

壁面音響反射の拡散性と室内音響特性*

佐久間 哲哉，小坂 慶之，太刀岡勇氣（東大・新領域）

1 はじめに

「音場の拡散性」と「壁面反射の拡散性」がいかなる関係にあるのかは、室内音響学における永年の難題である[1]。その一因は「拡散性」という用語が曖昧あるいは多義的に用いられることにある。特に音場に関しては、エネルギーの空間分布や到来方向、音圧の空間相関などによる様々な評価法が存在する上、室形・壁面形状・吸音力配分などが複雑に影響するため、壁面反射の拡散性と因果関係は未だ明確ではない。一方、壁面反射に関しては近年2種類の指標、diffusion coefficientとscattering coefficientに関する研究が進み、測定法がISOで一部規格化されるに至っている。

本報では、音場の拡散性に深く立ち入らず、壁面反射の拡散性と室内音響特性への影響について概観する。具体的には、壁面反射の拡散性指標とその測定法を解説した上で、波動音響解析による壁面反射性状の検討例を示す。さらに、拡散壁と室内音響特性の関係についての幾何音響シミュレーションによる検討例を若干紹介する。

2 壁面反射の拡散性評価法

2.1 2つの拡散性指標

壁面反射の拡散性に関する代表的な指標として、diffusion coefficient（指向拡散度）[2]とscattering coefficient（拡散反射係数）[3]が提案されている。前者は反射指向特性の均一性の程度を表すのに対して、後者は鏡面反射方向以外に散乱するエネルギーの割合を表す。一般に鏡面反射成分が大きくなると（散乱成分が小さくなると）指向性が強まるため、両指標に相関はあるが、散乱成分が大きくなるとその相関は無くなる傾向にある。

指向拡散度は音響伝搬方向の均一性という観点で音場の拡散性と共通するが、拡散反射係数は音場の拡散性と直接的には結びつかない。一

方、指向拡散度は壁面拡散性能の相对比较を可能とするが、室内音響設計における活用方法は現時点で明らかでない。その点、拡散反射係数は幾何音響シミュレーションへの導入が想定されており、直ちに有用である。

2.2 指向拡散度の定義と測定法

指向拡散度は、ある方向の入射波に対する壁面の方向別散乱エネルギーの自己相関係数を平均した次式により表される。

$$d_{\theta} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n E_i\right)^2 - \sum_{i=1}^n E_i^2}{(n-1)\sum_{i=1}^n E_i^2} \quad (1)$$

ただし、 E_i は各方向の散乱エネルギー、 n は方向分割数であり、完全鏡面反射では $d_{\theta} = 0$ 、完全拡散反射では $d_{\theta} = 1$ となる。

指向拡散度を測定するには反射指向特性の計測が必要であり、無響室内に試料、音源、受音点を遠方場条件を満たすように配置して行う（図1）。測定手順としては、ある音源位置に対して各方向のインパルス応答を計測し、時間領域で反射波のみを切り出した後、周波数帯域毎に方向別散乱エネルギー E_i を求めて、式(1)により斜入射拡散度を算出する。実際、無響室内で実物大試料に対する遠方場条件の確保は容易ではないため、縮尺模型の使用が現実的であり、ランダム入射拡散度を求めるには各入射条件において方向別のインパルス応答計測が必要となるので、大変な労力を要する。

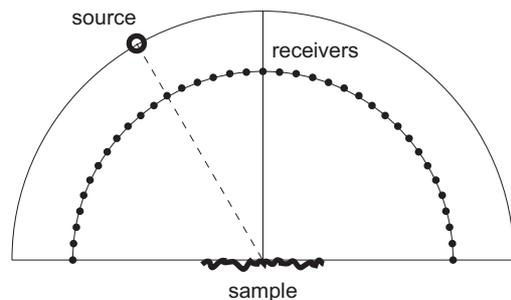


Fig. 1. Free field measurement of reflection directivity.

* Diffuseness of sound reflection by walls and room acoustic characteristics, by SAKUMA, Tetsuya, KOSAKA Yoshiyuki and TACHIOKA, Yuki (Univ. of Tokyo).

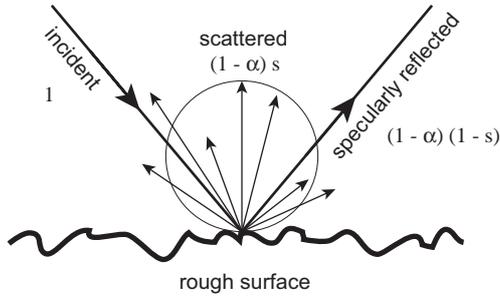


Fig. 2. Scattering on rough surface.

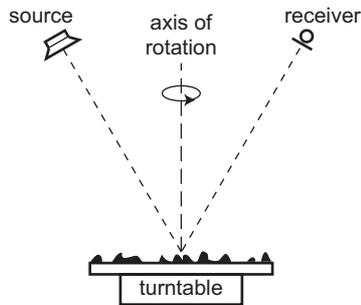


Fig. 3. Free field measurement of scattering coefficient with the sample rotation method.

2.3 拡散反射係数の定義と測定法

拡散反射係数は、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割合として次式により表される。

$$s_{\theta} = \frac{\alpha_{\text{spec}} - \alpha}{1 - \alpha} = 1 - \frac{E_{\text{spec}}}{E_{\text{total}}} \quad (2)$$

ただし、 E_{total} は全反射エネルギー、 E_{spec} は鏡面反射エネルギー、 α は試料表面の吸音率、 α_{spec} は鏡面反射成分以外は吸音された見なした場合の吸音率である（図2）。完全鏡面反射では指向拡散度と同様に $s_{\theta} = 0$ となるが、鏡面反射成分のみ存在しなければ $s_{\theta} = 1$ となるため、必ずしも完全拡散反射を指すことにはならない。

拡散反射係数の測定法としては、円形試料を回転しながら多数のインパルス応答を同期加算して鏡面反射成分のみを抽出する試料回転法が残響室と自由音場を想定した2通りで提案されており、前者はISO 17497-1として規格化されている。残響室法では試料静止状態と回転状態の残響室法吸音率の測定を通して拡散係数を求める。残響時間測定にはシュレーダー法を用いる必要があり、試料回転状態では散乱成分がインパルス応答の同期加算により相殺され、静止状態に比べて残響時間が短くなる。即ち、見掛け上で鏡面反射成分以外は試料により吸音されたことになり、静止状態で得られる吸音率 α よ

りも大きい見掛けの吸音率 α_{spec} が得られる。最終的にこれらの値を式(2)に代入することによりランダム入射拡散係数が算出される。

一方、自由音場法ではある方向の入射条件で試料を回転させながら複素反射係数を計測し、次式の加算平均により鏡面反射係数 r_{spec} を求める（図3）。

$$r_{\text{spec}} \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (3)$$

ただし、 r_i は複素反射係数、 n は試料回転角の分割数である。鏡面反射係数は $\alpha_{\text{spec}} = 1 - |r_{\text{spec}}|^2$ の関係にあることから、式(2)により斜入射拡散係数が算出される。

3 壁面反射の拡散性解析

3.1 拡散性指標の計算

周期構造またはランダム形状の無限大壁面については反射性状の理論解析が可能であるが、有限寸法の壁面については境界要素法による数値解析が有効である。ISOによる拡散反射係数の測定法では試料寸法が直径3mに規定されているが、この寸法であれば現在でも4kHz帯域程度までの3次元解析が十分可能である[4]。

指向拡散度は反射指向特性が求まれば式(1)により容易に算出される。図4に3m四方の正弦波状壁面（周期20cm、高さ6cm）のランダム入射拡散度を平板とあわせて示す。図中、鉛直断面内(Case 1)と3次元全方位(Case 2)の評価値を各々を示しているが、後者は極めて小さい値となる。また、低音域の値の上昇は試料周辺からの端部回折波の影響であり、800Hz以上で壁面表面の拡散効果が現れている。

拡散反射係数については、測定法における試

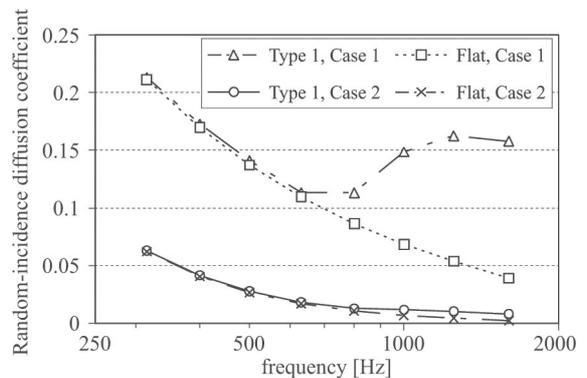


Fig. 4. Diffusion coefficients of a sinusoidal surface with $d=20\text{cm}$, $h=6\text{cm}$ (Type 1) and a flat panel, calculated in 2 dimensions (Case 1) and in 3 dimensions (Case 2).

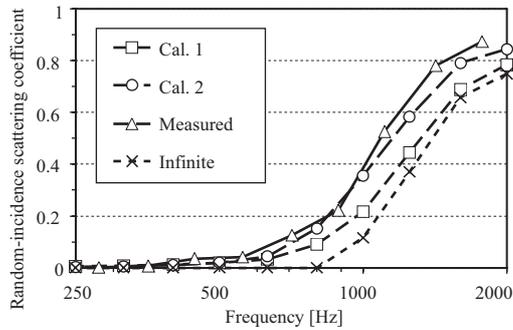


Fig. 5. Scattering coefficients of a sinusoidal surface with $d=20\text{cm}$, $h=6\text{cm}$, calculated with directivity correlation (Cal.1), with sample rotation (Cal.2), by the infinite surface theory, and measured.

料回転法とは別に、自由空間中における試料と基準平板の反射指向特性の相関から算出する指向相関法[5]が適用可能である。具体的には、次式により拡散係数が算出される。

$$s_{\theta} = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^n p_i \cdot \hat{p}_i^* \right|^2}{\sum_{i=1}^n |p_i|^2 \sum_{i=1}^n |\hat{p}_i|^2} \quad (4)$$

ただし、 p_i , \hat{p}_i は試料・基準平板の各設置状態における各方向の複素反射音圧である。前述の正弦波状壁面に対して、試料回転法と指向相関法により算出したランダム入射拡散係数を図5を示す。図中、実測値と無限大壁面の理論値をあわせてを示しているが、前者と試料回転法、後者と指向相関法が良く対応している。指向拡散度と同様、800Hz程度以上で壁面表面の拡散効果が明確に現れている。

3.2 壁面形状と拡散反射係数

拡散壁の表面形状には1次元的な凹凸が多用されている。図6は正弦波状の凹凸を1方向および2方向に持つ壁面の拡散反射係数分布を表している。1次元的な凹凸の場合、凹凸に沿う入射方向で値は大きい、その直交方向では鏡面反射に近い状態となっており、拡散壁設計の際は設置向きに十分な注意が必要となる。

次に、凹凸の詳細形状の解析例として、図7に正弦波状と矩形波状のランダム入射拡散係数を示す。拡散効果が現れる高音域にて、正弦波状は周波数とともに単調増加する傾向にあるが、矩形波型は顕著な山谷が生じており、周波数特性の点では前者の方が無難である。凹凸の高さについては、周期に対して正弦波状で30%程度、矩形波状で20%程度で拡散効果が最大となっており、設計上の一つの目安となる。

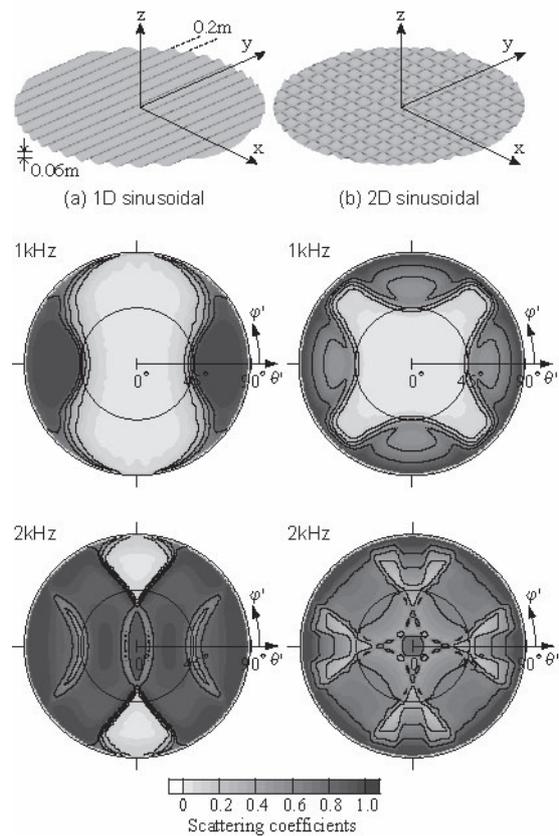


Fig. 6. Directional scattering coefficients of a 1D and a 2D sinusoidal surfaces.

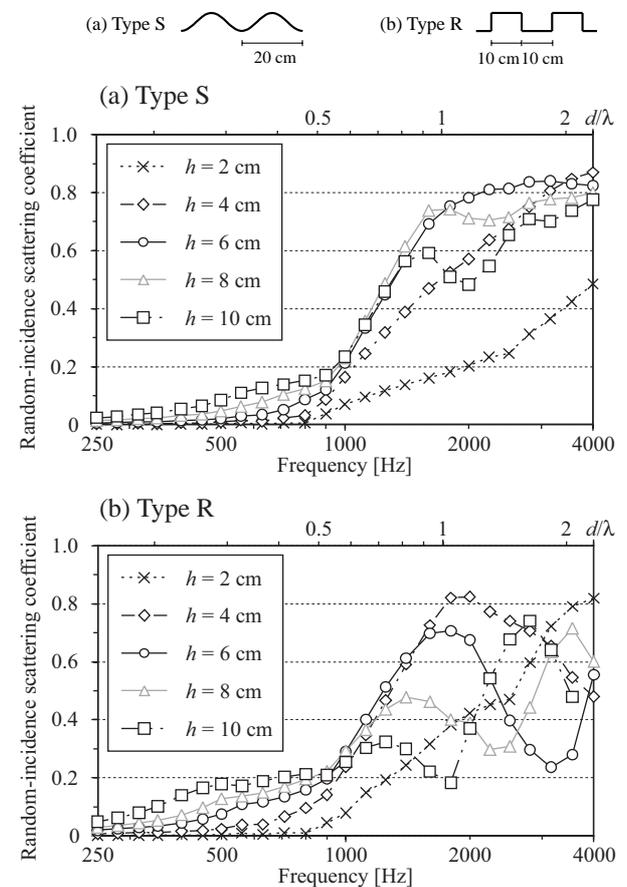


Fig. 7. Scattering coefficients for sinusoid (Type S) and rectangles (Type R) with changing the heights.

4 室内音場における拡散壁の影響

市販の幾何音響解析ソフトでは壁面条件として拡散反射係数を導入したものが多く見られるが、以下ではcone tracing手法を採用したCATT-Acousticによる室内音場の解析例を示す。

第一の対象は床面のみ吸音性の直方体室(幅12m、奥行き24m、高さ6m)であり、側壁には三角波状拡散体(鉛直方向周期1.5m、高さ22.5cm)が設置されている。図8に側壁の拡散係数を変化させて求めた残響時間をFDTD解析結果[6]とともに示す。吸音面が偏在した直方体室内では残響時間が拡散音場の理論値より顕著に長くなるが、250Hz以上ではその傾向が拡散壁により抑制されている。また、両者の対応から推定した側壁の拡散係数を図9に示すが、推定値は概ね図7(a)と対応している。

第二の対象は客席床面・後壁のみ吸音性のシューボックス型ホール(幅20m、奥行き45m、高さ18m)であり、反射面の拡散反射係数を変化させて舞台中央の点音源に対する各種聴感物理指標を算出した[7]。図10に客席部におけるC₈₀とGの分布を示す。完全拡散反射の場合(s=1)を鏡面反射に近い場合(s=0.1)と比較すると、C₈₀は客席後方に向かうほど減少する傾向にある。また、Gは客席前方でやや上昇、後方でやや減少し、空間偏差は増加する傾向にある。側壁の拡散性が客席床面・後壁の吸音を助長した結果と考えられるが、音場の拡散性に逆う傾向であり、今後詳細な分析が必要である。

5 おわりに

現在、壁面反射の拡散性については評価指標と測定法が整備され、数値解析により詳細な性状把握がほぼ可能となった。一方、室内音響特性への影響については時間応答、空間分布、聴感印象など様々な側面があり、未解明の問題が多い。特に音響設計の観点から、現実的な室形や吸音力配分との影響関係を聴感物理指標ベースで整理する必要がある。

参考文献

[1] 藤原, 音響学会誌 53, 301-305 (1997)
 [2] T. J. Hargreaves et al., JASA 108, 1710-1720 (2000)
 [3] M. Vorlander et al., Appl. Acoust. 60, 187-199 (2000)
 [4] Y. Kosaka et al., AST 26, 136-144 (2005)

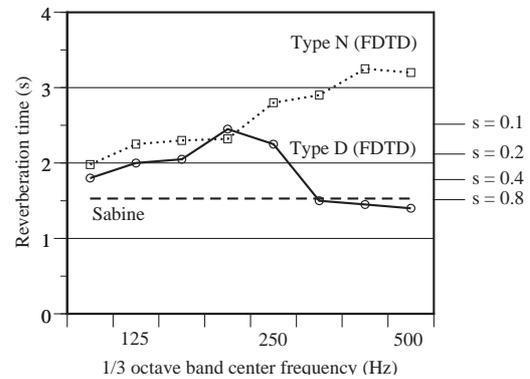


Fig. 8. Reverberation time simulated with changing the scattering coefficient of walls. FDTD results for two cases with/without diffusive walls (Type D/Type N).

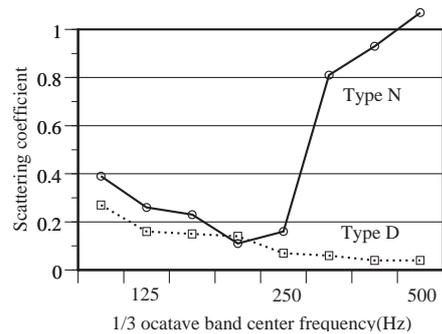


Fig. 9. Scattering coefficients estimated for two cases with/without diffusive walls (Type D/Type N).

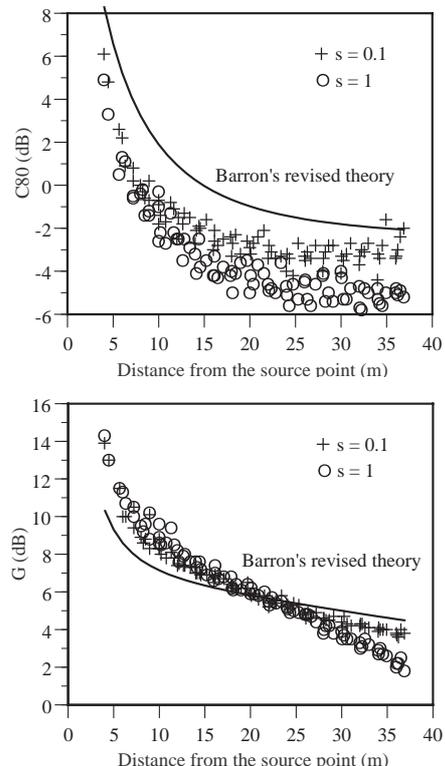


Fig. 10. Distribution of C₈₀ and G calculated with s = 0.1 and s = 1 for reflective surfaces.

[5] E. Mommertz, Appl. Acoust. 60, 201-203 (2000)
 [6] 安田他, 音講論(秋), 963-964 (2004)
 [7] 太刀岡他, 音講論(秋) (2006)