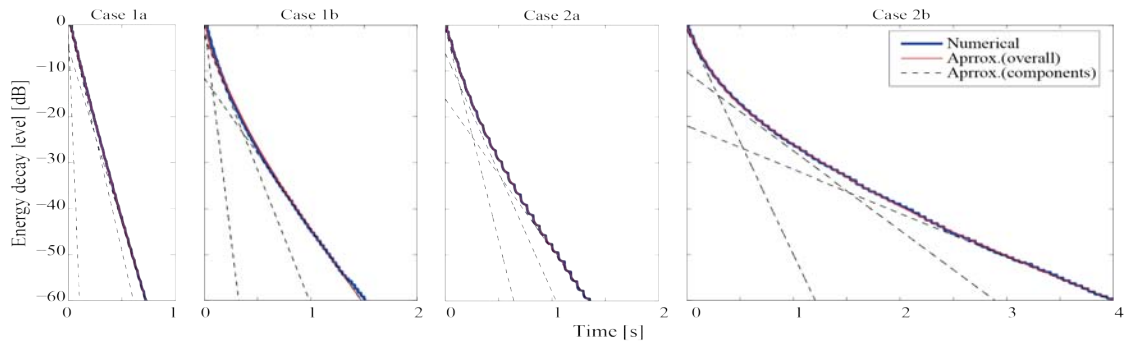


Fig. 2. Backward integrated decay curves at 4 Cases.

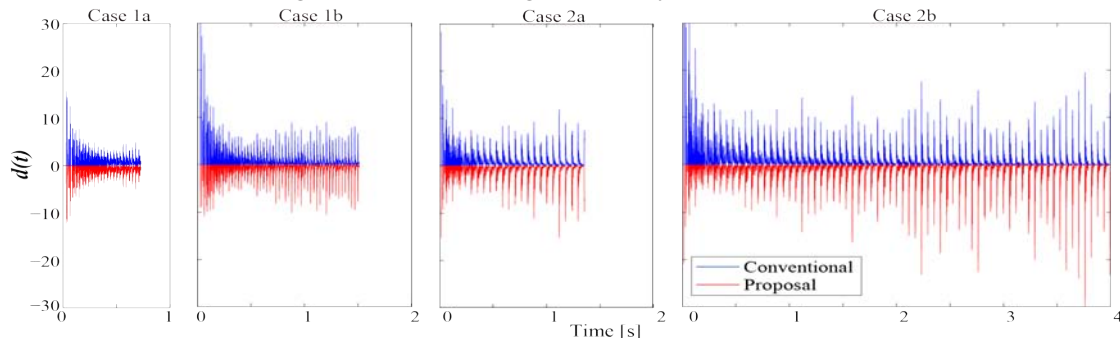


Fig. 3. $d(t)$ normalized by $\overline{D(t)}$ at 4 Cases.

特異反射音性状 異なる基準値によって算出した $d(t)$ を図 3 に示す(青が従来手法[1,2], 赤が提案手法). 基準値に依らず, Case 1a では時間が経過するにつれ全体的に値が小さくなっている. 湾曲している他の条件においては後期時間で $d(t)$ の値が大きくなっており, 平行壁間での交互反射の特異性がより顕著に示してされている. 特に湾曲が強い Case 2b ではその傾向が現れている. 基準値の違いについては, 回帰曲線を用いることで, 相対的に初期では値が小さく, 後期での値が大きくなり, 反射音の特異性を強調して表現できていると考えられる. また, 既報[4,5]で示唆された湾曲点付近での値の不連続な変化は見られないため, 減衰性状に依らず特異反射音構造を抽出することができていると考えられる.

壁面拡散の影響 減衰の湾曲が顕著な Case 2b について, 乱反射率を全面一律に 0.1, 0.2, 0.4 と変化させた場合の結果を図 4,5 に示す. なお, 減衰曲線の収束が悪いため, 音線数を 10^7 本とした. 減衰曲線(図 4)については, 乱反射率が大きいほど湾曲が低減され, 0.4 でほぼ直線になっている. 回帰曲線も減衰曲線が直線に近づくにつれ, 少ない項数の指数減衰で表現できていることは上節と対応する. 特異反射音構造(図 5)については, 乱反射率が大きいほど値が小さくなっており, 反射音の特異性が低減されている

ことがわかる. 概ね直線減衰している乱反射率が 0.4 の場合には, 基準値に依らず同様の傾向が見られる.

3.3 実測による検討

図 6 に示す小会議室を対象として, インパルス応答測定を行う. 吸音条件については, 吸音材なし (Case A) と吸音材を平行 2 壁設置 (Case B) の 2 条件を設定する. 室内の基本条件として, 壁はスチール製間仕切り 3 面・石膏ボード張り 1 面, 床はビニールシート, 天井は岩綿吸音板の仕上げであり, 室中央に机及び椅子 4 脚を配置した. サンプル周波数 48 kHz, 応答長 1.37s として測定し, 全周波数帯域の他, 得られた

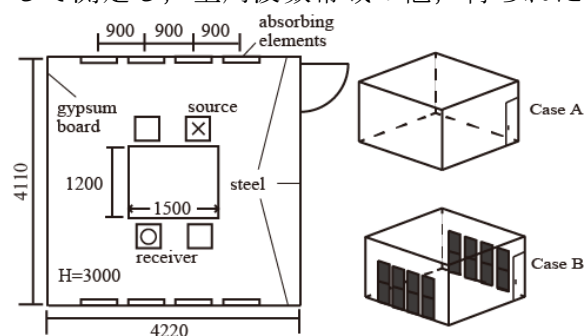


Fig. 6. Plan of the meeting room and absorption conditions.

Table 2. Reverberation times (unit : s)

Case	A.P.	125 Hz	500 Hz	2 kHz
A	0.96	0.97	0.96	0.76
B	0.64	0.84	0.50	0.54

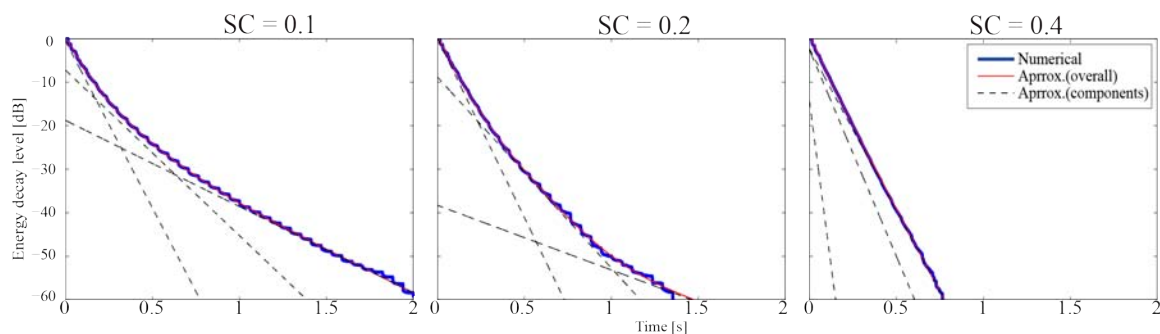


Fig. 4. Backward integrated decay curves with changing scattering coefficients.

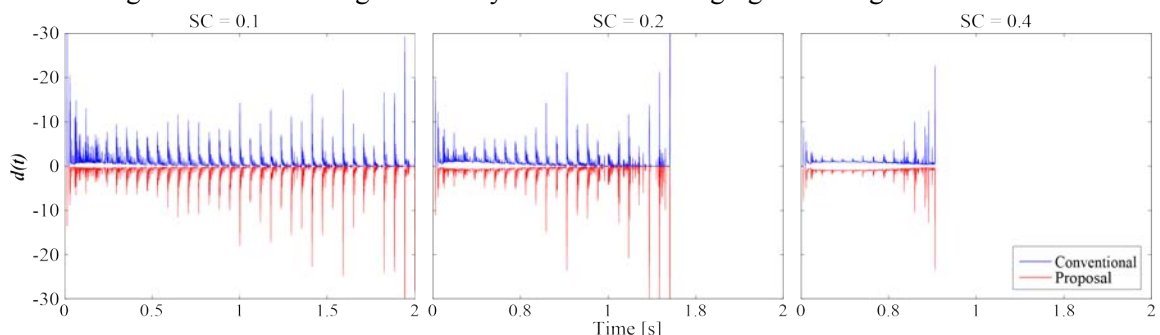


Fig. 5. $d(t)$ normalized by $\overline{D(t)}$ with changing scattering coefficients.

応答に中心周波数 125, 500, 2k Hz の 1 オクターブバンドフィルタリング処理を施した 3 つの周波数帯域での $d(t)$ を算出する．評価区間は，減衰曲線が -70 dB 減衰するまでの時間とする．

残響時間 残響時間を表 2 に示す．吸音材なしに比べて，吸音材を設置した条件では残響時間が短くなっている．その他の音響特性については文献[7]を参照されたい．

減衰性状 結果を図 7 に示す．条件に依らず，All Pass の場合は暗騒音の影響によって曲線が湾曲していると考えられる．また，Case B の All Pass を除いた他の条件では，ほぼ 1 つの指数減衰とべき乗減衰によって表現されていることが確認できる．

特異反射音性状 結果を図 8 に示す．なお，図中における網掛部は暗騒音であり反射音の評価ができない区間を示している．従来手法と提案手法ではどの条件においても傾向が類似している．これはノイズ部を除き

減衰がほぼ直線的に減衰しているためであると考えられ，湾曲減衰の場合には上節のような傾向が見られると推察される．絶対値については，提案手法は従来手法に比べ $d(t)$ の値が小さくなっており，従来手法ではノイズ部や応答の打ち切りも含めた基準値を用いているため，特異反射音の過大評価をしていると考えられる．

4 おわりに

非線形回帰曲線による基準化を行うことで，減衰性状や暗騒音によらず，反射音の特異性を評価できる可能性を示唆した．今後は周波数特性の考慮や，指標の評価方法を検討する．

参考文献

- [1] C.-H. Jeong, *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*, **132**, 1427-1435, 2012.
- [2] 羽入他, AIJ 梗概集 D-1, 183-184, 2012.
- [3] C. Huszty, *Ph. D. dissetation*, Univ. of Tokyo, 2012.
- [4] 江田他, AIJ 梗概集, D-1, 157-158, 2013.
- [5] 竹下他, AIJ 梗概集, D-1, 159-160, 2013.
- [6] N. Xiang, *J. Acoust. Soc. Am.*, **98**, 2112-2121, 1995.
- [7] 佐久間, AIJ 梗概集 D-1, 165-166 2013.

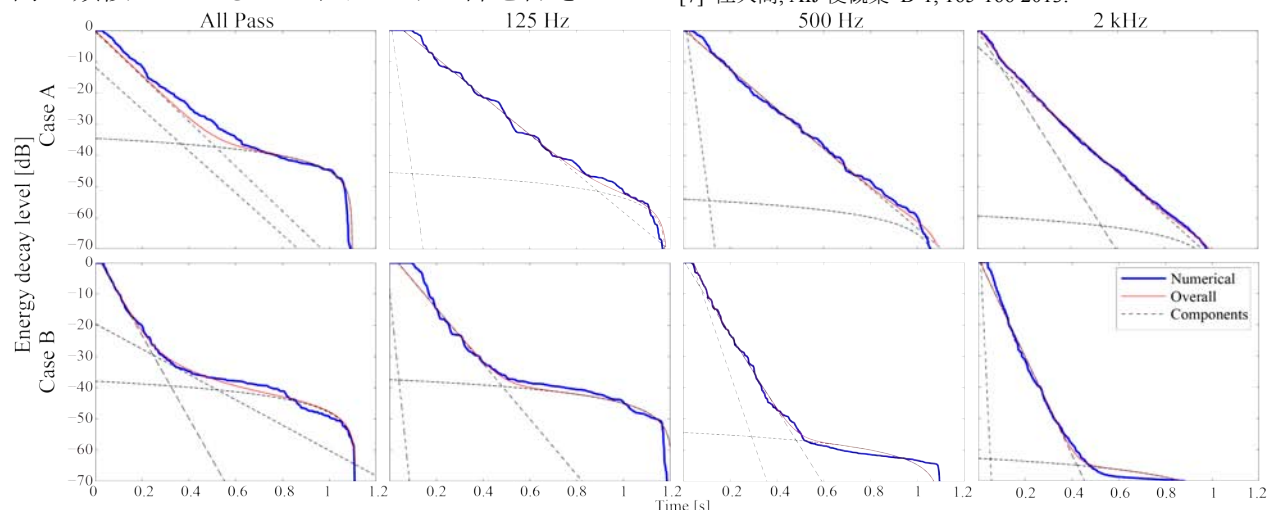


Fig. 7. Backward integrated decay curves at 4 frequency bands (Case A and Case B) .

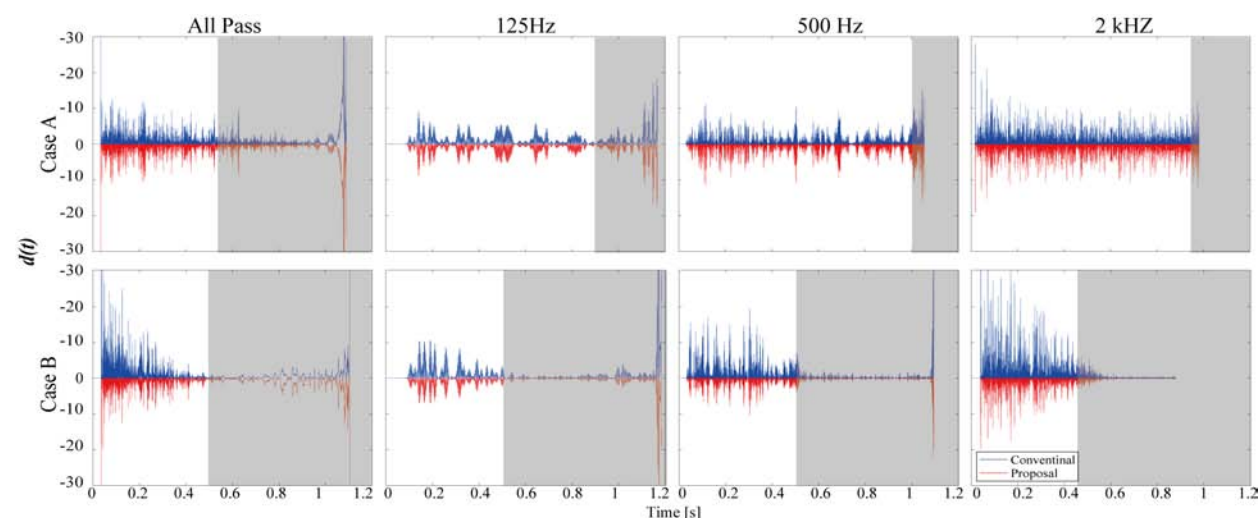


Fig. 8. $d(t)$ normalized by $\overline{D(t)}$ at 4 frequency bands (Case A and Case B).

室内音響インパルス応答の時空間特性に関する研究
—反射音構造分析の基礎的検討—
Study on spatio-temporal properties of room impulse responses
— Analysis of reflected sound structure —

江田和司, 竹下圭悟, 佐久間哲哉
K. Eda, K. Takeshita and T. Sakuma

東京大学大学院新領域創成科学研究科
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

内容概要 近年、音場拡散評価やエコー検出を目的として、インパルス応答から減衰の影響を除去した反射音構造を算出する方法が提案されている。本報では、この反射音構造の算出方法と基本的性状に関して、数値解析および実測を通じた基礎的な検討を行った。その結果、算出時に用いる基準減衰率として減衰の湾曲性を考慮した値を用いることで、評価区間に依存せずに、また、平均的な減衰性状に対する到来反射音の特異性の程度をより正確に表す値を算出することができた。また、周波数帯域分析時には帯域幅に依存して値が変化することが示唆された。今後の課題としては、算出された反射音構造の評価が挙げられる。

1. はじめに

近年、音場拡散評価やエコー検出を目的として、インパルス応答から減衰の影響を除去した反射音構造を算出する方法が提案されている[1-3]。本報では、各算出手法を概観し、その基本的性質に関して数値解析手法を用いた基礎的な検討を行い、最後に実測例を紹介する。

2. 減衰を除去した反射音構造の算出方法

Jeong[2]は、インパルス応答積分法によって得られた残響減衰曲線における急峻な変化が強い反射音を表しているとして、残響減衰曲線の瞬時の傾き(瞬時減衰率)を算出した(式(1))。

$$D(t) = \{L(t + \Delta t) - L(t)\} / \Delta t \quad (1)$$

但し、 $L(t) = 10 \log_{10} \langle h^2(t) \rangle$ 、 $\langle h^2(t) \rangle = \int_t^\infty g^2(\tau) d\tau$ 、 $g(t)$ は室内インパルス応答。 $D(t)$ の単位はdB/sであり、直線減衰時には一定値、湾曲減衰時には単調減少を示す。また、式(1)は $\Delta t \rightarrow 0$ のとき、

$$D(t) = \frac{dL(t)}{dt} = -\frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{g^2(t)}{\langle h^2(t) \rangle} \quad (2)$$

となり、羽入[3]が提案する音圧の二乗値を逆二乗積

分値で除する手法と係数を除いて一致する。また、インパルス応答積分法の冪指数を変化させ、突出した反射音を増幅する方法が提案されている[1]。

2.1. 基準化

瞬時減衰率 $D(t)$ について平均的な減衰率 \bar{D} に対する比を算出することで残響の長さによる影響を除去することができる。基準化後の $D(t)$ を瞬時減衰率比 $d(t) (= D(t) / \bar{D})$ と称する。既往例[2,3]では、基準減衰率として評価区間内の $D(t)$ の平均値、即ち評価区間内で直線減衰を仮定した場合の減衰率が用いられているが、評価区間の設定は試行段階にあるように見える。そのため、湾曲減衰を考慮した基準減衰率を用いることで評価区間に依存せずに、また、平均的な減衰性状に対する到来反射音の特異性の程度をより正確に表す値を算出できると考えられる。

3. 基準減衰率に関する検討

3.1. 検討方法

本節では、2種類の基準減衰率 \bar{D} を設定し、比較検討を行う。基準減衰率は、A) 残響減衰曲線における 0 dB 点と -60 dB 点を結ぶ直線の勾配 \bar{D}_{60} 、

B) 残響減衰曲線に対して非線形回帰を施した曲線の瞬時減衰率 $\bar{D}(t)$ とする。

回帰手法 残響減衰曲線 $L(t)$ に対して、3種の指数減衰で表される曲線 $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ を仮定して回帰する。

$$\tilde{L}(\mathbf{x}, t) = 10 \log_{10} (x_1 e^{-x_2 t} + x_3 e^{-x_4 t} + x_5 e^{-x_6 t}) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 。回帰区間を時刻 $t = 0$ to T とし、次式で表される誤差関数が最小となるときの \mathbf{x} を求める。

$$G(\mathbf{x}) = \int_{t=0}^T (\tilde{L}(\mathbf{x}, t) - L(t))^2 dt \quad (4)$$

室条件 室容積 1000 m^3 ，吸音面積 210 m^2 の矩形室に対して、アスペクト比と吸音分布が均等・不均等となる4条件を設定する（表1）。全条件で Sabine 式による残響時間は 0.77 s である。音源・受音球を室中央に設定し、音線法解析を行う。音線数 10^6 本，時間離散化幅 1 ms ，計算の打ち切り時刻 7.5 s とする。尚，直接音は除くこととし，反射音構造の評価区間は 60 dB 減衰時刻までとする。

Table 1. Conditions of rectangular rooms.

Case	L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	α_x	α_y	α_z	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

3.2. 結果と考察

残響減衰性状 図1にエネルギー応答曲線と残響減衰曲線を示す。立方体・均等吸音の Case 1a では，両曲線とも概ね直線減衰を示しているが，他条件では湾曲し，室アスペクト比・吸音分布ともに不均等の Case 2b で顕著である。 α/L が等しい Case 1b と Case 2a の残響減衰曲線は概ね類似しているが，エ

ネルギー応答曲線については，Case 1b に比べ Case 2a では突出した反射音が周期的に表れている。伝搬距離の大きい壁間での交互反射の影響であると考えられる。回帰曲線については，図2に示す通り，室条件によらず残響減衰曲線を概ね近似していることがわかる。特に，直線的に減衰する Case 1a であっても2種の直線によりわずかな湾曲を捉えている。

瞬時減衰率比 結果を図3に示す。瞬時減衰率 $D(t)$

(O) は室条件によらず，初期では反射音密度が疎かつ減衰が迅速なため値が大きく，後期では条件毎にそれぞれ概ね一定の値を変動している。瞬時減衰率比 $d(t)$ については，基準減衰率として \bar{D}_{60} を用いた場合 (A) には，減衰の湾曲が大きい条件ほどやや大きな値を示すが，時間的な変動は小さい。 $\bar{D}(t)$ を用いた場合 (B) には，直線減衰する Case 1a では基準減衰率による違いは見られないが，他の条件では後期時刻に，または減衰の湾曲が大きい場合に値が大きくなっており，平行壁間の交互反射の影響が時々刻々と強まることが表されていると考えられる。

乱反射率の影響 残響減衰曲線の湾曲が顕著な Case 2b を対象として，全ての面に乱反射率 $s = 0.1, 0.2, 0.4$ を与えた場合の結果を図4に示す。尚，音線数は 10^7 本とし， $d(t)$ 算出における基準減衰率は $\bar{D}(t)$ とした。残響減衰曲線については，乱反射率が大きくなるに従って湾曲が軽減され，乱反射率 0.4 では概ね直線的に減衰している。 $d(t)$ については，乱反射率の増大とともに初期の値が小さくなり，乱反射率 0.4 では概ね1に収束する。尚，後期で $d(t)$ 値が上昇するのは，音線数の不足に伴う残響減衰曲線の収束性の悪化に起因すると考えられる。

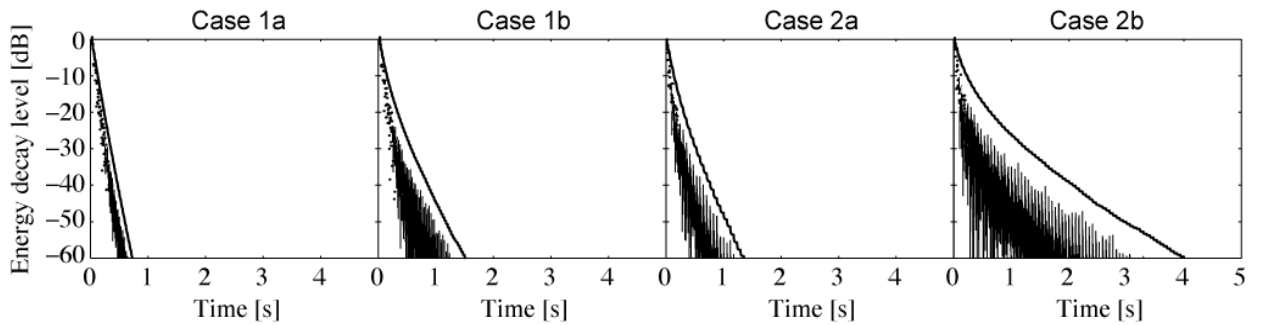


Fig. 1: Energy-time curves obtained by ray tracing simulation, backward integrated decay curves.

B) 残響減衰曲線に対して非線形回帰を施した曲線の瞬時減衰率 $\bar{D}(t)$ とする。

回帰手法 残響減衰曲線 $L(t)$ に対して、3種の指数減衰で表される曲線 $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ を仮定して回帰する。

$$\tilde{L}(\mathbf{x}, t) = 10 \log_{10} (x_1 e^{-x_2 t} + x_3 e^{-x_4 t} + x_5 e^{-x_6 t}) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 。回帰区間を時刻 $t = 0$ to T とし、次式で表される誤差関数が最小となるときの \mathbf{x} を求める。

$$G(\mathbf{x}) = \int_{t=0}^T (\tilde{L}(\mathbf{x}, t) - L(t))^2 dt \quad (4)$$

室条件 室容積 1000 m^3 ，吸音面積 210 m^2 の矩形室に対して、アスペクト比と吸音分布が均等・不均等となる4条件を設定する（表1）。全条件で Sabine 式による残響時間は 0.77 s である。音源・受音球を室中央に設定し、音線法解析を行う。音線数 10^6 本，時間離散化幅 1 ms ，計算の打ち切り時刻 7.5 s とする。尚，直接音は除くこととし，反射音構造の評価区間は 60 dB 減衰時刻までとする。

Table 1. Conditions of rectangular rooms.

Case	L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	α_x	α_y	α_z	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

3.2. 結果と考察

残響減衰性状 図1にエネルギー応答曲線と残響減衰曲線を示す。立方体・均等吸音の Case 1a では，両曲線とも概ね直線減衰を示しているが，他条件では湾曲し，室アスペクト比・吸音分布ともに不均等の Case 2b で顕著である。 α/L が等しい Case 1b と Case 2a の残響減衰曲線は概ね類似しているが，エ

ネルギー応答曲線については，Case 1b に比べ Case 2a では突出した反射音が周期的に表れている。伝搬距離の大きい壁間での交互反射の影響であると考えられる。回帰曲線については，図2に示す通り，室条件によらず残響減衰曲線を概ね近似していることがわかる。特に，直線的に減衰する Case 1a であっても2種の直線によりわずかな湾曲を捉えている。

瞬時減衰率比 結果を図3に示す。瞬時減衰率 $D(t)$

(O) は室条件によらず，初期では反射音密度が疎かつ減衰が迅速なため値が大きく，後期では条件毎にそれぞれ概ね一定の値を変動している。瞬時減衰率比 $d(t)$ については，基準減衰率として \bar{D}_{60} を用いた場合 (A) には，減衰の湾曲が大きい条件ほどやや大きな値を示すが，時間的な変動は小さい。 $\bar{D}(t)$ を用いた場合 (B) には，直線減衰する Case 1a では基準減衰率による違いは見られないが，他の条件では後期時刻に，または減衰の湾曲が大きい場合に値が大きくなっており，平行壁間の交互反射の影響が時々刻々と強まることが表されていると考えられる。

乱反射率の影響 残響減衰曲線の湾曲が顕著な Case 2b を対象として，全ての面に乱反射率 $s = 0.1, 0.2, 0.4$ を与えた場合の結果を図4に示す。尚，音線数は 10^7 本とし， $d(t)$ 算出における基準減衰率は $\bar{D}(t)$ とした。残響減衰曲線については，乱反射率が大きくなるに従って湾曲が軽減され，乱反射率 0.4 では概ね直線的に減衰している。 $d(t)$ については，乱反射率の増大とともに初期の値が小さくなり，乱反射率 0.4 では概ね1に収束する。尚，後期で $d(t)$ 値が上昇するのは，音線数の不足に伴う残響減衰曲線の収束性の悪化に起因すると考えられる。

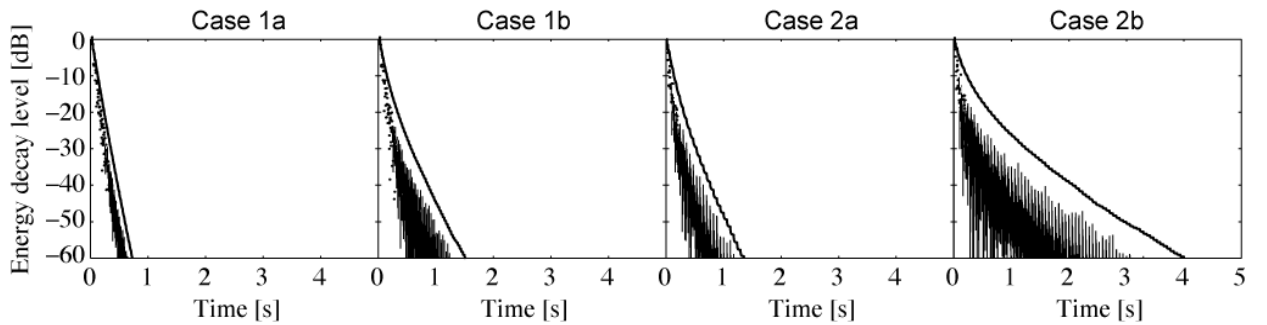


Fig. 1: Energy-time curves obtained by ray tracing simulation, backward integrated decay curves.

B) 残響減衰曲線に対して非線形回帰を施した曲線の瞬時減衰率 $\bar{D}(t)$ とする。

回帰手法 残響減衰曲線 $L(t)$ に対して、3種の指数減衰で表される曲線 $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ を仮定して回帰する。

$$\tilde{L}(\mathbf{x}, t) = 10 \log_{10} (x_1 e^{-x_2 t} + x_3 e^{-x_4 t} + x_5 e^{-x_6 t}) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 。回帰区間を時刻 $t = 0$ to T とし、次式で表される誤差関数が最小となるときの \mathbf{x} を求める。

$$G(\mathbf{x}) = \int_{t=0}^T (\tilde{L}(\mathbf{x}, t) - L(t))^2 dt \quad (4)$$

室条件 室容積 1000 m^3 ，吸音面積 210 m^2 の矩形室に対して、アスペクト比と吸音分布が均等・不均等となる4条件を設定する（表1）。全条件で Sabine 式による残響時間は 0.77 s である。音源・受音球を室中央に設定し、音線法解析を行う。音線数 10^6 本，時間離散化幅 1 ms ，計算の打ち切り時刻 7.5 s とする。尚，直接音は除くこととし，反射音構造の評価区間は 60 dB 減衰時刻までとする。

Table 1. Conditions of rectangular rooms.

Case	L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	α_x	α_y	α_z	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

3.2. 結果と考察

残響減衰性状 図1にエネルギー応答曲線と残響減衰曲線を示す。立方体・均等吸音の Case 1a では，両曲線とも概ね直線減衰を示しているが，他条件では湾曲し，室アスペクト比・吸音分布ともに不均等の Case 2b で顕著である。 α/L が等しい Case 1b と Case 2a の残響減衰曲線は概ね類似しているが，エ

ネルギー応答曲線については，Case 1b に比べ Case 2a では突出した反射音が周期的に表れている。伝搬距離の大きい壁間での交互反射の影響であると考えられる。回帰曲線については，図2に示す通り，室条件によらず残響減衰曲線を概ね近似していることがわかる。特に，直線的に減衰する Case 1a であっても2種の直線によりわずかな湾曲を捉えている。

瞬時減衰率比 結果を図3に示す。瞬時減衰率 $D(t)$

(O) は室条件によらず，初期では反射音密度が疎かつ減衰が迅速なため値が大きく，後期では条件毎にそれぞれ概ね一定の値を変動している。瞬時減衰率比 $d(t)$ については，基準減衰率として \bar{D}_{60} を用いた場合 (A) には，減衰の湾曲が大きい条件ほどやや大きな値を示すが，時間的な変動は小さい。 $\bar{D}(t)$ を用いた場合 (B) には，直線減衰する Case 1a では基準減衰率による違いは見られないが，他の条件では後期時刻に，または減衰の湾曲が大きい場合に値が大きくなっており，平行壁間の交互反射の影響が時々刻々と強まることが表されていると考えられる。

乱反射率の影響 残響減衰曲線の湾曲が顕著な Case 2b を対象として，全ての面に乱反射率 $s = 0.1, 0.2, 0.4$ を与えた場合の結果を図4に示す。尚，音線数は 10^7 本とし， $d(t)$ 算出における基準減衰率は $\bar{D}(t)$ とした。残響減衰曲線については，乱反射率が大きくなるに従って湾曲が軽減され，乱反射率 0.4 では概ね直線的に減衰している。 $d(t)$ については，乱反射率の増大とともに初期の値が小さくなり，乱反射率 0.4 では概ね1に収束する。尚，後期で $d(t)$ 値が上昇するのは，音線数の不足に伴う残響減衰曲線の収束性の悪化に起因すると考えられる。

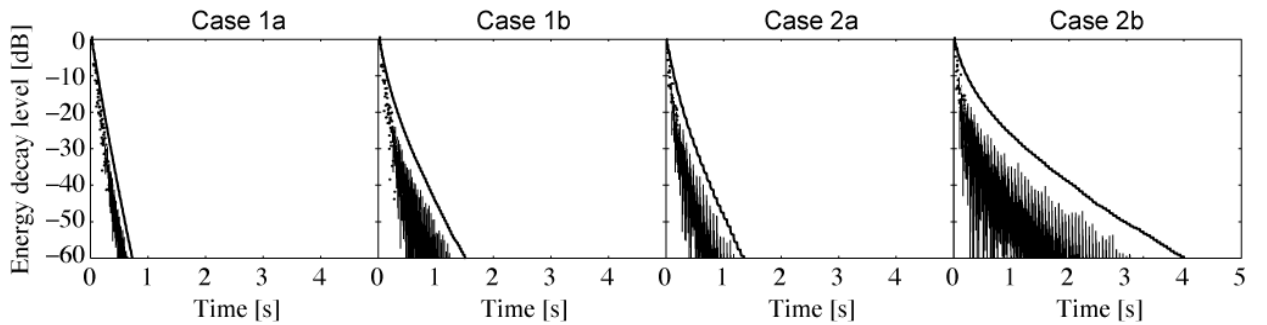


Fig. 1: Energy-time curves obtained by ray tracing simulation, backward integrated decay curves.

B) 残響減衰曲線に対して非線形回帰を施した曲線の瞬時減衰率 $\bar{D}(t)$ とする。

回帰手法 残響減衰曲線 $L(t)$ に対して、3種の指数減衰で表される曲線 $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ を仮定して回帰する。

$$\tilde{L}(\mathbf{x}, t) = 10 \log_{10} (x_1 e^{-x_2 t} + x_3 e^{-x_4 t} + x_5 e^{-x_6 t}) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 。回帰区間を時刻 $t = 0$ to T とし、次式で表される誤差関数が最小となるときの \mathbf{x} を求める。

$$G(\mathbf{x}) = \int_{t=0}^T (\tilde{L}(\mathbf{x}, t) - L(t))^2 dt \quad (4)$$

室条件 室容積 1000 m^3 ，吸音面積 210 m^2 の矩形室に対して、アスペクト比と吸音分布が均等・不均等となる4条件を設定する（表1）。全条件で Sabine 式による残響時間は 0.77 s である。音源・受音球を室中央に設定し、音線法解析を行う。音線数 10^6 本，時間離散化幅 1 ms ，計算の打ち切り時刻 7.5 s とする。尚，直接音は除くこととし，反射音構造の評価区間は 60 dB 減衰時刻までとする。

Table 1. Conditions of rectangular rooms.

Case	L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	α_x	α_y	α_z	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

3.2. 結果と考察

残響減衰性状 図1にエネルギー応答曲線と残響減衰曲線を示す。立方体・均等吸音の Case 1a では，両曲線とも概ね直線減衰を示しているが，他条件では湾曲し，室アスペクト比・吸音分布ともに不均等の Case 2b で顕著である。 α/L が等しい Case 1b と Case 2a の残響減衰曲線は概ね類似しているが，エ

ネルギー応答曲線については，Case 1b に比べ Case 2a では突出した反射音が周期的に表れている。伝搬距離の大きい壁間での交互反射の影響であると考えられる。回帰曲線については，図2に示す通り，室条件によらず残響減衰曲線を概ね近似していることがわかる。特に，直線的に減衰する Case 1a であっても2種の直線によりわずかな湾曲を捉えている。

瞬時減衰率比 結果を図3に示す。瞬時減衰率 $D(t)$

(O) は室条件によらず，初期では反射音密度が疎かつ減衰が迅速なため値が大きく，後期では条件毎にそれぞれ概ね一定の値を変動している。瞬時減衰率比 $d(t)$ については，基準減衰率として \bar{D}_{60} を用いた場合 (A) には，減衰の湾曲が大きい条件ほどやや大きな値を示すが，時間的な変動は小さい。 $\bar{D}(t)$ を用いた場合 (B) には，直線減衰する Case 1a では基準減衰率による違いは見られないが，他の条件では後期時刻に，または減衰の湾曲が大きい場合に値が大きくなっており，平行壁間の交互反射の影響が時々刻々と強まることが表されていると考えられる。

乱反射率の影響 残響減衰曲線の湾曲が顕著な Case 2b を対象として，全ての面に乱反射率 $s = 0.1, 0.2, 0.4$ を与えた場合の結果を図4に示す。尚，音線数は 10^7 本とし， $d(t)$ 算出における基準減衰率は $\bar{D}(t)$ とした。残響減衰曲線については，乱反射率が大きくなるに従って湾曲が軽減され，乱反射率 0.4 では概ね直線的に減衰している。 $d(t)$ については，乱反射率の増大とともに初期の値が小さくなり，乱反射率 0.4 では概ね1に収束する。尚，後期で $d(t)$ 値が上昇するのは，音線数の不足に伴う残響減衰曲線の収束性の悪化に起因すると考えられる。

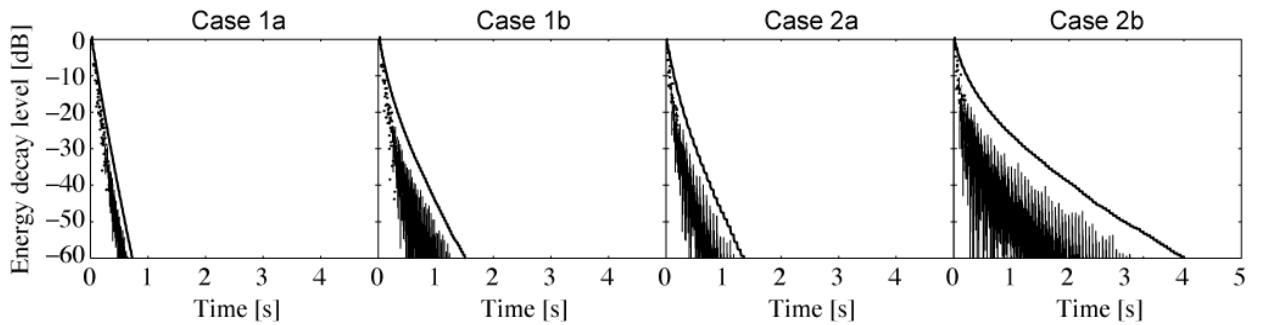


Fig. 1: Energy-time curves obtained by ray tracing simulation, backward integrated decay curves.

B) 残響減衰曲線に対して非線形回帰を施した曲線の瞬時減衰率 $\bar{D}(t)$ とする。

回帰手法 残響減衰曲線 $L(t)$ に対して、3種の指数減衰で表される曲線 $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ を仮定して回帰する。

$$\tilde{L}(\mathbf{x}, t) = 10 \log_{10} (x_1 e^{-x_2 t} + x_3 e^{-x_4 t} + x_5 e^{-x_6 t}) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 。回帰区間を時刻 $t = 0$ to T とし、次式で表される誤差関数が最小となるときの \mathbf{x} を求める。

$$G(\mathbf{x}) = \int_{t=0}^T (\tilde{L}(\mathbf{x}, t) - L(t))^2 dt \quad (4)$$

室条件 室容積 1000 m^3 ，吸音面積 210 m^2 の矩形室に対して、アスペクト比と吸音分布が均等・不均等となる4条件を設定する（表1）。全条件で Sabine 式による残響時間は 0.77 s である。音源・受音球を室中央に設定し、音線法解析を行う。音線数 10^6 本，時間離散化幅 1 ms ，計算の打ち切り時刻 7.5 s とする。尚，直接音は除くこととし，反射音構造の評価区間は 60 dB 減衰時刻までとする。

Table 1. Conditions of rectangular rooms.

Case	L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	α_x	α_y	α_z	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

3.2. 結果と考察

残響減衰性状 図1にエネルギー応答曲線と残響減衰曲線を示す。立方体・均等吸音の Case 1a では，両曲線とも概ね直線減衰を示しているが，他条件では湾曲し，室アスペクト比・吸音分布ともに不均等の Case 2b で顕著である。 α/L が等しい Case 1b と Case 2a の残響減衰曲線は概ね類似しているが，エ

ネルギー応答曲線については，Case 1b に比べ Case 2a では突出した反射音が周期的に表れている。伝搬距離の大きい壁間での交互反射の影響であると考えられる。回帰曲線については，図2に示す通り，室条件によらず残響減衰曲線を概ね近似していることがわかる。特に，直線的に減衰する Case 1a であっても2種の直線によりわずかな湾曲を捉えている。

瞬時減衰率比 結果を図3に示す。瞬時減衰率 $D(t)$

(O) は室条件によらず，初期では反射音密度が疎かつ減衰が迅速なため値が大きく，後期では条件毎にそれぞれ概ね一定の値を変動している。瞬時減衰率比 $d(t)$ については，基準減衰率として \bar{D}_{60} を用いた場合 (A) には，減衰の湾曲が大きい条件ほどやや大きな値を示すが，時間的な変動は小さい。 $\bar{D}(t)$ を用いた場合 (B) には，直線減衰する Case 1a では基準減衰率による違いは見られないが，他の条件では後期時刻に，または減衰の湾曲が大きい場合に値が大きくなっており，平行壁間の交互反射の影響が時々刻々と強まることが表されていると考えられる。

乱反射率の影響 残響減衰曲線の湾曲が顕著な Case 2b を対象として，全ての面に乱反射率 $s = 0.1, 0.2, 0.4$ を与えた場合の結果を図4に示す。尚，音線数は 10^7 本とし， $d(t)$ 算出における基準減衰率は $\bar{D}(t)$ とした。残響減衰曲線については，乱反射率が大きくなるに従って湾曲が軽減され，乱反射率 0.4 では概ね直線的に減衰している。 $d(t)$ については，乱反射率の増大とともに初期の値が小さくなり，乱反射率 0.4 では概ね1に収束する。尚，後期で $d(t)$ 値が上昇するのは，音線数の不足に伴う残響減衰曲線の収束性の悪化に起因すると考えられる。

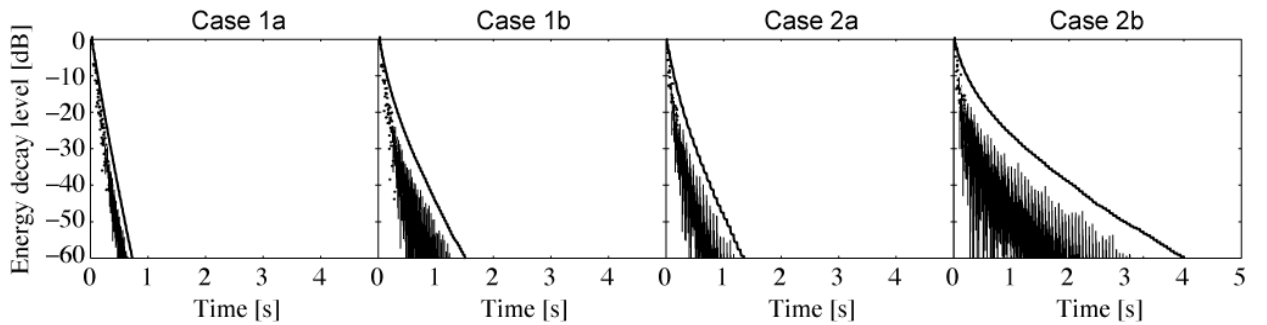


Fig. 1: Energy-time curves obtained by ray tracing simulation, backward integrated decay curves.

B) 残響減衰曲線に対して非線形回帰を施した曲線の瞬時減衰率 $\bar{D}(t)$ とする。

回帰手法 残響減衰曲線 $L(t)$ に対して、3種の指数減衰で表される曲線 $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ を仮定して回帰する。

$$\tilde{L}(\mathbf{x}, t) = 10 \log_{10} (x_1 e^{-x_2 t} + x_3 e^{-x_4 t} + x_5 e^{-x_6 t}) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 。回帰区間を時刻 $t = 0$ to T とし、次式で表される誤差関数が最小となるときの \mathbf{x} を求める。

$$G(\mathbf{x}) = \int_{t=0}^T (\tilde{L}(\mathbf{x}, t) - L(t))^2 dt \quad (4)$$

室条件 室容積 1000 m^3 ，吸音面積 210 m^2 の矩形室に対して、アスペクト比と吸音分布が均等・不均等となる4条件を設定する（表1）。全条件で Sabine 式による残響時間は 0.77 s である。音源・受音球を室中央に設定し、音線法解析を行う。音線数 10^6 本，時間離散化幅 1 ms ，計算の打ち切り時刻 7.5 s とする。尚，直接音は除くこととし，反射音構造の評価区間は 60 dB 減衰時刻までとする。

Table 1. Conditions of rectangular rooms.

Case	L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	α_x	α_y	α_z	Ratio α/L
1a	10	10	10	0.35	0.35	0.35	1:1:1
1b	10	10	10	0.15	0.30	0.60	1:2:4
2a	20	10	5	0.30	0.30	0.30	1:2:4
2b	20	10	5	0.10	0.20	0.40	1:4:16

3.2. 結果と考察

残響減衰性状 図1にエネルギー応答曲線と残響減衰曲線を示す。立方体・均等吸音の Case 1a では，両曲線とも概ね直線減衰を示しているが，他条件では湾曲し，室アスペクト比・吸音分布ともに不均等の Case 2b で顕著である。 α/L が等しい Case 1b と Case 2a の残響減衰曲線は概ね類似しているが，エ

ネルギー応答曲線については，Case 1b に比べ Case 2a では突出した反射音が周期的に表れている。伝搬距離の大きい壁間での交互反射の影響であると考えられる。回帰曲線については，図2に示す通り，室条件によらず残響減衰曲線を概ね近似していることがわかる。特に，直線的に減衰する Case 1a であっても2種の直線によりわずかな湾曲を捉えている。

瞬時減衰率比 結果を図3に示す。瞬時減衰率 $D(t)$

(O) は室条件によらず，初期では反射音密度が疎かつ減衰が迅速なため値が大きく，後期では条件毎にそれぞれ概ね一定の値を変動している。瞬時減衰率比 $d(t)$ については，基準減衰率として \bar{D}_{60} を用いた場合 (A) には，減衰の湾曲が大きい条件ほどやや大きな値を示すが，時間的な変動は小さい。 $\bar{D}(t)$ を用いた場合 (B) には，直線減衰する Case 1a では基準減衰率による違いは見られないが，他の条件では後期時刻に，または減衰の湾曲が大きい場合に値が大きくなっており，平行壁間の交互反射の影響が時々刻々と強まることが表されていると考えられる。

乱反射率の影響 残響減衰曲線の湾曲が顕著な Case 2b を対象として，全ての面に乱反射率 $s = 0.1, 0.2, 0.4$ を与えた場合の結果を図4に示す。尚，音線数は 10^7 本とし， $d(t)$ 算出における基準減衰率は $\bar{D}(t)$ とした。残響減衰曲線については，乱反射率が大きくなるに従って湾曲が軽減され，乱反射率 0.4 では概ね直線的に減衰している。 $d(t)$ については，乱反射率の増大とともに初期の値が小さくなり，乱反射率 0.4 では概ね1に収束する。尚，後期で $d(t)$ 値が上昇するのは，音線数の不足に伴う残響減衰曲線の収束性の悪化に起因すると考えられる。

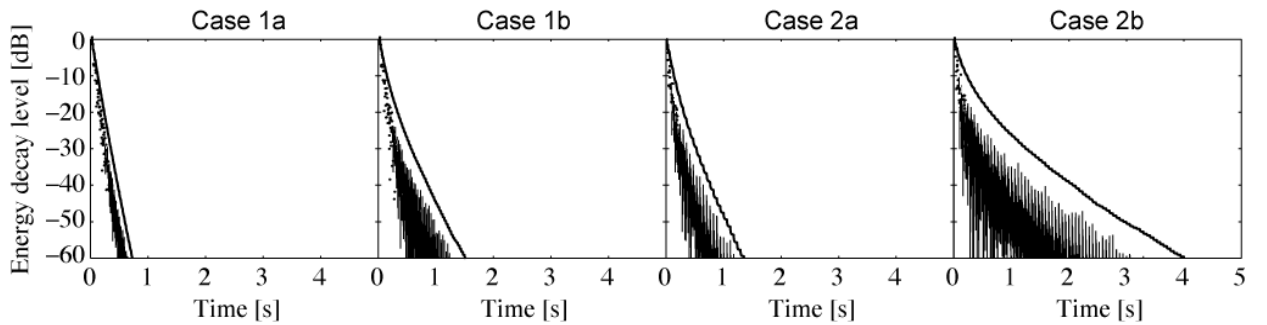


Fig. 1: Energy-time curves obtained by ray tracing simulation, backward integrated decay curves.

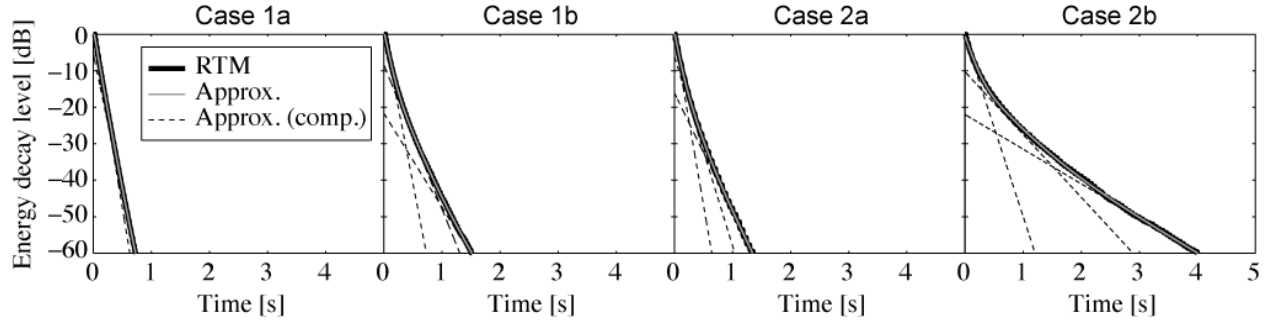


Fig. 2: Energy decay curves and their approximation curves.

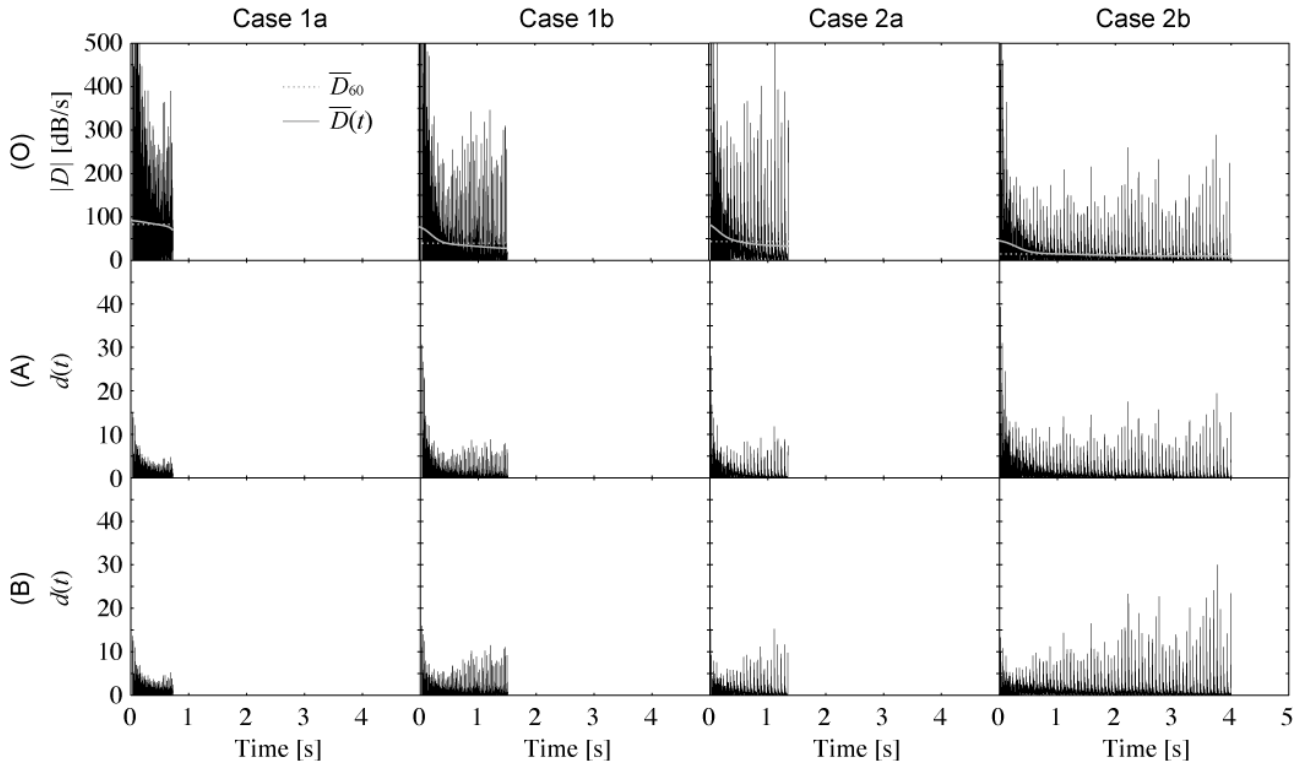


Fig. 3: Instantaneous decay rates $D(t)$ (O), and instantaneous decay ratio $d(t)$ using \bar{D}_{60} (A) and $\bar{D}(t)$ (B).

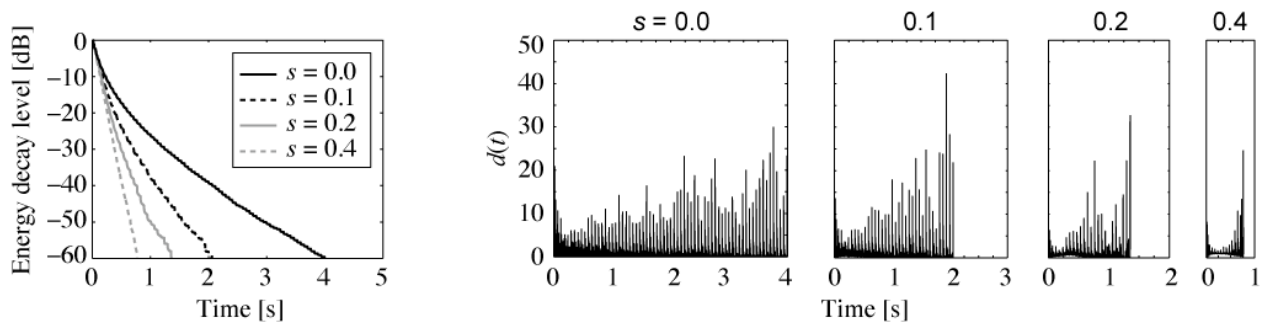


Fig. 4: Reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB) and instantaneous decay ratio $d(t)$ of Case 2b with changing scattering coefficient s , calculated by the ray tracing method.

4. 瞬時減衰率比の周波数特性に関する検討

4.1. 検討方法

本節では、FDTD 法解析を用いて、瞬時減衰率比 $d(t)$ の周波数特性について検討する。直方体室と点音源からなる解析モデルを図5に示す。境界条件としては、全面反射性 (reflec: 垂直入射吸音率 $\alpha=0.1$ 相当の実音響インピーダンス), 天井のみ吸音 (absorp: $\alpha=0.5$ 相当) の2つを設けた。基本条件の室 (noDiff) に対して、全壁面に一次元周期構造の矩形拡散体 (0.1 m 角 / 0.2 m 周期) を水平方向に設置 (4Diff) した。拡散体の乱反射率を図6に示す。FDTD 法解析については、空間離散化幅 0.025 m, 時間離散化幅 0.04 ms とし、音源には 1 kHz の 1/3 オクターブバンド上限周波数以下の成分が含まれるガウス関数を音圧の空間分布として与えた。受音点 R で得られたインパルス応答 (応答長 2 s) に 1/3 オクターブバンドフィルタリング処理を施し、反射音構造 $d(t)$ を求める。評価区間は 60 dB 減衰時刻までとし、非線形回帰曲線の瞬時減衰率 $\bar{D}(t)$ を用いる。

4.2. 結果と考察

残響減衰性状 残響時間を図7に残響減衰曲線を図8に示す。拡散体なしでは、全面反射性の場合には周波数帯域によらず概ね直線的に減衰し、天井吸音時には残響が抑制されるが、高音域では直進性により水平面内の成分が残留し、残響が鈍くなっている。拡散体を設置した場合、全面反射性では乱反射率が比較的に大きい 500, 1k Hz 帯域で減衰が鈍くなっている。これは拡散反射成分が鉛直方向の交互反射成分に転化するためと考えられる。天井吸音時には周波数帯域によらず減衰が抑制されている。

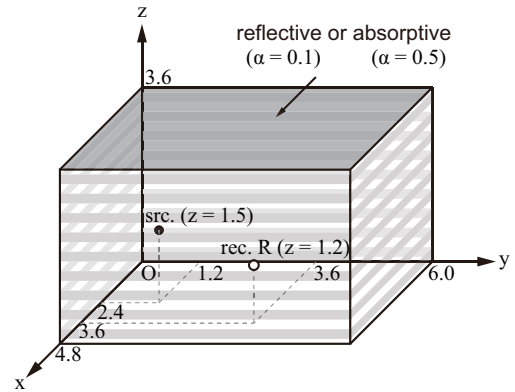


Fig. 5: A rectangular room with a point source.

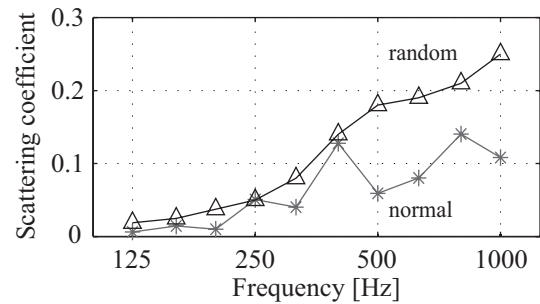


Fig. 6: Random/normal incidence scattering coefficients of the diffuser [4].

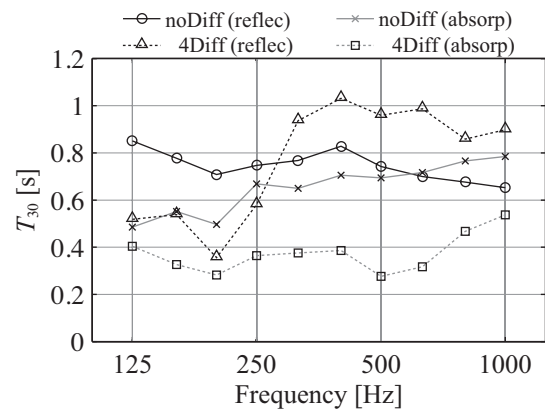


Fig. 7: Reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB).

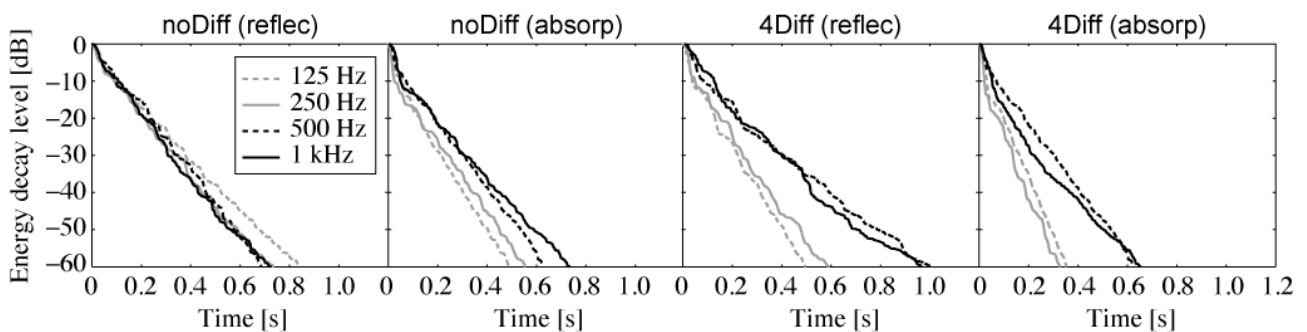


Fig. 8: Energy decay curves in 1/3 octave bands of 125, 250, 500 and 1k Hz.

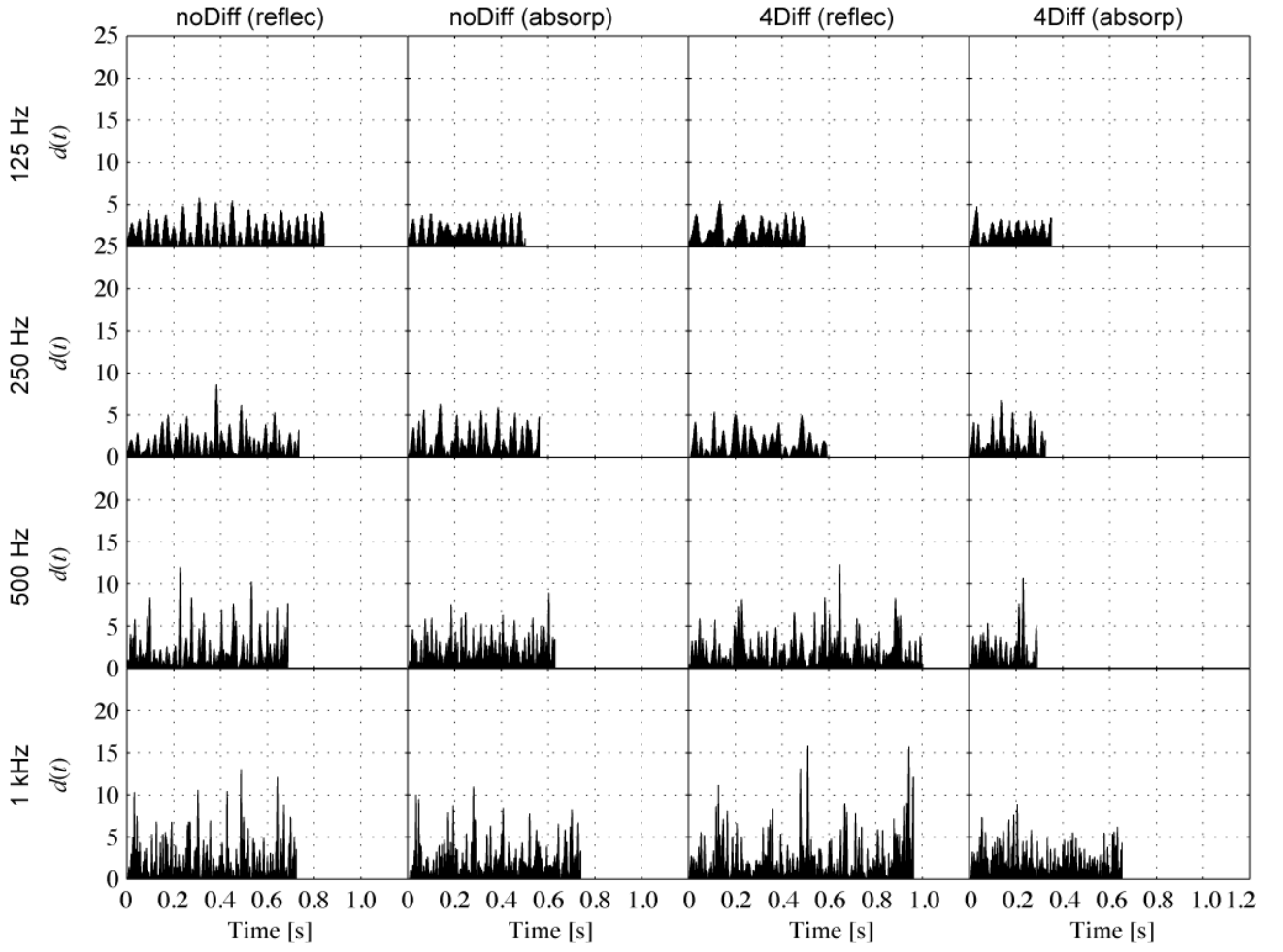


Fig. 9: Instantaneous decay ratio $d(t)$ using $\bar{D}(t)$, calculated by the FDTD method in 1/3 oct. bands of 4 frequencies.

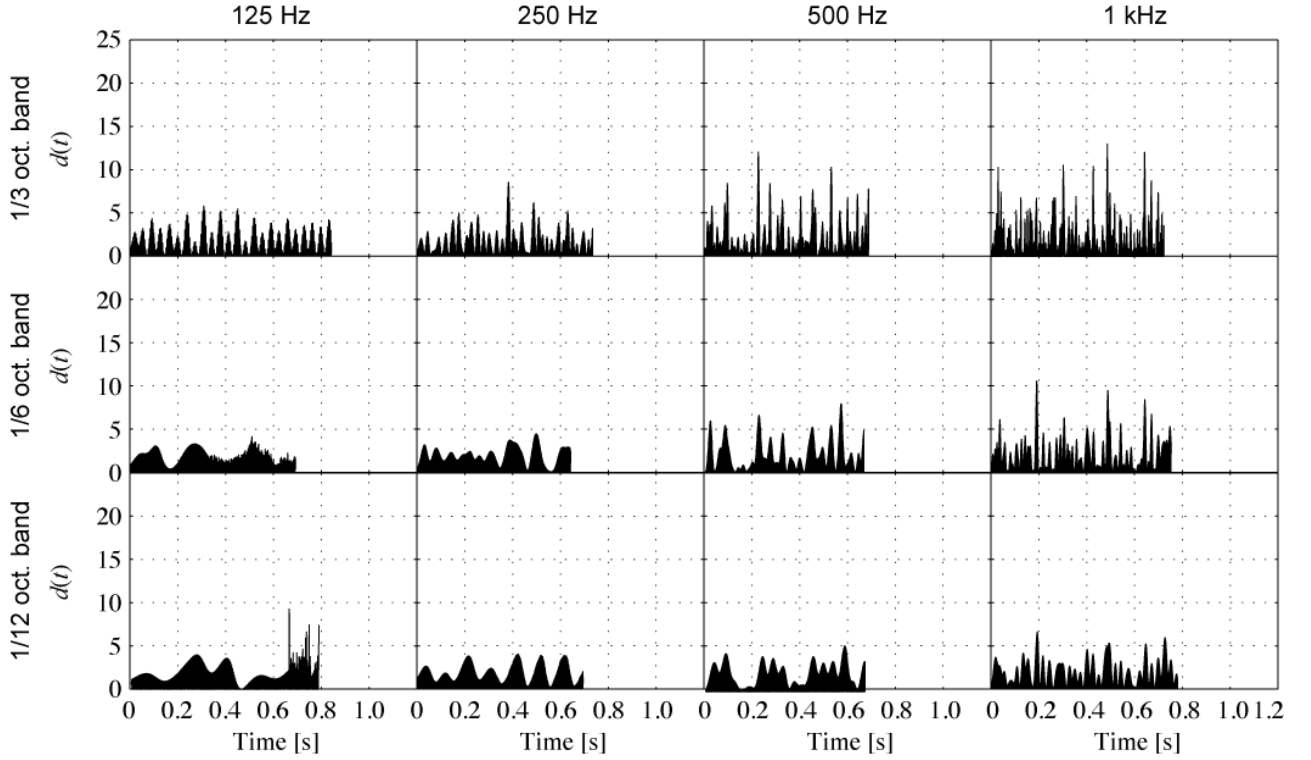


Fig. 10: Instantaneous decay ratio $d(t)$ using $\bar{D}(t)$, calculated by the FDTD method in 1/3, 1/6 and 1/12 oct. bands.

瞬時減衰率比 結果を図9に示す．低音域では室条件による傾向は捉え難いが，500, 1k Hz 帯域については，全面反射性の場合に対して天井吸音時に値が小さくなる傾向が見られ，特に拡散体設置時に顕著である．また，室条件によらず高音域ほど値が大きくなる傾向が見られる．

周波数帯域分析の影響 フィルタリング処理による影響を調べるために，比較的に残響の周波数特性が平坦な noDiff(reflec)を対象として，帯域幅を 1/3, 1/6 および 1/12 オクターブバンドに変化させた結果を図10に示す．各帯域に含まれる成分は異なるため単純な比較はできないが，高音域ほど，また帯域幅が広いほど値が大きくなる傾向にあることが示唆される．

5. 実測例

5.1. 測定条件

容積 100 m³ 程度の小会議室を対象として，実測したインパルス応答の反射音構造を分析する．室内の基本条件としては，壁は石膏ボード張り（一部，金属製パネル），床はビニルシート，天井は岩綿吸音板の仕上げであり，室中央に机および椅子4脚を配置した（図11）．基本条件の室（Case O）に対して，吸音性（図12）のパネル（2,000×900×36 mm）を対向2壁面に各4枚配置した Case A，全壁面に各4枚配置した Case B の3条件を設定した．12 面体スピーカを長手壁面の中央（h = 1.3 m）に，受音点を特定の座席位置（h = 1.2 m）に設置して，インパルス応答測定を行った．反射音構造の評価区間は-5 から-35 dB とし，基準減衰率は非線形回帰曲線の瞬時減衰率 $\bar{D}(t)$ とする．但し，本節で仮定する近似曲線 $\tilde{L}(\mathbf{x}, t)$ は Xiang[5]を参考として，2種の指数減衰および暗騒音と逆二乗積分の打ち切りを想定した成分で構成する．

$$\tilde{L}(\mathbf{x}, t) = 10 \log_{10} \left\{ x_1 e^{-x_2 t} + x_3 e^{-x_4 t} + x_5 (T - t) \right\} \quad (9)$$

回帰区間は暗騒音と逆二乗積分の打ち切りの影響を捉えるため，便宜的に-5 から-80 dB とした．

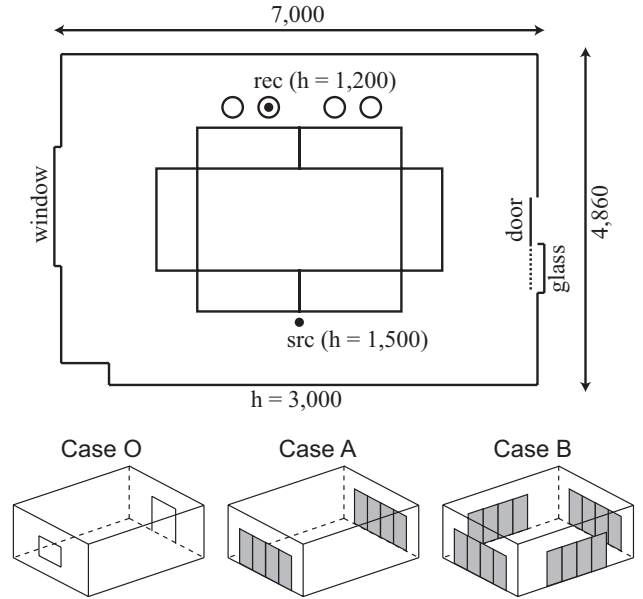


Fig. 11: A plan of the meeting room and configurations of the absorptive panels.

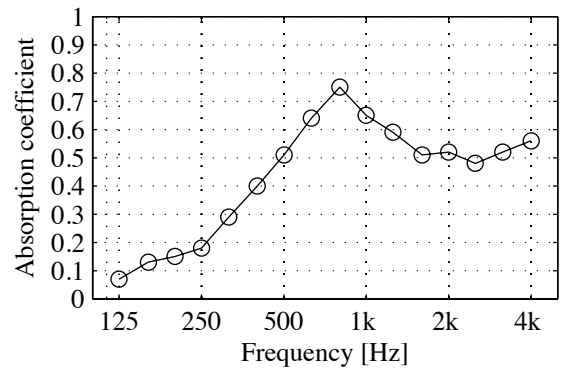


Fig. 12: Random incidence absorption coefficient of the absorptive panel.

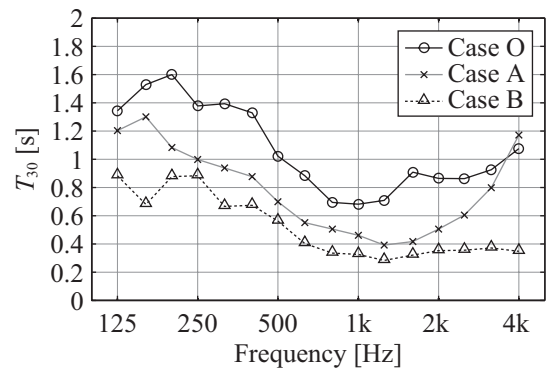


Fig. 13: Reverberation times T_{30} (-5 to -35 dB).

5.2. 結果と考察

残響減衰性状 残響時間を図 13 に残響減衰曲線を図 14 に示す。パネルなしの場合 (Case O) に対して、パネル設置時 (Case A, B) にはパネルの吸音特性に応じて残響が抑制されているが、2 面設置時 (Case A) では反射性の平行壁間での交互反射成分が残留することにより高音域で残響時間が長くなっている。回帰曲線については、一例として 4 kHz 帯域の結果を図 15 に示すが、減衰の湾曲だけでなく暗騒音や積分の打ち切りによる影響も近似されていることがわかる。

瞬時減衰率比 結果を図 16 に示す。低中音域については、傾向を捉え難いが、4 kHz 帯域では交互反射成分が残留する Case A で周期的に強い反射音が到来していることがわかる。室条件によらず、高音域ほど値が大きくなる傾向は前節と同様である。

6. おわりに

インパルス応答から減衰の影響を除去した反射音構造の算出方法に関して、数値解析および実測を通じた基礎的な検討を行った。その結果、基準減衰率として減衰の湾曲性を考慮した値を用いることで、評価区間に依存せずに、また、平均的な減衰性状に対する到来反射音の特異性の程度をより正確に表す値を算出することができた。また、周波数帯域分析時には帯域幅に依存して値が変化することが示唆された。今後の課題としては、抽出された反射音構造の評価が挙げられる。

参考文献

- [1] C.-H. Jeong, *et al.*, “Room acoustic transition time based on reflection overlap,” *J. Acoust. Soc. Am.* **127**, 2733-2736 (2010).
- [2] C. Huszty, “Time-domain swept signal based measurement and processing of impulse responses for room acoustic evaluation,” Ph.D dissertation (2012).
- [3] 羽入他, “減衰を除去したインパルス応答による室内音場における拡散度の推定,” *AIJ 梗概集 D-1*, 183-184 (2012).
- [4] H. Lee, “Characterization of scattering coefficients of periodical surfaces by numerical analysis,” *Proc. Inter-Noise 2012* (New York), N.756, 9p. (2012).
- [5] N. Xiang, “Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach,” *J. Acoust. Soc. Am.* **98**, 2112-2121 (1995).

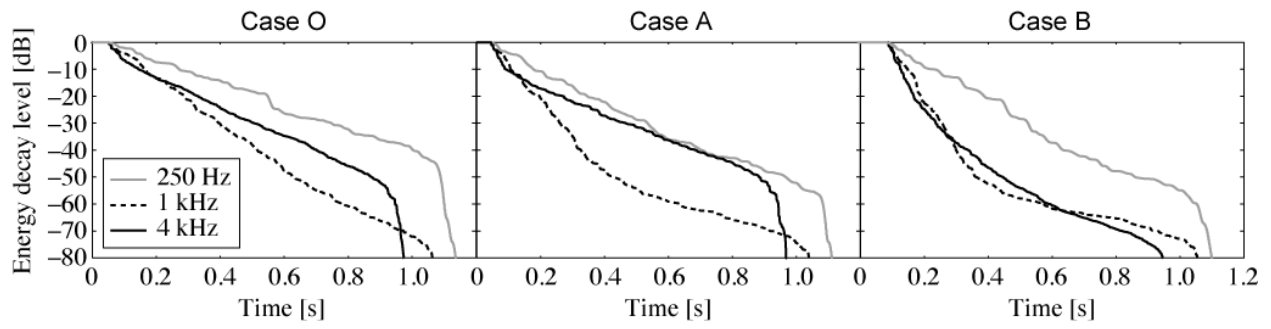


Fig. 14: Energy decay curves in 1/3 octave bands of 250, 1k and 4k Hz.

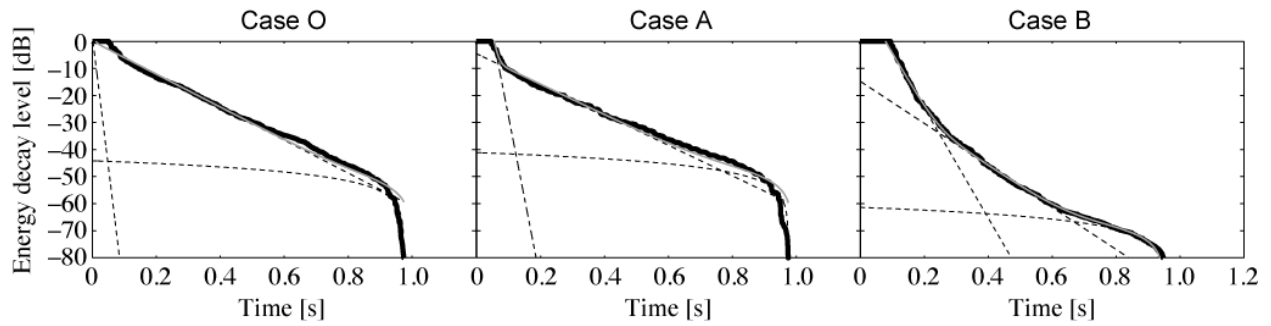


Fig. 15: Energy decay curves in 1/3 octave band of 4 kHz, and their approximation curves.

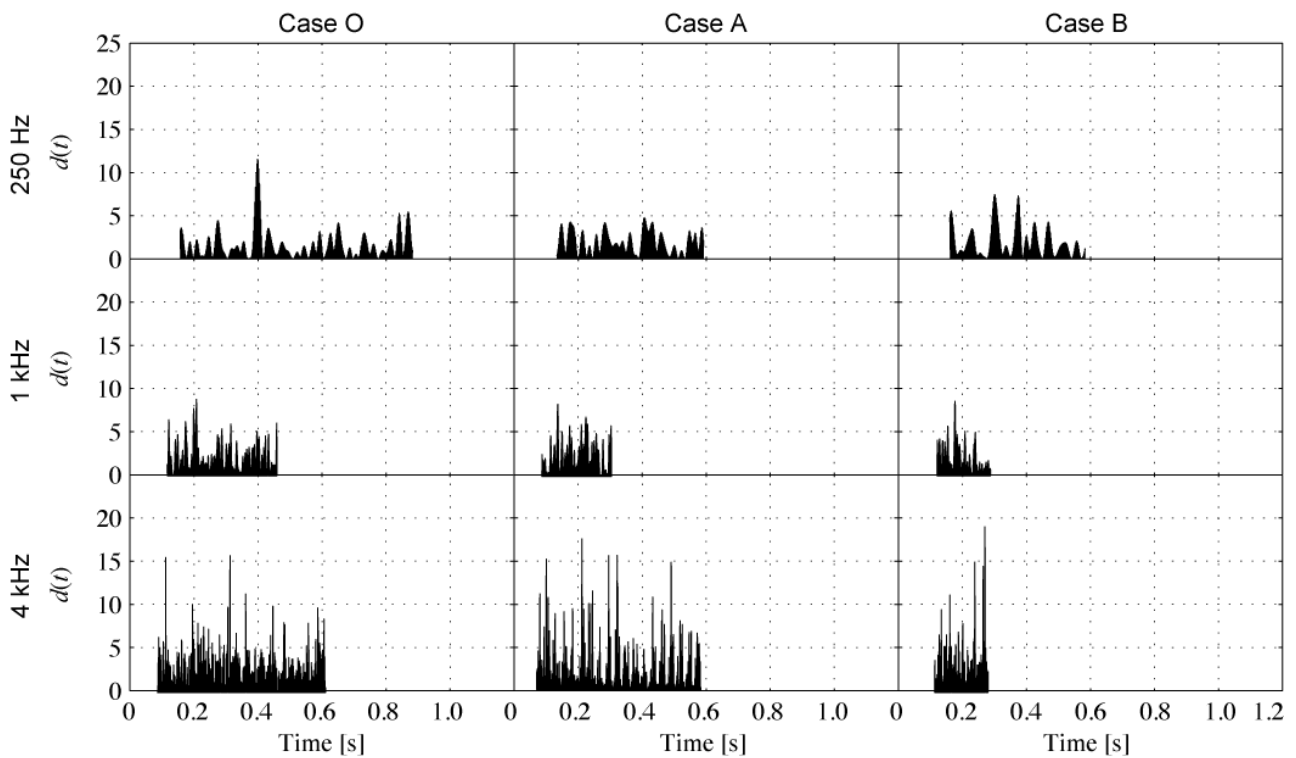


Fig. 16: Instantaneous decay ratio $d(t)$ in 1/3 octave bands, calculated by the measured room impulse responses.