

D1-9

減衰除去インパルス応答を用いた室内音場の拡散性評価指標の模型実験による検討

A study on indices for evaluating diffuseness of sound fields based on the decay-cancelled impulse response by using 1/10 scale model

○下山達志¹, 羽入敏樹², 星和磨²

*Tatsushi Shimoyama¹, Toshiki Hanyu², Kazuma Hoshi²

1. はじめに

室内音響設計において音の拡散は重要な要素の一つである。しかし、音場の拡散性の評価手法は確立されていないのが現状である。筆者らは、インパルス応答における反射音構造に着目し、減衰除去インパルス応答を用いた拡散性の評価指標を提案している[1-3]。しかし、評価指標の有効性を示すためには、さらに様々な音場において検証する必要がある。

そこで、1/10 縮尺模型実験を実施して提案指標の検証を試みた。本報では、立方体室において吸音を偏させた音場を作り、反射面に拡散体を設置して音場の拡散性を変化させ、この変化を提案指標で評価できるか否か検討した結果について報告する。

2. 減衰除去インパルス応答

2-1 実験装置

式(1)のように、測定されたインパルス応答 $p(t)$ を、シュレーダー積分法により求めた減衰曲線 $E(t)$ の平方根で除し、インパルス応答から減衰成分を除去することで、反射音構造を抽出したものを減衰除去インパルス応答 $g(t)$ とする。

$$g(t) = \frac{p(t)}{\sqrt{E(t)}} = \frac{p(t)}{\sqrt{\int_t^\infty P^2(\tau) d\tau}} \quad (1)$$

減衰除去インパルス応答の振幅は音場の残響の減衰率 A に依存し、減衰の異なる音場間での比較ができないため、減衰率 A による正規化が必要である。しかし、非拡散音場では減衰曲線に湾曲が生じるため、減衰曲線を直線近似して減衰率 A を求められない。そこで、時間 t を中心として、減衰曲線 $E(t)$ が $\pm 5\text{dB}$ となる時間範囲の傾きから瞬時減衰率 $A(t)$ を求める。なお、減衰の初期において $+5\text{dB}$ が取れない区間では、時間 t から -5dB となる時間範囲の瞬時減衰率を使用する。

式(2)のように瞬時減衰率 $A(t)$ の平方根で正規化したものを正規化減衰除去インパルス応答 $h(t)$ として音場間の比較が可能な形にする。

$$h(t) = \frac{g(t)}{\sqrt{A(t)}} \quad (2)$$

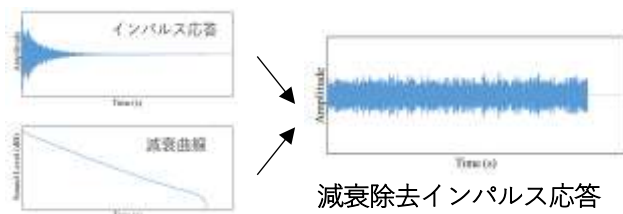


図1 減衰除去インパルス応答の概念図

3. 減衰除去インパルス応答を用いた音場の拡散性評価

3-1 時間領域のばらつき評価指標

まずインパルス応答を 1/3 オクターブバンドでフィルタリングした帯域制限応答を求める。この 1/3 オクターブ帯域波形に対して減衰除去した応答 $g(t)$ を求める。これをさらに先述の方法で正規化した正規化減衰除去インパルス応答 $h(t)$ を算出する。これを二乗したものを正規化減衰除去エネルギー比 $h^2(t)$ として時間領域のばらつき評価に用いる。減衰除去エネルギー比に対してある閾値を設定し、閾値を徐々に上げていったとき、閾値を超えるエネルギーの合計が全体のエネルギーの 1/100 になった閾値を「時系列ばらつき度」として評価指標とする。

3-2 周波数領域のばらつき評価指標

「時系列ばらつき度」と同様に、まずは 1/3 オクターブ帯域の減衰除去応答 $g(t)$ を求める。この $g(t)$ をフーリエ変換してパワースペクトルを算出する。次に帯域内のパワースペクトルを平均が 1 になるように正規化する。時系列ばらつき度と同様に、正規化したパワースペクトルに対して閾値を設定し、閾値を超えるエネルギーの合計がエネルギー全体の 1/100 になる値をその帯域の「周波数ばらつき度」とする[3]。

4. 評価指標の検証方法

評価指標の妥当性を確認するため、図 2 に示すように一辺が 7m (実寸換算) の立方体の 2 面に吸音を偏させ、フラッターエコーが生じるような拡散の悪い一次元的音場をつくる。その反射壁面の一面に拡散体の個数を変化させて設置することで音場の拡散性を変化させ、これを指標が捉えることができるか否かを検証する。拡散体の数は、設置壁面 (拡散面) に対する拡散体底面積合計の割合が 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% の 6 段階となるように変化させた。なお、拡散体は設置壁面においてなるべく均一な分布になるように配置した。拡散体の大きさは、PLA 樹脂で作成したサイズの異なる大小二種類の四角錐を用いた。拡散体の概要を図 3 に示す。

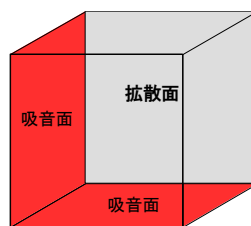


図2 測定音場の概要

大きさ	w [mm]	h [mm]
大	80	30
小	40	15

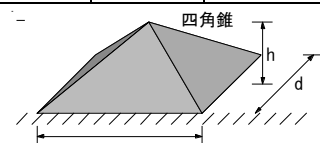


図3 拡散体の概要

1 : 日大理工・院 (前)・建築 2 : 日大短大・教員・建築

図 4 に測定装置および配置図を示す。模型内で小型の 12 面体スピーカーから TSP 信号を放出し、拡散体パターンごとに受音点 R1~R5 にて測定した。なお、サンプリング周波数は 192kHz、量子化は 24bit である。

測定したインパルス応答を中心周波数 20~10000Hz の各 1/3 オクターブ帯域でフィルタリングし、時系列ばらつき度と周波数ばらつき度を求める。拡散体設置面積の割合ごとの時系列ばらつき度と周波数ばらつき度の全受音点平均を求めた。

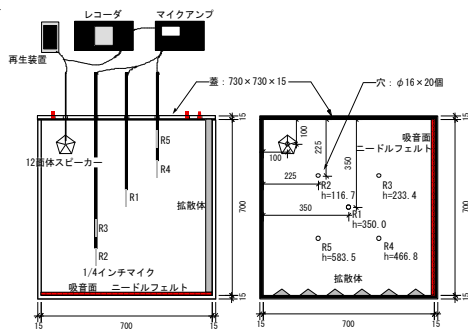


図 4 測定装置および配置図(左:立面図、右:平面図)

5. 結果と考察

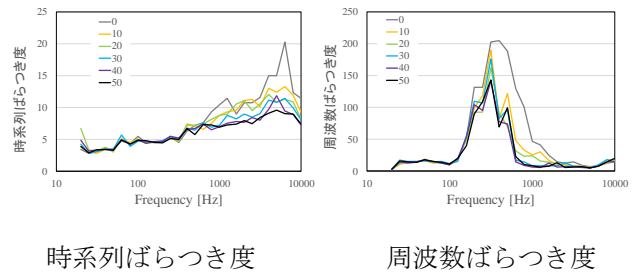
拡散体小、拡散体大の結果を図 5、図 6 にそれぞれ示す。

全体的にみると、基本的には拡散体の個数が増加するに従い、時系列ばらつき度、周波数ばらつき度ともに減少する傾向にある。ばらつき度が小さくなるほど音場の拡散の程度は増すと考えられることから、拡散体の個数が増すほど音場の拡散度は増していることが推察される。また、拡散体のサイズの違いに着目すると、拡散体大は拡散体小に比べてより低音域から時系列ばらつき度、周波数ばらつき度ともに変化している。拡散体と音の波長との関係から、拡散体サイズが大きい方がより低音域から音場の拡散に寄与していると考えられる。

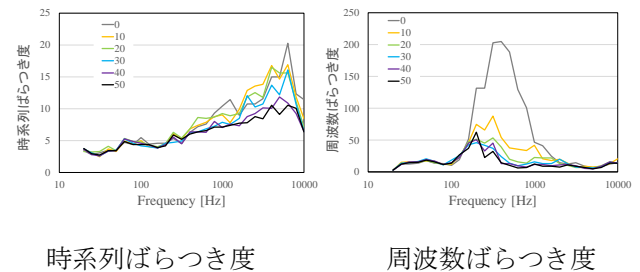
以上のような基本的傾向が認められたが、詳細にみると例外もある。例えば、拡散体大の時系列ばらつき度は、2000Hz~4000Hz においては、拡散体が 10%、20%の値が拡散体なしの条件より大きくなっており、拡散体設置によって音場の拡散性をむしろ低下させている可能性を示している。拡散体の寸法より短い波長の音波は四角錐の各面で鏡面反射するため、対向する反射壁面と拡散体の間で往復反射を繰り返す何らかの反射経路が形成されたためと推測される。40%以上では 2000Hz~4000Hz においても時系列ばらつき度が再び低下する。拡散体を増やすと確率的にそのような鏡面反射経路が形成されにくくなるため、音場の拡散度が高まるものと考えられる。

次に、時系列ばらつき度、周波数ばらつき度の変化と聴感との対応について考察する。拡散体を設置すると、時系列ばらつき度は主に中高音域に変化が現れ、周波数ばらつき度は主に低音域から中音域に変化が現れる。まず、拡散体なしの条件において、帯域制限したインパルス応答として聴感で確認してみると、時

列ばらつき度が大きい帯域で「フラッターエコー」が確認され、周波数ばらつき度が大きい帯域においては「残響のうなり」や特定の周波数だけが金属音のように長く響く「残響の質の低下」が確認された。拡散体を設置して時系列ばらつき度、周波数ばらつき度が低下するにしたがってこれら音響障害は目立たなくなり、拡散体設置が 50%になるとほとんど聞こえなくなった。



時系列ばらつき度 周波数ばらつき度
図 5 拡散体小の実験結果



時系列ばらつき度 周波数ばらつき度
図 6 拡散体大の実験結果

6. まとめ

インパルス応答の反射音構造を時間領域と周波数領域に分け、それぞれの領域でエネルギー卓越度合いを評価する「時系列ばらつき度」と「周波数ばらつき度」について、音場の拡散性評価指標としての有効性を 1/10 模型実験によって検討した。その結果、両指標によって音場の拡散性の変化を捉えることができた。時系列ばらつき度によって「フラッターエコー」を、周波数ばらつき度によって「残響のうなり」や「残響の質の低下」などを評価できる可能性が示された。残響の質を感覚ではなく指標値として定量評価できる可能性があると考えられる。

【参考文献】

[1] 羽入他 “インパルス応答の二乗応答とシュレーダー減衰曲線を組み合わせた音場の残響時間および拡散度の解析法”, 音講論 pp.1253-1256(2012年3月)
 [2] 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” 建築学会便概集, pp183-184(2012年9月)
 [3] 羽入他 “周波数領域における反射音エネルギーのばらつきに着目した室内音場の拡散性評価” 日本音響学会講演論文集, pp1027-1028(2013年9月)
 [4] 羽入他 “非直線減衰を持つ室内音場の減衰除去インパルス応答の計算”, 日本音響学会講演論文集, pp1067-1068(2014年9月)