

# 壁面音響乱反射率の実験室測定と数値解析に関する研究

## Laboratory Measurement and Numerical Analysis of Acoustic Scattering Coefficients for Wall Surfaces

学籍番号 097644  
氏名 李 孝振 (Lee, Hyojin)  
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

### 1 序

1.1 背景 コンサートホールや劇場などの大空間からスタジオやオーディオルームといった小空間に至るまで、室内音響空間では音場の拡散性の向上や音響障害の防止等の目的で壁面に多種多様の凹凸が用いられることが多い。一方、壁面の凹凸がどのような反射特性を与え、どの程度の拡散性能を有するのかについては、指標や測定法が未整備であることから明確な形で定量化されていないのが現状である。

1.2 乱反射率(Scattering coefficient)について 近年、壁面による音響拡散の程度を表す一物理指標として乱反射率 (Fig. 1) が提案されている。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定義されているものであり、次式により表される。

$$s(\theta', \varphi') = 1 - \frac{E_{\text{spec}}}{E_{\text{total}}} = \frac{\alpha_{\text{spec}} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad (1)$$

但し、 $(\theta', \varphi')$ : 入射角,  $E_{\text{total}}$ : 全反射エネルギー,  $E_{\text{spec}}$ : 鏡面反射エネルギー,  $\alpha_s$ : 試料の吸音率,  $\alpha_{\text{spec}}$ : 鏡面吸音率. この指標の最も有効な利用法の一つとしては幾何音響シミュレーションへの適用が考えられる。入射角依存乱反射率, もしくはランダム入射乱反射率を境界条件として適用することにより、壁面による音響拡散を取り扱うことが可能であり、拡散音場の仮定が成立しない空間の残響予測や壁面による拡散を考慮した騒

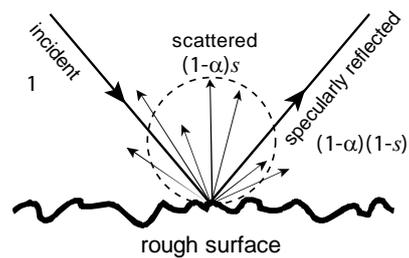


Fig. 1: Schematic of the scattering coefficient.

音伝搬予測, 各種音響物理量の推定等, 幾何音響シミュレーションの適用範囲が広がるものと考えられる。乱反射率の算出法としては、試料回転による測定法(残響室法, 自由音場法)<sup>[1]</sup>と散乱指向特性から求める方法(指向相関法)<sup>[2]</sup>の2種類があるが、それらの対応関係は明らかにはされていない。残響室法については、乱反射率が総計入射平均値として得られることから比較的簡便で実用性が高く、ISO 17497-1<sup>[3]</sup>にも規格化されているが、測定を行うに当たってはまだ不明確な点が多い。また、拡散壁のエコー低減効果の検討等では、垂直入射乱反射率が有用となることから、その測定法も望まれる。一方、乱反射率の数値解析<sup>[4]</sup>が可能となったが実測例は少なく、測定結果との対応関係はまだ不明確である。

1.3 目的 壁面音響乱反射率の汎用的な定量化手法の構築・整備, 及び実験室測定と数値解析を通して乱反射率の挙動を把握し、測定条件、測定における誤差要因等に関する知見を得ると共に、各種壁面拡散体の乱反射率特性を調べ

る。乱反射率の導入により、将来的には、幾何音響シミュレーションの性能が高まることや新たな拡散体の開発など、実務音響設計の支援ツールとしての役割が期待される。

## 2 ランダム入射乱反射率の測定法の構築

残響室法によるランダム入射乱反射率の測定法について、試料の適用条件や測定における誤差要因等を明らかにするための検討を行い、測定法の汎用性及び有効性を向上させる。

**2.1 測定原理** 残響室法では試料静止状態と回転状態の残響室吸音率の測定を通して乱反射率を求める (Fig. 2)。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、見かけ上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  $\alpha_s$  よりも大きい見かけの吸音率  $\alpha_{spec}$  が得られる。最終的にこれらの値を Eq. (1) に代入することによりランダム入射乱反射率が算出される。

## 2.2 試料の適用範囲に関する検討

**2.2.1 試料端部処理について** 試料を円形で切り取った場合に、端部の凹凸により過大に測定されていた乱反射率を、基準円盤に枠を取り付けることで抑制できることが示された (Fig. 3)。

**測定概要** 測定は 1/4 縮尺模型残響室において行った。測定試料は木製リブを配列した周期構造壁面を用いた。枠の高さは ISO<sup>[3]</sup>の試料高さ ( $d/16 = 47.5 \text{ mm}$ ) 以内という規定値に準じて設定し、厚さと材質は 2 水準とした。

**結果と考察** 枠の高さ 枠の有無による実測と数値解析の乱反射率を Fig. 4 に示す。  $h = 10 \text{ mm}$  の場合は、枠なし・あり、数値解析共により対応を示している。基準円盤面と拡散体との高低差  $10 \text{ mm}$  程度では側方の散乱の影響が小さいためと考えられる。  $h = 25 \text{ mm}$  の場合では、枠なしの測定値は拡散体の表面以外に側方からの散

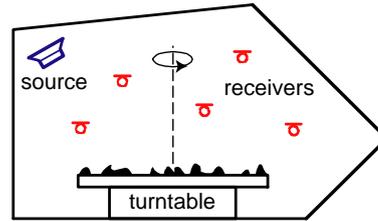


Fig. 2: Sample rotation method in a reverberation room.

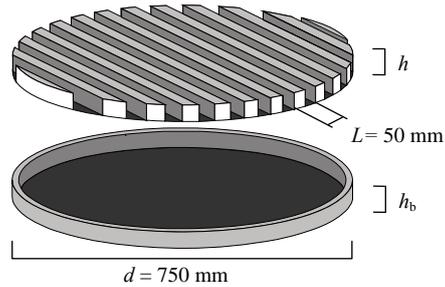


Fig. 3: A way to suppress the edge scattering from the uneven perimeter of a test sample with border setting around the base plate.

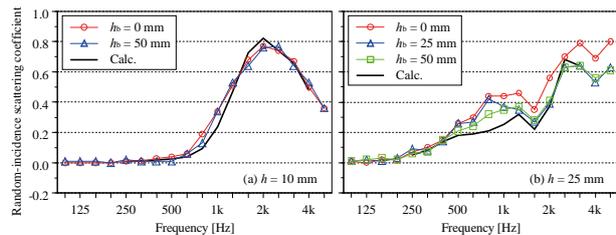


Fig. 4: Random-incidence scattering coefficients measured with changing border heights on the fixed sample heights. Black lines represent the values obtained by numerical analysis.

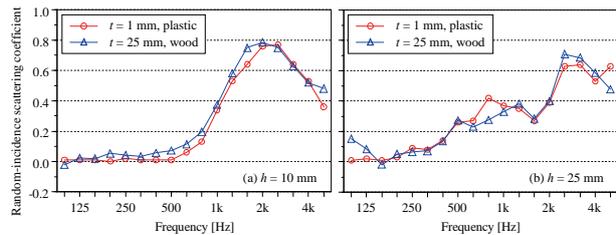


Fig. 5: Random-incidence scattering coefficients measured with changing border thicknesses on the fixed sample heights.

乱成分が含まれるため数値解析と比べて値が大きくなったが、枠ありの測定値は数値解析に近い値を示した。以上より、枠の高さは試料高さ以上に設定する。枠の厚さ 良く対応することから厚さによる影響は少ないと考えられる (Fig. 5)。

**2.2.2 試料の配置による影響** 試料の切り出し位置は測定上殆ど問題にならないことが示唆された。

## 2.3 インパルス応答の測定条件に関する検討

インパルス応答の同期加算方法には、連続的に試料を回転しながら行う方法(連続法)と、各々の回転角度で停止して静止状態で測定する方法(Step法)があるが、その対応関係が明らかにされていない。ここでは、その同期加算方法を理論的に考察した上で、SS(Sine Swept)及びMLS(Maximum Length Sequence)信号を用いた測定を通して、測定方法による影響を検討する。

**2.3.1 理論的考察 Step法** 信号の種類に関わらず、角度ステップ数の下限値が依存し、その値は試料の乱反射率が高いほど、部屋の吸音面積が小さいほど、増加する。連続法 部屋の残響時間に比例する回転周期の下限値が存在し、その値は試料の乱反射率が高いほど、部屋の吸音面積が小さいほど、増加するものの、インパルス応答の切り出し時間に大きく依存する。

**2.3.2 測定概要** 1/4 縮尺模型残響室を用いて連続法における試料回転速度の影響を検討する。測定試料は 25 mm 角の木製リブを配列した周期構造壁面とし、基準円盤に枠(高さ 25 mm)を取り付けた。インパルス応答の測定では、SS 及び MLS 信号長を 6 水準とし、1 回転中の同期加算回数に応じて回転速度を変化させた(Table 1)。なお、逆二乗積分法により残響曲線を求める際の時間窓は 1/3 Oct. band 毎において  $T_1/2 \sim T_1$  ( $T_1$ : 空室の残響時間)の範囲になる最短信号周期で固定し、 $T_{15}(-5 \sim -20 \text{ dB})$ を用いた。

**2.3.3 結果と考察 SS 信号による測定** 信号周期、回転周期、信号数を変化させた場合におけるランダム入射乱反射率の測定結果を Fig. 6 に示す。信号周期を 2.73 秒に固定した場合には、全般に回転周期が 81.9 秒/回転( $N=30$ )より短くなると、値は高音域から低下する傾向が見られる。回転周期を 81.9 秒/回転に固定した場合には、信号周期が 2.73 秒( $N=30$ )より長くなるにつれ、値は高音域から低下する傾向にある。信号数を 30 個に固定した場合には、信号周期と回転周期を変化させたにも関わらず、値は殆ど変化しない。以上より、SS 信号を用いた連続法による測定では乱反射率は信号数に依存し、その傾向は Step 法の角度ステップ数に対応することがわかった。MLS 信号による測定 ランダム入射乱反射率の測定結果を Fig. 7 に示す。信号周期を 2.73 秒に固定した場合には、回転周期が 81.9 秒/回転より短くなると値は高音域から低下する。回転周期を 81.9 秒/回転に固定した場合には、信号周期と信号数を変化させても値の変化は殆ど見られない。信号数を 30 個に固定した場合には、回転周期が 81.9 秒/回転より長くなると値は高音域からやや低下する傾向にある。以上より、MLS 信号を用いる連続法では、乱反射率は回転周期に依存することが示されたが、インパルス応答の切り出し時間に大きく依存することから、SS 信号の方がより実用的であることが考えられる。

Table 1: Conditions of the impulse response measurements in 1/4 scale.

Signal period [s]	Revolution period [s/rev]								
	10.2	20.5	41.0	81.9	164	328	656	1312	2624
0.68	-	-	-	-	10.2	20.5	41.0	81.9	164
1.37	-	-	-	10.9	20.5	41.0	81.9	164	328
<b>2.73</b>	-	-	10.9	21.8	41.0	81.9	164	328	-
5.46	-	10.9	21.8	43.7	81.9	164	328	-	-
10.9	10.9	21.8	43.7	87.4	164	328	-	-	-
21.8	21.8	43.7	87.4	175	328	-	-	-	-
Angular interval [deg]	360	180	90	45	24	12	6	3	1.5
Number of signals	1	2	4	8	15	<b>30</b>	60	120	240

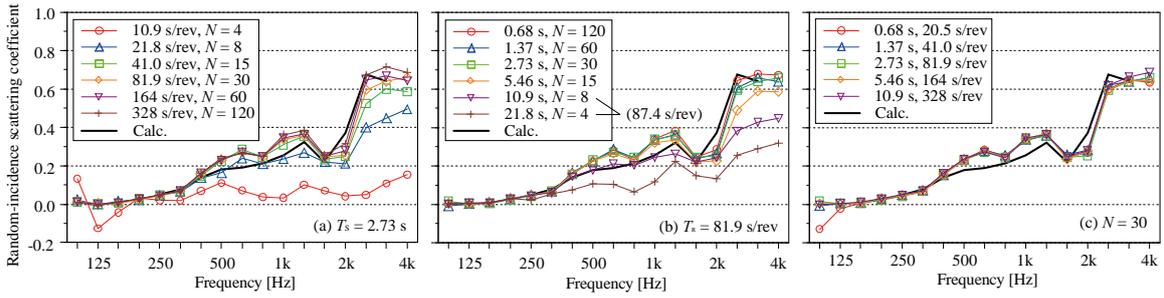


Fig. 6: Random-incidence scattering coefficients of the 1D periodic sample, measured with SS signals in 1/4 scale.

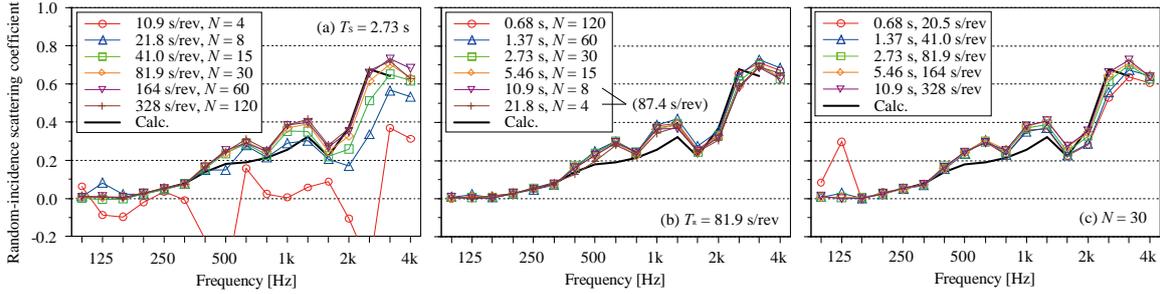


Fig. 7: Random-incidence scattering coefficients of the 1D periodic sample, measured with MLS signals in 1/4 scale.

### 3 各種壁面拡散体のランダム入射乱反射

**特性の測定** 構築したランダム入射乱反射率測定システムを用い、一般的な拡散体であるリブ及びブロック構造の乱反射率特性を明らかにし、拡散壁設計上で有用な知見を得た。角柱リブ構造の乱反射率は、角柱高さが半波長付近の周波数で低下し、そのディップは高さの増加に伴い低音域に移動することがわかった。リブの高さ変動、間隔の拡大・不均等化、背後空気層の挿入は上記ディップを緩和し、周波数特性の平坦化に有効であることが示された。また、円柱・直立板リブ構造の乱反射率は、角柱リブ構造に概ね近似しつつ、高音域に向けて緩やかに増加する傾向が見られた。リブ構造の溝部または背後に吸音材を挿入した場合は、吸音材無しの場合と比較的類似した乱反射率特性を示した。立方体ブロック構造の乱反射率は、低中音域で小さく、高音域のみで大きくなる傾向が見られた。被覆率は25~50%で高音域における乱反射率が最大となり、ブロックの交互配置よりランダム配置の方が中音域で乱反射率が増大し、同被覆率の角柱リブ構造の周波数特性に近づくことが示された。

### 4 垂直入射乱反射率の測定法の構築

建築空間には、反射性の壁面が向き合い、音はその面を繰り返し往復反射することでフラッターエコー等の音響障害が生じることが多い。その際に用いる拡散壁のエコー低減効果の検討等では、垂直入射乱反射率が有用となることから、その測定法が望まれる。ここでは、矩形室において1次元音場の卓越する条件を設定し、試料設置による残響時間の変化から垂直入射乱反射率を測定する方法を構築し、縮尺模型実験により測定法の妥当性に関する検討を行う。

**4.1 測定理論** 矩形室の四周壁面を吸音性、天井・床面を反射性とし、1次元音場が卓越する条件を作る (Fig. 8)。床面全面に試料を設置するものとし、試料設置前後の残響時間  $T_{1,0}$ ,  $T_{1,1}$  を計測する。鉛直方向の1次元音場を仮定すると次式が導かれる。

$$T_{1,0} = \frac{13.8L_z}{c\{-\ln(1-\alpha_0)\}} \quad (2)$$

$$T_{1,1} = \frac{13.8L_z}{c\{-\ln\sqrt{(1-\alpha_0)(1-\alpha_n)(1-s_n)}\}} \quad (3)$$

但し、 $L_z$ : 鉛直方向の寸法、 $c$ : 音速、 $\alpha_n$ ,  $s_n$ : 試料

面の垂直入射吸音率・乱反射率,  $\alpha_0$ :天井・床面の垂直入射吸音率. 従って, 試料面の垂直入射乱反射率は次式で算出される.

$$s_n = 1 - \frac{1 - \alpha_0}{1 - \alpha_n} \exp\left\{\frac{27.6L_z}{c} \left(\frac{1}{T_{1,0}} - \frac{1}{T_{1,1}}\right)\right\} \quad (4)$$

**4.2 受音点位置の影響に関する検討** インパルス応答の測定結果に大きな影響を及ぼす受音点位置の設定は, 本測定法における重要な設定項目である. ここでは, 音源点 2 箇所, 受音点 5 箇所を設け, 設置位置による影響程度について検討した. その結果, 受音点毎のエネルギーレベル差は見られるものの, 周波数によらず減衰率は概ね同程度になることから, 受音点位置による影響は小さいことが確認された.

#### 4.3 試料設置方向の影響に関する検討

**測定概要** 測定はアクリル板材からなる 1/4 縮尺模型矩形室において行った (Fig. 8). 周壁に使用した吸音材は厚さ 150 mm, 密度 25 kg/m<sup>3</sup> のウレタンフォームである. 測定試料は 25 mm 角の木製リブを配列した周期構造壁面で, 設置方向を 2 方向 (Rib A, Rib B) とした.

**結果と考察** 残響曲線の性状 初期の減衰曲線は非常に折れ曲がるが, 後期に推移するに従い直線的な曲線となる (Fig. 9). 垂直入射乱反射率の同定 試料設置前後において, 10, 20, 30 dB 間隔で同定した残響時間から算出した垂直入射乱反射率の測定値は計算値と比べピーク・ディップの位置が非常に良く対応し, また後期から同定した値は計算値に近似している (Fig. 10). 時間が経過するに従い鉛直方向への反射成分が残り, より 1 次元音場が卓越する条件になるためと考えられる. 設置方向による影響は小さいが, 2.5kHz で最大 0.2 の乖離が見られる. 長い床面に対し平行方向に設置した Rib A では, 鉛直方向以外の反射成分が Rib B に比べてより広い吸音面に到達することに起因すると考えられる.

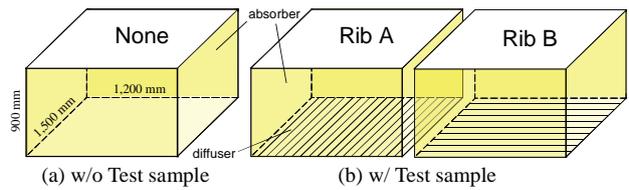


Fig. 8: Illustration of the rectangular room in 1/4 scale model.

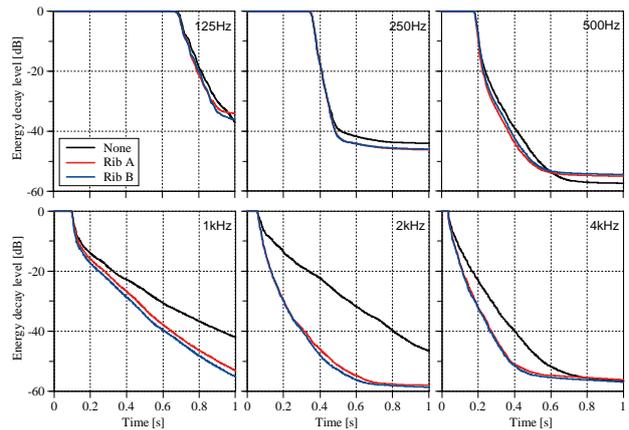


Fig. 9: Average energy decay curves with and without the test sample in 1/3 octave bands. The test samples of Rib A and B are arranged in two ways as Fig. 8(b).

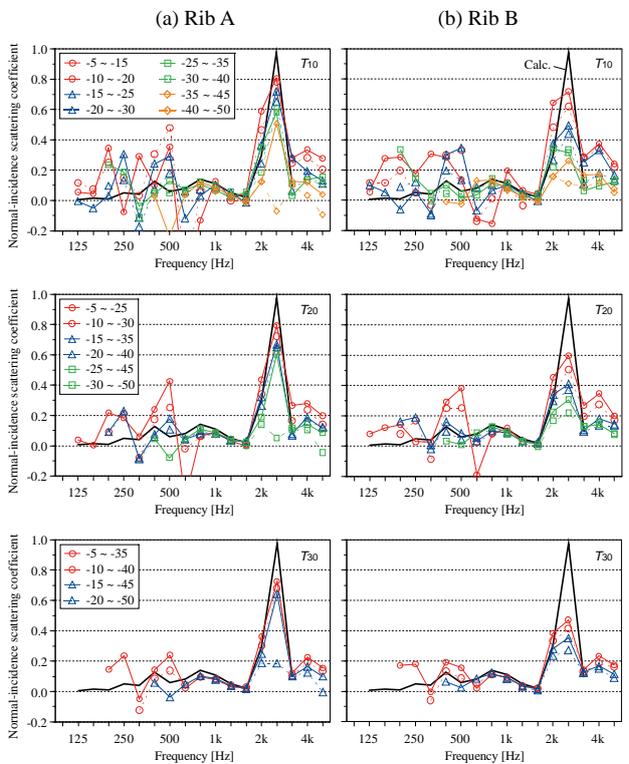


Fig. 10: Normal-incidence scattering coefficients estimated from the reverberation times in different decay level ranges for Rib A and Rib B. Black lines represent the values obtained by numerical analysis.

## 5 周期構造壁面の乱反射率特性の数値解析

典型的な拡散壁面仕上げである周期構造壁を対象として取り上げ、その断面形状が乱反射率に及ぼす影響を数値解析により調べるとともに、測定法との対応関係を検討する。

**5.1 数値解析方法** 自由音場中の散乱指向特性から乱反射率を算出する方法(指向相関法)として、Mommertz<sup>[2]</sup>は次式を提案している。

$$s(\theta', \varphi') = 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^N p_i \cdot \hat{p}_i^* \right|^2}{\sum_{i=1}^N |p_i|^2 \cdot \sum_{i=1}^N |\hat{p}_i|^2} \quad (5)$$

但し、 $p_i$ : 試料設置時の各方向における複素反射音圧、 $\hat{p}_i$ : 試料と同サイズの剛平板設置時の各方向における複素反射音圧、 $N$ : 総反射方向数。試料と同サイズの基準平板の反射特性を鏡面反射成分とみなし、試料設置時の指向特性との相関を取ることにより乱反射率を算出する。

**5.2 解析対象** 正方形(1辺 3 m)を採用し、凹凸形状が正弦波(Type S)・三角波(Type T)・矩形波(Type R)となる 3 タイプの周期構造壁面を解析対象とする。ここで、全ての壁面は音響的に完全反射性として、試料厚さ 0 を仮定する。

**5.3 結果と考察** 凹凸形状 矩形波型壁は高音域において顕著なピーク・ディップが生じるのに対して、正弦波型壁・三角波型壁は比較的穏やかな周波数特性を有するため、拡散壁としての性能としてはより優れているものと考えられる(Fig. 11)。凹凸高さ 周期構造壁面の拡散性能を最大化するためには、ランダム入射時においては、正弦波型壁、三角波型壁及び矩形波型壁で周期に比べそれぞれ 30, 40, 20% 程度の高さとし、垂直入射時においては、それぞれ 20, 25, 15% 程度の高さに設定することが望ましいことが確認された(Fig. 12)。凹凸幅 高さによらずランダム及び垂直入射時と共に周期に比べ 50% の幅で拡散効果が最大になることが示された(Fig. 13)。

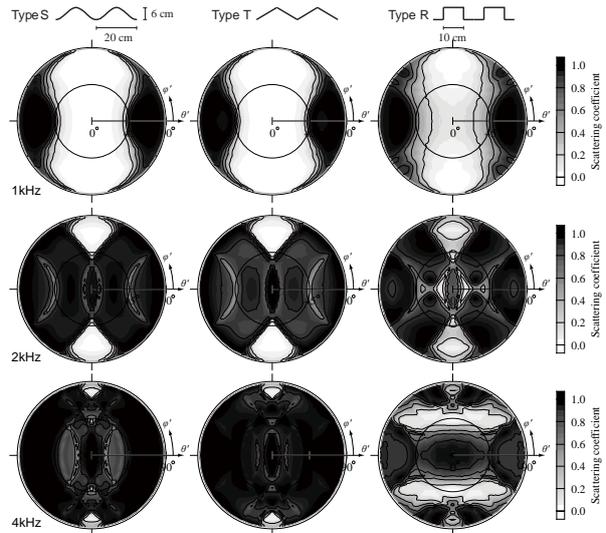


Fig. 11: Distribution of directional scattering coefficients calculated for Types S, T and R.  $\theta'$  and  $\varphi'$  are incidence angles.

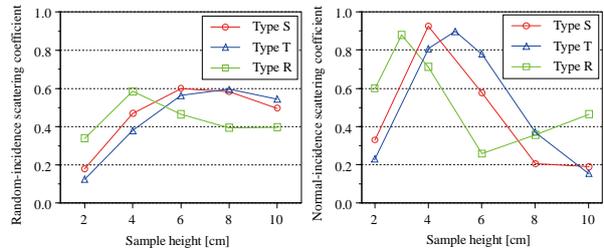


Fig. 12: Averaged random and normal-incidence scattering coefficients calculated for Types S, T and R ( $w = 10$  cm) with changing the heights.

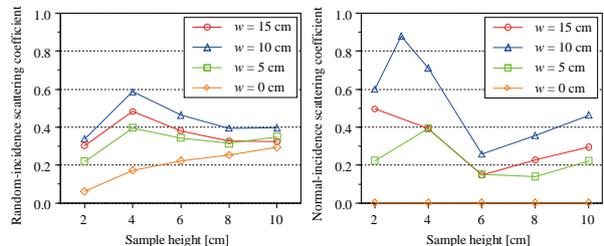


Fig. 13: Averaged random and normal-incidence scattering coefficients calculated for Type R with changing the widths.

**6 総括** 壁面音響乱反射率の汎用的な定量化手法を構築し、適切な設定条件を導くと共に、各種壁面拡散体の乱反射率特性を把握した。今後の課題としては、垂直入射乱反射率測定法に関する検討、測定値と計算値の詳細な比較・検討、幾何音響シミュレーションへの適用に関する検討などが挙げられる。

**参考文献** [1] M. Vorländer *et al.*, *Appl. Acoust.*, **60**, 187–199, 2000. [2] E. Mommertz, *Appl. Acoust.*, **60**, 201–203, 2000. [3] ISO 17497-1: 2004. [4] Y. Kosaka *et al.*, *Acoust. Sci. Tech.*, **26**, 136–144, 2005.