

○桐山直己<sup>1</sup>, 星和磨<sup>2</sup>, 羽入敏樹<sup>2</sup>Naoki Kiriya<sup>1</sup>, \*Kazuma Hoshi<sup>1</sup>, Toshiki Hanyu<sup>2</sup>

## 1 はじめに

室内音響設計において音場の拡散は重要な要素の一つである。しかし、音場の拡散性と壁面の拡散性の関係は未解明な点が多い。特に音場の拡散度を測定する方法が整備されていないのが現状である。

筆者らはインパルス応答から反射音のエネルギー変動を抽出する平滑化減衰エネルギー比を提案している[1-2]。そして、平滑化減衰エネルギー比がある閾値を超える確率を定義し、それによって音場の拡散度を評価する方法の可能性を示した[3]。本報では、この平滑化減衰エネルギー比の閾値関数から音場拡散の定量的評価に結び付く物理量を抽出することを試みたので、その結果について報告する。

## 2 平滑化減衰エネルギー比による音場拡散の評価法

### 2.1 平滑化減衰エネルギー比

平滑化減衰エネルギー比は、インパルス応答  $p(t)$  の二乗応答を幅の異なる 2 つの時間窓  $T_{\text{narrow}}$ ,  $T_{\text{wide}}$  で平滑化し、そのエネルギー比の時間変化  $k(t)$  として定義される。

$$k(t) = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\int_t^{t+T_{\text{narrow}}} p^2(t) dt}{\int_t^{t+T_{\text{wide}}} p^2(t) dt} \quad (1)$$

ただし、 $T_{\text{narrow}} < T_{\text{wide}}$  とする。ここで、 $\mu$  は式で表される窓幅比である。

$$\mu = \frac{T_{\text{narrow}}}{T_{\text{wide}}} \quad (2)$$

この比を取ることで、時々刻々の反射音エネルギーの平均的エネルギー減衰に対する相対的な卓越度合いを抽出することができる。変動が小さい応答の  $k(t)$  は 1 に近づく。今回の検討においては  $T_{\text{narrow}}$  を 48kHz サンプリング周波数で 1 データ分 (約 0.02ms),  $T_{\text{wide}}$  を 100ms に設定した。

### 2.2 平滑化減衰エネルギー比の閾値関数

ある時間範囲において、平滑化減衰エネルギー比  $k(t)$  が閾値  $k_{th}$  を超える確率を  $z(k_{th})$  と定義する。評価する時間範囲の時間長を  $T_e$  とし、 $k(t)$  が  $k_{th}$  を超える時間の合計を  $T(k_{th})$  とすると、 $z(k_{th})$  は以下のように定義できる。

$$z(k_{th}) = \frac{T(k_{th})}{T_e} \quad (3)$$

したがって、 $z(k_{th})$  は  $k_{th}$  を超える時間率の関数とも解釈できる。離散化された平滑化減衰エネルギー比から  $z(k_{th})$  を求めるには次のような手順による。まず閾値  $k_{th}$  を超えるデータ数をカウントし、閾値をパラメータとしたデータ数の関数  $n(k_{th})$  を作成する。この  $n(k_{th})$  を評価時間範囲の全データ数  $N$  で除して基準化したものが  $z(k_{th})$  となる。定義から、 $z(0)=1$  である。

次に時間ではなくエネルギーの観点から考えてみる。 $k_{th}$  を超える平滑化減衰エネルギー比  $k(t)$  の合計を  $R(k_{th})$ 、評価対象の時間範囲全体の平滑化減衰エネルギー比の合計を  $R_e$  とすると、 $k_{th}$  を超えるエネルギー比の割合  $z_e(k_{th})$  が以下のように定義できる。これも定義から、 $z_e(0)=1$  となる。

$$z_e(k_{th}) = \frac{R(k_{th})}{R_e} \quad (4)$$

## 3 閾値関数による音場拡散の評価

### 3.1 概要

音場の拡散性が低い例として最もわかりやすいのがエコーである。そこでまずは、フラッターエコーやロングパスエコーによって、定義した閾値関数がどのような変化を示すのか検討することにする。用いたインパルス応答は収容人数 500 人規模の音楽ホールの一階中央付近で測定した応答である。インパルス応答波形を Fig. 2 上図に、平滑化減衰エネルギー比を下図に示す。平滑化減衰エネルギー比は、直接音の影響を除くために直接音から 5ms 以降のデータを対象に算出した。

この応答を基にロングパスエコーおよびフラッターエコーが生じる応答を人工的に作成した。反射音の位置や大きさ、間隔などをそれぞれ Table. 1, 2 に示す。また、作成したインパルス応答の例を Fig. 3, 4 の上図に、平滑化減衰エネルギー比を Fig. 3, 4 の下図に示す。

### 3.2 結果と考察

作成したインパルス応答から平滑化減衰エネルギー比の閾値関数をそれぞれ求めた。ロングパスエコーの結果を Fig. 5 に、フラッターエコーの結果を Fig. 6 に示す。また各図の上図に時間率による閾値関数  $z(k_{th})$  の結果を、下図にエネルギー率による閾値関数  $z_e(k_{th})$  の結果を示す。

まず Fig. 5 を全体的に見ると、 $k_{th}$  が大きくなるにしたがって  $z(k_{th})$  が小さくなっていく。この減衰が急であるほど、エネルギーの卓越した反射音が少ないことを示

\* 1 : 日大理工・院・建築 Dept. of arch., grad. sch., Nihon Univ. 2 : 日大短大・教員・建設 Dept. of const., jr. col., Nihon Univ.

している. すなわち  $z(k_{th})$  の減衰の傾きが急なほど音場の拡散度は大きいと考えることができる. ロングパスエコーを付加しない場合には, 減衰性状は  $z(k_{th})$  の対数に対してほぼ直線的に減衰する. しかし付加したエコーのレベルが大きくなるにしたがって減衰の折れ曲がりが大きくなり, 閾値関数の終端値も大きくなっている.

次に Fig. 6 をみると, 付加したフラッターエコーのレベルが大きくなるにしたがい, 閾値関数の傾きが緩くなっている. フラッターエコーの場合, ロングパスエコーに比べて減衰の折れ曲がりの度合いがそれほど大きくなく, 全体的な傾きが変化するのが特徴である.

以上の結果から, 閾値関数が急に折れ曲がる傾向を示す場合にはロングパスエコーが, 折れ曲がりは大

きくないが閾値関数の傾きが緩やかな場合にはフラッターエコーなどのように時間全体にわたってエネルギー変動が生じていると判定できると考えられる.

また, Fig. 5, 6 上図の時間率による閾値関数  $z(k_{th})$  と下図のエネルギー率による閾値関数  $z_e(k_{th})$  を比較すると,  $z_e(k_{th})$  の方が傾きの変化が読み取り易いことがわかった. 4. おわりに

今回の検討から閾値関数によって音場の拡散性を定量的に評価する可能性が示された.

**参考文献**

[1] 来栖他, 音講論(春), pp.1131-1132. (2010.3).  
 [2] 桐山他, 音講論(秋), pp.1051-1052. (2010.9).  
 [3] 羽入他, 建築音響研究会資料, AA2011-20.

Table. 1 付加したロングパスエコーの諸条件

パターン	反射音の大きさ	付加位置
L1	なし	—
L2	直接音から -9 dB	150 ms
L3	直接音から -6 dB	150 ms
L4	直接音から -3 dB	150 ms
L5	直接音から 0 dB	150 ms

Table. 2 付加したフラッターエコーの諸条件

パターン	反射音の大きさ	付加間隔
F1	なし	—
F2	1.5 倍の振幅	25 ms
F3	2.0 倍の振幅	25 ms
F4	2.5 倍の振幅	25 ms

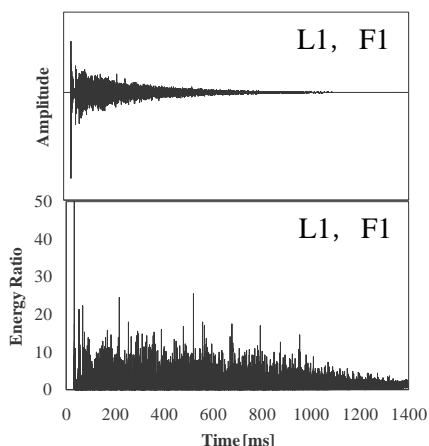


Fig. 2 音楽ホールのインパルス応答(上図)と平滑化減衰エネルギー比(下図)

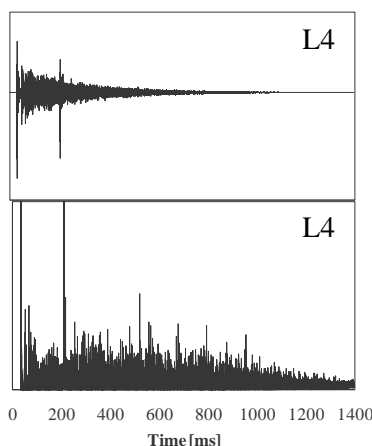


Fig. 3 ロングパスエコーを付加したインパルス応答(上図)と平滑化減衰エネルギー比(下図)

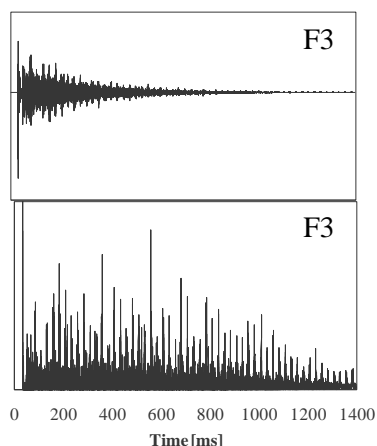


Fig. 4 フラッターエコーを付加したインパルス応答(上図)と平滑化減衰エネルギー比(下図)

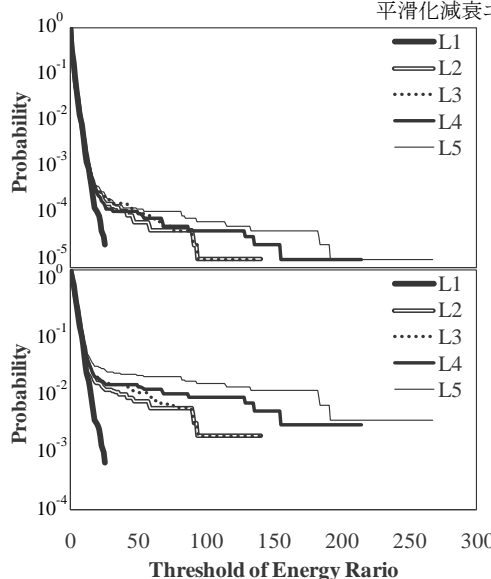


Fig. 5 ロングパスエコーを付加した波形の時間率による閾値関数  $z(k_{th})$  (上図)とエネルギー率による閾値関数  $z_e(k_{th})$  (下図)

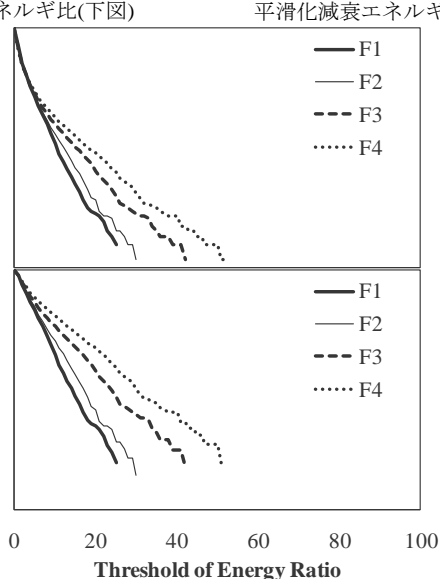


Fig. 6 フラッターエコーを付加した波形の時間率による閾値関数  $z(k_{th})$  (上図)とエネルギー率による閾値関数  $z_e(k_{th})$  (下図)