

模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定法の構築

Development of Reverberation Chamber Method for Measuring the Scattering Coefficient

学籍番号 076956
氏名 李孝振 (Lee, Hyojin)
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

1 はじめに

室内音場の解析手法の一つである幾何音響シミュレーションは、音の波動性を考慮しないため厳密性に欠ける反面、計算機資源や計算時間の観点から大規模な空間を扱う際の現実的な手法として設計実務に広く用いられている。従来幾何音響シミュレーションでは壁面の音響特性として吸音率のみを設計パラメータとしていたが、近年では鏡面反射と乱反射を区別して後者のエネルギーの割合を乱反射率(Fig. 1)と定義し、その数値を反映させることにより壁面の拡散性の影響も検討可能となっている。

乱反射率の測定法として提案されている残響室法は、現在試行段階にとどまっている自由音場法に比べ、乱反射率が統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、ISO17497-1にも規格化されている[1]。測定には実物大によるものと縮尺模型によるものが考えられるが、前者は測定装置が大掛かりとなるのが難点である。一方後者は、反射性が前提となる試料では縮尺に起因する吸音特性の違いを再現する必要がないこともあり比較的普及しているといえる。しかしながら、縮尺模型による測定を行うに当たっては未だ不明な点が多い。

そこで本研究では、模型残響室を用いたランダム入射乱反射率の測定法の構築を目指し、ケーススタディにより測定試料適用条件の把握や測定システムにおける誤差要因等、測定法の適用条件を明らかにするための様々な知見を得ることを目的とする。

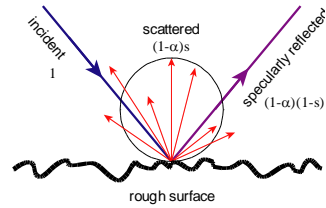


Fig. 1 Scattering on rough surface.

2 乱反射率の測定法について

2.1 乱反射率の定義

乱反射率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定義され、Eq. (1)により表される[1]。

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

ここで、 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を吸音成分と見なした場合の見かけの吸音率である。ランダム入射乱反射率は、統計入射平均値として定義される。

2.2 乱反射率の測定法

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乱反射率を求める。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 α よりも大きい見かけの吸音率 α_{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。測定においてはインパルス応答の同期加算回数、回転速度などを適切に定める必要がある他、円盤の側面からの回折波の影響にも十分注意する必要がある。

3 測定環境に関する基礎的検討

ここでは、基本的な測定をするのに当たっての基礎的な設定項目について検討する。

3.1 測定概要

測定はFig. 2の縮尺模型残響室を用いて行った。模型残響室は10 mm 厚のアクリル板からなる直方体室であり、室内の拡散性を高めるため、曲面状の拡散板10枚を吊り下げて設置した。縮尺については比較検討のため1/4・1/5の2条件を設定した。台盤として木製円盤をターンテーブルに固定し、その上面に木製半球32個を等間隔に配置して拡散体試料(Fig. 3)とした。半球の寸法と配列は各縮尺で相似則を保っている。試料回転中のインパルス応答測定に関しては、同期加算条件の影響を検討するため、Table 1の条件を設定した。ここでM系列の信号長(測定間隔)を2水準とし、試料回転数を1~4回とした。ただし、ターンテーブルの回転速度は1回転80秒に固定されている。残響時間は T_{20} を用いた。

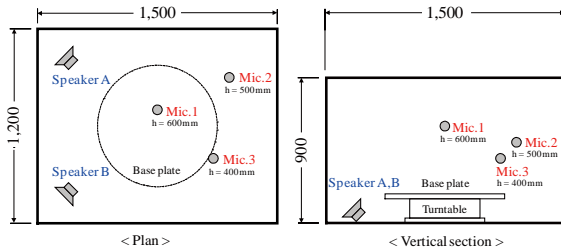


Fig. 2 The specifications of the reverberation room (unit: mm).

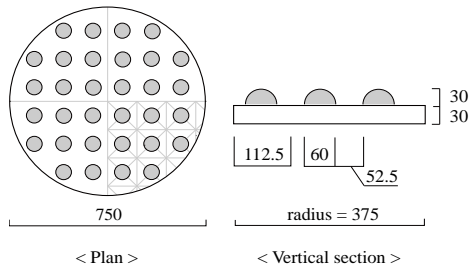


Fig. 3 Test sample (hemisphere, scale 1/4, unit: mm).

Table 1 Conditions of IR measurement.

Averages num.	Signal length(angle)	Revolution num.
117	0.68 s (3.07 deg)	approx. 1 (0.998)
59	1.37 s (6.14 deg)	approx. 1 (1.007)
117	1.37 s (6.14 deg)	approx. 2 (1.997)
176	1.37 s (6.14 deg)	approx. 3 (3.003)
234	1.37 s (6.14 deg)	approx. 4 (3.994)

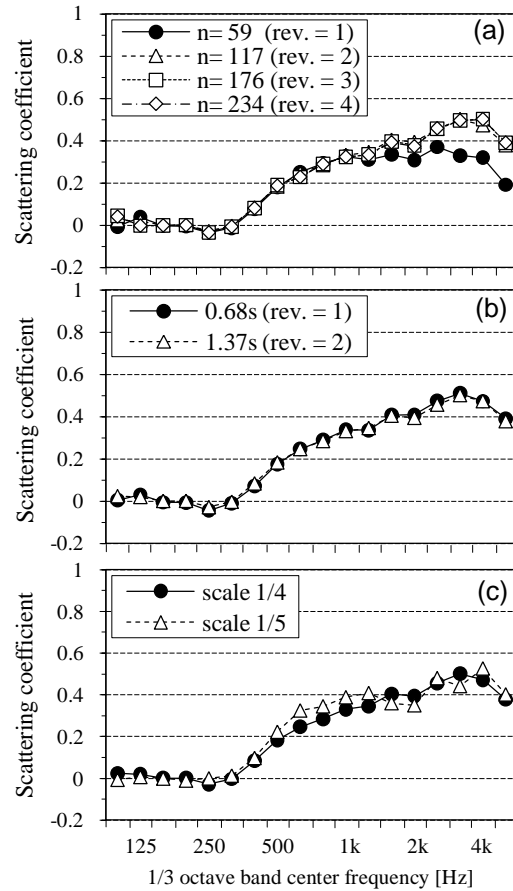


Fig. 4 Scattering coefficients measured in different setups (n = averages number, rev = revolution)

3.2 結果と考察

同期加算回数の影響 縮尺1/4・測定間隔1.37秒において同期加算回数を変化させた場合の乱反射率測定結果をFig. 4(a)に示す(以降、周波数は実物換算)。2回転以上の場合では値がほぼ一致したが、1回転では中音域まで一致するものの高音域では小さくなっている。測定間隔に対応する角度がISOの規定する回転角度の離散化幅3~6度を若干上回っていることが影響した可能性がある。

測定間隔の影響 縮尺1/4・同期加算回数117回において測定間隔を変化させた場合の結果をFig. 4(b)に示す。両者の値はほぼ一致し、1回転の場合でも測定間隔が回転角度の離散化幅の範囲内であれば影響はないものと考えられる。

縮尺の影響 測定間隔 1.37 秒・同期加算回数117回における縮尺 1/4 および 1/5 の乱反射率測定結果を Fig. 4(c)に示す。中音域で若干の乖離は生じているものの、全体的に両者は概ね良

い対応を見せている。乖離の原因としては、室内音場の拡散性、壁面吸音や空気吸収の周波数特性などが考えられる。なお、今回の模型残響室では、縮尺 1/4 と 1/5 の実物換算で室容積は 103.6m^3 、 202.5m^3 、壁から台盤までの距離は 0.9m と 1.5m に相当し、縮尺 1/4 では ISO の規格外となる。ただし、空気吸収による高音域での測定精度の劣化は縮尺 1/4 の方が小さい。

4 試料適用条件に関する検討

1 次元周期構造等を円形に切り取った場合に側面に拡散形状が露出される拡散体では、側面の影響により乱反射率が過大に測定される可能性がある。そこで、拡散体を設置する基準円盤に枠を取り付けた場合の乱反射率の測定を行い、枠の高さの影響および数値解析[2]との対応を検討する。

4.1 測定概要

測定は 1/4 縮尺で行う。使用試料である矩形 1 次元周期構造(高さ 2 水準)を Fig. 5 に示す。材料はタモ集成材ウレタンクリア塗装である。

4.2 結果と考察

枠の高さによる影響 Type B における枠の高さ (Fig. 6) を変化させた場合の乱反射率測定結果を Fig. 7(a) に示す。枠ありの場合は、枠なしに比べ乱反射率の値が低下しているものの、試料の高さより高ければ、枠の高さに依らず全周波数帯域に渡ってほぼ一致した。ISO[1]の試料高さの規定値は $d/16 = 47.5\text{ [mm]}$ であるので、この値程度としておけば、試料高さに依らず、汎用的な設定と言える。よって、枠の高さを 50mm に設定する。

数値解析との対応 Type A, B の基準円盤枠なし・ありによる実測と数値解析(枠なし)[2]の乱反射率を Fig. 7(b), (c) に示す。 $h = 10\text{ [mm]}$ の Type A では、枠なし・あり、数値解析共により対応を示している。 $h = 25\text{ [mm]}$ の Type B では、枠なしの測定値が数値解析と比べて 500 Hz 以上で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。1 次元周期構造拡散体の基準円盤枠なしの値が枠ありの値より大きくなる理由は、拡散体の表面以外に側面からの音の

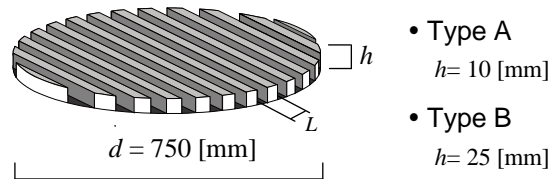


Fig. 5 1D rectangular shape, 15 periods ($L = 50\text{ [mm]}$).



Fig. 6 Base plate with rigid border (h_b : height of border).

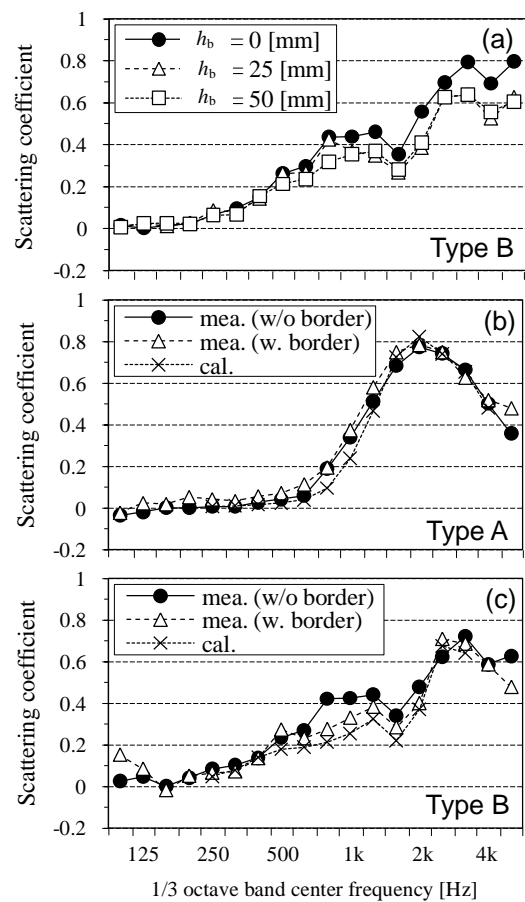


Fig. 7 Scattering coefficients measured in different setups.

散乱成分が乱反射率の測定値に含まれるためと考えられる。また、数値解析(枠なし)と測定値(枠なし)が乖離するのは、両方で乱反射率の算出法や測定試料の厚さが異なることが考えられる。Type A の枠なし・ありで乱反射率の差が小さい理由は、基準円盤面と拡散体との高低差 10 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。

5 インパルス応答測定に関する検討

前述のとおり、残響室法は、試料を回転させながら測定した多数のインパルス応答を同期加算することにより鏡面反射成分を抽出する方法であるが、試料回転速度の制限については不明な部分が残っている。ここでは、1/4 縮尺模型を用いた乱反射率測定において、インパルス応答測定用の M 系列信号長、試料回転速度および間隔の影響を検討する。

5.1 測定概要

M 系列信号長を 4 水準とし、1 回転中の同期加算回数に応じて試料回転速度を変化させた (Table 2)。なお、測定試料は Fig. 3 に示し、残響時間は T_{15} を用いた。

5.2 結果と考察

検討 A (信号長固定) 信号長 1.37 秒において、回転速度を変化させた場合の乱反射率の測定結果を Fig. 8(a) に示す。全般に回転速度が遅くなるにつれて、乱反射率の測定値が高周波数域から低下する傾向が見られる。

検討 B (回転速度固定) 回転速度 82 秒/回転において、信号長を変化させた場合の乱反射率の測定結果を Fig. 8(b) に示す。信号長を長くすると、検討 A と同様、乱反射率の測定値が高周波数域から低下している。信号長が長い程、回転速度を遅く設定する必要がある。

検討 C (測定間隔固定) 測定間隔 (回転角度) 6 度において信号長および回転速度を変化させた場合の乱反射率の測定結果を Fig. 8(c) に示す。全て良く一致しており、測定値は測定間隔にのみ依存することがわかる。ただし、6 度の場合、3 度と比べて 4kHz のみ若干の低下が生じている。

6 まとめ

本研究により、1次元周期構造等を円形に切り取った場合に側方に拡散形状が露出される拡散体では、側方の散乱の影響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

Table 2 Conditions of IR measurement (rev= 1).

Signal length [s]	Revolution speed [s/rev]				
	-	-	41	82	-
0.68	-	-	41	82	-
1.37	20.5	41	82	164	328
2.73	-	82	164	-	-
5.46	82	-	328	-	-
Angular step [deg]	24	12	6	3	1.5
Averaging number	15	30	60	120	240

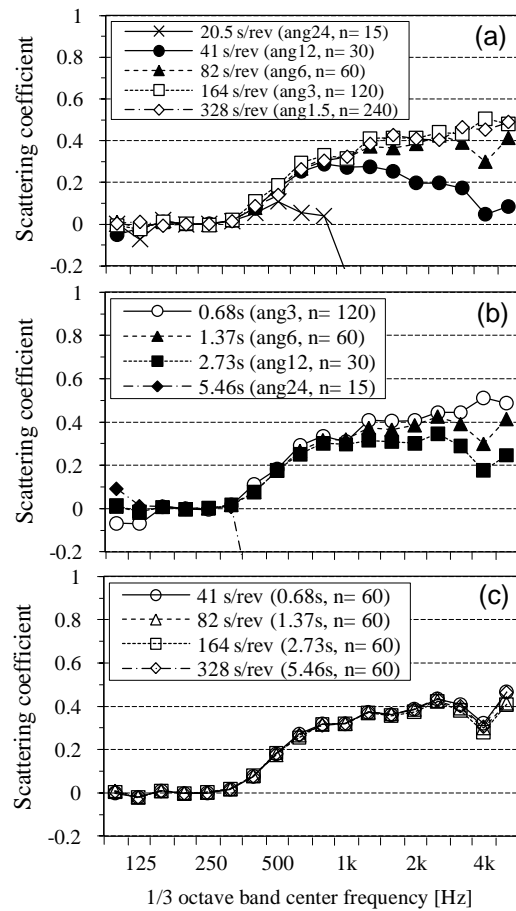


Fig. 8 Scattering coefficients measured in different setups. (n= averages number, rev= revolution)

ることで抑制できることが示された。また、試料回転中にM系列信号を用いてインパルス応答測定を行う場合、信号長は残響時間が同定できる範囲で短く設定した上で、試料回転速度は測定間隔が3~6度以下になるように設定する必要があることが確認された。

参考文献 [1]ISO 17497-1:2004: Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces, Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room. [2] 佐久間: 1.3 壁面形状の拡散性解析, 音響技術 No.137, pp.14-19, 2007.