

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 $\bar{\alpha}$ 、平均自由行路 $l = 4V/S$ 、 $\Delta t_s = 1/f_s$ 、 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

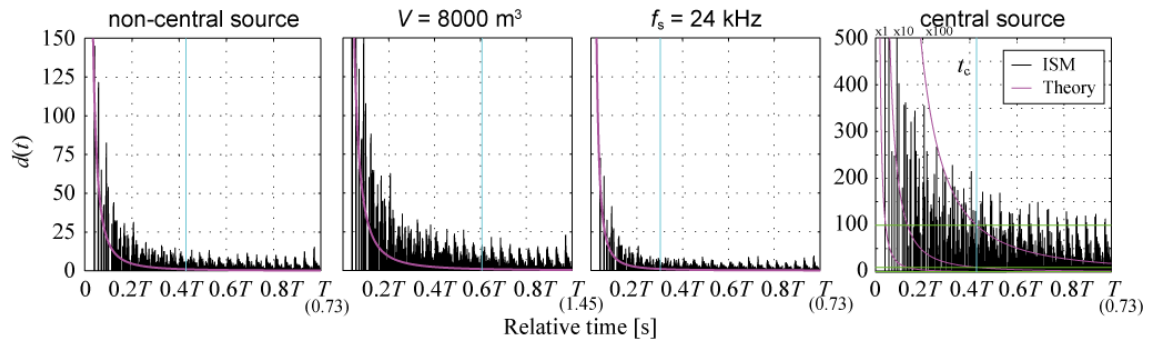


Fig. 1: Decay ratio $d(t)$, calculated by the image source method and the theory.

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

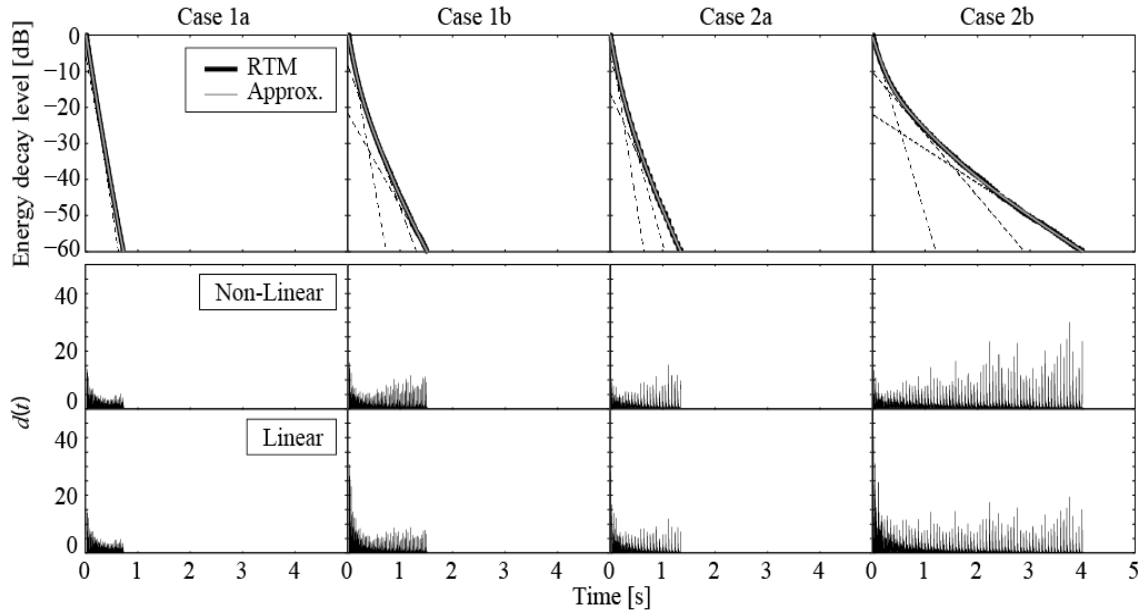


Fig. 2: Upper: energy decay curves calculated by the ray tracing method, and their approximation curves; Lower: decay ratio $d(t)$, normalized by using non-linear and linear regression curves

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 を全篇一律に 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

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。

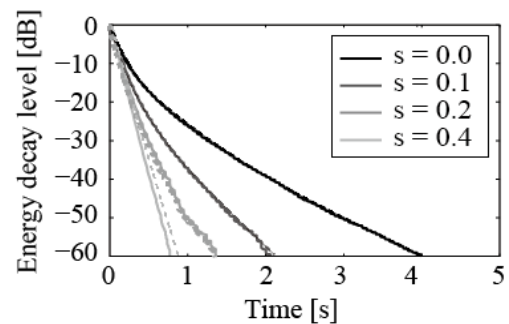


Fig. 3: Energy decay curves calculated with changing scattering coefficient and their approximation curves.

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)

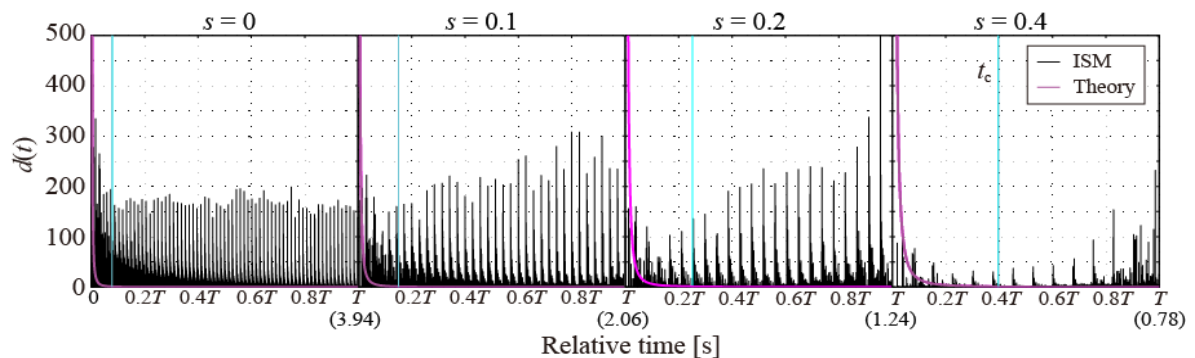


Fig. 4: Decay ratio of Case 2b with changing scattering coefficient s , calculated by the ray tracing method.